Uloga plazma aktuatora u kontroli graničnog sloja

Stepanić, Ivica

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:430495

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Ivica Stepanić

ULOGA PLAZMA AKTUATORA U KONTROLI GRANIČNOG SLOJA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ULOGA PLAZMA AKTUATORA U KONTROLI GRANIČNOG SLOJA

ROLE OF PLASMA ACTUATORS IN CONTROL OF BOUNDARY LAYER

Mentor: doc. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Ivica Stepanić

JMBAG: 0246030931

Zagreb, 2016.

ULOGA PLAZMA AKTUATORA U KONTROLI GRANIČNOG SLOJA

SAŽETAK

Viskoznost fluida očituje se u vremenu potrebnom da se fluid izlije iz jedne posude u drugu. Zrak koji pri velikim brzinama opstrujava oko predmeta pokazuje svojstva viskoznosti. Granični sloj tanki je dio struje fluida uz neko tijelo u kojem su moguća dva režima strujanja: turbulentno i laminarno. Plazma aktuatori su uređaji koji aktualizacijom plazme, tj. negativnim nabijanjem zraka, mogu utjecati na strujanje fluida unutar graničnog sloja što za posljedicu ima djelovanje na fundamentalne sile prisutne kod strujanja fluida oko aeroprofila. Dielektrična su svojstva različita za pojedine kompozitne materijale korištene u svrhu zadržavanja naboja. Plazma aktuatori imaju široku primjenu u aerodinamici čija se zasluga temelji na brojnim prednostima električnih sklopova bez pomičnih djelova u odnosu na mehaničke.

KLJUČNE RIJEČI: viskoznost, granični sloj, dielektrik, aktualizacija plazme

SUMMARY

Viscosity of fluids is a measurement that represents the time necesary for one fluid to be poured from one container into another. Air flowing around an object at high velocities displays the characteristics of viscosity. Boundary layer is a narrow layer of flow right above the surface of the body in which there are two regimes of flow possible: laminar and turbulent. Plasma actuators are devices that by ignition of plasma (negative charged air molecules) affect the flow inside the boundary layer which in turn has an effect on the fundamental forces that appear in the presence of mentioned flow. Dielectric properties differ in compozite materials used for retaining charge. Plasma actuators have a wide-spread usage in aerodinamics which is due to their many advantages of fully electric systems without any moving parts compared to mechanical ones.

KEYWORDS: viscosity, boundary layer, dielectric, plasma actualisation

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. DEFINIRANJE GRANIČNOG SLOJA 3

2.1. Osobine fluida 3

2.1.1. Definicija fluida 3

2.1.2. Kontinuitet fluida 4

2.1.3. Tlak fluida 4

2.1.4. Viskoznost fluida 4

2.2. Reynoldsov broj 5

2.3. Strujanje fluida 6

2.3.1. Laminarno strujanje 6

2.3.2. Turbulentno strujanje 7

2.4. Granični sloj 8

2.4.1. Definicija graničnog sloja 8

2.4.2. Schlichting-ova teorija transformacije laminarnog graničnog sloja u turbulentni 9

2.4.3. Odvajanje graničnog sloja 11

3. VRSTE PLAZMA AKTUATORA 13

3.1. Plazma aktuator sa zakrivljenom niti 13

3.2. Plazma aktuator sa sintetičkim mlazom 14

3.3. Plazma aktuator pojedinačnog izboja na izolator 16

4. PRINCIP RADA PLAZMA AKTUATORA 18

5. KAKVOĆA DIELEKTRIČNIH MATERIJALA KORIŠTENIH U PLAZMA AKTUATORIMA 22

5.1. Akril 22

5.2. Staklo 23
6. UPRAVLJANJE GRANIČNIM SLOJEM PLAZMA AKTUATORIMA 24
6.1. Aktivno upravljanje graničnim slojem 24
6.2. Električni vjetar 25
6.3. Uloga plazma aktuatora u aktivnoj kontroli 26
7. ZAKLJUČAK 30
LITERATURA 31
POPIS KRATICA 34
POPIS SLIKA 35

1. UVOD

Aktualizacijom plazme smatra se postupak negativnog nabijanja molekula zraka. To se vrši dodavanjem slobodnih elektrona u okruženje bogato zrakom. Plazma aktuatori su uređaji koji imaju sposobnost izbaciti negativno nabijene čestice, elektrone u slobodni prostor na kratko vrijeme. Te se čestice tada, na trenutak, vežu na molekule zraka stvarajući plazmu. U ovom radu bit će nastojano sažeti rezultate eksperimentalnih istraživanja, kao i do sada dostupne teorije o ponašanju plazme u uvjetima vrijednosti Reynoldsova broja manjim od 10^7, utjecaja izboja plazme na strujanje unutar graničnog sloja, objasnit će se pojava električnog vjetra koja je prisutna kod aktualizacije plazme, te će se navesti vrste plazma aktuatora, njihova trenutna kao i buduća primjena.

Materija rada je podijeljena na slijedeći način:

1. Uvod
2. Definiranje graničnog sloja
3. Vrste plazma aktuatora
4. Princip rada plazma aktuatora
5. Kakvoća dielektričnih materijala korištenih u plazma aktuatorima
6. Upravljanje graničnim slojem plazma aktuatorima
7. Zaključak

U uvodnom dijelu predstavljen je predmet istraživanja, definirani su svrha i cilj istraživanja te je predočena struktura rada.

U drugoj je cjelini pobliže objašnjen pojam graničnog sloja. Definirani su parametri strujanja fluida koji su od utjecaja za rezultate obrađene u ovom radu. Razumijevanje fizikalnih svojstava isprepletenih sa molekularnim karakteristikama fluida u strujanju ključno je za korištenje postojećih modela koji služe za pobliže opisivanje kretanja čestica, kao i njihovog međudjelovanja. Reynoldsov je broj, kao veličina kojom se opisuje viskoznost fluida, također je definiran u ovom poglavlju.

Treća cjelina ovog rada koncipirana je u tri poddijela, od kojih svaki kratko opisuje rad i, što je bitnije, razlike vrsta trenutno najčešće primjenjivanih aktuatora u dosadašnjim eksperimentima. Radi se o principijelno istom postupku, no mijenjanjem raznih parametara postižu se sasvim različiti rezultati. Istaknute su prednosti pojedinih konfiguracija, kao i kratak pregled mehanizama.

Vrste plazma aktuatora koje su opisane trećom cjelinom polučuju gotovo iste rezultate, no sam proces aktualizacije je kod različitih tipova aktuatora vrlo različit što se može vidjeti u četvrtom dijelu rada. U ovoj cjelini i nadalje, plazma aktuatorima se smatra isključivo vrsta koja se, zbog svoje jednostavne primjene, jeftine izrade i velike fleksibilnosti prilikom primjene, koristi u većini postojećih konfiguracija u spominjanim okolnostima.

Peta cjelina rada navodi vrste materijala korištenih u svrhu izolatora. Obje navedene vrste posjeduju određene prednosti u međusobnom ogledu, te se izmjenično koriste uzimajući u obzir narav konfiguracije u kojoj se nalaze. Zbog izrazito velikog broja kompozitnih materijala dielektričnih svojstava, u ovom radu detaljno su obrađena samo dva najčešće korištena.

U šestom poglavlju analizira specifični utjecaj plazma aktuatora na strujanje graničnog sloja. Tako je drugo i šesto poglavlje u uskoj vezi, prvo opisujući stanja graničnog sloja, a šesto uzroke tih stanja, moguće promjene i vrste utjecaja. U jednom poddijelu, opisana je mogućnost inovativne primjene ranije opisanih načela kontrole graničnog sloja u svrhu upravljanja svemirskim letjelicama u orbiti drugih planeta.

U sedmom zaključnom poglavlju, dani su konkretni zaključci istraživanja predmetne materije prema naprijed nabrojanim poglavljima.

2. DEFINIRANJE GRANIČNOG SLOJA

2.1. Osobine fluida

2.1.1. Definicija fluida

Fluidom se naziva materija koja se u promatranom procesu pojavljuje kao tekućina ili plin. Prema molekularnoj teoriji, manifestacija nabrojenih stanja je posljedica pokretljivosti, međusobne udaljenosti molekula i djelovanja međumolekularnih sila. Fluid u plinovitom i tekućem stanju ima znatno pokretljivije molekule koje se nalaze na srednjim udaljenostima obzirom na udaljenosti molekula čvrstih tijela. Molekule plina nalaze se na znatno većoj udaljenosti nego kod molekula tekućina. To svojstvo omogućuje molekulama plina da se lakše komprimiraju i ekspandiraju u slučaju djelovanja sila tlaka. Teži li vanjski tlak nuli, plin teži beskonačno velikom volumenu. Fluid je materija koja se neprestano (kontinuirano) deformira pod djelovanjem tangencijalnih naprezanja.[1]

Stanje fluida pri strujanju ili mirovanju izražava se osobinama ili veličinama stanja. Neke osnovne osobine fluida su:

- tlak,
- temperatura,
- gustoća,
- viskoznost,
- kapilarnost,
- stlačivost,
- specifična toplina,
- toplinska provodljivost, itd.

Za potrebe ovog rada govorit će se o fizikalnim svojstvima fluida. Kinematička su svojstva fluida:

- brzina,
- ubrzanje,
- vrtložnost i dr.

Posebno stanje plina poznato kao plazma ima osobine različite od običnog plina. Plazma se sastoji od ioniziranih atoma, tj. atoma koji su izgubili jedan ili više elektrona i tako postale

[1] Kesić P.: Osnove aerodinamike, Sveučilište u Zagrebu, 2003., str. 10 - 14

pozitivno nabijene čestice. Otpušteni elektroni, koji imaju negativan naboj, lutaju slobodno u prostoru ispunjenim plinom.

