**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Marko Mirković**

**NOVA TEHNOLOŠKA RJEŠENJA KONSTRUKCIJE KRILA ZRAKOPLOVA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2011**

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet Prometnih Znanosti

**ZAVRŠNI RAD**

**NOVA TEHNOLOŠKA RJEŠENJA KONSTRUKCIJE KRILA ZRAKOPLOVA**

Mentor: dr. sc. Andrija Vidović

Student: Marko Mirković, 0135200733

Zagreb, 2011

**SADRŽAJ:**

**1. UVOD...........................................................................................................................1**

**2. MORFOZA KRILA ZRAKOPLOVA.............................................................................3**

**2.1. Podrijetlo morfoze krila zrakoplova............................................................3**

**2.2. Razvoj i dizajn programa morfoze zrakoplovnih struktura.......................7**

**2.2.1. Karakteristike i materijali Lockheed-Martin koncepta...............11**

**2.2.2. Karakteristike i materijali NextGen koncepta.............................16**

**2.2.3. Testiranja i budućnost programa................................................19**

**2.3. Razvoj i dizajn HECS programa.................................................................22**

**2.3.1. Karakteristike i materijali koncepta.............................................24**

**2.3.2. Testiranja i budućnost koncepta.................................................26**

**2.4. Budućnost morfoze krila zrakoplova........................................................27**

**3. AWIATOR PROJEKT.................................................................................................28**

**3.1. Osnovne značajke AWIATOR projekta.....................................................28**

**3.2. Inovacijska tehnologija AWIATOR projekta.............................................29**

**3.3. Rezultati testiranja......................................................................................32**

**4. PROJEKT AKTIVNOG AEROELASTIČNOG KRILA................................................34**

**4.1. Osnovne značajke.......................................................................................34**

**4.2. Dizajn projekta............................................................................................36**

**4.3. Rezultati testiranja......................................................................................38**

**4.4. Budućnost AAW projekta...........................................................................39**

**5. ZAKLJUČAK..............................................................................................................40**

**LITERATURA.................................................................................................................42**

**POPIS SLIKA.................................................................................................................44**

**POPIS KRATICA............................................................................................................45**

**1. UVOD**

Svaki zrakoplov da bi mogao poletjeti i održati se u zraku, sa ili bez pogona vlastitih motora, treba stvoriti dovoljan uzgon koji bi ga odvojio od tla. Konstrukcijski element ili uređaj koji mu to omogućuje zove se krilo. Krilo je najvažniji dio i glavna noseća površina zrakoplova na kojoj se stvara sila uzgona razlikom tlakova na gornjaci i donjaci krila. Od nastanka prvog zrakoplova i početka zrakoplovstva, davne 1903. godine do danas, krilo, kao glavni dio zrakoplova, prolazilo je kroz najveće moguće dizajnersko-tehnološke promjene i poboljšanja u konstrukcijskim materijalima, obliku i performansama u letu za civilne i vojne zrakoplove. To se događalo zbog stalnih novih otkrića u zrakoplovnoj tehnologiji tijekom godina. Razlika između prvih i današnjih suvremenih zrakoplova je ogromna i ta tendencija za revolucijom u zračnom prometu se nastavlja.

Do nedavno, mnogi zrakoplovni inovatori i dizajneri nisu razmišljali ili nisu htjeli ići dalje od osnovnog modela fiksnog krila zrakoplova jer taj model smatrao najefikasnijim. No, zadnje studije i istraživačke metode za otkrivanje novih tehnoloških rješenja pri konstrukciji krila zrakoplova su obratile više pozornosti na kretanje ptica u zraku i njihova krila koja pri raznim manevrima mijenjaju oblik te tako omogućuju učinkovitije kretanje u zraku. Rezultati koji su dobiveni tijekom tih studija i istraživanja pokazali su da su nova tehnološka rješenja konstrukcije krila na pomolu i da je u njima budućnost zrakoplovnog inženjerstva. Takvi bi uređaji i sustavi uz puni potencijal novih tehnologija uvelike promijenili performanse, ekonomičnost, izgled i mogućnosti leta zrakoplova.

Iz raznih istraživanja, inovacija i novih otkrića u zrakoplovnoj tehnologiji, današnji znanstvenici, zrakoplovni dizajneri i inženjeri došli su do novih tehnoloških rješenja i programa u konstrukciji krila, a najviše se ističu promjene oblika krila tijekom leta, tj. morfoza krila zrakoplova, projekt poboljšanja krila sa naprednim tehnologijama - AWIATOR (Aircraft Wing with Advanced Technology Operation) projekt i projekt aktivnog aeroelastičnog krila.

Cilj ovog završnog rada je prikazati mogućnosti, promjene i performanse najnovijih projekata i programa novih tehnoloških rješenja pri konstruiranju krila zrakoplova.

Materija rada je izložena u 5 poglavlja:

1. Uvod

2. Morfoza krila zrakoplova

3. AWIATOR Projekt

4. Projekt Aktivnog aeroelastičnog krila

5. Zaključak

U uvodnom dijelu rada je definirana problematika istraživanja, definirani su cilj i svrha istraživanja zrakoplovnih struktura, te je predočena struktura rada.

U drugom poglavlju opisane su nove tehnologije pri konstruiranju krila zrakoplova, morfoza krila, te različiti koncepti morfoze krila. Predočene su njihove prednosti i nedostaci te očekivanja od budućeg razvoja.

Treće poglavlje opisuje novu tehnologiju naprednih uređaja na krilima koje dodatno zrakoplovu poboljšavaju performanse i samu operativnost zrakoplova. Razvoj tehnologije i njihove posebne uloge na krilu zrakoplova su detaljnije opisani u nastavku trećeg poglavlja.

U četvrtom poglavlju detaljno je opisana nova konstrukcija aktivnog krila koja koristi nekonvencionalne kontrole leta zrakoplova, dizajn i operativnost komandnih površina krila. Uz osnovne značajke projekta, opisani su i rezultati testiranja kao i utjecaj projekta na daljnji razvoj tehnologija krila zrakoplova.

U petom, zaključnom dijelu rada, predočeni su konačni rezultati istraživanja prema pojedinim segmentima rada.

**2. MORFOZA KRILA ZRAKOPLOVA**

**2.1. Podrijetlo morfoze krila zrakoplova**

U zrakoplovnoj industriji, tehnologija ubrzano i neprekidno napreduje te omogućava razna poboljšanja i olakšava letenje. Budućnost zrakoplovne industrije je donekle nepredvidiva, ali uvid u bližu budućnost zrakoplovne industrije se nazire. Tim stručnjaka iz američke agencije za aeronautiku i svemir, zvane NASA (National Aeronautical and Space Administration), koji su zaduženi za poboljšanja zrakoplovnih krila i performansi te općenito svih parametara leta zrakoplova, stvorili su obećavajući projekt o mogućnosti mijenjanja oblika krila tijekom leta zrakoplova. Oni su bili inspirirani analizama stručnjaka i znanstvenika iz Europe o letu crnih čiopa i orlova, ptica koje tokom svoga leta mijenjaju oblik krila koji odgovaraju režimu leta, kao što se vidi na slici 1, na primjer, pri slijetanju na vrh drveća ili pri lovljenju insekata u zraku. Te ptice su ujedno i najefikasnije u aktivnom letu, tj. najviše koriste oblik svojih krila u letu i one provode gotovo cijeli život u zraku, čak i spavaju u letu.

Studija znanstvenika iz Europe je pokazala da te ptice trostruko poboljšavaju svoje performanse u letu što čini morfozu krila slijedećim velikim napretkom u zrakoplovnoj industriji. Ti znanstvenici su dali indicije zrakoplovnim dizajnerima kako poboljšati krila zrakoplova i općenito let zrakoplova.

Tijekom testiranja sa prirodno uginulim čiopama i orlovima, u aerotunelima se pokazalo da tijekom sporijeg leta, ispružena krila pružaju maksimalnu učinkovitost leta i lete skoro duplo dalje. Kada bi svoja krila približili uz tijelo dalje od glave, u obliku strijele, došlo bi do boljih aerodinamičkih performansi te bržeg i pravocrtnijeg leta. Približena krila uz tijelo su također služila za brza nagla skretanja i nagibe u zraku jer u tome režimu letenja dolazi do velikih sila i do četiri puta veće tjelesne težine ptice te bi se ispružena krila slomila.



**Slika 1.** Promjena u obliku krila ptice čiope za razne režime leta

Izvor: www.wur.nl/UK/newsagenda/archive/news/2007/Aerodynamic\_performance\_of\_the\_swift\_unravelled

Daljnja istraživanja su otkrila da odgovarajuća koordinacija krila u određenom režimu leta, omogućuje i do 60% duži let u jednom zamahu krila te tri puta veću učinkovitost skretanja.

Ti rezultati doveli su do novog trenda u zrakoplovnoj industriji - izraditi zrakoplov koji bi mogao u letu učinkovito mijenjati oblik svojih krila ovisno o režimu letenja i tako poboljšati performanse, imati bolju sposobnost manevriranja, smanjiti troškove i potrošnju gorive te produljiti let zrakoplova.

Projekt morfoze krila zrakoplova agencije NASA-e je temeljena upravo na tim činjenicama i taj projekt teži izradi koncepta sa integriranim naprednim tehnologijama u cilju učinkovitog i višestruko prilagodljivog zračnog ili svemirskog vozila. Projekt morfoze krila zrakoplova zahtijeva razne pristupe sa makro, mikro, aerodinamičkih i strukturalnih stajališta. Morfoza označava bilo kakvu promjenu oblika ili transformaciju, no u kontekstu projekta morfoze krila zrakoplova, ona označava učinkovitu prilagodljivost zrakoplova svim režimima leta. Također, označava i razne promjene u odnosu na konvencionalne konstrukcije zrakoplova kao što su mehanički jednostavnije konstrukcije i konstrukcije manjih težina te učinkovitije iskorištenje energije i bolja pokretljivost.

Sve ove promjene omogućuju puno više novih uloga zrakoplova koji se prilagođavaju svim mogućim režimima leta te tako uspješno i učinkovito obavljaju svoje uloge u granicama sigurnosti.

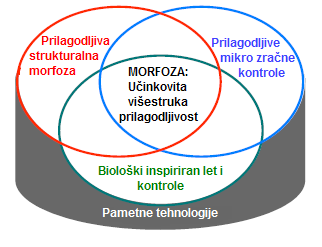
Morfoza se ne odnosi samo promjenu u obliku krila, već NASA-ini stručnjaci obraćaju pozornost aerodinamičke promjene oblika ili strukture da bi integrirali i spojili sve funkcije aerodinamike, strukture i kontrole zrakoplova. Na primjer, morfoza na nekim tipovima zrakoplova može biti kao strateško usmjeravanje mikro protoka zraka i kontrole strujanja zraka po nekim dijelovima konstrukcije sa ili bez većih promjena u obliku strukture.

