

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Návrh a výroba kompozitního nosníku pro model F3B
Bc. Dominik Sedláček

Diplomová práce
2021

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Sedláček**
Osobní číslo: **C19509**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**
Téma práce: **Návrh a výroba kompozitního nosníku pro model F3B**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. V teoretické části zpracujte literární rešerši na téma použití kompozitních materiálů v letectví a v leteckém modelářství.
2. Připravte návrh kompozitního nosníku pro model F3B, popište různé typy nosníků i s ohledem na používané materiály.
3. Provedte výpočty hodnot navrženého nosníku.
4. Popište podrobně výrobu nosníku a navržený nosník vyrobte.
5. Vyrobené nosníky otestujte z hlediska fyzikálně-mechanických vlastností a výsledky zkoušek vyhodnoťte a diskutujte.
6. Diplomovou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 „Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu“.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Večeřa, CSc.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Konzultant diplomové práce: **Ing. František Bayer**

Datum zadání diplomové práce: **18. prosince 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **7. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Bc. Dominik Sedláček

PODĚKOVÁNÍ

Dád bych poděkoval panu Ign. Miroslavu Večeřovy CSc za vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing Františku Bayerovi za cenné rady a pomoc při výpočtech.

ANOTACE

Práce se zabývá kompozitními díly využívající se v letectví a leteckém modelářství. Má za úkol navrhnout a vyrobit část kompozitního nosníku pro kategorii F3B. Vyrobený nosník bude podroben fyzikálně mechanickým zkouškám, zda odpovídá podmínkám použití ve skutečném modelu letadla kategorie F3B.

KLÍČOVÁ SLOVA

Uhlíkový kompozit, model letadla, kompozitní nosník, F3B větroň, kompozitní materiály

TITLE

Design and manufacture of a composite beam for model F3B

ANNOTATION

This thesis deals with composite parts which are used in areas like aviation and aeronautical modeling. Its main goal is to propose and produce a part of composite piece for the F3B category. The final piece will be subjected to physical mechanical tests to determine if it corresponds to conditions of use in a real model of an airplane of the F3B type.

KEYWORDS

Carbon composite, plane model, composite gridert, F3B glider, composite materials

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratk	11
Seznam rovnic	12
Úvod	14
1 Teorie	15
1.1 Kompozitní materiál	15
1.1.1 Definice	15
1.1.2 Vlastnosti	15
1.1.2.1 Anizotropie	15
1.1.2.2 Synergický efekt	16
1.1.3 Matrice	16
1.1.4 Výztuž	16
1.1.4.1 Skelná vlákna	17
1.1.4.2 Aramidová vlákna	18
1.1.4.3 Uhlíková vlákna	18
1.1.5 Vláknový kompozit	21
1.2 Kompozity využívané v letectví	21
1.2.1 Části letadla	22
1.2.1.1 Drak	23
1.2.1.2 Pohonná jednotka	24
1.2.1.3 Letové soustavy	24
1.2.1.4 Vybavení	25
1.2.2 Využívané kompozitní materiály	25
1.2.3 Nosník hlavních nosných ploch	25

1.3	Výpočet nosníku křídla	27
1.3.1	Moment nosníku	27
1.3.2	Výpočet sil působící uvnitř nosníku při ohybu	28
1.4	Výpočet kompozitního dílu	33
1.4.1	Obsah plniv a vláken	33
1.4.2	Modul pružnosti v tahu	34
2	Praktická část	35
2.1	Výpočet sil působící na model F3B	35
2.2	Rozložení zatížení po křídle	36
2.3	Výpočet napětí působící v nosníku	38
2.4	Výpočet kompozitního dílu	38
2.4.1	Výpočet kompozitní části	39
2.4.2	Výpočet pásnice	40
2.4.3	Výpočet počtu vrstev	42
2.5	Výroba kompozitního nosníku	44
3	Výsledky	48
	Závěr	50
	Použitá literatura	51
	Přílohy	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Epoxidová pryskyřice na bázi Bisfenolu A a epichlorhydrinu.....	16
Obrázek 2: Struktura aramidů	18
Obrázek 3: Výroba uhlíkových vláken z PAN [4]	19
Obrázek 4: Vnitřní struktura uhlíkového vláken [4]	20
Obrázek 5: mikroskopická struktura uhlíkového vlákna [4]	20
Obrázek 6: Vliv teploty zpracování na mez pevnosti a modul pružnosti [4].....	21
Obrázek 7: Obsah kompozitních materiálů v průběhu času [4,9]	22
Obrázek 8: 787 materiálové složení [11]	22
Obrázek 9: Ukázka typů konstrukcí křídla [14]	24
Obrázek 10: Ukázka navíjení části trupu 787 [15].....	25
Obrázek 11: Ukázka příhradových konstrukcí [20]	26
Obrázek 12: Ukázka plošných nosníků [17]	27
Obrázek 13: Ohyb prostý [6]	29
Obrázek 14: Působení napětí v nosníku [6]	30
Obrázek 15: Nákres křídla	35
Obrázek 16: Graf závislosti plochy na délce křídla	36
Obrázek 17: Graf závislosti zatížení na délce křídla.....	37
Obrázek 18: Graf závislosti ohybového momentu na délce křídla	37
Obrázek 19: Nákres průřezu nosníku	44
Obrázek 20: Příprava před vrstvením sendviče	45
Obrázek 21: Výrobní kroky nosníku.....	46
Obrázek 22: Zkouška ohybem	47
Obrázek 23: Závislost síly na prohnutí	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných druhů skel [5]	17
Tabulka 2: Vlastnosti polyamidů [5]	18
Tabulka 3: Hodnoty pro výpočet kompozitu[21,22].....	39
Tabulka 4: Vypočítané vlastnosti kompozitu.....	40
Tabulka 5: Ilustrativní tabulka určená k výpočtům.....	41
Tabulka 6: Výsledná tabulka rozměrů a hodnot	43
Tabulka 7: Maximální hodnoty síly při ohybu.....	49

SEZNAM ZKRATEK

Ψ	Hmotnostní podíl vláken
φ	Objemový podíl vláken
ε	Relativní prodloužení
$E_{ }$	Modul pružnosti kompozitu rovnoběžně se směrem vláken
E_{\perp}	Modul pružnosti kompozitu kolmo na směr vláken
E_m	modul pružnosti matrice
$E_{ f}$	modul pružnosti vláken v rovnoběžném směru
$E_{\perp f}$	Modul pružnosti vláken v kolmém směru
FAI	Mezinárodní letecká federace
Bisfenol A	2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan
PAN	Polyakrylonitril

SEZNAM ROVNIC

Výpočet vztlakové síly	(1.3.1—1)	27
Plocha křídla je funkcí jeho délky.....	(1.3.1—2)	28
Plošné zatížení poloviny křídla	(1.3.1—3)	28
Výpočet ohybového momentu v délce křídla.....	(1.3.1—4)	28
Výpočet relativního prodloužení.....	(1.3.2—1)	29
Výpočet Hookeůva zákona	(1.3.2—2)	29
Dosazený výpočet Hookeůva zákona.....	(1.3.2—3)	30
Zkrácený výpočet Hookeůva zákona	(1.3.2—4)	30
Výpočet normálové síly v ploše nosníku	(1.3.2—5)	30
Integrace výpočtu normálové síly	(1.3.2—6)	30
Dosazený výpočet normálové síly	(1.3.2—7)	30
Výpočet ohybového momentu z normálové síly.....	(1.3.2—8)	31
Integrace a dosazení ohybového momentu	(1.3.2—9)	31
Výpočet elementárního ohybového momentu	(1.3.2—10)	31
Integrace a dosazení elementárního ohybového momentu	(1.3.2—11)	31
Dosazení do Hookeůva zákona	(1.3.2—12)	31
Výpočet kvadratického momentu průřezu	(1.3.2—13)	32
Výpočet kvadratického momentu průřezu obdélníku	(1.3.2—14)	32
Výpočet kvadratického momentu průřezu celého tělesa.....	(1.3.2—15)	32
Výpočet polohy těžiště části v prostoru	(1.3.2—16)	32
Výpočet celkového těžiště tělesa v prostoru	(1.3.2—17)	32
Výpočet dílčích ramen těžišť	(1.3.2—18)	32
Výpočet objemového podílu vláken v kompozitu	(1.4.1—1)	34
Výpočet modulu pružnosti kompozitu rovnoběžně s vlákny.....	(1.4.2—1)	34
Výpočet modulu pružnosti kompozitu kolmo k vláknům.....	(1.4.2—2)	34
Výpočet zrychlení působící na model.....	(1.4.2—1)	36
Výpočet vztlakové síly působící na polovinu křídla modelu.....	(1.4.2—2)	36
Výpočet zatížení působící na křídlo modelu.....	(1.4.2—1)	37
Výpočet objemového podílu vláken použitého kompozitu.....	(2.4.1—1)	39
Výpočet meze pevnosti použitého kompozitu	(2.4.1—2)	39
Výpočet hustoty použitého kompozitu	(2.4.1—3)	39
Výpočet objemu vláken vrstvy použitého kompozitu.....	(2.4.1—4)	40

Výpočet objemu matrice použitého kompozitu	(2.4.1—5)	40
Výpočet celkového objemu kompozitu jedné vrstvy	(2.4.1—6)	40
Výpočet výšky jedné vrstvy kompozitu	(2.4.1—7)	40
Výpočet maximální síly v tahu jedné vrstvy kompozitu.....	(2.4.1—8)	40
Výpočet kvadratického momentu částí nosníku	(2.4.2—1)	42
Výpočet polohy těžišť částí nosníku	(2.4.2—2)	42
Ilustrační výpočet napětí působící v pásnici	(2.4.3—1)	42
Výpočet skutečného napětí působící v pásnici.....	(2.4.3—2)	43
Výpočet potřebných vrstev na výrobu pásnice	(2.4.3—3)	43

ÚVOD

V rámci leteckého průmyslu se začínají ve větší míře uplatňovat kompozitní materiály. Nejčastěji se využívá vláknových kompozitů, u tohoto typu je výhodou vysoká mechanická pevnost a nízká hmotnost. Také pomocí různých vláken a matric se dají velmi snadno měnit celkové vlastnosti od velmi tvrdých a křehkých materiálů s malou tažností po relativně houževnaté s vysokou průtažností. Kombinací těchto rozdílných materiálů je možné vytvořit výrobek s požadovanými vlastnostmi.

Nejčastěji se využívá uhlíkových vláken, skelných vláken a aramidových vláken. Spolu s vlákny je kompozit tvořen i matricí. Matrice je nejčastěji tvořena epoxidovou pryskyřicí. Epoxidová pryskyřice může mít různé vlastnosti. Tyto vlastnosti záleží na její molekulové hmotnosti a různých modifikacích.

1 TEORIE

1.1 Kompozitní materiál

1.1.1 Definice

Podle obecné definice je kompozit: „Jakýkoliv materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.“ [1] podle této definice jsou prakticky všechny materiály kompozity, což je z hlediska vnímání kompozitu v moderní podobě nepřesné.

Druhá definice je daleko přesnější: „Kompozitní materiál je kombinace dvou a více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky v nich si zachovávají svou identitu (tzv. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí vzájemnou součinností. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ [2]

Pomocí těchto definic můžeme říct, že: Kompozit je materiálový systém, skládající se nejméně ze dvou fází, z nichž musí být jedna pevná, tvořící výztuž a druhá spojitá tvořící matici. Dále pak můžeme použít rozdělení pro částicové a vláknové kompozity. Částicové kompozity mají poměr délky ku průměru přibližně roven [1] a vláknové kompozity poměr délky ku průměru v řádech stovek, tisíců i daleko větších. Pevnost je u vláknových kompozitů je také dána uspořádáním vláken, vyskytuje se u něj anizotropie. Pokud je směr vláken ve směru působící síly, je výsledná pevnost nejvyšší, pokud ale síla působí kolmo na směr uspořádání vláken, je pevnost nejnižší. [2]

1.1.2 Vlastnosti

1.1.2.1 Anizotropie

Kompozitní materiály, na rozdíl od klasických, často vykazují silnou anizotropii. Anizotropie znamená, že materiál vykazuje rozdílné chování při působení síly z rozdílných stran. Anizotropické chování závisí na typu výztuže a jejím uspořádáním, pokud jsou výztužící částice ve tvaru koulí, tak se zde anizotropické chování prakticky nevyskytuje. Oproti tomu, pokud je výztuž tvořena dlouhými uspořádanými vlákny, tak se u tohoto materiálu vyskytuje velmi silné anizotropické chování. [1,2,4]

1.1.2.2 Synergický efekt

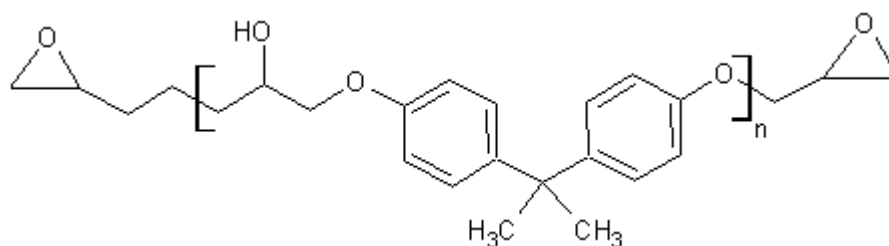
„Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně (G. Slayter)“. [4]

Pro kompozit je charakteristický tzv. synergický efekt, působící mezi jeho jednotlivými složkami (výztuž a matrice). Což znamená, že poměrový součet vlastností je menší, než jsou skutečné vlastnosti. My se při výrobě materiálu snažíme docílit co nejvyššího synergického efektu. [2]

1.1.3 Matrice

Matrice je část kompozitu udržující soudržnost materiálu. Má spojitý charakter a přenáší síly mezi jednotlivými částicemi výztuže, chrání výztuž před okolními vlivy a zajišťuje tvarovou stálost výrobku. Pro matrici je důležité, aby měla dobrou smáčivost a dobrou adhezi k vláknům. V rámci kompozitů používaných v leteckém průmyslu se často využívají matrice na bázi reaktoplastů. [4]

Nejčastěji využívanou termoplastickou matricí jsou epoxidy a jiné systémy na bázi epoxidů. Jejich výhodou je vysoká modifikovatelnost. Mohou být velmi tvrdé a křehké, ale mohou se připravit i změkčené s řídkou sítí, které jsou naopak velmi houževnaté. Doba zpracovatelnosti se dá ovlivnit pomocí rozdílných tvrdidel, stejně tak teplotou zpracování. [3,4]



Obrázek 1: Epoxidová pryskyřice na bázi Bisfenolu A a epichlorhydrinu

1.1.4 Výztuž

Výztuž kompozitů se dá rozdělit na dvě části:

- Částice
- Vlákna

Částice jsou nejčastěji kulovitého, destičkovitého nebo jehličkového charakteru. Dle svého tvaru a uspořádání v kompozitu vykazují větší či menší anizotropické chování.

