

KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÁ KONSTRUKCE PRO HYDROFOIL PRO VODNÍ SPORTY

Bc. Ladislav Haiker

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ladislav Haiker
Osobní číslo:	T24480
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Kompozitní sendvičová konstrukce pro Hydrofoil pro vodní sporty

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů pro sportovní pomůcky.
- Přehled kompozitních materiálů, výztužní systémy, vlastnosti a použití.
- Návrh kompozitní sendvičové konstrukce pro Hydrofoil s využitím kompozitních a polymerních materiálů.
- Experimentální testování dle doporučení.
- Návrh prototypu se zvolenou orientací výztuže a volba vláken, odůvodnění.
- Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J., Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton, 2018.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-015-8. 2011.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o kompozitních materiálech, jejich druzích, vlastnostech a možnostech použití. Zejména se diplomová práce věnuje kompozitní sendvičové struktuře a jejímu možnému využití pro vodní sporty. V praktické části diplomové práce byl nejprve vytvořen počítačový model geometrie hydrofoilu a byl zkoumán simulacemi proudění kapalin. Dále pak byl tento model po volbě vhodného jádra a vhodné geometrie fyzicky zhotoven pomocí technologie 3D tisku a následném laminování uhlíkovým vláknem. Po dokončení výroby byl jeden z dílů testován na jeho pevnost v ohybu, aby se prokázala jeho způsobilost pro reálné použití. V posledním kroku pak došlo k ověření funkčnosti při reálném použití.

Klíčová slova: Hydrofoil, kompozit, sendvičová struktura

ABSTRACT

This master's thesis focuses on composite materials, their types, properties, and potential applications. Special attention is given to composite sandwich structures and their possible use in water sports. In the practical part of the thesis, a computer model of hydrofoil geometry was first created and analyzed using computational fluid dynamics simulations. Based on the simulation results and selection of a suitable core material and geometry, a physical prototype was then manufactured using 3D printing technology and subsequently laminated with carbon fiber. After the production was completed, one of the components was tested for bending strength to verify its suitability for real-world applications. In the last step, the functionality was verified under real-world conditions.

Keywords: Hydrofoil, composite, sandwich structure

Poděkování:

Děkuji paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D., za veškerou pomoc i rady při vypracovávání této práce, jakož i za její vedení v praktické části diplomové práce. Dále patří poděkování organizaci Shredhouse, jejíž vliv mi přinesl do života velkou inspiraci.

Motto:

*„Kolik na poli čmeláků, tolik na těle boláků“
Bc. Štěpán Kašík*

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 FUNKCE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.2.1 PODLE MATERIÁLU MATRICE	14
1.2.2 PODLE ZPEVNŮJÍCÍ FÁZE	15
2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY.....	16
2.1 VLIV TLOUŠTKY VLÁKEN NA PEVNOST KOMPOZITU.....	16
2.2 ANIZOTROPIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	16
2.3 LAMINÁTY	17
2.4 DRUHY VLÁKEN	18
2.4.1 Skelná vlákna	19
2.4.2 Výroba skelných vláken.....	19
2.4.3 Uhlíková vlákna	21
3 POLYMERNÍ KOMPOZITY	22
3.1 KOMPOZITY S POLYMERNÍ MATRICÍ	22
3.1.1 Matrice z termoplastů.....	23
3.1.2 Matrice z reaktoplastů	23
4 KOMPOZITNÍ SEDNVIČOVÁ STRUKTURA	25
4.1 MATERIÁLY JÁDRA	26
4.1.1 Tuhé pěny	27
4.1.2 3D Tištěná jádra	27
5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE SPORTU	29
5.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE VODNÍCH SPORTECH.....	29
6 HYDROFOIL	29
6.1 PRINCIP FUNKCE HYDROFOILU	30
6.2 TYPY HYDROFOILŮ	33
6.3 NEŽÁDOUCÍ HYDRODYNAMICKÉ EFEKTY	34
6.3.1 Spray	34
6.3.2 Ventilace	35
6.3.3 Kavítace.....	36
6.4 ČÁSTI FULLY SUBMERGED HYDROFOILU	38
6.5 TVARY KŘÍDEL	39
7 VÝROBCI HYDROFOILŮ.....	40
8 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	41

II PRAKTICKÁ ČÁST	42
9 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	43
10 VÝPOČET HYDROFOILU	44
10.1 VOLBA PRŮŘEZŮ KŘÍDLA PRO JEDNOTLIVÉ VARIANTY	45
10.2 VÝPOČTY KŘÍDEL	47
10.2.1 Výpočty pro variantu Clark Y	48
10.2.2 Výpočty pro variantu NACA 2412	48
11 NÁVRH 3D TVARU	49
11.1 MODELOVÁNÍ PRVNÍ VARIANTY	49
11.2 MODELOVÁNÍ DRUHÉ VARIANTY	50
12 TVORBA ZBYLÝCH ČÁSTÍ HYDROFOILU.....	51
12.1 ZADNÍ KŘÍDLO	51
12.2 OSTRUHA (MAST).....	51
12.3 TRUP (FUSELAGE)	52
13 SIMULACE PROUDĚNÍ	53
13.1 SIMULACE PROUDĚNÍ PRVNÍ VARIANTY	53
13.2 SIMULACE PROUDĚNÍ DRUHÉ VARIANTY	54
14 VOLBA VARIANTY	55
15 VOLBA JÁDRA	55
16 VÝROBA SENDVIČOVÉ STRUKTURY	56
16.1 VÝROBA JADER	56
16.2 LAMINOVÁNÍ JADER	57
16.3 VÝROBA TRUPU	59
17 ZKOUŠKA V OHYBU ASTM D790	60
18 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY PRO HLAVNÍ KŘÍDLO	64
19 DOKONČENÍ A SESTAVENÍ HYDROFOILU	65
20 TESTOVÁNÍ PŘI PRAKTICKÉM POUŽITÍ.....	69
ZÁVĚR.....	70
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
SEZNAM OBRÁZKŮ	78
SEZNAM TABULEK.....	80
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	81
SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Kompozitní materiály představují v moderním inženýrství klíčovou oblast výzkumu a vývoje díky své mimořádné kombinaci mechanických vlastností, nízké hmotnosti a odolnosti vůči vnějším vlivům. Tyto materiály se staly nedílnou součástí mnoha průmyslových odvětví, včetně automobilového, leteckého a lodního průmyslu. V rámci těchto aplikací se často používají sendvičové struktury, které nabízejí optimální kombinaci pevnosti, tuhosti a minimální hmotnosti.

