

Analýza kompozitových nosníků s průřezem tvaru omega

Petr David^{1,*}, Zdeněk Padovec¹, Tereza Zámečnicková¹, Radek Sedláček¹, Josef Křena²

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

² LATECOERE Czech Republic s.r.o., Beranových 65, Praha 9 – Letňany, 199 02, Czech Republic

Abstrakt

Cílem této práce je nalézt alternativu ke stávající verzi kompozitového nosníku, který má průřez tvaru řeckého písmena omega, nacházející se v sestavě dveří letadla. Hlavní částí této práce je použití softwaru, využívajícího metody konečných prvků k vyřešení této úlohy. Nejdříve bude vyřešena duralová verze, která bude sloužit jako kalibrační, poté bude tento model převeden na kompozitový, za použití dvou různých přístupů. Výsledky těchto metod budou pro jednotlivé upravené geometrie nosníků porovnány. Výpočet se bude skládat jak z výpočtu statického zatížení, tak z analýzy ztráty stability.

Klíčová slova: Kompozit; Kompozitový nosník; Nosník tvaru omega; Ztráta stability; Metoda konečných prvků

1. Úvod

V této práci se soustředíme na analýzu nosníku tvaru omega, který vyztužuje dveře letadla. Původní nosník by měl být nahrazen lepší variantou s upravenou geometrií, za účelem snížení celkových posuvů v sestavě dveří. Dva přístupy k modelování kompozitů jsou předvedeny (model s homogenizovanými vlastnostmi a model tvořený skutečnými vrstvami kompozitu) a porovnány. Všechny výpočty jsou provedeny pro všechny varianty geometrie, za použití výpočtového softwaru, používajícího metodu konečných prvků Abaqus [1].

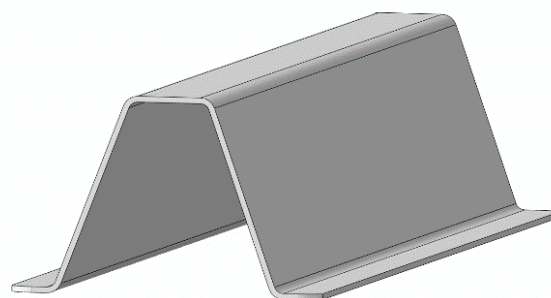
Výsledný kompozit se v tomto případě skládá z tkaniny, obsahující uhlíková vlákna v matrici z polyfenylsulfidu, a to s 5H atlasovou vazbou. Tento laminát se bude skládat z deseti vrstev této tkaniny v konfiguraci $[[[(0,90)/(\pm 45)]_2/(0,90)]_s$. S tloušťkou jedné vrstvy 0,31 mm se pak tloušťka kompletního kompozitu dostane na 3,1 mm. Mechanické vlastnosti duralu a kompozitu jsou uvedeny v tabulce 1 [2].

Tabulka 1. Mechanické vlastnosti duralu a kompozitu [2]

	C/PPS 5H atlas – homogen.	C/PPS 5H atlas – 1 vrstva	Dural
$E_x = E_y$ [MPa]	47 427	58 000	73 000
E_z [MPa]	11 000	-	73 000
G_{xy} [MPa]	15 166	4 100	27 443
$G_{xz} = G_{yz}$ [MPa]	4 000	4 100	27 443
ν_{xy} [-]	0,26379	0,046	0,33
$\nu_{yz} = \nu_{xz}$ [-]	0,26379	-	0,33

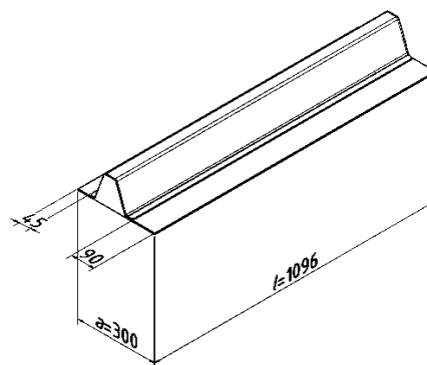
2. Tvorba modelu

Z globální sestavy dveří byl vybrán nejvíce namáhaný nosník, jehož model je vidět na Obrázku 1.