Cilj projekta morfoze krila zrakoplova je da razvije napredna tehnologija i koncepti integriranih komponeneti koji bi omogućile učinkovitiju i višestruku prilagodljivost (morfozu) leta zrakoplova. Projekt je usmjeren prema dugotrajnim, visokorizičnim i visokoisplativim tehnologijama s obzirom na svoje potencijale. Tri fokusna područja ovog projekta su:

- prilagodljiva sturkturalna morfoza

- prilagodljiva mikro - zračna kontrola

- biološki inspirirani sustavi leta i kontrole



**Slika 2.** Grafički prikaz osnovnih elemenata projekta morfoze

Izvor: NASA's Morphing Project Research Summaries.pdf

Ta područja podupiru najnoviji sustav pametnih, nano i biološki inspiriranih materijala, elektronika i sistemske studije zvane “pametne tehnologije”.

Slika 2. prikazuje elemente morfoze krila zrakoplova. Ovaj multi-disciplinarni pristup omogućuje izuzetne mogućnosti u potrazi za novim inovacijama koje su moguće samo u području gdje se ovi svi elementi, tj. područja, sijeku.

Područje prilagodljive sturkturalne morfoze sastoji se od razvoja i testiranja multifunkcionalnih i prilagodljivih koncepata krila zrakoplova koja se mogu učinkovito prilagoditi različitim uvjetima leta koristeći pristupe izvan konvencionalnih kontrolnih površina.

Istraživanja u području prilagodljivih mikro - zračnih kontrola se fokusiraju na dinamičku promjenu općeg polja opstrujavanja zraka oko zrakoplova tako da se vrši interakcija i kontrola lokalne nestabilnosti protoka zraka i struktura za protok zraka.

U području biološki inspiriranih sustava leta i kontrola, fokus je na razumijevanju i prijenosu primjera iz prirode leta ptica u projekt, ali ne potpuno kopirajući biologiju.

Područje pametnih tehnologija uključuje sistemske studije i istraživanja materijala za razvoj novih “pametnih” materijala za pokretanje i aktivaciju senzora, koncepte sklopa aktuatora, mikroelektronike za napajanje pametnih materijala te za razvoj i nanošenje raznih pristupa naprednih kontrola za morfozne zrakoplove.

Sva ta područja uključuju stvaranje novih ili optimiziranje postojećih aktuatora, kontrolnih površina, opreme (posebice elektronike), senzora i ostalih struktura zrakoplova važnih za što bolji i efikasniji let.

**2.2. Razvoj i dizajn programa morfoze zrakoplovnih struktura**

Razvoj programa morfoze zrakoplovnih struktura (MAS - Morphing Aircraft Structure) je zasnovan na prijašnjim istraživanjima u sličnim područjima u zrakoplovstvu koja se ozbiljnije započinju proučavati tijekom 1920-ih godina kada je G.T.R. Hill konstruirao svoj Pterodactyl IV zrakoplov bez repa, prikazan na slici 3. Taj zrakoplov, koji je prvi put poletio 1931.godine, imao je mogućnost promjene kuta krila od 4.75º pomoću ugrađenog mehaničkog sklopa kotačića u trupu zrakoplova. Od te prvotne ideje danas su se razvili razni sustavi koji su sličili tom projektu kao što su promjena konstruktivnog kuta krila tijekom leta-VSW[[1]](#footnote-1) i promjena kuta nosa zrakoplova Concorde i Tu-144.



**Slika 3.** Pterodactyl IV sa promijenjivim krilima u obliku strijele

Izvor: Terrence A.Weisshaar-Morphing Aircraft Technology.pdf

Od 1990.godine, NASA je krenula u svoj projekt morfoze krila zrakoplova sa temeljima iz prošlosti no sa vizijama za budućnost.

Taj projekt se vodio u Langley centru za istraživanje sa glavnim ciljem otkrivanja tehnologija koji bi omogućili morfozu krila zrakoplova. Zadatak im je bio da razviju i ocijene napredne metodologije i integrirane koncepte komponenti koji bi omogućili učinkovitu geometrijsku prilagodbu krila zrakoplova raznim režimima leta. Od 2004. godine, projekt se proširio i nastavio s istraživanjem sa dodatnim industrijskim i vladinim agencijama kao što je agencija DARPA[[2]](#footnote-2).

Agencija DARPA je nastavila MAS program projektom morfoze krila sa ciljem integriranja novih tehnologija koje bi omogućile dizajn, konstrukciju i demonstraciju aerodinamički učinkovitih krila kao i njihovu morfozu.

MAS program je imao dva primarna tehnička cilja:

1. Razviti aktivnu strukturu krila koja bi mijenjala oblik te tako omogućila veliki raspon aerodinamičkih performansi i letnih kontrola koji nisu mogući sa konvencionalnim krilima.
2. Omogućiti razvoj operacijsko učinkovitih zrakoplovnih sustava i flote zrakoplova koji nisu mogući sa konvencionalnim zrakoplovima. To uključuje operacije mornarice i zračnih snaga.

Prva faza programa je bila razviti koncepte morfoznih krila koji bi vodili prema drastično drugačijim, promjenjivim zrakoplovima. Za ovaj posao su bila zadužena tri kontraktora, Lockheed-Martin (Palmdale, California), Hypercomp/NextGen (Torrance, California) te Raytheon Missile Systems (Tucson, Arizona) koji je više bio orijentiran konceptima projektila.

Druga faza programa se sastojala od testiranja modela raznih veličina u aerotunelima tvrtke NASA da bi se odredila izvedivost sustava u uvjetima stvarnog leta.

Treća faza se sastoji od konstruiranja prototipa za demonstriranje leta i letnih performansi. Uza sve to, teži se da se strukturalno oblikuju promjenjivi sustavi u strukturalnu efikasnost visokog stupnja koja bi smanjila nepotrebnu težinu krila.

Sva tri sudionika MAS programa prilagodili su se sustavnim pristupima i proveli funkcionalnu analizu koja je dala rezultat da se promjenom oblika krila i njegove površine (omogućavanje širokog raspona opterećenja raspoređenih po površini krila uslijed djelovanja težine zrakoplova) te promjenom raspona krila tvori nova klasa morfirajućih zrakoplovnih sredstava.

Glavni ciljevi MAS programa su strukturirani tako da omoguće dobre performanse glavnog sustava za:

* Brzinu reagiranja - kritično vrijeme koje je potrebno da se uređaji za promjenu oblika aktiviraju i u slučajevima nepredviđenih kriznih situacija
* Agilnost (pokretljivost) - brzo i lagano izvođenje letnih manevara kao i sposobnost napada na brze pokretne zračne i zemaljske ciljeve
* Trajnost leta (istrajnost, dolet)- sposobnost dominacije velikih operacijskih površina u dugom vremenskom periodu

Prvi koncept bespilotne letjelice koji je izašao iz projekta je od strane tvrtke Lockheed-Martin, zvan koncept sklapajućeg krila, koji je omogućavao varijacije u duljini raspona krila, promjenu vitkosti krila te promjenu efektivnog kuta strijelastog krila, čije su konfiguracije promjene oblika krila od početnog do završnog stanja prikazane na slici 4 - lijevo.

Drugi koncept promjenjivog kuta zamaha krila i promjenjivog kuta korijena tetiva krila je razvila tvrtka Hypercomp/NextGen Aeronautics, koji je također prikazan na slici 4 - desno. Taj koncept omogućava direktne promjene u korijenu duljine tetive krila te promjene kuta zamaha krila, a indirektno promjenu oblika krila gledano odzgo te promjenu vitkosti krila.

****

**Slika 4.** Koncepti morfoze krila zrakoplova MAS programa: Lockheed-Martin lijevo, NextGen Aeronautics desno

Izvor: Modeling and optimization for morphing wing concept generation.pdf

Dizajn sklapajućeg krila tvrtke Lockheed-Martin sastoji se od zglobnih spojeva na dva mjesta na krilu koji omogućuju kruto kretanje oblika krila na sve četiri primarne sekcije, a koncept tvrtke NextGen sadrži promjenjivu konfiguraciju ljuskaste strukture krila sa elastičnom oplatom da bi se postigla varijacija oblika krila.

Glavne aspekte morfirajućeg krila MAS programa čine slijedeći dizajnerski elementi:

* Skup tradicionalnih, tj. konvencionalnih krilnih podstruktura povezanih sa komponentama superstruktura koji su mehanizirani sa pokretnim zglobovima i okovima koji dopuštaju kruto gibanje sastavnih površina krila (npr. konvencionalna krila promjenjive geometrije- F-111, F-14, Tornado ili dizajn sklapajućih krila tvrtke Lockheed-Martin)
* Promjenjive (rekonfigurirajuće) i pokretne podstrukture spregnute sa elastičnom oplatom koja omogućuje promjenjiv oblik krila u letu (npr. koncept tvrtke NextGen)
* Kombinacija tih tipova krilnih sekcija koji imaju i fiksne i promjenjive, pokretne strukturne komponente

**2.2.1. Karakteristike i materijali Lockheed-Martin koncepta**

Koncept sklapajućeg krila tvrtke Lockheed-Martin se sastoji od krutog mijenjanja oblika i položaja krila tijekom leta da bi se omogućio što bolji uzgon, bolje manevriranje i što manje otpora kretanju zrakoplova u određenim režimima leta. Slika 5. prikazuje početni i završni stupanj promjene oblika krila, tj. morfiranu i nemorfiranu konfiguraciju krila. Ovaj inovativni dizajn “skriva” dio površine krila tijekom većih brzina i pri nižim visinama. Također, ovaj dizajn djelomično koristi i napredne materijale oplate krila da bi se održala glatkoća površine krila za dobru aerodinamičku učinkovitost kada se krila sklope tijekom leta.



**Slika 5.** Morfirajući dizajn krila tvrtke Lockheed-Martin

Izvor: Terrence A.Weisshaar-Morphing Aircraft Technology.pdf

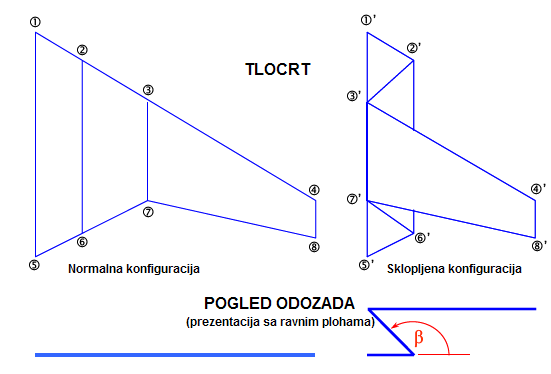
Da bi se ta krila mogla iz početnog ispruženog stanja transformirati u krajnje sklopljeno stanje potrebno je ugraditi piezoelektrične aktuatore na svakoj spojnoj sekciji krila. Aktuatori dopuštaju dizajnerima da optimalno i efikasno distribuiraju aktivacijsku silu i snagu za potrebe mijenjanja oblika krila.

