SISTEME STRUCTURALE ADAPTIVE: DE LA ZBORUL NATURAL LA AERONAVELE DE GENERAȚIE VIITOARE

Andreea BACIU

Universitatea Transilvania Brașov, Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial, Construcții Aerospațiale, Brașov, România

ABSTRACT. Această lucrare analizează tehnologiile structurilor alare adaptabile continuu, proiectate pentru a substitui suprafețele discrete de control aerodinamic. Sunt evaluate arhitecturi biomimetice avansate, precum mecanismul *Fish Bone Active Camber* (FishBAC) și nucleele alveolare reconfigurabile, acționate prin sisteme electromecanice, ultrasonice și utilizarea materialelor inteligente. Analiza evidențiază optimizarea aeroelastică prin sinergia dintre flexibilitatea structurală controlată și capacitatea de preluare a sarcinilor utile. Rezultatele demonstrează că eliminarea discontinuităților geometrice maximizează eficiența aerodinamică globală, reducând simultan rezistența la înaintare și amprenta acustică în regimuri de zbor dinamice.

Cuvinte cheie: aripi morfologice, biomimetism, FishBAC, structuri de tip fagure, actuatori.

ABSTRACT. This paper analyzes continuously adaptive wing structure technologies designed to replace discrete aerodynamic control surfaces. Advanced biomimetic architectures are evaluated, such as the Fish Bone Active Camber (FishBAC) mechanism and reconfigurable alveolar cores, actuated by electromechanical and ultrasonic systems and utilizing smart materials. The analysis highlights aeroelastic optimization through the synergy between controlled structural flexibility and the ability to carry payloads. The results demonstrate that eliminating geometric discontinuities maximizes overall aerodynamic efficiency while simultaneously reducing drag and acoustic footprint in dynamic flight regimes.

Keywords: morphological wings, biomimicry, FishBAC, honeycomb structures, actuators.

1. DEFINIȚIA CONCEPTULUI ȘI PROGRES PÂNĂ IN PREZENT

Aripile cu formă variabilă — denumite și aripi adaptabile flexibile — reprezintă o filosofie avansată de proiectare structurală și aerodinamică, în care variațiile continue ale curburii, răsucirii și conturului profilului aerodinamic înlocuiesc suprafețele de control convenționale discrete, precum balamalele, flapsurile și eleroanele. Prin deformarea lină a învelișului, astfel de structuri elimină golurile de la linia balamalei, întârzie separarea fluxului și reduc complexitatea mecanică și emisiile de zgomot

Conceptele pentru aripile cu curbură variabilă își au originea în anii 1950, când studiile timpurii au explorat marginile posterioare flexibile destinate misiunilor de anduranță lungă . Dezvoltările moderne au fost avansate prin colaborări între FlexSys Inc., Laboratorul de Cercetare al Forțelor Aeriene ale SUA și NASA, culminând cu demonstratori precum:

• Mission Adaptive Compliant Wing (MACW / FlexFoil), un sistem compozit flexibil multistrat capabil de deviații mari și line fără balamale mecanice

• Adaptive Compliant Trailing Edge (ACTE), testat în zbor pe un Boeing 737-800, demonstrând o deviație continuă de 2°–30°, o reducere a rezistenței aerodinamice de 6–10% și o reducere semnificativă a zgomotului .

Biomimetica rămâne un factor major de proiectare: păsările mențin un zbor controlat la unghiuri de atac cuprinse între 30° și 45°, cu mult peste limitele de pierdere a portanței de 12°–20° ale profilelor aerodinamice rigide convenționale, datorită flexibilității distribuite și răsucirii adaptive pe lungimea anvergurii

În consecință, structurile morfante trebuie să rămână:

• suficient de flexibile pentru a-și adapta forma aerodinamică în toate fazele de zbor și

• suficient de rigide pentru a rezista la sarcinile aerodinamice și inerțiale fără a pierde controlul

2. ARHITECTURI MORFOLOGICE INSPIRATE DIN LUMEA BIOLOGICĂ PENTRU AVIOANELE DE NOUA GENERAȚIE

2.1. Paradigme structurale și sisteme de acționare

2.1.1. Fish Bone Active Camber (FISHBAC)

Mecanismul FishBAC este un concept de margine posterioară flexibilă, extrem de anizotropă, integrat pe o aripă OA212, care acționează în principal în zona cu coardă de 75–90%. Acesta constă dintr-o coloană vertebrală cu grinzi flexibile, lonjeroane care modelează distribuția rigidității, o piele elastomerică pretensionată și un sistem de acționare acționat de tendoane, fără acționare inversă.

