https://doi.org/10.26552/ pas.Z.2025.1.29

UNIVERSITY OF ŽILINA

POLYMORFNÉ KONŠTRUKCIE AKO SÚČASŤ RIADENIA LETÚNOV

Michal Schwarz
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

Goal of this work is to find out whether morphing wing configurations are a viable option for flight controls such as elevators, flaps, ailerons etc. This work is divided into 3 sections. First section is about general research of conventional wing constructions, materials used in aircraft and mechanisms used to actuate flight controls. Second section looks into construction of morphing wings, viable materials for these constructions, mechanism used to actuate them and finally designing a functioning morphing wing based on previous research. In final third part we are going to compare morphing configuration against conventional solutions used on aircraft today in CFD simulations as well as in a wind tunnel and compare the results gained by these simulations.

Keywords

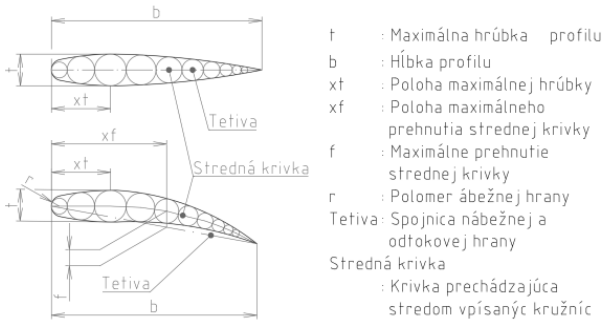
Morphing wing, construction, mechanism, simulation

1. Úvod

Letúny počas letu prechádzajú rôznymi fázami kde sa im menia ich letové výkony. Pri niektorých fázach letu ako vzlet a pristátie však letové výkony nie sú optimalizované keďže letúny sú optimalizované pre najdlhšiu časť letu, teda cestovnú. Pre zlepšenie letových výkonov pri neoptimalizovaných fázach letu sa využívajú sekundárne riadiace plochy, ktoré však v momentálnom štádiu produkujú výrazne zvýšený odpor. Primárne riadiace plochy sú využívané počas celej dĺžky letu či už z dôvodu riadenia alebo aerodynamického vyváženia kde rovnako ako sekundárne produkujú odpor. Polymorfné konštrukcie sa snažia optimalizovať letové výkony pre rôzne fázy letu menením geometrických charakteristík krídla a profilu, aby poskytovali dostatočný aerodynamický vztlak pre let a minimalizovali aerodynamický odpor. Táto práca sa bude zaoberať konštrukciou polymorfných koncepcií, ich porovnaniu oproti konvenčným riešeniam riadiacich plôch a ich potencionálnym využitím v prevádzke.

2. Polymorfná konštrukcia

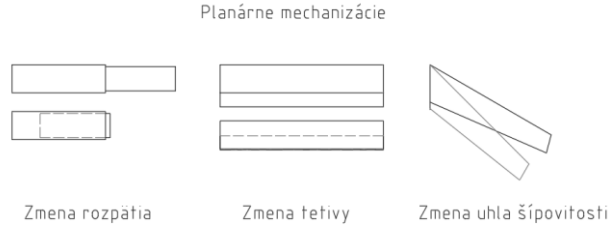
Výraz polymorfný pochádza z gréckych slov *poly*– mnoho alebo viac a *morphia*–tvar. Do slovenčiny tento výrez môžeme preložiť ako mnoho tvarý alebo viactvarý, respektíve označiť niečo, čo je schopné mať viacero foriem. Pôjde teda o leteckú konštrukciu, ktorá je schopná meniť svoj tvar počas letu. Konkrétne pôjde o polymorfné konštrukcie profilov, ktoré budú schopné meniť geometrické charakteristiky viď (Obrázok), ako tetivu, strednú krivku, maximálne prehnutie strednej krivky a ďalšie parametre, ktoré majú vplyv na aerodynamické vlastnosti profilu krídla.



Obrázok 1: Geometrické charakteristiky profilu.
Zdroj: autor podľa 7

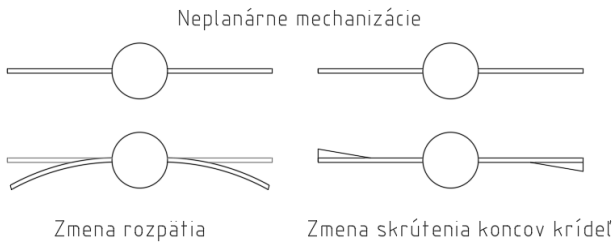
Pri profilových polymorfných konštrukciách okrem menenia tvaru strednej krivky môžeme meniť aj hrúbku profilu. Okrem profilových však poznáme aj planárne a neplanárne polymorfné konštruckie.

Planárne mechanizácie fungujú na princípe vysúvania a zasúvania častí krídla do inej časti lietadla ako je napríklad krídlo, trup a iné. Pre ich rozdelenie viď (Obrázok).



Obrázok 2: Planárne mechanizácie.
Zdroj: autor podľa 6

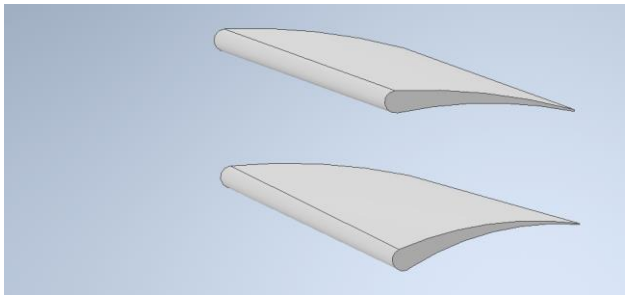
Neplanárne mechanizácie vykonávajú pohyb, ktorý nie je limitovaný v jednej rovine, teda je schopný pohybu okolo viacerých osí respektíve v trojrozmernom priestore. Pre ich rozdelenie viď (Obrázok 14).



Obrázok 14: Neplanárne mechanizácie.
Zdroj: autor podľa 6

3. História a súčasný stav polymorfných konštrukcií

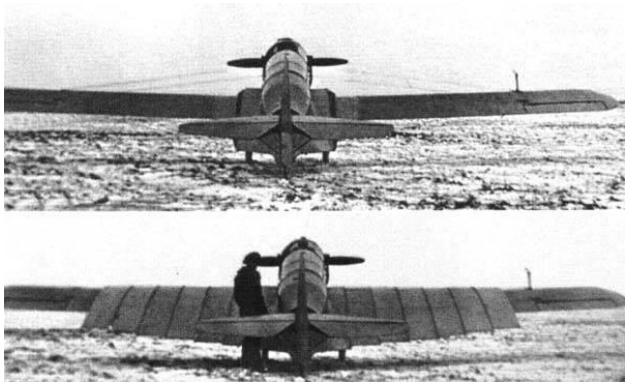
Princíp tejto technológie bol požitý už na prvom motorovom letúni Wright Flyer v roku 1903. Zabezpečovane ňou bolo klonenie letúna cez menenie skrútenia na konci krídel viď (Obrázok). Čo rezultovalo v diferenciálnom vztlaku na konci krídel a nim indukovaný klonivý moment.