Sendvičové struktury se skládají z lehkého jádra umístěného mezi dvě tuhé povrchové vrstvy. Tato konfigurace zajišťuje vysokou ohybovou tuhost a pevnost při současném zachování nízké hmotnosti. Díky těmto vlastnostem nachází sendvičové struktury široké uplatnění v konstrukcích s požadavky na vysokou výkonnost; například v dopravních prostředcích, sportovním vybavení a v hydrodynamických systémech.

V oblasti sportu sehrály kompozitní materiály zásadní roli při zlepšování výkonu a bezpečnosti sportovců. Díky své lehkosti a pevnosti se kompozitní materiály používají například při výrobě karbonových rámců jízdních kol, lyžařského vybavení, hokejových holí nebo závodních lodí. Zvláště v dynamických sportech, kde hraje roli každý gram hmotnosti a zároveň je nutná vysoká pevnost, jsou kompozitní materiály nedocenitelné. Jedním z moderních příkladů využití kompozitních materiálů a sendvičových struktur je konstrukce hydrofoilu, což je speciální typ křídla, jež se používá k nadzvednutí plavidla nad hladinu vody. Tím se výrazně snižuje hydrodynamický odpor a zvyšuje se efektivita pohybu po vodní hladině. Hydrofoily se stávají stále populárnějšími v lodním sportu, zejména v oblasti závodních plavidel a rekreačních vodních sportů.

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh, optimalizaci a výrobu hydrofoilu s využitím moderních kompozitních materiálů a sendvičové struktury. V teoretické části práce bude provedena analýza dostupných materiálů a konstrukčních technik používaných při výrobě sendvičových struktur a hydrofoilů. Praktická část se zaměří na návrh, výrobu a testování experimentálního modelu hydrofoilu.

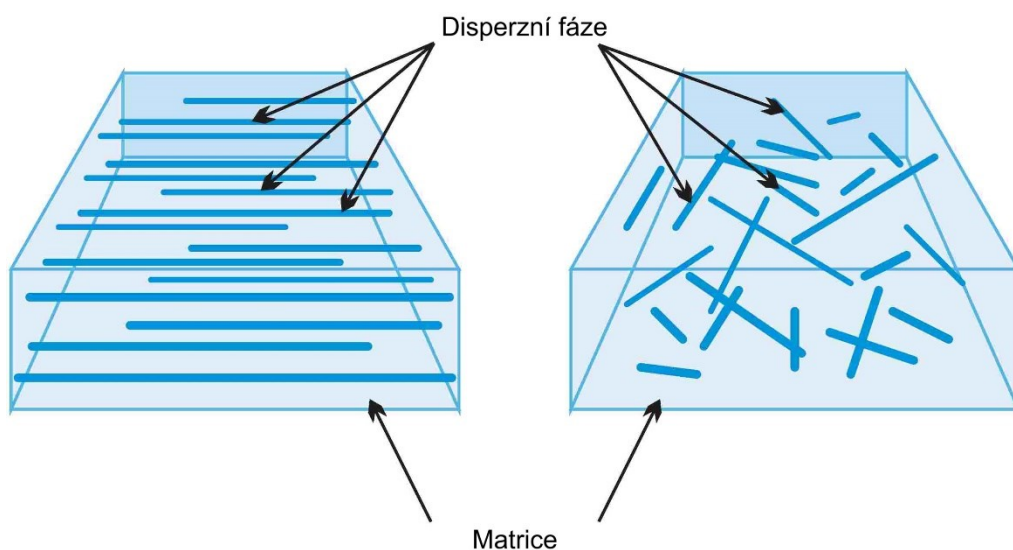
I TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou širokou a velmi hojně používanou skupinou materiálů. Jejich výhoda tkví především v možném spojování dvou a více různých materiálů a jejich společné synergii. Použití těchto materiálů je dnes stále běžnější a způsoby jejich využití jsou jen velmi málo limitovány. Kompozitní materiál, nebo zkráceně také kompozit, je materiál, který je složen ze dvou a více jiných materiálů s odlišnými vlastnostmi, z nichž minimálně jeden se nachází v pevném skupenství. Toto spojení pak umožňuje kombinovat vlastnosti jednotlivých složek a tím dosáhnout velmi dobře využitelného materiálu. Nejčastěji uváděným příkladem je obvykle beton, který je směsí cementu a kamenitých přísad. Díky tomu je beton velmi tvrdý, ale podstatněji snáz tvarovatelný než prostý kámen. Přesto, že jsou kompozity již velmi dlouho používaným materiálem a je možné je nalézt i jako přírodní materiály, jsou dnes velmi často využívány zejména při použití polymerů a podobných moderních materiálů jako jejich složek. [1][2][3]

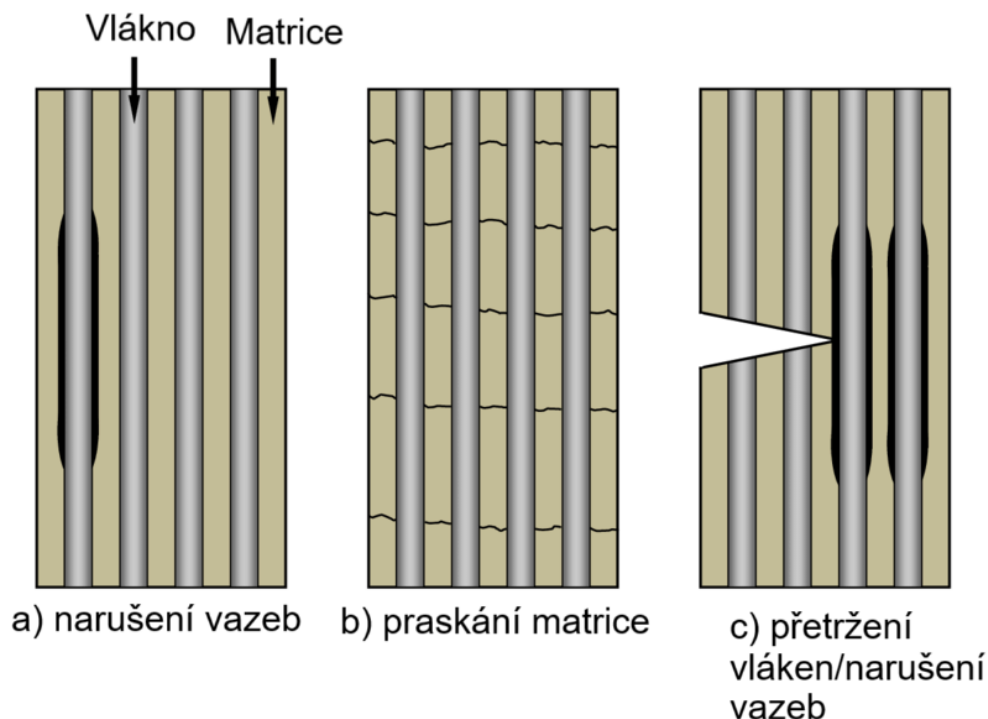
1.1 FUNKCE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály se skládají minimálně ze dvou základních složek neboli fází. První základní fází je matrice, která obklopuje ostatní fáze, drží tvar a přenáší zatížení. Tato matrice může být z nejrůznějších materiálů jako kov, keramika či polymer. Druhou základní složkou je zpevňující fáze, nebo také disperze. Tato složka, či složky, má za úkol díky své pevnosti vyztužit matrici a ustát namáhání přenesené matricí. Zpevňující fáze může být v matrici přítomná ve formě částic, například jako štěrk v betonu, nebo také ve formě vláken. Vlákná v matrici se dělí na krátká, dlouhá a spojitá podle své délky.