2.1.2. Kontinuitet fluida

Kontinuitet je kao pojam preuzet iz matematike, sa značenjem neprekidnosti. Tako je npr. sustav realnih brojeva neprekidan, zato što između dva različita realna broja uvijek postoji neki realni broj, pa postoji beskonačno mnogo realnih brojeva između dva spomenuta broja. Pojam kontinuiranog fluida označava da se osobine fluida mijenjaju kontinuirano od točke do točke unutar fluidne mase, kao i od trenutka do trenutka. [2]

2.1.3. Tlak fluida

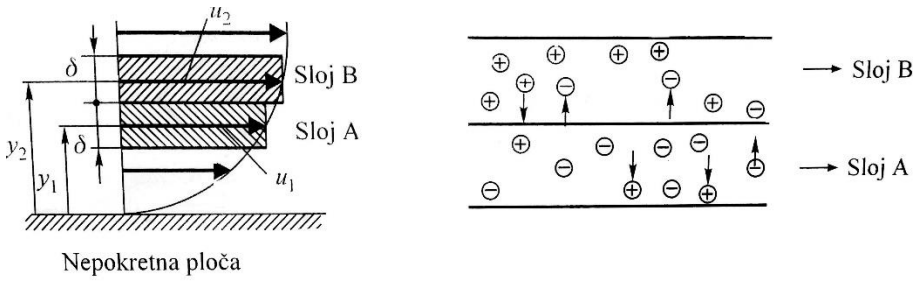
Fluid je uvijek izložen utjecaju tlaka. Promatrano mikroskopski, tlak je posljedica sudara molekula. Fluidi mogu biti izloženi vrlo velikim tlakovima, ali ne mogu izdržati veće sile istezanja. Tlak se mjeri u odnosu na referentne vrijednosti. To je posljedica činjenice kako mjerni instrumenti zaista mjere isključivo referentne vrijednosti tlaka. Kada se tlak izražava u odnosu na potpuni vakuum, gdje nema molekula, a time ni tlaka, govori se o apsolutnom tlaku. Uobičajena referentna vrijednost je tlak zraka na nula metara nadmorske visine koji iznosi 1.013 bara, a odgovara stupcu žive od 760 mm. Apsolutni tlak koji je manji od referentne vrijednosti i daje negativne vrijednosti relativnog tlaka, naziva se vakuum. Veličina vakuuma može se izraziti visinom stupca žive.

2.1.4. Viskoznost fluida

Viskoznost je osobina koja ima iznimno važan utjecaj na strujanje fluida, a promatra se kao otpor kojim se fluid suprotstavlja strujanju. Ako sile koje djeluju na čestice fluida, obično prikazivane kao sile shematski raspoređene u slojeve duž pravca gibanja fluida, prestanu djelovati, čestice fluida se zaustavljaju ne pokazavši nikakvu tendenciju vraćanja u prvobitno stanje. Takva se pojava, taj kočioni efekt, pripisuje viskoznosti fluida, odnosno tendenciji pojedinih fluida da se gibaju različitim brzinama. Osobinu viskoznosti demonstriraju svi fluidi, u većoj ili manjoj mjeri.

Mjera viskoznosti jest vrijeme potrebno da se fluid pretoči iz jedne posude u drugu. Što je više vremena potrebno za pretakanje fluida, to je viskozniji.

[2] Ibid.



Slika 1: Raspored brzina u fluidu [12]

Na slici 1 prikazan je raspored brzina u fluidu koji struji iznad ploče. Tu se zamišljeni sloj A debljine δ na razmaku y_1 giba translatornom brzinom u_1, a sloj B iste debljine na visini y_2 giba se većom translatornom btzinom u_2. Uslijed gibanja fluida po glatkoj površini molekule manje brzine u_1 prelaze iz sloja A u sloj B, a molekule iz sloja B sa većom brzinom prelaze u sloj A. Ukupno promatrano, sloj B se giba većom brzinom od sloja A zato što je dalji od nepokretne ploče gdje fluidne molekule imaju nultu translatornu brzinu. Zato što brzina termalnog gibanja raste s temperaturom, proizlazi da s povećanjem temperature raste i utjecaj viskoznosti kod plinova. Na viskoznost plinova u maloj mjeri utječe tlak. Dinamički koeficijent viskoznosti zraka za temperature niže od 3.000 K ne ovisi o tlaku. Reynoldsov broj predstavlja količnik inercijalnih i viskoznih sila. Kod strujanja oko aeroprofila njegova vrijednost je velika, reda 10^6 što pokazuje da su inercijalne sile dominantne, a djelovanje viskoznih sila svedeno na tanki sloj fluida koji se naziva granični sloj.

2.2. Reynoldsov broj

Pri manjim brzinama realni flulid struji laminarno, tj. u slojevima (lat. Lamina = sloj). Svaki sloj tekućine ima svoju brzinu koje se obično razlikuju. Ako brzina fluida postane veća od neke kritične brzine v_k, strujanje, iz laminarnog prelazi u turbulentno. Pri tom nataje miješanje slojeva fluida, čestice prelaze iz jednog sloja u drugi, i nastaju vrtlozi. Kritična brzina pri kojoj laminarno strujanje prelazi u turbulentno ovisi o viskoznosti i gustoći fluida te o obliku cijevi kroz koju fluid struji, odnosno o obliku tijela što se giba kroz fluid. Hoće li fluid teći laminarno ili turbulentno, može se odrediti pomoću bezdimenzionalnog parametra koji se zove Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{v\,\varrho\,l}{\eta} \quad \text{.....(1)}$$

gdje je ϱ gustoća fluida, l karakteristična duljina, η koeficijent dinamičke viskoznosti, v brzina strujanja fluida (odnosno brzina tijela koje se giba kroz fluid). Reynoldsov broj ovisi i o obliku cijevi, odnosno tijela, a ta ovisnost se određuje karakterističnom dužinom l, koja je, npr., za

cijev kružnog presjeka jednaka promjeru, za kvadratni presjek jednaka duljini stranica kvadrata, za kuglu polumjeru ili promjeru kugle i sl. Protjecanje fluida je laminarno ako je Reynoldsov broj manji od kritičnog $Re_{x,kr}$, dok je za Re > $Re_{x,kr}$ protjecanje turbulentno. Za strujanje preko ravne ploče $Re_{x,kr}$ je oko 4 x 10^5, a za krila zrakoplova $Re_{x,kr}$ je oko 5 x 10^6.[3]

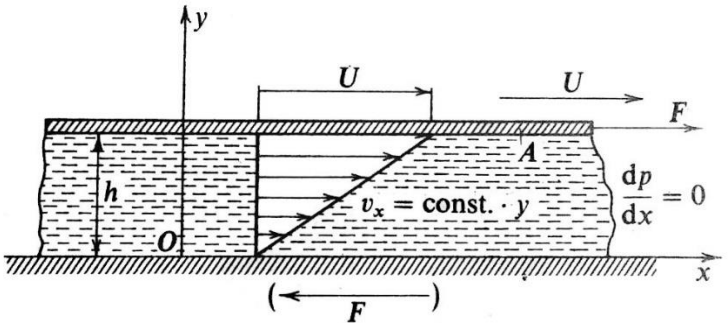
2.3. Strujanje fluida

2.3.1. Laminarno strujanje

Laminarno je strujanje dominantno u sloju bližem površini glatkog aeroprofila po kom struji fluid. Karakteristike laminarnog strujanja očituju se u paralelnom smjeru strujnica. Strujnica predstavlja krivulju na koju se tangenta u svakoj njenoj točki u zadanom trenutku poklapa sa smjerom vektora brzine u toj točki. Strujnice su vektorske krivulje vektorskog polja brzine, slično kao što su silnice vektorske krivulje vektorskog polja sile.[4] Laminarno je strujanje opisano kao strujanje fluida uz glatku površinu u slojevima usko vezano uz viskoznost fluida.

Viskoznost se manifestira u jednostavno zamišljenom eksperimentu, prikazanom na slici 2, gdje se između dviju paralelnih ravnih ploča, razmaknutih za udaljenost h i dovoljno velikih površina da se učinci rubova mogu zanemariti nalazi fluid. Donja ploča miruje, a gornja, površine A, pod djelovanjem sile F giba se paralelno sa svojom ravninom brzinom U. Kao prvi rezultat eksperimenta pokazuje se da se čestice fluida lijepe ili prianjaju uz krutu stjenku tako da čestice fluida uz donju ploču na slici 2 miruju, a one uz gornju ploču gibaju se istom brzinom U kao i ploča. Ako udaljenost h između ploča nije prevelika, ili ako brzina U nije previsoka, i ako nema uzdužnog gradijenta tlaka, tj. dp/dx=0, eksperiment pokazuje da se u fluidu uspostavlja linearni profil brzine od 0 do U, da je sila F proporcionalna mjernom broju površine A gornje ploče, brzini U i obrnuto proporcionalna udaljenosti ploča h. Brzina U i udaljenost h moraju biti ograničeni da bi se osigurali laminarno strujanje.[5]

[3] Kulišić P., Mehanika i toplina, Zagreb, 2005., str. 170–175.
[4] Fancev M., Mehanika fluida,Tehnička enciklopedija, glavni redaktor Rikard Podhorsky, Zagreb: Jugoslavenski leksikografski zavod, 1983., str. 104
[5] Ibid. str. 75



Slika 2: Strujanje fluida između dvije ploče [8]

Tako čestice bliže površini imaju manju brzinu od čestica koje su udaljenije od površine. Bez obzira što je gibanje strujnicama opisano kao laminarno, tj. paralelno, neke čestice na mikroskopskoj razini manje brzine i dalje prelaze u gornje slojeve, a druge, pak, prelaze iz gornjih slojeva veće brzine u donje slojeve. Prilikom takvih prelazaka čestica dolazi do sudara molekula zraka prilikom kojih čestice izmjenjuju određenu količinu gibanja proporcionalnu mu_x, vidljivo sa slike 1. Uslijed izmjene dovoljne količine gibanja, odnosno prilikom postizanja dovoljno velikog broja sudara, laminarno strujanje prelazi u turbulentno.[6] Laminarnost strujanja nije stabilna pojava i pri višim brzinama U ili većim razmacima h između ploča iz opisanog eksperimenta strujanje postaje turbulentno s osjetnim fluktuacijama brzine strujanja i intenzivnim miješanjem makroskopskih gromada čestica fluida između udaljenih slojeva. Za turbulentni sloj nije valjan Newtonov zakon viskoznosti. Za laminarno strujanje uvjet je da se izmjene čestica fluida između bliskih slojeva zbivaju u mikroskopskom, molekularnom mjerilu.

2.3.2. Turbulentno strujanje

Turbulentno je strujanje okarakterizirano sa nepredvidljivim smjerom strujnica međusobno, no ne i obzirom na ukupan smjer strujanja. Strujanje je i dalje, ukupno, određeno rezultantom svih strujnica, no, međusobno, smjerovi strujnica nemaju ovisnost. Promatranjem strujanje zraka po glatkoj površini aeroprofila vidljivo je kako se prelazak iz laminarnog u turbulentno strujanje nikako ne može precizirati u jednoj točci, već se taj prelazak odvija postupno. Sastoji se od sljedećih koraka koji se razvijaju sa početkom na početnom rubu aeroprofila, pa prema zadnjem bridu:

1. Stabilni laminarni tok u neposrednoj blizini prednjeg, napadnog brida

[6] Kesić P. Osnove aerodinamike, Sveučilište u Zagrebu, 2003., str 25.