Svaki koncept morfoze krila zrakoplova zahtijeva da aktuatori budu ugrađeni u interne mehanizme, obloženi sa kliznim i elastičnim aerodinamičnim površinama i sa dodatnim dijelovima za prijenos težine između oplate i kostura krila. To zahtijeva distribuirani niz aktuatora, mehanizma i materijala koji se srodno pomiču, tj. klize ili materijale koji se rastežu. Zahtjevi pri dizajnu tih mehanizma uključuju mnogo različitih gibanja i opterećenja te su istaknute brige oko spojnih dijelova, trenja i efekata deformabilnosti strukture krila pod opterećenjem kao i podopterećenja djelovanja aktuatora.

Performanse aktuatora, njegova snaga i sila aktiviranja su važne za uspješan dizajn. Veličina, težina i volumen aktuatora je također važna karakteristika aktuatora kao i opseg gibanja, pojasna širina i ponašanje prilikom otkaza ili greške aktuatora. Zaključavanje[[3]](#footnote-3) aktuatora je važno za krilo pod opterećenjem, ali i kada bi došlo do greške da se aktuator ne zakoči, on mora izdržati puno opterećenje krila.

Na slici 6. prikazana su mjesta aktuatora na primjeru dizajna Lockheed-Martin koja su označena zaokruženim brojevima. Ti aktuatori su ujedno i kontrolne točke krila koja se pokreću od strane pilota pomoću određenih naredbi elektroničkih uređaja, procesora i indikacije senzora pozicija koji su međusobno povezani. Parametri morfoze krila su vezani u algoritam koji se nalazi u elektroničkom procesoru sustava morfoze, skriptirani su u programskom jeziku Matlab, pokreću aktuatore i oni djeluju na spojne sekcije ili “mostove” u tri sekcije krila.

Raspored aktuatora po krilima je od velike važnosti kao i raspored težine krila. Cilj dizajnera je da se sa što manjim brojem aktuatora postignu potrebni manevri krila. Razvojni tim je sa genetskim algoritmom zaključio i ocijenio pozitivno 150.000 kombinacija od skoro 3x1099 mogućih kombinacija sa 350 aktuatora. To daje mogućnost dizajnerima za efikasnije i bolje kombinacije u budućim ocjenjivanjima dizajna.

****

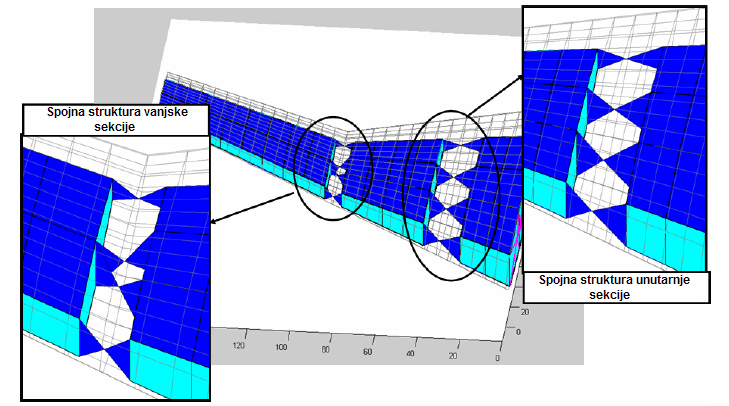
**Slika 6.** Ortografska projekcija koncepta sklapajućeg krila sa prikazom kontrolnih točki i parametar morfoze β

Izvor: Michael D. Skillen and William A. Crossley, Modeling and Optimization for Morphing Wing Concept Generation II; Part I: Morphing Wing Modeling and Structural Sizing Techniques.pdf

Parametar morfoze (β) je ujedno i kut morfoze krila koji se mijenja pomoću aktuatora od 0º do 135º. Spojni dio krila sa ostalim sekcijama gdje se obavlja gibanje i mijenja parametar morfoze krila mora biti čvrst i dobro pokretan. Posebno se obraća pažnja strukturalne čvrstoće na tim dijelovima krila jer oni prenose snagu i silu aktuatora na ostale krilne sekcije. Spojni dio ovisi o broju ramenjača i rebara krila, kao i o razmaku istih. Broj ramenjača i rebara za svaku sekciju krila ovisi o odabiru dizajnera i ne postoji točno određeni broj potrebnih ramenjača i rebara u nacrtu krila.

Na slici 7. je dan prikaz spojnog dijela sekcija krila i elemenata strukturalne membrane krila koji su spojeni od ramenjača sekcija sa točkom u osi spojnog okova.

Na svakoj pregibnoj točci krila, unutar kučišta spojnih okova, dva spojna čvorišta se nalaze na istoj prostornoj poziciji. Trokutasti element jedne sekcije krila spaja se sa čvorištem sekcije krila dok se drugi element spaja sa drugim čvorištem spojnog dijela krila. Sva čvorišta imaju isti otklon osim rotacijske slobode kretanja uzduž osi tetive aeroprofila koji ima ugrađenu torzijsku oprugu između dva čvorišta sa zadaćom prenošenja opterećenja na savijanje spojnog okova.



**Slika 7.** Ilustracija strukture spojnih okova (“mostova”) na modelu sklapajućih krila

Izvor: Michael D. Skillen and William A. Crossley, Modeling and Optimization for Morphing Wing Concept Generation II; Part I: Morphing Wing Modeling and Structural Sizing Techniques.pdf

Jedna od važnih karakteristika koncepta sklapajućeg krila koja omogućuje i samo sklapanje krila jest elastična oplata krila. Elastična oplata krila je već sada postala standard kod svakog novog koncepta budućeg zrakoplova jer omogućuje veću otpornost na razna opterećenja krila u letu a i postoji mogućnost da zamijene konvencionalne uređaje za povećanje uzgona i osnovne komandne površine leta.

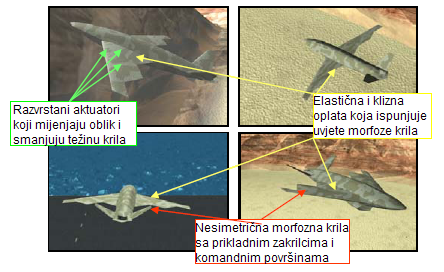
Izbor materijala za oplatu krila je vrlo selektivan i zahtjevan posao. Tražene karakteristike takvih materijala su velika prilagodljivost obliku krila, multifunkcionalna krutost oplate krila, mogućnost materijala da se vrati iz deformiranog stanja u početno, fleksibilnost, velika čvrstoća na savijanje kao i omogućivanje aktuatorima mijenjanje oblika pri manjim snagama, kompatibilnost spoja i sučelja materijala na zrakoplovu te sposobnost brtvljenja mogućih procijepa pri mijenjanju krila iz jednog oblika u drugi. Te karakteristike materijala najviše ispunjavaju polimeri memorije oblika ili SMP[[4]](#footnote-4) koji su slični fiberglasu (stakloplastici).

Stručnjaci iz Lockheed-Martina su se odlučili za te polimere koji djeluju na dvije faze, svaka sa drugačijim modulima. Kada se zagriju, ti polimeri ulaze u stanje sa niskom krutošću, u stanje “opuštenosti”, i tada se mogu lako deformirati pomoću aktuatora. Međutim, pri niskim temperaturama bi se stvrdnuli i očvrsnuli što je dobro za zadržavanje oblika. Zagrijavanje tih materijala je izvedeno pomoću određene jakosti struje koja se pušta kroz ugrađene vodiče unutar tih polimera debljine od 3.175 mm, a kada bi se protok struje prekinuo, materijal se vraća u kruto stanje. Oplata od tih materijala mora osigurati bešavni oblik aeroprofila i održati strukturalni integritet pod raznim pritiscima, naprezanjima, savijanju i ostalim opterećenjima tijekom letnih transformacija te istovremeno popuniti i prikrili sve procijepe i diskontinuitete zračne struje uzrokovane gibanjem većih površina krila zrakoplova. S takvim materijalima dizajneri imaju veliku mogućnost zamijeniti i odbaciti iz nacrta konvencionalna krilca ili zakrilca te razne zglobove i šarke. Te kontrolne površine pri letu zrakoplova se također pokreću pomoću aktuatora i senzora smještenih na mjestima konvencionalnih krilca i zakrilaca te tako poboljšavaju ukupne aerodinamičke performanse. Također, dobra raspodjela težine i opterećenja na krilima je jedna od važnih aerodinamičkih čimbenika na performanse zrakoplova i zato su stručnjaci osigurali dobre performanse krila sa tako velikom transformacijom površine krila, u ovom slučaju sa 50% promjene površine krila.

**2.2.2. Karakteristike i materijali NextGen koncepta**

Inženjeri iz tvrtke NextGen Aeronautics su dizajnirali malo drugačiji koncept morfoze krila. Njihov pristup unutarnje transformacije krila povećava, odnosno smanjuje, površinu krila pomoću dobro uklopljenih inovativnih materijala, aktuatora i kompjuteriziranog kontrolnog sustava koji utječe na transformaciju krila. Ta krila se mogu proširiti i suziti na nekoliko pozicija, “sakrivajući” dio krila unutar trupa. Svaka pozicija i transformacija krila daje najefikasniji oblik krila za potrebne aerodinamičke performanse zrakoplova u letu, bilo za veće ili za male brzine, ovisno o vrsti misije zrakoplova, da li je to izvidnička ili napadna misija.

Slika 8. prikazuje NextGen dizajn morfoze krila koji se s promjenom kuta krila u odnosu na trup mijenja i reducira površina krila od oblika efikasnog krstarenja visoke vitkosti do efikasnog krozvučnog oblika letenja sa oštrijim kutem krila u odnosu na trup. Slika također pokazuje osnovne dijelove i karakteristike dizajna kao što su mjesta aktuatora, uloga materijala i oplate krila te lokacije komandnih površina.



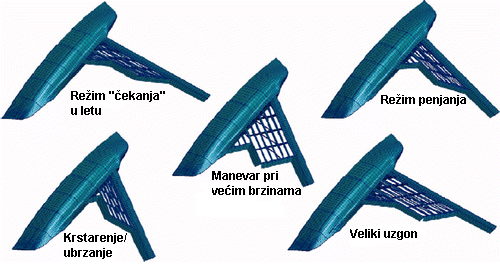
**Slika 8.** NextGen Aeronautics koncept morfoze krila, zvan Batwing (“krilo šišmiša”)

Izvor: Terrence A.Weisshaar-Morphing Aircraft Technology.pdf

Najveći tehnički izazov ove koncepcije krila je bio dizajn oplate zrakoplova i izbor materijala oplate. Uvjete koje mora ispunjavati ta oplata i materijal je da omogućuje veliko rastezanje i sužavanje površine oplate krila te da učinkovito podnosi razna opterećenja bez pucanja materijala. Kod NextGen koncepta, oplata krila se rasteže i do 100% za slijetanja i još može podnijeti opterećenja. Materijal koji se koristi u ovom konceptu je silikonska elastomerna oplata sa temeljnom vrpčastom strukturom koja poboljšava krutost krila izvan trupa zrakoplova pri rastezanju i do 100% te laka i pokretna krilna podstruktura. Da bi se to rastezanje omogućilo, tj. da bi se mijenjao kut krila u odnosu na trup i općenito transformacija krila zaslužan je elektro-mehanički aktuator, njih devet u ovome slučaju, koji se svaki sastoji od jednog električnog motora (zasad u svrhe testiranja na bespilotnoj letjelici koji bi u pravom mjerilu bio mnogo jači ili višestruki).