Obrázek 1 Zobrazení vláknových kompozitů [7]

Největší výhoda kompozitních materiálů spočívá při namáhání tahem v jejich synergii. Při zatížení tahem se měkká matrice začne snadno deformovat a přenesení napětí na zpevňující fázi.



Obrázek 2 Rozvoj trhliny ve vláknovém kompozitu [8]

Díky tomu je kompozit jako celek schopen vydržet namáhání, které by jinak samotná matrice nevydržela. Tento jev bohužel neplatí vždy, protože při jiných způsobech namáhání nemají často složky možnost zachovat svou orientaci a uspořádání. [1][3][4]

1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály jsou velmi širokou skupinou materiálů. I proto je třeba je rozdělit do jednotlivých skupin, aby byly navzájem od sebe odlišeny. Rozdělení lze provést podle nejrůznějších kritérií, ale nejčastěji se používají následující dva způsoby: [3][4]

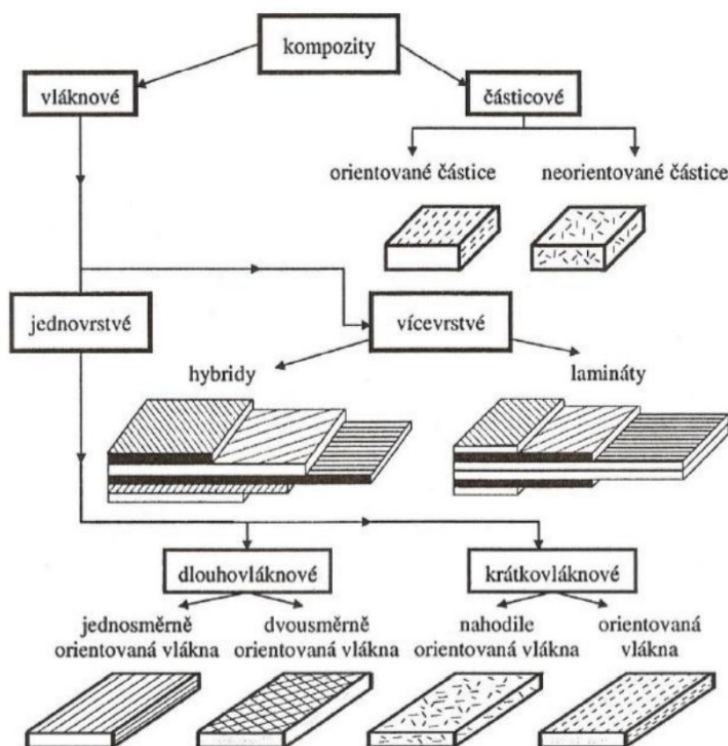
1.2.1 PODLE MATERIÁLU MATRICE

Podle materiálu matrice se kompozity nejčastěji dělí na:

- Kompozitní materiály s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC)
- Kompozitní materiály s keramickou maticí (Ceramics Matrix Composites – CMC)
- Kompozitní materiály s polymerní maticí (Plastic Matrix Composites – PMC)
- Ostatní kompozitní materiály [3][4]

1.2.2 PODLE ZPEVNŮJÍCÍ FÁZE

Zpevňující fáze se mohou lišit jak materiálem, tak svou strukturou či geometrickou charakteristikou. Nejzákladnějším typem rozdělení je, zda má kompozit disperzní fázi pevnou, kapalnou, nebo plynnou. Nejčastější kompozity mají jednu, nebo více pevných fází. Kompozitní materiály s kapalnou disperzí nejsou příliš časté. Řadí se sem především materiály jejichž póry jsou naplněny mazivem. Do skupiny s plynnou disperzí patří například kovové pěny a jim podobné materiály. Podstatným rozdílem je také geometrická charakteristika disperzní fáze, podle které se také kompozitní materiály rozdělují, protože se tím mění i vlastnosti samotného kompozitu. Tato fáze se může v matrici nacházet ve formě částic, granulí (pravidelných i nepravidelných tvarů) a různě dlouhých vláken s menším či větším systémem uspořádání. [3][4]



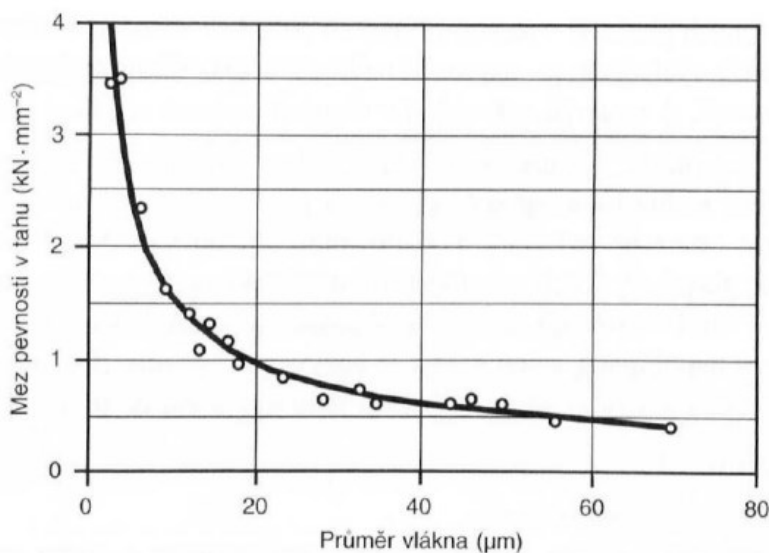
Obrázek 3 Rozdělení kompozitů podle výztuže [10]

2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

Vláknové kompozity jsou velmi často používanou skupinou kompozitních materiálů. Typ a délka vláken se vždy liší v závislosti na požadovaných vlastnostech kompozitu. Výsledný kompozit má vysokou pevnost a tuhost díky použití vláken jako výztuže. Jejich využití je velmi časté například v letectví, automobilovém a námořním průmyslu. [1][2][9]

