



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## MORFOVATELNÉ NOSNÉ PLOCHY LETADEL

AIRCRAFT LIFTING SURFACE MORPHING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Helena Přikrylová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dubnický

BRNO 2022



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Studentka: **Helena Přikrylová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenství  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Dubnický**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Morfovateľné nosné plochy letadel

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika morfovateľných nosných ploch je v súčasnosti intenzívne zkoumanou oblastí vývoje letecké techniky. Morfování nosných ploch umožňuje plynulou aktivní změnou tvaru upravit parametry plochy, čímž dojde k rozšíření možných režimů použití letounu, zlepšení jeho charakteristik, snížení spotřeby pohonných hmot atd.

### Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši doposud navržených způsobů morfování nosných ploch nebo jejich částí. Porovnat koncepty z hlediska nutných technologií.

### Seznam doporučené literatury:

BARBARINO, S., O. BILGEN, R. M. AJAJ, M. I. FRISWELL a D. J. INMAN. A Review of Morphing Aircraft. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures. 2011 , 22(9), 823-877. ISSN 1045-389X. DOI: 10.1177/1045389X11414084.

THILL, C., J. ETCHES, I. BOND, K. POTTER a P. WEAVER. Morphing skins. The Aeronautical Journal [online]. 2008, 112(1129), 117-139. ISSN 0001-9240. DOI:10.1017/S0001924000002062.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce představuje problematiku morfovateľných nosných ploch letadel nebo jejich částí, a to konkrétně morfování změnou prohnutí střední křivky profilu. Požadavky kladené na morfovateľné konstrukce a rozdílné přístupy k jejich dosažení jsou prezentovány na základě popisu jednotlivých návrhů.

V první části práce představuje motivaci pro stavbu letadel s morfovateľnými nosnými plochami. Následující tři kapitoly se zabývají konstrukčním řešením, přičemž jsou rozebrány pohyblivé mechanismy, sloužící jako náhrada konvenčního tuhého žebra, potahy, u nichž je požadavek anizotropních vlastností a aktuátory, jakožto pohony morfování. Následující kapitola se věnuje simulacím a experimentálním měřením výkonů morfovateľných nosných ploch.

Poslední kapitola je zaměřena na simulace a testy na modelech profilů, týkající se demonstrace schopnosti změny tvaru profilu a prokázání dostatečné tuhosti a pevnosti konstrukce.

## **Klíčová slova**

letadla, morfovateľné nosné plochy, měnitelná geometrie křídla, morfování změnou prohnutí střední křivky profilu, aktuátory, smart materiály

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with the introduction of morphing wing technology, more specifically camber morphing. It describes the specific requirements in terms of different construction parts by presenting various morphing concepts.

The first part is dedicated to brief description of the motivation for wing morphing, that is followed by introducing different morphing concepts that use kinematic or compliant mechanisms in order to achieve shape changes of the airfoil. The need of anisotropic skin and several ways of achieving the anisotropic behaviour are described as well as the pros and cons of the use of conventional actuators and innovative smart materials.

The last chapters deal with the validation of morphing wing benefits and the demonstrations of the feasibility of the morphing concepts.

## **Keywords**

aircraft, morphing wing, adaptive wing, camber morphing, actuators, smart materials

## **Bibliografická citace**

PŘIKRYLOVÁ, Helena. *Morfovateľné nosné plochy letadel*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/172058>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Lukáš Dubnický.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Dubnického a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022 .....

Helena Přikrylová

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Lukáši Dubnickému, za jeho rady a čas strávený konzultacemi během vypracovávání mé bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat rodině za podporu během celého studia.

# Obsah

Úvod.....	11
1    Morfování křídel.....	11
1.1    Morfování změnou šípovitosti .....	11
1.2    Morfování změnou rozpětí.....	11
1.3    Morfování změnou prohnutí střední křivky profilu .....	12
2    Vnitřní konstrukce .....	13
2.1    Kinematický mechanismus .....	14
2.2    Poddajný mechanismus.....	22
2.3    Návrhy morfování bez vnitřního pohyblivého mechanismu.....	25
3    Potah křídla.....	28
3.1    Nedělený potah.....	28
3.2    Dělený potah .....	32
4    Aktuátory .....	33
4.1    konvenční aktuátory .....	35
4.2    Solid-state aktuátory.....	38
5    Kalkulace a měření potenciálních aerodynamických výkonů .....	42
6    Simulace morfování a zkoušky morfování na modelech profilů.....	47
6.1    Simulace a zkoušky morfování .....	48
6.2    Simulace zatížení a zkoušky zatížení na modelech profilů.....	50
Závěr.....	53
Použité informační zdroje.....	53
Seznam použitých zkratk .....	57

# Úvod

Za vůbec první letoun s morfovateľnými nosnými plochami by mohl být považován již stroj bratří Wrightů ze začátku 20. století, který disponoval poddajným křídlem, jehož zkroucení narušovalo rovnováhu mezi vztlakem na pravé a levé části křídla. Tak bylo ovládáno klonění letounu.

V následujících desetiletích byla u letounů poddajná konstrukce křídla vlivem vyšších nároků, především na její tuhost, nahrazena konstrukcí pevnou, ovládání letounu bylo pak namísto zkroucením křídla řešeno taktéž samostatnými konstrukčními prvky – křídélky. Změnou jejich výchylky je dosaženo jiného prohnutí střední křivky profilu tak, jako u prvních letadel toho bylo dosaženo deformací křídla kroucením.

V průběhu následujících desetiletí se ovšem znovu objevila potřeba, a díky pokroku v letectví i možnost, přiblížit se aerodynamicky velmi dokonalým ptákům, jejichž letem byl inspirován i koncept bratří Wrightů. A tak postupně začala vznikat letadla s měnitelnou geometrií křídel, za účelem skloubení výhod, které s sebou různé geometrie přináší.

Za více než sto let zaznamenalo letectví velký posun vpřed a letadla se stala velmi sofistikovanými stroji. Další snaha o pokrok tedy představuje ještě větší výzvu. Avšak v současné době je již vědecké poznání na tak vysoké úrovni, že umožňuje řešení i velmi náročných problémů, které byly v době počátků letectví prakticky neřešitelné. V posledních desetiletích se tedy objevují projekty i prototypy letadel, nadále posouvající hranice výkonnosti a umožňující větší všestrannost letadel, pramenící z možnosti změny geometrie křídla.

První část práce představuje motivaci pro stavbu letadel s morfovateľnými nosnými plochami a rozděluje metody morfování podle měněné geometrie křídla. Vzhledem k obsáhlosti tématu se v dalších částech práce zaměřuje pouze na morfování změnou prohnutí střední křivky profilu. V následující části jsou popsána konstrukční řešení některých návrhů morfování, a to konkrétně různé způsoby zajištění změny tvaru profilu. Dále se práce zabývá představením specifických požadavků, kladených na potahy profilů morfovateľných křídel a porovnáním rozdílných přístupů k jejich dosažení.

# 1 MORFOVÁNÍ KŘÍDEL

Vzhledem k tomu, že letadlo prochází v průběhu letu několika letovými režimy, během nichž je tou nejvýhodnější rozdílná geometrie křídla, výkonnost tuhého křídla s pevně danou geometrií se za letu mění podle toho, v jakém režimu letu se letadlo zrovna nachází.

Hlavní motivací stavby letadel s morfovateľnými nosnými plochami je celkové vylepšení aerodynamických výkonů letadla umožněním změny geometrie křídla podle aktuálních podmínek letu. Podle toho, jakým způsobem je geometrie křídla měněna, lze ovlivnit různé vlastnosti.

Jednotlivé způsoby morfování křidel je možné rozdělit podle způsobu změny tvaru. V této práci byly rozděleny na morfování křídla změnou šípovitosti, změnou rozpětí a změnou prohnutí střední křivky profilu, tedy změnou tvaru profilu.

## 1.1 MORFOVÁNÍ ZMĚNOU ŠÍPOVITOSTI

Změna šípovitosti je využívána z důvodu pozitivního vlivu větší šípovitosti na vlastnosti letadla při rychlostech blízkých se rychlosti zvuku. Obecně je šípovitost křidel jedním z neefektivnějších způsobů oddálení a snížení efektů odtržení proudnic vlivem rázové vlny na křídle [19]. Vzhledem k tomu, že u šípovitých křidel svírá nabíhající proud vzduchu s náběžnou hranou křídla jiný úhel než  $90^\circ$ , je rychlost proudu rozložena do složky kolmé a rovnoběžné s náběžnou hranou. Je to pouze kolmá složka rychlosti, která určuje velikost tlaku na profilu a jeho aerodynamických koeficientů a tato složka je díky šípu snížena oproti rychlosti okolního proudu vzduchu. Díky tomu lze při větší šípovitosti dosáhnout vyšší rychlosti letu, aniž by byly dosaženy kritické podmínky na křídle. Využitím šípovitosti křidel je tedy možné oddálit počátek vlivů stlačitelnosti vzduchu a současně snížit velikost tlakových sil působících na křídlo [19].

Křídlo s větší šípovitostí je vhodné pro vysoké rychlosti letu, naopak pro nižší rychlost letu by bylo výhodnější použití křídla s menší šípovitostí vzhledem k nutnosti dosažení většího součinitele vztlaku. Morfování změnou šípovitosti je tedy motivováno rozdílnými požadavky na geometrii křídla letadel, které dosahují nadzvukových rychlostí.

## 1.2 MORFOVÁNÍ ZMĚNOU ROZPĚTÍ

Významným benefitem zvětšení rozpětí při stálé hloubce profilu je zvětšení štíhlosti křídla. Ta má velký vliv na hodnotu indukovaného odporu, jehož zdrojem jsou koncové víry, vznikající na koncích křidel v důsledku rozdílů tlaku na jeho horní a spodní straně, přičemž její větší hodnota má za následek snížení indukovaného odporu.

Se zvětším rozpětím naroste navíc i plocha křídla, což vede ke snížení plošného zatížení (Anderson, 2017) ovšem současně dojde i ke značnému nárůstu ohybového momentu, a tedy napětí u kořene křídla (Ajaj et al., 2014). Při letu vyšší rychlostí, kdy je

křídlo namáháno velkými silami a momenty, je tedy spíše žádoucí křídlo s menším rozpětím. Naopak při letu s nižší rychlostí, kdy má indukovaný odpor významný podíl na celkovém odporu, by byly výkony zlepšeny významným úbytkem odporu v případě křídel s větším rozpětím (Anderson, 2017).

Je tedy zřejmé, že možnost měnit rozpětí za letu by přispěla k výkonnosti letadla díky přizpůsobení podmínkám daného režimu letu.

Vzhledem k tomu, že se tato práce nezabývá morfováním změnami rozpětí a šípovitosti, nebude jim, jejich konstrukčním řešením a vlivu na výkonnost letadel v následujících kapitolách věnována pozornost.

### 1.3 MORFOVÁNÍ ZMĚNOU PROHNUTÍ STŘEDNÍ KŘIVKY PROFILU

Změna pronutí střední křivky profilu má obecně za následek změnu průběhu tlaku na jeho horní a spodní straně, čímž je ovlivněn také průběh hodnot jeho součinitelů vztlaku a odporu v závislosti na úhlu náběhu. Kladné pronutí střední křivky profilu v odtokové části profilu pak má významný vliv na hodnotu součinitele vztlaku při daném úhlu náběhu. Pronutí na náběžné hraně způsobuje převážně oddálení odtržení proudnic na přední části profilu, a tedy dosažení vyšších maximálních součinitelů vztlaku (Nicolai a Carichner, 2010).

Hodnota maximálního dosažitelného součinitele vztlaku má pak vliv na minimální rychlost letu letadla (Anderson, 2017). Potřeba vyvození vysokého součinitele vztlaku bývá standardně řešena použitím prostředků pro zvýšení vztlaku, tedy vztlakových klapek a slotů, jejichž vysunutí způsobí zvětšení pronutí střední křivky profilu.

Vzhledem k tomu, že konvenční vztlaková klapka s sebou nese negativní efekt diskontinuit na profilu a tím většího odporu, v případě morfovateľného křídla, které by bylo schopné plynule měnit pronutí střední křivky profilu, by ke vzniku tohoto dodatečného odporu nedocházelo. Další nevýhodou konvenčních vztlakových klapek pak je nárůst odporu, způsobený odtržením proudnic v zadní části profilu vlivem zvětšení poloměru křivosti na horní straně profilu při vychýlení vztlakové klapky směrem dolů (Kota et al., 2003). Kota et al. (2006) pak zmiňuje zmírnění nebo eliminaci tohoto odtržení díky jemnějšímu zakřivení křivky profilu v případě použití poddajné morfovateľné konstrukce jako náhrady vztlakové klapky. Dalším benefitem oproti konvenčním vztlakovým klapkám a jimi způsobeným diskontinuitám profilu je také zmenšení radarového průřezu (Wang et al., 2001).

Concilio et al. (2020) uvádí jako další motivaci pro schopnost změny pronutí střední křivky profilu za letu významné snížení hmotnosti za letu vlivem spotřeby paliva. Snížení hmotnosti letadla má za následek snížení nutného vztlaku pro horizontální let, a tudíž nižší hodnotu součinitele vztlaku. Profil křídla se tedy dostane do jiného operačního bodu na poláre, mimo optimální podmínky, do stavu, který je méně výhodný, například vykazuje nižší hodnotu poměru L/D. Změna tvaru profilu by tedy mohla změny v hmotnosti kompenzovat (Concilio et al., 2020).

Wu et al. (2016) prezentuje jako další možnost využití morfovateľného profilu

také ovlivnění klopivého momentu nezávisle na hodnotě  $C_L$ , a to jak pro manévrování, tak i pro vyvážení.

Od konkrétního určení morfování se pak odvíjí poloha morfovateľné části křídla podél rozpětí. Vedle náhrady konvenčních vztlakových klapek zvažují některé návrhy také náhradu ovládacích ploch-křidélek. Příkladem je program Smart Wing 1 a na něj navazující Smart Wing 2 (Wang et al., 2001).

Možným řešením je také rozdílné morfování podél rozpětí křídla, které by podél něj měnilo průběh vztlaku. To by umožňovalo jeho úpravu tak, aby se blížil eliptickému, následkem čehož by byl snížen indukovaný odpor a současně i ohybový moment u kořene křídla (Kota et al., 2006).

Využití všech benefitů morfovateľného profilu bylo pak cílem programu Advanced Fighter Technology Integration (AFTI) a to u modifikovaného letounu F-111. Program byl zaměřen na integraci takového systému morfování, který by společně s automatickým systémem letadla byl schopen podle aktuálního režimu letu měnit zakřivení profilu.

Systém zahrnoval 4 automatické ovládací módy. První měl za úkol drobnou změnou výchytky klapek upravovat prohnutí střední křivky profilu a na základě vyhodnocování vlivu jejich nastavení na rychlost pak tuto výchytku měnit tak, aby byla maximalizována cestovní rychlost. Druhý mód změnou prohnutí maximalizoval poměr  $L/D$ , třetí mód ovlivňoval prohnutí profilu křídla podél rozpětí za účelem snížení ohybového momentu u kořene křídla a čtvrtý mód krátkodobě zvyšoval prohnutí profilu pro vylepšení manévrovatelnosti při obratu nebo prohnutí snižoval při průletu poryvem (Thornton, 1993).

## 2 VNITŘNÍ KONSTRUKCE

Obecně lze shrnout požadavky kladené na konstrukci morfovateľného křídla tak, že je nutné, aby vykazovala vysokou tuhost ve směrech, ve kterých je namáhána aerodynamickým zatížením. Zároveň však musí umožňovat a zajišťovat změnu tvaru v oblasti, ve které dochází ke změně tvaru křídla morfováním.

Vzhledem k tomu, že při morfování dochází ke změně geometrie křídla, vnitřní konstrukce křídla nemůže být nepohyblivá. U morfování změnou prohnutí střední křivky profilu je měněn tvar profilu a současně s tím i žebra. To je nejčastěji nahrazeno pohyblivou strukturou, mechanismem, a to v oblasti morfovateľné části profilu, buďto před nosníkem pro morfování náběžné hrany nebo za ním pro morfování odtokové hrany. Tyto mechanismy je možné rozdělit do dvou skupin podle jejich struktury – na kinematické a poddajné. Zatímco kinematické mechanismy sestávají z tuhých součástí, spojených kinematickými vazbami, poddajné mechanismy se spoléhají na poddajnost jeho součástí. Při morfování tak dochází k jejich deformaci. Oba typy mechanismů

představují část nosné struktury křídla, zároveň však i zprostředkovávají přenos sil od aktuátorů na potah tak, aby byla vytvořena přesná kontura profilu v morfovaném stavu.

Vedle návrhů zahrnujících použití mechanismu jakožto vnitřní konstrukce křídla se objevují i řešení, která s použitím vnitřní morfovateľné struktury nepočítají a spoléhají se na dosažení změn tvaru profilu skrze poddajný potah přímo ovládaný aktuátory.

## 2.1 KINEMATICKÝ MECHANISMUS

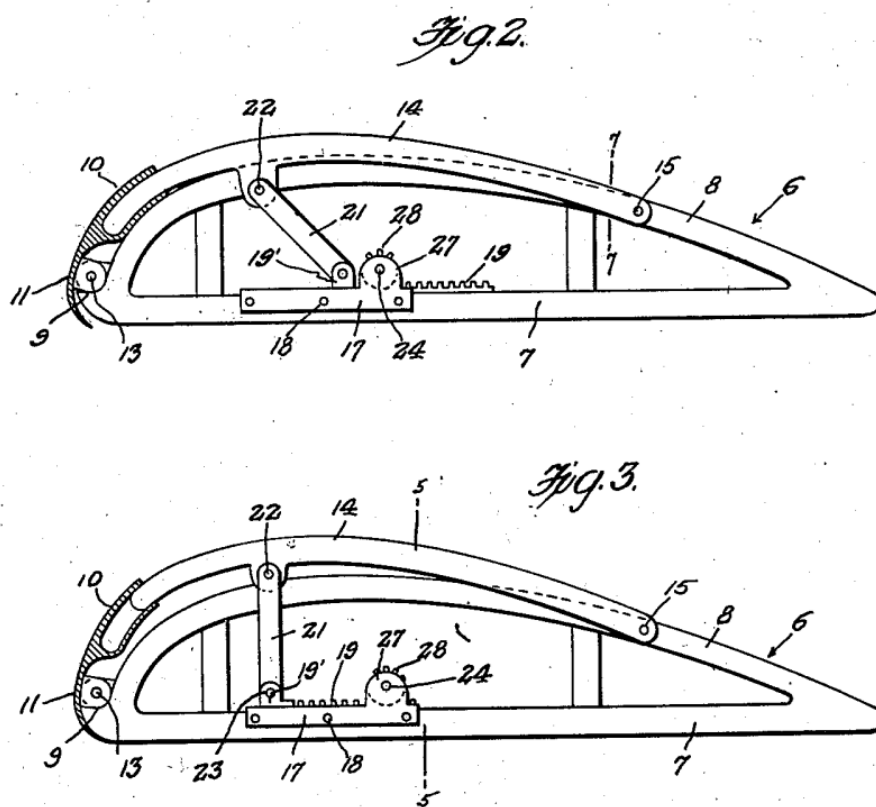
Konstrukce morfovateľného profilu disponující pevným kinematickým mechanismem, který by změnu tvaru a přenos sil zprostředkoval, byly předmětem několika patentů již od prvních desetiletí 20. století. Jak zmiňuje Monner et al. (2009) většina z těchto patentů předpokládá plně elastický potah, který by byl schopen měnit zakřivení přesně podle pohybu kinematického mechanismu, a navíc je založena na komplikovaných a těžkých mechanismech. Vzhledem ke snaze konstruovat letadla co nejlehčí, až dosud nebylo zkonstruováno žádné dopravní letadlo, disponující morfovateľným křídlem.