2. Pojava nestabilnih dva-dimenzijskih Tollmien-Schlichting valova
3. Razvijanje tri-dimenzijskih nestabilnih valova
4. Razbijanje vrtloga u područjima velikih inercijskih sila
5. Stapanje vrtložnih frakcija u tri-dimenzijske fluktuacije
6. Formiranje turbulentnih žarišta na mjestima lokalnih fluktuacija
7. Spajanje turbulentnih žarišta u potpuno turbulentni tok[7]

Tollmien-Schlichting valovi su blisko definirani sa pojavom valova u prostoru prilikom interakcije dva režima strujanja fluida, u slučaju gibanje zraka preko aeroprofila to se odnosi na „slobodan tok“ izvan graničnog sloja koji pokazuje svojstva neviskoznosti i graničnog sloja koji posjeduje izrazite karakteristike viskoznosti blizu površine aeroprofila.

2.4. Granični sloj

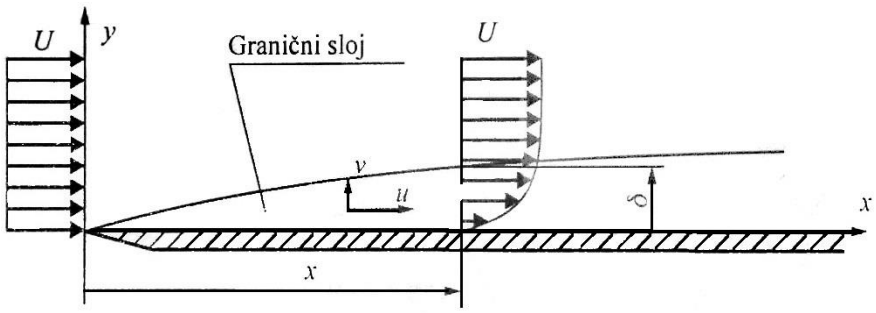
2.4.1. Definicija graničnog sloja

L. Prandtl je 1904. godine uveo pojam graničnog sloja, čime je označen početak moderne ere mehanike fluida. Uvjet priljepljivosti realnog viskoznog fluida o krutu stjenku uzrokuje bitnu razliku u poljima brzine strujanja idealnog i viskoznog fluida u neposrednoj blizini krute granice tijela. Podalje od te granice ta se razlika praktički potpuno gubi. Prandtl je u analizi viskoznog strujanja oko tijela podijelio polje strujanja u područje relativno tankog graničnog sloja u neposrednoj blizini krutih granica i područje koje prekriva ostatak polja strujanja. Unutar tankoga graničnog sloja tangencijalna komponenta brzine naglo se mijenja u smjeru normalno na stijenku, i to od nule na stijenci do brzine slobodne struje na vanjskom rubu graničnog sloja. U tom je sloju učinak viskoznosti bitan; strujanje je vrtložno, a viskozne su sile istog reda kao i inercijske sile, pa se dinamika strujanja opisuje Navier – Stokesovim jednadžbama. Izvan graničnog sloja učinak viskoznosti je zanemariv, pa se gibanje može opisivati Eulerovim jednadžbama, promatrano idealnim u potencijalnom strujanju. Iz Navier - Stokesovih jednadžbi slijedi da je osnovno svojstvo graničnog sloja da se tlak preko normalnog presjeka graničnog sloja može smatrati konstantnim i jednakim tlaku u vanjskom strujanju. [8]

[7] White, F. M.: Viscous Fluid Flow, siječanj, 1991., str. 370-375
[8] Fancev M.: Mehanika fluida,Tehnička enciklopedija, glavni redaktor Rikard Podhorsky, Zagreb: Jugoslavenski leksikografski zavod, 1983., str. 75-112

2.4.2. Schlichting-ova teorija transformacije laminarnog graničnog sloja u turbulentni

Laminarni granični sloj preko ravne površine karakteriziran je slojevitim, ali u biti vrtložnim strujanjem koje je limitirano velikim brzinama, točnije, do nekih kritičnih vrijednosti Reynoldsovih brojeva $Re_{x,kr}$ kada strujanje postaje nestabilno. To znači da vrlo male poremećaje nastale od više mogućih uzroka poput: hrapavosti zida, turbulencije slobodne struje, tlačnih valova, vibracija i drugih, nije moguće prigušiti djelovanjem sila viskoziteta te se oni gonjeni velikim inercijalnim silama (velike brzine) pojavljuju kao vrtlozi različitih dimenzija. Poremećaji se međusobno pojačavaju pa se laminarno strujanje transformira u turbulentno. Shema strujanja preko ravne ploče prikazana je na slici 3.



Slika 3: Strujanje u graničnom sloju preko ravne ploče [12]

Brojčana vrijednost kritičnog Reynoldsova broja $Re_{x,kr}$ zavisi od niza čimbenika koji djeluju kao poremećaji, a prije svega od:

- hrapavosti zida,
- intenziteta turbulencije slobodne struje,
- gradijenta tlaka (dp/dx) stlačivosti fluida,
- mehaničkih i tlačnih poremećaja koji se prenose iz okoline.

Zbog toga se može govoriti i o području $Re_{x,kr}$. Što je intenzitet poremećaja veći, kritična vrijednost Reynoldsova broja je manja. Za maksimalnu vrijednost $Re_{x,kr}$ unutar koje strujanje ostaje stabilno laminarno uzima se $Re_{x,kr}$= 500.000.

Kao što je vidljivo sa slike 3, poslije relativno kratkog područja transformacije laminarnog graničnog sloja u turbulentni nastaje razvijeni turbulentni granični sloj s tankim viskoznim (laminarnim) podslojem neposredno iznad ploče. Daljnje strujanje je nepovratno

turbulentno i ne može doći do transformacije u laminarno. Eventualnim snižavanjem brzine strujanja može se povećati kritična dužina x dana izrazom:

$$x_{kr} = \frac{Re_{x,kr}}{(\frac{U}{\nu})} \quad \text{.....(2)}$$

koji se može odrediti na temelju slike 3. [9]

Schlichting je sažeo rezultate višegodišnjih istraživanja o transformaciji laminarnog graničnog sloja u turbulentni na aeroprofilima u nekoliko zaključaka:

1. Teorija stabilnosti pokazuje da gradijent tlaka (dp/dx) ima dominantan utjecaj na stabilnost graničnog sloja; snižavanje tlaka u nizstrujnom smjeru ima stabilizirajući utjecaj dok porast tlaka u istom smjeru vodi k nestabilnosti.
2. Shodno prethodnom, položaj točke maksimalne brzine u vanjskom (potencijalnom) strujanju (odnosno točke minimalnog tlaka) utječe presudno na točku nestabilnosti i točku transformacije. Može se pretpostaviti, kao približno pravilo, da se poklapaju točke nestabilnosti i minimalnog tlaka, a da transformacija slijedi neposredno poslije u srednjem području Reynoldsovih brojeva (10^6<Re_x<10^7).
3. Kada se napadni kut aeroprofila povećava na istom Reynoldsovu broju, točka nestabilnosti se pomiče na gornjaci uzstrujno, a na donjaci nizstrujno.
4. Kada se Reynoldsov broj poveća pri konstantnom napadnom kutu, točke nestabilnosti i transformacije pomiču se uzstrujno.
5. Kod velikih Reynoldsovih brojeva i kod aeroprofila s neizraženim minimumom tlaka točka nestabilnosti može, u nekim uvjetima, prethoditi položaju točke minimalnog tlaka.
6. Čak i kod malih Reynoldsovih brojeva (10^5<Re_x<10^6) točke nestabilnosti i transformacije slijede točku odvajanja laminarnog graničnog sloja; u nekim uvjetima laminarni granični sloj se može odvojiti da bi se ponovno priljubio uz čvrsti zid, ali kao turbulentan. Tako se formira mjehurasta cirkulacijska zona strujanja fluida iznad površine zida. [10]

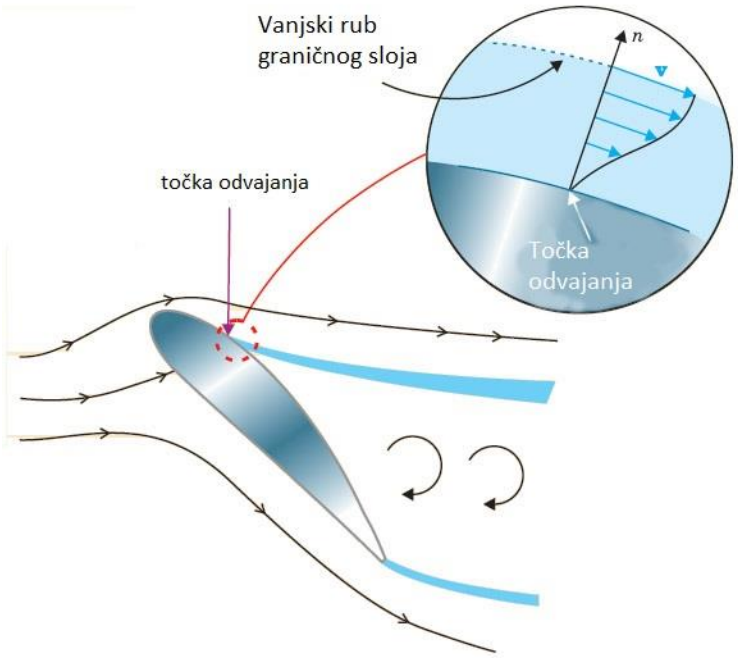
[9] Kesić P.: Osnove aerodinamike, Sveučilište u Zagrebu, 2003., str. 230-240
[10] Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, Sixth edition, Mc-Graw Hill, 1968.

2.4.3. Odvajanje graničnog sloja

Vrlo bitna značajka graničnog sloja je pojava odvajanja graničnog sloja. U slučaju kada je napadni kut veći od tkz. kritičnog napadnog kuta, granični sloj fluida se odvaja od tvrde glatke površine po kojoj struji ostavljajući za sobom dvije granične struje zraka kao što je prikazano na slici 4. Gornja struja zraka, plave boje, koja struji od točke odvajanja u smjeru slobodnog strujanja čini gornji granicu, a strujanje prikazano na slici sa početkom na zadnjem bridu krila čini donju granicu tkz. *dead-air* područja, u kojem nema karakterističnog strujanja ili vrtloženja struje zraka. Prilikom odvajanja graničnog sloja gubi se sila uzgona. Ovakva je pojava opisana u radu Ludwiga Prandtl-a gdje je dokazano kako se uslijed odvajanja strujnica graničnog sloja od površine aeroprofila u području iza točke odvajanja stvara područje strujanja vrlo niske energije, no prevladava područje zraka koje ne struji.[11]

Raspodjela tlaka iznad površine tijela se nakon odvajanja graničnog sloja drastično mijenja. Promjena distribucije tlaka za uzrok ima pojavu sile otpora tlaka koja čini vrlo veliku protusilu uzgonu, te u slučaju kada je to područje dovoljno veliko, obično ima vrijednost puno veću od otpora trenja između čestica zraka i podloge. U točci odvajanja čestice fluida u nižim slojevima graničnog sloja su izgubile većinu svoje kinetičke energije uslijed djelovanja sile trenja između samih čestica i podloge, te nemaju dovoljno da bi se počele kretati k višim slojevima većeg tlaka, stoga se, kako je vidljivo sa slike 4, čestice u jednom trenutku odvajaju od podloge uzrokujući odvajanje ukupnog graničnog sloja.