2.1 Vliv tloušťky vláken na pevnost kompozitu

Pevnost a tuhost kompozitního materiálu nezávisí pouze na materiálu matrice a zpevňující fázi. Dalším důležitým parametrem je také tloušťka vláken výztuže. V praxi materiály nikdy nedosahují teoreticky možných hodnot pevností a odolností. To je způsobeno přítomností vad a nečistot v materiálu, které tyto hodnoty snižují. Tento jev se minimalizuje použitím vláken s velmi malým průměrem, u kterých klesá pravděpodobnost přítomnosti velkých vad a defektů. Větší množství tenkých vláken bude mít tedy větší pevnost než malé množství tlustších vláken. U menších vláken také dochází k lepší distribuci napětí v kompozitu a případné selhání jednoho vlákna oslabí kompozit méně. Vlákná se obvykle vyrábí v průměrech okolo 10-14 μm . [1][9]

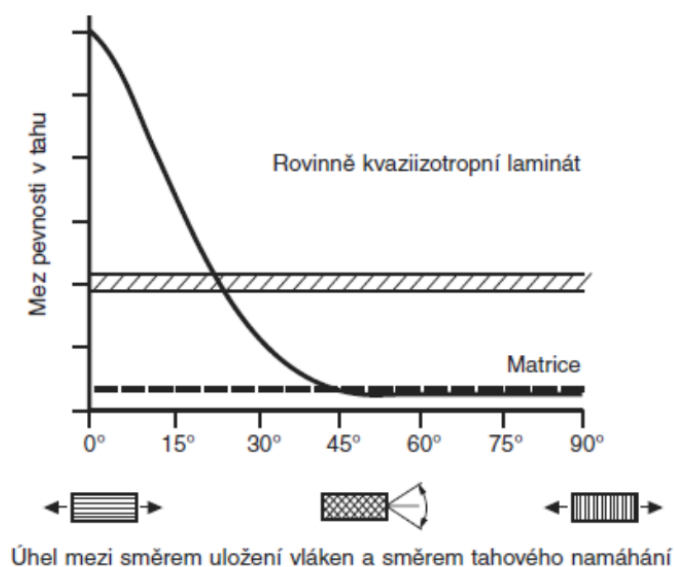


Obrázek 4 Vliv průměru skelného vlákna na pevnost [1]

2.2 Anizotropie kompozitních materiálů

Každý vláknový kompozit je vysoce anizotropní. Tento fakt je způsoben tím, že vlákna v kompozitu mohou přenášet pouze axiální zatížení. S měnícím se úhlem zatížení je matrice nucena stále více přenášet zatížení místo vláken. S výrazně nižší pevností matrice to ale

způsobuje podstatné zeslabení kompozitního materiálu v radiálním směru. Tento typ kompozitu je nazývaný jednosměrný, nebo také jednosměrně vyztužený. Anizotropie jiných kompozitních materiálů závisí na typu jejich výztuže. Kompozity s částicovou disperzní fází budou například mnohem méně anizotropní než kompozity s dlouhými vlákny. [1][5]



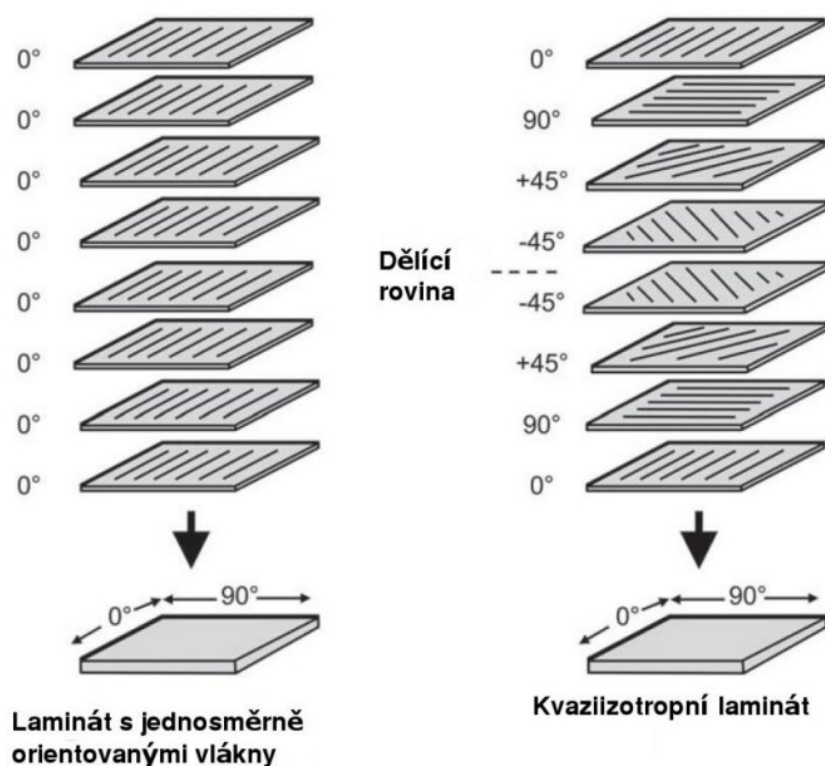
Obrázek 5 Závislost pevnosti kompozitu na úhlu vláken [1]

Anizotropie se u vláknových kompozitů obvykle snižuje na minimum použitím více vrstev jednosměrných kompozitů. Každá vrstva je schopna výborně přenášet napětí v určitém směru a kombinací těchto vrstev je poté celek schopen odolávat napětí bez ohledu na úhel namáhání. Tyto více vrstvé vláknové kompozity se, jak ukazuje obrázek 3, dělí na lamináty a hybridy. U laminátů je každá vrstva složena ze stejného materiálu a rozdíl je pouze v orientaci vláken, zatímco hybridní kompozitní materiály mohou mít v různých vrstvách také různé materiály. [1][5]