Obrázek 1. Nosník s průřezem omega

Výpočtová oblast byla zredukována na výřez potahu s nosníkem, jak je patrné na Obrázku 2.

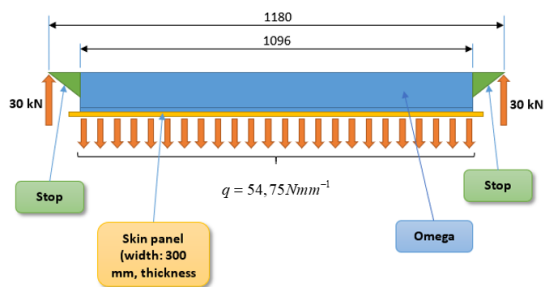


Obrázek 2. Počítaná sestava

Zatížení použité v modelu bylo spočítáno na základě znalosti velikosti reakčních sil v podpůrných nosnicích připojených k omeze. Schéma zatížení je vidět na Obrázku

* Kontakt na autora: Petr.David@fs.cvut.cz

3. Podpůrné nosníky, v nichž byla známa reakce jsou na též obrázku vyznačeny zeleně jako „Stop“.



Obrázek 3. Schéma zatížení

Reakční síly v podpůrných nosnících byly převedeny na tlak na potah dveří, za použití známých rozměrů těles vyskytujících se v sestavě, podle následujících vzorců:

$$q = \frac{2 \cdot F_R}{l} = \frac{2 \cdot 30\,000}{1096} = 54,75 \text{ Nmm}^{-1} \quad (1)$$

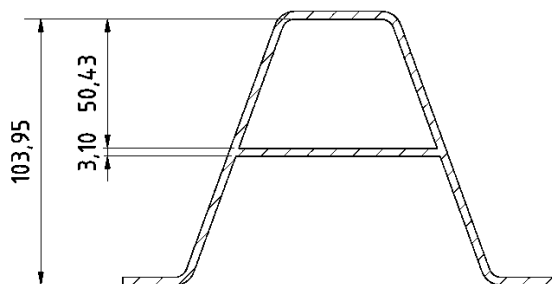
$$p = \frac{q}{a} = \frac{54,75}{300} = 0,182 \text{ Nmm}^{-2}, \quad (2)$$

kde F_R [N] je reakční síla v podpůrných nosnících, l [mm] je délka nosníku omega, q [Nmm⁻¹] je spojité zatížení, a [mm] je šířka potahu dveří a p [MPa] je vnitřní přetlak kabiny, zatěžující trup letadla.

Zátěžné síly a okrajové podmínky uložení byly vytvořeny, model byl vysítován a poté se mohlo začít s výpočtem.

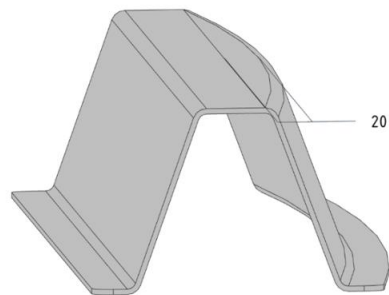
2.1. Úprava geometrie

Následující varianty geometrie byly podrobeny analýze. Nejprve tedy máme původní prizmatickou omegu (viz Obrázek 1), poté byla k této omeze přidána horizontální příčka (Obrázek 4 – varianta „A“).



Obrázek 4. Varianta „A“

Dále bylo provedeno zakřivení jedné ze stojin omegy podle Obrázku 5, a nakonec podobně jako u prizmatické verze byla i zde přidána horizontální příčka.