Kinematický mechanismus sestává z tuhých členů, které jsou mezi sebou spojeny rotačními nebo posuvnými vazbami a je připevněn k potahu v takových místech, aby do nich byl pohyb vyvolaný aktuátorem, přes jednotlivé části mechanismu přenesen ve formě žádaných posunutí. Nová poloha těchto míst pak tvoří jednotlivé body požadované křivky profilu, která má být cílem morfování.

Jako jednu z potenciálních nevýhod použití kinematického mechanismu označuje Monner et al. (2009) omezení možnosti přirozeného deformačního chování potahu v místech jeho spojení s mechanismem z důvodu tuhosti členů kinematického mechanismu, které při pohybu přesně definují způsob jeho deformace. Vasista et al. (2019) naproti tomu uvádí, že v případech, kdy se části mechanismu pohybují velmi přesně po cílových, žádaných trajektoriích, nemusí být tento jev pozorován.

Dalším aspektem konstrukce mechanismu je také počet spojů s potahem. Jelikož mechanismus splňuje roli podpory potahu vůči vnějším zatížením, nedostatečný počet těchto spojů může vést k odchylkám ve výsledném tvaru profilu (Vasista et al., 2019).

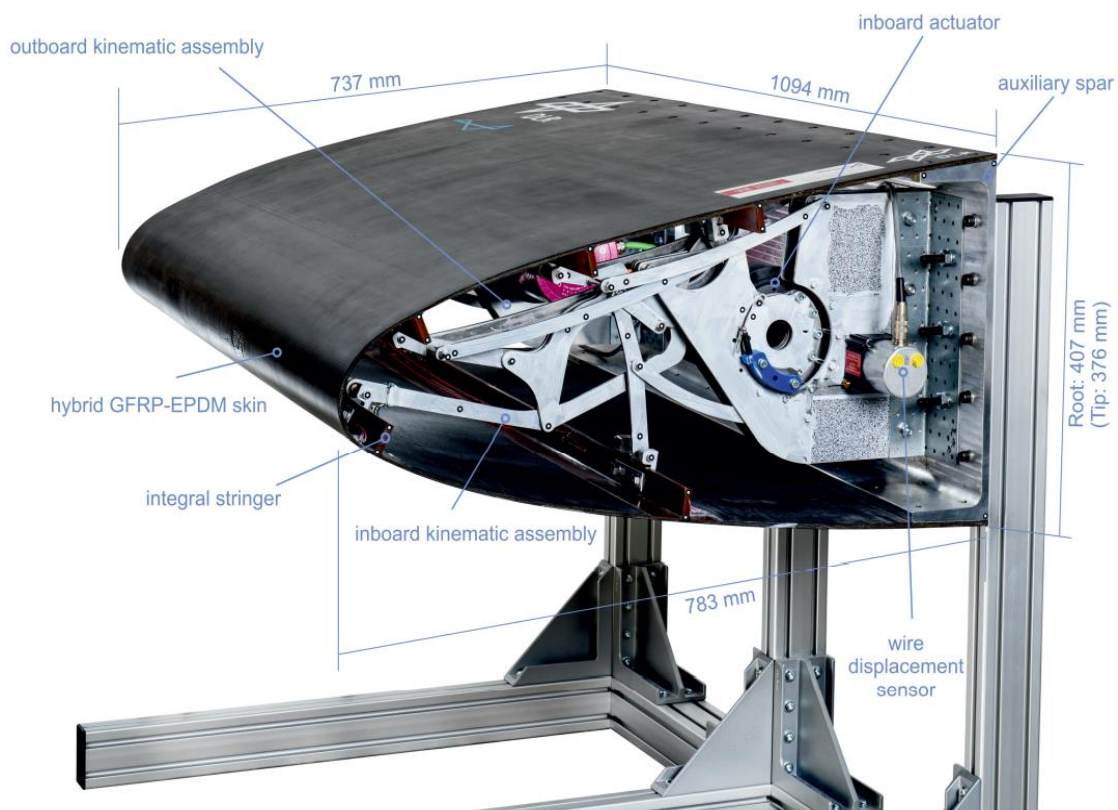
Jedním z prvních návrhů kinematického mechanismu morfovateľného profilu byl předmětem patentu z roku 1930 (Hannah, 1930). Morfováním zde dochází ke změně zakřivení pouze horní strany profilu a tím zvětšení jeho tloušťky a prohnutí střední křivky profilu. Funkce mechanismu je znázorněna na obr. 1. Změna tvaru profilu je zde založena na vyklopení horní posuvné části profilu rotací okolo rotační vazby a současném vysunutí z kolejnice v otočné náběžné hraně.



Obr. 1 Návrh kinematického mechanismu, který je předmětem patentu z roku 1930 (Hannah, 1930)

Ačkoliv se jedná o relativně jednoduchý kinematický mechanismus, i současné návrhy mechanismů morfování jsou založeny na stejných principech kinematických vazeb.

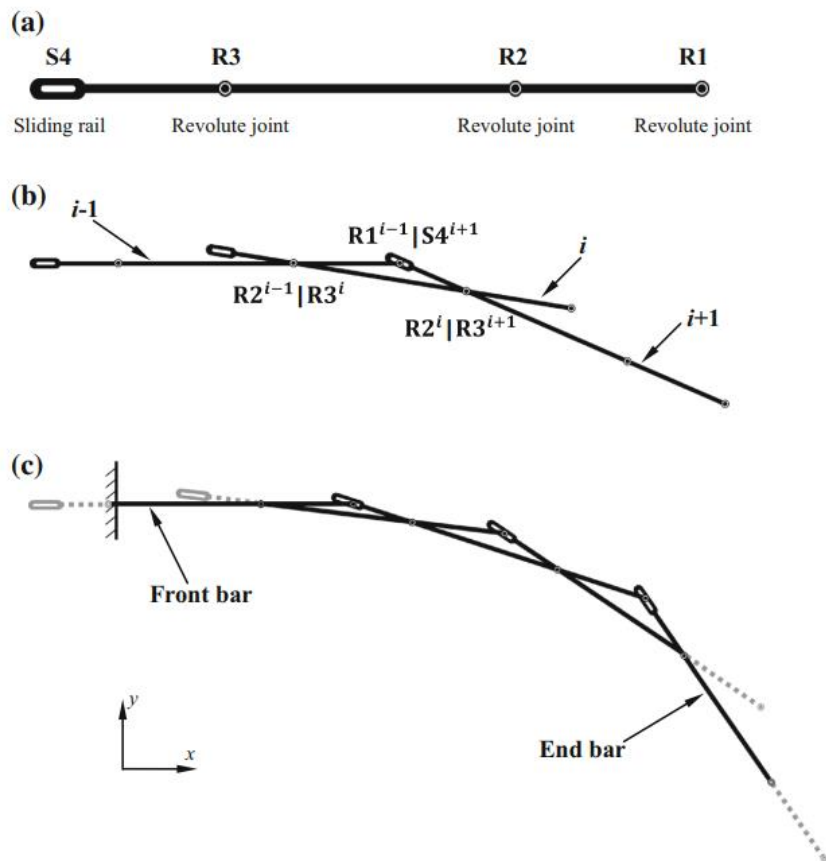
Jeden z moderních návrhů morfovateľného profilu, u něhož je využito kinematického mechanismu, představuje ve své studii z roku 2019 Vasista et al. (2019). Jedná se o návrh morfovateľné náběžné hrany, která má být využita společně se vztlakovou klapkou schopnou vychylky  $65^\circ$  a se systémem vyfukování do mezní vrstvy. Tvary náběžné hrany pro let v cestovním režimu a pro nízké rychlosti byly získány optimalizací a za účelem snížení napětí v potahu byly navrženy tak, aby celková délka potahu zůstala během morfování konstantní. Mechanismus je zkonstruován tak, aby na základě jednoho vstupu, daného úhlem natočení rotačního aktuátoru zprostředkovával 5 výstupních trajektorií okrajových členů mechanismu, které jsou spojeny s podélníky křídla, čímž je dosaženo změny tvaru profilu. Obr. 2 znázorňuje demonstrátor morfovateľné náběžné hrany, sestávající ze dvou pohyblivých žeber ve formě kinematických mechanismů.



*Obr. 2 Demonstrátor morfovateľné náběžné hrany skutečné velikosti disponující kinematickým mechanismem a vyvinutým poddajným potahem (Vasista et al., 2019)*

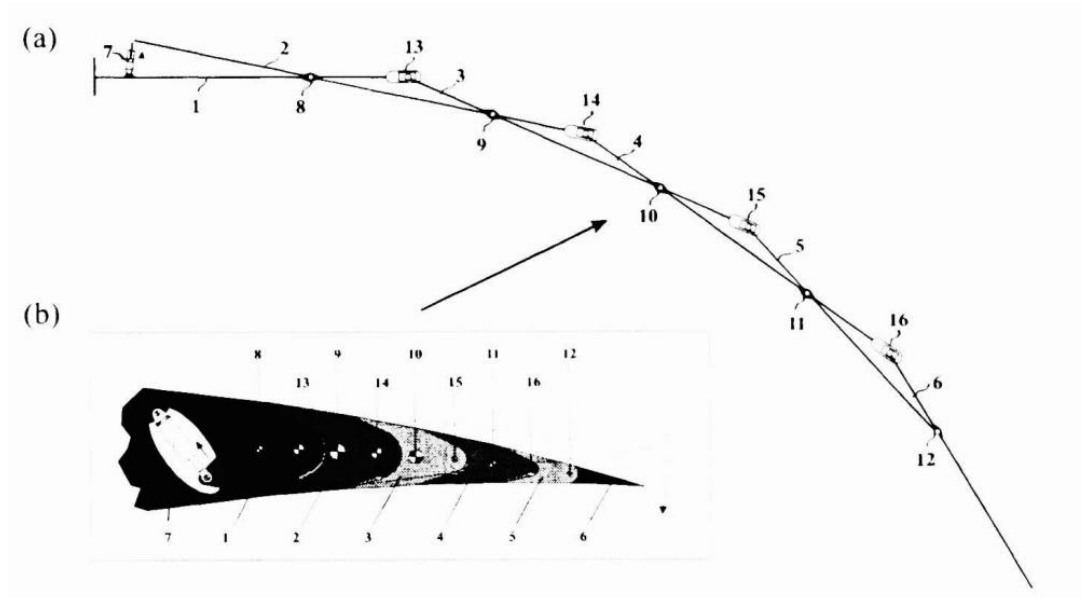
Jiným typem kinematického mechanismu je pohyblivé žebro Flexible Rib, jehož původní návrh byl vyvinut jakožto návrh Fowlerovy klapky měnitelné geometrie (Monner et al., 1998).

Mechanismus je v tomto případě tvořen členy, které jsou mezi sebou spojeny pomocí rotačních a posuvných vazeb (prizmatických kloubů), jak je patrné ze zjednodušeného schématu mechanismu na obr. 3. Pro funkci pohyblivého žebra je nutné, aby mechanismus obsahoval minimálně 3 tyto členy, z nichž první člen je nepohyblivě spojen s tuhou částí křídla. Tou může být tuhá zadní část konvenčního žebra, jak ve své studii uvažuje Monner et al. (1998), popřípadě může být tento mechanismus napojen přímo na nosník, jako je tomu v případě návrhu, který prezentuje Meguid et al. (2015).



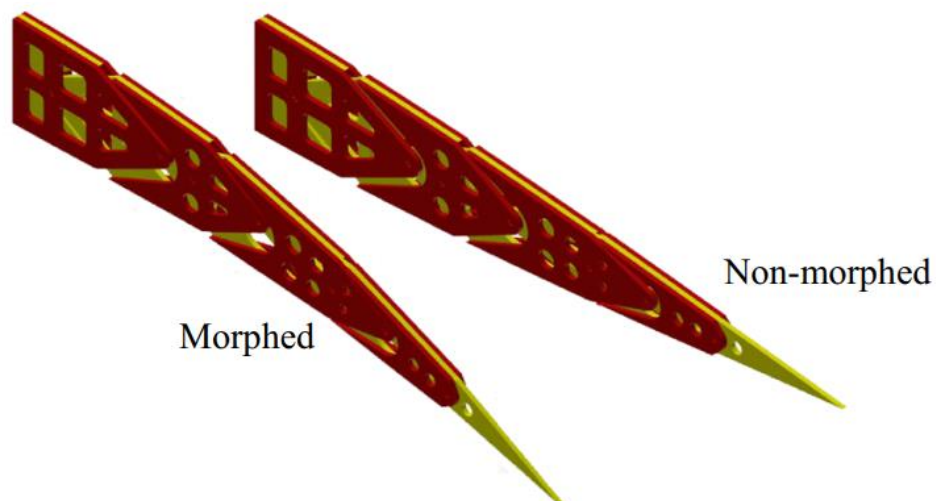
Obr. 3 Schéma kinematického mechanismu Flexible Rib (Meguid et al., 2015)

Monner et al. (1998) vysvětluje funkci mechanismu na vzájemném pohybu prvních tří členů mechanismu. Vychýlením druhého členu pomocí aktuátoru, dojde současně k pohybu třetího členu, a to okolo jeho rotační vazby, kterou je spojen se druhým členem, a ke translačnímu pohybu vlivem posuvné vazby mezi ním a prvním členem.



Obr 4 Kinematický mechanismus o celkem 6 členech (Monner et al., 1998), schematické znázornění a skutečný tvar pohyblivého žebra

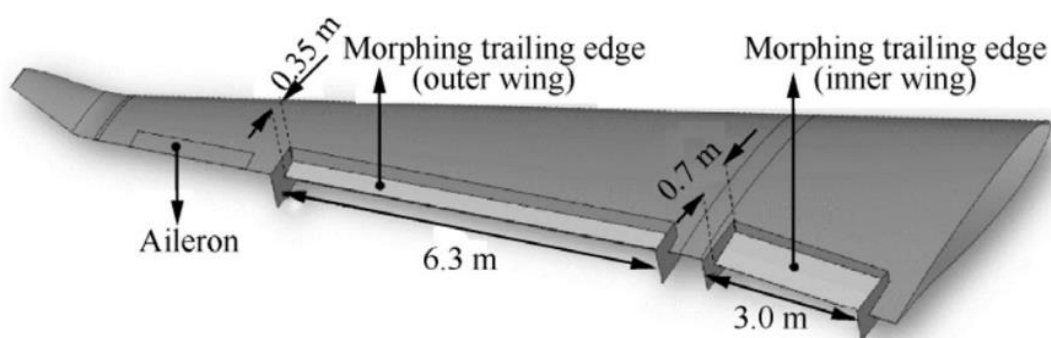
Nastavení délky mezi jednotlivými vazbami pak umožňuje dosažení požadovaného tvaru. Obr. 4 znázorňuje mechanismus o celkem 6 členech. Skutečný tvar mechanismu v základním tvaru a v morfované konfiguraci je zobrazen na obr. 5.



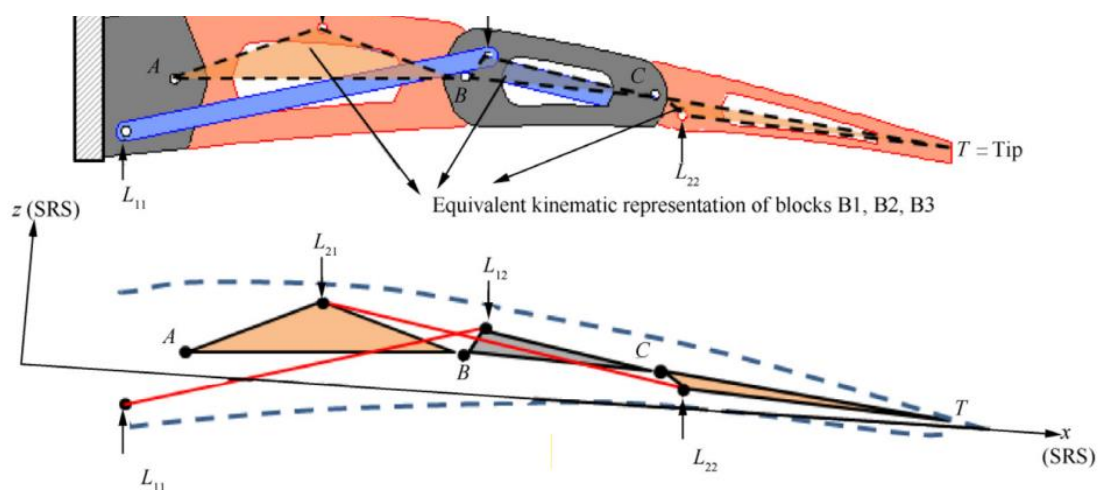
Obr. 5 Kinematický mechanismus pohyblivého žebra ve dvou konfiguracích (Meguid et al., 2015)

Dalším návrhem je mechanismus, označený autory jako Finger-like Rib. Cílem

má být změna tvaru profilu za účelem kompenzace změn hmotnosti letadla v průběhu letu, přičemž křídlo má disponovat dvěma morfovateľnými oblastmi, jednou u kořene křídla a druhou ve středové části, jak je znázorněno na obr. 6 (A. Concilio et al.,2020).