2.3 Lamináty

Lamináty jsou skupinou kompozitních materiálů s širokou škálou využití. Každá vrstva neboli lamela má obvykle jednosměrně orientovaná vlákna a spojením těchto lamel lze dosáhnout požadovaných vlastností. Při návrhu laminátových kompozitů se uvažuje, že spojení jednotlivých vrstev je dokonalé, nekonečně tenké a odolné proti smykovému namáhání. Každé spojení je tedy schopno zcela přenášet deformace mezi vrstvami. Mezi největší výhody laminátů patří velká pevnost, nízký součinitel teplotní roztažnosti a vysoká odolnost proti korozi. Naopak mezi jejich nevýhody patří těžko předvídatelné chování materiálu a nízká pevnost v příčném směru. Jak vyplývá z obrázku 5, při úhlech zatížení

větších než 45° je pevnost jednosměrného kompozitu nižší než pevnost samotné matrice. Lamináty se proto mohou vyrobit s dostatečným množstvím vrstev v různých orientacích, nebo použitím vrstev, které budou orientovány podle hlavních směrů namáhání. Tímto lze snížit množství potřebných vláken na čtvrtinu. Velká výhoda laminátů tedy spočívá v cíleném uspořádání vláken a tím i jejich účinně řízené anizotropii. Tento fakt je důvodem, proč se lamináty téměř nevyrábějí jako univerzálně použitelný materiál, ale vždy se bere v potaz tvar, funkce, a především hlavní směr namáhání pro konkrétní aplikace. Díly jsou tedy konstruovány tak, aby ve směru hlavních namáhání bylo dostatečné množství vrstev vláken. [1][2][9]



Obrázek 6 Orientace vrstev laminátu [11]

2.4 Druhy vláken

Vláken pro vyztužování matrice je mnoho druhů, každý s jinými vlastnostmi. Mohou být například přírodní jako bavlna a celulóza, nebo uměle vyráběná jako karbid křemíku (SiC). Mezi nejčastěji používané typy vláken však patří:

- Skelná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Aramidová vlákna
- Bórová vlákna
- Ostatní [2][4]

2.4.1 Skelná vlákna

Již podle názvu je zřejmé, že skelná vlákna budou mít velmi podobné vlastnosti jako sklo. Těmito vlastnostmi je zejména pevnost a odolnost proti korozi. Mezi jejich přední výhody také patří nízká hmotnost a nízká cena. Jejich tuhost se pohybuje okolo 80-100 GPa a bod tání přes 1000°C. Oproti vláknům uhlíkovým a aramidovým jsou izotropní a pro svou kovalentní vazbu mezi křemíkem a kyslíkem mají i vysokou pevnost. Jejich nedostatky jsou malá únavová odolnost a fakt, že povrchová úprava lubrikace snižuje jejich pevnost. V závislosti na jejich přesném chemickém složení rozeznáváme několik typů sklovin, které mohou být použity pro výrobu skelných vláken. [1][2][3][4]

2.4.1.1 E-sklovina

Tato bezalkalická sklovina má vynikající elektro-izolační vlastnosti a jedná se o nejpoužívanější typ pro výrobu vláken. E-sklovina vyniká svou kombinací dobrých mechanických vlastností s odolností proti korozi a nízkou cenou. Již podle názvu je patrné, že její nejčastější využití bude v elektro průmyslu. [1][2]

2.4.1.2 S-sklovina

S-sklovina má na rozdíl od E-skloviny vyšší obsah SiO_2 , MgO a Al_2O_3 . Díky tomu má až o 70% vyšší pevnost. Odtud pochází i její označení (S-strength). Někdy bývá také označována jako R-sklovina. Její využití je však poněkud omezené z důvodu čtyřikrát vyšší ceny než u E-skloviny. [1][2]

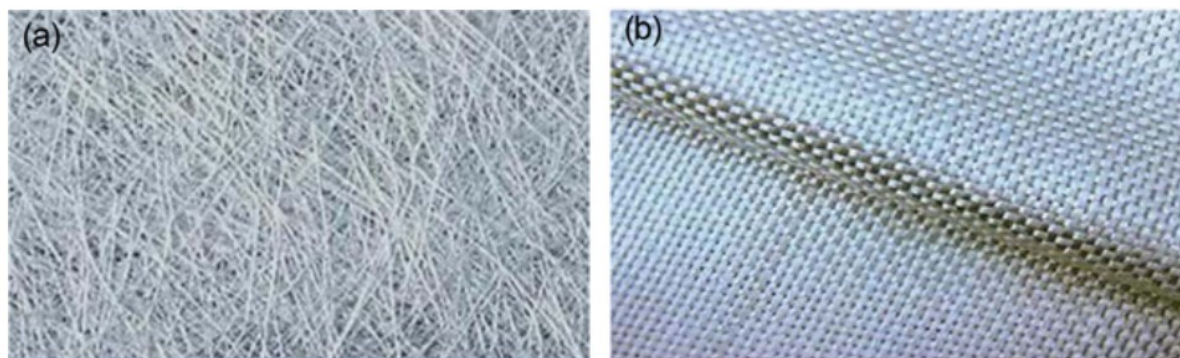
2.4.1.3 C-sklovina

Skupina C-sklovin je využívána spíše pro své chemické než mechanické vlastnosti. Jejich využití spočívá především v jejich odolnosti proti kyselinám, chemicky agresivním látkám a korozi. [1][2]

2.4.2 Výroba skelných vláken

Skelná vlákna se vyrábí rychlým tažením z taveniny. Nejprve jsou ve sklářské peci roztaveny suroviny jako křemičitý písek, kaolin, dolomit a ostatní složky. Poté tavenina zůstává několik dní v peci a probíhá proces čiření. Během toho dochází především k odstranění bublin, nečistot a homogenizaci taveniny. Po dokončení tohoto procesu je kanálky tavenina přivedena do předpecí, kde pozvolně vytéká ven z platinových trysek. Tyto vlákna mají tloušťku okolo 2mm, ale rychlým odvíjením jsou vlákna ztenčena na