Vlákna se dále mohou dělit na dlouhá, s teoreticky nekonečnou délkou, a staplová, s délkou desítek, maximálně stovek milimetrů. Pokud jsou v kompozitu uspořádána jedním směrem, vykazují velice silné anizotropické chování. [1,4]

Nejpoužívanějšími vlákny jsou:

- Skelná vlákna
- Aramidová vlákna
- Uhlíková vlákna

1.1.4.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna se vyrábí zvlákněním z taveniny SiO_2 a dalších oxidů. Nejčastějšími jsou oxidy Al, Ca, Mg, B, s malým zastoupením alkalických kovů Na a K. Různými poměry těchto prvků vznikají různá skla s rozdílnými vlastnostmi. [1,4,5]

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných druhů skel [5]

	sklo E	sklo S	sklo C	sklo ACR	křemenné sklo
Průměr / μm	9–13	9–13	9–13	-	8,9
Hustota / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modul pružnosti / GPa	72,4	85,5	69	75	69
Pevnost v tahu / MPa	až 3 450	až 4 600	až 3 000	1 700	3 450
Prodloužení / %	4,8	5,7	4,8	-	5
Souč. tepelné roztažnosti	5	5,6	7,2	-	-
Teplota měknutí / $^{\circ}\text{C}$	800	970	750	-	980

Skelná vlákna jsou levná varianta, avšak dražší varianta aramidových nebo uhlíkových vláken má lepší vlastnosti. [5] Smáčivost skelných vláken je relativně dobrá, díky polárním skupinám na povrchu. Smáčivost se dá upravit pomocí různých silanů. [4]

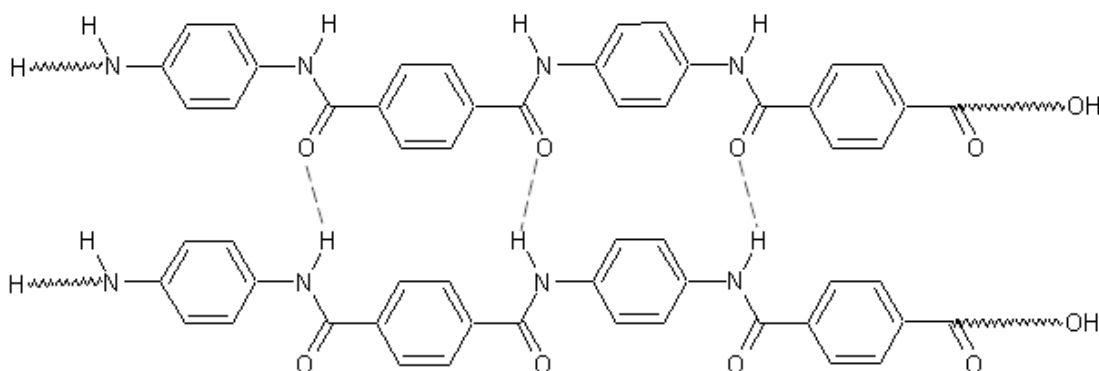
1.1.4.2 Aramidová vlákna

Jedná se o polymerní vlákna, polykondenzáty aromatických aminů a aromatických kyselin. Přítomnost benzenových jader v hlavní řetězci ve spojení se silnou kovalentní vazbou vytváří velice pevnou makromolekulu. Přítomnost vodíků vázaných na dusík dále způsobují vazbu vodíkovými můstky na kyslík přítomný na řetězci, čímž vytváří velké procento krystalů okolo 95%, což dále způsobuje vysokou pevnost vlákna. [3,4,5]

Nejznámějšími aramidami jsou Kevlar a Nomex, od firmy Du Pont.

Tabulka 2: Vlastnosti polyamidů [5]

	Pevnost v tahu /MPa	Modul pružnosti v tahu / GPa	Prodloužení / %	Hustota / g*cm ⁻³
Kevlar 29	3600	80	4,0	1,44
Kevlar 49	3600	130	2,5	1,44
Kevlar 149	3400	146	2	1,47
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA 66	900	5	13,5	1,14



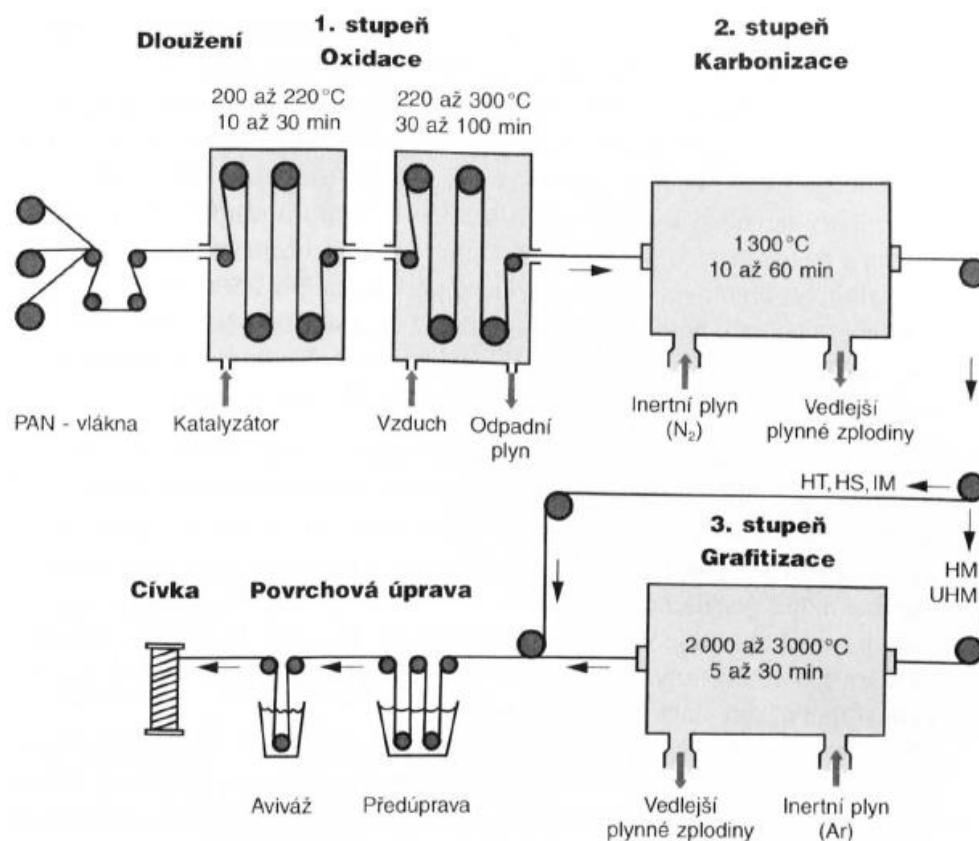
Obrázek 2: Struktura aramidů

1.1.4.3 Uhlíková vlákna

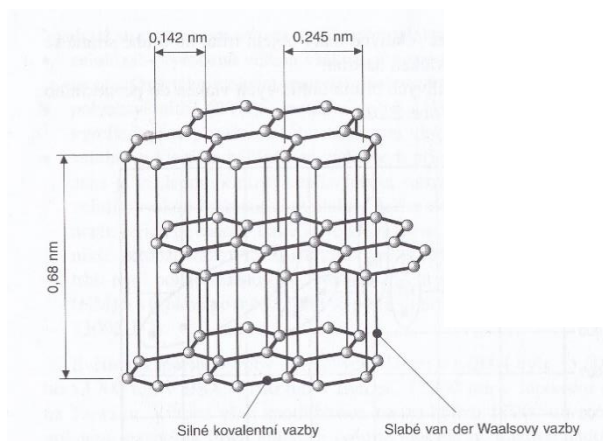
Jedná se o nejpevnější dlouhá známá vlákna. Mají extrémně vysokou tuhost a pevnost, přičemž mají velice malou tažnost. Vyrábí se tažením ze 3 materiálů, PAN, celulózy a různých

mezifázových smol. Připravená vlákna se poté za vysoké teploty a v inertní atmosféře zbavují všech ostatních prvků, kromě uhlíku. Výsledný obsah je více jak 90 % C, < 7 % N, < 1 % O a < 0,3 % H. [2,4]

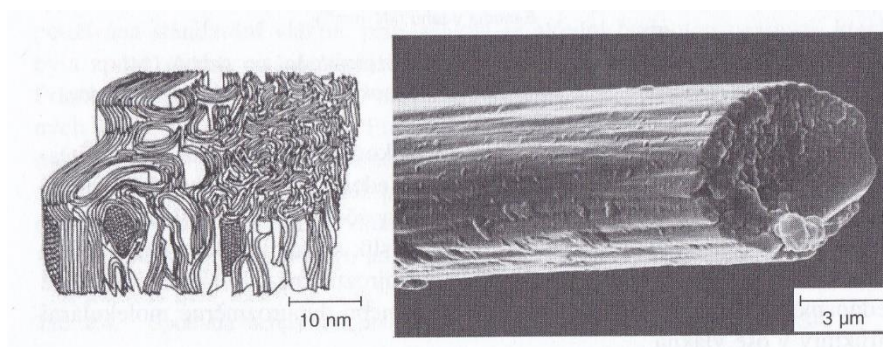
Uhlíkové vlákno má vysokou pevnost díky tomu, že je v mikrostruktuře tvořeno z vrstev grafenu. Tyto vrstvy jsou uspořádány ve směru osy vlákna. Grafénová vrstva je tvořena uhlíky uspořádaných do šestiúhelníkových struktur v jedné vrstvě. Tyto uhlíky jsou spojeny silnými kovalentními vazbami a vrstva je díky tomu pevná a kompaktní. Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou spojeny pomocí slabých van der Waalsových sil, které jsou kolmé na osu vlákna. Tato orientace vrstev se děje díky materiálové paměti dloužených krystalů. Ta je zachována a převedena na krystaly grafitu, které jsou pak rovněž uspořádány v ose vlákna a ne nahodile, jak je tomu u přírodního grafitu. Tato skutečnost je podpořena tím, že je vlákno celou dobu výroby pod zatížením, čímž se rovněž pomáhá vzniku orientovaných krystalů. [2,4,5]



Obrázek 3: Výroba uhlíkových vláken z PAN [4]

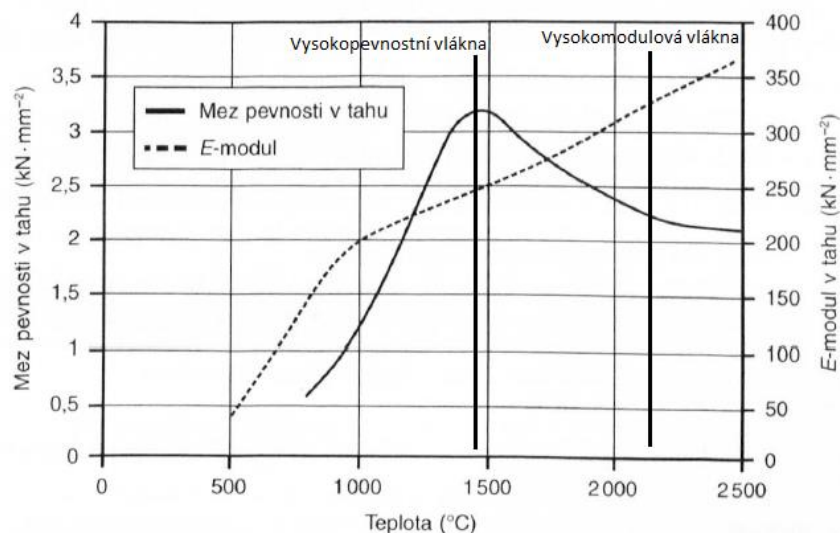


Obrázek 4: Vnitřní struktura uhlíkového vlákna [4]



Obrázek 5: mikroskopická struktura uhlíkového vlákna [4]

Vlastnosti uhlíkových vláken závisí na teplotě zpracování. Nejčastějšími druhy vláken jsou vysokomodulová a vysokopevnostní. [1,2,4]



Obrázek 6: Vliv teploty zpracování na mez pevnosti a modul pružnosti [4]

1.1.5 Vláknořvý kompozit

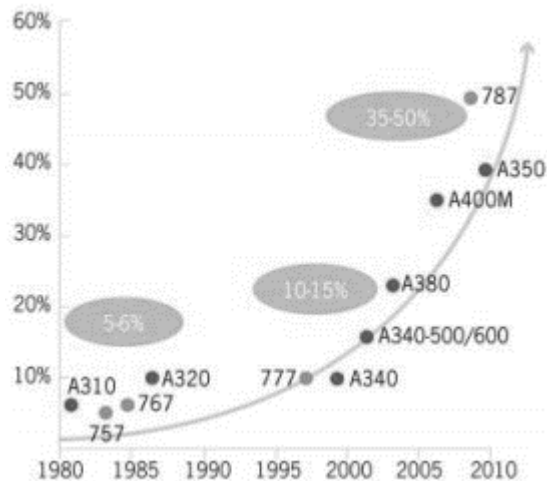
Vláknořvý kompozit je druh kompozitu, který je tvořen vřztuří z vláken. Vlákna mají parametř: délka ku řřmřeru v řřadu tisíců až statisíců, na rozdřl od řřástic, které mají stejný parametr řřibližně roven jedné. [1,2]