Silikonski elastomerni materijali su kompozitni materijali mikrostrukturalnog programa sa pojačanim vlaknima u strukturi i jako su rastezljivi i čvrsti. Prilikom razvlačenja krila u položaj ispruženih krila, elastomeri moraju izdržati sva opterećenja u letu, opterećenja uzrokovana djelovanjem aktuatora i vlastita opterećenja materijala na rastezanje. Materijal oplate može biti pojačan sa karbonom, staklom, aramidom ili sa nano-pojačanjima.

Kostur krila je podijeljen u sustav ćelija koje pri rastezanju postaju paralelogram i imaju velika svojstva rastezanja i sužavanja bez da naruše integritet okolnih struktura zidova uzdužnica, rebara ili ramenjače. Na slici 9. je dan jednostavni prikaz zglobnog elastičnog sustava uzdužnica i rebara koje su linearno razmaknute i pri otklonu krila na određenu poziciju i oblik, visokoprecizni kontrolni pretvornici, tj. senzori bilježe njihov razmak te tako šalju stanje i pozicije krila glavnoj kontrolnoj ploči. Napadna i izlazna ivica krila, kao što se vidi na slici 9., su fiksno povezana sa mrežnom strukturom krila i trupa, kao i donekle konvencionalne kontrolne površine, no s mogućnošću gibanja s obzirom na transformaciju krila.



**Slika 9.** Prikaz kostura krila kroz pet letnih konfiguracija krila, NextGen koncept

Izvor: Zheng Min, Vu Khac Kien and Liew J.Y. Richard; Aircraft morphing wing concepts with radical geometry change.pdf

Tvrtka NextGen Aeronautics, u suradnji sa agencijom DARPA, američkim zračnim snagama i tvrtkom Boeing, razvila je ovaj oblik transformacije oblika krila sa osnovnom karakteristikom mijenjanja geometrije krila koja se prilagođavaju brzini kretanja zrakoplova čija se ukupna površina krila mijenja za 40%, odnosno raspon krila se kreće od 35º u razvučenoj konfiguraciji do 15º u skupljenoj konfiguraciji uz maksimalnu brzinu od 185 km/h koju je postigla njihova prva inačica koncepta zvana MFX-1. Nakon dobivenih rezultata testiranja, koje će kasnije biti navedena, inženjeri iz tvrtke NextGen su počeli raditi na novoj, poboljšanoj inačici zvanoj MFX-2. Najvažnije poboljšane karakteristike modela MFX-2 u odnosu na prošlu inačicu su mogućnosti biranja između autopilotskog sustava tvrtke Aero Controls ili daljinskog upravljanja, bolja fleksibilnost, dvomotorni mlazni pogonski sustav dok je MFX-1 imao jedan mlazni motor, mogućnost izvršavanja do 73% promjene raspona krila te 177% promjene vitkosti krila. Također, imao je promijenjen oblik izlaznih ivica krila, dok je MFX-1 imao izlazne ivice u obliku slova W, MFX-2 ima ravniji i jednostavniji oblik izlaznih ivica krila.

**2.2.3. Testiranja i budućnost programa**

Testiranja tih koncepata tvrtki Lockheed-Martin i NextGen Aeronautics su započela nakon obavljenih pojedinačnih testiranja materijala i opreme te konstruiranja testnih modela, što je označavalo drugu fazu MAS programa. Testni modeli variraju ovisno o mjerilu i o fokusnom području dijela koncepta ili režimu leta za koje se vrši testiranje. Prvi dio faze testiranja se vršio u aerotunelima agencije NASA Langley TDT[[5]](#footnote-5) i to na polu-modelima bespilotnih letjelica tvrtki NextGen i Lockheed-Martin. Ti modeli su imali vlastitu pokretnu snagu, aktuatore i kontrolne sustave koji su pokretali krila brzo i precizno kroz sve oblike i pozicije. Brzina strujanja zraka se kretala čak do 0.9 Macha, a visina do 15.250 metara.

Na slici 10. je prikazan polu-model koncepta NextGen, MFX-1, pri kojem se testira njegova promjena oblika krila u aerotunelu čija je brzina transformacije oko 15 sekundi. Kod testiranja u aerotunelima posebna pažnja se posvetila materijalu oplate i njegovom rastezanju. To je posebno pomoglo u poboljšanju dizajna koncepta tvrtke NextGen jer je pri testiranju u zračnim tunelima došlo do nekoliko manjih pukotina u oplati prilikom povećanja opterećenja, ali to se ubrzo ispravilo manjim zahvatom u dizajnu koncepta. Testiranja su pokazala da se dizajn oplate tvrtke Lockheed-Martin može rastegnuti i do 100%.

Drugi dio faze testiranja je bio na stvarnim veličinama bespilotnih letjelica, također pod nadzorom raznih stručnjaka tvrtki i agencije DARPA. Ta testiranja su se provodila na otvorenim prostorima tvrtki NextGen (Camp Roberts) i Lockheed-Martin (Helendale).



**Slika 10.** Prikaz testiranja koncepta MFX-1 tvrtke NextGen u NASA TDT aerotunelu

Izvor: www.flightglobal.com/articles/2006/08/15/208487/success-for-first-in-flight-morphing-aircraft-as-small-californian-start-up-nextgen-flies

Pri testiranju koncepata bespilotnih letjelica, prvi problemi su nastali konceptu tvrtke Lockheed-Martin zbog problema u softveru letnih kontrola te je dva puta došlo do nezgode prilikom polijetanja koncepta. To se ubrzo ispravilo tako da su zamijenili motor i stavili novi sustav letnih kontrola tvrtke Athena Technologies. Tijekom svog leta na daljinsko upravljanje, koncept je pri transformaciji krila koristio snagu baterije postavljene unutar trupa. Testiranja su bila uspješna i krenulo se u daljnja poboljšanja i modifikacije u cilju bolje agilnosti letjelice te daljnjih istraživanja mogućnosti letjelice i ponašanja u slučajevima otkazivanja nekog sustava (tvrtka Skunk Works), uzimajući u obzir i nove dizajne poput teleskopskih krila.

Nakon testiranja u zračnim tunelima, što je trajalo 18 mjeseci, započela je treća faza MAS programa bespilotne letjelice. Koncept tvrtke NextGen, MFX-1, je dobio svog nasljednika, MFX-2. Njegova testiranja su bila čak i uspješnija od koncepta tvrtke Lockheed-Martin, posebice mogućnosti autopilota i performansi podsustava. MFX-2 je izveo pet demonstrativna leta.

Uspješno je održavao visinu i transformirao krila u roku od 5 do 10 sekundi te imao mogućnost rastezanja oplate do 100%. Iako je bilo manjih problema pri slijetanju letjelice, to se ispravilo dodatnim ažuriranjem sustava upravljanja. Ovaj koncept se pokazao vrlo agilnim i fleksibilnim dizajnom, a jedna od budućih razmatranja kod ovog koncepta je ta da se integriraju razne antene u strukturu oplate letjelice koje bi prenosile sva opterećenja na krilu.

Budućnost ovih koncepata ovisi o napretku tehnologija i u usavršavanju postojećih koncepata, no ne isključuje se i proširenje vizija stručnjaka koje dosežu i do 20 godina unaprijed. Kod ova dva koncepta najvažnije je napraviti modernu, multifunkcionalnu i obrambenu bespilotnu letjelicu koja bi omogućila razvoj tehnologije promjene oblika krila u svim granama zrakoplovstva, posebice u vojnom zrakoplovstvu u čijim bi misijama uloga bila izvidnica u visokom letu pri malim brzinama te istovremeno i mogućnost brzih napadnih manevara prema raznim kopnenim i zračnim ciljevima što u današnje vrijeme nije zastupljeno kod niti jednog zrakoplova.

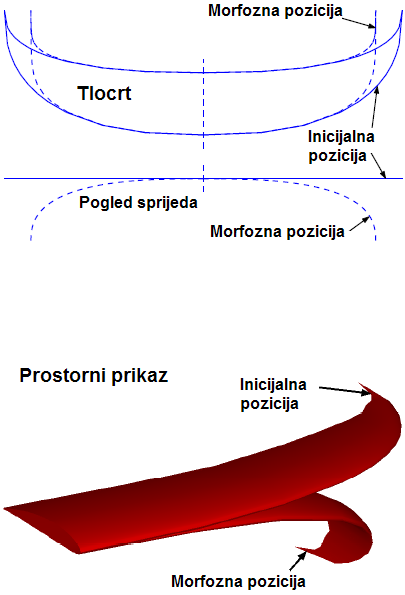
**2.3. Razvoj i dizajn HECS programa**

HECS[[6]](#footnote-6) program je dio projekta morfoze krila zrakoplova agencije NASA koji analiziraju biomimetriku ptica i osnovnih karakteristika ponašanja krila u letu i zatim to implementiraju na dizajniranje krila zrakoplova. To uključuje analiziranje svih aeroelastičnih efekata na krila, dinamičkog jedrenja krila i skupnu kontrolu krila. Rješenje do kojeg su došli stručnjaci iz NASA-e zove se krilo sa hiper-eliptičnim savijajućim rasponom, HECS krilo.

Iz dugogodišnjih proučavanja leta ptica, ostalih programa transformacije krila i sa napredovanjem modernih tehnologija i materijala došlo se do stvaranja ovog programa sa ciljem konstriranja što boljeg i modernijeg krila sa što boljim i multifunkcionalnim performansama u odnosu na konvencionalna krila. Fokus ovog programa je konstrukcija učinkovitog krila koje bi integriralo najvažnije karakteristike krila ptica u letu i naprednu zrakoplovnu tehnologiju i konstrukciju.

U istraživačkom centru NASA-e (Langley) se proučava nova konfiguracija krila sa hiper-eliptičnim savijajućim rasponom koja bi mogla voditi do povećane stabilnosti i kontrole, smanjenja induciranog otpora te poboljšane aerodinamičke učinkovitosti tijekom leta zrakoplova. Međutim, tijekom polijetanja i slijetanja, konvencionalni dizajn krila bi bio preporučen te se odatle veže potreba za krilom sa promjenjivom konturom tijekom leta.

Dizajn HECS krila se vidi na slici 11. Sastoji se od dvije konfiguracije oblika krila, prvobitna konfiguracija ravnog “konvencionalnog“ oblika krila te transformiranog, savijenog oblika krila. Prvobitan ili inicijalan oblik krila izgleda kao normalno fiksno krilo koje se proteže od trupa zrakoplova lagano prema unazad, dok u morfoznom, krajnjem obliku, krilo ima hiper-eliptičan oblik napadne i izlazne ivice pomaknut unazad.