[11] Anderson Jr, J.D.: Ludwig Prandtl's boundary layer, Physics today, 2005., str 42, dostupno na: http://dx.doi.org/10.1063/1.2169443



Slika 4: Prikaz odvajanja graničnog sloja [2]

3. VRSTE PLAZMA AKTUATORA

3.1. Plazma aktuator sa zakrivljenom niti

Plazma aktuatori sa lokaliziranom zakrivljenom niti (engl. *Localised Arc Filament Plasma Actuators – LAFPA*), sastoje se od:

- šupljine,
- para elektroda i
- izlaznog otvora.

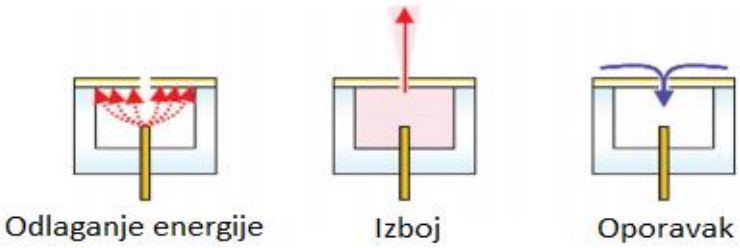
Radni proces LAFPA dijeli se u tri stadija:

1. Odlaganje energije
2. Izboj
3. Oporavak

Unutar šupljine elektrode su postavljene na određenu međusobnu udaljenost; u prvoj fazi, kada ulazni napon probije kritičnu vrijednost, inicira se izboj u obliku luka kojim se vrlo brzo zagrije okolni zrak unutar šupljine. Sa vrlo oštrim rastom tlaka, plin eruptira iz šupljine i formira sintetički mlaz plazme. Taj se stadij naziva fazom izboja. U krajnjem, trećem, stadiju okolni plin će zbog razlike tlakova biti usisan u šupljinu te je aktuator time spreman za novi ciklus, kao što je vidljivo sa slike 5. Provedeni eksperimenti pokazali su kako je vršna razina tlaka u šupljini kod ovakvih tipova aktuatora $1.8x10^6$Pa. Vršne vrijednosti temperature, mjerene posebnim digitalnim uređajima, izmjerene su 75 μs nakon izboja, a ne prelaze vrijednosti od 1.600 K. Najveća brzina strujanja mlaza ovako zagrijanog plina ne prelazi 100 m/s.

Kada se *LAFPA* koristi u brzinama većim od 2 Macha, tj. u supersoničnom strujanju, moguće je promatrati jačinu prodiranja mlaza zagrijanog plina u glavno strujanje fluida. Eksperimenti su pokazali kako mlaz ovih svojstava može prodrijeti i do 8 mm u struju glavnog strujanja. Uslijed takvog prodiranja, moguće je zapaziti i pojavu malog udarnog vala obzirom na glavno strujanje koje ima deformirani oblik, a širi se brzinom zvuka. Maksimalna brzina strujanja ovakvog mlaza, prilikom korištenja u supersoničnim brzinama, pri čemu se koristi gustoća snage od 5×10^{12} W/m³ iznosi 850 m/s. Usisavanje zraka nazad u šupljinu odvija se 180 μs nakon izboja napona unutar šupljine, a cijeli ciklus traje nešto više od 400 μs. Interakcija

između supersoničnog strujanja i izboja LAFPA istražuje se i eksperimentalno i matematički. [12]



Slika 5: Konfiguracija elektroda kod LAFPA [10]

3.2. Plazma aktuator sa sintetičkim mlazom

Plazma aktuator sa sintetičkim mlazom (engl. *Plasma Synthetic Jet Actuator* – PSJA) radi na sličan način kao i prethodna vrsta aktuatora sa kritičnom razlikom karakteristika. PSJA obično imaju puno manje ulazne snage dok je vršna izlazna brzina projiciranog mlaza obično manja od 60 m/s. Smanjenje otvora šupljine može za posljedicu imati dramatične promjene krajnjih karakteristika. Ukoliko se rubovi otvora zaoble, akustična se distorzija smanjuje za čak 40%, pri čemu se povećava i efikasnost sintetičkog mlaza. Mehanički dijelovi aktuatora proizvode mlazove brzine od oko 600 m/s i mogu se upravljati na frekvencijama nekoliko stotina Hz. Budući da PSJA kombinira veliku snagu mlaza (~300 m/s) sa visokom frekvencijom rada (~5.000 Hz), pronalazi razne primjene poput:

- kontrole graničnog sloja,
- smanjenja buke,
- upravljanje udarnim valovima i
- upravljanje letom.

Istragom karakteristika strujanja korištenjem PSJA moguće je razlučiti dvije temeljne vrste karakteristika: one koje vrijede za jedan ciklus i one koje se javljaju kod repeticijskog rada aktuatora. Od otkrića i početka primjene ovakvih tipova aktuatora, ostvaren je velik napredak u poboljšanju rada aktuatora u jednom ciklusu. Dinamički tlak, inducirana brzina i vrtložno polje te distribucija temperatura su parametri koji su mjereni optičkom metodom mjerenja svojstva fluida (engl. P*article Image Velocimetry* – PIV) tehnikom ubrizgavanja sitnih čestica

[12] Grossman K.R., Cybyk B.Z., van Wei D.M.: Sparkjet actuators for flow control. Proceedings of 41st Aerospace sciences meeting and exhibit; 2003 Jan 6–9; Reno, Nevada.

koje se mogu digitalno pratiti u strujanje fluida kako bi poprimile svojstva strujanja fluida i na taj način osigurala vjeran prikaz svojstva samog strujanja. Dobiveni rezultati su uspoređivani sa rezultatima pretpostavljenim u simulacijama kako bi se odredila efikasnost grijanja PSJA, te je procijenjena na 35%.[13]

Komparativna studija pokazala je kako PSJA koji je koristio kapacitativni izvor snage ima potencijal proizvesti mlaz veće brzine no kraćeg vremenskog trajanja. Brzina mlaza povećava se sa povećanjem kapacitativne snage izvora struje. Ipak, samo su pojedini uspjesi postignuti na području povećanja frekvencije. Naime, eksperimentima je uočeno kako postoji vršna frekvencija aktualizacije (~5 kHz) za ostvarivanje dovoljno stabilnih i ponovljivih ciklusa. Povremena odsutnost ciklusa objašnjena je potrebom za dostupnosti raspoloživog plina iz okoline. Kada je frekvencija aktualizacije mlaza ispod 400 Hz, brzina mlaza ostaje nepromijenjena. Kada se frekvencija poveća na 500 Hz, brzina mlaza se smanji za određenu vrijednost koja ostaje nepromijenjena bez obzira na daljnje povećanje frekvencije. Nadalje, eksperimenti pokazuju kako se temperatura u šupljini poveća dok se povećanjem frekvencije generiranih izboja smanjuje izbačena masa plina u pojedinom ciklusu.[14] Problem kod analitičkog opisivanja repeticijskog procesa rada PSJA leži u nepostojanju odgovarajućeg modela za opisivanje trećeg stadija rada aktuatora. Samim time nije moguće simulacijama doći do optimalnih vrijednosti pojedinih parametara.

Najnoviji analitički model za predviđanje eksperimentalnih rezultata repeticijskog rada PSJA na frekvencijama nižim od 4,6 kHz vrlo je točan, sa odstupanjima točnih vrijednosti temperature zidova šupljine i ukupnog tlaka na izlazu iz šupljine od 5 do 20%. Na temelju rezultata ovog modela i provedenih eksperimenata može se zaključiti kako repeticijskim radom aktuatora razlikujemo dvije faze:

- tranzicijska faza i
- faza dinamičke ravnoteže.

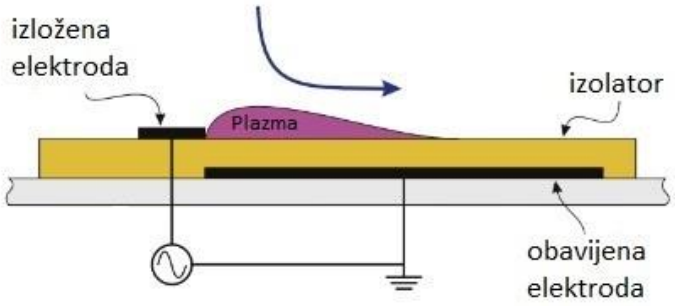
U prvom stadiju prosječna temperatura u šupljini i vršna brzina mlaza postupno povećavaju vrijednosti, dok se gustoća unutar šupljine smanjuje. U drugom stadiju svi parametri, uključujući i tlak, gustoću i brzinu mlaza mijenjaju vrijednost periodički.

[13] Caruana, D., Rogler, F., Dufour, G., Gleyzes, C.: The Plasma Synthetic Jet Actuator, Flow, Modeling and Flow Control Application on Separation, Aerospacelab journal, 2013.
[14] Tang, H. and Zhong, S.: Lumped element modelling of synthetic jet actuators, Aerosp. Sci. Technol. 13(6), 331–339 (2009). Dostupno na: http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2009.06.004

Povećavajući frekvenciju, prosječna temperatura unutar šupljine i vršna brzina mlaza postupno povećaju vrijednosti, no iznad 5,5 kHz prosječna toplina ostaje gotovo nepromijenjena. Sa istom količinom odlagane energije postoji frekvencija zasićenja, iznad koje ukupna količina mehaničke energije mlaza naglo pada. Većim promjerom otvora šupljine moguće je ostvariti višu frekvenciju zasićenja. Nadalje, povećanjem frekvencije mehanička energija oslobođena izbojem, izbačena masa plina i prosječna gustoća unutar šupljine tokom jednog ciklusa smanjuju vrijednosti što se pripisuje smanjenju vremenskog trajanja stadija oporavka, tj. ponovnim punjenjem otvora šupljine plinom početnih svojstava iz okoline.[15]

3.3. Plazma aktuator pojedinačnog izboja na izolator

Plazma aktuator pojedinačnog izboja na izolator (engl. *Single Dielectric Barrier Discharge* – SDBD) ima najširu primjenu u kontroli strujanja fluida. Kako je prikazano na slici 6, sastoji se od dvije elektrode od kojih je jedna izložena vanjskom strujanju fluida, a druga u potpunosti obavijena dielektričnim materijalom, tj. izolatorom.