Obrázok 4: Skrútený profil na konci krídla.
Zdroj: autor

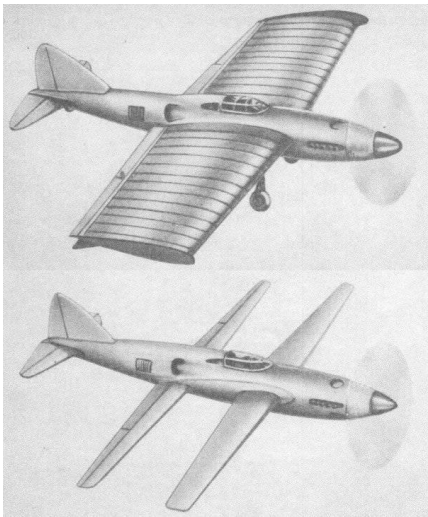
Ďalšie využitia tejto technológie v oblasti zmeny profilu sa objavili až v roku 1937 v Sovietskom zväze. Pod vedením Georiva Ivanovicha Bakshaveva boli vyvinuté 2 letúny schopné zmeniť hrúbku a hĺbku profilu krídla. Táto zmena bola riešená vysunutím mechanizovaného poťahu okolo pôvodného krídla. Po vysunutí mechanizácie mali letúny väčšiu plochu krídel čo im dalo lepšie letové výkony na nižších rýchlostiach.

Letún LIG-7 viď (Obrázok) bol konštruovaný ako jednoplošník zo schopnosťou vysunúť tento poťah do 2/3 rozpätia krídel. [1]



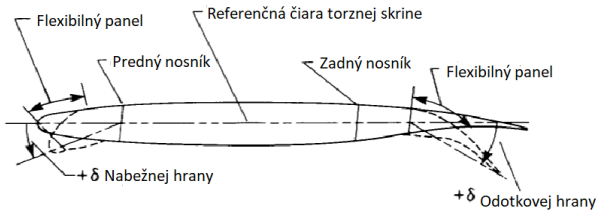
Obrázok 5: LIG-7.
Zdroj: 1

Letún RK-1 viď (Obrázok) bol skonštruovaný ako s dvomi nosnými plochami v tandeme a bol schopný vysunutia poťahu po celej dĺžke rozpätia. [2]



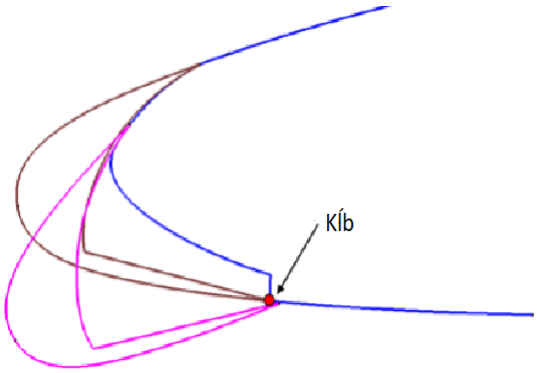
Obrázok 6: RK-1.
Zdroj: 2

V 80-tych rokoch boli vykonané testy na upravenom letúni F-111 Aardwark dezignovanom ako F-111 AFTI, kde boli vztlakové mechanizácie riešené ako polymorfné konštrukcie viď (Obrázok). Išlo o tvz. MAW (mission adaptive wing), teda doslovne krídlo, ktoré sa prispôsobí prostrediu podľa danej úlohy [5].



Obrázok 7: Krídlo F-111 ATFI .
Zdroj: 5, Úprava: autor

V súčastnosti sú tieto konštrikcie stále vo vývoji ale nájdu sa aj príklady v prevádzke ako DND (Droop Nose Device) využívané pre vztlakovú mechanizáciu nábežnej hrany letúnov Airbus A380 a A350 viď (Obrázok) [4].



Obrázok 8: Droop Nose Device.
Zdroj: 4, Úprava: autor

Najväčším priekopníkom tejto technológie je spoločnosť Flexsys, ktorá úspešne otestovala polymorfnú vztlakovú mechanizáciu odtokovej hrany na letúni Gulfstream GIII viď (Obrázok) počas 22 testových letov. Okrem klapiek táto spoločnosť vytvorila aj polymorfné krídeľká a sloty, ktoré však neboli testované.

Obrázok 9: Polymorfná vztlakoví klapka.
Zdroj: 31

Posledná zmienka o ich ďalšom smerovaní bola v roku 2015, kedy oznámili spoluprácu s NASA na vývoji polymorfných modifikácií pre letun KC-135 Stratotanker. Od vtedy však neboli zverejnené žiadne ďalšie verejne dostupné informácie [31].

4. Cieľ a metodika práce

Primárnym cieľom tejto práce je analyzovať možnosti využitia polymorfných konštrukcií ako primárne a sekundárne riadiace plochy letúnov.

Sekundárnymi cieľmi práce je návrh a zostrojenie polymorfnej riadiacej plochy. Vykonanie CFD simulácie a následná analýza hodnôt z rôznych konfigurácií riadiacich plôch.

Metodika práce

Pred začatím písania sme sa zamerali na literárnu rešerš, z, ktorej sme zozbierali informácie o predošlých odborných článkoch na tému polymorfných konštrukcií. Tieto informácie obsahovali históriu použitia, rôzne možnosti zhotovenia mechanizmu, konštrukčné prvky krídel, vlastnosti materiálov a aplikáciu v praxi.

Po spracovaní informácií získanými z analýzy súčasného stavu boli následne riešené časti bakalárskej práce, kde sme sa zamerali na výber vhodného riešenia pre rôzne aspekty vlastnej konštrukcie, či už ide o materiál, alebo mechanizmus.

Po zvážení všetkých možnostiam ku, ktorým sme dospeli z analýzy sme vybrali polymorfnú konštrukciu typu FishBAC kvôli jej jednoduchosti. Prvá vývojová fáza spočívala vo výbere vhodného profilu kde bol vybratý profil NACA 0012 kvôli jeho hrúbke a návrhu rôznych variantov konštrukcie. Dokopy boli nakreslené 3 varianty v programe AutoCAD z, ktorého boli následne prerobené z 2D výkresov na 3D modely.

Okrem FishBAC sme vytvorili aj konvenčnú a plávajúcu plochu na základe už spomenutého profilu NACA 0012, aby sme mohli porovnať vlastnosti FishBAC.

Následná časť práce riešila CFD simulácie, ktorých bolo dokopy vykonaných 48 pre 4 rôzne uhly nábehu a pre 4 rôzne rýchlosti z, ktorých 3 boli nízke a jedna vyššia vzhľadom na to, že tieto konštrukcie majú momentálne vysoký potenciál pre UAV, ktoré nezvyknú lietať vo vysokých rýchlostiach.