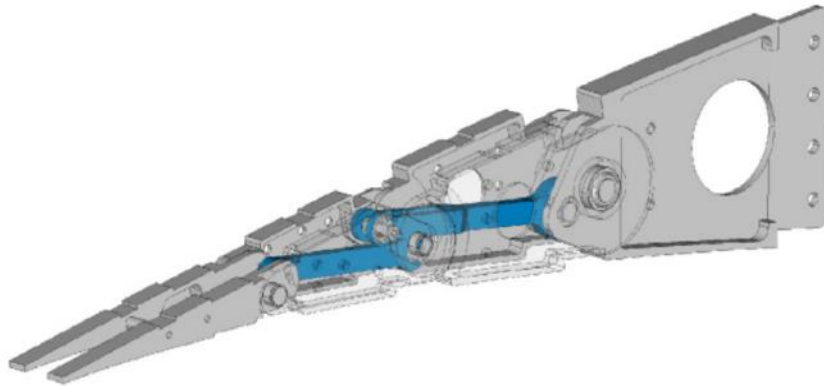


Obr. 6 Křídlo se dvěma morfovateľnými oblastmi podél rozpětí (A. Concilio et al.,2020)



Obr. 7 Člony kinematického mechanismu a ovládací ramena ve schematické podobě (Concilio et al., 2020)

Concilio et al. (2020) pro dané použití představuje mechanismus pohyblivého žebra sestávající ze čtyř částí, které jsou vzájemně napojené pomocí závěsů v místech, kterými prochází střední křivka profilu, přičemž spojení s nepohyblivou částí křídla je mezi zadním nosníkem a první částí mechanismu. Morfování je pak realizováno skrze ramena v rotačních vazbách, spojující spolu nesousedící části mechanismu, jak je vidět na obr. 7 a obr. 8. Takto spojené jednotlivé členy dohromady tvoří mechanismus s jedním stupněm volnosti. Aktuátorem vyvolaný pohyb jednoho členu tedy způsobí pohyb všech ostatních.

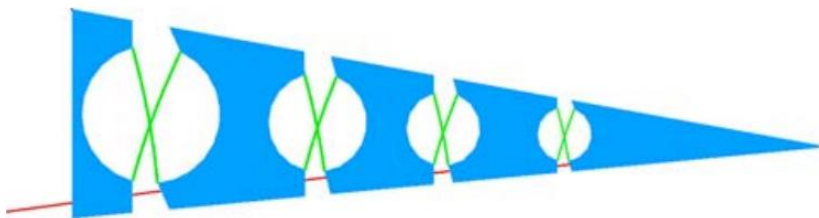


Obr. 8 Pohyblivé žebro s ovládacími rameny (Concilio et al., 2020)

Jiný mechanismus navrhuje Barbarino et al. (2008), jehož koncept však stejně jako poslední dva uvedené, vychází ze tvaru konvenčního žebra rozděleného do několika částí, tvořících dohromady mechanismus morfování.

Ačkoliv jsou jednotlivé členy tuhé a změna tvaru profilu tedy není zprostředkována jejich vlastní elastickou deformací, zásadním rozdílem oproti všem výše zmíněným mechanismům je absence kinematických rotačních nebo posuvných vazeb. Vzhledem k tuhosti jeho členů, které při morfování nepodléhají deformaci, byl tento mechanismus zařazen mezi kinematické.

Návrh využívá k definování vzájemného pohybu jednotlivých členů elastických spojů, tvořených překříženými plochými destičkami, na obr. 9 jsou znázorněny zelenou barvou ve 2D jako táhla.

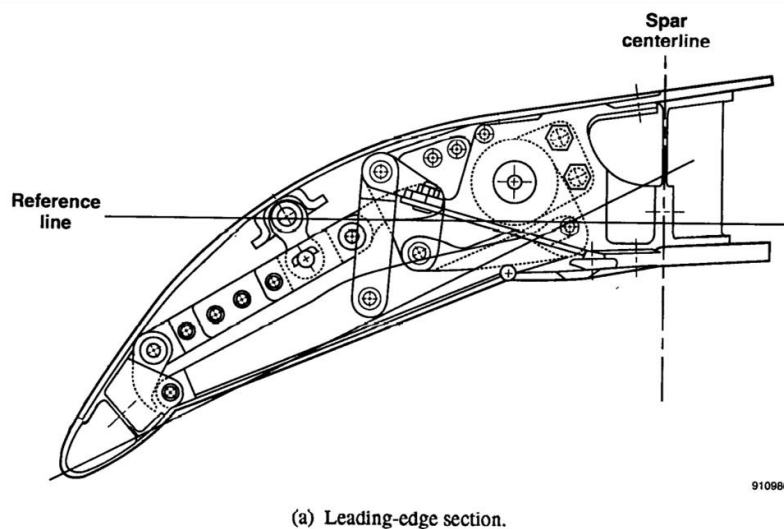


Obr. 9 Tuhý mechanismus s elastickými vazbami (Barbarino et al., 2008)

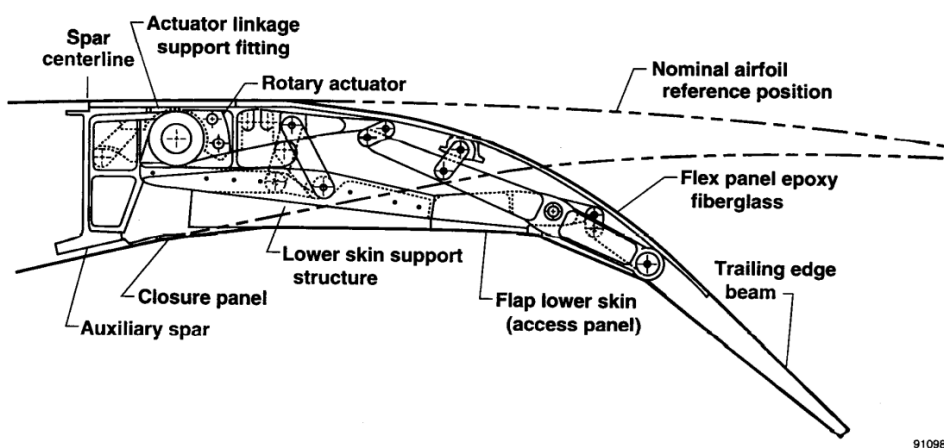
Jedním z mála programů zahrnujících morfování profilu, u nichž došlo ke stavbě letuschopného prototypu a letovým zkouškám, je pak Advanced Fighter Technology Integration, kde bylo křídlo F-111 na začátku 80. let 20. století nahrazeno morfovateľným

křídlem nazvaným Mission Adaptive Wing (Smith et al., 1992). Pevný mechanismus morfovateľné náběžné a odtokové hrany je znázorněn na obr. 10 a obr. 11.

Patent konstrukce, jehož majitelem je Statkus blíže popisuje mechanismus použitý jak na náběžné, tak odtokové hraně jako dva čtyřkloubové mechanismy, přičemž jeden z nich ovládá horizontální a vertikální pohyb tuhého členu konstrukce na náběžné nebo odtokové hraně a druhý pak úhel natočení tohoto členu a moment působící na poddajný potah na horní straně profilu (Statkus, 1980).



Obr. 10 Mechanismus morfovateľné náběžné hrany letounu F-111 programu AFTI (Smith et al., 1992)



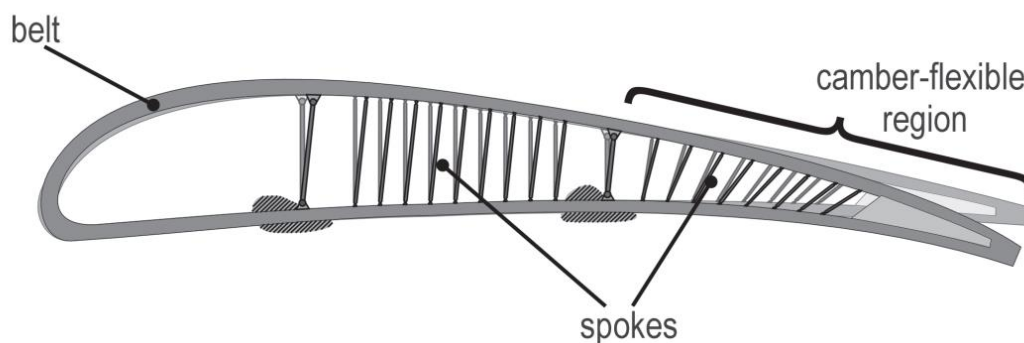
Obr. 11 Mechanismus morfovateľné odtokové hrany letounu F-111 programu AFTI (Smith et al., 1992)

## 2.2 PODDAJNÝ MECHANISMUS

Vedle pevných mechanismů, plnicích funkci vnitřní konstrukce křídla se v novějších projektech a studiích objevuje konstrukce zahrnující použití poddajného mechanismu. Tím je struktura, u níž vlivem působící síly nebo momentu dochází k elastické deformaci a deformační energie, která je v podobě této deformace uložena, je pak uvolněna v určených cílových místech ve formě síly nebo posunu (Kota, 2001). Těmito cílovými místy jsou pak spoje poddajného mechanismu s potahem.

Obecně by poddajný mechanismus měl mít co největší tuhost vůči působení aerodynamických sil a zároveň co největší poddajnost při pohybu součástí mechanismu během morfování. Tedy tak, aby aktuátor překonával primárně aerodynamická zatížení a zároveň nebyl nucen vyvíjet velkou sílu na překonání sil v mechanismu (Kota et al., 2003).

Jedním z konceptů poddajného mechanismu je návrh vyvinutý německým Střediskem pro letectví a kosmonautiku (DLR), nazvaný „Belt Rib Concept“. Jedná se o návrh poddajného mechanismu pro morfovateľnou vztlakovou klapku pro letoun Airbus A340. Pohyblivé žebro je tvořeno pásem výztuh mezi spodní a horní částí potahu, od nosníku směrem k odtokové hraně. Tyto výztuhy jsou spojeny s poddajným potahem pomocí závěsů, které mají relativně nízkou tuhost, a výztuhy jsou tedy namáhány především na tah a tlak (Campanile a Sachau, 2022). Změny tvaru profilu je pak dosaženo jejich nakloněním, které současně vede k posunutí jejich spojů s potahem a tím k jeho deformaci, jak je znázorněno a obr. 12.



Obr. 12 Návrh poddajného mechanismu morfovateľného profilu Belt Rib se znázorněním změny tvaru (Campanile a Sachau, 2022)

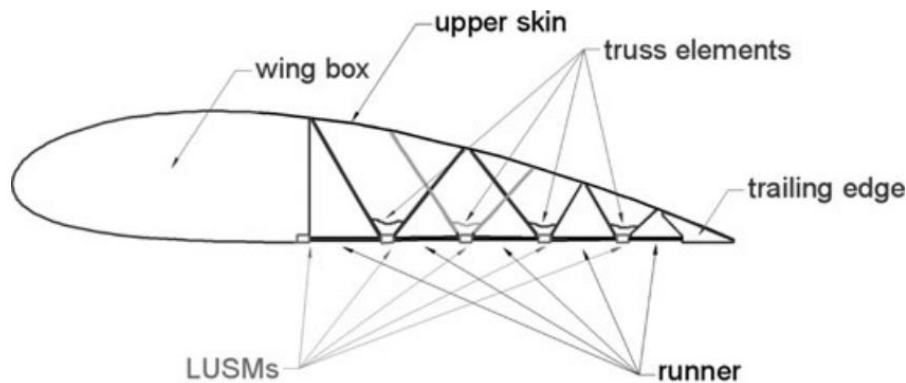
Campanile a Sachau (2022) dále zmiňují důležitost návrhu poddajných spojů mezi výztuhami a potahem, přičemž se zaměřují na zjištění vlivu ohybové tuhosti na morfováním dosažené zakřivení profilu. Na základě analýzy provedené metodou konečných prvků pak uvádí, že zvýšení ohybové tuhosti vede ke koncentraci zakřivení v oblasti blíže k nosníku, což má za následek obecně horší aerodynamické výkony oproti plynule zakřivenému profilu. Významné zakřivení v jedné oblasti navíc způsobuje větší napětí v daném místě.

Studie prezentuje i pevnostní požadavky, kladené na tento mechanismus, přičemž zmiňuje stanovení minimální ohybové délky spojů mezi výztuhami a potahem, a to podle hodnoty maximálního požadovaného úhlu rotace a ohybové tuhosti těchto spojů.

V případě výztuh je pak rozhodujícím parametrem normálové napětí vzhledem k možným mezním stavům dosaženým vzpěrem nebo vlivem tahových napětí. Vzhledem ke konečné ohybové tuhosti spojů pak navíc dochází i k ohybovému namáhání výztuh (Campanile a Sachau, 2022).

Jiný přístup k problematice představuje Wu et al. (2016). V návrhu tvoří mechanismus poddajná příhradová konstrukce a poddajné výztuhy, vedoucí od náběžné hrany k odtokové. Celá konstrukce má několik stupňů volnosti, které jsou ovládány lineárními ultrazvukovými motory (LUSM). Ty jsou spojeny se čtyřmi členy příhradové konstrukce na jejich spodní hraně a pohybují se po poddajných výztuhách, tvořících hladkou křivku spodní strany profilu.

Wu et al. (2016) uvádí jako hlavní výhodu tohoto návrhu možnost morfování s více stupni volnosti, což umožňuje dosažení množství různých tvarů profilu, a to díky vzájemně nezávislému pohybu čtyř prvků příhradové konstrukce a pevné odtokové hrany, které jsou poháněny celkem pěti LUSM aktuátory. Aby byl umožněn volný pohyb příhradové konstrukce a nedocházelo k interferenci jejích sousedících prvků, střídají se tyto na žebrech podél rozpětí. To je patrné z obr. 13, na kterém je světlejší barvou znázorněn prvek příhradové konstrukce nacházející se na jiném žebře než prvky ostatní.

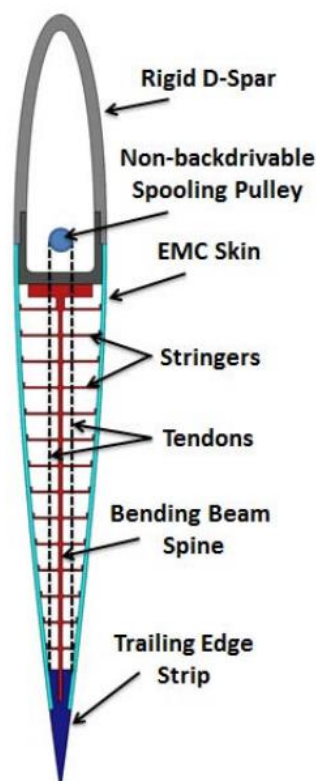


Obr. 13 Zobrazení poddajného mechanismu s příhradovou konstrukcí a LUSM aktuátory (Wu et al., 2016)

Zcela odlišné řešení morfovateľného profilu prezentují Woods a Friswell (2012), kteří jako cíl svého návrhu uvádí vývoj univerzální technologie morfování, použitelné u profilů letadel všech typů, od malých bezpilotních prostředků po dopravní letouny, současně však také u rotorových listů helikoptér, větrných turbín a u listů rotorů turbín

přilivových elektráren.

Navržená konstrukce byla autory nazvána Fishbone Active Camber (FishBAC) podle inspirace v tělesné stavbě rybí kostry. Disponuje poddajným prvkem v podobě podélné výztuhy vedoucí přibližně v místě tětiny profilu od začátku morfovateľné části k odtokové hraně. Podél tohoto prvku konstrukce, autory označovaného jako ohebná páteř, vedou kolmé výztuhy k horní a spodní straně profilu. Ke změně tvaru dochází pomocí antagonistických táhel, vedoucích od odtokové hrany ke středové části profilu, ve které se nachází navíjecí kladka. Poddajný mechanismus znázorňuje obr. 14.



*Obr. 14 Poddajný mechanismus FishBAC s tuhou náběžnou hranou a pružnou výztuhou vedoucí středem profilu k odtokové hraně (Woods a Friswell, 2012)*

Woods a Friswell (2012) zvažují volbu kovového nebo kompozitního materiálu pro podélnou poddajnou výztuhu profilu. Kompozitní materiál by přitom poskytl možnost dosažení anizotropních vlastností, tedy nízkou tuhost podél tětiny a vysokou ve směru podél rozpětí. Současně by bylo možné zajistit rozdílnou místní tuhost výztuhy podél tětiny, což by vedlo k žádané koncentraci prohnutí ve zvolené oblasti profilu.

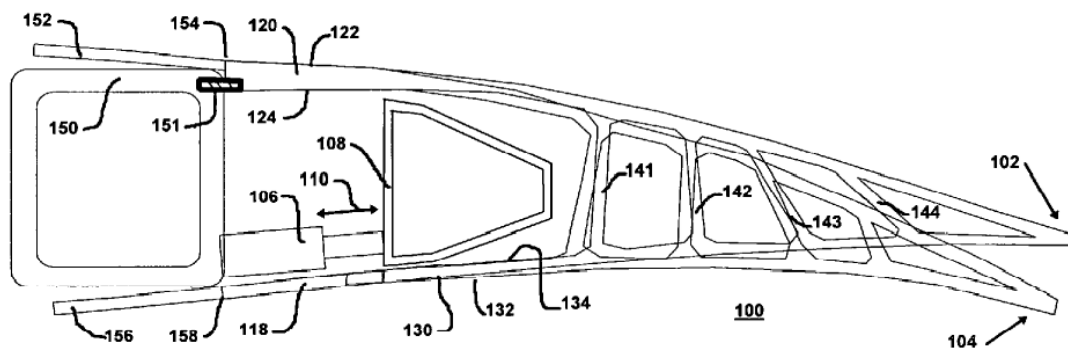
Dalším možným způsobem získání poddajného mechanismu je v současnosti také využití topologické optimalizace, při níž je na základě stanovených okrajových podmínek a návrhového prostoru získán optimalizovaný tvar poddajné struktury. Takto získaný návrh poddajného mechanismu pak ve své studii popisuje Reinisch et al. (2021). Cílem

je navržení profilu výkonného kluzáku se sklopnou náběžnou hranou a vztlakovou klapkou. Model profilu disponující poddajným mechanismem je pak zobrazen na obr. 15, a to v základním a v morfovaném stavu.



Obr. 15 Poddajný mechanismus náběžné hrany ve dvou stavech morfování, jehož tvar byl získán topologickou optimalizací (Reinisch et al., 2021)

Dalším návrhem je patentovaný koncept morfovateľného profilu „Mission Adaptive Compliant Wing“ (MACW) společnosti FlexSys Inc., který byl patentován a testován za letu na modifikovaném letounu Gulfstream III. Profil je tvořen poddajnou strukturou, přičemž v odtokové části se nachází výztuhy mezi horní a spodní stranou profilu o takové tuhosti, která zaručuje že profil při morfování získává požadovaný tvar. Znázornění poddajné struktury a jejího morfovaného stavu je zobrazeno na obr. 16. (Kota a Hetrick, 2008).



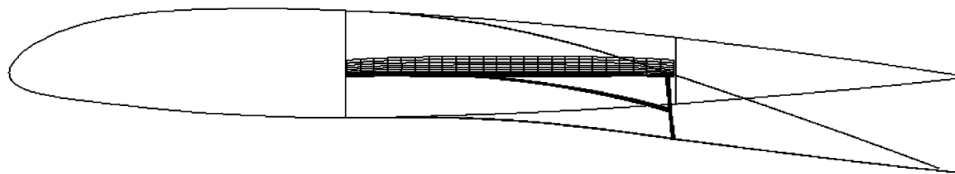
Obr. 16 Poddajný mechanismus odtokové hrany patentovaný v roce 2008 (Kota a Hetrick, 2008)

### 2.3 NÁVRHY MORFOVÁNÍ BEZ VNITŘNÍHO POHYBLIVÉHO MECHANISMU

Vedle návrhů morfování, kde je změna tvaru zajištěna pohybem vnitřní konstrukce ve formě mechanismu, se objevují také koncepty, které morfování řeší zcela odlišným

způsobem.

Jedním z takových návrhů je například koncept profilu, jehož vnitřní konstrukcí je bistabilní struktura. Diaconu et al. (2007) označuje bistabilní nebo multistabilní struktury jako dobré kandidáty morfování, jelikož po dosažení změny tvaru zůstává struktura ve stabilním stavu. Koncept využívá bistabilního jevu, k němuž dochází v tenkostěnných kompozitních strukturách vlivem napětí vyvolaných teplotní změnou. Bistabilním prvkem v uvažované konstrukci je kompozitový plech nacházející se v místě střední křivky profilu. Změny tvaru z jedné stabilní konfigurace ve druhou je dosaženo zahřátím celé struktury. Stabilní části konstrukce profilu pak musí být dostatečně poddajné, aby změnu tvaru profilu umožnily. Změna tvaru vlivem použití bistabilní struktury je znázorněna na obr. 17.

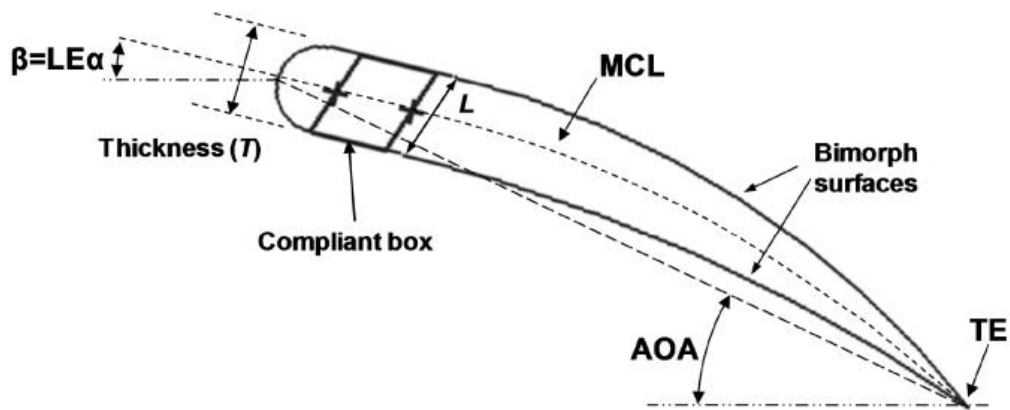


*Obr. 17 Morfovateľný profil se schematickým znázorněním změny tvaru pomocí bistabilní struktury a jeho dvě tvarové konfigurace (Diaconu et al., 2007)*

Diaconu et al. (2007) však přiznává mnoho úskalí, které přináší použití bistabilních struktur. Mezi nimi například potenciální požadavek zajišťovacího mechanismu vzhledem k vysoké poddajnosti struktury, která by bez něj nemusela být schopna odolávat vnějším zatížením. Další nevýhodou je pak také ovlivnění bistabilních jevů operační teplotou, přičemž bistabilita je významnější v prostředích s nízkou teplotou, a naopak v podmínkách charakteristických vysokými teplotami může být snížena nebo vymizet.

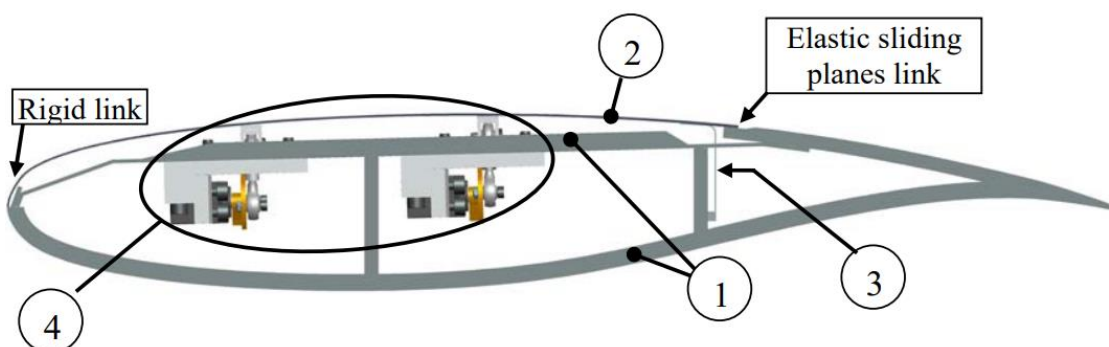
Další speciální způsob řešení představují návrhy, kde ke změně zakřivení profilu nedochází přenosem sil z mechanismu na potah, ale přímo změnou tvaru potahu díky jeho aktuátorům zabudovaným přímo v něm.

Jedním z nich je řešení, které uvažuje Bilgen et al. (2010). Jedná se o profil s bimorf povrchy na horní a spodní straně odtokové části profilu, tedy povrchy, disponujícími dvěma aktivními vrstvami, které jsou schopny změny tvaru. V přední části profilu pak je poddajná struktura, k jejíž změně tvaru dochází vlivem změny zakřivení odtokové části profilu. Navržené řešení je znázorněno na obr. 18.



Obr. 18 Návrh profilu schopného změny tvaru pomocí bimorf povrchů na jeho spodní a horní straně (Bilgen et al., 2010)

Jiný přístup prezentuje Coutu et al. (2007), který uvažuje morfování pomocí aktuátory poháněné horní strany profilu, a to od náběžné hrany až k začátku odtokové hrany, která je opět tuhá. V těchto místech je poddajný potah spojen s tuhou konstrukcí a to tak, že na náběžné hraně je spojení tuhé, na druhé straně potahu je pak realizováno pružným spojením pomocí kompenzační pružiny. Ta zajišťuje plynulý tvarový přechod mezi poddajnou a tuhou částí potahu. Mezi těmito dvěma spoji jsou pak umístěny dva ovládací systémy vyvozující sílu ve směru normálovém k těživě a zahrnující použití aktuátorů se slitinami s tvarovou pamětí (SMA) (Brailovski et al., 2010).



Obr. 19 Morfovateľný profil s nepohyblivou vnútornou konštrukciou a poddajným potahom ovládaným SMA aktuátormi (Coutu et al., 2007)

### 3 POTAH KŘÍDLA

Vzhledem k tomu, že potah je vlivem morfování deformován ve směru tětiny, je namáhán tahovým napětím, které by mělo být co nejmenší, což vyžaduje dobrou poddajnost potahu ve směru morfování. Zároveň je ale zatížen vnějšími aerodynamickými silami a momenty, vůči jejichž působení by měl mít naopak co největší tuhost. Je tedy nutné, aby použitý materiál byl anizotropní.

Monner et al. (2009) definuje problematiku výběru anizotropního potahu jako jednu z hlavních technických výzev stavby morfovateľných nosných ploch. Jako možná řešení uvádí návrhy disponující děleným potahem, přičemž při morfování křídla dochází v potahu ke vzniku mezer nebo „schoďů“ mezi jeho jednotlivými segmenty. Použití děleného potahu má sice řešit problém s vysokým napětím při změně tvaru profilu, současně však vede ke snížení celkové tuhosti konstrukce. Ta musí být tedy volena komplikovanější a těžší. Vlivem diskontinuit potahu je navíc narušena kvalita povrchu, klíčová pro laminární proudění.

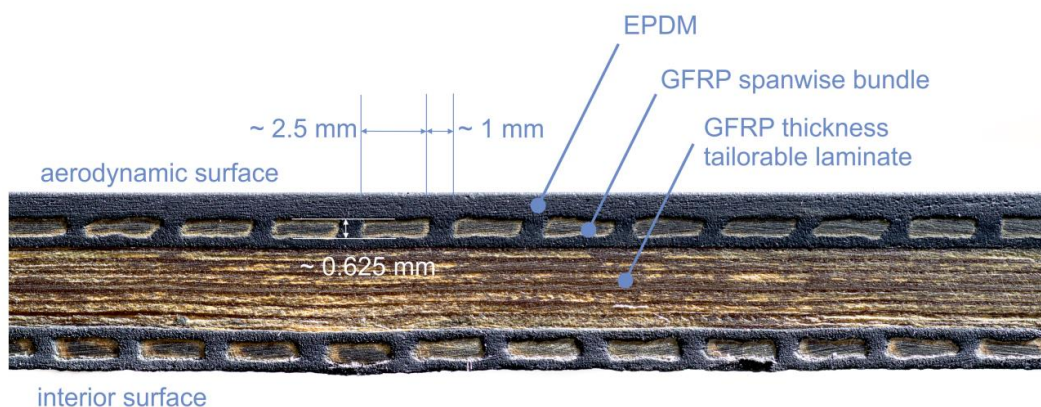
Dále poukazuje i na odlišnosti podmínek deformace při morfování potahu náběžné hrany a odtokové hrany, kdy je pohyb potahu při morfování odtokové hrany omezen vlivem diskontinuity na jejím okraji, zatímco v případě náběžné hrany má materiál potahu větší volnost v deformaci. Výsledným tvarem morfování je pak takový tvar, který má co nejmenší deformační energii, tedy větší poloměr náběžné hrany, což vede ke zlepšení výkonů křídla při malých rychlostech.

#### 3.1 NEDĚLENÝ POTAH

Vasista et al. (2019) představuje pro návrh potahu morfovateľné náběžné hrany řešení v podobě hybridního materiálu se speciální strukturou. Potah sestává z kompozitů, a to jak ze skelných (GFRP) tak z uhlíkových (CFRP) vláken, a z elastomeru. Konkrétní podoba jednotlivých vrstev pak určuje, jaké vlastnosti bude takto vytvořený materiál vykazovat v jednotlivých směrech.

K zajištění dostatečné ohybové tuhosti bylo použito výztuh v podobě svazků ze skelných nebo uhlíkových vláken, instalovaných do vnějších vrstev elastomeru ve směru podél rozpětí.

Schopnosti měnit zakřivení profilu při morfování je dosaženo díky elastomeru, který je schopen vlivem zatížení dosahovat významné deformace (Walker, 2017) a orientací výztuh, jejichž nespojitost ve směru tětiny tuto změnu zakřivení umožňuje. Zároveň jsou tyto výztuhy umístěny co nejdál od neutrální osy a tím dále přispívají ke zvýšení ohybové tuhosti (Vasista et al., 2019).



Obr. 20 Vyvinutý potah s vrstvami zajišťujícími anizotropní vlastnosti (Vasista et al., 2019)

Vnitřní vrstvu materiálu pak tvoří kompozit ze skelných vláken, přičemž tloušťka této části materiálu byla v určitých místech podél profilu zmenšena odebráním jednotlivých vrstev, aby při morfování docházelo k zakřivení profilu co nejbližšímu požadovanému tvaru.

Strukturu takového hybridního materiálu je pak možné doplnit dalšími specifickými vrstvami za účelem dosažení konkrétních vlastností. Zkoumáno bylo například použití měděné sítě ve vrstvách kompozitu jakožto ochrany proti zásahu bleskem (Vasista et al., 2019).

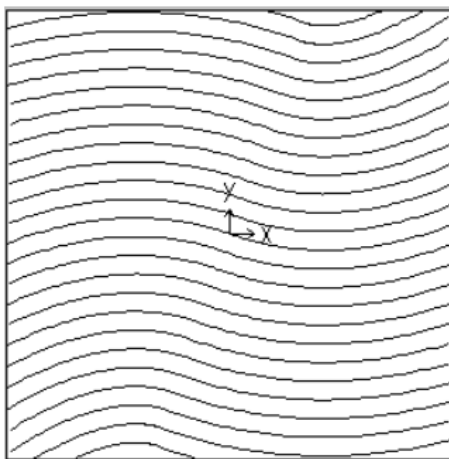
Vasista et al. (2019) také provedl srovnání hmotnosti navrženého potahu, přičemž jeho hmotnost rozpětí tvořila  $22,0 \text{ kg/m}^2$ . Celková hmotnost prostředků zvýšení vztlaku na náběžné hraně podle konkrétního typu se pohybuje mezi  $25,6 \text{ kg/m}^2$  a  $29,8 \text{ kg/m}^2$  (Rudolph, 1996). Studie ovšem zmiňuje náročnost takového srovnání vzhledem k tomu, že velikost letadla, plocha náběžné hrany a pozice celého zařízení mají vliv na normalizované hodnoty hmotnosti. Navíc uvádí, že použití morfovateľné náběžné hrany může vést k lepším výkonům i přes určitý nárůst hmotnosti.

Jiný způsob zajištění anizotropních vlastností potahu představují Woods a Friswell (2012), kteří se zaměřují na návrh pro použití u morfovateľného profilu FishBAC s poddajnou vnitřní konstrukcí. Potah využívá vyztuženého předepjatého kompozitu s elastomerní maticí (EMC). Použití čistě elastomeru bylo vyloučeno vzhledem k vysokému Poissonovu poměru v rovině potahu, což by při morfování mělo za následek současnou deformaci potahu ve směru podél rozpětí. To by kromě narušení povrchu profilu na okrajích morfovateľné části vedlo současně ke vzniku velkých smykových napětí mezi potahem a adhezivními spoji s podélnými výtuhami ve směru podél rozpětí, což by dále ovlivnilo pevnost a spolehlivost tohoto návrhu. Jako řešení bylo zvoleno vyztužení elastomeru vlákny ve směru podél rozpětí, přičemž je zmíněn minimální vliv takhle orientovaných vláken na tuhost ve směru tětiny.

Zároveň však studie poukazuje na jiná možná řešení, vzhledem k tomu, že vlákna

v tomto směru významně nenavysují ohybovou tuhost mezi podélnými výztuhami. Takovým řešením je například možnost natočení vláken vůči směru podél rozpětí, což by významně zvýšilo ohybovou tuhost při přijatelném navýšení Poissonova poměru a tuhosti ve směru podél tětiny.

Další alternativou je použití křivočarých vláken se základní orientací podél tětiny, jak je znázorněno na obr. 21. Díky jejich zvlnění je pak umožněno značné prodloužení v tomto směru, jelikož vlákna se při působení napětí narovnávají místo toho, aby byla protahována. Studie dále uvažuje o kombinaci zmíněných vrstev tak, aby bylo dosaženo žádaných anizotropních vlastností, konkrétně použití křivočarých vláken ve vnějších vrstvách s čistým elastomerem nebo EMC ve vnitřních. Takovým přístupem by bylo dosaženo zvýšení schopnosti odolávání ohybovému zatížení díky umístění výztužných vláken nejdál od neutrální osy a zároveň by nebyla ovlivněna tuhost ve směru potahu (Woods a Friswell, 2012).

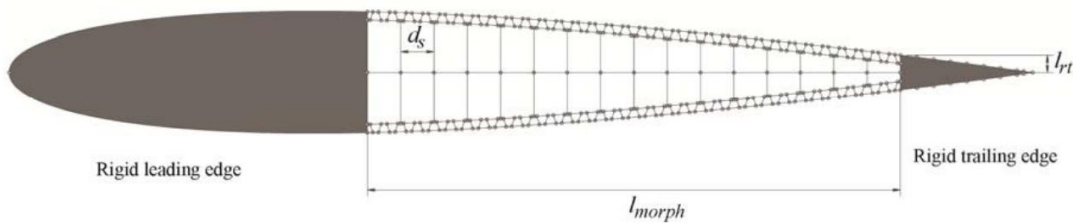


*Obr. 21 Schematické znázornění křivočarých vláken (Woods a Friswell, 2012)*

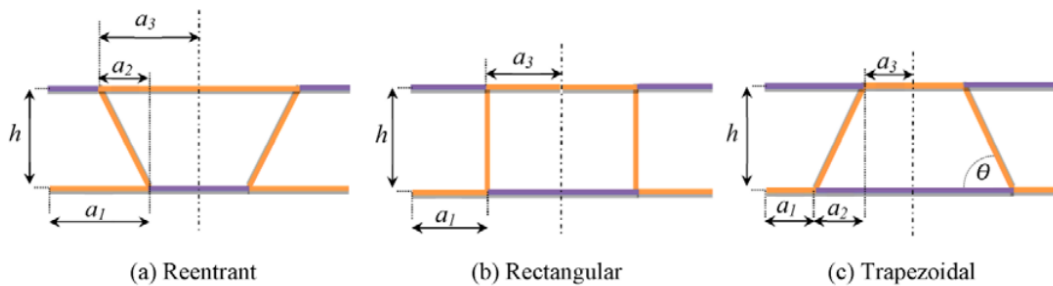
Dalším aspektem, hrajícím roli při řešení poddajného potahu morfovateľného křídla je tloušťka potahu. Ta může být optimalizována podél profilu podle rozdílných tlaků, které v jednotlivých místech působí, jak zmiňují Woods a Friswell, (2012) a tedy zvětšena směrem k náběžné hraně. Ve studii dále uvádí i provázanost tloušťky potahu s řešením vnitřní konstrukce, konkrétně s počtem podélných výztuh návrhu FishBAC, přičemž při větší tloušťce potahu pak bude možné použít velmi malý počet těchto výztuh.

Jiný návrh potahu pro tentýž koncept morfovateľného profilu FishBAC pak představují Dayyani et al. (2014), který se zaměřuje na dosažení anizotropních vlastností použitím sendvičové struktury s vlnitým jádrem, které je znázorněno na obr. 22. Tyto vlnité panely jsou tuhé ve směru podél vln, ale pružné ve směru kolmém na ně, což odpovídá požadavku na anizotropii materiálu a společně s velkou únavovou odolností z nich činí vhodný materiál pro využití v potahu morfovateľného křídla. Studie se pak zaměřuje na porovnání tří různých geometrií vlnité vrstvy, které jsou zobrazeny na obr.

23, a to s povlakem z elastomeru a bez něj a na následnou optimalizaci geometrických parametrů tak, aby vlastnosti panelů co nejlépe odpovídaly požadavkům a současně aby byla minimalizována jejich hmotnost.



Obr. 22 Profil FishBAC s potahem ze sendvičové struktury s vlnitým jádrem (Dayyani et al., 2014)



Obr. 23 Tři různé geometrie vlnité vrstvy sendvičových panelů (Dayyani et al., 2014)

Hodnotícím kritériem při zkoumání vlastností této vlnité struktury byla ohybová tuhost a tuhost v rovině materiálu, konkrétně jejich poměr, přičemž žádoucí vlastností materiálu je vysoká ohybová tuhost, ze které vyplývá nižší deformace způsobená napětím od ohybového momentu. Současně s tím má pozitivní vliv i na deformační chování potahu při namáhání tlakem během morfování. U tuhosti v rovině materiálu je naopak žádoucí co nejnižší hodnota a tedy situace, kdy potah klade co nejmenší odpor proti deformaci při morfování, což snižuje vynaloženou sílu, potřebnou na dosažení změny tvaru profilu a spotřebu energie. Studie se dále zabývá optimalizací geometrie, zvolené na základě výsledků metody konečných prvků, a tou byla lichoběžníková geometrie s povlakem z elastomeru.

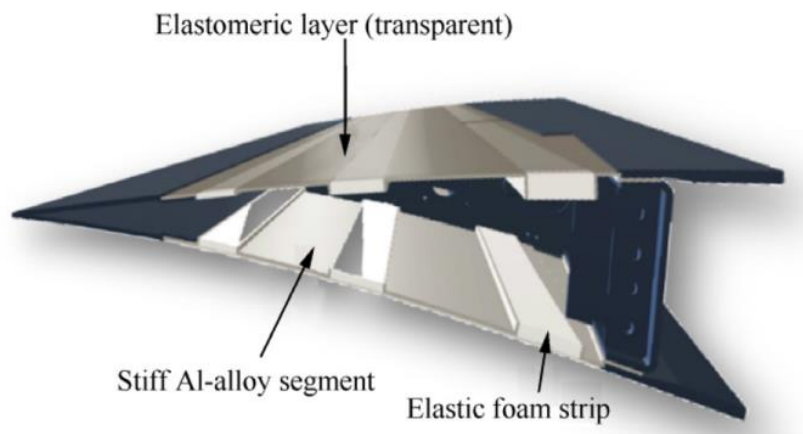
Nejen konkrétní struktura, ale také kombinace několika různých materiálů o rozdílných vlastnostech může být použita k zajištění anizotropních vlastností.

Potah pro použití na morfovateľném křídle pro projekt SARISTU byl navržen Fraunhoferovým institutem pro výzkum aplikovaných materiálů (IFAM) a v tomto případě se jedná o nedělený potah, který je však tvořen poddajnými a tuhými segmenty (Concilio et al., 2020). Řešení je zobrazeno na obr. 24. Poddajnost zajišťují podélné segmenty z pružné pěny, jejichž tloušťka se liší dle rozdílných napětí ve směru tětiny. Mezi těmito díly se nachází stejně orientované segmenty z hliníkové slitiny, které mají

plnit strukturální funkci a poskytovat správné spojení potahu s vnitřní konstrukcí.

Další součástí potahu je pak tenký povrch z elastomeru, který má zajišťovat hladkou výslednou křivku profilu. Arena et al. (2019) uvádí, že poddajné a pevné segmenty byly vhodně umístěny vůči vnitřní pohyblivé konstrukci tak, aby se poddajné segmenty nacházely v místech, kde dochází k největší deformaci vlivem pohybu mechanismu, tedy nad a pod závěsy jednotlivých částí mechanismu a pevné v oblastech mezi nimi, tedy v místech, ve kterých není deformace téměř žádná vlivem relativně tuhých částí mechanismu.

Na sestaveném vzorku byly provedeny únavové testy, přičemž při 10 % prodloužení bylo značně překročeno 200 000 cyklů, tedy podstatně více, než bylo stanoveno jako cílová hodnota (A. Concilio et al., 2020).



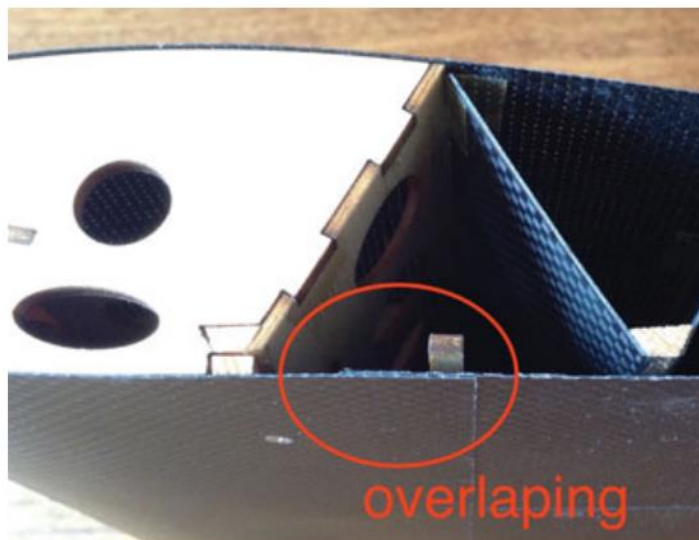
Obr. 24 Nedělený potah s tuhými a poddajnými segmenty (Concilio et al., 2020)

Arena et al. (2019) navíc na základě provedených vibračních testů zmiňuje potenciální přínos morfovateľného potahu v podobě tlumení vibrací, který by mohl mít pozitivní vliv na aeroelastické vlastnosti křídla. Vzhledem k tomu, že morfovateľná odtoková hrana je v uvažovaném případě umístěna v oblasti koncových částí křídel a tato oblast je často náchylná k aeroelastické nestabilitě, vylepšení tlumících vlastností by přispívalo k celkové bezpečnosti konstrukce.

### 3.2 DĚLENÝ POTAH

Jedním z uvažovaných řešení potahu morfovateľného křídla je použití děleného potahu, přičemž při změně tvaru profilu dochází vlivem změny zakřivení k posouvání jednoho segmentu potahu po druhém.

Tuto volbu navrhuje například Wu et al. (2016), překryv obou segmentů potahu na spodní straně profilu modelu navrženého řešení je znázorněn na obr. 25.



Obr. 25 Demonstrace děleného potahu s překrývajícími se částmi

Poněkud jiné řešení volil S. A. Meguid et al. (2015), jehož letový prototyp bezpilotního letounu disponuje pružným potahem, který je však dělený v místech, kde na sebe navazují jednotlivé prvky mechanismu pohyblivého žebra. Za účelem zlepšení aerodynamických vlastností byly tyto diskontinuity profilu překryty pružným gumovým materiálem.

Varianta s po sobě posuvnými kovovými panely byla použita také na spodní straně profilu křídla modifikovaného letounu F-111 programu AFTI (John W. Smith et al., 1992), a to na morfovateľné náběžné i odtokové hraně. Vzájemný posuvný pohyb mezi okrajem panelu a nepohyblivou částí potahu byl na náběžné hraně řešen pomocí odklopné části panelu, udržované v kontaktu s potahem za pomoci pružinových závěsů na odtokové hraně pak tvarovým přizpůsobením okrajů panelu (Statkus, 1980).

## 4 AKTUÁTORY

Řešení pohonu morfování se odvíjí od konkrétního typu mechanismu, tvořícího vnitřní konstrukci křídla. Použitý aktuátor může zprostředkovávat pohyb mechanismu skrze natočení v případě rotačního aktuátoru nebo lineární posunutí, v případě lineárního.

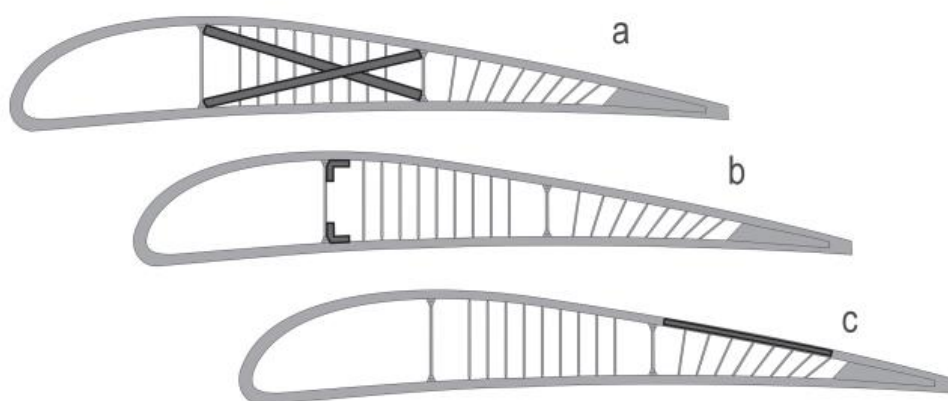
Co se týká konkrétní volby aktuátoru, v případě použití klasických pohonných systémů Barbarino et al. (2008) zmiňuje až 50% nárůst hmotnosti. Vzhledem k tomu, že technologie morfování křídel je spjata se snahou o dosažení co nejmenšího nárůstu hmotnosti navzdory morfovateľné konstrukci, objevují se tedy vedle konvenčních

aktuátorů často návrhy zahrnující použití moderních aktuátorů, které mají potenciál snížení hmotnosti a nároků na zaujímaný prostor. Tyto moderní aktuátory bývají občas uvažované přímo jako součást konstrukce ve formě Smart materiálů. Jako další výhody použití takových aktuátorů uvádí například Campanile a Sachau (2022) možnost ovládní více než jednoho stupně volnosti.

Naproti tomu Woods a Friswell (2012) poukazují na mnohé otázky, které v souvislosti s použitím Smart materiálů vyvstávají a jsou v současnosti stále nezodpovězeny, jako je například údržba nebo únavový život. Navíc zmiňují i úskalí týkající se spolehlivosti a bezpečnosti skrze použití elektrických, teplotních nebo magnetických polí přímo v primární konstrukci křídla.

Některá konstrukční řešení pak představují více možností ovládní morfování. Obr. 26 například zobrazuje různé možnosti umístění aktivního prvku v konstrukci Belt rib žebra (Campanile a Sachau, 2022) V případě, že aktuátor poskytuje pouze tahové síly, jako je tomu například u tzv. svalového drátu ze slitin s tvarovou pamětí (SMA), pak je možné využít konfiguraci znázorněnou na obr. 26 a). Použitím rotačních aktuátorů nebo aktivních pohyblivých závěsů je možné ovládat přímo úhel jednotlivých výztuh vůči potahu (obr. 26 b). Další zmíněnou variantou je pak zakomponování aktuátoru přímo do konstrukce, zde do poddajného potahu, ve formě Smart materiálů, uvedeno je například použití slitin s tvarovou pamětí nebo piezoelektrických materiálů (obr. 26 c).

Také na uložení aktuátoru v konstrukci jsou kladeny určité požadavky. Vasista et al. (2019) uvádí nutnost zajištění takového uložení, které by umožňovalo translační pohyb ve směru podél rozpětí a rotační pohyb vlivem ohybu křídla.



Obr. 26 a), b), c) Různé způsoby umístění aktivního prvku v konstrukci profilu Belt Rib (Campanile a Sachau, 2022)

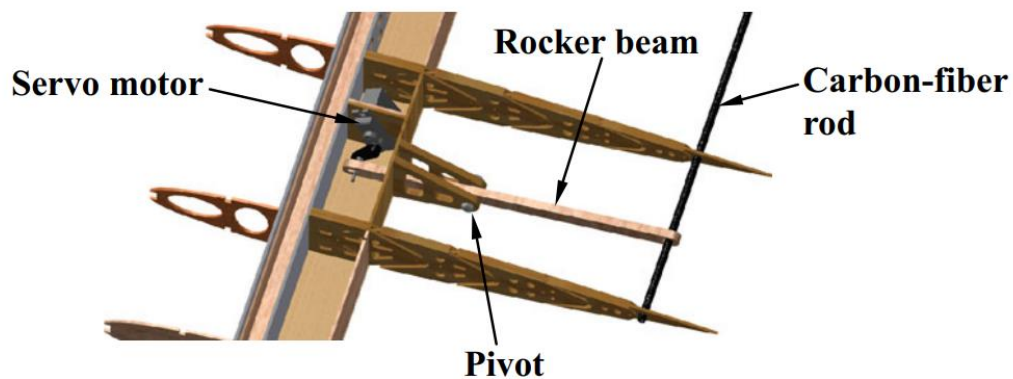
Podle konkrétního typu konstrukce a počtu aktuátorů pak bývá ovládnán jeden nebo více stupňů volnosti mechanismu, tvořícího žebro. Pokud je navíc každé žebro poháněno jedním aktuátorem, je v některých případech uvažováno také rozdílné morfování jednotlivých žeber za účelem dosažení zkroucení křídla podél rozpětí. Concilio et al. (2020) například uvažuje obě možnosti. Jednou je synchronní chod aktuátorů, který zajistí

jednotnou křivku profilu podél rozpětí, ve druhém případě aktuátory zajišťují rozdílné morfování žeber.

#### 4.1 KONVENČNÍ AKTUÁTORY

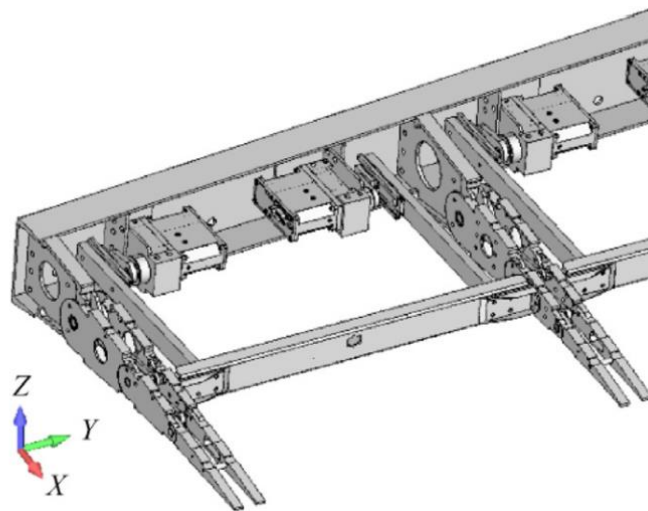
V případě morfování, zajištěného kinematickým mechanismem, sestávajícím z pevných, nepoddajných částí, návrhy nejčastěji zahrnují použití konvenčních aktuátorů.

Pohyblivé žebro, které ve svém návrhu představuje Meguid et al. (2015) má využívat k morfování servomotorů. Jako výhody řešení s tímto typem aktuátoru jsou uvedeny přesné ovládání a výsledný pohyb mechanismu, krátká reakční doba a dostatečná tuhost a pevnost. Ovládání má sestávat z několika setů mechanismů, u nichž je ovládací síla přenesena ze servomotoru pákou na poslední článek pohyblivého žebra. Mechanismus je znázorněn na obr. 27.



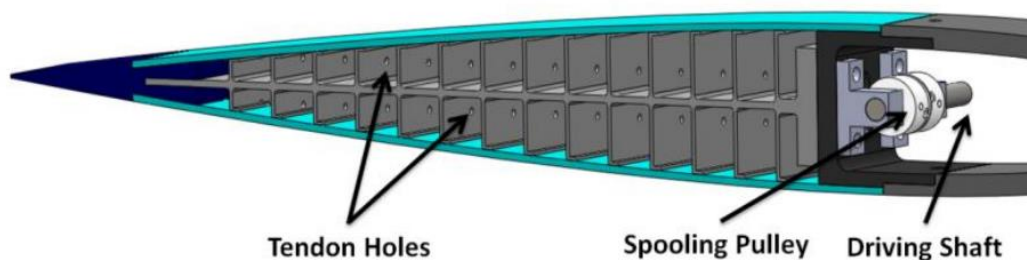
Obr. 27 Ovládací systém se servomotorem a pákou přenášející ovládací sílu na poslední článek pohyblivého žebra (Meguid et al., 2015)

Concilio et al. (2020) v projektu SARISTU uvažuje použití elektromechanických aktuátorů, přičemž každé pohyblivé žebro pak pohání jeden aktuátor pomocí pákových mechanismů. Části pohonného systému pak jsou zobrazeny na obr. 28. Studie uvádí, že bylo zvoleno takové řešení, kde aktuátory vedle zprostředkovávání pohybu částí pohyblivého žebra současně přenáší vnější aerodynamická zatížení.



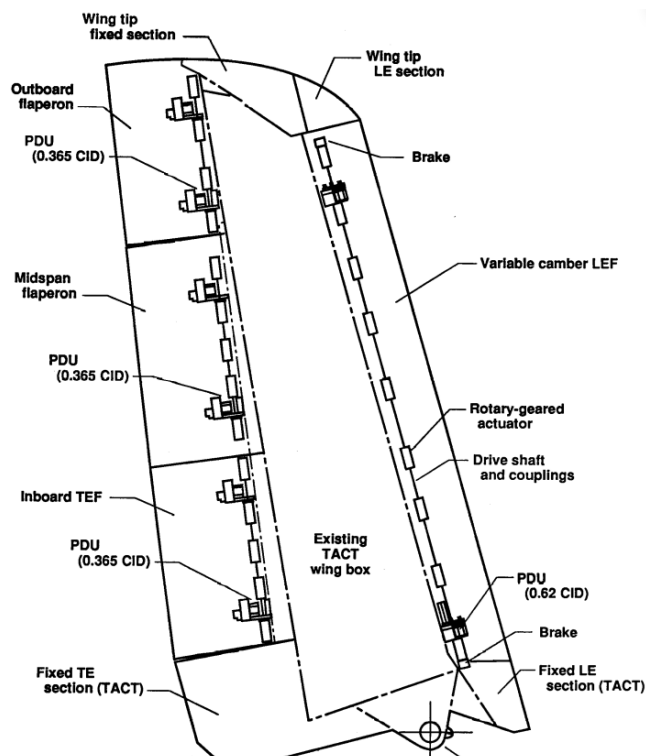
*Obr. 28 Pákový mechanismus ovládacího systému morfovateľného křídla projektu SARISTU (Concilio et al., 2020)*

Woods a Friswell (2012) v poddajné konstrukci morfovateľného profilu FishBAC uvažují především použití konvenčních aktuátorů. Co se konkrétní volby týče, ve studii rozebírají možnost využití hned několika technologií, mezi nimi tradiční hydraulické nebo elektromechanické aktuátory nebo pneumatické umělé svaly a pneumatické válce. Dále zmiňují i potenciální možnost použití aktuátorů, využívajících slitin s tvarovou pamětí, což by mohlo vést k lehčímu a jednoduššímu řešení, jako nevýhody ovšem uvádí náročnost dosažení spolehlivosti elektromotoru. Jelikož změna tvaru profilu je zprostředkována skrz systém táhel, navíjených na kladku v přední části profilu, je vyžadováno použití technologie, která může být nakonfigurována tak, aby vytvářela rotační pohyb, přičemž je aktuátor s tímto ovládacím systémem spojen pomocí mechanismu se zamezeným zpětným chodem, například šnekovým převodem. Navržený systém ovládní má navíc udržování morfovaného tvaru na základě tření bez nutnosti neustálého dodávání energie. Schematické zobrazení ovládacího mechanismu s navíjecí kladkou je znázorněno na obr. 29.



Obr. 29 Ovládací systém profilu FishBAC s navíjecí kladkou v náběžné hraně profilu a táhly vedoucími skrz výztuhy (Woods a Friswell, 2012)

Skutečná složitost potenciálního ovládacího systému použitelného u letuschopného letadla je patrná z konstrukce F-111 programu Advanced Fighter Technology Integration (AFTI). Každá morfovateľná náběžná hrana je poháněna 9 rotačními aktuátory, jimž poskytují energii 2 hydraulické jednotky pro rozvod energie, umístěné na okrajích segmentů morfovateľné náběžné hrany. Každá odtoková hrana pak sestává ze 3 morfovateľných segmentů, z nichž 2 vnější plní roli flaperonů. Každý tento segment je ovládán vlastním systémem, přičemž je poháněn několika aktuátory, hydraulické jednotky pro rozvod energie jsou situované opět na okrajích těchto segmentů. Celkem konstrukce morfovateľného křídla obsahuje 16 jednotek pro rozvod energie a 46 rotačních aktuátorů (Smith et al., 1992). Rozložení jednotlivých aktuátorů a jednotek pro rozvod energie podél rozpětí je znázorněn na obr. 30.



Obr. 30 Rozložení aktuátorů a jednotek pro rozvod energie podél rozpětí (Smith et al., 1992)

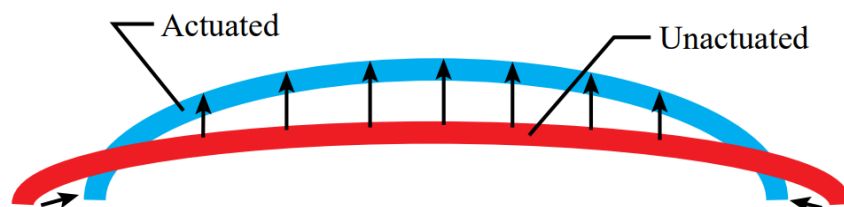
## 4.2 SOLID-STATE AKTUÁTORY

Jedním z moderních navrhovaných způsobů řešení pohonu morfování je použití solid state aktuátorů, tedy aktuátorů, které zprostředkovávají ovládací síly a změny tvaru na základě elektrického pole.

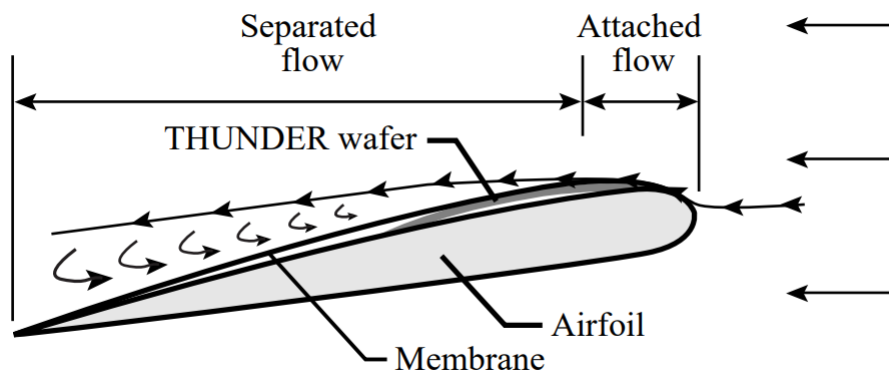
Jedním typem takových aktuátorů jsou například tzv. Smart materiály, tedy materiály, u nichž je možno dosahovat změn některých jejich vlastností vlivem působení vnějších podnětů, jako například tlaku, teploty, elektřiny, magnetismu, světla atd. (Sun et al., 2016). Na rozdíl od použití konvenčních aktuátorů, kde jsou posunutí a síly přeneseny od aktuátoru na cílová místa například pomocí táhel, v případě použití SMART materiálů vzniká deformace přímo v tomto materiálu, který je součástí konstrukce, u které má ke změně tvaru docházet.

Příkladem Smart materiálů jsou piezoelektrické materiály, schopné prodloužení nebo zkrácení v případě, že jsou vystaveny elektrickému poli (Pinkerton a Moses, 1997). Ty je dále možné rozdělit do dvou skupin podle toho, v jakém směru jsou schopné měnit tvar konstrukce, v níž jsou zabudované.

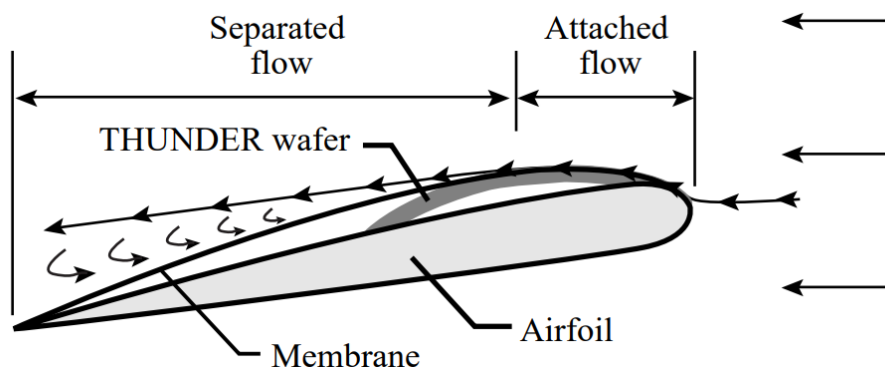
Pinkerton a Moses (1997) se zabývají využitím piezoelektrického aktuátoru, nazvaného THUNDER, vyvinutého v Langley Research center. Jedná se o unimorf aktuátor, který je určen pro změnu tvaru mimo rovinu aktuátoru. Studie uvádí v případě tohoto typu aktuátoru dosažení významných tvarových změn v porovnání s jinými piezoelektrickými aktuátory. Presentovaným návrhem je pak aplikace destiček THUNDER aktuátoru k hornímu povrchu malého profilu a pomocí jeho změny tvaru dosažení většího prohnutí tohoto profilu, a tedy posunutí oblasti odtržení proudnic. Obr. 31 znázorňuje tvarové změny aktuátoru vlivem působení napětí, obr. 32 a obr. 33 pak jeho uvažované zakomponování do profilu a vliv na změnu tvaru profilu. Zmíněny jsou také otázky creepu a hystereze aktuátorových destiček. Výsledky prezentované studií však potvrzují možnost využití těchto aktuátorů pro morfování malých profilů i při aerodynamickém zatížení.



Obr. 31 Znáornění změny tvaru aktuátoru působením napětí (Pinkerton a Moses, 1997)



Obr. 32 Tvar profilu v základním stavu (Pinkerton a Moses, 1997)



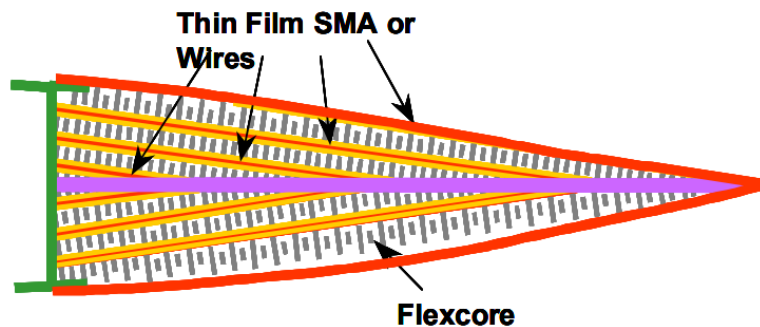
Obr. 33 Změna tvaru profilu vlivem prohnutí aktuátoru (Pinkerton a Moses, 1997)

Využití aktuátorů v podobě Smart materiálů v poddajné konstrukci profilu představuje například Bilgen et al. (2010), který uvažuje použití bimorf povrchu a ve své studii se zabývá návrhem a testováním jeho použití na profilu. Jedná se o materiál, skládající se z několika vrstev, u něhož dochází vlivem tvarových změn aktivních prvků k žádanému zakřivení.

V modelu profilu bylo použito celkem 8 piezoelektrických MFC aktuátorů, na každé straně 4, ve směru podél tělvy. Typické hodnoty napětí se dle studie pohybují v rozmezí od -500 V do 1500 V, přičemž napětí na horním a spodním potahu profilu mají opačnou polaritu a hodnoty napětí pak určují míru morfování. Na základě testů Bilgen et al. (2010) uvádí, že návrh prokázal srovnatelnou efektivitu s konvenčními aktuačními systémy, přičemž MFC aktuátory se ukázaly být schopné ovládní změny tvaru profilu, ačkoliv studie připouští, že testy morfování prokázaly očekávané zbytkové zakřivení z předchozího cyklu skrze piezoelektrickou hysterezi.

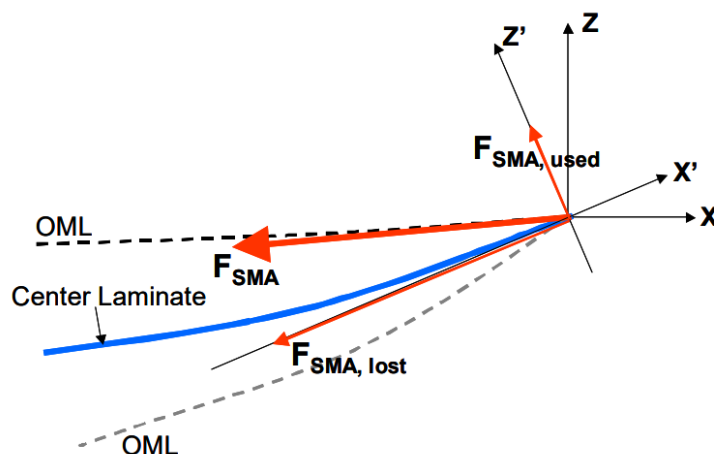
Jiný způsob ovládní morfování zahrnující využití Smart materiálů představuje

jako jeden z možných Wang et al. (2001) ve své studii, týkající se programu Smart Wing 2. Táhla jsou v tomto případě ze slitiny s tvarovou pamětí (SMA) a pro rychlejší odezvu ovládacího systému mají být aktivně chlazena. Alternativou by pak bylo použití většího množství těchto táhel v několika vrstvách, což by zmenšilo požadovanou sílu, vyvolanou jedním táhlem. Uvedené řešení znázorňuje obr. 34, ze kterého je zřejmý způsob ovládní zkracováním SMA táhel.



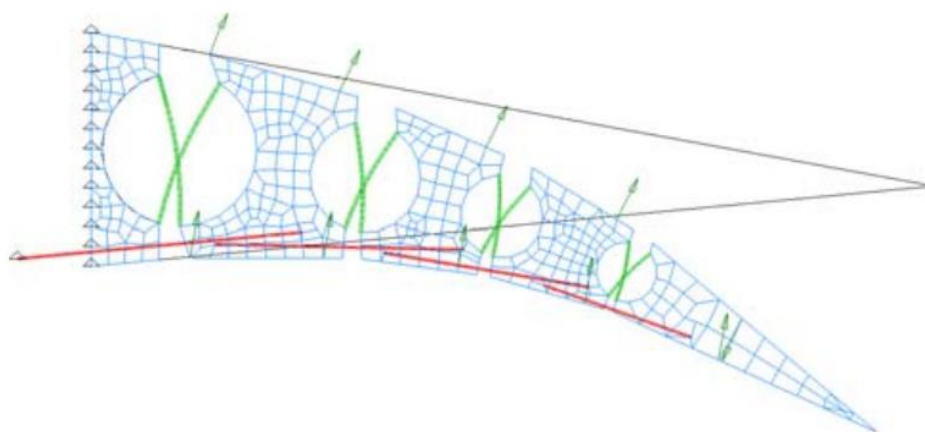
Obr. 34 SMA táhla v několika vrstvách vedoucí k odtokové hraně profilu (Wang et al., 2001)

Toto řešení má za cíl vyvození ohybových momentů podél profilu. Wang et al. (2001) ovšem upozorňuje, že v tomto případě je na ohyb profilu využita pouze malá složka síly v táhlu, a to skrz jeho orientaci, vzhledem k tomu, že ohybový moment je vyvozen pouze složkou síly kolmou k rameni. Silový rozklad je znázorněn na obr. 35. Koncept je tedy označen za nevýhodný pro použití v tenkých profilech.



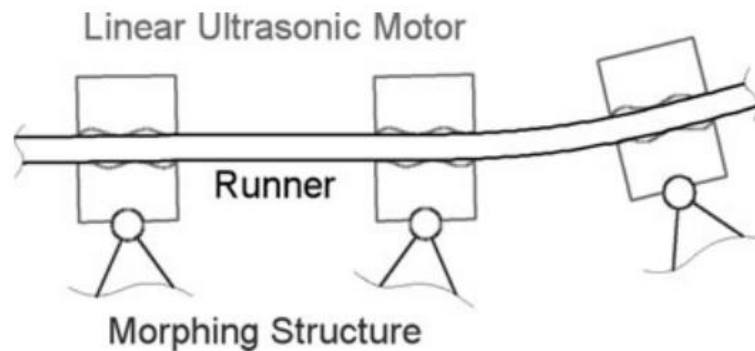
Obr. 35 Znázornění silového rozkladu a relativně malého podílu využité složky síly na morfování (Wang et al., 2001)

Ovládání v podobě Smart materiálů využívá také Barbarino et al. (2008). Ovládacími prvky v tomto návrhu jsou táhla ze slitiny s tvarovou pamětí (SMA), vedoucí mezi jednotlivými členy mechanismu na spodní straně profilu, jak je vidět na obr. 36. Změny tvaru je pak dosaženo aktivací těchto táhel, a to jejich zkrácením nebo prodloužením, což má za následek rotaci členů mechanismu okolo elastických spojů.



*Obr. 36 Morfování tuhého mechanismu ovládaného SMA táhly (znázorněna červeně) a elastických spojů (znázorněny zeleně) (Barbarino et al., 2008)*

Vedle konvenčních aktuátorů a Smart materiálů je další možností použití solid-state aktuátorů, které nejsou přímo součástí morfovateľné konstrukce. Příkladem je například řešení, které představuje Wu et al. (2016), který pro pohon morfování počítá s lineárními ultrazvukovými motory (LUSM), zajišťujícími posuv členů příhradové konstrukce po poddajných výztuhách na spodní straně profilu. Obr. 37 zobrazuje navržené řešení, kde vlivem pohybu lineárních ultrazvukových motorů po poddajné výztuze dochází k jejím tvarovým změnám a současně k pohybu členů příhradové konstrukce, která je s těmito motory spojena z druhé strany. Studie dále poukazuje na velký potenciál takových aktuátorů, a to především pro použití v malých bezpilotních prostředcích, kde je potřeba splňovat náročné požadavky, týkající se velikosti aktuátorů nebo v aplikacích, kde je vyžadováno větší množství aktuátorů pro ovládání více stupňů volnosti.

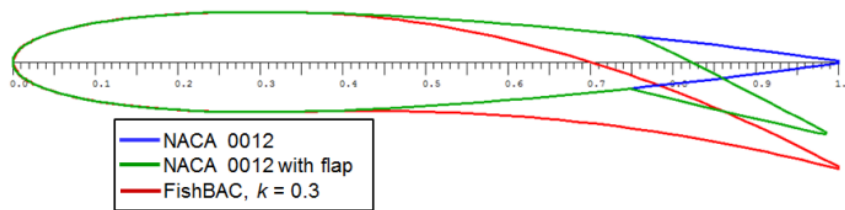


Obr. 37 Znáznornění LUSM aktuátorů posuvných po poddajné výztuze na spodní straně profilu (Wu et al., 2016)

## 5 KALKULACE A MĚŘENÍ POTENCIÁLNÍCH AERODYNAMICKÝCH VÝKONŮ

K demonstraci, popř. zjištění aerodynamických benefitů, plynoucích z použití morfovateľného profilu a k poukázání na možnosti jeho využití se studie věnují také teoretické analýze aerodynamických vlastností profilu, v některých případech doplněné o testy v aerodynamickém tunelu. Vyhodnocení výsledků analýzy nebo měření pak probíhá na základě srovnání s jinými profily, popř. se stejným profilem, který tvoří základní tvar nemorfovaného profilu, se vztlakovou klapkou.

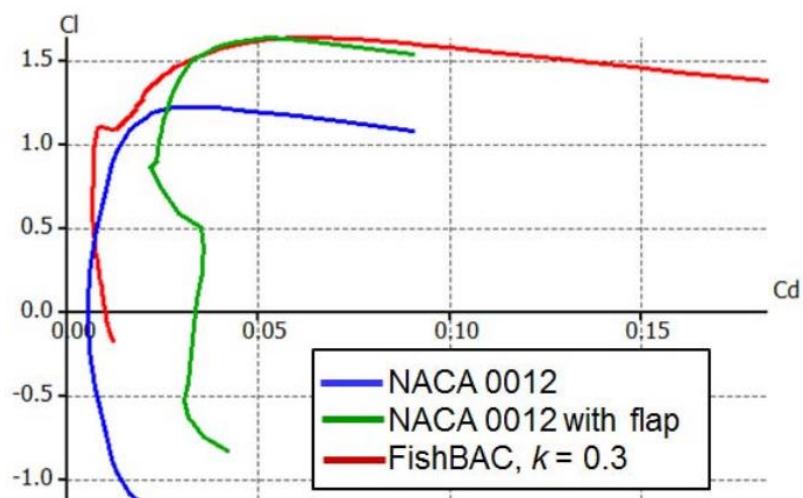
Druhým zmíněným způsobem postupují Woods a Friswell (2012), kteří ve svém návrhu morfovateľného profilu FishBAC vycházejí z profilu NACA 0012 a dále se zabývají analytickým srovnáním jeho morfovaného tvaru s tímto profilem a s profilem NACA 0012 se vztlakovou klapkou. Při tom vychází z výsledků aerodynamických koeficientů zjištěných programem XFOIL. Pro efektivní srovnání byly parametry vztlakové klapky nastaveny tak, aby při daných podmínkách profil dosahoval stejného maximálního součinitele vztlaku, jako profil v morfovaném stavu. Studie ovšem zmiňuje, že v programu XFOIL je uvažována utěsněná klapka, tedy pouze ostré zakřivení profilu, jak je vidět na obr. 38, který zobrazuje všechny tři použité profily.



Obr. 38 Tři porovnávané profily (Woods a Friswell, 2012)

Výhody použití profilu FishBAC jsou patrné při porovnání jednotlivých polár těchto tří profilů. Profil FishBAC má značně menší odpor, než profil NACA 0012 se vztlakovou klapkou a při hodnotě  $C_L > 0,45$  i menší, než profil NACA 0012 bez vztlakové klapky (Woods a Friswell, 2012).