Pro lepší zpracování a výrobu se nevyuřívají jednotlivá vlákna, jejich zpracování je pro miniaturní tlouřřku prakticky nemořné, pouřívají se pramence složené s několik tisíců jednotlivých vláken. S těmito pramenci se vřak řřasto nepracuje pro jejich řřpatnou zpracovatelnost. Nejřřastěji se pro výrobu kompozitů pouřívají tkaniny a pleteniny z důvodu lepší manipulace řři výrobě. Tkaniny mohou být řřůzné vazby: plátnová, atlasová, keprová. [1,4]

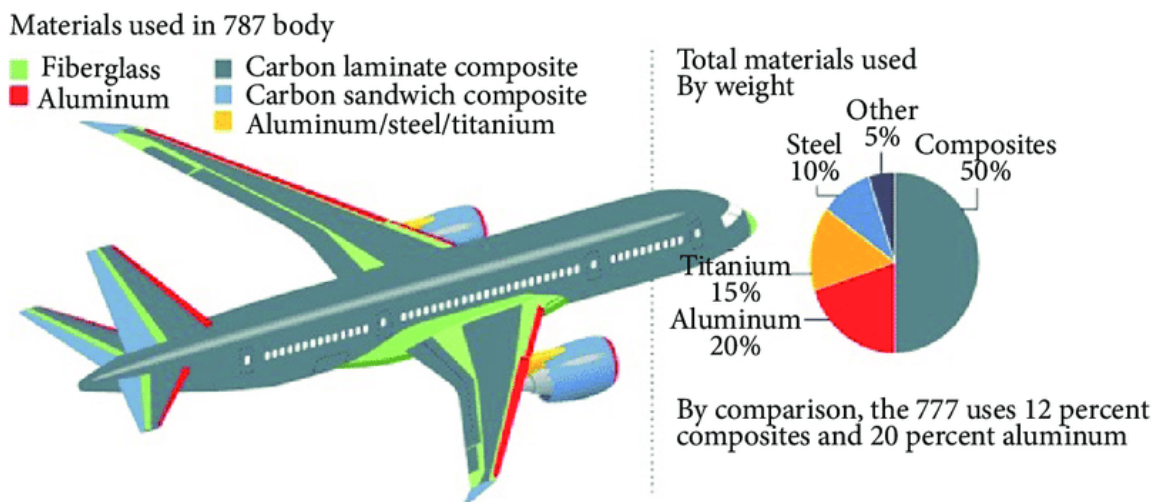
1.2 Kompozity vyuřívané v letectví

Letadlo je létající stroj řřeřší než vzduch s pevným křřídelm. Velmi důležitým parametřem letadla je jeho hmotnost, která musí být co nejnižší, a také vysoká spolehlivost. Vyuřítím kompozitních materiálů na bázi epoxidových pryskyřic vřztuřených uhlíkovými vlákny se dá snadno dosáhnout vřhodného poměru mezi hmotností a mechanickými vlastnostmi. Díky tomu je možno uspořit řřibližně 20% hmotnosti řři zlepšené funkčnosti a zachování spolehlivosti. Nevřhodou jsou vřak výrobní náklady, které jsou v porovnání s kovovými konstrukcemi stále vysoké. I řřes tento fakt se vláknořvé kompozity vyuřívají řřím dál řřastěji. Zatřmco v roce 1975 tvořil podřl vláknořvých kompozitů v Airbusu A300 5 %, v roce 2000 byl podřl na

A340 - 600 již 15 %, a v roce 2005 na letadle A380 (v současnosti největšího dopravního letadla světa) 22 %. Konkurenční firma Boeing také představila nový letoun 787 Dreamliner, který je konstruován z 50 % na bázi kompozitů z uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. [4,10]



Obrázek 7: Obsah kompozitních materiálů v průběhu času [4,9]



Obrázek 8: 787 materiálové složení [11]

1.2.1 Části letadla

- Drak
- Pohonná jednotka
- Letadlové soustavy

- Vybavení

1.2.1.1 Drak

- Jedná se o nejdůležitější část letadla zahrnující:
- Trup
- Nosné prvky
- Ovládající prvky

Trup

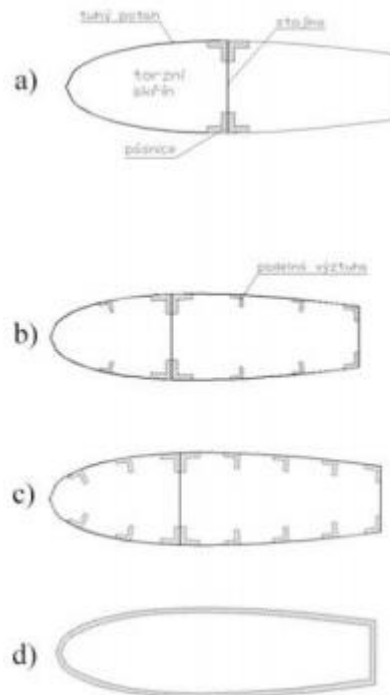
Jedná se o nejdůležitější část letadla. Z hlediska konstrukce je to spojovací prvek všech ostatních částí. V různých místech jsou na trup přichyceny nosné části (křídla) a ovládací prvky (směrové kormidlo a výškové kormidlo). Trupy můžeme z historického hlediska dělit na trupy s nosným potahem a nenosným potahem. Kompozitní materiály se s výhodou uplatňují v konstrukcích s nosným potahem, kde slouží pro přenos aerodynamických sil do konstrukce a jako pevnostní součást trupu. [12,13]

Nosné prvky

Nosné prvky letadla jsou tvořeny křídly. Křídla zabezpečují vztlak a stabilitu za letu. Za účelem stabilizace a ovládání za letu jsou křídla vybavena i pohyblivými ovládacími prvky, jako sklápěcí náběžné hrany, křídélka a aerodynamické brzdy. Pro konstrukci křídla je nejdůležitější působení vztlakové síly za letu a výsledný ohybový moment působící na křídlo. [12]

Mezi hlavní konstrukční prvky křídla patří podélný nosník a podélné výztuhy. Dalšími prvky jsou příčné nosné prvky neboli žebra a potahy. Úkolem nosníků je přenos ohybu z křídla na trup. Úkolem žebek je vytvoření a udržení aerodynamického tvaru a přenášení síly mezi potahem a nosníkem. Dále je úkolem žebek mechanicky zpevňovat oblasti křídel s vyšším namáháním, např. v místě uchycení podvozku nebo ovládacích prvků. [12,14]

Potah zajišťuje aerodynamický tvar celého křídla a zároveň přenáší vnější síly působící na křídlo do konstrukce. Využívání kompozitních materiálů v rámci potahů je možné a v oblasti leteckého modelářství v současné chvíli již velmi rozšířeno. Využívá se skořepinová konstrukce, která je natolik pevná, že nevyžaduje ani přílišné vyztužení pomocí žebek. Hojně se tato technologie využívá i u bezmotorových kluzáků a malých ultralehkých letadel. U velkých letadel dochází k využití tzv. jednotlivých kompozitních panelů, které se uchycují na žebra s nosníky. [12,14]



Obrázek 9: Ukázka typů konstrukcí křídla [14]

a) nosníková konstrukce, b) nosníková polo skořepina, c) polo skořepina, d) skořepina

Ovládací prvky

Mezi hlavní ovládací prvky patří křídélka, která jsou uchycena na hlavních nosných plochách, výškové kormidlo umístěno na zadních vodorovných nosných plochách, které fungují i jako vedlejší nosné plochy, a směrové kormidlo umístěno na vertikálním stabilizátoru. Nejčastěji jsou umístěny vertikální i horizontální stabilizátory na ocase letadla. Konstrukce těchto stabilizátorů je velmi podobná konstrukci nosných ploch, avšak jejich velikost je daleko menší než u nosných ploch. Díky tomu na ně nepůsobí tak velké síly a mohou být slabší. Tím se u těchto ploch daleko častěji setkáváme s vláknovými kompozitními materiály. [12]

1.2.1.2 Pohonná jednotka

Zajišťuje pohon letadla vpřed. Je zpravidla tvořena motorem, motorovým ložem nebo motorovou gondolou, vstupem pro čerstvý vzduch a odvod spalin. V rámci konstrukce se jedná o část, u které není příliš možností náhrady kovů za kompozitní materiál. [14]

1.2.1.3 Letové soustavy

Tato část zahrnuje hydraulické ovládání, palivová čerpadla, klimatizace a další. V těchto částech není příliš možné nahrazení částí kompozitními materiály z důvodu agresivity provoz-

ních kapalin nebo nárokům na spolehlivost. Dále u těchto částí není nahrazování kvůli ceně ekonomické.

1.2.1.4 Vybavení

Mezi tyto části patří radiové vybavení, přístroje, sedadla a ostatní.

1.2.2 Využívané kompozitní materiály

Pro využití v letectví se využívají prakticky pouze kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken a reaktoplastické matrice. Pro využití v průmyslovém měřítku se využívá technologie navíjení a pultruze. [1,4]



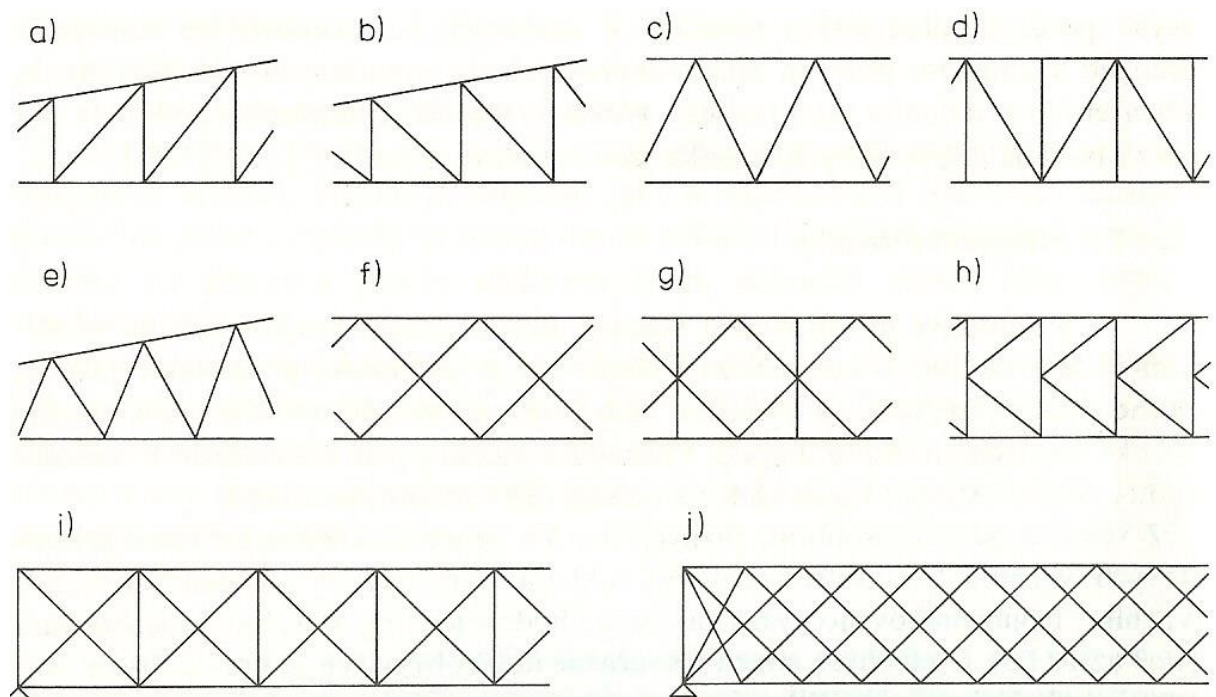
Obrázek 10: Ukázka navíjení části trupu 787 [15]

V rámci leteckého modelářství se využívají různorodější materiály, a to z důvodu vysoké ceny uhlíkových vláken. Častěji se zde setkáváme s aramidovými výztužemi a skelnou výztuží. Uhlíková vlákna se využívají pro místa konstrukce, která jsou nejvíce namáhána, jako: nosník a odtoková část křídla u ovládacích prvků. [16]

1.2.3 Nosník hlavních nosných ploch

Nosník letadla je základní prvek podélné konstrukce. Zajišťuje pevnost v podélném směru a nese nejvyšší zatížení z celé konstrukce nosných ploch. Nejčastějším nosníkem je tvořen ze dvou pásnic, umístěných v horní a dolní části, které spojuje jedna nebo více stojen. Z konstrukčního hlediska můžeme nosníky dělit na plošné a příhradové. Plošný nosník má

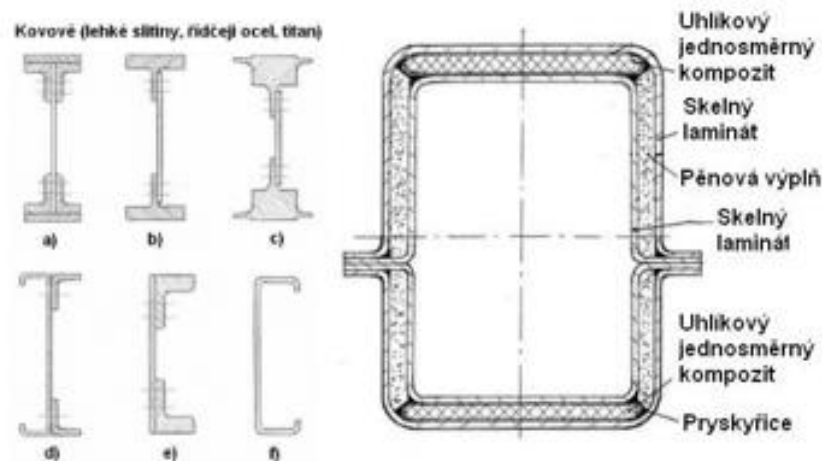
stojnu nebo stojny tvořené z jednoho kusu po celé ploše mezi pásnicemi a příhradový nosník tvořen dvěma pásnicemi, které jsou propojeny příčnými výztuhami. Výhodou plošného nosníku je jeho jednoduchá výroba. Výhodou příhradového nosníku je zase nižší hmotnost a méně využitého materiálu. Z toho porovnání vychází: příhradový nosník bude využíván spíše pro kovové konstrukce, protože opracování kovů umožňuje tuto složitější výrobu a konstrukce se tím i odlehčí. Naproti tomu plošný nosník bude výhodný pro použití vláknových kompozitů, které jsou dostatečně lehké a nosník jednoduše vyrobitelný. Vyrobít příhradový nosník z kompozitních materiálů je možné, ale velmi pracné a nepřinese vzhledem ke své náročnosti na výrobu dostatečný užitek. [17]