Tieto simulácie boli vykonané v programe Ansys Fluent podľa následného postupu:

- V Ansys workbench sme otvorili Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing).
- Pripravili sme si model pre meshing cez DesignModeler.
- Mesh bol urobený z minimálnou veľkosťou buniek 0,0001 m.
- Následne sme si pre simuláciu nastavili parametre ako rýchlosť, plochu a hĺbku krídla a simulovali na 250 iterácií.
- Po dosimulovaní sme si dali vytlačiť hodnoty a zobrali snímku obrazovky grafického zobrazenia rýchlostných a tlakových distribúcií.

Detailný textový postup použitý pre simulácie si môžete pozrieť v prílohe C

Posledná časť práce rieši stavbu živého modelu. Pri stavbe modelu sme začali vytlačením nábežnej časti do ktorej bol vsadený motor aby sme sa uistili, že bol model správne navrhnutý. Po tomto teste sme vytlačili tenkú sekciu chrbtice z PETG a kladku zo živice na ktorej sme vykonali testy ktoré prebehli úspešne. Pri tomto testovaní sme sa rozhodli použiť zásuvný poťah namiesto pružného po pokuse z pílovým listom ako poťahom. Následne sme navrhli variant 3 ktorý bol navrhnutý pre zásuvný poťah. Vytlačili sme hrubšiu časť chrbtice na ktorej sme otestovali poťah z mäkčeného PVC aby sme videli približné chovanie poťahu a usúdili sme, že potrebujeme pridanie koľajníc, aby poťah opisoval geometriu pozdĺžnikov.

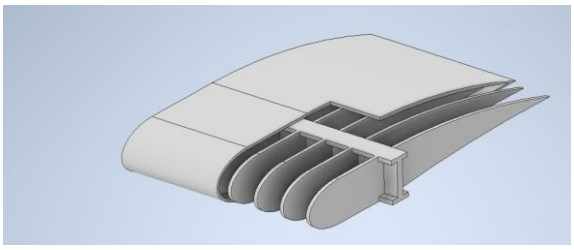
5. Konštrukcia polymorného profliu

V tejto časti sme sa zamerali na konštrukčné riešenia krídel ktoré využívajú profilové polymorfné konštrukcie. Riešili sme konštrukčnú, materiálovú a mechanizmovú problematiku.

5.1. Konštrukcia

Konštrukčná časť sa zaoberala nosnou sústavou krídla. Jej hlavným zameraním bolo vybrať vhodnú tradičnú konštrukciu krídla ktorá by bola ideálny pre tieto konštrukcie a podľa toho urobiť pár návrhov ako by mohla vyzerať.

Z pomedzi nosníkovej, pološkrupinovej, nosníkovo pološkrupinovej a škrupinovej konštrukcie sme vybrali nosníkovú konštrukiciu viď (Obrázok) ako najlepšiu možnosť z dôvodu nižšieho počtu nosných prvkov a jednoduchej implementácii aktuátorov a mechanizmov [7].



Obrázok 10: Nosníková konštrukcia.
Zdroj: autor podľa 7

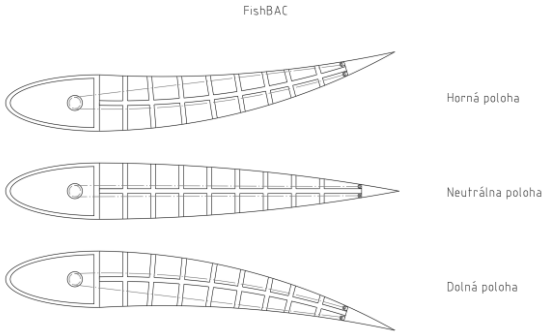
5.2. Materiály

V materiálovej časti sme sa zaoberali možným využití rôznych materiálov pre tieto konštrukcie z oblasti kovov, plastov a kompozitov. Konštrukciu sme rozdelili na tri časti pre ktoré sme riešili parametre, ako pevnosť, pružnosť, hmotnosť a odolnosť voči únave materiálu.

5.3. Mechanizácia

Táto časť sa zaoberala rôznymi konceptami mechanizácií polymorfných konštrukcií a výberom jedného konceptu na ktorom bude vykonaná štúdia. Pri výbere konceptu sme zohľadňovali nasledujúce parametre: Smer vychýlenia, veľkosť vychýlenia, výsledný tvar po vychýlení a komplexnosť mechanizmu.

Nakoniec sme z pomedzi kandidátov vybrali koncept FishBAC, teda (Fish bone adaptive camber) viď (Obrázok). Ide o mechanizáciu ktorá mimikuje biológiu rýb pre dosiahnutie zmeny tvaru strednej krivky. Dôvodom tohto výberu bola jednoduchá konštrukcia a možnosť vychýlenia do oboch strán a hladký prechod v oblasti vycbýlenia [26].

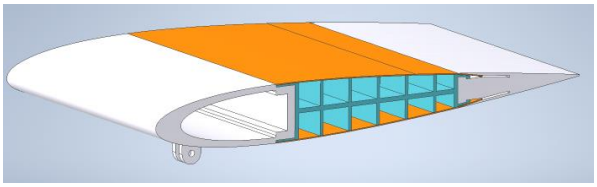


Obrázok 11: FishBAC.
Zdroj: autor podľa 26

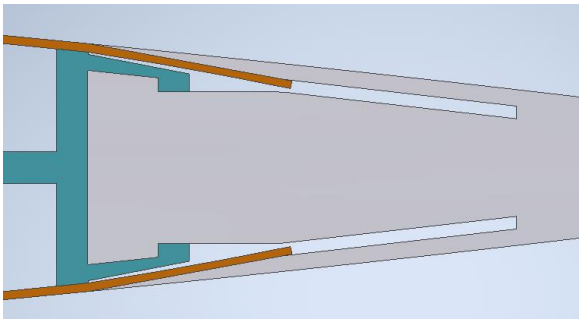
Ako posledné sme v teoretickej návrhovej časti riešili otázku riadenia a ovládania. Riešili sa možnosti priameho a nepriameho riadenia a ovládanie pre polymorfné konštrukcie kde sa defilovalo aké pohyby musí riadiaca sústava byť schopná vykonať aby dokázala riadiť polymorfné konštrukcie a aké komponenty by mohli byť využité pre ich docielenie.

6. Návrh a výroba modelu

Ako už bolo spomenuté v 5.3 pre reálny model sme si vybrali koncepciu polymorfnej konštrukcie FishBAC. Boli navrhnuté tri podobné varianty modelu ktoré sa líšili jednom alebo viacerých rozdieloch. Prvé dva varianty mali využívať pružný poťah zatiaľ čo variant 3 viď (Obrázok 15) využíval zasúvací poťah viď (Obrázok) kvôli čomu bol nakoniec aj vybratý.