Studie dále uvádí i rozdílné chování, oproti profilu NACA 0012 se vztlakovou klapkou, kdy je při srovnání vztlakových polár těchto dvou profilů při určitém úhlu náběhu (zde  $-4^\circ$ ) a daných podmínkách pozorována změna směrnice vztlakové poláry FishBAC profilu. Stejně chování profil vykazuje při různých nastavených podmínkách, a tedy při rozdílných úhlech náběhu.

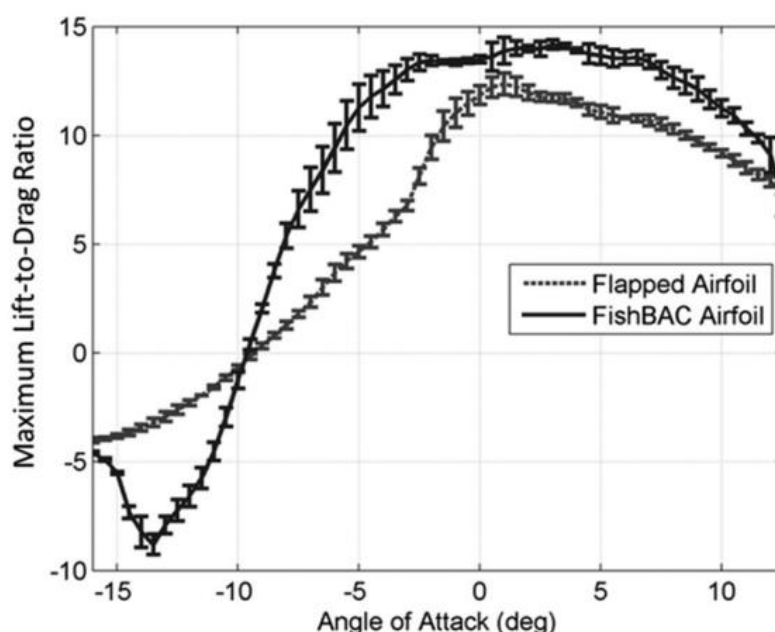


Obr. 39 Srovnání polár tří porovnávaných profilů získané programem XFOIL (Woods a Friswell, 2012)

Navazující studie se opět zabývá srovnáním modelu tohoto profilu se shodným profilem s klapkou pomocí testů v aerodynamickém tunelu.

Klapkový profil je testován ve 4 různých stavech, odpovídajících úhlu klapky vůči těživě a v základním stavu. Jednotlivé stavy morfování profilu FishBAC, testované v aerodynamickém tunelu, jsou pak odstupňované podle úhlu rotace navíjecí kladky ovládacím, což na měřeném modelu profilu odpovídá poloze nastavené ovládacím

servomotorem (Woods et al., 2014). Současně bylo cílem srovnání takových geometrií, které budou vykazovat podobné chování, co se týká hodnot součinitele vztlaku. Dalším krokem pak bylo porovnání  $L/D$  v závislosti na úhlu náběhu obou profilů. Výsledek tohoto srovnání lze vidět na obr. 40 (Woods et al., 2014). Profil FishBAC dosahuje ve většině běžných úhlů náběhu značně vyšší poměr  $L/D$  než klapkový profil, současně studie zmiňuje i daleko větší oblast úhlů náběhu, při kterých je dosaženo nejlepších výkonů profilu. Nárůst hodnot poměru  $L/D$  se pak pohybuje v rozmezí 20 % - 25 % (Woods et al., 2014).



Obr. 40 Porovnání výsledků měření v aerodynamickém tunelu, kde je patrný nárůst poměru  $L/D$  v široké oblasti úhlů náběhu (Woods et al., 2014)

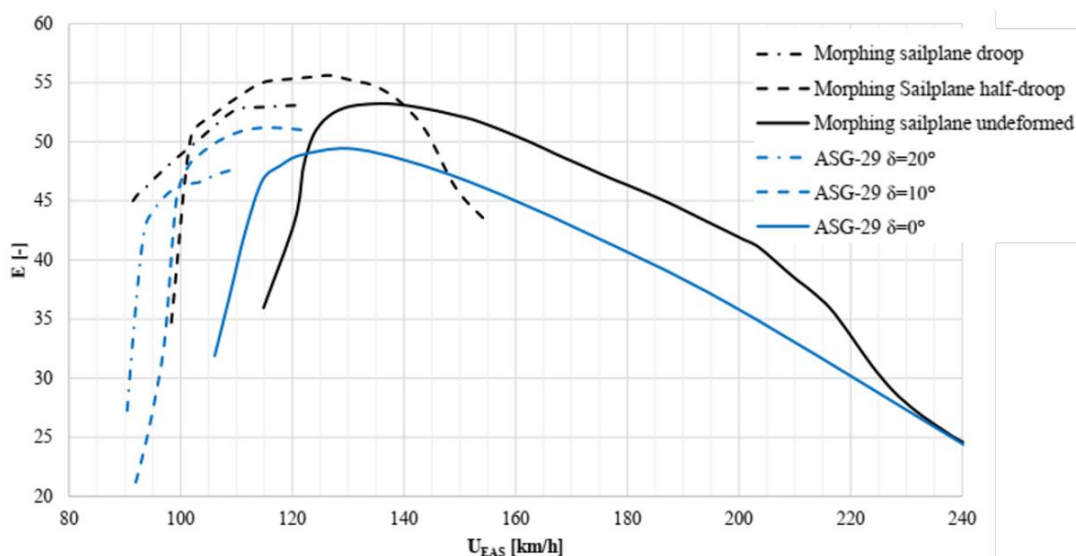
Trochu jinou myšlenku volí ve svém návrhu například Meguid et al. (2015), který uvažuje takovou změnu tvaru profilu, že profil v základním, nemorfovaném stavu tvarem odpovídá profilu NACA 0012 a při morfování dochází k jeho plynulé změně v profil NACA 6412, který má stejnou tloušťku, jako NACA 0012, ovšem s maximálním prohnutím. V případě, že by byl profil schopen měnit své prohnutí mezi těmito dvěma profily, měl by dosahovat optimálního poměru  $L/D$  v oblasti nízkých i vysokých rychlostí. Meguid et al. (2015) zde ovšem zmiňuje, že je nutné vzít v potaz, že ke změně profilu dochází pouze v morfovateľné části, zatímco přední, pevná část, zachovává tvar NACA 0012. V případě tohoto návrhu je tedy morfovaný profil srovnáván s profilem NACA 0012.

Analýza byla provedena použitím CFD simulace, přičemž pro zjištění její realističnosti studie zahrnuje i data z testování profilu NACA 0012 v aerodynamickém tunelu a poukazuje na jejich dobrou shodu s daty získanými simulací.

Srovnání těchto dvou profilů jasně ukazuje možnost využití morfovateľného křídla. Nad hodnoty  $C_L$  vyšší, než 0,3, a tedy na nižších rychlostech, je výhodnější použití profilu v morfovaném tvaru, který v této oblasti dosahuje lepšího poměru  $L/D$ . Při nižších hodnotách  $C_L$ , a tedy vyšších rychlostech, je efektivnější naopak profil NACA 0012. Z výsledků je tedy zřejmé, že by aerodynamické výkony byly vylepšeny zvláště u letadel, které v průběhu letu častěji přechází mezi různými režimy letu.

Jiným způsobem k problematice přistupuje Achleitner et al. (2020), který se zabývá demonstrací možných posunutí výkonnosti kluzáku v případě, že by disponoval morfovateľným, optimalizovaným křídlem se schopností sklopné náběžné hrany a s konvenční vztlačovou klapkou. Ve své studii vytvořil předběžný návrh takového křídla s 5 různými, optimalizovanými profily. Studie uvádí, že hlavní odlišností oproti jiným návrhům morfovateľného profilu je uvažovaná konstantní délka morfovateľné části v základní konfiguraci a konfiguraci po morfování. Důvodem je dosažení přesnějšího deformačního chování, které může přispívat k aerodynamickým výkonům křídla vzhledem k tomu, že oblast náběžné hrany je velmi citlivá na odchylky od žádaného zakřivení, které mohou mít za následek dřívější přechod do turbulentního proudění nebo odtržení proudnic (Achleitner et al., 2020). Navržené křídlo pak bylo doplněno o ocasní plochy kluzáku ASG-29 pro vytvoření modelu ke srovnání s právě tímto kluzákem. Výsledky ukazují možná posunutí výkonnosti v jednotlivých fázích letu v případě využití různých konfigurací morfování.

Při maximální vzletové hmotnosti 600 kg plošné zatížení optimalizovaného křídla dosahuje hodnoty  $69 \text{ kg/m}^2$  oproti  $57 \text{ kg/m}^2$  u kluzáku ASG-29, přičemž je stále zajištěna minimální rychlost 90 km/hod. Díky většímu plošnému zatížení dosahuje kluzák při rychlostech nad 140 km/hod. lepší klouzavosti, a to při mírném zvýšení výkonů při kroužení na malých rychlostech (Achleitner et al., 2020).

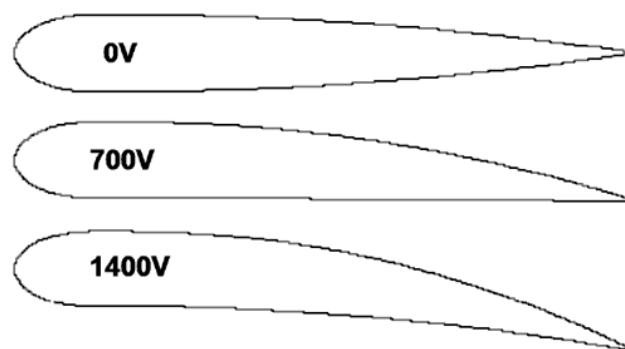


Obr. 41 Srovnání potenciálních výkonů kluzáku s morfovateľnou náběžnou hranou s výkony kluzáku ASG-29 (Achleitner et al., 2020)

Možnost využití tohoto morfovateľného křídla a posunutí výkonnosti oproti křídlu ASG-29 je vidět na obr. 41. Ačkoliv se jedná pouze o teoretické výsledky, potenciál morfování náběžné hrany z nich plynoucí je zřejmý, dosažení takových výsledků by ovšem vyžadovalo přesnou deformaci jednotlivých profilů (Achleitner et al., 2020).

Bilgen et al. (2010) představuje poněkud jinou úvahu, a to, že při zvětšení prohnutí střední křivky profilu je současně zvětšen i úhel náběhu.

V prvním kroku teoretické analýzy se studie zaměřuje na zjištění optimální tloušťky profilu. Přitom vychází z dat získaných programem XFOIL. Aerodynamické koeficienty jsou následně měřeny při jednotlivých hodnotách vstupního napětí, které tedy ovlivňuje jak úhel náběhu, tak prohnutí střední křivky profilu. Efekt různých aplikovaných vstupních napětí je vidět na obr. 42 u profilu s 13% tloušťkou. Analýzou jednotlivých profilů při rychlosti proudu 15 m/s bylo zjištěno, že profil s 6% tloušťkou vykazuje největší nárůst vztlaku v závislosti na napětí a profil s 12% tloušťkou naopak nejnižší nárůst odporu. Zjištěné informace byly studií využity ke konstrukci modelů profilu a jejich dalšímu testování.



*Obr. 42 Změny tvaru profilu s bimorf povrchy dosažené rozdílným napětím (Bilgen et al., 2010)*

Aerodynamická přínosnost morfovateľného profilu je následně vyhodnocena porovnáním jeho výkonů, zjištěných měřeními v aerodynamickém tunelu s výkony profilů NACA 0009 a NACA 0013 a s profilem, který s ním je shodný v základní, nemorfované konfiguraci. V případě morfovateľného profilu je jakožto nezávislá proměnná brán úhel náběhu způsobený aplikovaným napětím. Nárůst vztlaku v závislosti na úhlu náběhu je pak o 72 % větší, než u profilu NACA 0009. Studie uvádí, že cílem mělo být prokázání výhod morfovateľného profilu, u něhož morfováním dochází současně ke změně prohnutí střední křivky profilu a úhlu náběhu oproti mechanicky ovládaným změnám v úhlu náběhu a že tyto výhody byly prokázány. Jelikož zde bylo cílem zlepšení výkonů, co se týká generování vztlaku, vlastnosti týkající se odporu nebyly považovány za tak podstatné (Bilgen et al., 2010).

Wu et al. (2016) provádí měření v aerodynamickém tunelu u 7 různých profilů, které odpovídají jednotlivým stavům morfování. Blíže se pak zaměřuje na srovnání tří profilů, a to profilu s konvenční vztlakovou klapkou v 75 % délky tětiny a 2 profilů, lišících se polohou intenzivní změny prohnutí střední křivky profilu, u jednoho v oblasti maximální tloušťky profilu, u druhého pak v oblasti blízko k odtokové hraně.

V aerodynamickém tunelu bylo z časových důvodů provedeno jen měření jednoho profilu při rychlosti proudu 25 m/s a při nižším Reynoldsově čísle vzhledem k omezením modelu a zařízení. Závislosti zjištěné měřeními a závislosti z teoretické analýzy v programu XFOIL mají velmi podobný trend, studie tedy vychází z teoreticky zjištěných dat.

Ze závěrů vyplývá, že v případě morfování, kdy je střední křivka profilu prohnuta více v odtokové části, profil podává lepší výkony (vyšší  $L/D$ ) při větších úhlech náběhu, naopak horší výkony při menších úhlech náběhu. Při nižších hodnotách  $C_L$  je tedy ze tří zmíněných profilů nejvýhodnější profil s intenzivním prohnutím v oblasti největší tloušťky profilu, při vyšších hodnotách  $C_L$  pak morfovateľný profil s intenzivním prohnutím v odtokové části. Při hodnotách  $C_L > 1,8$  je pak nejvýhodnější použití profilu se vztlakovou klapkou. To je způsobeno žádoucím tlakovým gradientem v oblasti začátku vztlakové klapky, vlivem významného zakřivení v této oblasti, což má za následek urychlení proudu v tomto místě a tím oddálení odtržení (Wu et al., 2016).

Z pohledu využitelnosti morfovateľného profilu jsou tedy jasné potenciální výhody plynoucí z možnosti plynulé změny tvaru profilu. A to zvláště u takového morfovateľného profilu, který by byl schopen zvětšovat prohnutí střední křivky profilu v různých místech, tedy například právě koncept s několika stupni volnosti představený v této studii.

Wu et al. (2016) však současně připouští, že nebylo prokázáno zlepšení výkonů morfovateľných profilů oproti profilu se vztlakovou klapkou při relativně vysokých úhlech náběhu. Jako možný důvod uvádí použití modelu s co nedokonalejším povrchem a vzduchotěsné místo spoje se vztlakovou klapkou.

## **6 SIMULACE MORFOVÁNÍ A ZKOUŠKY MORFOVÁNÍ NA MODELECH PROFILŮ**

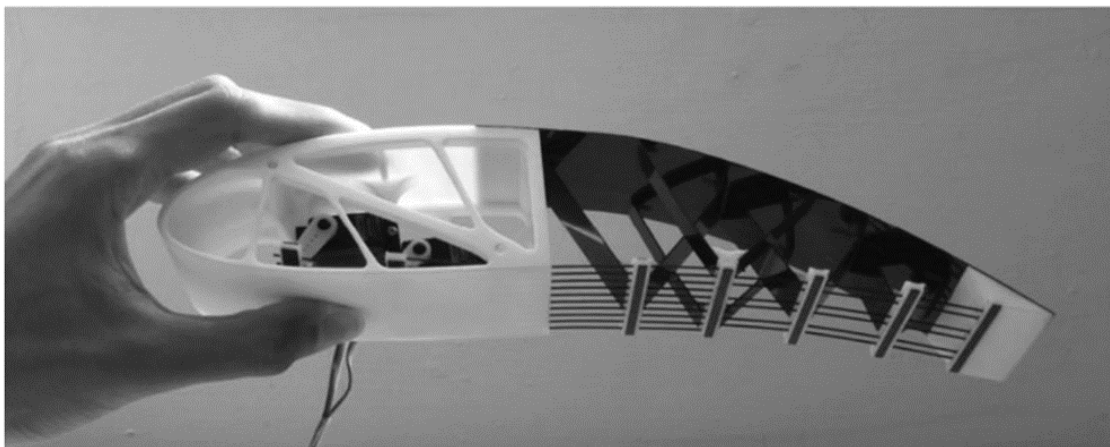
Autoři jednotlivých návrhů se vedle simulací a testů, zaměřených na aerodynamické výkony, zabývají také potvrzením použitelnosti mechanismu morfování, co se týká jeho schopnosti dosahovat žádané změny tvaru a dosažení požadavků na pevnost a tuhost konstrukce.

## 6.1 SIMULACE A ZKOUŠKY MORFOVÁNÍ

Wu et al. (2016) ve své studii uvádí provedení počítačové simulace morfování. Model pro simulaci byl vytvořen na základním profilu NACA 4418. Příhradová konstrukce byla v simulaci pevně spojena s výztuhami na spodní straně profilu a pohyb mezi ní a výztuhami byl nahrazen za využití teplotní roztažnosti jednotlivých sekcí výztuh. Tímto způsobem bylo simulováno ovládání všech 5 stupňů volnosti.

Dosažený morfovaný tvar profilu byl hladký, ačkoliv na horní a spodní části potahu bylo pozorováno mírné zvlnění, které bylo potvrzeno také při následujících testech v aerodynamickém tunelu (Wu et al., 2016).

Při testování morfování na modelu se studie zaměřuje spíše na použitelnost daného mechanismu morfování, než na využití konkrétního typu aktuátorů a to z důvodu malého rozměru modelu. Místo uvažovaných LUSM aktuátorů jsou tedy použity 2 servomotory, které ovládají pohyb výztuh, vedoucích podél spodní strany profilu a spojených s prvky příhradové konstrukce, konkrétně jejím druhým členem na jeho spodní hraně a s odtokovou hranou. Obr. 43 znázorňuje model morfovateľného profilu.



Obr. 43 Model morfovateľného profilu se dvěma servomotory (Wu et al., 2016)

Také (Campanile a Sachau, 2022) v návrhu Belt Rib zmiňují v prvním kroku provedení simulace metodou konečných prvků, konkrétně simulace morfování a simulace chování profilu při zatížení v cestovním režimu za účelem zjištění tuhosti konstrukce.