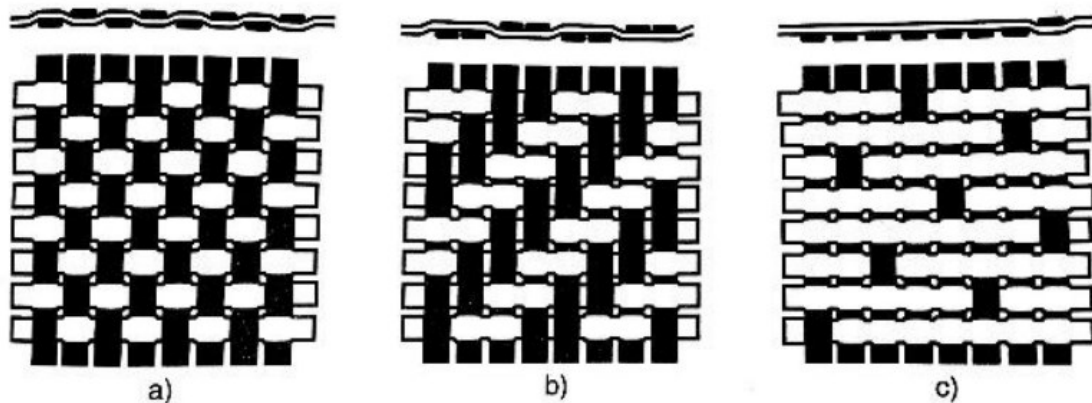
požadovaný průměr. Důležitým faktorem je i počáteční teplota tuhnutí taveniny. Proto je struktura skla definována i svou teplotní historií. Tato elementární vlákna nejsou tažena každé zvlášť, nýbrž jsou u trysek splétány do spřádacích vláken neboli konců. Elementární vlákna však vzájemně působí ve spřádacím vlákně velmi abrazivně a snižují původní pevnost vláken. Proto jsou jednotlivá vlákna ještě před spletením lubrikována. Lubrikace má za účel dobře spojit samostatná vlákna, chránit jejich povrch a zlepšit vazby mezi vláknem a pryskyřicí, která obvykle tvoří matrici. Tato lubrikace může být jak dočasná, tak i trvalá. Konce se obvykle uspořádávají do různých typů seskupení. Nejčastěji používané seskupení jsou pramence, rohože a tkaniny. Pramence se skládají z rovnoběžně uložených 20 - 60 konců. Rohože jsou plošné výrobky z relativně dlouhých a náhodně uložených vláken. Tato vlákna jsou postříkána pojivem a následně vysušena. Tkaniny jsou podobně jako rohože plošné výrobky, s tím rozdílem, že jsou organizovaně upleteny buď z pramenců, nebo pouze vláken. [1][2][3]



Obrázek 7 Uspořádání skelných vláken [13]

a) rohož b) tkanina

Vlákna, či pramence, jsou ve tkanině uloženy pravoúhle a mohou se vyskytovat v různých druzích křížení neboli vazeb. [1][3]



Obrázek 8 Typy křížení tkanin [1]

a) plátňová vazba b) keprová vazba c) atlasová vazba

Ve spojení s tkaninami se můžeme setkat s pojmy osnova a útek. Osnovou se označuje soustava vláken nebo pramenců v podélném směru a útkem naopak soustava ve směru příčném. Tkaniny se také nemusejí nutně skládat ze stejného druhu vláken. Je například možné použít více pevnějších vláken v osnově a jako útek použít pouze tenká vlákna k fixaci tkaniny, nebo vlákna z jiného materiálu. Tento typ tkaniny se nazývá směsná tkanina. [1]

2.4.3 Uhlíková vlákna

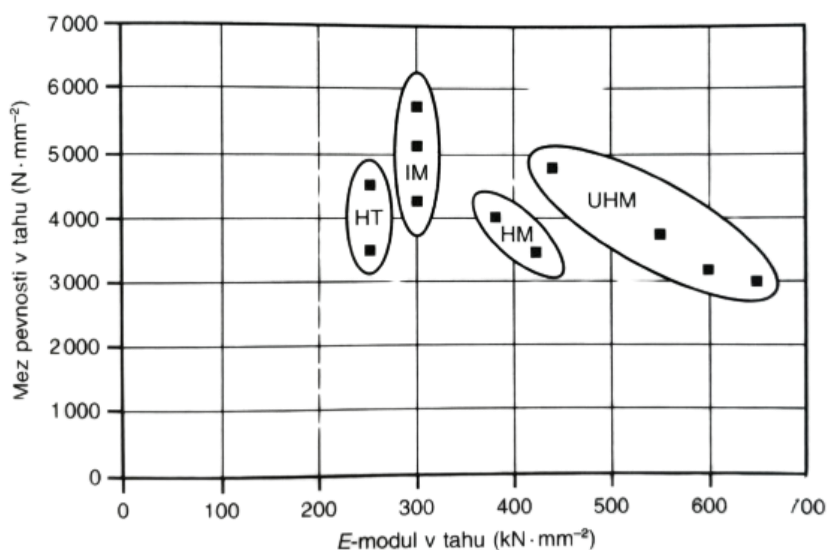
Uhlíková vlákna spolu se skelnými patří dnes k nejvíce využívaným typům vláknových kompozitů. Jedná se o vlákna s velmi vysokou pevností, tuhostí a s vysokým modulem pružnosti, tedy s nízkou tažností při zatížení. Oproti skelným vláknům mohou mít až desetinásobnou tuhost a to při nižší hustotě. Jsou velmi lehké a chemicky odolné. Na rozdíl od skelných vláken se uhlíková vlákna vyrábějí v celé škále pevností a tažností. Jejich finální vlastnosti závisí jak na vlastnostech původní suroviny, tak na výrobním procesu. Uhlíková vlákna mají také vynikající tepelnou stabilitu. S přidanou ochranou před oxidací mohou být stabilní až do 2000 °C. Jejich největší nevýhodou je ovšem vysoká cena. Oproti skelným vláknům jsou několikanásobně dražší.[1][2][4]

2.4.3.1 Druhy uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se liší jak svou tuhostí a pevností, tak typem použitých surovin pro výrobu. Tyto suroviny jsou tři a výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti vláken.

- Celulóza – vlákna vyráběná z celulózy se používají především izolační materiál pro vysoké teploty
- Polyakrylonitril (PAN) – vlákna mají nejlepší vlastnosti a jsou široce používána pro výrobky s nutnou velkou pevností a lehkostí (například v letectví)
- Smola – cena těchto vláken je oproti polyakrylonitrilovým příznivější, ovšem za cenu nižší pevnosti a horších vazeb mezi grafitovými rovinami.

Druhým rozdílem mezi uhlíkovými vlákny je jejich pevnost a tuhost. Podle těchto kritérií se dělí do čtyř základních skupin:



Obrázek 9 Rozdělení uhlíkových vláken [1]

Skupina HT (High tenacity), nebo také HS je standardní skupina vláken s nižšími hodnotami modulu pružnosti. Modul se pohybuje okolo 250 GPa. Další skupinou je skupina se středně velkým modulem pružnosti, IM (intermediate modulus). Skupina HM (high modulus) se pohybuje okolo 350-420 GPa modulu pružnosti. Poslední skupinou je sekce UHM (ultra-high modulus). Sem se obvykle řadí uhlíková vlákna s modulem pružnosti od 400 GPa výše. [1][2][3]