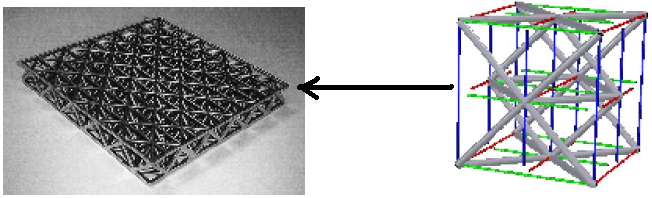


**Slika 11.** Prikaz konfiguracije HECS krila

Izvor: Matthew D. Stubbs; Kinematic Design and Analysis of a Morphing Wing.pdf

**2.3.1. Karakteristike i materijali HECS krila**

Kod ovog koncepta kontrola uzdužnog i poprečnog nagiba te kontrola smjera se vrši morfozom cijelog krila, posebice vrha krila. Da bi se to postiglo, stručnjaci su razvili posebne strukturne nosače i materijale koji su raspoređeni duž krila. Ti nosači, prikazani na slici 12., su izrađeni od pojedinačnih ćelija koji su međusobno zavisne i sadrže tetive od kablova koji ih pokreću. Taj strukturni spoj služi kao pokretni, klizni zglob za morfozu krila. Ćelije unutar tog strukturnog nosača su spojene preko usuglašenih zglobova te tako međusobno prenose momente savijanja krila. Strukturni materijal koji se nalazi oko tih nosača se sastoji od legura memorije oblika (SMA-Shape Memory Alloy) te tako pri mijenjanju i otpuštanju kablova koji pokreću cijelu strukturu nosača krila vraćaju oblik krila u svoj prvobitni položaj ili vrše promjenu oblika krila pod djelovanjem postojećih aerodinamičkih sila.



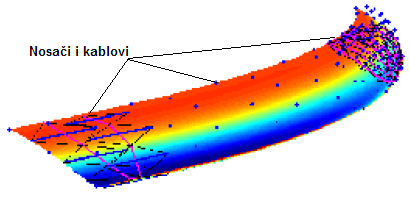
**Slika 12.** Prikaz strukturnih nosača i aktuatorskih tetiva HECS programa

Izvor: D. S. Ramrkahyani,G. A. Lesieutre,M. Frecker,S.Bharti; Aircraft Structural Morphing using Tendon Actuated

Compliant Cellular Trusses.pdf

Nekoliko obećavajućih prednosti ovih ćelijskih nosača su: 1) struktura je lagana 2) glatka i precizna promjena oblika krila, 3) omogućuje postavljanje oplate duž krila, 4) kablovi imaju veliku sposobnost aktiviranja.

Kod HECS krila primarni oblik deformacije je savijanje krila po razmahu sa većim savijanjem pri vrhu krila, pa je stoga raspored ćelijskih strukturnih nosača vrlo bitan. Slika 13. pokazuje njihov raspored duž gornje i donje površine krila. Ovisno gdje se nalazi nosač, na gornjoj ili donjoj površini, ima različito postavljene kablove i čvorišta koji mu omogućuju gibanje i samim tim morfozu krila.



**Slika 13.** Prikaz rasporeda strukturnih nosača HECS krila

Izvor: D. S. Ramrkahyani,G. A. Lesieutre,M. Frecker,S.Bharti; Aircraft Structural Morphing using Tendon Actuated

Compliant Cellular Trusses.pdf

Dizajn oplate HECS krila također mora biti kvalitetan tako da omogućuje morfozu krila dok se prenose razna aerodinamička opterećenja tijekom leta. Oplata HECS krila mora imati nisku membransku (unutarnju) krutost koja omogućuje lakoću morfoze i smanjuje sile aktivacije morfoze, visoku krutost sa vanjske strane da bi mogla prenositi aerodinamička opterećenja i zadržavati svoj aerodinamički oblik. Te uvjete zadovoljavaju visoko-naprezajući materijali kao što su superelastični SMA materijali, kompoziti elastomera jakih snaga te neprobojno-napete strukture. Dizajn oplate i materijala može biti od više slojeva, od savijene unutarnje oplate koja se nalazi ispod elastične oplate krila te od segmentirane oplate koja klizi jedna o drugu tijekom deformacije krila. Segmentirana oplata se čini najprikladnija HECS krilu jer najbolje zadovoljava tražene uvjete i lako se nadovezuje na čvorišta ćelija strukturnih nosača.

**2.3.2. Testiranja i budućnost koncepta**

Testiranja su se vršila u Cornell zračnim tunelima malih brzina na brzinama od 65 km/h do 80 km/h da bi se održao planarni oblik krila. Jedan od problema pri testiranju je bio vrh krila koji se najviše deformirao te je bilo potrebno ugraditi 50% više kablova, tj. žica da bi vrh krila izdržao aerodinamičke sile i opterećenja tijekom leta. Također, kutovi transformacije krila su se smanjili za 5-10% da bi se očuvao životni vijek SMA žica i materijala.

Rezultati dosadašnjih testiranja su pokazali da se mogu uspješno kontrolirati sve aerodinamičke sile i kretanja pomoću vrha HECS krila, no teško je sa sigurnošću odrediti dali je HECS program morfoze krila dobar i isplativ program zbog raznih faktora i odnosa same težine krila i količine opterećenja krila. Testiranja HECS krila na bespilotnim letjelicama su još u tijeku i ostaje još mnogo prostora napretku da bi se došlo do brzih i glatkih promjena oblika krila.

Budućnost ovog projekta i daljnja istraživanja se odnose na nove i lakše aktuatore uz povećanje broja aktuatora na krajevima krila koji bi ujedno i smanjili težinu krila te poboljšali snagu momenta kontrole oblika krila. Također, dolazak novih materijala, polimera memorije oblika (SMA), bi smanjili potrošnju snage pri zagrijavanju tih materijala kod promjene oblika. Napredovanje ovog programa je postepeno i sa pojavom novih tehnologija i novih konstrukcijskih rješenja krila, proširiti će se sposobnosti HECS krila i tako omogućiti višestruke uloge zrakoplova tijekom letenja.

**2.4. Budućnost morfoze krila zrakoplova**

Daljnje napredovanje tehnologije i potreba za novim tehnološkim rješenjima krila i zrakoplova općenito, osigurava sigurnu budućnost raznim novim konceptima u konstrukciji krila u kojima glavnu ulogu ima morfoza krila zrakoplova. Sve veća težnja prema stvaranju zrakoplova koji bi se mogao u zraku prilagoditi trenutačnom zadatku i uvjetima letenja, potiče stručnjake sa različitih područja na suradnju u istraživanju novih zrakoplovnih tehnologija i materijala.

Projekt morfoze krila se nastavlja razvijati u smjeru bespilotnih letjelica, a posebna pažnja se usmjerava vojnim zadacima i sposobnostima letjelica koje bi trebale zadovoljiti određene vojne zahtjeve te svojom uspješnom demonstracijom sposobnosti osigurati mjesto u vojnim sredstvima. Taj napredak bi također omogućio razvoj morfoze krila za civilne upotrebe, no to je pogled u budućnost koja iziskuje mnoga testiranja novih konstrukcijskih rješenja u raznim konceptima morfoze krila.

Dizajneri tih koncepata ne smiju izgubiti iz vida činjenicu da njihov zrakoplov nije sustav, nego dio sustava sa centralnom namjenom. Pretjerana briga oko kompleksnosti zrakoplova ili o troškovima, bez pogleda u sustavnu učinkovitost ili neučinkovitost, čini njihov koncept neproduktivnim.

Buduće generacije programa morfoze krila, kao što su DARPA MAS program ili HECS program, će promijeniti i poboljšati postojeće programe uz napredovanje tehnologija i tehnoloških spoznaja kao što su umjetna inteligencija, nanotehnologija i bio-mimetrika, te raznih tehnoloških materijala koji imaju senzore i samoaktivacijske sposobnosti.

Inovacija nije linearan posao i mnoge discipline pri istraživanju ne napreduju jednakim ritmom te je potrebno neko vrijeme da se sve kockice poslože. NASA je nagovijestila da bi moglo proći i do 20 godina do prikladnog i efikasnog modela zrakoplova koji bi efikasno mijenjao svoj oblik krila za razne režime letenja.

**3. AWIATOR PROJEKT**

**3.1. Osnovne značajke AWIATOR projekta**

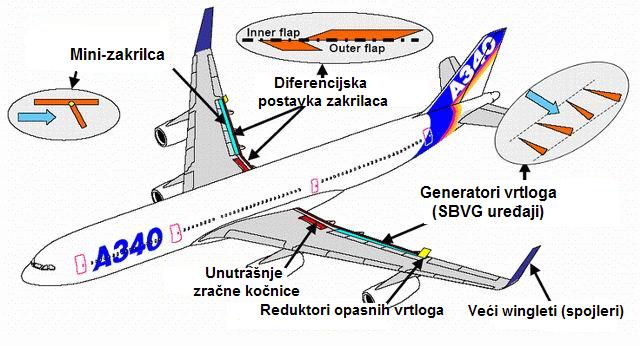
AWIATOR[[7]](#footnote-7) projekt je se bazira na implementiranju novih zrakoplovnih tehnologija i uređaja u postojeće sustave krila zrakoplova. Taj inovativni istraživački projekt zrakoplovne industrije, osnovan od strane Europske Unije, uključuje razne inovativne tehnologije kao što su mini-zakrilca, reduktore vrtloga te detektore naleta vjetra što najavljuje dolazak lakših i “inteligentnijih” zrakoplova koji trenutno reagiraju na promjene u brzini vjetra i ostale nepredvidljive uvjete leta zrakoplova.

Ukupni cilj ovog projekta je integriranje naprednih tehnologija u konfiguracije fiksnih krila sa što većim korakom u poboljšanju ukupne učinkovitosti zrakoplova. Da bi se to postiglo trebaju se ispuniti slijedeći industrijski ciljevi:

* reduciranje opasnosti vrtloga - smanjenjem ove pojave bi se smanjila udaljenost i razmak između dva zrakoplova za 1 nm u letu jednog iza drugog te tako smanjio ekonomski trošak u sektoru zračnog prostora;
* primjenjivanje specifične letne procedure sa novim uređajima što bi smanjilo buku za 2 EPNdB[[8]](#footnote-8);
* povećanje performansi zrakoplova u krstarenju i pri malim brzinama - koristeći nove uređaje i nove strategije kontrole opterećenja, za 2% bi se smanjilo izgaranje goriva te bi se za 2% povećao odnos uzgona i otpora;
* smanjenje strukturalne težine zrakoplova do 10% primjenjivanjem nove strategije kontrole opterećenja;
* aerodinamičke karakteristike, sustavi i strukture će biti optimizirani sa multi-disciplinskim pristupom kontrole distribucije uzgona, vrtloga i opterećenja krila.

**3.2. Inovacijska tehnologija AWIATOR projekta**

Tehnologija koja se koristi u AWIATOR projektu je kombinacija inovativnog softvera sa novim i sofisticiranim tehnologijama ugrađenim na krila zrakoplova koje rezultiraju boljom učinkovitosti i smanjenjem težine krila. Zbog toga krila reagiraju više na organski način na razne uvjete i promjene vjetra.