Obrázek 11: Ukázka příhradových konstrukcí [20]

Ve velkých letadlech se mohou využít oba typy, avšak vyrobít plošný nosník z kompozitního materiálu je technologicky jednodušší a pevnější než výroba příhradového nosníku z téhož materiálu. V leteckém modelářství se s jiným, než plošným nosníkem nesetkáme, jelikož náročnost výroby příhradového nosníku v tak malém měřítku je velice náročná. [16,17]

Materiál nosníků může být různorodý, nejčastěji se setkáváme s lehkými slitinami na bázi duralu, nebo právě s kompozitní strukturou. U leteckých modelů se setkáváme se stejnými materiály jako u velkých letadel, ale můžeme se setkat i s dřevěnou konstrukcí. S dřevěnou konstrukcí se samozřejmě můžeme setkat i u velkých letadel, ale to spíše u historických konstrukcí. U moderních letadel i těch ultralehkých se s dřevěnou konstrukcí prakticky nesetkáme. [12,13,17]



Obrázek 12: Ukázka plošných nosníků [17]

1.3 Výpočet nosníku křídla

Základem každého výpočtu je zjištění podmínek, za jakých bude letadlo provozováno. Na tyto podmínky poté bude letadlo s danou hmotností dimenzováno. Z hlediska pevnosti křídla jsou důležité vnější tvary křídla, protože ovlivňují velikost a rozložení vnějších sil na křídle. Vnější geometrické tvary křídla jsou dány půdorysovým tvarem, který současně určuje plochu. Pro zjištění napětí v nosníku se nejprve musí určit moment síly, který na nosník bude působit. [7]

1.3.1 Moment nosníku

Je zde důležité rozložení zatížení po rozpětí křídla. Rozložení zatížení křídla určuje velikost ohybového momentu zatěžující křídlo. Aerodynamické síly jsou v ustáleném letu v rovnováze s váhou letadla, ale mají opačný směr a směřují vzhůru. Ve vodorovném ustáleném letu je vztlak křídla roven hmotnosti letadla. V ustáleném letu, kdy působí ještě jiná síla než gravitační síla, je vztlaková síla rovna váze modelu násobeného zrychlením. [7]

$$[7] \quad Y = a * m \quad (1.3.1—1)$$

Vztlak je po celé ploše křídla. Uvažujeme-li o rozložení zatížení po rozpětí, předpokládejme, že vzhledem k hloubce křídla je vztlak soustředěn ve výslednici, působící v působíšti vztlaku v profilu, kde se konstrukčně nachází nosník. Proti této síle působí i hmotnost křídla v daném místě a oproti vztlaku je tato hmotnost zanedbatelná. Vztlak je po rozpětí rozložen určitým způsobem. Rozložení lze vypočítat u křídel libovolného půdorysu. Rozložení vztlaku je tudíž závislé na plošném zatížení křídla. Dle plošného zatížení se následně určí zatížení na jednotku

délky křídla. Ohybový moment je poté roven násobku zatížení a změně délky křídla od jeho kořene. [7]

$$[7] \quad S = fl \quad (1.3.1—2)$$

$$[7] \quad Q = \frac{Y}{2} * S \quad (1.3.1—3)$$

$$[7] \quad M = Q * \Delta l \quad (1.3.1—4)$$

1.3.2 Výpočet sil působící uvnitř nosníku při ohybu

Ohyb je druh namáhání, při kterém se původně přímé těleso zakřivuje do rovinné nebo prostorové křivky. Za nosník předpokládejme každé přímé těleso, namáhané převážně na ohyb, jestliže zatížení vnějšími silovými účinky způsobí, že výslednice vnitřních sil v řezu kolmém k jeho podélné ose vytváří dvojici sil, kterou nazýváme ohybový moment „M“. Vektor dvojice momentů je kolmý k podélné ose tělesa. [6]

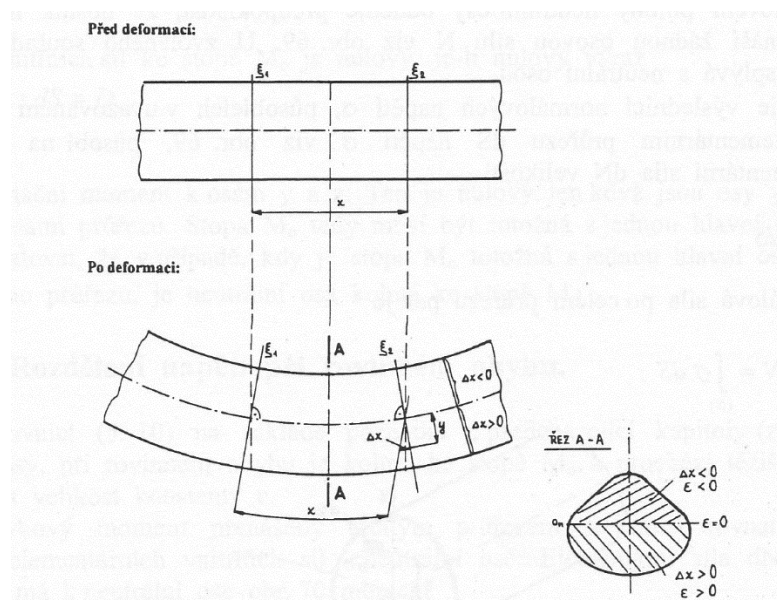
Rovnováha libovolného tuhého tělesa je v obecném případě zatížení zjištěna za splněním podmínek rovnováhy. U rovinných případů se i těleso i působící síly eventuálně momenty nacházejí v jedné rovině souřadnic (např. „x“, „y“). [6,18]

Ze soustavy vnějších sil, která zahrnuje i reakce, lze určit tři neznámé silové účinky. Počet neznámých statistických účinků musí odpovídat počtu rovnic, které lze pro určitý případ sestavit. Posuzování pevnosti nosníků a jejich přetvoření od zatížení vyžaduje znalost rozdělení vnitřních silových účinků v jejich příčných průřezech po celé délce. Tímto se vytvoří pro dané místo výslednice, která udává konkrétní sílu působící v daném místě. [6]

V místě, ve kterém chceme určit vnitřní silové účinky, vedeme myšlený řez, tím oddělíme jednu část nosníku. Tato oddělená část nosníku musí být v rovnováze. V rovnováze ji udržují síly rovné vnitřním silovým účinkům. Pohybu ve svislém směru zabraňuje vnitřní síla zvaná posouvací síla, vnitřní moment „M“ zvaný také ohybový moment. Ohybový moment zabraňuje rotaci rozříznuté části nosníku, musí zabezpečit splnění momentové rovnováhy. Posouvací síla v libovolném řezu nosníku se stanoví algebraickým součtem všech příčných sil, působících po jedné straně uvažovaného řezu. Ohybový moment v libovolném řezu nosníku se stanoví algebraickým součtem momentů všech vnějších sil a dvojic, působících po jedné straně řezu. [6]

Ohyb přímého prutu vzniká působením vnějších silových účinků a vyvolává jeho prohnutí a změnu délky vláken. Vnitřní síly působící na řez, ohybovým momentem a posouvací silou, vyvolávají v daném řezu normálové napětí a smykové napětí. Normálové napětí je funkcí ohybového momentu a smykové napětí je funkcí posouvací síly. Praktické výpočty ukazují, že ve většině případů má posouvací síla zanedbatelný vliv na jak na napjatost, tak na deformaci nosníku. [6,18]

Při prostém ohybu o jednotném zatížení nastane taková deformace, při které budou horní vlákna stlačovat a spodní budou natahovat a některá nebudou ovlivněna vůbec. Takto nezměněná vlákna vyplní tzv. neutrální plochu, která protíná každý příčný řez v neutrální ose. Rovněž prodloužení nebo zkrácení vláken „ Δx “, i poměrové prodloužení i zkrácení vláken „ $\epsilon = \Delta x / x_0$ “, je úměrné vzdálenosti od neutrální osy „ y “. [6,18]



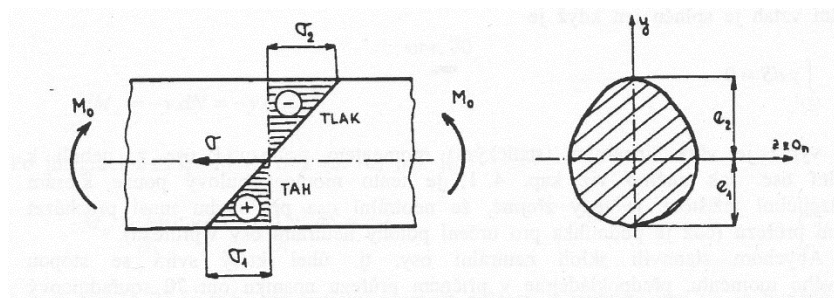
Obrázek 13: Ohyb prostý [6]

Zde pak volíme konstantu „ k “ a vzdálenost od neutrální osy „ y “, záporné znaménko z důvodu volby souřadnicového systému, kde kladnému „ k “ odpovídá záporné „ ϵ “.

$$[6,18] \quad \epsilon = -k * y \quad (1.3.2-1)$$

Prostý ohyb je jednostranná napjatost, pro níž platí Hookův zákon

$$[6,18] \quad \sigma = E * \epsilon \quad (1.3.2-2)$$



Obrázek 14: Působení napětí v nosníku [6]

Po dosazení za „ ϵ “.

$$[6,18] \quad \sigma = -E * k * y \quad (1.3.2—3)$$

Vezmeme-li v úvahu, že „ k “ je konstanta a modul „ E “ se po dobu průřezu také nemění můžeme tyto parametry shrnout do jedné konstanty „ c “ poté rovnice vypadá takto. [6]

$$[6,18] \quad \sigma = -c * y \quad (1.3.2—4)$$

Pro stanovení neutrální osy předpokládejme, že na nosník namáhaný na ohyb nebude působit žádná osová síla „ N “, to je síla rovnoběžná s nosníkem. U zvoleného souřadnicového systému osa „ z “ splývá s neutrální osou. Síla „ N “ je výslednicí normálových napětí „ σ “, působících v požadovaném průřezu. Působí-li na část plochy průřezu „ dS “ napětí „ σ “, působí na ni tedy normálová síla o velikosti „ dN “ [6,18]

$$dN = \sigma * dS \quad (1.3.2—5)$$

Výsledná normálová síla po celém průřezu

$$[6,18] \quad N = \int_{(S)} dN = \int_{(S)} \sigma * dS \quad (1.3.2—6)$$

Dosazením za „ σ “ a položením $N = 0$ získáme

$$N = - \int_{(S)} E * k * y * dS = -E * k \int_{(S)} y * dS = 0$$

$$[6,18] \quad (1.3.2—7)$$

$$\int_{(S)} y * dS = 0$$

Tento výraz je však lineárním momentem k průřezu k ose „z“, neboli k neutrální ose. Tento moment bude nulový pouze k osám procházející těžištěm, je tedy zřejmé, že neutrální osa musí procházet těžištěm průřezu. [6]

Abychom stanovili sklon neutrální osy, to je úhel, který svírá se stopou ohybového momentu, předpokládejme v příčném průřezu nosníku souřadnicový systém, u něhož osa „y“ je totožná se stopou ohybového momentu a neutrální osa splývá s osou „z“. To znamená, že je neutrální osa kolmá ke stopě ohybového momentu „ M_0 “. Moment vnitřních sil ke stopě „ M_0 “ stanovíme z průřezu nosníku, kde na plochu průřezu „ dS “ působí elementární síla „ dN “, která vyvodí ke stopě elementární moment. [6]

$$[6,18] \quad dM = z * dN = z * \sigma * dS \quad (1.3.2—8)$$

Výsledný moment ke stopě pak.

$$[6,18] \quad M = \int_{(S)} dM = -c \int_{(S)} y * z * dS = 0 \quad (1.3.2—9)$$

Rozdělení napětí při rovinném ohybu

Ze známé polohy neutrální osy, která je při rovinném ohybu kolmá ke stopě momentu „ M_0 “ a prochází těžištěm průřezu. Zbývá určení konstanty „ c “, ohybový moment přenášený určitým průřezem se musí rovnat výslednému momentu elementárních vnitřních sil k neutrální ose. Elementární síla „ dN “ působící na plochu „ dS “, má k neutrální ose moment. [6,18]

$$[6,18] \quad dM_0 = -y * dN = -y * \sigma * dS \quad (1.3.2—10)$$

Po integraci a dosazení vzorce za „ σ “ dostaneme.

$$[6,18] \quad M_0 = \int_{(S)} y * c * y * dS = c \int_{(S)} y^2 * dS = c * I \quad (1.3.2—11)$$

Kde „ I “ je kvadratický moment průřezu k neutrální ose. Opět dosadíme za konstantu „ c “ z předešlého vzorce.

$$[6,18] \quad \sigma = -c * y$$

$$\sigma = -\frac{M_0}{I} * y \quad (1.3.2—12)$$

Kvadratický moment celého průřezu nosníku o ploše „S“, k ose „z“, která leží v rovině průřezu, určíme jako součet kvadratických momentů jeho elementárních částí „dS“.

$$[6,18] \quad I_i = \int_{(S)} dI = \int_{(S)} y^2 dS \quad (1.3.2—13)$$

Kde „y“ se dá nahradit jakoukoliv jinou osou ze souřadnicového systému. Rozměr kvadratického momentu je „m⁴“. Pro obdélníkový průřez se po integraci dá vypočítat jako.

$$[6] \quad I_i = \frac{y^3 * z}{12} \quad (1.3.2—14)$$

Abychom poté mohli vytvořit centrální kvadratický moment nosníku, je nutné jednotlivé obrazce sečíst do jednoho celkového obrazce. To se provede pomocí Steinerovy věty, ta říká, že celkový kvadratický moment setrvačnosti je roven sumě jednotlivých obrazců, ke kterým je připočten součin plochy obrazce a čtverce dílčího ramena těžiště. Dílčí rameno těžiště je rovno rozdílu polohy těžiště části obrazce ku poloze těžiště celkového obrazce. [6]

$$[6] \quad I = \sum I_i + c_i^2 * S \quad (1.3.2—15)$$

Všechny výpočty těchto kvadratických momentů se počítají zvlášť pro směr „y“ a „z“ a tyto symboly jsou poté zaměněny.