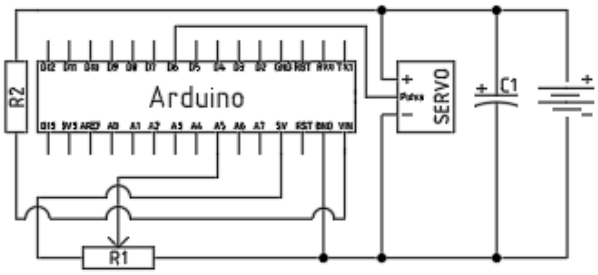
Obrázok 15: FishBAC V3.
Zdroj: autor



Obrázok 12: FishBAC V3 Zásuvné drážky pre poťah.
Zdroj: autor

Následne bola riešená mechanizácia kde sa vyberali medzi rôznymi komponentami, ako kladka, reťazové koleso a remenica a ku nim príslušným ťažným médiom ako lanko, reťaz a remeň. V momentálnom stave je v modeli využívaná ozubená kladka a lanko ktoré je ukotvené o odtokovú časť modelu za pomoci sťahovacích pások, tie boli vybraté z dôvodu jednoduchosti montáže a možnosti napínania lanka ich sťahovaním.

Posledná návrhová časť riešila riadenie a ovládanie. Vzhľadom na to že priame riadenie by bolo náročné realizovať pri testoch vo veternom tuneli a celkovo by bolo zložitejšie sme sa rozhodli použiť nepriame riadenie formou FBW (Fly By Wire). Mechanizácia bude riadená pomocou elektromotora ktorý bude dostávať signál z potenciometra spracovaný cez arduino nano. Pre schému elektrického zapojenia viď (Obrázok).



Obrázok 13: Schéma zapojenia.
Zdroj: autor

Model je momentálne stále vo vývoji, ale čiastočne funkčný. Je schopný vykonávania výchyliek do oboch smerov viď (Obrázok) a (Obrázok).

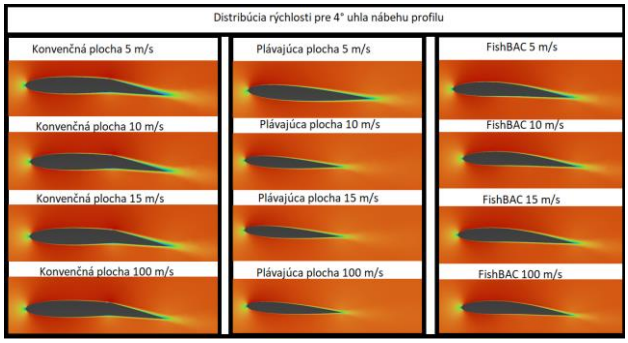
Obrázok 14: Model FishBAC horné vychýlenie.
Zdroj: autor

Obrázok 15: Model FishBAC dolné vychýlenie.
Zdroj: autor

7. Interpretácia výsledkov

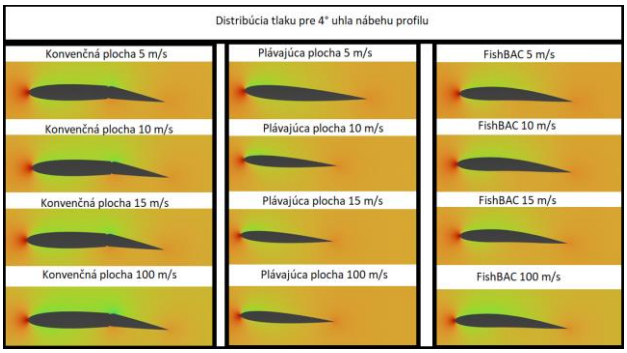
Táto časť práce sa zameriava na výsledky CFD simulácií vykonaných v Ansys Fluent. Ako vzorku hodnôt bolo vykonaných 48 simulácií pre štyri rôzne uhly nábehu profilu na štyroch rôznych rýchlostiach.

7.1. Distribúcia rýchlosti a tlaku



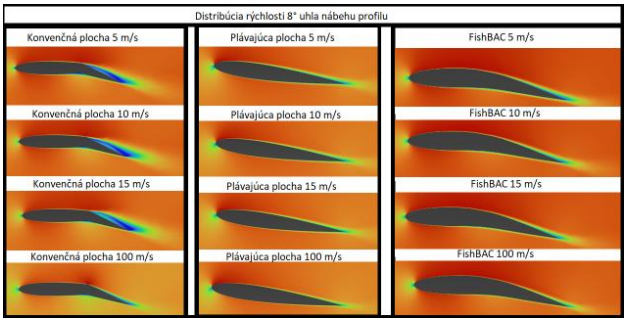
Obrázok 16: Distribúcia rýchlostí pre 4° uhla nábehu profilu.

Zdroj: autor

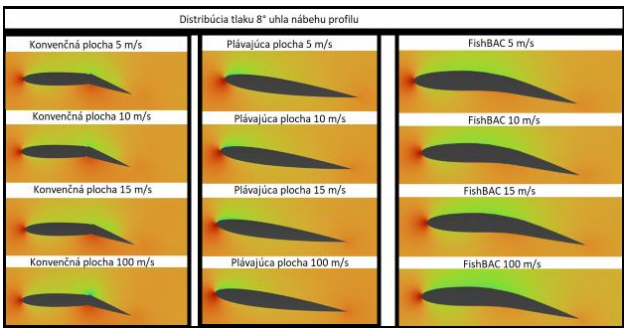


Obrázok 17: Distribúcia tlaku pre 4° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

Viď (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre pre uhol nábehu profilu 4°. Konvenčná konfigurácia má výrazné polia zvýšeného a zníženého tlaku a zvýšenej a zníženej rýchlosti v oblasti kĺbu kormidla. Pávajúca konfigurácia tieto výrazné polia nemá, polia nižžšieho talku sú však najme na nábežnej časti čo nie je ideálne pre generáciu vztlaku. Konfigurácia FishBAC pri tomto uhle nábehu profilu nadobúda podobu semi-symetrického proflu. Distribúcia nízkeho tlaku nad profilom je sa tiahne po väčšej ploche ako pri plávajúcej tak isto pozorovať miesta z výraznejšou zmenou tlakových a rýchlostných polí, ale táto zmena nie je výrazná ako pri konvenčnej konfigurácii.