3 POLYMERNÍ KOMPOZITY

Polymerní kompozity jsou dnes široce využívanou skupinou materiálů. Do této skupiny můžeme zařadit jak kompozity s polymerní maticí, tak i kompozity s polymerní dispergovanou fází. Tato fáze se může nacházet jak ve formě částic, tak i vláken. Velmi známým příkladem je kevlarové vlákno, jehož materiálem je aromatický polyamid (aramid). I polymerní kompozity je nutné dělit do nejrůznějších skupin, aby v tématech s nimi spojenými nedocházelo ke zmatkům. Prvním dělicím kritériem může být již výše zmíněný fakt, zda je z polymeru matrice či výztuž. Stejně jako předchozí kompozitní materiály se i polymerní dělí podle toho, jestli mají částicovou či vláknovou výztuž. Posledním velkým kritériem pak je materiál polymeru, především zda se jedná o termoplast nebo reaktoplast. [1][4]

3.1 Kompozity s polymerní maticí

Kompozitní materiály s polymerní maticí jsou dnes jedním z nejvíce využívaných typů kompozitních materiálů. Jejich přední výhodou je jednoduchost výroby a s tím se pojící i

nízká cena. I přes tato pozitiva však musí matrice plnit základní úkoly jako držení tvaru, přenos namáhání a ochrana vláken před okolními vlivy. Kromě mechanických vlastností a chemické odolnosti je však velmi důležitým faktorem adheze mezi matricí a vláknem, viskozita a povrchové napětí. [1][2]

3.1.1 Matrice z termoplastů

Termoplastické matrice pro kompozitní materiály jsou výrazně méně používány než matrice z reaktoplastů (termosetů). Protože se termoplasty za normálních teplot vyskytují v pevném stavu, jejich zpracování a kombinace s vlákny je možná až nad teplotou tání. Největší nevýhodou termoplastů je jejich vysoká viskozita, pročež je velmi zkomplikována jejich zpracovatelnost a smáčivost. Také prosycování vláken je energeticky náročnější, protože termoplasty prosycují vlákna v roztavené fázi. Výhodou termoplastů je jejich vyšší houževnatost a fakt, že v průběhu zpracování dochází pouze k fyzikálním změnám a nikoli chemickým reakcím, které by mohly ovlivňovat proces výroby. Nejpoužívanějšími termoplasty pro matrici jsou: Polyamid, Polyethylen, Polypropylen a Polykarbonát. Mezi přední výrobky s termoplastickou matricí patří GMT (Glass Mat Thermoplastics) – termoplasty vyztužené prošívány skleněnými rohožemi a LFT (Long Fiber Thermoplastics) – termoplasty vyztužené dlouhými vlákny. Jejich další výhodou oproti matricím z reaktoplastů je možnost neomezeně dlouhého skladování. Termosety totiž stále reagují, a proto je jejich skladování možné pouze v chladu a na omezenou dobu. [1][2][3]

3.1.2 Matrice z reaktoplastů

Termosety jsou podstatně více používaným polymerním materiálem na matrice než termoplasty. Hlavním důvodem je snazší a energeticky přívětivější proces zpracování. Reaktoplasty se na vlákna aplikují ve svém tekutém, nevytvrzeném stavu a pro jejich nižší viskozitu může dojít k dobrému smáčení a prosycení vláken i za vysokých zpracovatelských rychlostí. Tento nevytvrzený termosetový materiál se obvykle nazývá pryskyřice. Během vytvrzovacího procesu dojde k nevratné exotermické chemické reakci, která vytvoří zesíťovanou řetězovou strukturu a přemění pryskyřici na pevný produkt. Vytvrzování probíhá s přidáním katalyzátoru, urychlovače a případně i tlaku a tepla. Nevýhodou těchto pryskyřic je omezená doba skladování a doba manipulace. Doba skladování neboli shelf life je doba, po kterou může být pryskyřice skladována bez degradace. Doba manipulace označována jako gel time je čas, po který se se smíchanou pryskyřicí dá stále manipulovat, než dojde k podstatnému nárůstu viskozity a tím i znemožnění další manipulace. Často se

také využívají takzvané prepregy, což jsou polotovary s již předimpregnovanými vlákny, které se později dále zpracovávají. Mezi nejčastěji používané pryskyřice patří následující: [1][2][3]

3.1.2.1 Polyesterové pryskyřice

- Polyesterové pryskyřice jsou nejpoužívanější skupinou reaktivních pryskyřic. Jde o čiré nízkoviskózní roztoky, které lze vytvrzovat za normálních i zvýšených teplot. Tyto pryskyřice mají dobré mechanické, elektrické i chemické vlastnosti. Díky jejich UV odolnosti jsou také vhodné pro venkovní aplikace. Nevýhodou je větší míra objemového smrštění, ke kterému dojde při exotermické vytvrzovací reakci. [1][2]

3.1.2.2 Vinylesterové pryskyřice

Tyto reaktoplasty mají lepší mechanické vlastnosti než polyesterové pryskyřice a jsou také reaktivnější. Vyznačují se vyšším stupněm zesítení a kratšími molekulovými řetězci. Jejich nevýhodou je křehkost, vyšší cena, a naopak nižší tvarová stálost za vysokých teplot. [1][2]

3.1.2.3 Epoxidové pryskyřice

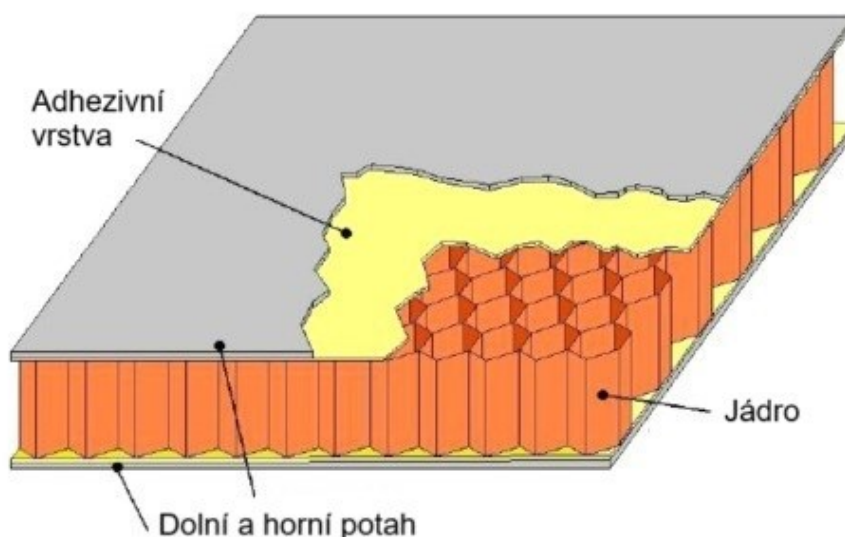
Epoxidové pryskyřice jsou široce používány pro svou univerzálnost, dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Jejich přední vlastností je také nižší míra smrštění než u ostatních pryskyřic. Obvykle se používají s kvalitními vyztužujícími vlákny, například uhlíkovými. Jejich výsledné vlastnosti jsou však velmi ovlivněny typem tvrdidla přidaného do pryskyřice. Dalšími negativy jsou vyšší cena a také vyšší viskozita. [1][2]