Poloha těžiště obdélníku v soustavě souřadnic se vypočítá jako.

$$T_{iy} = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (1.3.2—16)$$

kde jednotlivé souřadnice značí hrany obdélníku. Analogicky se vypočítají i ostatní osy. Výsledné těžiště se pak vypočítá jako.

$$T_y = \frac{\sum T_{iy} * S}{\sum S} \quad (1.3.2—17)$$

Analogicky se vypočítají i souřadnice středu v ostatních osách.

$$c_{iy} = T_{iy} - T_y \quad (1.3.2—18)$$

„c“ je dílčí rameno těžiště a určuje vzdálenost těžiště dílčího obrazce od těžiště celkového obrazce.

1.4 Výpočet kompozitního dílu

Mnohé případy dokázaly, že je nejen možno připravit dobrý kompozitní materiál náhodou, ale také jej navrhnout tak, aby během využívání splňoval všechny požadované funkce. To však předpokládá, že máme k dispozici adekvátní teorii, obsahující základní principy nebo zákony, které musí být splněny jakoukoliv materiálovou směsí, aby byly zajištěny kompozitní vlastnosti. Nejvíce byla zatím propracována teorie kompozitů s vláknovou výztuží, která má však cenný význam pro správný návrh i úspěšnou výrobu jakéhokoliv kompozitního materiálu. [1,4]

První krokem návrhu je výběr jednotlivých složek. Výběr je vázán jistými kritérii, jejichž cílem je volba nevhodnějších jednotlivých složek, které budou schopny zastávat předem specifikované funkce. [1,4]

Zvláštní místo mezi kompozity zauímají plasty vyztužené vlákny. Do viskózní nebo křehké matrice jsou vložena vysoko modulová a vysokopevnostní vlákna, která z velké části určují tuhost a pevnost kompozitu. Atraktivní jsou jemná vlákna a whiskery s velmi velkým poměrem povrchu k objemu. Jednotné strukturní chování vláken a matrice v kompozitu při velkém poměru povrchu k objemu vyžaduje dosažení spojitě, rovnoměrně silné soudržnosti mezi složkami. Náhodné nespojitě chování zaviněné výrobou vede k chybám, které často přerůstají do chyb kritických, které se projeví při pracovním zatížení v pracovním prostředí. [1,4]

Mechanické interakce mezi výztuží a matricí jsou charakterizovány bezrozměrnými parametry, jako je poměr modulů pružnosti, Poissonových součinitelů a tažných, creepových a lomových vlastností složek. Mechanické vlastnosti by měly být popsány za podmínek „in situ“ to je – v interakci s teplotními a chemickými účinky, ale to se dosud nepodařilo beze zbytku zvládnout. Často se chemické a teplotní interakce mezi výztuží a matricí zavádějí jako nezávislé jevy a skládají se dohromady s mechanickým působením. [1,4]

1.4.1 Obsah plniv a vláken

Pro jednodušší měření, snadnější váhové dávkování a další, je obsah vláken nebo jiného plniva často udáván jako hmotnostní podíl vláken (ψ) udávaný ve hmotnostních procentech. Při výpočtu veličin vztažených zejména na plochu, jako je napětí nebo E-modul, se uplatňuje lépe objemový podíl (ϕ) vláken vyjádřený v objemových procentech. Protože hustota vláken je vyšší než hustota matrice, je hodnota obsahu vláken v objemových procentech nižší než hodnota v hmotnostních procentech. Tuto souvislost ukazuje následující vztah. [1,2,4]

$$[4] \quad \varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} * \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (1.4.1-1)$$

1.4.2 Modul pružnosti v tahu

Zásadní vliv vlastností vláken na tuhost kompozitu lze ukázat na hodnotách modulů pružnosti jednosměrně vyztužené tkaniny. Spolupůsobení vláken a matrice v kompozitním materiálu je složité, a proto při stanovování vlastností kompozitu na základě vlastností jednodušších složek a jejich podílu a geometrického uspořádání je nutné přijmout řadu zjednodušujících předpokladů. Prvek jednosměrně vyztuženého kompozitu tvoří základní element při pevnostních a deformačních analýzách konstrukcí s vlákny vyztužených plastů. [1,2,4]

V prvním přiblížení lze předpokládat, že při namáhání tahem ve směru vláken jsou deformace matrice i vláken v tomto směru stejné. Z toho vyplývá vztah pro modul pružnosti v rovnoběžném směru, který představuje pravidlo směsí. Předpokládáme-li, že namáhání v příčném směru působí v obou složkách stejná napětí, pak lze dospět ke vzorci pro kolmý modul pružnosti. [1,2,4]

$$[2,4] \quad E_{||} = \varphi E_{||f} + (1 - \varphi) E_m \quad (1.4.2-1)$$

$$[2,4] \quad E_{\perp} = \frac{E_{\perp f} E_m}{\varphi E_{\perp f} + (1 - \varphi) E_m} \quad (1.4.2-2)$$

V obou případech se nebere zřetel na rozdílné hodnoty Poissonových čísel vlákna a matrice, což způsobuje značnou chybu zejména v případě kolmého modulu pružnosti. Jednoduchost těchto vztahů však umožňuje názorně ukázat vliv jednotlivých složek na výsledné hodnoty kompozitu. [2,4]

Pevnost v tahu vlákna lze výhodně stanovit zatěžováním pramence prosyceného pryskyřicí. Naměřené hodnoty, přepočítané na 100% objemový podíl vláken, jsou pro praktické úvahy plně dostačující. Mez pevnosti kompozitu ve směru vláken může být odhadnuta pomocí pravidla směsí obdobným výpočtem. [2,4]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Výpočet sil působící na model F3B

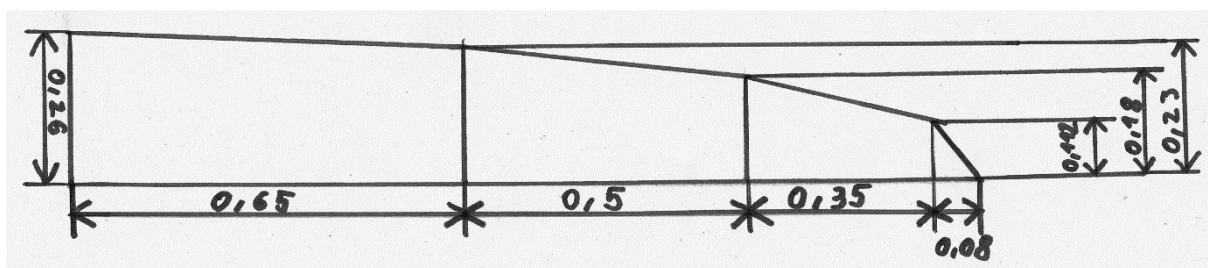
Modelářská kategorie F3B je dle FAI je kategorie pro víceúlohové větroně. Jeho definice dle FAI zní:

„Model letadla bez pohonné jednotky, u kterého vztlak vzniká působením aerodynamických sil na nepohyblivé plochy, které zůstávají nepohyblivé během letu, s výjimkou řídicích ploch. Modely s proměnnou geometrií nebo plochou musí vyhovovat základním charakteristikám, jsou-li plochy ve svém maximálním nebo minimálním rozložení či tvaru. Model musí řídit pilot stojící na zemi rádiem. Jakékoli změny geometrie nebo plochy musí být ovládány dálkově rádiem.“ [19]

Dále uvádí základní charakteristiky modelu:

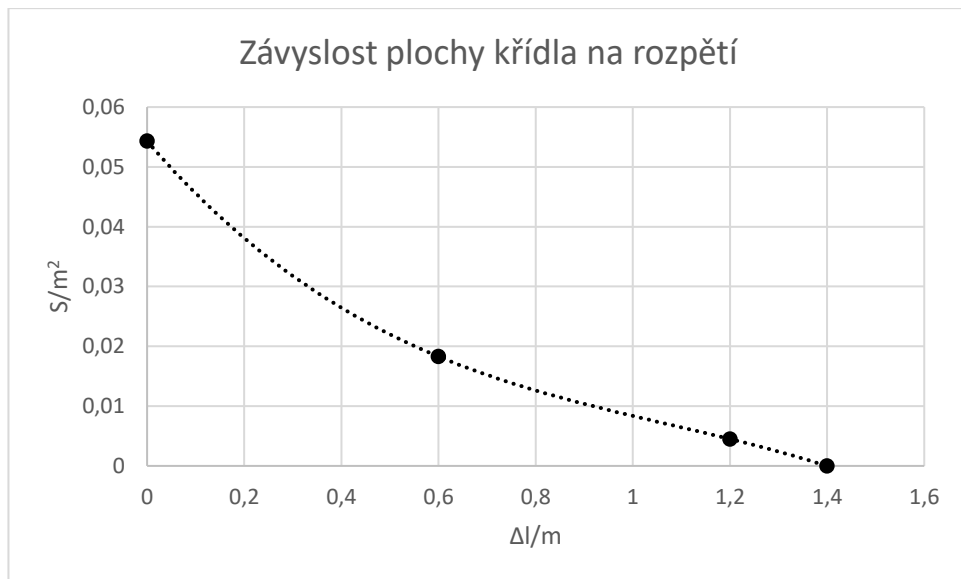
- Největší celková nosná plocha: 150 dm^2
- Nejvyšší letová hmotnost: 5 kg
- Plošné zatížení: $\leq 75 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2}$

Pravidla neuvádějí maximální možné rozpětí křídla ani hloubku křídla, pro tato data důležitá pro zjištění rozložení sil byl vybrán skutečný model a z něj byla tato data odečtena. Uvedené rozměry jsou v metrech. [19]



Obrázek 15: Nákres křídla

Pomocí těchto dat byla zjištěna funkce závislosti plochy jednoho křídla na rozpětí.



Obrázek 16: Graf závislosti plochy na délce křídla

Zjištění maximálního vztlaku působící na křídlo je důležité znát namáhání za letu. Toho dosahuje tento model při startu, který je prováděn pomocí elektrického navijáku a pružného silonového vlasce. Nejvyššího zatížení modelu dochází při takzvaném výstřelu, kdy model zamíří k zemi a energie uložená v napnutém vlasci se uvolní. Po dosažení maximální možné rychlosti model prudce zamíří vzhůru a při tomto obratu dochází k nejvyššímu zatížení. Zrychlení působící na model se dá popsat jako dostředivé zrychlení pohybu po kružnici.

$$a_d = \frac{v^2}{r} = \frac{35^2}{5} = 245 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1.4.2—1)$$

Z dat získaných z modelu víme, že rychlost při výstřelu se pohybuje do $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a poloměr dosahuje 5 metrů. Tato data byla získána od konzultanta, který shromažďuje data z provedených startů. Z výpočtu pak vychází zrychlení $245 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. [23]

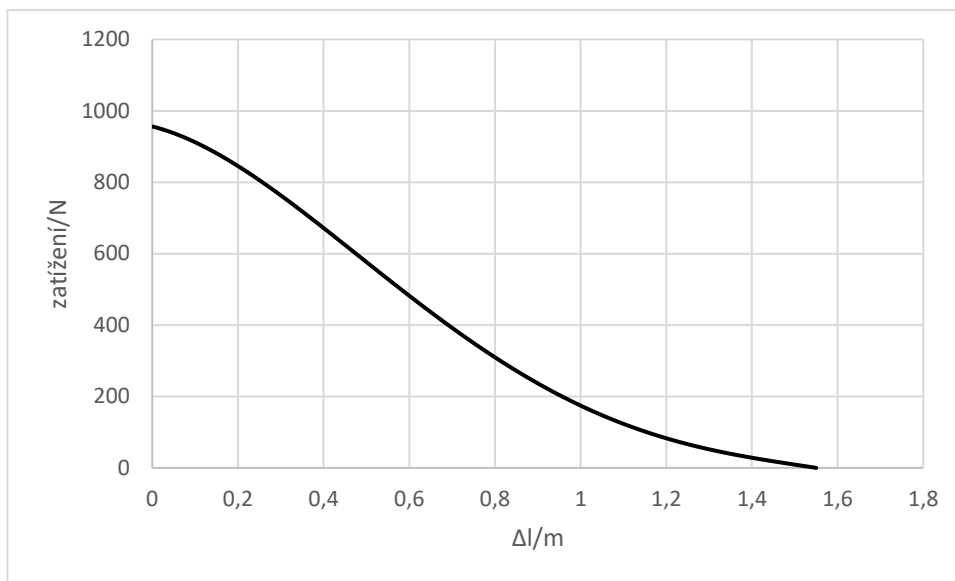
K výpočtu celkového vztlaku modelu je nutné k výpočtu přidat bezpečnostní koeficient, ten je stanoven na 1,5 a maximální možnou hmotnost modelu, kterou nám určují pravidla. Výsledný vztlak má tedy hodnotu: 1 912,5 N

$$Y = 1,5 \cdot (a_d + g) \cdot m = 1,5 \cdot 254 \cdot 5 = 1912,5 \quad (1.4.2—2)$$