**Slika 14.** Osnovne tehnologije AWIATOR projekta

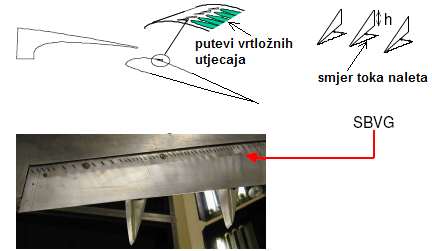
Izvor: www.tu-berlin.de/ILR/FMR/FORSCHUNG/AWIATOR/awiator

Na slici 14. su prikazane osnovne tehnologije AWIATOR projekta koje se testiraju na putničkim modelima zrakoplova Airbus A340. Te tehnologije, od kojih su mnoge inovativne, se sastoje od modificiranih unutrašnjih zračnih kočnica, sustava senzora turbulencija, strategija kontrole opterećenja krila, većih *wingleta*, reduktora opasnih vrtloga, mini-zakrilaca i od generatora vrtloga na zakrilcima krila (SBVG[[9]](#footnote-9)-a). Za razliku od ostalih tehnologija, nove zračne kočnice i veći *wingleti* su samo modificirane i optimizirane verzije konvencionalnih modela radi boljih performansi pri slijetanju i smanjenja opasnih vrtloga krila zrakoplova.

Jedna od inovacija u AWIATOR projektu su ugrađeni generatori vrtloga na površinama zakrilca (SBVG), a prikazani su na slici 15. Ti uređaji kontroliraju granični sloj zakrilaca dodavajući moment graničnom sloju na površini zakrilaca i time kontroliraju ili “odgađaju” separaciju graničnog sloja te tako poboljšavaju performanse zrakoplova pri slijetanju. Ti uređaji, koji se nalaze na gornjoj površini zakrilaca, kontroliraju granični sloj kada se zakrilce otkloni, a kada je zakrilce povučeno, nalaze se ispod gornjake aeroprofila krila.

Potencijalne prednosti SBVG uređaja uključuju:

* veći kutovi pri otklanjanju zakrilaca na izlaznim ivicama krila; bolji uzgon pri slijetanju zrakoplova, a time i mogućnost smanjenja brzine zrakoplova koja rezultira smanjenjem buke pri slijetanju.
* mogućnost korištenja pri polijetanju i slijetanju; smanjenje odvajanja zakrilaca zbog manje osjetljivosti na razmak od krila.
* mogućnost konstruiranja novog dizajna zrakoplova sa manjim površinama zakrilaca, no sa puno većim kutovima otklanjanja zakrilaca; smanjena težina i kompleksnost krila, a iste performanse pri slijetanju i polijetanju.



**Slika 15.** Prikaz generatora vrtloga na zakrilcu krila (SBVG)

Izvor: David Sawyers; AWIATOR project perspectives:passive flow control on civil aircraft flaps using SBVGs.pdf

Druga važna tehnologija u projektu je senzor naleta vjetra koji je dio LIDAR[[10]](#footnote-10) sustava detekcije turbulencije zraka. To je uređaj koji je ugrađen na napadnu ivicu krila da bi detektirao “džepove” tlaka, promjenu brzine vjetra te turbulenciju koja uzrokuje neugodan let. Da bi eliminirao turbulenciju, senzor trenutno odašilje informacijski signal u uređaj ugrađen u konvencionalna zakrilca i u nove kontrolirajuće uređaje na izlaznim ivicama krila koje se pokreću kao mini-zakrilca te tako povećavaju stabilnost zrakoplova. Ukupni efekt toga sustava na zrakoplov rezultira mogućnošću da svako krilo diskretno reagira na sile koje djeluju na njih, kao što krilo ptice reagira na promjenu struje zraka u letu. Uz to što mini-zakrilca omogućuju mirniji let zrakoplova, njihova druga prednost je to što pružaju veću sigurnost i efikasnost.

Drugim riječima, redistribuiranjem opterećenja na krila zrakoplova posebnom strategijom rasporeda sila i opterećenja ili samim konstrukcijskim rješenjima ili uređajima, stvara se mogućnost konstruiranja lakših i tanjih konstrukcijskih dijelova krila, krila više ne moraju biti teška, robusna i čvrsta kao danas, a kao rezultat dobije se poboljšana efikasnost potrošnje goriva te lakši i sigurniji zrakoplov.

**3.3.Rezultati testiranja**

Rezultati testiranja tehnologija i uređaja AWIATOR projekta su se pokazali uspješnima te su se postigli sigurniji, ugodniji i ekološki prihvatljivi letovi zrakoplova. Testiranja su se izvodila kroz par faza testiranja u zračnim tunelima i testiranja na zrakoplovu Airbus A340.

Glavni rezultati najistaknutijih uređaja:

-Povećani *wingleti*: novi, povećani wingleti visine 3,73 metara su bili ugrađeni na A340-300 i testiranja su pokazala poboljšanja u strukturalnim i aerodinamičkim karakteristikama te njihovu sposobnost većeg smanjenja otpora od standardnih *wingleta* kao i smanjenje omjera potrošnje goriva.

-Modificirane zračne kočnice: dizajneri su napravili nekoliko otvora na donjem dijelu kočnice, tj. spojlera da bi poboljšale performanse istih. Otvori su preusmjeravali strujanje zraka prema krilu, što dalje od repa zrakoplova, te tako omogućili lakše upravljanje zrakoplova. Ta promjena je napravljena na novim, unutarnjim zračnim kočnicama koje pružju veći aerodinamički otpor i bolje poniranje zrakoplova.

-Modificirana zakrilca: ugrađeni generatori vrtloga (SBVG) i mini-zakrilca su poboljšala performanse pri malim brzinama zrakoplova zbog većih kutova otklanjanja zakrilca, do 35º od prijašnjih 31º, sa zanemarenim povećanjem otpora. Također, vidljiv je budući potencijal novih, jeftinijih, lakših i jednostavnijih sustava zakrilaca.

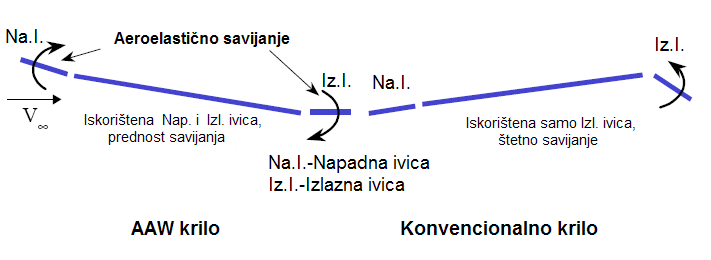
-Sustav senzora turbulencija: turbulencijski senzori smješteni na krilima i trupu zrakoplova šalju očitanja na zaslon u kokpitu te tamo piloti procjenjuju intenzitet turbulencija i određuju dali će ih zaobići ili proći kroz njih. Ako se piloti odluče proći kroz njih, LIDAR sustav senzora će nezavisno upravljati potrebnim zrakoplovnim površinama (mini-zakrilca) da bi let bio što ugodniji.

Demonstracije raznih testnih letova zrakoplova A340, čiji su novi dijelovi prethodno bili podvrgnuti raznim kompjuteriziranim testiranjima i simulacijama u zračnim tunelima te nekoliko zemaljskih testiranja, su bila pozitivno ocijenjena od strane stručnjaka. S obzirom da su se testiranja vodila na jednom modelu zrakoplova, preostaje još mnogo testiranja i procjenjivanja isplativosti određenih uređaja kao i njihova implementacija u ostale modele civilnih zrakoplova. Međutim, uređaji AWIATOR projekta se sve više koriste na postojećim zrakoplovima kao dodatno poboljšanje njihovih letnih karakteristika, te kao posljedica toga, projekt je omogućio stručnjacima i dizajnerima više slobode i inovacije pri konstruiranju zrakoplova.

**4.PROJEKT AKTIVNOG AEROELASTIČNOG KRILA**

**4.1.Osnovne značajke**

Projekt aktivnog aeroelastičnog krila (AAW[[11]](#footnote-11)) predstavlja novi pristup dizajnu struktura zrakoplovnog krila. Tehnologija koristi statične aeroelastične deformacije pri manevriranju zrakoplova. Konvencionalna filozofija dizajna zrakoplovnih krila smatra aeroelastičnu deformaciju krila štetnom za opću aerodinamiku i performanse zrakoplova, jer pri izvršavanju manevra kotrljanja postoji mogućnost pojave fenomena obratnih kontroli krilca zbog promjene krivine krila i izvijanja krila i krilca te oni ne mogu proizvesti kotrljajući moment krila.



**Slika 16.** Prikaz djelovanja krila pri manevru kotrljanja AAW krila i konvencionalnog krila

Izvor: P.M.Flick, M.H.Love, P.Scott Zink;The Impact of Active Aeroelastic Wing Technology on Conceptual Aircraft Design.pdf

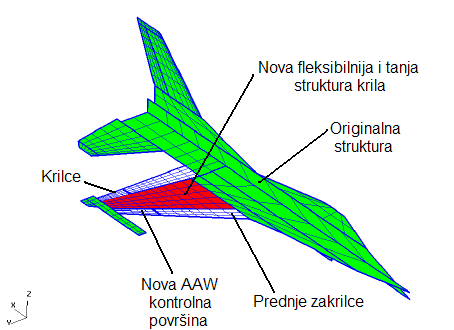
Tehnologija projekta Aktivnog aeroelastičnog krila integrira dizajn letnih kontrola da bi unaprijedili aerodinamičke, kontrolne i strukturne performanse zrakoplova. AAW je projekt tvrtke NASA Dryden. Iskorištava svojstvenu strukturnu fleksibilnost kao prednost u kontroli, koristeći kontrolne površine napadne i izlazne ivice krila u cilju aeroelastičnog oblikovanja krila. Cijelo krilo djeluje kao kontrolna površina zrakoplova te površine napadne i izlazne ivice djeluju sukladno kao tabulatori. Snaga zračne struje se koristi za savijanje krila u željeni oblik. Stupanj deformacije aeroprofila krila ne mora nužno biti veći od stupnja deformacije konvencionalnih krila, međutim, deformacija daje svoju prednost pri manevriranju, što pokazuje slika poprečnog presjeka krila (slika16.).

AAW krilo se može koristiti za stvaranje velikog autoriteta kontrole pri okretanju zrakoplova oko uzdužne osi pod velikim dinamičkim tlakom i omogućava kontrolu manevarskih opterećenja krila za simetrične i asimetrične manevre. Ostale prednosti AAW krila je u tome što su dizajneri koristili jača rebara krila i deblju čvršću oplatu pri konstrukciji krila. Također, prednost AAW tehnologije konstrukcije krila je to što omogućuje težinski kompetitivno krilo, smanjenje ukupnog otpora, povećanje doleta zrakoplova i smanjenje potrošnje goriva jer se koristi aerodinamički efikasnije krilo sa povećanom vitkošću krila.