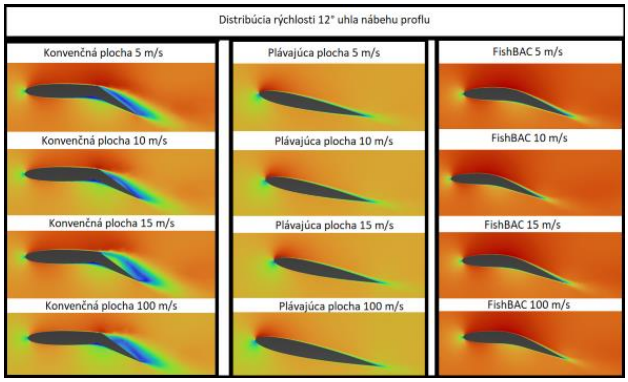
Obrázok 18: Distribúcia rýchlostí pre 8° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor



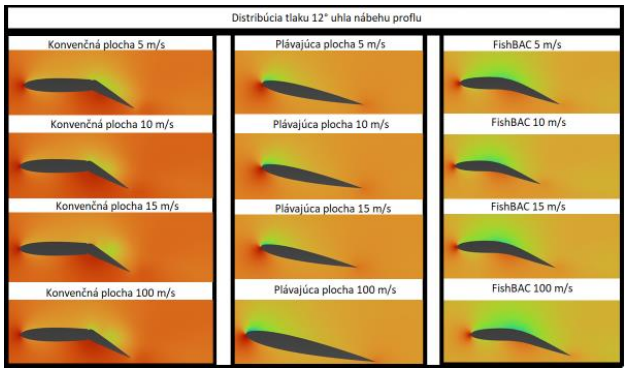
Obrázok 19: Distribúcia tlaku pre 8° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

Viď (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre pre uhol nábehu profilu 8°. Konvenčná konfigurácia má podobú distribúciu tlakových polí, ale na rýchlostnej distribúcii môžeme vidieť odtrhávanie medznej vrstvy na kormidle. Pri tomto uhle nábehu je zvýšenie rýchlosti schopné zabrániť tomuto odtrhnutiu. Pri plávajúcej konfigurácii

nemôžeme pozorovať výrazné zmeny okrem z intenzívnenia tlakových a rýchlostných polí nad profilom v nábežnej časti. Pri Konfigurácii FishBAC sa zo zvýšením uhla nábehu rovnako zintenzívnili tlakové a rýchlostné polia ako pri plávajúcej konfigurácii. Nemôžeme pozorovať žiadne odtrhávanie medznej vrstvy ako pri konvenčnej konfigurácii.



Obrázok 20: Distribúcia rýchlostí pre 12° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor



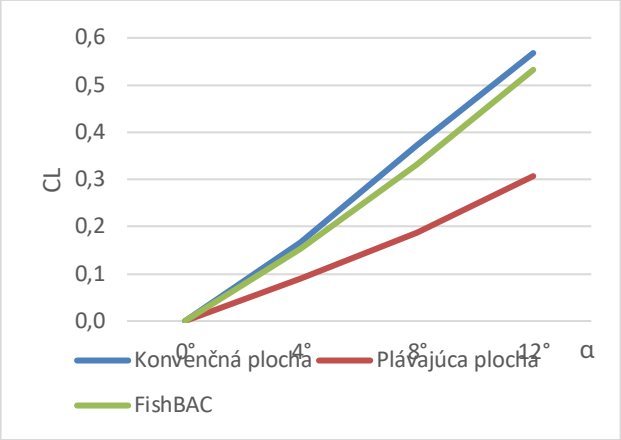
Obrázok 21: Distribúcia tlaku pre 12° uhla nábehu profilu.
Zdroj: autor

Viď (Obrázok) a (Obrázok) pre zmeny rýchlostných a tlakových distribúcií pre uhol nábehu profilu 12°. Konvenčná plocha si ponecháva tlakové a rýchlostné distribúcie ako pri nižších uhloch nábehu profilu. Rovnako dochádza k odtrhávaniu medznej vrstvy, ale v tomto prípade zvýšenie rýchlosti tomuto javu nepredídeme. Plávajúca konfigurácia si rovnako ponecháva tlakové a rýchlostné distribúcie ktoré boli pozorované pri nižších uhloch nábehu. Pri konfigurácii FishBAC môžeme pozorovať výrazné zvýšenie intenzívnosti rýchlostných a tlakových polí, tieto polia sú však kvôli hladkému prechodu distribuované po väčšej ploche oproti konvenčnej konfigurácii.

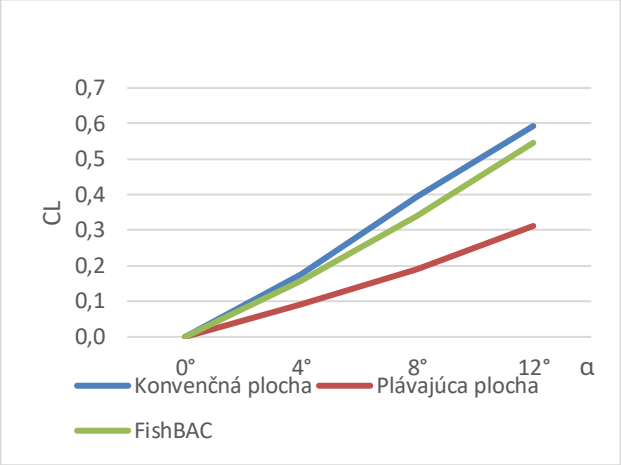
7.2. Grafy

Vztlakové a odporové vlastnosti, ktoré boli získané simuláciou na týchto plochách môžu byť zobrazené za pomoci grafov ako vztlaková, odporová čiara a krivky aerodynamickej jemnosti. Pre interpretáciu výsledkov využijeme hodnoty získané zo simulácií pre rýchlosti 15 m/s a 100 m/s Dôvodmi výberu týchto rýchlostí sú nasledovné. 15 m/s je rýchlosť, ktorú pri menších UAV môžeme považovať za vzletovú rýchlosť. Rýchlosť 100 m/s môžeme považovať za cestovnú rýchlosť UAV, alebo pristávaciu a vzletovú väčších letúnov. Ako východzie hodnoty porovnania budeme používať hodnoty konvenčnej plochy, ktorá bude mať hodnotu 100%, teda pokiaľ konvenčná plocha bude mať hodnotu 1 a plocha X hodnotu 0.5, plocha X bude generovať 50% danej hodnoty.

7.2.1. Vztlakové charakteristiky



Graf 1: Koeficient vztlaku CL pre v = 15 m/s.
Zdroj: autor



Graf 2: Koeficient vztlaku CL pre v = 100 m/s.
Zdroj: autor

Tabuľka 1: Koeficient vztlaku CL pre v = 15 m/s.

Koeficient vztlaku CL pre v = 15 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.1677366	0.088940296	0.15430984
%	100%	53,02 %	92,00 %
8°	0.37301864	0.18623416	0.33294064
%	100%	49,93 %	89,26 %
12°	0.56784089	0.3070217	0.53228697
%	100%	54,07 %	93,74 %

Zdroj: autor

Tabuľka 2: Koeficient vztlaku CL pre v = 100 m/s.