2.2 Rozložení zatížení po křídle

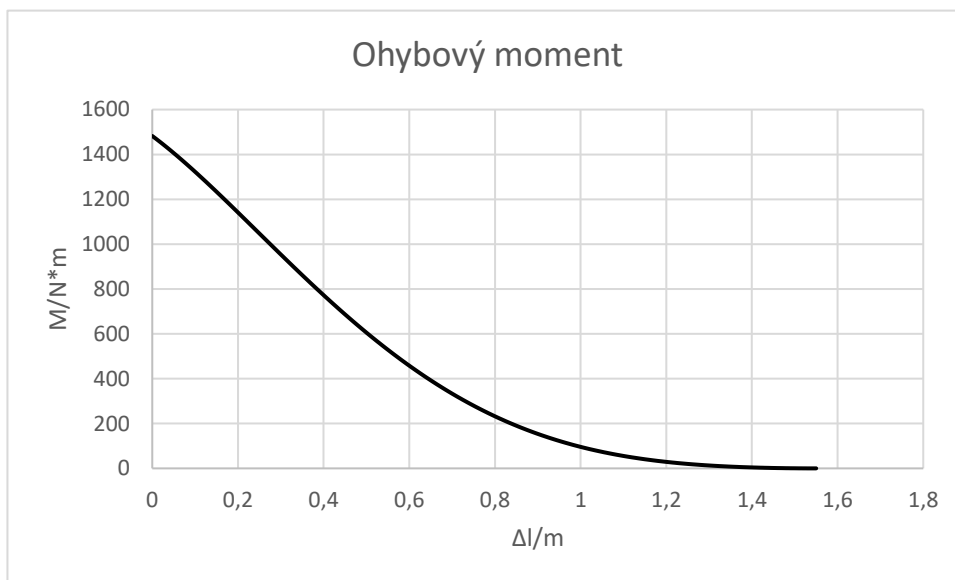
Zatížení se po křídle rozloží podle poměru dané plochy v dané vzdálenosti od kořene křídla ku celkové ploše křídla.

$$Q = Y * \frac{S_i}{S} \quad (1.4.2—1)$$



Obrázek 17: Graf závislosti zatížení na délce křídla

Ohybový moment síly působící na nosník se vypočítá jako zatížení násobené změnou délky od kořene křídla dle rovnice (1.3.1.— 4). V ranci práce bude využita nejvyšší hodnota 1 450 N*m.



Obrázek 18: Graf závislosti ohybového momentu na délce křídla

2.3 Výpočet napětí působící v nosníku

Kategorie modelů F3B je konstrukčně velmi náročná. Tato náročnost je určena podmínkami této kategorie. F3B je víceúlohová kategorie bezmotorových modelů letadel, skládá se ze tří úloh. [19]

- Čas letu
- Vzdálenost
- Rychlost

Každá tato úloha vyžaduje jinou konfiguraci letadla, a tudíž i jiné konstrukční namáhání. K nejvyššímu konstrukčnímu namáhání dochází při úloze „Rychlost“. Při této úloze musí letadlo prolétnout čtyřikrát dráhu o vzdálenosti 150 m za co nejkratší čas, toho se dosahuje tak, že je letadlo zatíženo na maximální vzletovou hmotnost daného letadla, pak je proveden start s nastoupaním maximální výšky a poté letadlo prudce klesne, čímž nabere vysokou rychlost a provede průlet celou tratí s provedením tří obrátů o 360°. [19]

Nosníky využívané v modelech F3B jsou z velké části výrobní tajemství jednotlivých výrobců. Obecně můžeme říct, že kompozitní nosník je plošný s dvěma a více stojnami, které jsou tvořeny uhlíkovou tkaninou z plátňové vazby orientovanou pod úhlem 45°. Pásnice jsou poté tvořeny jednosměrnou uhlíkovou tkaninou, nebo složené z jednotlivých uhlíkových rovingů. Počet jednotlivých vrstev se poté odhaduje na základě zkušeností nebo výpočtů.

Rozměry nosníku byly dány volnou dutinou v profilu křídla. Šířka není pro prostor v křídle podstatná. Aby při zkoušce nedošlo k převodu síly z ohybové do torzní, rozhodl jsem se pro relativně velkou šířku. Rozestupy mezi jednotlivými stojnami byly zvoleny: 5;10;5 mm, celková šířka nosníku bude tudíž 20 mm plus tloušťka čtyř jednotlivých uhlíkových vrstev. Výsledek byl díky využití vakuového lisování o 3 mm užší tudíž byl výsledný rozměr 17 mm. Postup výroby bude uveď později. Tato sestava byla navržena konzultantem, který podobnou využívá ve svých modelech, které konstruuje a staví.

2.4 Výpočet kompozitního dílu

Na základě rady konzultanta jsem se rozhodl vyrobit nosník se čtyřmi stojnami po jedné vrstvě uhlíkového plátna. Pásnice budou vyrobeny z uhlíkového rovingu. Počet jednotlivých pramenů rovingu bude vypočítán.

Pro komplexní výpočet je nutná aproximace, které se po vyplnění všech vstupních údajů dopočítá řešitel. Výpočet se dá rozdělit na dva kroky. V prvním kroku výpočet kompozitní části, hlavně jeho meze pevnosti v tahu. Druhý krok spočívá ve výpočtu počtu vrstev, nutných pro požadovanou výdrž nosníku. Všechny rovnice nutné pro výpočet jsou uvedeny výše v teoretické části.

2.4.1 Výpočet kompozitní části

Jako ideální prosycení bylo rozhodnuto, že prosycení bude 40 %. Tato hodnota je prakticky jednoduše dosažitelná a zároveň je obsah pryskyřice již dostatečně nízký pro vysokou pevnost. Platí zde totiž nepřímá úměra, čím vyšší je prosycení, tím nižší jsou výsledné hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti.

Potřebné hodnoty:

Tabulka 3: Hodnoty pro výpočet kompozitu [21,22]

Hustota vláken	1,77	g/cm ³
Mez v pevnosti v tahu vláken	4000	MPa
Hustota matrice	1,2	g/cm ³
Mez v pevnosti v tahu matrice	80	MPa

Tyto hodnoty byly využity pro výpočet vlastností kompozitu. Jak bylo uvedeno výše prosycení bylo zvoleno 40 % pro výpočty hustoty meze pevnosti je lepší zvolit objemový podíl vláken ten se vypočítá dle rovnice (1.4.2—1).

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - 0,6}{0,6} * \frac{1,77}{1,2}} = 0,504 \quad (2.4.1—1)$$

Tato hodnota byla využita pro výpočet hustoty výsledného opozitu a meze pevnosti kompozitu.

$$\sigma_{max} = 0,504 * 4\ 000 + (1 - 0,504) * 80 = 2\ 056\ Mpa \quad (2.4.1—2)$$

$$\rho_k = 0,504 * 1,77 + (1 - 0,504) * 1,2 = 1,487\ g * cm^3 \quad (2.4.1—3)$$

Tabulka 4: Vypočítané vlastnosti kompozitu

hustota kompozitu	1,49	g/cm ³
mez pevnost vtahu	2056	MPa

Pomocí hustoty se vypočítá výška vrstvy vzniklá jedním pramenem. K tomuto výpočtu se dále využije hodnota TEX udána na vláknech 1600 Tex. Z ní byla vypočtena hodnota hmotnosti vláken dlouhých 100 mm, což je délka tělesa, na 0,16 g. Pomocí hmotnosti vláken a známých hustot byl vypočten celkový objem jedné vrstvy. Pro jednoduchost výpočtů jsou uvedeny v cm.

$$V_f = \frac{0,16}{1,77} = 0,0904 \text{ cm}^3 \quad (2.4.1—4)$$

Díky známému objemovému podílu vláken byl dopočítán objem matrice.

$$V_m = \frac{0,0904 * (1 - 0,504)}{0,504} = 0,0889 \text{ cm}^3 \quad (2.4.1—5)$$

Celkový objem je poté součet těchto jednotlivých objemů.

$$V_k = 0,0904 + 0,0889 = 0,1793 \text{ cm}^3 \quad (2.4.1—6)$$

Známe základnu pásnice, na kterou se budou nalepovat jednotlivé vrstvy, a to je rozměr 100X17 mm, tudíž výpočet výšky je již jednoduchý, jen dojde ke korekci na mm.

$$h = \frac{V}{z * y} = \frac{0,1793}{10 * 1,7} * 10 = 0,105 \text{ mm} \quad (2.4.1—7)$$

Z této hodnoty jsme schopni také spočítat, jakou maximální sílu je schopná jedna vrstva vydržet. A to pomocí meze pevnosti, jen se musí vypočítat plocha v řezu a přepočíst na metry a MPa na Pa

$$F_{max} = \sigma_k * z * h = 2\,056 * 0,105 * 17 * \frac{1\,000\,000}{1\,000\,000} = 3\,686 \text{ N} \quad (2.4.1—8)$$

2.4.2 Výpočet pásnice

Základem výpočtu je hodnota ohybového momentu. Velikost ohybového momentu se dá převést na normálové napětí působící v nosníku. To se vypočítá dle rovnice (1.3.2—12). Jediná neznámá nutná k výpočtu je moment setrvačnosti. Zde však nastává problém, jelikož pro ten-

to výpočet je nutné znát polohu těžiště v prostoru a ta je proměnná s počtem vrstev, které je úkolem zjistit.

Výpočet je nutné rozdělit do několika částí a to:

- 1) Výpočet kvadratického momentu pásnice
- 2) Výpočet polohy těžiště pásnic
- 3) Výpočet polohy těžiště obrazce
- 4) Výpočet ramene těžiště pásnic
- 5) Výpočet centrálního kvadratického momentu obrazce

K těmto výpočtům sloužila následující tabulka. Uváděné rozměry jsou v mm a jejich mocninách. Pásnice jsou tělesa označená jako 1 a 2. Číslo jedna je spodní pásnice a číslo 2 je horní pásnice. Tabulka je pouze ilustrativní, nereprezentuje výsledné hodnoty.

Tabulka 5: Ilustrativní tabulka určená k výpočtům

n	y/mm	z/mm	S/mm ²	T _{iy} /mm	T _y	C _y /mm	I _i /mm ⁴	I/mm ⁴
1	2	17	34	1	34	-8,5	11,33	2 467,8
2	2	17	34	18	612	8,5	11,33	2 467,8
3	15	0,4	6	9,5	57	0	55,46	55,46
4	15	0,4	6	9,5	57	0	55,46	55,46
5	15	0,4	6	9,5	57	0	55,46	55,46
6	15	0,4	6	9,5	57	0	55,46	55,46
Σ			92		9,5			5 157,5

Pro výpočet je podstatná celá tabulka, avšak ke změnám dochází pouze u hodnot pásnic, části 1 a 2, při ovlivňování pouze výšky pásnic. Dále se samozřejmě s přibývajícím tloušťkou bude měnit poloha těžiště, a to bude ovlivňovat hodnotu kvadratického momentu tělesa. Změna plochy se vypočítá jednoduše jako šíře „z“ krát výška „y“.

Výpočet kvadratického momentu části „I_i“ tělesa je jednoduchý za využití rovnice (1.3.2—14), kde je možno zaměnit „y“ za „h“

$$I_i = \frac{z * h^3}{12} \quad (2.4.2—1)$$

Poloha těžiště jednotlivých obrazců se nalézají vždy v polovině jejich výšky, pro jednotlivé obrazce v mm se tedy vypočítá jako.

1. $0,5 * h$
2. $0,5 * h + h + 15$ (2.4.2—2)
- 3; 4; 5; 6. $0,5 * 15 + h$

Jako „h“ se v těchto výpočtech označuje výška pásnice, kterou chceme zjistit. Z poloh jednotlivých těžišť poté vypočítáme těžiště celého obrazce dle rovnice (1.3.2—17). Dalším výpočtem je výpočet ramene těžiště. Tento výpočet je opět velmi jednoduchý dle rovnice (1.3.2—18).

Konečným výpočtem je výpočet kvadratického momentu tělesa. Ty byly vypočítány po jednotlivých částech dle rovnice (1.3.2—15) každá zvlášť a součet byl proveden nakonec. K výpočtu počtu vrstev byl využit kvadratický moment části pásnice.