**4.2.Dizajn projekta**

AAW krilo ne zahtijeva tehnologiju “pametnih” struktura kao nova tehnološka rješenja konstrukcije krila ranije navedena u radu, niti napredne koncepte aktuatora ili tehnike zakona adaptivne kontrole, ali je moguće da se u budućnosti iskoriste neke od tih tehnologija. Ključna razlika između AAW pristupa dizajna krila i konvencionalnog dizajna je u eksploataciji aeroelastičnih metoda tijekom procesa dizajna. AAW pristup otklanja statična aeroelastična ograničenja u dizajnu krila. Također, projekt proširuje dizajnerski prostor razvojnim stručnjacima tako što omogućuje tanji aeroprofil i veću vitkost krila čime bi takovo krilo bilo težinski konkurentno geometrijski krućim oblicima krila.

Studije su pokazale da AAW projekt otvara mogućnost konfiguracija sa znatno smanjenim površinama repnih površina zrakoplova. To istraživanje je dosta otežalo rad dizajnerima jer treba proći mnogo vremena za testiranja i određivanje najbolje konfiguracije AAW krila. Međutim, da bi omogućili fleksibilnost i pogodne momente savijanja krila, stručnjaci su iskoristili kompjuterske uređaje i metode koje kombiniraju aerodinamičke, statičke aeroelastične analize i analize vibracija sa strukturalnom optimizacijom krila, ASTROS[[12]](#footnote-12) optičke senzore te NASA kompjuterski program za analizu strukture. Stručnjaci iz NASA-e su odlučili AAW krilo napraviti na borbenom zrakoplovu F/A-18, posebnog naziva X-53, koji je zbog svojih lakih i tanjih krila poslužio kao dobar model za testiranje. Pri ugradnji ovog krila na zrakoplov F/A-18, stručnjaci su preko algoritama programa za analizu aerodinamičkih struktura dobili najpovoljniju geometriju krila baziranu na površini krila, vitkosti krila, suženju krila te kutu zamaha tetive aeroprofila krila. Algoritimi su također definirali torzije momenata krila i lokaciju kontrolnih površina na napadnim i izlaznim ivicama koje se može vidjeti na slici 17., gdje je zelenom bojom označena originalna struktura zrakoplova, crvenom bojom paneli tanke aeroelastične strukture krila i plavom bojom kontrolne površine napadne i izlazne ivice, tj. krilca, zakrilca i AAW kontrolna površina prednjih zakrilaca zrakoplova.



**Slika 17.** Prikaz aerodinamičnog modela AAW krila na zrakoplovu F/A-18 (X-53)

Izvor: P.M.Flick, M.H.Love, P.Scott Zink;The Impact of Active Aeroelastic Wing Technology on Conceptual Aircraft Design.pdf

Originalna struktura i oplata krila zrakoplova F/A-18 su bili komparativno lagani i fleksibilni, no tijekom testiranja zrakoplova, krila su se pokazala previše elastičnima pri izvršavanju kotrljanja na velikim brzinama jer bi pri velikim aerodinamičnim silama otklonjeno krilce uzrokovalo okretanje zrakoplova oko uzdužne osi suprotno željenom smjeru. Iz toga razloga, u ovom projektu su stručnjaci podijelili prednje zakrilce na dva segmenta, unutarnji i vanjski dio zakrilca, AAW dio zakrilca, koji se uz dodatno ugrađene konvencionalne hidrauličke aktuatore posebno kontrolira i otklanja sukladno otklanjanju krilca te se s promjenom napadnog kuta napadne ivice krila savije oblik aeroprofila krila. Koristeći vanjski dio prednjeg zakrilca krila, tj. AAW kontrolnu površinu i krilce da bi izvinuli krilo, aerodinamičke sile koje djeluju na izvijeno krilo pomažu pri dobivanju željenog okretnog momenta krila i zrakoplova. Pri otklanjanju krilca prema gore, AAW krilce se otklanja prema dolje i obrnuto za drugi smjer okretanja te se tako krilo izvije i stvara se dobar okretni moment krila pri većim brzinama zrakoplova. Površina AAW krilca je veličine od 1/3 duljine cijelog prednjeg zakrilca i stupanj otklanjanja je isti kao i za krilce, do 30º.

**4.3. Rezultati testiranja**

Nakon što su stručnjaci i dizajneri dobili glavni oblik AAW krila sa svim konstrukcijskim dijelovima, Američka ratna mornarica je donirala NASA-i zrakoplov F/A-18 koji je bio u izvornom stanju sa elastičnijim krilima, jer su se kasnije, bez AAW tehnologije, modificirala u kruća zbog kontra efekta pri kotrljajućem manevru na većim brzinama. Nakon što se konstruirala AAW tehnologija i AAW krilo zrakoplova, testiranja su počela sa posebnim NASA kompjuterskim programom koji opširno testira krilo na sva moguća strukturalna i težinska opterećenja pomoću posebno raspoređenih hidrauličkih utega i zatezača na krilu. Ta testiranja su pokazala da se može uspješno i ravnomjerno rasporediti sva težinska i strukturalna opterećenja na AAW krilo pri svim uvjetima leta, no sa manjim ispravcima u softveru upravljanja AAW krilcem.

Nakon što su se izvršila sva testiranja unutar hangara, započela su letna testiranja. U prvom dijelu testiranja zrakoplova u letu, stručnjaci su mjerili aerodinamičke sile koje djeluju na AAW krilo i sile pri izvijanju krila u fazi okretanja oko uzdužne osi. Nakon toga je slijedila dugotrajna analiza podataka i sitne preinake u kontrolnom softveru da bi se optimizirale performanse AAW fleksibilnog krila.

Zadnja faza letnih testiranja je bila ocjenjivanje AAW kontrolnih zakona i kvalitete upravljanja zrakoplovom kao i performansa AAW krila. Rezultati su pokazali da je kontrola zrakoplova pri manevru kotrljanja jako učinkovita i efikasna, čak i do brzine od 1.3 macha, te je bez fenomena negativnih, tj. obrnutih kontrola. Unatoč tome što se krilo savije za 4º, pri velikim brzinama je to velik i pozitivan učinak na kontrolu zrakoplova. Također, pokazalo se da AAW krilo može uštedjeti 7-18% bruto težine zrakoplova sa jednakim performansama kao i originalno krilo zrakoplova. Ugradnjom AAW tehnologije na krilo zrakoplova može se dobiti i do 25% lakše krilo nego izvorno konvencionalno krilo.

**4.4. Budućnost AAW projekta**

AAW tehnologija krila može imati veliki utjecaj na koncepcijski dizajn letjelica i ona bi omogućila proširenje dizajnerskog prostora za lake borbene letjelice. Dizajneri imaju mogućnost dizajnirati učinkovitija i tanja krila te krila sa većom vitkošću za buduće letjelice sa visokim performansama i manjim strukturalnim težinama. Te prednosti povećavaju efikasnost potrošnje goriva i kapacitet korisnog tereta zrakoplova što pokazuje mogućnost budućeg adaptiranja AAW tehnologije u postojeće zrakoplove.

Da bi dizajneri koristili prednosti AAW tehnologije moraju računati na fleksibilnost strukture zrakoplova tijekom cijelog procesa konstruiranja, koristeći se raznim programima i metodama za analizu i provjeru opterećenja te mogućnosti njihovog modela zrakoplova kako bi što više uštedjeli u dizajnerskom procesu. Također, dizajneri moraju znati da AAW dizajn krila može uzrokovati manje povećanje u težini krila zbog dodatnog aktuatorskog mehanizma na napadnoj ivici krila te dodatne uvjete i zahtjeve pri opterećenju i oblikovanju strukture krila. Daljnjim istraživanjem ove tehnologije postoji mogućnost nekih promjena i u samom dizajnu AAW krilca i promjena u veličinama horizontalnog repa, što je također bitno pri dizajniranju koncepta.

Cilj ove tehnologije je da što bolje omogući novi pristup kontroli zrakoplova, posebice za jako fleksibilna krila i krila sa velikom vitkošću kao i za zrakoplove bez repa i zrakoplove koji imaju problema sa konvencionalnim aerodinamičkim kontrolama. Uz daljnji napredak, ova tehnologija može postati i referentna točka, tj. mjerilo performansi budućih novih sustava kontrole na krilima zrakoplova.

**5. ZAKLJUČAK**

Zrakoplovna industrija se razvija sukladno razvoju novih tehnologija. Napredovanje zrakoplovne tehnologije i tehnologije materijala su razvidni iz naprijed navedenih projekata i programa kojih ima mnogo, no malo ih uspije privući pozornost velikih ulagača i tvrtki koje omogućuju daljnji razvoj tih koncepata. Krilo zrakoplova je jedan od najvažnijih “uređaja” na zrakoplovu koja omogućuje let zrakoplova i nudi najviše mogućnosti napretka u cilju poboljšanja performansi zrakoplova.

Od početka zrakoplovstva, od prvog leta braće Wright, inovatori i dizajneri zrakoplova su razmatrali krilo zrakoplova na način da bude slično letu ptica, no sa nedostatkom tehnologija i materijala, nisu mogli zadovoljiti sve zahtjeve i zakonitosti leta zrakoplova. Tijekom godina istraživanja i otkrića novih tehnologija i materijala, krilo zrakoplova i njegova konstrukcija se mijenjala sukladno novim tehnologijama, poboljšavajući performanse krila, a samim time i zrakoplova. Današnji istraživači i dizajneri nailaze na nova konstrukcijska rješenja koja znatno utječu na poboljšanje leta zrakoplova. Uz to nastojanje i potrebu da se što bolje iskoriste mogućnosti današnje tehnologije, stručnjaci su označili morfozu krila kao jednu od najvažnijih i najistaknutijih budućih promjena u konstrukciji krila. Morfoza krila zrakoplova bi poboljšala performanse zrakoplova u svim režimima leta, zrakoplov bi mogao letjeti dalje i duže, mogao bi postizati velike nadzvučne brzine i jako male brzine. Morfoza krila bi smanjila, a možda i zaustavila proizvodnju raznih kategorija zrakoplova poput brzih borbenih presretača ili bombardera. Međutim, postoje određene granice sigurnosti i isplativosti koncepata i sa trenutačnom tehnologijom je moguće konstruirati samo bespilotne letjelice koje postaju sve učinkovitije u svojim raznovrsnim ulogama. Zato se stručnjaci oslanjaju na budućnost koja nosi nova rješenja u tehnologiji, a time i u morfozi krila jer se s razvojem specijalnih kompjuterskih programa i kompozitnih materijala stvaraju novi i poboljšani koncepti konstrukcije krila zrakoplova.

Osim dugogodišnjeg projekta morfoze krila zrakoplova, koja u potpunosti iskorištava današnju tehnologiju, postoje koncepti poput NASA HECS krila i aktivnog aeroelastičnog krila, čiji su koncepti uspješno završeni i prošli većinu testiranja, ali sa stalnim pomicanjem granica u dizajnu i otvaranjem novih konstrukcijskih mogućnosti poput smanjenja horizontalnog repa kod AAW projekta ili promjene oblika aeroprofila, njihova testiranja još traju. Dok se kod nekih koncepata i dalje vrše preinake i modificiranja, konvencionalni se projekti poput AWIATOR-a, čiji se određeni uređaji već i koriste na zrakoplovima, uspješno prilagođavaju današnjim rastućim zahtjevima. Ti uređaji su se pokazali efektivnijima u poboljšanju određenih performansi zrakoplova, kao što su bolja stabilnost pri slijetanju i manjim brzinama zrakoplova te smanjenju turbulencija, no ostaje neispunjena potreba za novijim i nekonvencionalnim dizajnom koji ima veći potencijal za poboljšanje upravljivosti i iskoristivosti zrakoplova.