Slika 6: Konfiguracija elektroda SDBD [6]

Mehanizam koji se koristi u kontroli sloja strujanja očituje se u prostornoj sili koja djeluje na volumen tijela, za razliku od površinskih i kontaktnih sila koje djeluju na površinu krutih tijela. Prostorna sila koju ovakvi aktuatori iziskuju na okolni fluid može se izvesti primjenom prvih načela, stoga se karakteristične pozicije elektroda, kakvoća izolatora ili korišteni naponi mogu mijenjati sa preciznošću dovoljnom za stalno poboljšanje krajnjih rezultata. Materijal koji se koristi kao izolator u ovakvom tipu plazma aktuatora obično je Kapton, no može se sa jednako dobrim rezultatima koristiti keramika, staklo ili kvarc. Gornja elektroda izložena toku strujanja fluida priključena je na napon obično izmjenične struje reda veličine 10^3 dok je frekvencija same izmjenične struje oko 10^3 Hz. Kod aktivacije aktuatora,

[15] Zong, H., Wu, Y., Li, Y., Song, H., Zhang, Z., Jia, M.: Analytic model and frequency characteristics of plasma synthetic jet actuator, Physics of fluids 27, 19 February 2015

golim je okom moguće zapaziti mlaz plavkastog sjaja koji izvire na izloženoj elektrodi i širi se nizstrujno preko površine izolatora u smjeru elektrode obavijene izolatorom. Plavkasti sjaj je očitanje plazme koja se sastoji od:

- ioniziranog zraka,
- slobodnih elektrona i
- iona.

Bitna karakteristika ovakvog načina postavljanja elektroda je mogućnost održavanja postojanog mlaza plazme bez upotrebe pomičnih dijelova, što je od presudne važnosti i ključne prednosti ovakvog sustava kontrole graničnog sloja. SDBD aktuator karakterizira:

- vrlo mala masa,
- može pratiti konture svake površine na koju ga se postavi,
- vrlo visok frekvencijski odziv,
- može raditi na vrlo visokim frekvencijama,
- u potpunosti je ovisan o električnoj energiji.

Istraživanja provedena u nastojanju poboljšanja performansa SDBD aktuatora pratila su promjene varijabli koje utječu na distribuciju i intenzitet plazme:

- oblik vala napona,
- amplituda napola,
- frekvencija,
- konfiguracija elektroda u prostoru,
- plin u strujanju,
- materijal izolatora,
- debljina i temperatura izolatora.[16] [17]

[16] Enloe, L., C., McLaughlin, T.E., Van Dyken, R.D., Kachner, K.D., Jumper, E.J., Corke, T.C., Post, M., and Haddad, O.: Mechanisms and Responses of a Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects", AIAA Journal, Vol. 42, No. 3 (2004), dostupno na: 595-604.DOI: http://dx.doi.org/10.2514/1.3884
[17] Erfani, R.; Zare-Behtash, H., Kontis, K., Plasma actuator: Influence of dielectric surface temperature, Elsevier, objavljen 12. lipnja 2012.

4. PRINCIP RADA PLAZMA AKTUATORA

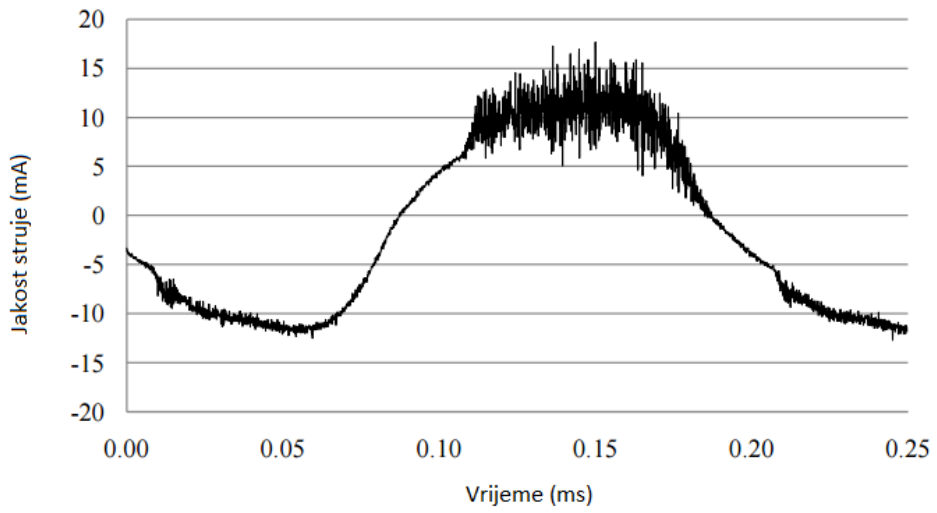
Da bi se upravljalo SDBD plazma aktuatorom (u daljnjem tekstu koristiti će se samo izraz plazma aktuator), potrebno je gornju izloženu elektrodu spojiti na izvor izmjenične struje. To uzrokuje izboj plazme koji se zadržava na površini dielektrika ispod kojeg se nalazi druga elektroda. Taj izboj za posljedicu ima ioniziranje čestica zraka u području strujanja iznad elektroda. U uvjetima u kojima nema strujanja okolnog zraka, izboj aktuatora uvlači čestice zraka i uzrokuje nizstrujno gibanje zraka u smjeru tangencijalno od dielektrika. Kada se dovoljna količina napona dovede na izloženu elektrodu u uvjetima strujanja čestica zraka, naboj na elektrodi biva više negativan u odnosu na površinu dielektrika, te izbacuje višak elektrona prema drugoj elektrodi. Budući da je svojstvo dielektrika da ne propušta elektrone, nastaje nakupljanje elektrona na površini dielektrika koji se sudarajući sa česticama zraka pretvaraju u plazmu. Takve sada nabijene čestice zraka u obliku plazme, stvaraju Lorentzovu silu koja djeluje na volumen zraka u struji rezultantom sile mehaničkih svojstava. Ova sila ima djelovanje u smjeru dielektrične podloge i kasnije uzrokuje izbacivanje uvučenog zraka, tj. fluida, nizstrujno od elektrode priključene na izvor izmjenične struje. Nagli pad tlaka iznad elektrode izložene strujanju zraka potpomaže djelovanje sile rezultante.[18]

Ciklus rada plazma aktuatora može se podijeliti u dva polu-ciklusa jer jedan ciklus izmjenične struje za posljedicu ima dva izboja plazme. Tijekom prvog polu-ciklusa naboj na elektrodi izloženoj fluidu je negativan u odnosu na površinu dielektrika. To je prvi skok izboja u kojem elektroni prelaze sa izložene elektrode na površinu dielektrika. Ovakvi se elektroni sudaraju sa molekulama zraka ionizirajući ih, čime se stvara plazma. Vrlo je bitno razumjeti kako napon na elektrodi nije jednak naponu u plazmi. Kako se elektroni nakupljaju na površini dielektrika, smanjuje se razlika potencijala u plazmi. Početak drugog polu-ciklusa započinje kada napon prestane biti negativan, a prvi izboj plazme se ugasi. Aktuator ulazi u drugi polu-ciklus čim napon izmjenične struje postane pozitivan u odnosu na dielektrik. Elektroni sa površine dielektrika vraćaju se na izloženu elektrodu sudarajući se sa neutralnim česticama zraka ionizirajući ih po drugi put unutar jednog ciklusa izmjenične struje, opet stvarajući izboj plazme. Izboj plazme se gasi kada prestane kretanje elektrona, u ovom polu-ciklusu, čim napon prestane biti pozitivan.[19] Elektroni prelaze sa elektrode na površinu dielektrika, i nazad, u mikroizbojima. Promatrano golim okom plazma se čini kompaktna, no u stvarnosti je sačinjena

[18] Houser, N. M.: Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Degradation Resistance, Master Thesis, University of Toronto, 2013.
[19] Ferry, J.W.: Thrust measurement of dielectric barrier discharge plasma actuators and power requirements for aerodynamic control, Master thesis, Missouri university of science and technology, 2010

od velikog broja pojedinačnih mikroizboja. Ti izboji su nasumični i formiraju se, no bivaju suzbiti gotovo trenutno zbog dielektrika koji onemogućuje formiranje stalnog luka elektrona između dvije elektrode.[20] Ovo svojstvo trenutnog suzbijanja izboja elektrona odgovorno je za neravnotežnu i izotermalnu narav rada plazma aktuatora.

Izgled i svojstva mikroizboja razlikuju se u oba polu-ciklusa. U prvom polu-ciklusu, kada je napon negativan, broj mikroizboja je veći no svaki pojedini nosi manju količinu napona na površinu dielektrika. U drugom polu-ciklusu broj mikroizboja je manji, ali se svakim prenosi veća količina naboja natrag na izloženu elektrodu. Zorni prikaz svojstva jednog ciklusa izmjenične struje prikazan je na slici 7 gdje svaka vršna devijacija linije jakosti struje odgovara pojedinom mikroizboju. Potrebno je napomenuti kako premda u prvom polu-ciklusu postoji veći broj mikroizboja manjeg potencijala, količina jakosti struje približno je jednaka drugom polu-ciklusu gdje postoji manji broj mikroizboja većeg potencijala.



Slika 7: Grafički prikaz mikroizboja u ovisnosti od vremena i jakosti struje [9]

Prilikom povećanja frekvencije rada plazma aktuatora moguće je iz raspršenog načina pojavljivanja mikroizboja preći u konfiguraciju žarne niti u kojoj se, nadalje, približavanjem kritičnoj vrijednosti naboja koji dielektrik može podnijeti, javljaju žarišta mikroizboja. Ukoliko se vrijednosti napona daljnje povećavaju dolazi do otkazivanja rada aktuatora uslijed fizičkih oštećenja dielektrika. Vrsta mikroizboja uvelike utječe na efikasnost rada aktuatora. Prilikom

[20] Enloe, C., McHarg, M., McLaughlin, T.: Time-correlated force production measurements of the dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator, Journal of Applied Physics 2008., Vol. 103, Article 073302

povećanja frekvencije i napona mlaz proizveden radom aktuatora dobiva na snazi bez obzira na vrstu mikroizboja u trenutku promatranja, što se može vizualno potvrditi. No ukoliko se samo frekvencija povećava a napon ostaje konstantan, efikasnost aktuatora će se smanjiti ukoliko su mikroizboji u konfiguraciji žarne niti.[21]

Moguća je manipulacija izbojima plazme mijenjajući parametre konfiguracije. Tako se mijenjanjem pozicije elektrode koja je obložena dielektrikom postižu značajne promjene izboja plazme. Smanjenjem udaljenosti dviju elektroda, ili smanjenjem debljine dielektrika povećava se vrijeme zadržavanja plazme na površini dielektrika. Isti je učinak moguće postići i povećanjem količine naboja. Nadalje, smanjenjem udaljenosti dviju elektroda postižu se veće brzine induciranog toka strujanja za isti napon. Efikasnost plazma aktuatora izražava se u postotku pretvorbe ulazne snage električne energije u mehaničku snagu proizvedenog mlaza. Efikasnost plazma aktuatora svih tipova vrlo je mala, obično ispod 1%.[22]

Konfiguracije plazma aktuatora koje su eksperimentalno pokazali najveću efikasnost imaju izloženu elektrodu velike duljine, obzirom na struju fluida, te elektrodu manje duljine obavijenu što je moguće debljim slojem dielektrika. Za ostvarivanje najveće mehaničke snage mlaza potrebne su visoke vrijednosti napona, stoga je najefikasnija konfiguracija ona koja omogućuje najviše vrijednosti napona. Istraživanja su pokazala kako oblik izložene elektrode utječe na količinu momenta ostvarene mehaničke sile.