2.4.3 Výpočet počtu vrstev

Konečným výpočtem je výpočet počtů vrstev rovingu nutných pro dané zatížení letadla. Prvním výpočtem je výpočet napětí působící v nosníku v dané vzdálenosti od neutrální osy ležící v těžišti. Výpočet proběhl dle vzorce (1.3.2—12) pro maximální vzdálenost, která je rovna polovině výšky částí 3;4;5;6, což odpovídá 7,5 mm a k němu byla přičtena aktuální výška pásnice. Výpočet uveden z ilustračních dat převedených na základní jednotky.

$$\sigma = \frac{1450}{2467,83 * 10^{-12}} * (7,5 + 2) * 10^{-3} = 5\,581\,819\,410 \text{ Pa} \quad (2.4.3—1)$$

Výsledek uvedený v pascálech se dá převést na 5582 MPa. Jedná se pouze o ilustrativní výpočet s výškou pásnice 2 mm. Pro výpočet počtů vrstev je důležité najít bod u kterého dohází k tomu, že napětí působící v nosníku je rovno nebo menší mezi napětím vypočítaného pro kompozit, které odpovídá 2056 MPa. Pro výpočet potřebné tloušťky byla využita aproximace.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 6: Výsledná tabulka rozměrů a hodnot

	h	z	A	Sy	Ty	Cy	Ii	I
1	5,07	17	86,18	2,53	218,45	-10,03	184,6	8862,6
2	5,07	17	86,18	22,60	1948,05	10,03	184,6	8862,6
3	15	0,4	6	12,57	75,42	0	55,5	55,5
4	15	0,4	6	12,57	75,42	0	55,5	55,5
5	15	0,4	6	12,57	75,42	0	55,5	55,5
6	15	0,4	6	12,57	75,42	0	55,5	55,5
Σ			196,4		12,6			17947,1

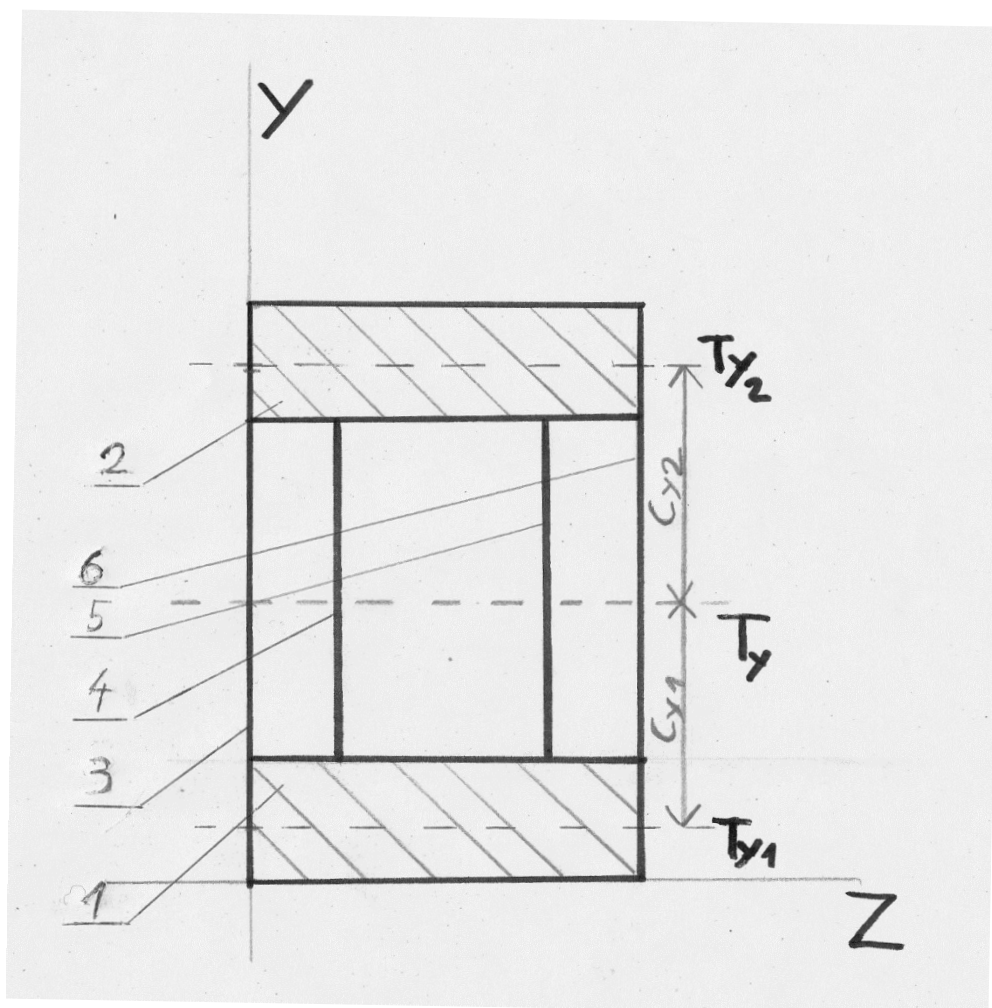
Výsledná hodnota napětí v nosníku byla počítána a vypočítána v základních jednotkách.

$$\sigma = \frac{1450}{8862 * 10^{-12}} * (7,5 + 5,07) * 10^{-3} = 2\,056\,470\,508\,Pa \quad (2.4.3—2)$$

Po převedení na MPa jde o hodnotu 2056 MPa. Hodnota meze pevnosti kompozitu byla vypočítána na hodnotu 2056 MPa. Jedná se tedy o stejnou hodnotu, čehož jsme chtěli docílit. Počet vrstev vypočítáme pomocí známé hodnoty výšky jedné vrstvy a známé hodnoty výšky pásnice, kterou jsme získali pomocí aproximace. Podílem těchto dvou hodnot výšky získáme počet jednotlivých vrstev, které jsou potřeba na výrobu pásnic.

$$Počet\ vrstev = \frac{5,07}{0,105} = 48,07 \quad (2.4.3—3)$$

V rámci bezpečnosti bylo rozhodnuto, že celkový počet vrstev bude 49.

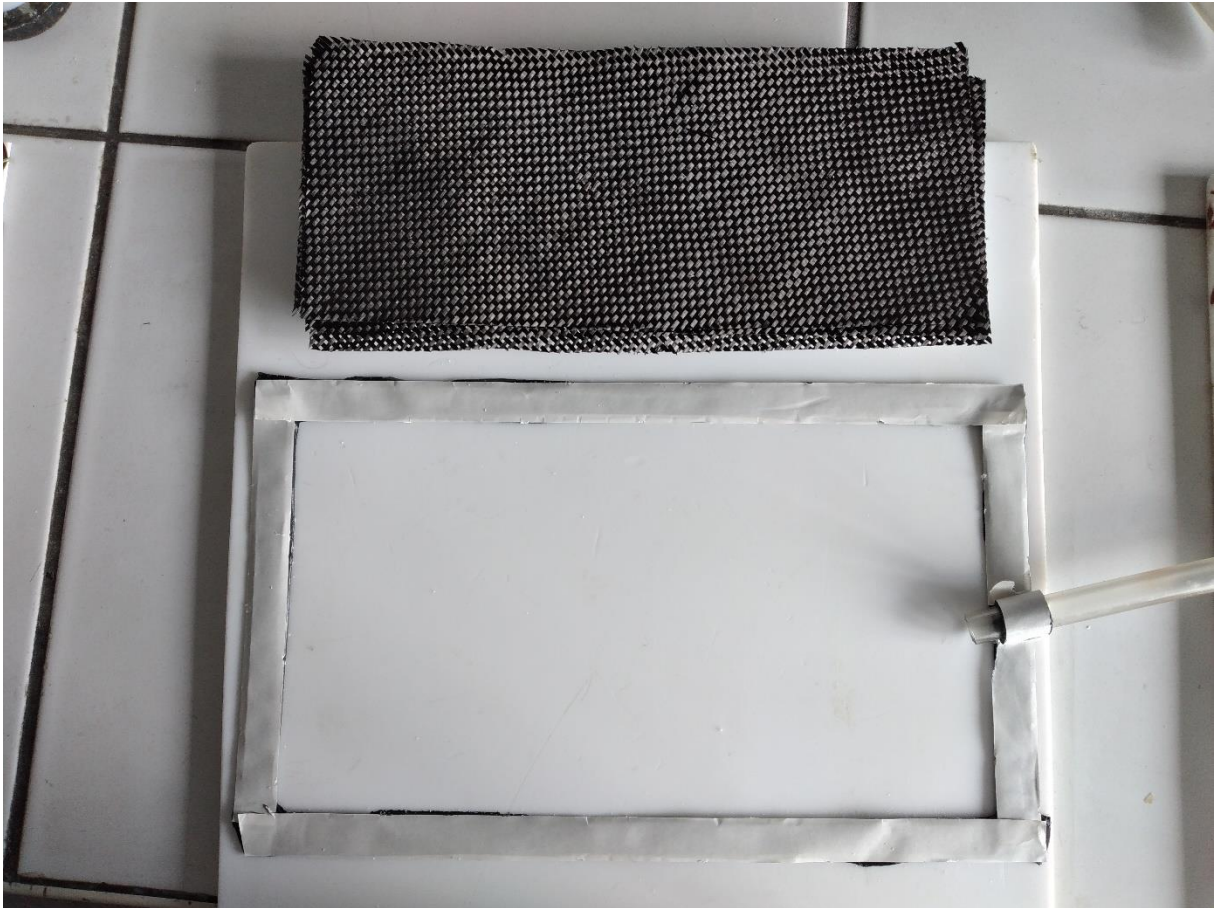


Obrázek 19: Nákres průřezu nosníku

2.5 Výroba kompozitního nosníku

Výroba probíhala tak, že jednotlivé vrstvy byly prosyceny komerční laminační pryskyřicí EPIKURE MGS LR 285 na bázi bisfenolu A 1,2,3 propantriolu a glycidyl etheru. Tvrdivlo bylo využito od stejné firmy LH 285 na bázi 3-aminomethyl -3,5,5- trimethylcyklohexylamin. Na pryskyřici i tvrdidle byly provedeny měření epoxidových skupin a aminového čísla, hodnoty byli srovnány s technickým listem a jejich poměry byli na základě toho porovnání. Změřené hodnoty odpovídali hodnotám v technickém listu, a tak bylo rozhodnuto o poměru 1/33 hmotnostní poměr a 1/2 objemový poměr [22]. Prosycení probíhalo na teflonové desce. Aby byly dodrženy rozestupy mezi jednotlivými stojkami, bylo využito expandovaného polystyrenu, který byl nařezán na potřebné rozměry. Rozměry základní desky byly stanoveny na 250 X 100 mm. Výroba probíhala tak, že jednotlivé vrstvy byly prosyceny odměřeným množstvím laminační epoxidové pryskyřice a poté na tuto vrstvu byla vložena distanční vložka

z expandovaného polystyrenu. Na distanční vložku byla opět navrstvena prosycená uhlíková tkanina. Tento postup se opakoval až do poslední navrstvené stojny. Na poslední vrstvu sendviče byla položena strhávací tkanina, kvůli jednoduššímu rozebírání. Na celou tuto sestavu byla umístěna vakuovací fólie a utěsněna po okrajích kaučukovou páskou. Nakonec byla celá forma odsáta a sendvič vyvakuován. Tvrzení probíhalo za normální teploty 24 hodin a následně bylo provedeno dotvrzení v sušárně při 75°C.

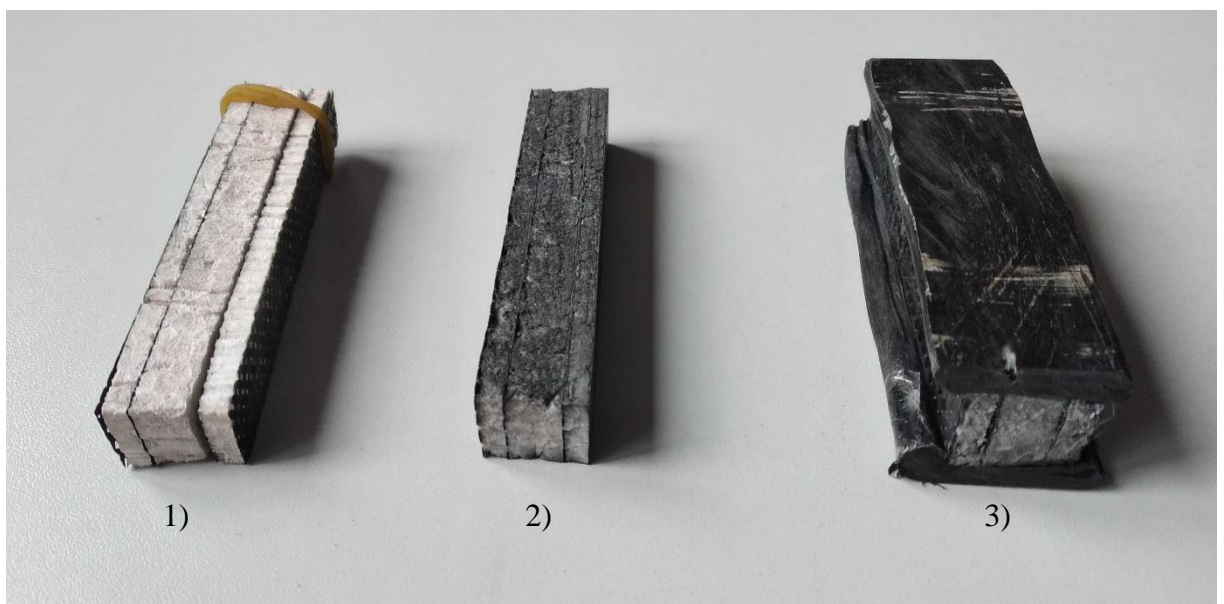


Obrázek 20: Příprava před vrstvením sendviče

Po vytvrzení byl sendvič odeslán, na nařezání pod vodním proudem, do externí firmy Synpo a.s. v Pardubicích na daný rozměr, který činil 100 X 17 mm. Při rozřezání došlo k nechtěné konizaci do lichoběžníkového tvaru. Tento tvar byl pro vytvoření nosníku nevhodný, a tak bylo provedeno jeho ruční zbroušení pomocí jemného brusného kamene ve vodném prostředí. Po této operaci bylo těleso ve tvaru obdélníku s rozměry 100 X 15 X 17 mm oproti původnímu které mělo mít rozměr 100 X 17 X 20 mm. První rozměr byl ovlivněn broušením a druhý rozměr byl ovlivněn zmenšením meziprostoru z důvodů stlačení expandovaného polystyrenu. Všechna tělesa byla změřena a byla vypočtena směrodatná odchylka 0,16 mm v jednom smě-

ru a 0,33 mm v druhém směru. To jsou velmi malé odchylky, které nejsou pro konstrukci podstatné. O tuto změnu rozměru byly upraveny vstupní údaje výpočtů.

Výroba pásnic byla spojena s kompletací celého nosníku. Probíhala tak, že vypočítaný počet vláken byl prosycen, opět komerční pryskyřicí LR 285 a tvrdidlo LH 285 [22], s hmotnostním obsahem vláken 60 % a pryskyřice 40 %. Takto prosycený kompozit byl umístěn na teflonovou podložku a na něj umístěn sendvič stojen a tento sendvič byl opět umístěn prosycený roving. Takto bylo pokračováno pro všechny nachystané vzorky. V závěru byla na všechny nosníky přiklopena další teflonová deska a ta byla zatížena. Nosníky byly vytvrzeny 24 hodin při pokojové teplotě a dotvrzeny 24 hodin v sušárně při teplotě 75°C.