Nova tehnološka rješenja pri konstrukciji krila zrakoplova se uglavnom svode na tehnološke inovacije i projekata adaptivnih struktura koje se mogu mijenjati u realnom vremenu kao odgovor na promjenjive uvjete i operacijske potrebe u letu zrakoplova. Nova konstrukcijskih rješenja krila se najviše oslanjaju na tehnologiju aktuatora i materijala konstrukcijskih dijelova krila čija se tehnologija svakodnevno istražuje. S vremenom, pojavljuju se nova rješenja u područjima nanotehnologije, umjetne inteligencije, biomimetrike i elastičnih materijala (SMA materijala) koji mogu istodobno očitavati parametre senzora na zrakoplovu i samostalno se pokrenuti te mijenjati oblik. Dolazak novih tehnoloških rješenja krila, bilo u civilnom ili vojnom zrakoplovstvu, imati će velik utjecaj ne samo na zrakoplovnu industriju, nego i na ekonomiju zračnog prometa u obliku smanjenja potrošnje goriva ili smanjenja cijena zrakoplovnih karata, na ekologiju smanjenjem zagađenja zraka ispušnim plinovima ili bukom. Da bi sve to postigli, zrakoplovni dizajneri, znanstvenici i računalni specijalisti međusobno moraju održavati neprekinutu komunikaciju, voditi redovite analize sposobnosti postojećih modela te istraživati nove tehnologije koje mogu promijeniti razna konvencionalna pravila, dopuštajući nova i drugačija rješenja. Stručnjaci su nagovijestili da bi mogli tek za 20 godina vidjeti najprikladniji i najučinkovitiji skup naprednih tehnologija u obliku letjelice, a dotada, ptice ostaju apsolutni vladari neba.

**LITERATURA**

1. Michael D. Skillen, William A. Crossley; Modeling and Optimization for Morphing

Wing Concept Generation.pdf; NASA/CR-2007-214860

2. Michael Thomas Kikuta; Mechanical Properties of Candidate

Materials for Morphing Wings.pdf; Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; 2003.

3. Terrence A. Weisshaar; Morphing Aircraft Technology-New Shapes for Aircraft Design.pdf; Aeronautics and Astronautics Department Purdue University; 2006.

4. D. S. Ramrkahyani, G. A. Lesieutre, M. Frecker, S. Bharti; Aircraft Structural Morphing using Tendon Actuated Compliant Cellular Trusses.pdf; Department of Mechanical Engineering, Penn State University; 2004.

5. Anna-Maria R. McGowan, Martin R. Waszak; NASA’s Morphing Project Research.pdf; Langley Research Center; 2005.

6. Anna-Maria R. McGowan, Anthony E. Washburn, Lucas G. Horta, Robert G. Bryant, David E. Cox, Emilie J. Siochi, Sharon L. Padula, Nancy M. Holloway;Recent Results from NASA's Morphing Project.pdf; NASA Langley Research Center; 2008.

7. Michael D. Skillen, William A. Crossley; Modeling and Optimization for Morphing Wing Concept Generation II Part I: Morphing Wing Modeling and Structural Sizing Techniques.pdf; NASA/CR-2008-214902

8. S. Kota, J. Hetrick, R. Osborn, D. Paul, Ed Pendleton, P. Flick, C. Tilmann;Design and application of compliant mechanisms for morphing aircraft structures.pdf; 2004.

9. Matthew D. Stubbs; Kinematic Design and Analysis of a Morphing Wing.pdf; Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; 2003.

10. Roger Ohayon; Morphing wing.pdf; 2004.

11. Justin E. Manzo; Analysis and design of a Hyper-Elliptical Cambered span Morphing aircraft wing.pdf; Faculty of the Graduate School of Cornell University; 2006.

12. Peter M. Flick, Michael H. Love, P. Scott Zink;The Impact of Active Aeroelastic Wing Technology on Conceptual Aircraft Design.pdf; 2000.

13. J. König; The European R&T Platform AWIATOR: Bringing New Aircraft Technologies Into The Air-Aerodays.pdf; 2006.

14. David Sawyers; AWIATOR Project Perspectives.pdf; 2008.

15. http://search.nasa.gov/search/search.jsp?nasaInclude=morphing+wings

16. http://news.softpedia.com/news/Wing-Morphing-The-Future-of-Aircraft-Design-53432 (2007.)

17. http://www.nasa.gov/missions/research/twist\_wing (2003.)

18. http://www.transport-research.info/web/projects/project\_details (2010.)

19. http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-061-DFRC (2009.)

20. http://www.techbriefs.com/component/content/article/7802 (2010.)

21. http://www.nextgenaero.com/success\_mfx2 (2007.)

22. http://www.afcea.org/signal/articles/templates/SIGNAL\_Article\_Template.asp

?articleid=1205&zoneid=56 (2006.)

23. http://beta.flightglobal.com/news/articles/lockheed-martin-and-nextgen aeronautics-start-fast-morphing-uav-tests-turning-attention-to-attack-formation-208463/ (2006.)

24. http://www.flightglobal.com/articles/2007/10/19/218799/nextgens-shape changing-uav-morphs-in-flight (2007.)

25. http://www.flightglobal.com/articles/2006/08/15/208487/success-for-first-in-flight-morphing-aircraft-as-small-californian-start-up-nextgen-flies (2006.)

26. http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/\_awiator\_better\_wing\_ technology\_ to\_boost\_aerodynamics\_en (2011.)

27. http://www.flightglobal.com/articles/2006/01/24/204272/awiator-prepares-for-wake-vortex-reduction-experiment (2006.)

28. http://www.aiaa.org/aerospace/Article.cfm?issuetocid=256&ArchiveIssueID=30 (2002.)

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Promjena u obliku krila ptice čiope za razne režime leta.......................................4

Slika 2. Grafički prikaz osnovnih elemenata projekta morfoze...........................................5

Slika 3. Pterodactyl IV sa promijenjivim krilima u obliku strijele..........................................7

Slika 4. Koncepti morfoze krila zrakoplova MAS programa..............................................10

Slika 5. Morfirajući dizajn krila tvrtke Lockheed-Martin.....................................................11

Slika 6. Ortografska projekcija koncepta sklapajućeg krila sa prikazom kontrolnih

točki i parametar morfoze β.................................................................................13

Slika 7. Ilustracija strukture spojnih okova (“mostova”) na modelu sklapajućih krila.....14

Slika 8. NextGen Aeronautics koncept morfoze krila.......................................................16

Slika 9. Prikaz kostura krila kroz pet letnih konfiguracija krila, NextGen koncept...........18

Slika 10. Prikaz testiranja koncepta MFX-1 tvrtke NextGen u NASA TDT aerotunelu....20

Slika 11. Prikaz konfiguracije HECS krila.........................................................................23

Slika 12. Prikaz strukturnih nosača i aktuatorskih tetiva HECS programa.......................24

Slika 13. Prikaz rasporeda strukturnih nosača HECS krila..............................................25

Slika 14. Osnovne tehnologije AWIATOR projekta..........................................................29

Slika 15. Prikaz generatora vrtloga na zakrilcu krila (SBVG)...........................................30

Slika 16. Prikaz djelovanja krila pri manevru kotrljanja AAW krila i konvencionalnog

krila....................................................................................................................34

Slika 17. Prikaz aerodinamičnog modela AAW krila na zrakoplovu F/A-18 (X-53)........37

**POPIS KRATICA**

AAW - (Active Aeroelastic Wing) tehnologija aktivnog aeroelastičnog krila

ASTROS - (Advanced Star/Target Reference Optical Sensor) napredni optički

senzor s ciljanim uputstvima

AWIATOR - (Aircraft Wing with Advanced Technology Operation) projekt poboljšanja

krila sa naprednim tehnologijama

DARPA - (Defence Advanced Research Project Agency) američka agencija za

razvoj novih naprednih projekata za vojsku SAD-a

EPNdB - (Effective Perceived Noise in Decibels) efektivna zapažena buka u

decibelima

HECS - (Hyper-Elliptic Cambered Span) krilo sa hiper-eliptičnim savijajućim

rasponom

LIDAR - (Light Detection And Ranging) optička senzorska tehnologija mjerenja

udaljenosti i ostalih osobina cilja osvjetljavajući cilj snopom svjetla,

najčešće pulsevima lasera

MAS - (Morphing Aircraft Structure) morfoza zrakoplovnih struktura

NASA - (National Aeronautical and Space Administration) američka agencija za

aeronautiku i svemir

SBVG - (Sub Boundary-layer Vortex Generators) generatori vrtloga u

podgraničnom sloju aeroprofila

SMA - (Shape Memory Alloy) legura memorije oblika

SMP - (Shape Memory Polymers) elastični polimeri memorije oblika

TDT - (Transonic Dynamics Wind Tunnel) transonični aerotuneli za testiranje

modela

VSW - (Variable Sweep Wing) promijenjiva geometrija krila

1. Variable Sweep Wing-promijenjiva geometrija krila (promjenjiv konstruktivni kut krila-zrakoplovi F-111, F-14,MiG 23,MiG 27,Su-24,Su-17...) [↑](#footnote-ref-1)
2. DARPA (Defence Advanced Research Project Agency)-Američka agencija za razvoj novih naprednih projekata za vojsku SAD-a. [↑](#footnote-ref-2)
3. Zaključavanje (Locking)- kada se aktuator zaustavi i zakoči u određenoj poziciji [↑](#footnote-ref-3)
4. Shape memory polymers (SMP)-elastični polimeri memorije oblika [↑](#footnote-ref-4)
5. Transonic Dynamics Wind Tunnel (TDT)- transonični aerotuneli za testiranje modela [↑](#footnote-ref-5)
6. Hyper-Elliptic Cambered Span (HECS) [↑](#footnote-ref-6)
7. AWIATOR-Aircraft Wing with Advanced Technology Operation [↑](#footnote-ref-7)
8. EPNdB (Effective Perceived Noise in Decibels)-Efektivna zapažena buka u decibelima [↑](#footnote-ref-8)
9. SBVG (Sub Boundary-layer Vortex Generators)-generatori vrtloga u pograničnom sloju aeroprofila [↑](#footnote-ref-9)
10. LIDAR (Light Detection And Ranging)-optička senzorska tehnologija mjerenja udaljenosti i ostalih osobina cilja osvjetljavajući cilj snopom svjetla, najčešće pulsevima lasera. [↑](#footnote-ref-10)
11. AAW (Active Aeroelastic Wing)-tehnologija aktivnog aeroelastičnog krila [↑](#footnote-ref-11)
12. ASTROS (Advanced Star/Target Reference Optical Sensor)- napredni optički senzor s ciljanim uputstvima [↑](#footnote-ref-12)