Dielektrični materijali veće debljine mogu podnijeti veće vrijednosti napona prije materijalne degradacije, stoga mogu podnijeti i veće vrijednosti snage električne energije. Prednosti korištenja dielektrika većih debljina sa manjim dielektričnim koeficijentom jest smanjeni gubitak snage pri prelasku struje kroz dielektrik, čime se mogu postizati veće vrijednosti napona i veće snage sile rezultante. Staklo sa višim dielektričnim koeficijentom, u usporedbi sa akrilom (PolyMethyl MethAcrylate) – PMMA), se pokazalo efikasnijim zbog pokazanih svojstava uslijed kojih je moguće koristiti veće vrijednosti napona rezultirajući većim brzinama induciranog toka strujanja. Nadalje, utrošena snaga je veća kod korištenja PMMA kao dielektrika. Smanjenjem debljine sloja dielektrika moguće je postići veće brzine strujanja induciranog toka, no to za posljedicu može imati preranu pretvorbu konfiguracije

[21] Ferry, J.W.: Thrust measurement of dielectric barrier discharge plasma actuators and power requirements for aerodynamic control, Master thesis, Missouri university of science and technology, 2010

[22] Pons, J., Moreau, E., Touchard, G.: Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics, Journal of PhysicsD:applied Physics, volume 38, number 19, objavljen 16 studeni 2015., dostupno na: http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/19/012

izboja plazme te moguće oštećenje dielektrika zbog izboja plazme u konfiguraciji žarne niti i lokalnih zagrijavanja zbog prevelike gustoće izboja.[23]

[23] Houser, N.M.: Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Degradation Resistance, Master Thesis, University of Toronto, 2013.

5. KAKVOĆA DIELEKTRIČNIH MATERIJALA KORIŠTENIH U PLAZMA AKTUATORIMA

5.1. Akril

Iako se akril, poznat pod skraćenicom PMMA, najčešće koristi u izradi kondenzatora ili memorijskih uređaja, vrlo niska cijena izrade i jednostavnost procesa izrade čini ga predmetom mnogih istraživanja. Dielektrični materijali posjeduju svojstvo zadržavanja dijela naboja koji se manifestira nekim oblikom energije, obično toplinskim; a svojstvo je opisano vrijednošću dielektričnog koeficijenta. Dielektrični koeficijent akrila srednje je vrijednosti. Svojstva dielektričnosti akrila pripadaju spoju $CaCu_3Ti_4O_{12}$ (CCTO). Povećanjem udjela CCTO spoja u akrilu povećava se i dielektrični koeficijent. Sa početne vrijednosti dielektričnog koeficijenta od 4,9 na frekvenciji od 100 Hz, povećanjem udjela CCTO spoja keramike na 40% postiže se povećanje dielektričnog koeficijenta sa 15,7 na 100 Hz. Daljnjim povećanjem udjela CCTO spoja ne postoji devijacija vrijednosti dielektričnog koeficijenta. PMMA spoj sa dodanim svojstvima CCTO odlikuje se iznimno niskim gubitkom dielektričnih svojstava čak i na iznimno visokim frekvencijama, čineći ga idealnim za korištenje u kondenzatorima. Prilikom korištenja u uvjetima stalnih izboja plazme ovakvi se materijali, budući da su na bazi PMMA ipak istroše dugotrajnim korištenjem. [24]

Pri izlaganju PMMA dielektrika dugotrajnom radu plazma aktuatora, tj. učestalim izbojima plazme, degradacija materijala je u zavisnosti od konfiguracije izboja plazme. Najveća razina degradacije jest na području netom nakon izložene elektrode, što nije sukladno točnom položaju izvora izboja konfiguracije žarne niti koja odgovara nizstrujnom položaju. To se pripisuje većoj vrijednosti jakosti električnog polja u neposrednoj blizini izložene elektrode. PMMA se tokom djelovanja plazme na samoj površini degradira djelovanjem pozitivne povratne veze. Prvotni stupanj degradacije u obliku šupljina nastalih termalnim djelovanjem plazme povećava se smanjenjem debljine sloja dielektrika; samim time i povećanjem jakosti električnog polja. [25]

[24] Thomas, P., Ravindran, R.S.E., Varma, K.B.R.: Dielectric properties of Poly(methyl methacrylate) (PMMA)/CaCu3Ti4O12 Composites, Indian Institue of Science, Bangalore

[25] Pons, J., Oukacine, L., Moreau, E., Tatibouët, J.M.: Observation of Dielectric Degradation After SurfaceDielectric Barrier Discharge Operation in Air at Atmospheric Pressure, IEEE Transactions on plasma science, vol 36, NO. 4, kolovoz 2008.

5.2. Staklo

Kompozit stakla i keramike (u daljnjem tekstu keramičko staklo), izrađuje se ponovnim zagrijavanjem stakla, nakon prvotne izrade željenog oblika. U tom dodatnom zagrijavanju staklo kristalizira te mu se dodaju posebni agensi koji pospješuju proces kristalizacije. Završni proizvod posjeduje izvrsna dielektrična svojstva. Keramičko staklo je smatrano heterogenim materijalom zbog svojstava preuzetih iz keramike koje u kompozitnom obliku ima vrlo male dielektrične gubitke na visokim uporabnim frekvencijama. Kao i svi dielektrici, povećanjem frekvencije dolazi do smanjenja dielektričnog koeficijenta. Smanjenje koeficijenta naglo je na niskim frekvencijama, dok gotovo stagnira na visokim. Budući da se spoj smatra heterogenim, na makroskopskoj razini posjeduje nesavršenosti u teksturi u kojima se, na niskim frekvencijama, zadržava određena količina naboja, smanjujući ukupnu vrijednost dielektričnog koeficijenta. Kod visokih frekvencija, kretanje elektrona po površini opisano je skokovitom putanjom stoga nesavršenosti na površini dielektrika ne utječu na vrijednosti dielektričnog koeficijenta. Budući da frekvencija opisanog kretanja elektrona na površini uvijek kasni za frekvencijom električnog polja, povećanjem frekvencije električnog polja dielektrični koeficijent niže je vrijednosti. Dielektrični gubitak parametar je koji određuje koliku količinu naboja upije materijal dielektrika. U idealnim uvjetima nastojano je ne imati apsorpciju naboja od strane dielektrika, dok je visoka apsorpcija nepovoljna iz razloga što nedovoljno naboja preostaje za, u slučaju rada plazma aktuatora, ranije opisani drugi dio polu-ciklusa.[26]

[26] Alias, R.: Structural and Dielectric Properties of Glass – Ceramic Substrate with Varied Sintering Temperatures, TMR&D Innovation Centre, Malaysia, dostupno na: http://dx.doi.org/10.5772/54037

6. UPRAVLJANJE GRANIČNIM SLOJEM PLAZMA AKTUATORIMA

6.1. Aktivno upravljanje graničnim slojem

Aktivno upravljanje graničnim slojem sastoji se od manipulacije toka u graničnom sloju u željenom smjeru. Efikasna se kontrola toka očituje u:

- utjecaju na prelazak iz laminarnog u turbulentno strujanje,
- kontroli brzine separacije graničnog sloja,
- smanjenju sile otpora i povećanju sile uzgona,
- stabilizaciji strujanja u cilju sprječavanja neželjenih vibracija, buke i gubitka energije.

Pod proces kontrole graničnog sloja smatra se utjecaj na barem jedan od slijedeća tri parametra:

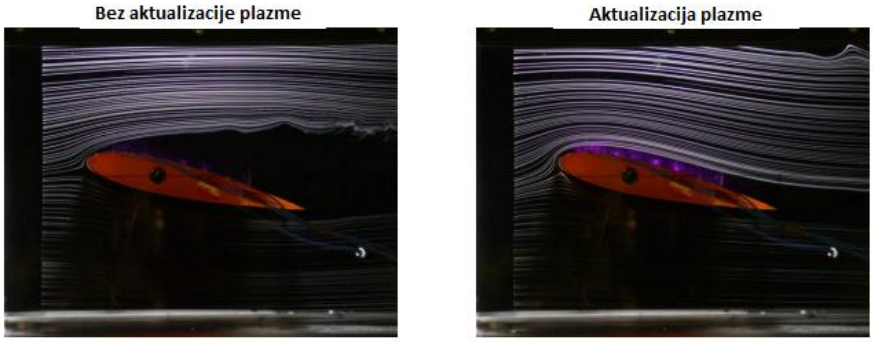
1. Prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje
2. Odvajanje graničnog sloja
3. Kontrola turbulencija

Prednosti odgode prelaska iz laminarnog u turbulentno strujanje unutar graničnog sloja očituju se u redu veličine sile otpora trenja između strujanja čestica zraka i podloge po kojoj struje. Smanjenjem sile otpora, kod zrakoplova, postiže se veća sila uzgona i veća maksimalna brzina. Odvajanje graničnog sloja uzrok je slomu uzgona zbog pojave područja inertnog zraka koji ne struji po površini. U slučaju promatranog aeroprofila sa slike 4 maksimalna vrijednost sile uzgona koja djeluje na aeroprofil može se povećati povećanjem napadnog kuta, no maksimalna vrijednost ostvarivog uzgona je ograničena sposobnošću da struja zraka ostane priljubljena uz površinu aeroprofila. Ukoliko zrak prestane strujati uz samu površinu, slama se uzgon, a granični se sloj od točke odvajanja nizstrujno u potpunosti odvaja od površine aeroprofila. Turbulencije su zajednički naziv za sva turbulentna gibanja unutar turbulentnog graničnog sloja. Povećanjem razine turbulencija dolazi do boljeg miješanja slojeva kod laminarnog strujanja, no smanjenjem turbulencija dolazi do značajnog smanjenja emitirane buke kod krila zrakoplova u bilo kojoj fazi strujanja.[27]

Kontrola graničnog sloja obično se izvodi mehaničkim komponentama koje u donje slojeve graničnog sloja usmjeravaju struju zraka veće brzine i veće količine gibanja, pa takve čestice mogu prelaziti u više slojeve, kao što je vidljivo na slici 1, zamjenjujući čestice koje su

[27] Moreau, E.: Airflow control by non-thermal plasma actuators, journal of Physics Department:Applied Phhysics, University of Poitiers, France, 23. listopad 2006, dostupno online:stacks.iop.org/JPhysD/40/605

iz donjih slojeva prešle u gornje i odgađajući odvajanje graničnog sloja. Na slici 8 prikazani su rezultati eksperimenata provedenih za brzinu strujanja od 2,58 m/s i napadnom kutu od 16°, gdje je jasno vidljivo kako je učinak koji aktualizirana plazma ima na tok strujanja sasvim identična učinku mehaničkih dijelova zaslužnih za kontrolu graničnog sloja.