Obrázek 21: Výrobní kroky nosníku

1) Stojny po rozřezání 2) Stojny po zbrúšení 3) Hotový nosník

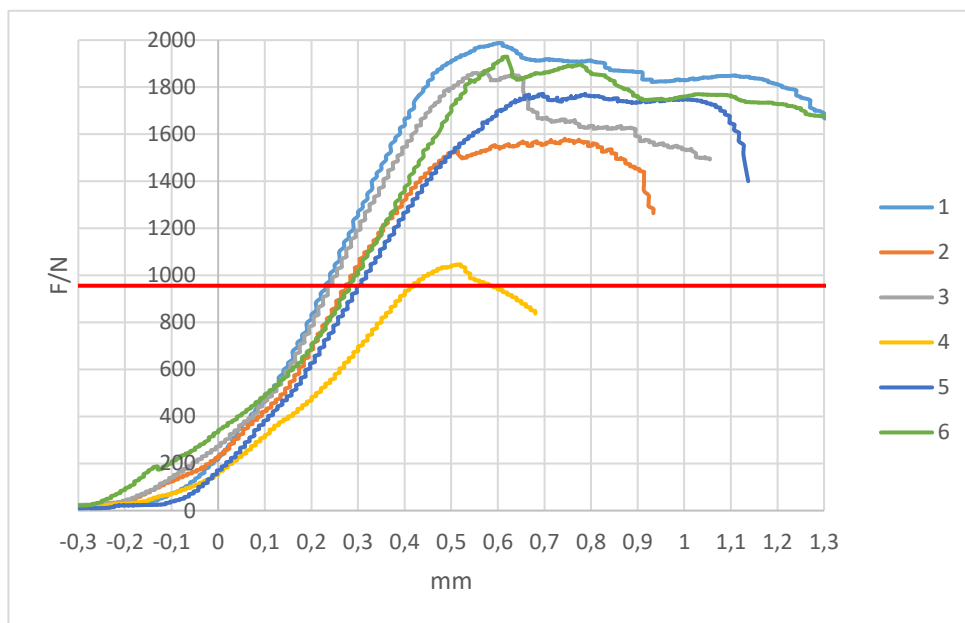
Výsledné vzorky nosníků byly podrobeny zkoušce tříbodovým ohybem. Zkouška byla provedena na stroji MTS-4/M. Tato zkouška byla inspirována normou ČSN EN 2562. Vzdáleností podpěr 80 mm. Rychlost pohybu byla nastavena na 2 mm*min⁻¹. Pro naše účely byly rozměry kompozitních vzorků odchýleny od normy, nicméně nedošlo k ovlivnění výpočtů.



Obrázek 22: Zkouška ohybem

3 VÝSLEDKY

Všech těles bylo podrobena zkoušce ohybu na stroji MTS-4/M a nejslabší výsledek bylo zatížení 1 046 N tělesa č.4. Tento výsledek se však velmi vymyká ostatním křivkám. Nejspíše zde bude velmi hrubá výrobní vada.



Obrázek 23: Závislost síly na prohnutí

Ostatní křivky opisují velmi podobnou trajektorii a jejich maxima se pohybují v rozmezí od 1 581 N u nejslabší křivky tělesa 2 po relativně stejná maxima okolo hodnoty 1 800 N rozdíly jsou nejspíše způsobeny rozdílnou výrobní kvalitou. Vypočítanou hodnotu zátěže 956 N, která působí na polovinu křídla a je polovinou vztahové síly, však překročily všechny křivky o zhruba dvojnásobek až na křivku číslo 4.

Tabulka 7: Maximální hodnoty síly při ohybu

Těleso	F_{\max}/N
1	1 988
2	1 581
3	1 866
4	1 046*
5	1 772
6	1 930

Průměr = $1\,827 \pm 142,5$ N

Průměrná hodnota přesahuje potřebnou hodnotu 956 N o téměř dvojnásobek. Přesně ji překračuje 1,91krát.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámení se kompozitními materiály využívaných v letectví a leteckém modelářství. Dále pak seznámení s částmi letecké konstrukce a uvedení těchto částí, kde dochází k využití kompozitních materiálů. V závěrečné části teoretické části byly představeny výpočty nutné pro výpočet sil působících na hlavní nosné plochy a dále pak sil působících na hlavní nosník těchto nosných ploch. Dále pak byly uvedeny výpočty pro síly působící uvnitř nosníku na materiál, ze kterého je nosník vyroben. Nakonec byly uvedeny výpočty výsledného kompozitu.

V praktické části bylo základem navržení kompozitního nosníku pro model letadla modelářské kategorie F3B, což je kategorie víceúlohových bezmotorových letadel. Základem byl výpočet sil, jaké musí nosné plochy a nosník samotný vydržet. Z těchto výpočtů a navrženého tvaru nosníku byly vypočítány síly, působící uvnitř nosníku a pomocí aproximace bylo vypočítáno potřebný počet vrstev kompozitního materiálu. Navržený nosník byl vyroben postupem, který napodoboval výrobu skutečného křídla. Vyrobený nosník byl podroben ohybové zkoušce, zda skutečný vyrobený nosník odpovídá teoretickým výpočtům.

Výsledná průměrná maximální síla, byla změřena na $1\ 8727 \pm 142,5$ N, což se od maximální vypočítané síly 956 N liší o 191 %. Při ohybové zkoušce nebylo pozorováno porušení pásnic, které byly hlavním předmětem výpočtu, nejpravděpodobněji došlo k porušení stojen. Stojny nebyly předmětem žádného výpočtu a o jejich počtu a síle došlo po dohodě s konzultantem (4 vrstvy).

Dle porovnání výsledků je jasné, že mnou provedené výpočty jsou dostačující a síla, které pásnice odolaly, byla daleko vyšší díky synergickému efektu, který výpočty příliš nezohledňují. Zohledňovat při výpočtech synergický efekt je dle současných znalostí velice obtížné a pro tuto aplikaci není tolik podstatné, protože synergický efekt vytvoří vyšší než vypočítané hodnoty, tudíž vypočítané hodnoty jsou podhodnoceny. Nosník vydržel požadovanou sílu, a ještě ji téměř dvakrát překročil.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
- [3] ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] VLÁKNA PRO KOMPOZITY. *Web.archive.org* [online]. [cit. 2021-06-29]. Dostupné z:
<https://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [6] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-440-0.
- [7] *Základy pevnosti létajících modelů a modelářský materiál*. Praha: Naše vojsko, 1955. ISBN 1329/3-4-137.
- [8] GAY, Daniel, S HOA a Stephen W TSAI. *Composite materials: design and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003, xiii,531 p. ISBN 15-871-6084-6.
- [9] Hardware letadla...skládanka, co je schopná vzlétnout. *Inadhled* [online]. 2014 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.inadhled.cz/zajimavosti/hardware-letadlaskladanka-co-je-schopna-vzletnout/>
- [10] HAYWARD, Justin. *From Start To Finish: How The Boeing 787 Is Made* [online]. 2021 [cit. 2021-6-12]. Dostupné z: <https://kompozit.org/tr/tr/how-the-boeing-787-is-made/>
- [11] *Materials usen in 787 body* [online]. [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Usage-of-composites-in-Boeing-787-Dreamliner-structure-22_fig1_320951033

- [12] SLAVÍK, Svatomír. *Drak a systémy, nouzové vybavení letounů (021 01 a 021 04)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005 [i.e. 2006], 372 s. ISBN 80-7204-437-0
- [13] ČORBA, Stanislav. *Aerodynamika, konstrukce a systémy letadel: studijní modul 13*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 450 s. ISBN 80-7204-395-1.
- [14] MERTL, Vlastimil. *Konstrukce a projektování letadel*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR Real, 2000, 133 s. ISBN 80-214-1789-7.
- [15] Composite Manufacturing | Aerospace Engineering Blog [online]. 2012 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://aerospaceengineeringblog.com/compositemanufacturing/>
- [16] (osobní sdělení) [Zlín letecko modelářský klub 1 p.s.] [Dolní dědina 108, Příluky, 760 01 Zlín] [8-1-2020]
- [17] *O letadlech* [online]. 2010 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Konstr_nosniku.aspx
- [18] JANATKA, Jaroslav. *Přímé tenkostěnné nosníky: teorie výpočtu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Teoretická knihovna inženýra.
- [19] *Svazek F3 Radiem řízené modely větroňů* [online]. 1.1.2015 [cit. 2021-6-14]. Dostupné z: http://svazmodelaru.cz/klem/Pravidla/FAI_F3BJ_15.pdf
- [20] *Typy uspořádání mezipásových prutů příhradových vazníků* [online]. [cit. 2021-7-11]. Dostupné z: <https://detailyok.webnode.cz/halovy-objekt/stresni-konstrukce/vazniky/>
- [21] *Delivery programme and characteristics for Tenax® STS filament yarn* [online]. 2010 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/12/e94fc2e1589ad6fa03e71a43685a13c154061642.pdf>
- [22] Lange Ritter [tištěné]. *L285 + H285/H286/H287*. [cit. 2021-05-29]
- [23] F3K a lietanie na svahu/vo vlně. *RCmania RChobby web* [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <http://www.rcmania.cz/viewtopic.php?f=19&t=37127&start=45>
- [24] *Těžiště* [online]. [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/lausova/cv11-16.pdf>

- [25] SEDLÁČEK, Dominik. *Studium kompozitních materiálů na bázi epoxidových pryskyřic a uhlíkových vláken*. Pardubice, 2019. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Miroslav Večeřa, CSc.

PŘÍLOHY

Příloha A – Část technického listu pryskyřice	55
---	----

PŘÍLOHA A – ČÁST TEHNICKÉHO LISTU PRYSKYŘICE

Specifikace

Vlastnost	Pryskyřice L 285	Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
Hustota při 25 °C (g/cm ³)	1.20-1.25	0.94-0.97	0.95-0.98	0.97-1.0
Viskozita při 25 °C (mPa.s)	600-900	60-100	60-100	60-100
Epoxidový ekvivalent	160 - 170	-	-	-
Podíl aminů (mg KOH/g)	-	350-400	450-500	450-500
Podíl barviva (Gardner)	max 6	max 4+	max 4+	max 4+

+ platí pouze pro nenabarvená transparentní tvrdidla, běžné jsou tvrdidla modře obarvená

Data při zpracování

Vlastnost	Pryskyřice L 285	Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
EP - hodnota	0.59-0.63	-	-	-
Aminový ekvivalent	-	62-67	62-67	62-67
Teplota zpracování	18 – 30 °C			
Skladovatelnost při 15-25 °C	>12 měsíců v originálním obalu			
Viskozita směsi při 25 °C	300 – 500 mPa.s			
Nárůst teploty při vytvrzování	Viz. diagram			
Tvrzení	Předtvrzení při 20-25 °C			
Temperace	15 hod/50 °C až 15 min/150 °C			

Směšovací poměry

	L 285 : Tvrdidlo 285 / 286 / 287
Hmotnostní díly	100 : 38 - 40
Objemové díly	100 : 47 - 50

Doba zpracovatelnosti

Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
45 – 60 min	100 – 120 min	cca. 300 min

Data nezpevněné epoxidové směsi

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		L285+H285	L285+H286	L285+H278
Hustota při 25 °C	(g/cm ³)	1.20	1.20	1.20
Ohybová pevnost	(N/mm ²)	118	110	115
Pevnost v tahu	(N/mm ²)	80	75	73
Rázová pevnost	(Nmm/mm ²)	46	52	50
Tažnost	(%)	4.8	4.8	5.3
Pevnost v tlaku	(N/mm ²)	126	132	130
E-modul z ohybové zkoušky	(N/mm ²)	3400	3300	3300
Cyklická ohybová pevnost dle DLR (DFVLR)	10%	1.7 exp4	1.2 exp4	2.0exp6
	90%	1.3exp6	5.6 exp6	2.0exp6

Teplota skelného přechodu (T_g)

Předtvrzeno při 20 – 25 °C Temperováno-----	15hod/40 °C	15hod/50 °C	15hod/60 °C	10hod/80 °C
L 285 + H 285	60 °C	68-73 °C	73-75 °C	75-80 °C
L 285 + H 286	60 °C	70-75 °C	75-80 °C	85-90 °C
L 285 + H 287	60 °C	70-75 °C	80-85 °C	95-100 °C

Měřeno systémem Mettler TA 4000

Data zpevněného systému

GfK- zkušební tělíčko: 16 vrstev sklo-tkaniny Interglas 92626 I 550, 4 mm tloušťka
CfK- zkušební tělíčko: 8 vrstev carbon-tkaniny Interglas 02924, 2 mm tloušťka
SfK- zkušební tělíčko: 15 vrstev aramidové tkaniny Interglas 98613, 4 mm tloušťka
Obsah vláken při zkoušce. 40-45%objemových, přepočteno na 43% objemových

L 285 + H 285

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost (N/mm ²)		484	712	349
Pevnost v tahu (N/mm ²)		485	541	508
Pevnost v tlaku (N/mm ²)		315	383	138
Rázová pevnost (N/mm ²)		41	51	28
E – modul ze zkoušky ohybem (kN/mm ²)		21	43	27

L 285 + H 286

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost (N/mm ²)		483	693	339
Pevnost v tahu (N/mm ²)		485	532	479
Pevnost v tlaku (N/mm ²)		321	350	135
Rázová pevnost (N/mm ²)		38	48	29
E – modul ze zkoušky ohybem (kN/mm ²)		21	43	26

L 285 + H 286

Tvrzeno: 24 hod/20 – 25 °C + 15 hod/50 – 55 °C		GfK	CfK	SfK
Ohybová pevnost (N/mm ²)		483	693	339
Pevnost v tahu (N/mm ²)		485	532	479
Pevnost v tlaku (N/mm ²)		321	350	135
Rázová pevnost (N/mm ²)		38	48	29
E – modul ze zkoušky ohybem (kN/mm ²)		21	43	26



SKOLIL KOMPOZIT s.r.o.
Jankovcova 1059/12
170 00 Praha 7

tel/fax: 220 873 550, 551, 553 www.skolil.cz

strana 4

Lange Ritter L 285 + H285/ H286/ H287