Rotația scripetului induce o deplasare diferențială a tendonului, generând un moment de încovoiere pe banda flexibilă a marginii posterioare și producând o variație substanțială a camberului. Proprietatea de a nu permite mișcarea inversă permite suprafeței să-și mențină starea de deformare cu un consum de energie neglijabil.

Datele din tunelul aerodinamic arată o reducere a rezistenței aerodinamice de 20–25% la o portanță echivalentă, o distribuție îmbunătățită a presiunii și un flux mai lin datorită absenței spațiilor de articulație. Învelișul elastomeric pretensionat crește rigiditatea în afara planului și suprimă flambajul local.

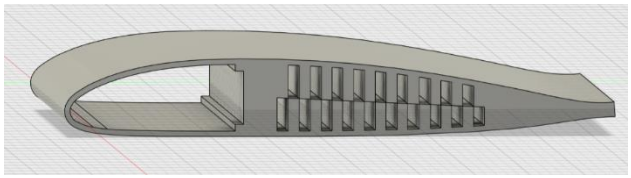


Fig. 1.1. Structură Fish BAC modelată 3D în Fusion 360

Printre limitări se numără tendonul cu un singur lanț utilizat în prototipurile inițiale, care limita deformarea complet bidirecțională, precum și fluajul/relaxarea elastomerului, care afectează durata de viață.

Evoluțiile actuale se concentrează pe mușchii artificiali pneumatici, compozitele cu fibre curbilineare pentru adaptarea rigidității și compozitele acoperite cu elastomer pentru îmbunătățirea rezistenței la factorii de mediu.

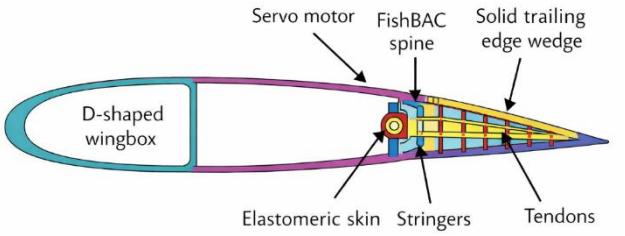


Fig. 1.2. Mecanism intern Fish BAC

2.1.2. Bord de fugă activ cu motoare ultrasonice liniare (LUSM)

Un alt concept de transformare inspirat din natură se bazează pe un bord de fugă acționat de motoare ultrasonice liniare (LUSM), integrate într-un profil aerodinamic din compozit cu fibră de carbon.

Arhitectura generală cuprinde:

• o cutie rigidă a aripii care acționează ca componentă principală de susținere a sarcinii,

• o piele superioară flexibilă care se adaptează la schimbările de curbură,

• elemente independente de zăbrele flexibile care conectează cutia aripii la marginea posterioară rigidă și

• un canal flexibil omogen care servește ca interfață pentru LUSM-uri.

Motoarele ultrasonice liniare generează mișcare prin microvibrații de înaltă frecvență și contact prin frecare, deplasând glisoarele de-a lungul canalului de ghidare. Pe măsură ce elementele de zăbrele flexibile alunecă și se deformează elastic, marginea posterioară se îndoaie sau se îndreaptă, modificând efectiv distribuția locală a curburii.

Învelișurile morfante din această arhitectură pot consta din panouri flexibile segmentate sau straturi elastomerice, care ajută la menținerea ermeticității și a netezimii aerodinamice. Senzorii încorporați în elementele de rulare sau de structură pot măsura curbură, permițând controlul în buclă închisă a formei camberului.

Printre avantajele principale se numără:

• precizie poziționlă ridicată și acționare electrică rapidă,

• controlul independent al mai multor segmente, care permite obținerea unor forme complexe ale curbei de camber, și

• compatibilitatea cu compozite ușoare din fibră de carbon, care oferă un raport ridicat rigiditate-greutate

Cu toate acestea, rămân câteva provocări:

• forța de acționare scade la temperaturi ridicate sau sub sarcini dinamice mari, din cauza funcționării bazate pe frecare,

• vibrațiile ultrasonice se pot cupla cu modulele structurale și necesită strategii dedicate de amortizare aeroelastică,

• durabilitatea pe termen lung a suprafețelor de contact prin frecare și uzura rotorului rămân subiecte active de cercetare.

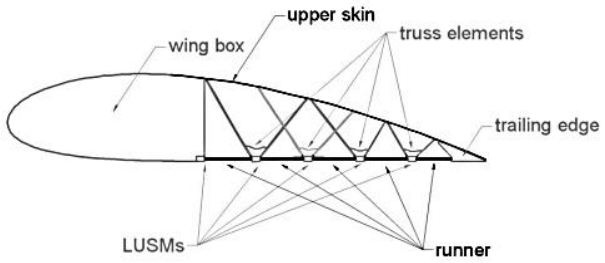


Fig. 1.3. Structură internă mecanism LUSM

2.1.3. Sisteme cu miez alveolar reconfigurabil

Sistemele cu miez alveolar reconfigurabil reprezintă o a treia categorie de arhitecturi în care topologia internă a miezului este modificată pentru a obține schimbări controlate de formă la nivelul suprafeței aerodinamice. În acest caz, transformarea se realizează prin ajustarea suprafețelor topologice ascunse din interiorul miezului, și nu doar prin deformarea învelișului exterior.

Se discută în mod obișnuit două variante:

a) Pârghii integrate

În prima variantă, celulele hexagonale sunt interconectate prin articulații cu dublă acțiune, creând un miez alveolar morfabil. Poziția spațială a miezului este controlată de rotația actuatoarelor de îndoire în plan, cu un capăt cuplat la un sistem de acționare electromecanic .

Actuatorul încorporează o pârghie îndoită față de axa de rotație a acționării și care trece prin caneluri din elemente intermediare legate între ele de-a lungul conturului fagurelui. Mișcarea sa determină o remodelare coordonată a geometriei fagurelui, ducând la o transformare globală a secțiunii aripii în conformitate cu cerințele aerodinamice.

b) Noduri mecatronice integrate

În cea de-a doua variantă, nodurile mecatronice sunt încorporate direct în miezul alveolar. Fiecare nod este alcătuit, de obicei, din:

• un servo-actuator compact,

• o bară de tracțiune care leagă actuatorul de pereții celulelor înconjurătoare și

• o articulație cilindrică cu dublă acțiune, prevăzută cu o articulație pivotantă care permite deformarea celulelor alveolare.

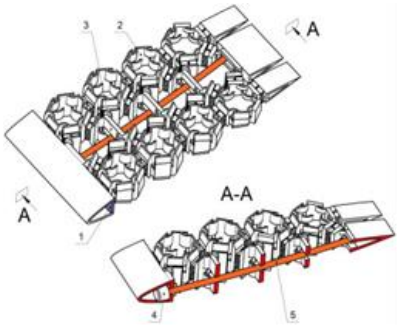


Fig. 1.4. Structură internă sistem cu miez alveolar cu pârghii integrate

Prin strângerea sau slăbirea barei de tracțiune, nodul poate trage sau împinge celulele adiacente, permițând transformarea controlată a structurii miezului. Articulația pivotantă ajută la compensarea deformărilor neuniforme și previne suprasolicitarea pereților celulelor.

Îmbunătățirile viitoare pot implica integrarea:

• actuatoarelor electromecanice,

• actuatoarelor piezoelectrice în serie,

• micro-actuatoarelor pneumatice și hidraulice, și

• mușchilor artificiali sau tendoanelor inteligente,

pentru a îmbunătăți eficiența energetică, timpul de răspuns și nivelul de control

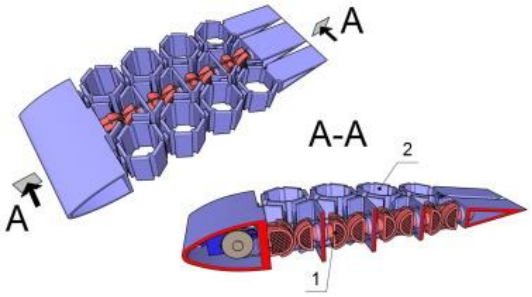


Fig. 1.5. Structură internă sistem cu miez alveolar cu noduri mecatronice integrate

2.2. Știința materialelor pentru aplicații morfologice

Alegerea materialelor este esențială pentru performanța și durabilitatea structurilor morfologice. Pentru a permite deformări mari și reversibile, menținând în același timp fluiditatea aerodinamică,

majoritatea învelișurilor morfologice și a substructurilor flexibile se bazează pe materiale polimerice și compozite personalizate.

Tabelul 1 prezintă principalele categorii de materiale utilizate în aplicațiile morfologice, precum și caracteristicile lor esențiale.

Cercetările recente explorează, de asemenea, învelișurile hibride multistrat, în care un strat exterior elastic din elastomer este lipit de un substrat compozit cu rigiditate variabilă, combinând netezimea suprafeței cu anizotropia controlată și toleranța la deteriorare.

Tabelul 1. **Știința materialelor**

Nr. crt	Tip material	Beneficii	Constrângeri
1	Învelișuri polimerice (de exemplu, PU, elastomeri de silicon)	Asigură o acoperire uniformă și modificări line ale formei, îmbunătățind performanțele aerodinamice și reducând rezistența la înaintare; densitate redusă; ușurință în fabricare și integrare.	Un coeficient Poisson ridicat duce la contracție laterală, histerezis și fluaj; poate necesita pre-întindere și armare; sensibilitate la radiațiile UV și la temperatură.
2	Polimeri electroactivi (PEA)	Deformație mare indusă electric; potențial pentru acționare silențioasă și cu greutate redusă; complexitate mecanică redusă și eficiență energetică îmbunătățită în anumite condiții.	Necesită câmpuri electrice puternice; durabilitate limitată pe termen lung; răspuns relativ lent; scăderea performanțelor în medii extreme; costuri ridicate ale materialelor, de obicei.
3	Polimeri cu memorie de formă (PMF)	Capacitatea de a reveni la o formă prestabilită sub acțiunea unui stimul specific (adesea termic); potriviți pentru deformări ample și lente; permit o geometrie adaptabilă între configurațiile de la sol și cele de zbor.	Timp de răspuns lent; rigiditate și rezistență limitate; instabilitate termică și deformații reziduale după mai multe cicluri.
4	Aliaje cu memorie de formă (AFM, de exemplu NiTi)	Densitate energetică foarte ridicată; actuatoare compacte; capacități biomimetice de îndoire și răsucire; utile pentru marginile posterioare fără balamale și pentru transformarea locală.	Interval îngust de temperatură de funcționare; întârziere termică; control complex din cauza histerezisului; sensibilitate la oboseală la un număr mare de cicluri.
5	Materiale compozite cu rigiditate variabilă	Distribuție personalizată a rigidității prin orientarea fibrelor; permit realizarea de straturi de suprafață deformabile, capabile să suporte sarcini, cu flexibilitate variabilă în funcție de zonă; compatibile cu tehnologii avansate de stratificare	Procesul complex de fabricație și controlul calității; fluajul anizotrop; proiectarea și analiza necesită metode numerice avansate și optimizare

3. ASPECTE AEROELSTICE ȘI STRUCTURALE

Proiectarea aripilor cu geometrie variabilă nu poate fi disociată de cerințele privind integritatea aeroelastică și structurală. Modificarea geometriei nu afectează doar forma aerodinamică externă, ci și distribuția rigidității și traiectoriile de sarcină în interiorul aripii

Printre aspectele cheie se numără:

• Divergența torsională: variațiile de curbură și răsucire afectează rigiditatea torsională a aripii. Debutul divergenței trebuie analizat pentru fiecare stare reprezentativă de morfing, pentru a asigura marje suficiente de stabilitate statică

• Flutter și fladder: Marginile posterioare flexibile ale aripilor cu morfing pot introduce moduri structurale de joasă frecvență care se cuplează cu sarcinile aerodinamice, putând duce la flutter sau „fladder” (flutter localizat în marginea posterioară)

• Sarcini de rafale și manevre: Morfingul în condiții tranzitorii (rafale, manevre) creează traiectorii de sarcină neliniare și poate necesita strategii active de atenuare a sarcinilor .

• Oboseală și durabilitate: Învelișurile elastomerice și materialele inteligente sunt predispuse la fluaj, relaxare a tensiunilor și îmbătrânire cauzată de mediu. Performanța pe termen lung trebuie validată prin teste de oboseală accelerate .

Pentru a aborda aceste probleme, cercetările actuale utilizează cadre de modelare integrate care combină:

• analiza cu elemente finite (AEF) pentru răspunsul structural,

• dinamica fluidelor computațională (DFC) pentru sarcinile aerodinamice și

• simulări complet cuplate de interacțiune fluid-structură (IFS) pentru a surprinde comportamentul neliniar al structurilor morfante

4. CONCLUZII

Aripile cu morfologie variabilă și structurile adaptabile flexibile reprezintă un pas important către o aviație mai eficientă și mai ecologică. Prin combinarea conceptelor FishBAC acționate de tendoane, a marginilor de atac LUSM acționate electric și a miezurilor reconfigurabile cu structură alveolară, cercetările recente demonstrează că suprafețele aeronavelor pot realiza o adaptare geometrică continuă și eficientă din punct de vedere energetic pe întreaga gamă de zbor.