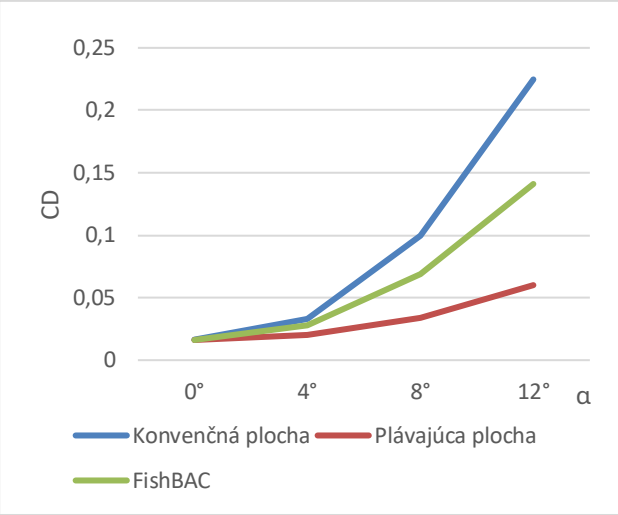
Koeficient vztlaku CL pre v = 100 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.17413646	0.090419647	0.15824075
%	100%	51,93 %	90,87 %
8°	0.39342449	0.18958228	0.34183689
%	100%	48,19 %	87%
12°	0.59300531	0.31199387	0.54596965
%	100%	52,61 %	92,07 %

Zdroj: autor

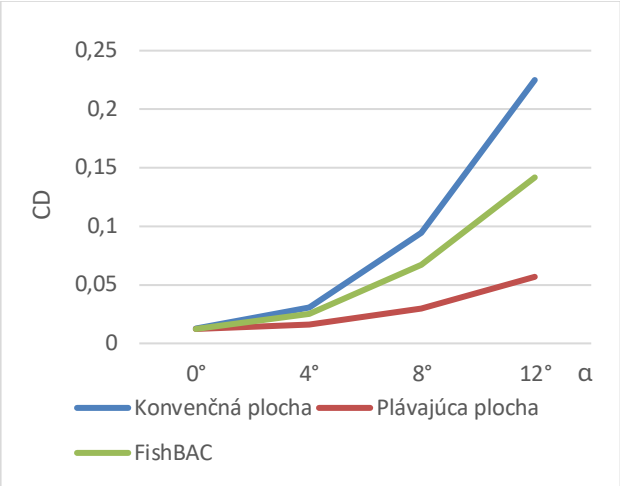
Viď (Graf), (Graf), (Tabuľka) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Konvenčná plocha má z troch skúmaných variantov najvyšší koeficient vztlaku. Plávajúca plocha dosahuje v priemere 51,63 % čo je približne polovičná hodnoty konvenčnej plochy zatiaľ čo priemerná hodnota konfigurácie FishBAC je 90,82 %.

Z týchto údajov môžeme vyvodiť nasledovný záver: Pri vykonávaní manévra by dosiahol najväčšiu účinnosť riadiacich plôch letún, ktorý používa konvenčnú konfiguráciu riadiacich plôch. V prípade, že by letún využíval plávajúcu konfiguráciu riadiacich plôch aerodynamický moment na ťažisko letúna by bol len polovičný voči konvenčnej ploche, čo by malo za výsledok pomalší manéver alebo nutnosť vyššieho vychýlenia riadiacej plochy pre jeho vykonanie. Konfigurácia FishBAC je schopná generovať len o 10% menší aerodynamický moment voči konvenčnej konfigurácii, čo by rovnako spôsobilo nižšiu účinnosť riadiacich plôch, ale tento rozdiel by nebol výrazný ako pri plávajúcej konfigurácii.

7.2.2. Odporové charakteristiky



Graf 3: Koeficient odporu CD pre v = 15 m/s.
Zdroj: autor



Graf 4: Koeficient odporu CD pre v = 100 m/s.
Zdroj: autor

Tabuľka 6: Koeficient odporu CD pre v = 15 m/s.

Koeficient odporu CD pre v = 15 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.033149336	0.020219168	0.028266173
%	100%	61,00 %	85,27 %
8°	0.099831494	0.03365793	0.068749713
%	100%	33,72 %	68,87 %
12°	0.224723	0.060066987	0.1410193
%	100%	26,73 %	62,76 %

Zdroj: autor

Tabuľka 4: Koeficient odporu CD pre v = 100 m/s.

Koeficient odporu CD pre v = 100 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	0.030201307	0.016413237	0.024875292
%	100%	54,35 %	82,37 %
8°	0.094536345	0.029993662	0.066853563
%	100%	31,73 %	70,72 %
12°	0.22489681	0.056827116	0.14173511
%	100%	25,27%	63,02 %

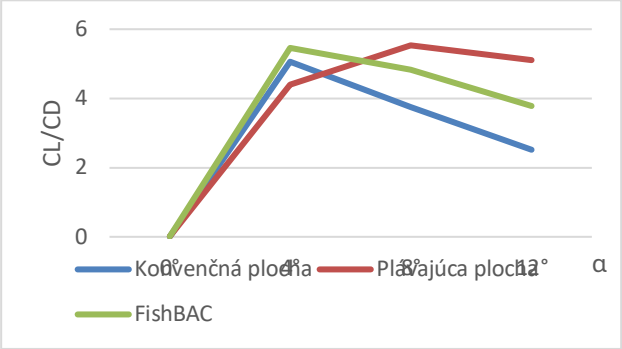
Zdroj: autor

Viď (Graf), (Graf), (Tabuľka 6) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Konvenčná plocha z troch skúmaných variantov vytvára najvyšší koeficient odporu. Rovnako ako v prípade vztlaku koeficient plávajúcej plochy je najnižší, ale na rozdiel od vztlaku so zvyšujúcim sa uhlom nábehu profilu rovnako, ako aj pri konfigurácii FishBAC výrazne klesá oproti hodnotám konvenčnej konfigurácie.

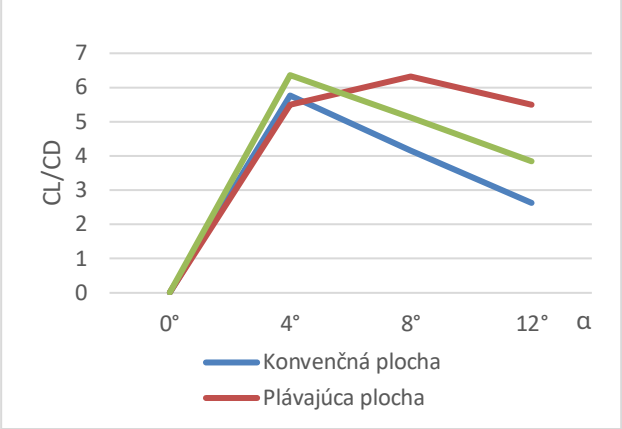
Z týchto údajov môžeme vyvodiť nasledovný záver: Letúny s plávajúcou konfiguráciou riadiacich plôch by produkovali výrazne menší odpor od letúnov s konvenčnou alebo FishBAC konfiguráciou riadiacich plôch. Konfigurácia FishBAC produkuje

značne vyšší odpor ako plávajúca konfigurácia, ale predstavuje zlepšenie oproti konvenčnej konfigurácii.