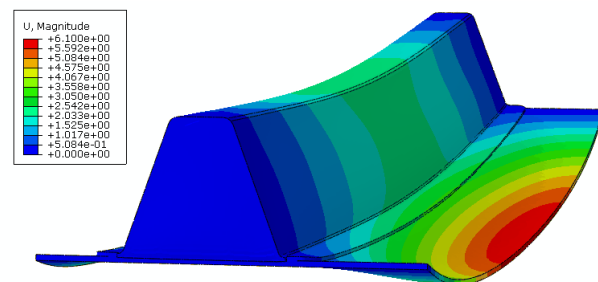


Obrázek 5. Neprizmatická omega

3. Výsledky

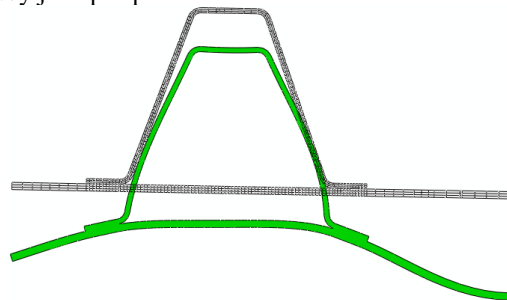
3.1. Analýza napětí a deformací

Nejprve byla vyhodnocena isotropaní duralová varianta, na které jsme ověřili správnost modelu. Po zavedení zátěžného tlaku se sestava deformuje podle Obrázku 6. Maximální průhyb 6,1 mm se nachází přesně mezi dvěma omegami v globální sestavě.



Obrázek 6. Deformace duralové omegy

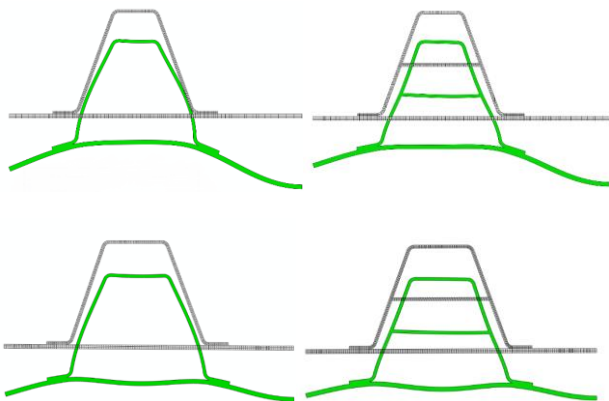
Profil se deformuje podle Obrázku 7, zde je profil porovnán před a po deformaci, a to uprostřed omegy. Všechny posuvy jsou pro přehlednost vizuálně desetkrát zvětšeny.



Obrázek 7. Profil před a po deformaci

Po dokončení kovové verze jsme přešli na zkoumání různých kompozitových variant. Sestavy všech variant se deformují podobně jako v případě duralové verze, s jediným rozdílem, a tím jsou hodnoty posuvů. Jelikož se deformace sestav podobají, lepší přehled o tom co se s omegou děje získáme, když se zaměříme na průřez nosníku. Porovnání zdeformovaných průřezů uprostřed omegy je vidět na Obrázku 8, kde vlevo nahoře je rovná kompozitová omega, vpravo od ní je varianta s příčkou, dále v dolní

řadě vlevo je neprizmatická varianta omegy a jako poslední zůstává neprizmatická omega ve variantě „A“.

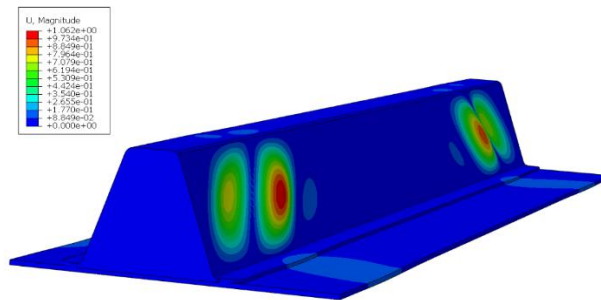
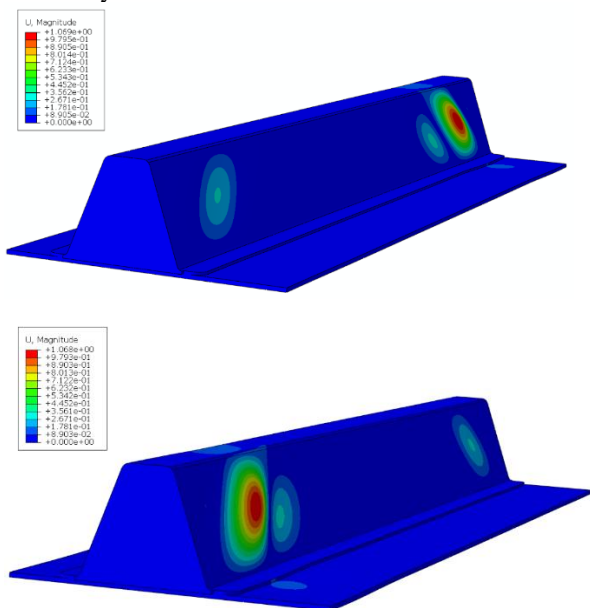


Obrázek 8. Profily všech 4 variant geometrií v porovnání

Jak si můžeme povšimnout, přidání horizontální příčky do omegy má za následek značné zlepšení integrity a příčka tedy pomáhá odolávat ohýbání stojin. Toto je nejlépe viditelné v Obrázku 8 vpravo dole, kde samotná omega zůstává i po aplikaci zatížení téměř nedeformovaná. Jelikož horizontální příčka pomáhá držet profil, její přidání pozitivně ovlivní hodnoty maximálního průhybu v sestavě. Hodnoty průhybů pro jednotlivé varianty jsou shrnuty v Tabulce 2.

3.2. Analýza ztráty stability

Protože je tloušťka omegy s 3,1 mm velmi malá v porovnání s ostatními rozměry nosníku, byla provedena analýza ztráty stability, aby se zjistilo, jestli je omega v tomto rozložení náchylná na utrátu stability po aplikaci zatížení. Byly tedy provedeny výpočty prvních tří vlastních čísel s korespondujícími vlastními tvary pro všechny druhy geometrií. Výsledky pro rovnou kompozitní omegu jsou zobrazeny na Obrázku 9.



Obrázek 9. První (nahore), druhý (uprostřed) a třetí vlastní tvar ztráty stability u rovné kompozitní omegy

Zobrazeny jsou všechny tři počítané vlastní tvary, nicméně nejdůležitější z těchto tří je hned ten první, jelikož to je ten, ke kterému by došlo při nejmenším zátěžném tlaku. Vlastní číslo tohoto vlastního tvaru je $-0,7797$ MPa, což nám říká dvě věci. Zaprvé, mínus před číslem znamená, že jediný způsob, jak tohoto tvaru dosáhnout, je pouze při zatížení opačným směrem. Zadruhé, i kdyby námi uvažované zatížení bylo zavedeno tímto opačným směrem, při hodnotě $-0,182$ MPa se nacházíme u hodnot koeficientu bezpečnosti kolem 4,284, což je při uvažování ztráty stability na místě. Bezpečnost byla spočítána následujícím způsobem:

$$k = \frac{p_1}{p} = \frac{0,7797}{0,182} = 4,284 [-] \quad (3)$$

kde k je koeficient bezpečnosti, p_1 je první vlastní číslo a p je tlak, kterým zatěžujeme sestavu [3]. Vlastní čísla pro ostatní geometrie jsou opět shrnuta v Tabulce 2.

4. Závěr

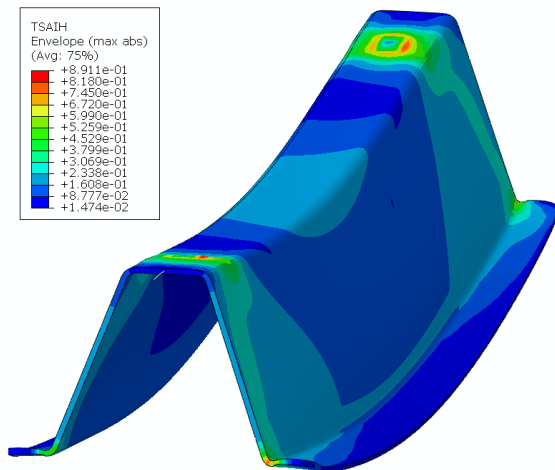
Při počítání různých variant této omegy nejprve dostaneme maximální průhyb 7,2 mm pro rovnou omegu bez příčky. Můžeme dosáhnout lepších výsledků po zavedení varianty „A“, kde pomocí příčky zredukujeme největší průhyb vyskytující se v sestavě na 6,7 mm. Ještě lepších výsledků dosáhneme po zakřivení jedné ze stojin podle Obrázku 5. Průhyb je snížen na zhruba 5,2 mm, což je výsledek ještě lepší než v případě duralové varianty. Opět jsme schopni snížit maximální průhyb přidáním horizontální příčky, a to konkrétně na hodnoty pohybující se kolem 5 mm.

Co se týče ztráty stability, sestava by měla odolávat ztrátě stability ve všech variantách, a to s dostatečnou bezpečností.

Celkově vzato, zatímco ostatní varianty mohou postačit, neprizmatická omega s příčkou jednoznačně stojí nad ostatními variantami se svou schopností, jak odolat ztrátě stability, tak snížit maximální průhyb v sestavě na 5 mm. Její profil se téměř nedeformuje, jak ukazuje Obrázek 8 a takovýto nosník by pravděpodobně unesl zatížení mnohem větší, než na jaké byl počítán.

Všechny zkoumané varianty byly také kontrolovány na porušení s použitím kritérií maximálního napětí, Tsai –

Hill, Tsai – Wu a Azzi – Tsai – Hill. Všechny verze prošly touto kontrolou. Na Obrázku 10 je pro představu zobrazeno kritérium porušení Tsai – Hill na prizmatické omeze bez příčky, které konkrétně pro tuto geometrii vycházelo nejhůře ze zmíněných kritérií, v některých místech až 0,8911. K poruše by dle tohoto kritéria mohlo dojít až při překročení 1, čili můžeme označit tuto konstrukci za bezpečnou.



Obrázek 10. Kritérium porušení Tsai – Hill pro prizmatickou omegu bez příčky

Výpočty byly provedeny za použití dvou různých přístupů modelování kompozitů. Největší rozdíl mezi nimi nastal při výpočtu průhybu neprizmatické omegy s příčkou, kde se maximální deformace lišily o 1,73 %. Co se týče ztráty stability, největší rozdíl se objevil při výpočtu neprizmatické omegy bez příčky, kde rozdíl mezi prvními vlastními čísly činil 3,9 %.

Tabulka 2. Shrnutí a porovnání výsledků

Model (R – rovná stojina, K - křivá)	Maximální průhyb [mm]	Hmotnost [kg]	První vlastní číslo [MPa]
R-dural	6,1	2,93	-0,95252
R-s homogenizovanými vl.	7,287	1,7	-0,7797
R-vrstvený	7,377	1,7	-0,80263
R- varianta „A“ (homog. vl.)	6,720	2,13	-0,93041
R- varianta „A“ (vrstvená.)	6,775	2,13	-0,94142
K-s homogenizovanými vl.	5,268	1,77	-0,85868
K-vrstvený	5,207	1,77	-0,82486
K- varianta „A“ (homog. vl.)	4,916	2,27	-0,95929
K - varianta „A“ (vrstvená.)	5,003	2,27	-0,98519

Poděkování

Tato práce byla podpořena projektem FV30033 Ministerstva průmyslu a obchodu České Republiky a grantem číslo SGS18/175/OHK2/3T/12 studentské grantové soutěže Českého Vysokého Učení Technického v Praze

Seznam symbolů

- a šířka potahu dveří [mm]
- F_R reakční síla v podpůrných nosnicích [N]
- k koeficient bezpečnosti [-]
- l délka nosníku omega [mm]
- p vnitřní přetlak kabiny [MPa]
- p_1 první vlastní číslo [-]
- q spojité zatížení [Nmm⁻¹]

Literatura

- [1] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. Vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 9788070436899
- [2] AEROSPACE COMPOSITES Datasheet TenCate Cetex® PPS: Product type: PPS Thermoplastic Resin System (Polyphenylene Sulfide). Aircraft interiors expo [online]. cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.aircraftinteriorsexpo.com/novadocuments/8392?v=634671502121130000>
- [3] Abaqus analysis user's manual: Eigenvalue buckling prediction. <https://www.sharcnet.ca> [online]. Wed April 28, 2010 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/books/usb/default.htm?start=pt03ch06s02at02.html>