Literatura de specialitate raportează în mod constant:

• reduceri ale rezistenței aerodinamice de până la 20–25% la o portanță corespunzătoare pentru anumite configurații ale marginilor posterioare morfante,

• raporturi îmbunătățite portanță-rezistență și atenuarea zgomotului, în special în timpul decolării și aterizării, și

• fezabilitatea arhitecturilor de acționare distribuită pentru controlul complex al camberului și al răsucirii.

Dezvoltările viitoare se vor baza pe:

• materiale inteligente avansate (cu durabilitate îmbunătățită),

• optimizarea aeroelastică a structurilor morfante folosind bucle de proiectare bazate pe FSI și

• strategii de control integrate care coordonează mai mulți actuatori și senzori în arhitecturi cu buclă închisă.

În ansamblu, tehnologia morfării are potențialul de a transforma aeronavele din configurații esențial statice în sisteme de portanță adaptabile, inspirate din natură, capabile de optimizare în timp real a performanței, consumului de combustibil și zgomotului.

BIBILOGRAFIE

[1] Adaptive Compliant Wing. (2014). *Technical overview and historical development.*

[2] Ahmad, D.; Parancheerivilakkathil, M.S.; Goswami, M.; Ajaj, R.M.; Patra, K.; Jawaid, M.; Volokh, K. & Zweiri, Y. (2024). *Recent developments of polymer-based skins for morphing wing applications*. Polymer Testing.

[3] Ajaj, R.M.; Friswell, M.I. & Saavedra Flores, E.I. (2021). *Morphing aircraft: Motivation, challenges and progress*. Progress in Aerospace Sciences.

[4] Barbarino, S.; Bilgen, O.; Ajaj, R.M.; Friswell, M.I. & Inman, D.J. (2011). *A review of morphing aircraft*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 22(9), 823–877.

[5] Bubert, E.; Woods, B.K.S.; Lee, K.; Kothera, C.S. & Wereley, N.M. (2010). *Design and fabrication of a passive variable-camber morphing wing*. AIAA Journal.

[6] Thill, C.; Etches, J.; Bond, I.; Potter, K. & Weaver, P. (2010). *Morphing skins using flexible matrices*. Composites Part A, 41(3), 412–423.

[7] Dayyani, I.; Shaw, A. & Friswell, M.I. (2014). *Aeroelastic behaviour of a morphing wing with variable stiffness skin*. Aerospace Science and Technology.

[8] Ivchenko, A.V.; Sharonov, N. & Ziatdinov, R. (2019). *New conceptual design of the adaptive compliant aircraft wing frame*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 22(5), 1149–1154.

[9] Kilian, L. (2022). *Bio-Inspired Morphing Wings: Mechanical Design and Wind Tunnel Experiments.*

[10] Kota, S.; Hetrick, J.; Osborn, R.; Paul, D.; Pendleton, E.; Flick, P. & Tilmann, C. (2009). *Design and application of compliant mechanisms for morphing aircraft structures*. AIAA Journal.

[11] NASA Armstrong Flight Research Center. (2014–2018). *Adaptive Compliant Trailing Edge (ACTE) flight-test campaign reports*.

[12] Santer, M. & Pellegrino, S. (2012). *Lightweight compliant mechanisms for morphing aircraft*. AIAA Journal.

[13] Gandhi, F. & Kudva, J. (2011). *Flexible skins for morphing aircraft*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures.

[14] Woods, B.K.S. & Friswell, M.I. (2014). *Structural characterization of the Fish Bone Active Camber morphing airfoil*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures.

[15] Wu, R.; Soutis, C.; Zhong, S. & Filippone, A. (2015). *A morphing aerofoil with highly controllable aerodynamic performance*. University of Manchester.

Despre autor

Andreea BACIU

Student, Universitatea Transilvania din Brașov - Facultatea de Inginerie Tehnologica și Management Industrial, Brașov, România

Profesor coordonator **George Răzvan BUICAN**

Șef lucrări Dr. Ing, Universitatea Transilvania din Brașov- Facultatea de Inginerie Tehnologica și Management Industrial, Brașov, România