7.2.3. Aerodynamická čistosť



Graf 5: Aerodynamická jemnosť pri 15 m/s.
Zdroj: autor



Graf 6: Aerodynamická jemnosť pri 100 m/s.
Zdroj: autor

Tabuľka 5: Aerodynamická jemnosť pri v = 15 m/s.

Aerodynamická jemnosť pri v = 15 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	5.060028955	4.398810871	5.459169871
%	100%	86,93 %	107,88 %
8°	3.736482597	5.533143601	4.842793162
%	100%	148,08 %	129,61 %
12°	2.52684812	4.842793162	3.774568233
%	100%	191,17 %	149,38 %

Zdroj: autor

Tabuľka 6: Aerodynamická jemnosť pri v = 100 m/s.

Aerodynamická jemnosť pri v = 100 m/s			
	Konvenčná plocha	Plávajúca plocha	FishBAC
4°	5.765858411	5.508946651	6.361362512
%	100%	95,54 %	110,33 %
8°	4.161621544	6.320744696	5.113218723
%	100%	151,88 %	122,87 %
12°	2.636788445	5.49022882	3.852042377
%	100%	208,22 %	146,09 %

Zdroj: autor

Viď (Graf), (Graf), (Tabuľka) a (Tabuľka) kde môžeme dedukovať nasledovné: Pri nižších uhloch nábehu profilu má plávajúca konfigurácia najnižšiu aerodynamickú čistosť zatiaľ čo FishBAC ju má najvyššiu. Zo zvažujúcim sa uhlom nábehu profilu sa však hodnoty plávajúcej konfigurácie zvyšujú, dosiahnu viac ako dvojnásobok konvenčnej konfigurácie. Podobný vývoj môžeme pozorovať aj pri FishBAC, táto konfigurácia však dosiahne iba 146,09 % hodnoty konvenčnej konfigurácie.

Z týchto údajov môžeme vyvodiť nasledovný záver: Konvenčná a FishBAC konfigurácie majú vysokú aerodynamickú čistosť pri nižšom uhle nábehu profilu. Toto by sa v praxi preukázalo na efektivite riadiacej plochy pri týchto uhloch nábehu, ktoré by boli využívané pre aerodynamické vyváženie počas cestovnej fázy letu. Pre vyššie uhly nábehu hodnoty plávajúcej konfigurácie aerodynamická čistosť narastie oproti ostatným konfiguráciám. Tento nárast spôsobí zvýšenie efektivity plávajúcej konfigurácii.

7.2.4. Komparácia konfigurácií

Riadiace plochy sú prostriedky na ovládanie letúna v priestore, tieto plochy musia byť schopné vytvárať dostatočne silné aerodynamické momenty na ťažisko letúna, aby bol letún považovaný za riaditeľný

Konvenčná konfigurácia generuje najvyššiu vztlakovú silu, čo ju robí najviac účinnú. Letún, ktorý využíva konvenčnú konfiguráciu by oproti letúnom, ktoré využívajú inú konfiguráciu bude mať najvyššiu obratnosť. Zároveň však generuje najvyššiu odporovú silu čo má za následok vyššiu spotrebu paliva. Pomer generovaného vztlaku a odporu je celkovo najhorší zo všetkých porovnávaných konfigurácií, čo ho robí najmenej efektívny.

Vztlakové sily plávajúcej konfigurácie sú najnižšie z porovnávaných konfigurácií, teda jej účinnosť z pomedzi nich je najnižšia, čo vyústi v horšiu obratnosť. Odporové sily sú však rovnako najnižšie, čo ich robí ideálnou konfiguráciou pre zníženie spotreby paliva. Pomer vztlakových a odporových síl je nižší pri menšom uhle nábehu, ale pri narastajúcom uhle nábehu tento pomer rastie vzhľadom na ostatné konfigurácie.

Konfigurácia FishBAC produkuje o 10% menšiu vztlakovú silu a výrazne menší odpor oproti konvenčnej konfigurácií. Toto ju robí výrazne efektívnejšiu s porovnateľnou účinnosťou oproti konvenčnej konfigurácii. Plávajúca plocha má najvyššiu efektivitu ale zároveň najnižšiu účinnosť.

8. Záver

Cieľom tejto práce bolo analyzovať či sú polymorfné konštrukcie vhodnou náhradou za rôzne konfigurácie riadiacich plôch používaných v dnešných letúnoch. Existuje mnoho konceptov polymorfných konštrukcií a ich mechanizácií, ktoré sa líšia v komplexnosti, smere vychýlenia, stupňa vychýlenia a každá koncepcia má pozitíva aj negatíva. CFD simulácie vykonané v Ansys Fluent na koncepte FishBAC nám preukázali, že

polymorfné konštrukcie nám poskytujú zlepšenia, ale aj zhoršenia rôznych aerodynamických charakteristík. V tejto práci neboli CFD simulácie vykonané v plnom rozsahu pre ostatné koncepty, avšak výskumy v analýze súčasného stavu preukázali výsledky podobné tým, ktoré boli dosiahnuté v našej práci. Okrem aerodynamických charakteristík je však potrebné spomenúť aj nevýhody v oblasti konštrukčnej, bezpečnostnej, údržbovej a ekonomickej. Polymorfné konštrukcie sú výrazne komplexnejšie z hľadiska konštrukcie oproti konvenčným riešeniam, to znamená, že sú náročnejšie na výrobu, väčšia šanca na zlyhanie komponentu, náročnejšia údržba, a to všetko vyústi do vyšších ekonomických nákladov. Polymorfné konštrukcie predstavujú zlepšenie z hľadiska letových vlastností a úspory paliva, kvôli zníženého odporu je otázne, či sú tieto zlepšenia dostatočné na to, aby pokryli náklady spôsobené jej komplexnejšou konštrukciou. Výskum polymorfných konštrukcií súkromnými spoločnosťami ale aj vládami financované projekty však naďalej napreduje, či už v oblasti optimalizácie už existujúcich alebo vývojom nových konceptov polymorfných konštrukcií. Niektoré koncepcie sú už zavedené v prevádzke alebo boli testované na letúnoch a ukázali sľubné výsledky. V momentálnom stave však väčšina polymorfných konštrukcií nie je v štádiu ,v ktorom by mohli byť zavedené do prevádzky.

Pokračovanie tejto práce by mohlo byť realizované optimalizáciou konfigurácie FishBAC, ako napr. odstránenie alebo minimalizovanie flutteru, optimalizovanie riadiacich prvkov alebo re-dizajn niektorých častí. Po odstránení nedostatkov by sa mohlo navrhnúť a skonštruovať UAV, ktoré využíva konfiguráciu FishBAC pre jednu alebo viac riadiacich plôch a porovnať letové výkony FishBAC a konvenčných konfigurácií.

Poďakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

[1] G. Witcher, “Experimental aircraft RK / LIG-7,” Военное обозрение. Accesed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://en.topwar.ru/105007-eksperimentalnyy-samolet-rk-lig-7.html

[2] ulyakinmariupol, “Experimental fighter RK-I,” Военное обозрение. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://en.topwar.ru/20680-eksperimentalnyy-istrebitel-rk-i.html

[3] VÁVRA, Pavel. a kol.: Strojnícke tabuľky pre SPŠ strojnícke, Bratislava, Alfa 1984. ISBN

[4] H. Strüber, “THE AERODYNAMIC DESIGN OF THE A350 XWB-900 HIGH LIFT SYSTEM”. In: 29th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. St Petersburg, Russia. Dostupné na: https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2014/data/papers/2014_0298_paper.pdf

[5] S. Powers, L. Webb, E. Friend, and W. Lokos, “Flight test results from a supercritical mission adaptive wing with smooth variable camber,” in *6th AIAA Biennial Flight Test Conference*, Hilton Head, SC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 1992. doi: 10.2514/6.1992-4101.

[6] T. Majid and B. W. Jo, “Status and Challenges on Design and Implementation of Camber Morphing Mechanisms,” *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, no. 1, p. 6399937, 2021, doi: 10.1155/2021/6399937.

[7] ŠKULTĚTY, Filip: Lietadlá 1, Žilina, EDIS 2022. ISBN 978-80-554-1925-1

[8] VAŠKO, MilanTECHNICKÁ MECHANIKA A PRUŽNOSŤ

[9] B. N. Bhat *et al.*, “Chapter 2: Aerospace Materials Characteristics,” 2018. doi: 10.2514/4.104893.

[10] “Carbon Fiber - The Material Of The Future? - YouTube.” Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=aKpDyfJnxQQ

[11] J. Martinez, D. Scopelliti, C. Bil, R. Carrese, and P. Marzocca, “Design, Analysis and Experimental Testing of a Morphing Wing,” Jan. 2017. doi: 10.2514/6.2017-0059.

[12] DIMINO, Ignazio. et al. Actuation System Design for a Morphing Wing Trailing Edge Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.cira.it/en/Pubblicazioni/2014_04_25_SARISTU.pdf

[13] S. Meguid, Y. Su, and Y. Wang, “Complete morphing wing design using flexible-rib system,” *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 13, Mar. 2017, doi: 10.1007/s10999-015-9323-0.

[14] P. L. Bishay *et al.*, “Design and Analysis of MataMorph-3: A Fully Morphing UAV with Camber-Morphing Wings and Tail Stabilizers,” *Aerospace*, vol. 9, no. 7, p. 382, Jul. 2022, doi: 10.3390/aerospace9070382.

[15] H. Zhu, “History and Future Development of Morphing-Wing Aircrafts,” *Theor. Nat. Sci.*, vol. 86, pp. 120–125, Jan. 2025, doi: 10.54254/2753-8818/2025.20190.

[16] M. S. Parancheerivilakkathil, R. M. Ajaj, and K. A. Khan, “A compliant polymorphing wing for small UAVs,” *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 33, no. 10, pp. 2575–2588, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cja.2020.03.027.

[17] T. Marketing, “Why Springs are not Made of Aluminium?,” Technische veren specialist | Tevema.com. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.tevema.com/why-springs-are-not-made-of-aluminium/

[18] A. Vila Masip, “Design and analysis of a Morphing Wing concept for a UAV - Albert Vila Masip,” Oct. 2020. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/363335309_Design_and_analysis_of_a_Morphing_Wing_concept_for_a_UAV_-_Albert_Vila_Masip#fullTextFileContent

[19] N. Nguyen and I. Tuzcu, “Aeroelastic Flight Dynamics of Flexible Aircraft with Inertial and Propulsive Force Interactions,” Aug. 2009. doi: 10.2514/6.2009-6045.

[20] A. Thomas, N. Nair, A. Jose, and N. CS, "Design and Analysis of Flexible Wing," *ACS J. Sci. Eng.*, vol. 3, pp. 42–52, Mar. 2023, doi: 10.34293/acsjse.v3i1.60.

[21] S. Bhat and R. Patibandla, "Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review," in *Alloy Steel - Properties and Use*, 2011. doi: 10.5772/28911.

[22] N. Yurii, "MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER AND CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 12, pp. 518–525, Oct. 2024, doi: 10.21474/IJAR01/19668.

[23] "Types of Plastic | Learn What is Plastic Made Of & Different Types of Plastic - A&C Plastics." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.acplasticsinc.com:443/informationcenter/r/7-different-types-of-plastic-and-how-they-are-used

[24] A. P, "A Closer Look at 3D Printing Materials: Plastics," 3Dnatives. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/

[25] "Thermoplastic Polyurethane (TPU) Material: Properties & Structure." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu

[26] C. Beaverstock, B. Woods, J. Fincham, and M. Friswell, "Performance Comparison between Optimised Camber and Span for a Morphing Wing," *Aerospace*, vol. 2, pp. 524–554, Sep. 2015, doi: 10.3390/aerospace2030524.

[27] A. E. Rivero, S. Fournier, R. M. Heeb, and B. K. S. Woods, "Design, Manufacture and Wind Tunnel Test of a Modular FishBAC Wing with Novel 3D Printed Skins," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12020652.

[28] H. L. Şahin and Y. Yaman, "Synthesis, Analysis, and Design of a Novel Mechanism for the Trailing Edge of a Morphing Wing," *Aerospace*, vol. 5, p. 127, Dec. 2018, doi: 10.3390/aerospace5040127.

[29] M. S. Parancheerivilakkathil, Z. Haider, R. M. Ajaj, and M. Amoozgar, "A Polymorphing Wing Capable of Span Extension and Variable Pitch," *Aerospace*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/aerospace9040205.

[30] Q. Chanzy and A. J. Keane, "Analysis and experimental validation of morphing UAV wings," *Aeronaut. J.*, vol. 122, no. 1249, pp. 390–408, Mar. 2018, doi: 10.1017/aer.2017.130.

[31] "FlexSys," FlexSys. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.flxsys.com

[32] KC-135 Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://www.airforce-technology.com/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/200306-Z-QI712-0001-1.jpg

[33] B. Woods and M. Friswell, "Preliminary Investigation of a Fishbone Active Camber Concept," in *ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2012*, Sep. 2012. doi: 10.1115/SMASIS2012-8058.

[34] E. Özbek, S. Ekici, and T. Karakoc, "Unleashing the Potential of Morphing Wings: A Novel Cost Effective Morphing Method for UAV Surfaces, Rear Spar Articulated Wing Camber," *Drones*, vol. 7, p. 379, Jun. 2023, doi: 10.3390/drones7060379.

[35] P. L. Bishay *et al.*, "SCAMORSA-1: A camber-morphing wind turbine blade with sliding composite skin," *J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 931–940, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.04.006.

[36] PECHO, Pavol. Plasty a ich rozdelenie

[37] "Polyamide (Nylon): Guide to PA6, PA66, PA11, PA12 Variants." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon

[38] "Polyethylene Terephthalate (PET) - Uses, Properties & Structure." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Dostupné na: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic