

## VÝVOJ KŘIDÉLKA PRO AERO L-39NG

Robin Poul\*, Pavel Henzl\*\*, Ondřej Uher\*

\**Compo Tech PLUS, spol. s r.o., Nová 1316, Sušice*

\*\**AERO Vodochody AEROSPACE a.s., U Letiště 374, Odolena Voda*

### Abstrakt

Príspevek prezentuje vývoj kompozitního křídélka letounu L-39NG. V první části je popsán samotný díl, jeho funkce a specifický způsob zatížení, který byl zohledněn při konstrukci. Dále je představen způsob návrhu kompozitního řešení zahrnujícího statickou a modální konečně-prvkovou analýzu a aplikaci pevnostních kritérií. Křídélko je vyráběno technologií vláknového navíjení s osovým kladením vláken, která je zde také představena. Pro účely ověření výpočtů a certifikaci křídélka byly zákazníkem realizovány statické a únavové zkoušky a zkoušky odolnosti proti impaktu.

### 1. Úvod

Předmětem tohoto příspěvku je vývoj kompozitního křídélka letounu L-39NG ve spolupráci firem AERO Vodochody AEROSPACE a.s. a Compo Tech PLUS, spol. s r.o. (dále také i jen CompoTech).

Křídélko (angl. aileron) je aerodynamická řídicí plocha umístěná na křídle co nejdále od podélné osy letadla. Zabezpečuje příčnou říditelnost a při vychýlení způsobuje klonění letadla.

V rámci modernizace letounu L-39 na L-39NG firmy AERO Vodochody AEROSPACE a.s. (dále také i jen AERO) bylo letadlo přestavováno tak, aby vyhovělo současným požadavkům na lehký bitevník a cvičný proudový letoun. Tato modernizace se dotkla i křídélka, které bylo u původního letounu tvořeno nýtovanou strukturou z hliníkové slitiny. Hlavní motivací pro přechod na integrální kompozitní (hybridní) strukturu bylo snížení poruchovosti zlepšením statické a únavové pevnosti a snížení hmotnosti křídla. Dalšími uvažovanými přínosy jsou lepší tvarová stálost a zlepšení konzistence mechanických vlastností v souvislosti s automatickou výrobní technologií.

Křídélko má lichoběžníkový půdorys a v příčném řezu má tvar symetrického aerodynamického profilu. Jeho základní rozměry jsou:

délka = 1445 mm,

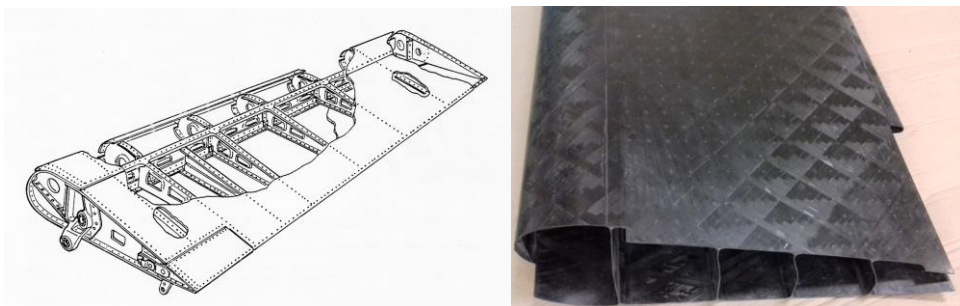
šířka u špičky = 501 mm,

šířka u kořene = 662 mm a

tloušťka = 139 mm.

---

\* tel. +420 602 688 020, e-mail: robin@compotech.com



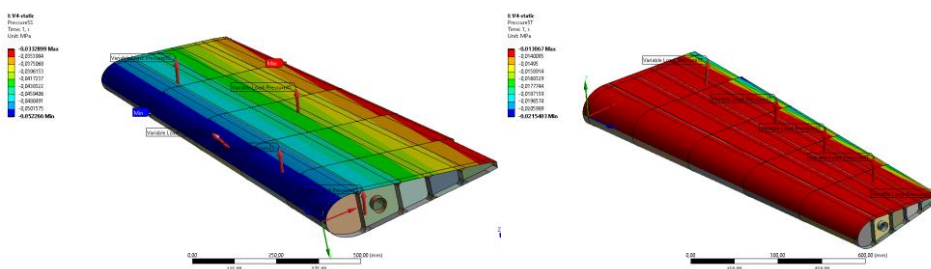
Obr. 1. Hliníkové nýtované křídélko L-39 (vlevo) (zdroj: AERO) a kompozitní skořepina L-39NG (vpravo) (zdroj: CompoTech).

## 2. Zatížení a uložení křídélka

Křídélko je uloženo na dvou čepích dovolujících jeho natáčení a pomocí páky v blízkosti vnitřního čepu je do křídélka přes hliníkové příčné žebro zaváděn krouticí moment. Touto pákou je realizována výchylka křídélka.

Křídélko je zatěžováno aerodynamickými silami. Na jeho potah (vnější skořepinu) působí tlakové zatížení (podtlak / přetlak) v závislosti na lokálních rychlostech a vlastnostech obtékajícího vzduchu.

Dominantním zatěžovacím případem, který byl definován zákazníkem a uvažován při návrhu, je podtlak současně na horní a spodní straně křídélka. K tomuto typu zatížení dochází při letu ve vysokých podzvukových rychlostech při vypuštění rakety a lokálním překročení rychlosti zvuku. Hodnoty podtlaku na horní a spodní straně jsou rozdílné a tím vyvozují i ohybový moment.



Obr. 2. Modelovaný průběh tlaků na sací (vlevo) a tlakové (vpravo) straně křídélka.

Uvedený způsob zatížení v minulosti několikrát vedl k roztržení potahů nýtovaného křídélka na jeho horní a spodní straně. Vyvinuté nové integrální kompozitní křídélko je vůči tomuto druhu poškození odolné.

Dalším, pro účely zkoušek těžko definovatelným způsobem zatížení, jsou případy vyplývající z manipulace při instalaci a seřizování křídélka a údržbě letounu.

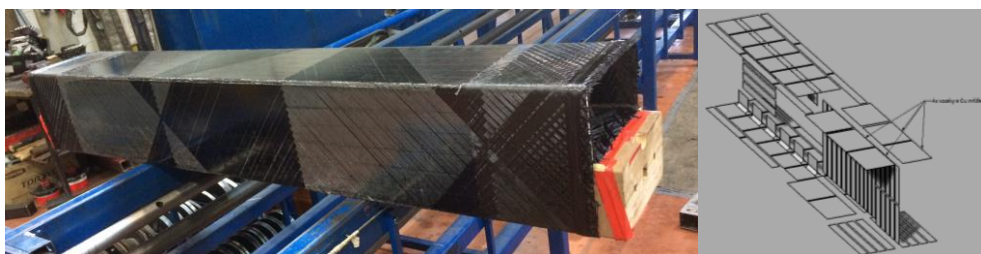
### 3. Způsob testování křídélka

Praktické ověření předběžných výpočtů probíhalo způsobem běžným v letectví a u výrobců kompozitních dílů, tj. od méně komplexních vzorků (kuponů) ověřujících základní mechanické vlastnosti materiálu a uvažovaných skladeb vrstev, přes testování dílčích detailů konstrukce jako jsou v našem případě např. spoje mezi potahem a podélným žebrem nebo nýtový spoj mezi kompozitní dutinou a příčným žebrem, přes zkoušku dílčího celku – křídélka (statická a únavová zkouška) až po zkoušky celého letounu. Přístup je naznačen na obrázku 3.



Obr. 3. Typy vzorků a zkoušek.

Pro zkoušky kuponů, detailů a částečně i podsestav byly vyrobeny specifické vzorky. Zkoušky sestav byly prováděny na prototypch kompozitních skořepin vyrobených stejným postupem jako sériové kusy. Příklad polotovaru pro zkušební vzorky a jejich rozvržení je na obrázku 4. Rozměry nosníků pro výrobu vzorků jsou 360 x 360 x 1500 mm. Vzorky podle rozměrů a účelu jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 4. Nosník pro výrobu vzorků a jejich rozvržení (zdroj: CompoTech).

Tab. 1. Rozpis vzorků.

Typ vzorku	Skladba	Rozměr [mm]	Počet [ks] / 1500 [mm]	Počet [ks] / 360 [mm]	
Únosnost Spoje	HL20-6_1_jednoduche	LS-T2-main	30x130	10	10
	HL20-6_2_jednoduche	LS-T1-T4-ribs	30x130	10	10
	HL20-6_3_jednoduche	LS-T1,T3,T4-main	30x130	10	10
	HL20-6_4_jednorade	LS-T2-main	30x250	7	5
	HL20-6_5_jednorade	LS-T1-T4-ribs	30x250	7	5
	HL20-6_6_jednorade	LS-T1,T3,T4-main	30x250	7	5
Materiálové charakteristiky	LS-T2-main_0	LS-T2-main	25x250	5	-
	LS-T2-main_90	LS-T2-main	25x250	5	-
	LS-T1-T4-ribs_0	LS-T1-T4-ribs	25x250	5	-
	LS-T1-T4-ribs_90	LS-T1-T4-ribs	25x250	5	-
	LS-T1,T3,T4-main_0	LS-T1,T3,T4-main	25x250	5	-
	LS-T1,T3,T4-main_90	LS-T1,T3,T4-main	25x250	5	-
Impaktní odolnost	Impact	LS-T2-main + LS-T1,T3,T4-main	150x100	12T+13+13	4
Zavedení síl	Odrtržení	-	290x290x80	3	-
Elektrická odolnost	Cu	LS-T2-main + LS-T1,T3,T4-main	150x100	4	-

Zkoušky byly realizovány ve firmách AERO Vodochody AEROSPACE a.s. a VÝZKUMNÝ A ZKUŠEBNÍ LETECKÝ ÚSTAV, a. s.

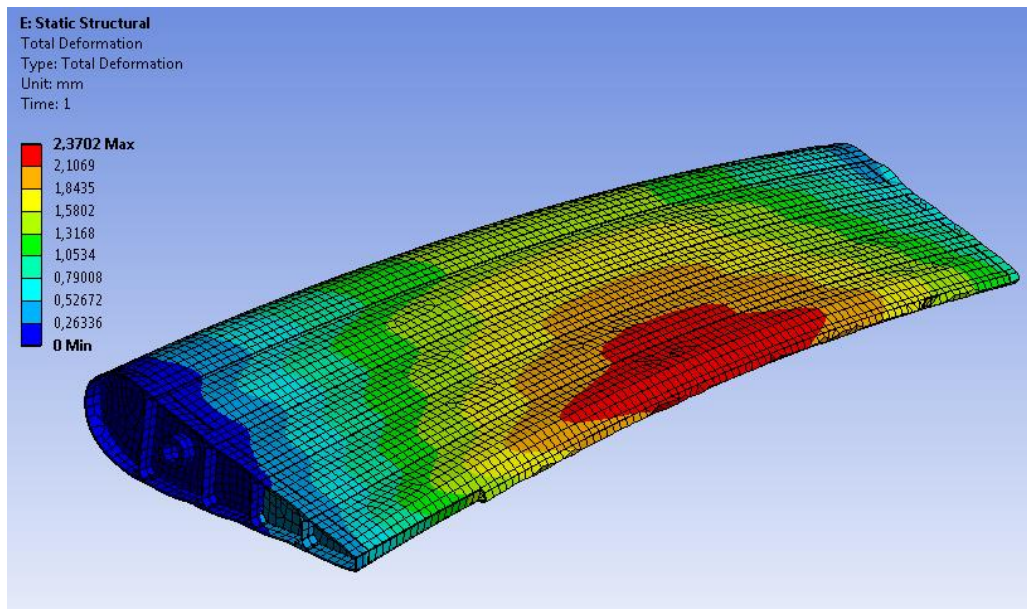
#### 4. Výpočty křídélka metodou konečných prvků

K výpočtům deformací, pevností a vlastních tvarů a frekvencí křídélka byl ve firmě CompoTech využit software Ansys. Tyto výpočty sloužily pro účely ověření konstrukce vnitřní struktury křídélka a skladbu jednotlivých sekcí kompozitní skořepiny. Firma AERO následně provedla vlastní výpočet finálního křídélka pro účely certifikace. V tomto článku jsou zmíněny pouze výsledky prvně jmenovaných výpočtů.

Model křídélka se skládá z několika základních prvků. Těmi jsou:

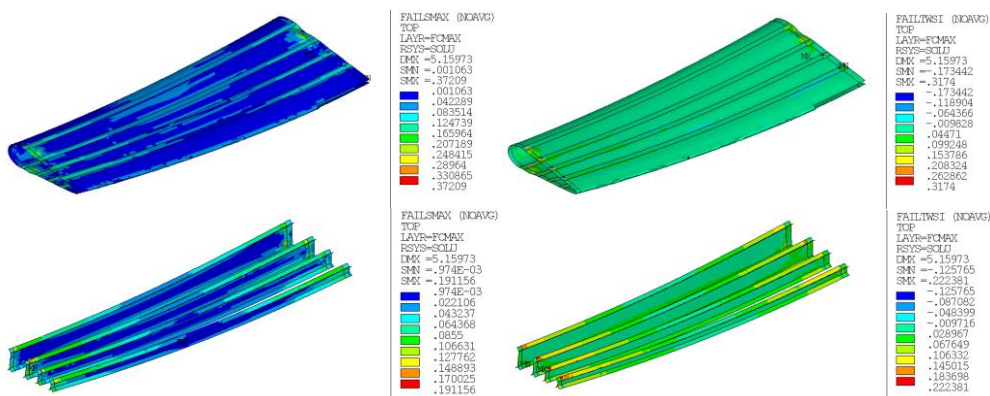
- potah křídélka modelovaný jako kompozitní skořepina pomocí kvadratických skořepinových prvků. Tento potah je rozdělen na:
  - část bez podélně orientovaných vláken,
  - část s podélně orientovanými vlákny umístěnými nad dutinou 2,
- podélná žebra modelovaná jako kompozitní skořepina pomocí kvadratických skořepinových prvků,
- spoje potahu a podélného žebra obsahující výplňovou pěnu,
- příčná žebra z hliníkové slitiny modelovaná jako skořepina s izotropními mechanickými vlastnostmi.

Pro výpočet statické deformace a pevnosti bylo křídélko zatíženo způsobem uvedeným v kapitole 2. Pro modální analýzu pak bylo pouze uloženo v čepech.



Obr. 5. Deformace křídélka zatíženého tlakem podle obrázku 2.

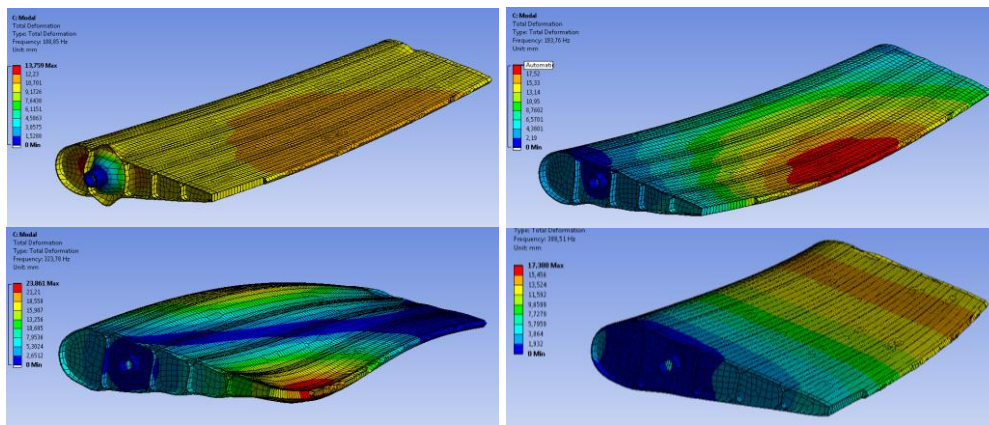
Pevnost skořepiny křídélka byla vyhodnocována podle pevnostního kritéria maximálního napětí a kritéria Tsai-Wu. Kritéria indikují poruchu, je-li jejich hodnota vyšší nebo rovna 1. Hodnoty kritérií pro celý laminát jsou na obrázku 6.



Obr. 6. Hodnoty pevnostních kritérií maximálního napětí (vlevo) a Tsai-Wu (vpravo) pro potah (nahore) a podélná žebra (dole).

Modální analýza křídélka byla provedena za účelem zjištění vlastních frekvencí a jejich tvarů. Nejnižší vlastní frekvence představuje podélné kmitání křídélka v ose čepů a má hodnotu 188,9 Hz. Následuje první a druhý ohybový mód ve směru nižší tuhosti s hodnotami 194 a 324 Hz. Čtvrtou vlastní frekvencí je pak první ohybový mód ve směru vyšší tuhosti s hodnotou 388 Hz.

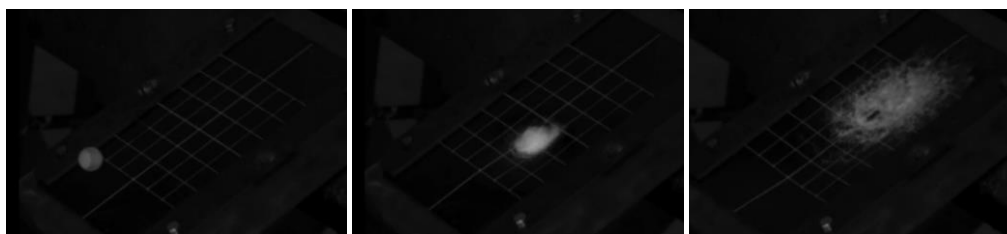




Obr. 7. První čtyři vlastní frekvence křídélka uloženého v čepích.

## 5. Vybrané zkoušky křídélka

Jednou ze zkoušek je odolnost skořepiny vůči dopadu cizího tělesa, v tomto případě kroupy. Kroupa o definovaných parametrech je vystřelena proti skořepině části křídélka. Následně je vyhodnoceno poškození kompozitu metodami NDT.



Obr. 8. Fáze dopadu kroupy zaznamenané vysokorychlostní kamerou (zdroj: AERO).

Na prvním prototypu křídélka byla provedena pevnostní statická zkouška. Zatížení opět odpovídalo zatěžovacímu případu definovanému v kapitole 2, tedy podtlaku na obou stranách křídélka.

Tlakové zatížení bylo pro účel měření nahrazeno sítí izolovaných sil o odpovídající velikosti distribuovaných po obou stranách křídélka pomocí textilních pásů nalepených na jeho povrch. Správný poměr sil působících na tyto pásy zajišťoval systém vahadel s vhodně nastavenými délkami ramen. Zatížení těchto vahadel pak bylo provedeno pomocí dvou protilehlých hydraulických válců. Na obrázcích 9. a 10. je uspořádání zkoušky a způsob poruchy.



Obr. 9. Uspořádání statické zkoušky (zdroj: AERO).



Obr. 10. Detaily poruchy křídélka (zdroj: AERO).

K poruše došlo při 145% návrhového početního zatížení křídélka. První poruchou bylo vytržení vnitřního příčného žebra druhé komory, přes které je do konstrukce zaváděn krouticí moment.

Obdobným způsobem proběhla i únavová zkouška, která byla realizována na druhém prototypu. Úspěšné provedení únavové zkoušky a hlavně certifikačního procesu z hlediska průkazu únavové životnosti kompozitního kormidla byla velká výzva a nakonec jeden z nevýznamnějších přínosů z inženýrského pohledu. Křídélko je součástí draku, kterou je nutné řadit do kategorie PSE (Principal Structure Element). Kontext významnosti kompozitního prvku

PSE se okamžitě ozřejmí, pokud vezmeme v úvahu filosofii konstrukce letounu, na kterém je takový konstrukční prvek použit. Letoun L-39NG je z pohledu Airworthiness vyvíjen a prokazován podle zásad filozofie únavového průkazu SL (Safe Life, tj. „bezpečného života“). To znamená, že na žádném z prvků PSE (v historických pramenech známé jako primární konstrukce) nesmí být za provozu přítomna jakékoliv vada či poškození typu trhliny a to bez ohledu na to zda jde o iniciační zárodečné stadium poruchy, fáze jejího šíření a už vůbec ne dosažení kritické velikosti trhliny. Jakákoliv kompozitní konstrukce je ovšem plná nejrůznějších diskontinuit, které lze považovat za možné iniciátory trhlin a prokazování takových konstrukčních PSE prvků je nutné provádět v souladu se zásadami DT (Damage Tolerant), což ale nutně vede na průkaz podle filozofie FS (Fail Safe, tj. „bezpečný při poruše“). Nyní jasně vyplývá zásadní nesoulad únavového průkazu celku letounu podle filozofie „bezpečného života“, když na některém z prvků PSE je nutné pracovat s detekovatelnými iniciátory trhlin a to od samého počátku provozu ihned po výrobě. Tou průkazovou výzvou bylo právě nalezení takového principu prokazování, který by umožnil průkaz letounu dle SL s prvkem DT. Do zkušebního kusu únavové zkoušky, tj. do druhého prototypu křídélka byly již při výrobě řízeně zaneseny umělé vady, které byly přesně zdokumentovány a v průběhu prvních dvou etap zkoušky i monitorovány pomocí NDT. Po úspěšném absolvování těchto dvou etap, kde nebylo zaznamenáno šíření vad, bylo přistoupeno k zavedení dalšího poškození pomocí impaktů. Zkouška pokračovala dalšími dvěma etapami včetně NDT kontrol. Žádná z vad se v průběhu zkoušky nešířila a křídélko splnilo všechny požadavky únavové zkoušky pro certifikaci. Právě úspěšné výsledky s průkazem „nešíření“ vady jsou tou cestou, která umožnila vyhovět oběma filozofiím konstrukce a průkazu letounu.

## 6. Technologie výroby kompozitní skořepiny křídélka

Kompozitní skořepina křídélka je vyráběna firmou CompoTech vlastní technologií RAFL (robot assisted fibre laying), která je odvozena od vláknového navíjení, ale dovoluje kladení vláken i v podélném směru a díky robotickému rameni umožňuje rovněž přesné umístění vláken i na tvarově složité výrobky.

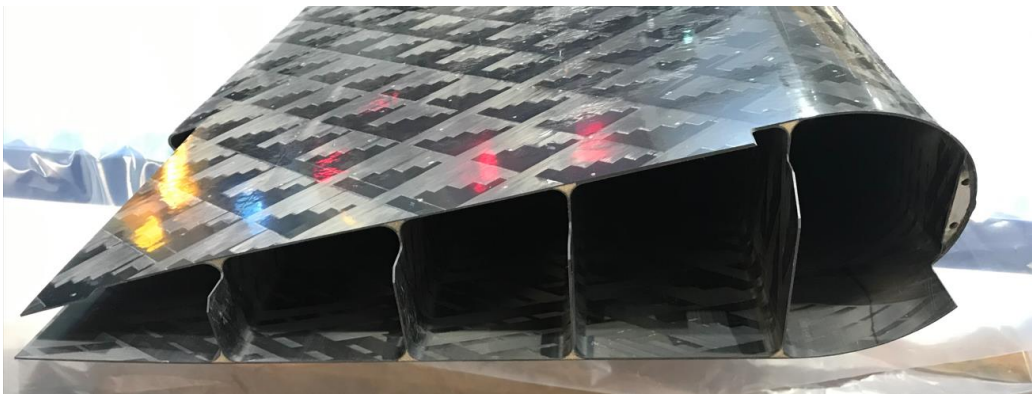
Výchozím materiálem pro výrobu skořepiny je uhlíkové vlákno s leteckým certifikátem vlastností použité ve formě pramence a epoxidová pryskyřice, kterou je vlákno v průběhu kladení impregnováno. Takto prosycené vlákno je postupně navinuto/nakladeno na 5 hliníkových navíjecích trnů, který každý vytváří příslušnou dutinu v křídélku. Po ovinutí všech pěti trnů je celá skořepina křídélka sestavena. Je připevněno závaží v náběžné hraně a budoucí spoje potahu a podélných žeber jsou vyplněny obrobenou strukturální pěnou. Na tuto sestavu jsou v místě druhé dutiny položena podélná vlákna pro zajištění ohybové tuhosti a pevnosti a následně je celá skořepina ovinuta vnějšími vrstvami kompozitu. Jak vnitřní, tak vnější vrstvy se vytvrzují současně (co-curing), což vede k výborné pevnosti a strukturální integritě dílu.

Po navinutí je materiál konsolidován pomocí současného působení vakua a vnějšího tlaku ve formě a pneumatickém lisu a vytvrzen za pokojové teploty. Zvýšení mechanických vlastností je dosaženo dotvrzením za zvýšené teploty v peci s řízenou teplotní křivkou.





Obr. 11. Navíjecí / kladeč stroj (nahore) a křídélko po navinutí (dole). (zdroj: CompoTech).



Obr. 12. Vnitřní konec kompozitní skořepiny křídélka po obrobení. (zdroj: CompoTech)

## 7. Závěr

Nově vyvinutá křídélka byla úspěšně certifikována pro použití na letounu L-39NG a probíhá jejich sériová výroba. Řešení kompozitní konstrukce bylo oceněno udělením ceny JEC Award 2019.

## Literatura

- [1] Interní technické zprávy CompoTech a AERO.
- [2] <https://ansyshelp.ansys.com>, Theory Reference.