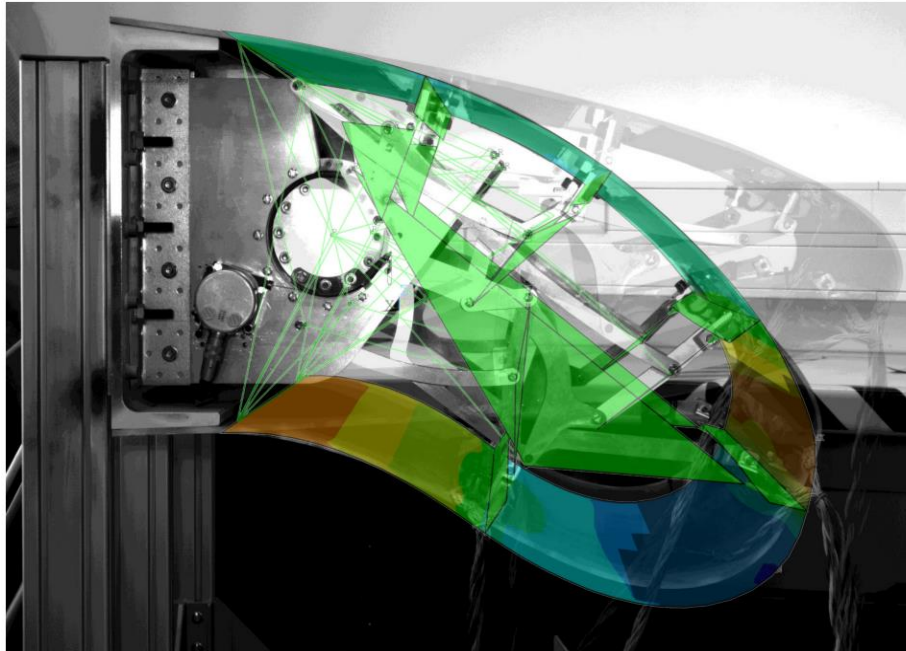
Následně uvádí provedení testů morfování na modelu profilu v měřítku 1:2, z praktických důvodů disponujícím externím aktuátorem. Výsledky byly srovnány s předchozí numerickou simulací, se kterými prokázaly dobrou shodu. Stejně tak i naměřené hodnoty napětí odpovídaly těm zjištěným metodou konečných prvků.

Bilgen et al. (2010) při konstrukci modelů profilu vychází z provedené teoretické

analýzy. Modely jsou poháněny celkem 8 MFC aktuátory, orientovanými podél tětivy profilu, 4 na každé straně profilu. Během testů v aerodynamickém tunelu při rychlosti proudu 15 m/s pak byla pozorována piezoelektrická hystereze, tedy zbytkové zakřivení z předchozího testovacího cyklu morfování. Aerodynamická hystereze pozorována nebyla. Bilgen et al. (2010) však poukazuje na fakt, že testy prokázaly opakovatelnost morfování. Většina odchylek od požadovaného tvaru pak byla způsobena rozhraním mezi tuhou náběžnou hranou a morfovatelem, aktivní částí profilu.

Vasista et al. (2019) v návrhu konstrukčního řešení morfovateľné náběžné hrany pomocí kinematického, tuhého mechanismu prezentuje výsledky testů morfování demonstrátoru skutečné velikosti. Ten disponuje dvěma kinematickými žebry, odděleně poháněnými aktuátory. Vzhledem k tomu, že během testu došlo k přetížení jednoho z aktuátorů, byla následně provedena kalkulace hodnoty kroutícího momentu pomocí metody konečných prvků a její výsledek odpovídal hodnotě zjištěné při testu. Jelikož tato hodnota byla nižší než maximální hodnota kroutícího momentu poskytovaného aktuátorem, uvedená v příručce, bylo vyvozeno, že skutečná tuhost potahu byla vyšší, než vypočítaná (Vasista et al., 2019).

Studie pak uvádí přiměřeně dobrou shodu morfovaného tvaru s tvarem z kalkulace v téměř celé oblasti, až na zcela přední část náběžné hrany, kde došlo k odchylce od předpokládaného tvaru. Srovnání výsledku testu s analýzou pomocí metody konečných prvků je vidět na obr. 44. Jako potenciální důvody pro tuto odchylku tvaru je uvedena nesprávná trajektorie mechanismu vlivem zatížení od napínaného potahu nebo přílišná tuhost potahu v dané oblasti. Právě ta byla označena za hlavní důvod na základě výsledků analýzy v programu ARAMIS, která měla za úkol zjištění vlivu tuhosti potahu na trajektorie mechanismu. Spekulovaným řešením je pak náhrada celistvého potahu děleným, který by se mohl posouvat vůči nepohyblivé části křídla. Vzniklé překrytí dvou povrchů by sice mělo vliv na laminární proudění, na druhou stranu by ovšem pravděpodobně byla snížena energie v potahu, což by odpovídalo menšímu napětí, požadovanému kroutícímu momentu aktuátoru a dokonalejší výsledné křivce profilu (Vasista et al., 2019).

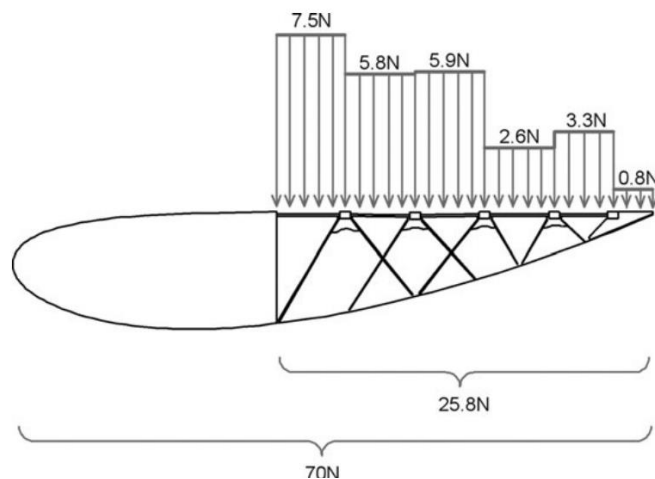


Obr. 44 Výsledek morfování demonstrátoru srovnaný s výsledkem získaným metodou konečných prvků. Zřetelná je tvarová odchylka na náběžné hraně profilu (Vasista et al., 2019)

## 6.2 SIMULACE ZATÍŽENÍ A ZKOUŠKY ZATÍŽENÍ NA MODELECH PROFILŮ

Pro zjištění tuhosti navržené konstrukce při zatížení vnějšími silami a pro prokázání dostatečné pevnosti se studie věnují také simulacím a zkouškám zaměřeným na zatížení za letu.

Při charakterizaci zatížení, působícího na profil, pak Wu et al. (2016) vychází z dat zjištěných programem XFOIL. Zatížení bylo rozděleno do 6 sil rovnoměrně rozložených podél jednotlivých oblastí spodní části profilu, jejichž hranice byly definovány podle polohy LUSM aktuátorů, jak znázorňuje obr. 45.



Obr. 45 Rozložení zatížení profilu v simulaci Wu et al. (2016)

Uvažovaným modelem byl profil s délkou tětiny 280 mm. Simulována byla tři různá zatížení, nejvyšší z nich odpovídalo celkovému zatížení profilu 250 N, na morfovateľnou část profilu tedy působilo 93 N. Studie uvádí jako ekvivalentní podmínky takovému zatížení součinitel vztlaku 1,5 a rychlost 111 m/s při bezpečnosti 1,5.

Vedle testů morfování se zkouškám zatížení modelů věnují také (Campanile a Sachau, 2022) ve studii morfovateľného profilu Belt Rib. Zkoušky navazovaly na simulaci zatížení pomocí metody konečných prvků. Splnění požadavků na tuhost konstrukce bylo prokázáno testem, v němž bylo zatížení za letu simulováno ocelovým závažím.

Další krok pak představovalo prokázání dostatečné pevnosti návrhu. Za tím účelem byl model zatížen ocelovým závažím celkové hmotnosti přibližně 335 kg, umístěným za zadní nosník. Také výsledky tohoto testu prokázaly splnění pevnostních požadavků tohoto návrhu (Campanile a Sachau, 2022).

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo představit doposud navržené způsoby morfování nosných ploch nebo jejich částí a porovnat je z hlediska nutných technologií.

V práci byly rozebrány rozdílné přístupy k řešení pohyblivé vnitřní konstrukce morfovateľného křídla, a to jak konzervativní přístup za použití kinematického mechanismu, tak také moderní přístup využívající poddajnosti vnitřní konstrukce křídla.

Dále byly popsány různé způsoby dosahování anizotropních vlastností potahu, které jsou klíčové k umožnění změny tvaru.

V následující části byla představena možná řešení pohonů morfování. Vedle konvenčních aktuátorů byly zmíněny také možnosti využití inovativních technologií, konkrétně Smart materiálů. Současně byla nastíněna také uváděná úskalí použití jednotlivých typů aktuátorů.

Práce se dále zabývá také možnostmi posunutí výkonnosti letadel díky použití morfovateľných nosných ploch, a to zvýšením poměru  $L/D$  ve velké oblasti úhlů náběhu. Prezentovány byly výsledky některých studií, a to jak ty získané teoretickou analýzou, tak i výsledky z měření v aerodynamickém tunelu.

Závěrečná část práce je věnována simulacím a zkouškám jednotlivých studií morfovateľných profilů, jejichž cílem je prokázat realizovatelnost navrženého konstrukčního řešení, a to schopnost měnit tvar profilu a současně plnit funkci nosné plochy křídla co se týká požadavků na tuhost a pevnost konstrukce.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

ACHLEITNER, Johannes, Kai ROHDE-BRANDENBURGER, Paul ROGALLA VON BIEBERSTEIN, Fabian STURM a Mirko HORNING. Aerodynamic Design of a Morphing Wing Sailplane. In: AIAA Aviation 2019 Forum [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, 2019-06-17, s. - [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-1-62410-589-0. Dostupné z: doi:10.2514/6.2019-2816

AJAJ, R. M., E. I. SAAVEDRA FLORES, M. I. FRISWELL a F. A. Diaz DE LA O. Span Morphing Using the Compliant Spar. Journal of Aerospace Engineering [online]. 2015, 28(4) [cit. 2022-05-19]. ISSN 0893-1321. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000442

ANDERSON, John D. Fundamentals of Aerodynamics. 6. New York: Library of Congress Cataloging-in Publication Data, 2017. ISBN 978-1-259-12991-9.

ARENA, Maurizio, Christof NAGEL, Rosario PECORA, Oliver SCHORSCH, Antonio CONCILIO a Ignazio DIMINO. Static and Dynamic Performance of a Morphing Trailing Edge Concept with High-Damping Elastomeric Skin. Aerospace [online]. 2019, 6(2) [cit. 2022-05-19]. ISSN 2226-4310. Dostupné z: doi:10.3390/aerospace6020022

BARBARINO, S., R. PECORA, L. LECCE, A. CONCILIO, S. AMEDURI a E. CALVI. A Novel SMA-based Concept for Airfoil Structural Morphing. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2009, 18(5-6), 696-705 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-009-9356-3

BARBARINO, Silvestro, Onur BILGEN, Rafic M. AJAJ, Michael I. FRISWELL a Daniel J. INMAN. A Review of Morphing Aircraft. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [online]. 2011, 22(9), 823-877 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X11414084

BILGEN, Onur, Kevin B. KOCHERSBERGER, Daniel J. INMAN a Osgar J. OHANIAN. Novel, Bidirectional, Variable-Camber Airfoil via Macro-Fiber Composite Actuators. Journal of Aircraft [online]. 2010, 47(1), 303-314 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0021-8669. Dostupné z: doi:10.2514/1.45452

BRAILOVSKI, V., P. TERRIAULT, T. GEORGES a D. COUTU. SMA actuators for morphing wings. Physics Procedia [online]. 2010, 10, 197-203 [cit. 2022-05-19]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.11.098

CAMPANILE, L. F. a D. SACHAU. The Belt-Rib Concept: A Structronic Approach to Variable Camber. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [online]. 2000, 11(3), 215-224 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1106/6H4B-HBW3-VDJ8-NB8A

CONCILIO, A., I. DIMINO a R. PECORA. SARISTU: Adaptive Trailing Edge Device (ATED) design process review. Chinese Journal of Aeronautics [online]. 2021, 34(7), 187-210 [cit. 2022-05-19]. ISSN 10009361. Dostupné z: doi:10.1016/j.cja.2020.08.036

COUTU, D., V. BRAILOVSKI, P. TERRIAULT a C. FISHER. Experimental validation of the 3D numerical model for an adaptive laminar wing with flexible extrados. In: Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure: ICAST-18th International Conference of Adaptive Structures and Technologies. Canada, 2007, s. 1-10. ISBN 9781605603476.

DAYYANI, Iman, Benjamin K. WOODS a Michael I. FRISWELL. The Design of a Corrugated Skin for the FishBAC Compliant Structure. In: 22nd AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014, 2014-01-13, s. - [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-1-62410-311-7. Dostupné z: doi:10.2514/6.2014-1121

DIACONU, Cezar G., Paul M. WEAVER a Filippo MATTIONI. Concepts for morphing airfoil sections using bi-stable laminated composite structures. Thin-Walled Structures [online]. 2008, 46(6), 689-701 [cit. 2022-05-19]. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2007.11.002

HANNAH, Mark O. Expanding wing for aeroplanes. United Kingdom. 389,987. Uděleno 1930. Zapsáno 1929.

KOTA, Sridhar a Joel A. HETRICK. Adaptive compliant wing and rotor system. USA. 10548053 7384016. Uděleno 2003. Zapsáno 2008.

KOTA, Sridhar, Eric H. ANDERSON, Joel A. HETRICK, Russell OSBORN, Donald PAUL, Edmund PENDLETON, Peter FLICK a Carl TILMANN. Design and application of compliant mechanisms for morphing aircraft structures [online]. In: 2003-8-12, s. 24- [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: doi:10.1117/12.483869

KOTA, Sridhar. Compliant systems using monolithic mechanisms. Smart Materials Bulletin [online]. 2001, 2001(3), 7-10 [cit. 2022-05-19]. ISSN 14713918. Dostupné z: doi:10.1016/S1471-3918(01)80002-2

MEGUID, S. A., Yu SU a Yue WANG. Complete morphing wing design using flexible-rib system. International Journal of Mechanics and Materials in Design [online]. 2017, 13(1), 159-171 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1569-1713. Dostupné z: doi:10.1007/s10999-015-9323-0

MONNER, Hans P., Janet M. SATER, Holger HANSELKA a Elmar J. BREITBACH. Development and design of flexible Fowler flaps for an adaptive wing [online]. In: . 1998-6-16, s. 60- [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: doi:10.1117/12.310673

MONNER, Hans, Markus KINTSCHER, T. LORKOWSKI a S, STORM. Design of a Smart Droop Nose as Leading Edge High Lift System for Transportation Aircrafts. In: 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference [online]. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009, 2009-05-04, s. - [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-1-60086-975-4. Dostupné z: doi:10.2514/6.2009-2128

NICOLAI, Leland M. a Grant E. CARICHER. Fundamentals of Aircraft and Airship Design [online]. Reston,VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010 [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-1-60086-751-4. Dostupné z: doi:10.2514/4.867538

OSBORN, Russel, Gregory ERVIN, Dragan MARIC, FLICK Peter., PAUL Donald. Mission Adaptive Compliant Wing – Design, Fabrication and Flight Test. In RTO Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Symposium (pp. 18-1). Air Force Research Laboratory [online]. Dayton, O.H. USA, 2009 April, 1-18 [cit. 2022-05-19]. ISSN NATO OTAN.

PINKERTON, Jennifer L. a Robert W. MOSES. A Feasibility Study to Control Airfoil Shape Using THUNDER. Hampton, Virginia: Langley Resarch Center, 1997. ISBN 23681-2199.

REINISCH, Joseph. Synthesis of Compliant Mechanisms for Morphing Wings with Nonlinear Topology Optimization [online]. In: 2018 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.14565.52963

RUDOLPH, Peter K. C. High-Lift Systems on Commercial Subsonic Airliners. ASA Contractor Report 4746: NASA [online]. 1996, 1-166 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960052267/downloads/19960052267.pdf>

SMITH, John W., Wilton P. LOCK a Gordon A. PAYNE. Variable-camber systems integration and operational performance of the AFTI/F-111 mission adaptive wing. NASA technical memorandum [online]. Washington DC., 1992 [cit. 2022-05-19].

STATKUS, Frank D. Continuous skin variable camber airfoil edge actuating mechanism. United Kingdom. 142,121. Zapsáno 1980.

SUN, Jian, Qinghua GUAN, Yanju LIU a Jinsong LENG. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [online]. 2016, 27(17), 2289-2312 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X16629569

THORNTON, Steohen V. Reduction of Structural Loads Using Maneuver Load Control on the Advanced Fighter Technology Integration (AFTI)/F-111 Mission Adaptive Wing. NASA Technical Memorandum 4526 [online]. Dryden Flight Research Facility Edwards, California: National Aeronautics and Space Administration, 1993 [cit. 2022-05-19].

VASISTA, Srinivas, Johannes RIEMENSCHNEIDER, Ralf KEIMER, Hans Peter MONNER,

Felix NOLTE a Peter HORST. Morphing Wing Droop Nose with Large Deformation: Ground Tests and Lessons Learned. *Aerospace* [online]. 2019, 6(10) [cit. 2022-05-19]. ISSN 2226-4310. Dostupné z: doi:10.3390/aerospace6100111

WALKER, James. *Elastomer Engineering Guide: Introduction to elastomer engineering*. England, 2017.

WANG, Donny P., Jonathan D. BARTELY-CHO, Christopher A. MARTIN a Brian J. HALLAM. Development of high-rate large-deflection hingeless trailing-edge control surface for the Smart Wing wind tunnel model. *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies: Smart Structures and Materials 2001* [online]. 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.429682>

WOODS, Benjamin King Sutton a Michael I. FRISWELL. Preliminary Investigation of a Fishbone Active Camber Concept. In: *Volume 2: Mechanics and Behavior of Active Materials; Integrated System Design and Implementation; Bio-Inspired Materials and Systems; Energy Harvesting* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 2012-09-19, s. 555-563 [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-0-7918-4510-3. Dostupné z: doi:10.1115/SMASIS2012-8058

WOODS, Benjamin KS, Onur BILGEN a Michael I FRISWELL. Wind tunnel testing of the fish bone active camber morphing concept. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2014, 25(7), 772-785 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X14521700

WU, R., C. SOUTIS, S. ZHONG a A. FILIPPONE. A morphing aerofoil with highly controllable aerodynamic performance. *The Aeronautical Journal* [online]. 2017, 121(1235), 54-72 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0001-9240. Dostupné z: doi:10.1017/aer.2016.113

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

### Zkratka

### Vysvětlení

AFTI	Advanced Fighter Technology Integration
$C_L$	Součinitel vztlaku
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
EMC	Elastomeric Matrix Composite
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
LUSM	Linear ultrasonic motor
L/D	Poměr vztlaku ku odporu
SMA	Shape memory alloy