Slika 8: Prikaz rezultata aktivacije plazma aktuatora obzirom na strujanje zraka [14]

6.2. Električni vjetar

Kod aktualizacije plazme dolazi do stvaranja momenta sile koja se dodaje strujanju zraka u graničnom sloju. Takvo se strujanje naziva električni vjetar. Ovu pojavu prvi je zabilježio M. Robinson 1960. godine. Električni vjetar uzrokovan je *Corona* izbojem koji se manifestira kada vodič oštrih rubova biva izložen visokim vrijednostima napona. Stvaranjem plazme, tj. ioniziranjem čestica zraka, uslijed prevelike koncentracije iona na samom krajnjem rubu vodiča vodi ka odbijanju tako nabijenih čestica zraka od ruba vodiča, zbog istog naboja. Brzina odbijanja molekula zraka jednaka je brzini električnog vjetra. U slučaju daljnjeg povećanja napona, zbog povećanja Coulombove sile, brzina električnog vjetra povećava vrijednosti.[28]

Eksperimentalna su istraživanja pokazala kako u slučaju povećanja brzine strujanja u graničnom sloju električni vjetar aerodinamički djeluje vrlo stabilno. Kada se smjerom strujanja električnog vjetra manipulira u smjer suprotan strujanju zraka u graničnom sloju, očituje se velik utjecaj strujanja električnog vjetra na strujanje u graničnom sloju sa vrlo malom snagom potrebnom za aktualizaciju strujanja električnog vjetra. Tako jedan naizgled proturječan proces ima pozitivan učinak na sprječavanje odvajanja graničnog sloja, pa se može zaključiti da kako

[28] Zhang, Y.: Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge, Journal of Electrostatics, 2015., dostupno na: http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2014.12.008

bi se optimizirao utjecaj električnog vjetra presudan je vremenski i prostorni raspored protustrujnih gibanja obzirom na relativno strujanje u graničnom sloju.[29]

6.3. Uloga plazma aktuatora u aktivnoj kontroli

Prednosti korištenja plazma aktuatora pri vršenju aktivne kontrole graničnog sloja očituju se u fizičkim značajkama konfiguracija plazma aktuatora:

- zanemariva masa,
- odsutnost pomičnih dijelova,
- mogućnost primjene pri velikim silama gravitacije.

Nadalje, kod ovih je sklopova prisutna izravna pretvorba električne energije u mehaničku. Vrijeme odziva je vrlo kratko, stoga je moguća aktivna kontrola graničnog sloja na vrlo visokim frekvencijama. Plazma aktuatori spojeni na izvor istosmjerne struje stvaraju posebnu vrstu strujanja u fluidu, tkz. *Corona* struju, no takva se vrsta aktuatora ne koristi u širokoj primjeni zbog velike kompliciranosti konfiguracije napajanja. Plazma aktuatori spojeni na izvor izmjenične struje transformatora sinusoidnog oblika koriste se zbog dostupnosti uređaja za proizvodnju sinusoidalnog oblika izmjenične struje te ranije spomenutih fizičkih karakteristika i jednostavnosti održavanja, kao i lakoće praćenja oblika površine prilikom postavljanja samih aktuatora.[30]

Plazma aktuatori proizvode struju fluida koja se, pravilnim postavljanjem sklopa i netom nakon nastajanja, pridružuje najnižem sloju strujanja graničnog sloja. Ovakva struja, sačinjena od iona i elektrona ima vlastitu brzinu relativno na brzinu strujanja koja je teoretski reda veličine 10^2 m/s. Ta se struja zraka stvara bez upotrebe pomičnih dijelova, vrlo visokom uporabnom frekvencijom moguće je vrlo precizno konfigurirati sklop, samim time i sami granični sloj. Cijeli sustav kontrole graničnog sloja na ovaj način koristi električnu energiju, čak i kod pretvorbe te energije u mehaničku. Dobiveni momenat mehaničke sile manji je od pneumatskih sustava slične upotrebe. Brzina električnog vjetra nastoji se istraživanjima povećati za red veličine kako bi imala još veći utjecaj na granični sloj, točnije na povećanje sile uzgona i pomicanja točke odvajanja graničnog sloja nizstrujno.[31]

[29] Moreau, E.: Airflow control by non-thermal plasma actuators, journal of PhysicsD:Applied Phhysics, University of Poitiers, France, 23. listopad 2006., dostupno online:stacks.iop.org/JPhysD/40/605
[30] Ibid.
[31] Erfani, R, Zare-Behtash, H., Hale, C., Kontis, K.: Development of DBD plasma actuators: The double encapsulated electrode, Manchester Metropolitan University, Acta Astronautica 109

6.4. Eksperimentalna primjena plazma aktuatora

Svojstva rada plazma aktuatora ispitivana su i u okolini sa visokim udjelom CO_2 plina, kao mogućnost upravljanja smjerom letenja letjelica u atmosferi Marsa. Problematika upravljanja ovakvim letjelicama očituje se u velikim potrebama za resursima mehaničkih dijelova za upravljanje na udaljenostima. Dosadašnji pokušaji istraživanja Marsa očitovali su se u slanju zemaljskih vozila na površinu koji većinu dostupnih resursa mogu trošiti na slanje prikupljenih podataka, iz razloga što je manje resursa potrebno za upravljanje. Nedostatak ovakvih načina istraživanja što su svi podaci prikupljeni lokalno. U slučaju kada bi slični uređaji mogli biti poslani da kruže atmosferom brzinom i dometom puno većim od dosadašnji tradicionalnih vozila, bilo bi moguće prikupiti širok spektar podataka u zadovoljavajuće kratkom vremenu. U tu se svrhu razmatra korištenje plazma aktuatora kao sredstva za upravljanje budućih letjelica tog tipa. Kako su energetske potrebe za rad aktuatora, uz iste rezultate kao i neki mehanički sklopovi, relativno male, a učinak je identičan, ostatak se dostupnih resursa u vidu energije može utrošiti za razvoj i optimizaciju drugih instrumenata na letjelici kritičnih za obavljanje operacija. Također, samo upravljanje plazma aktuatorom zbog iznimne jednostavnosti i male količine podataka potrebne za pokretanje sklopa omogućuje aktivno upravljanje na vrlo velike udaljenosti gotovo bez vremenskog pomaka. U okolini sa bogatim udjelom CO_2 plazma aktuatori postižu nešto smanjene vrijednosti momenta sile i brzine strujanja, no i dalje dovoljno visoke za postizanje traženih vrijednosti parametara koji utječu na smjer letenja.[32]

6.5. Potencijalna primjena u letu zrakoplova

Trenutna upotreba plazma aktuatora pri letu zrakoplova, razlog za što naveden je u prethodnim poglavljima, ograničena je na vrijednosti Reynoldsovog broja 10^5. Brzina induciranog toka prilikom izboja plazme stvara određeni moment sile koji djeluje na struju ukupnog toka. Budući da zrak u graničnom sloju opstrujavanja aeroprofila ima vlastitu brzinu strujanja, ukoliko energija predana česticama u najdonjem sloju graničnog sloja u vidu brzine nije dovoljno visoke vrijednosti, sam utjecaj takve struje nije relevantan za kretanje čestica u ukupnom graničnom sloju. Daljnjim modifikacijama konfiguracija plazma aktuatora, vrijednosti napona, i oblika istosmjerne struje moguće je u velikoj mjeri kontrolirati parametre izboja, samim time i polučene rezultate. Potencijalne primjene plazma aktuatora za široku i

[32] Takagaki, M., Isono, S., Nagai, H., Asai, K.: Evaluation of Plasma Actuator Performance in Martian Atmosphere for Applications to Mars airplanes, Department of Aerospace Engineering, Tohou University, Japan.

komercijalnu primjenu u zrakoplovstvu očituju se sposobnosti plazma aktuatora da što efikasnije obavljaju funkcije:

1. Generiranja vrtloga
2. Upravljanja zrakoplova
3. Smanjenja turbulencija

Svaka od navedenih funkcija određena je manifestacija izravnih posljedica manipulacije graničnim tokom strujanja.

Korištenje plazma aktuatora za generiranje vrtložnih kretanja zraka u struji zraka oko aeroprofila može u potpunosti zamijeniti upotrebu mehaničkih dijelova koji su trenutno u široj primjeni, a zahtijevaju stalna održavanja, nešto višu cijenu izrade te, u usporedbi, mnogo kompliciranijih sustava odgovornih za upravljanje tim dijelovima.

Budući da se zrakoplov prilikom leta rotira oko tri međuovisne osi, zbog razlika u opstrujavanju struje zraka oko krila zrakoplova u određenim uvjetima, moguće je djelovanjem na jednu os utjecati na ukupnu pokretljivost zrakoplova. Pokretljivost zrakoplova manifestira se sposobnošću zrakoplova da mijenja smjer, kao i režime letenja prema volji pilota, a može biti uzdužna, poprečna i po pravcu. Kod uzdužne pokretljivosti zrakoplova, zrakoplov se pokreće oko svoje poprečne osi propinjajući se ili obrušavajući. To se postiže pomicanjem repnih površina kojim se mijenja napadni kut.[33] Uzimajući u obzir da se upotrebom plazma aktuatora upravlja i količinom sile uzgona prilikom opstrujavanja krila, postavljanjem plazma aktuatore na oba krila i odgovarajućom kontrolom rada aktuatora moguće je inicirati valjanje, odnosno rotaciju zrakoplova obzirom na os po pravcu zrakoplova. Daljnjom kontrolom rada plazma aktuatora moguće je postići i povećanje uzgona na oba krila u određenom položaju, imajući za rezultat precizno i kontrolirano kretanje zrakoplova po određenom pravcu. Postavljanje aktuatora na repne površine zrakoplova može bitno utjecati i na upravljivost zrakoplova po pravcu, odnosno utjecajem na upravljivost zrakoplova po pravcu za učinak ima postizanje razlike brzina krila, te povećanja uzgona sa jedne strane zrakoplova, samim time i nagiba zrakoplova.

Smanjenje buke kod zrakoplova u uskoj je vezi sa smanjenjem vibracija uzrokovanih opstrujavanjem strujnica na trupu i krilima, nastanka vrtloženja zraka koje potom dolazi do repnih površina i uzrokuje podrhtavanje. Buka je tako izravna posljedica načina opstrujavanja,

[33] Vidović A., Elementi stabilnosti i upravljivosti zrakoplova, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.

odnosno stvorene količine otpora zraka u režimu strujanja oko aeroprofila. Tako korištenjem plazma aktuatora i boljom kontrolom samog strujanja moguće je postići smanjenu količinu emitirane buke u svakom stadiju leta zrakoplova, posebice u fazama slijetanja i uzlijetanja zrakoplova, što je od ključne važnosti za ocjenu ekološke prihvaćenosti pojedinog zrakoplova.

7. ZAKLJUČAK

Ovaj rad imao je za cilj iz rezultata provedenih eksperimenata deducirati i pobliže objasniti svojstva graničnog sloja, kao i potencijalnu manipulaciju strujanja. Pokazano je kako su plazma aktuatori vrlo svrsishodan način kontrole strujanja uz glatku površinu uz iznimno male energetske zahtjeve i sa velikom lakoćom primjene. Rad samih aktuatora izložen je u četvrtom poglavlju, obrađena je tematika bazirana na plazma aktuatorima koji koriste izmjeničnu struju iz razloga što su takvi izvori struje znatno manje težine - karakteristika nužna za praktičnu primjenu u aerodinamici.

Brzina električnog vjetra proizvedenog djelovanjem čestica plazme na okolni zrak, mijenjajući vrijednosti tlaka, sasvim sigurno će rasti boljim razumijevanjem gustoće i viskoznosti same plazme. Za takvo je istraživanje potreban pomak u izradi mjernih instrumenata dovoljno preciznih za dobivanje vjernih očitanja.

Upravljanje graničnim slojem od presudne je važnosti u aerodinamici zbog niza razloga. Kako bi se povećala učinkovitost leta nužno je potrebno povećavati silu uzgona na način da se smanji sila otpora. Učinkovitost leta usko je povezana sa ekonomskim faktorom pri izradi i održavanju svih vrsta letjelica. Što je veći uzgon, a manji otpor, potrebe za pogonskim gorivom se smanjuju čineći upravljanjem graničnim slojem, uz napore da se proizvedu što lakši mogući materijali, najbitnijom stavkom u smanjenju operativnog troška svih letjelica. Plazma aktuatori vrlo su jednostavno rješenje. Pružaju konverziju električne energije, koja je danas dostupna više nego ikad, u mehaničku i to bez pomičnih dijelova, što proizvodnju i održavanje maksimalno pojednostavljuje.

Sve pojave uzrokovane radom plazma aktuatora, odnosno izbojima plazme, sustavno su i pregledno objašnjene na temelju čega se može zaključiti kako u cilju povećanja sile uzgona, smanjenja sile otpora, pomicanje točke odvajanja graničnog sloja nizstrujno ili potpuno sprječavanje odvajanja ne postoje negativne posljedice već samo ograničenja. Ova činjenica, uz to da postoji izrazito zanimanje za korištenjem aktuatora u orbitama drugih planeta, osigurava da će se na pomicanju tih operativnih ograničenja uložiti veliki napor.

LITERATURA

1. Alias, R.: Structural and Dielectric Properties of Glass – Ceramic Substrate with Varied Sintering Temperatures, TMR&D Innovation Centre, Malaysia, dostupno na: http://dx.doi.org/10.5772/54037
2. Anderson Jr, J.D.: Ludwig Prandtl's boundary layer, Physics today, prosinac 2005, dostupno na: http://dx.doi.org/10.1063/1.2169443
3. Caruana, D., Rogler, F., Dufour, G., Gleyzes, C.: The Plasma Synthetic Jet Actuator, Flow, Modeling and Flow Control Application on Separation, Aerospacelab journal, AL06-10, lipanj 2013
4. Enloe, C., McHarg, M., McLaughlin, T.: Time-correlated force production measurements of the dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator, Journal of Applied Physics, 2008, Vol. 103, Article 073302
5. Enloe, L. C., McLaughlin, T. E., Van Dyken, R. D., Kachner, K. D., Jumper, E. J., Corke, T. C., Post, M., Haddad, O.: Mechanisms and Responses of a Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects, AIAA Journal, Vol. 42, No. 3 (2004), dostupno na: 595-604.DOI: http://dx.doi.org/10.2514/1.3884
6. Erfani, R., Zare-Behtash, H., Hale, C., Kontis, K.: Development of DBD plasma actuators: The double encapsulated electrode, Manchester Metropolitan University, Acta Astronautica 109, 19. siječnja 2015.
7. Erfani, R., Zare-Behtash, H., Kontis, K.: Plasma actuator: Influence of dielectric surface temperature, Elsevier, 12. lipnja 2012.
8. Fancev, M.: Mehanika fluida, Tehnička enciklopedija, glavni redaktor Rikard Podhorsky, Zagreb, Jugoslavenski leksikografski zavod, 1983.
9. Ferry, J. W.: Thrust measurement of dielectric barrier discharge plasma actuators and power requirements for aerodynamic control, Master thesis, Missouri university of science and technology, 2010
10. Grossman, K. R., Cybyk, B. Z., van Wei D. M.: Sparkjet actuators for flow control, Proceedings of 41st Aerospace sciences meeting and exhibit; 2003 Jan 6–9; Reno, Nevada.
11. Houser, N. M.: Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Degradation Resistance, Master Thesis, University of Toronto, 2013
12. Kesić, P.: Osnove aerodinamike, Sveučilište u Zagrebu, 2003.

13. Kulišić, P.: Mehanika i toplina, Zagreb, 2005.
14. Mohan, Madhan Raja Chandra, "Boundary Layer Flow Acceleration by Paraelectric and Peristaltic EHD Effects of Aerodynamic Plasma Actuators. " Master's Thesis, University of Tennesse, 2004, dostupno na: http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2184/
15. Moreau, E.: Airflow control by non-thermal plasma actuators, Journal of Physics D:Applied Phhysics, University of Poitiers, France, 23. listopad 2006., dostupno na: stacks.iop.org/JPhysD/40/605
16. Orlov, D. M.: Modelling and Simulation of Single Dielectric Barierrs Discharge Plazma Actuatorsm, A Dissertation, Univeristy of Notre Dame, Indiana, 2006.
17. Pons, J., Moreau, E., Touchard, G.: Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics, Journal of Physics Department: Applied Physics, volume 38, number 19, 16 studeni 2015., dostupno na: http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/19/012
18. Pons, J., Oukacine, L., Moreau, E., Tatibouët, J. M.: Observation of Dielectric Degradation After SurfaceDielectric Barrier Discharge Operation in Air at Atmospheric Pressure, IEEE Transactions on plasma science, vol 36, No. 4, kolovoz 2008.
19. Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, Sixth edition, Mc-Graw Hill, 1968., str. 110
20. Takagaki, M., Isono, S., Nagai, H., Asai, K.: Evaluation of Plasma Actuator Performance in Martian Atmosphere for Applications to Mars airplanes, Department of Aerospace Engineering, Tohou University, Japan, 26 lipnja 2008.
21. Tang, H. Zhong, S.: Lumped element modelling of synthetic jet actuators, Aerosp. Sci. Technol.13(6)0,331–339(2009).dostupno na: http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2009.06.004
22. Thomas, P., Ravindran, R. S. E., Varma, K. B. R.: Dielectric properties of Poly(methyl methacrylate) (PMMA)/CaCu3Ti4O12 Composites, Indian Institue of Science, Bangalore, 2003.
23. Vidović A., Elementi stabilnosti i upravljivosti zrakoplova, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010., str. 49-58
24. White, F. M.: Viscous Fluid Flow, University of Rhode Island, USA, 1991., str. 244 - 269
25. Zhang, Y.: Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge, Journal of Electrostatics (2015), dostupno na: http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2014.12.008

26. Zong, H., Wu, Y., Li, Y., Song, H., Zhang, Z., Jia, M.: Analytic model and frequency characteristics of plasma synthetic jet actuator, Physics of fluids 27, 19 veljače 2015.

POPIS KRATICA

CCTO	($CaCu_3Ti_4O_{12}$,) kemijska formula keramike
LAFPA	(Localised Arc Filament Plasma Actuators) plazma aktuatori sa lokaliziranom zakrivljenom niti
PIV	(Particle Image Velocimetry) optička metoda mjerenja svojstva fluida
PMMA	(Poly(Methyl MethAcrylate) akril
PSJA	(Plasma Synthetic Jet Actuator) plazma aktuator sa sintetičkim mlazom
SDBD	(Single Dielectric Barrier Discharge) plazma aktuator pojedinačnog izboja na izolator

POPIS SLIKA

Slika 1.	Raspored brzina u fluidu	5
Slika 2.	Strujanje fluida između dvije ploče	7
Slika 3.	Strujanje u graničnom sloju preko ravne ploče	9
Slika 4.	Prikaz odvajanja graničnog sloja	10
Slika 5.	Konfiguracija elektroda kod LAFPA	12
Slika 6.	Konfiguracija elektroda SDBD	16
Slika 7.	Grafički prikaz mikroizboja u ovisnosti od vremena i jakosti struje	19
Slika 8.	Rezultat rezultata aktivacije plazma aktuatora obzirom na strujanje zraka	25

METAPODACI

Naslov rada: **Uloga plazma aktuatora u kontroli graničnog sloja**

Student: **Ivica Stepanić**

Mentor: **doc. dr. sc. Andrija Vidović**

Naslov na drugom jeziku (engleski):

Role of Plasma Actuators in Control of Boundary Layer

Povjerenstvo za obranu:

- prof. dr. sc. Sanja Steiner predsjednik
- doc. dr. sc. Andrija Vidović mentor
- mr. sc. Miroslav Borković član
- doc. dr.sc. Ružica Škurla Babić zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: Zavod za zračni promet

Vrsta studija: Preddiplomski

Studij: Promet (npr. Promet, ITS i logistika, Aeronautika)

Datum obrane završnog rada: 13.09.2016.

Napomena: pod datum obrane završnog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Uloga plazma aktuatora u kontroli graničnog sloja**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 06.09.2016

(potpis)