3.1.2.4 Fenolické pryskyřice

Tato skupina pryskyřic je podstatně méně používána. Jejich hlavním přínosem je vysoká odolnost proti žáru a hoření. Spolu s dobrou teplotně-dimenzionální stabilitou a kvalitní adhezí jsou výborným materiálem na konstrukci elektrospotřebičů a jiné aplikace, kde je nutná velká odolnost proti hoření. [1][2]

4 KOMPOZITNÍ SEDNVIČOVÁ STRUKTURA

Sendvičová struktura je součástí skupiny kompozitních materiálů a díly s tímto složením vynikají především svou lehkostí a pevností. Na rozdíl například od laminátů nebo jiných kompozitních materiálů mají sendvičové kompozity rozdílnou strukturu, v podobě několika rozdílných vrstev z různých materiálů vzájemně spojených. Základ sendvičové struktury tvoří zpravidla silná vrstva lehkého a ohebného materiálu. Toto jádro tvoří podklad pro ostatní vrstvy a objemově tvoří většinu výsledné struktury. Úlohou jádra, kromě držení tvaru, je i přenášení smykového zatížení. Jádro je potaženo nejméně jednou tenkou vrstvou z každé strany, která je velmi pevná a tuhá. Materiál těchto potahů mohou být například hliníkové kovy, oceli, skelná a uhlíková vlákna nebo i dřevo. Při zatížení dochází k distribuci napětí mezi jádrem a obaly. Například při ohybovém zatížení je jedna vrstva namáhána na tah, zatímco druhá na tlak. Samotné jádro bývá ohebné a podle jeho materiálu a tloušťky se odvíjí výsledná tuhost celé struktury. Jádro a potahy jsou mezi sebou spojeny adhezivní vrstvou, která může spojovat i případné vícenásobné vrstvy potahů mezi sebou. Dobré spojení jednotlivých vrstev je klíčové a bývá k němu použito buď matrice kompozitu potahu, nebo samostatného jiného materiálu. Sendvičové díly jsou široce používány v leteckém i automobilovém průmyslu, pro námořní aplikace i běžné stavitelství. [14][15] [16]



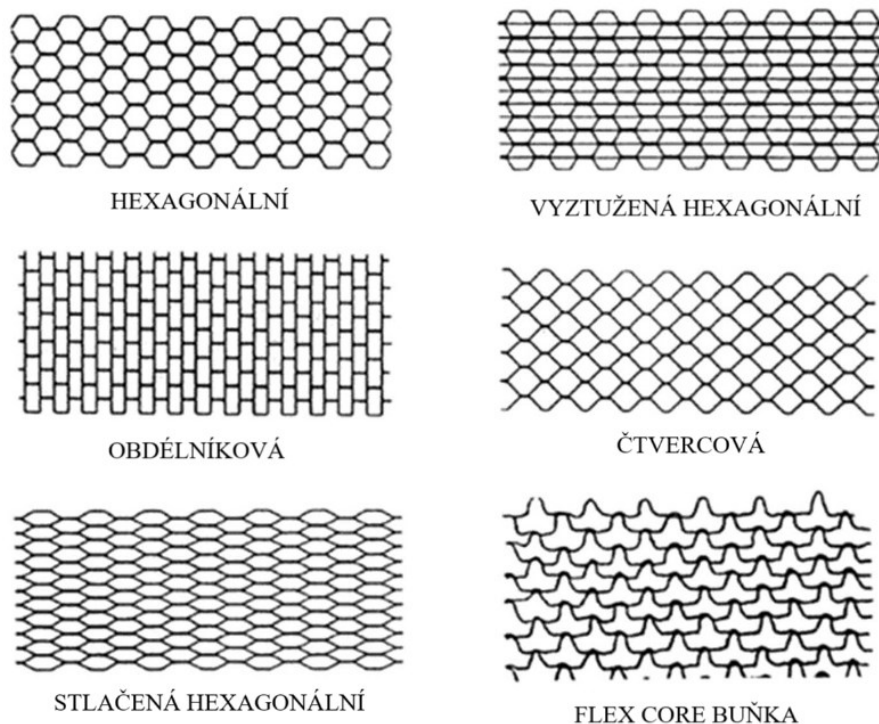
Obrázek 10 Sendvičová struktura [16]

4.1 Materiály jádra

Přestože materiál jádra je nesmírně důležitým aspektem, jeho konkrétní typ obvykle spadá do jedné ze tří kategorií:

- tuhé polymerní pěny
- dřevo
- voštiny

Polymerních pěn existuje velká řada a volba mezi nimi závisí na požadované hustotě, smykové odolnosti, kompatibilitě s různými pryskyřicemi a jiných vlastnostech. Mezi často používané polymerní pěny patří například EPS, PVC, PMI nebo PET. Zvláštní kategorii tvoří voštiny, což jsou struktury tenkých fólií seskupených do mnoha buněk. Voštiny se vzájemně liší materiálem, tvarem i velikostí buněk, ale jde o velmi často používanou variantu při volbě jádra. Mezi jejich přednosti patří kromě dobré tahové a tlakové pevnosti ve směru s osou buňky také vynikající pohlcování vibrací způsobené poměrně velkým třením jednotlivých buněk mezi sebou. Jejich nevýhodou je zjevná anizotropie vzniklá tvarem buněk. Konkrétní materiály voštin mohou být neželezné kovy, polymery, nebo již dříve zmíněné vláknové materiály, například aramidová vlákna. [14][15] [16]



Obrázek 11 Druhy buněk voštin [14]

4.1.1 Tuhé pěny

Tuhé pěny z polymerních materiálů jsou jedním z nejpoužívanějších materiálů pro jádra sendvičových struktur. Jedná se o materiály, které mají tuhou formu, ale obsahují velké množství malých vzduchových bublin. Díky tomu se vyznačují velmi nízkou hmotností, což je u jader sendvičových struktur žádoucí. Konkrétní vlastnosti pěny se odvíjejí od několika faktorů. Nejdůležitějším aspektem je druh základního materiálu. Pro jádra sendvičových prvků je to obvykle polystyren, polyuretan, polyvinylchlorid, nebo polymetakrilimid. Dalšími faktory jsou poměr bublin v materiálu, tloušťka stěn, nebo chemické složení celé pěny. [1][16][41]

4.1.1.1 Polyuretanové pěny

Polyuretanové pěny mají dobré izolační vlastnosti a jejich příprava je velmi jednoduchá. Jsou také velmi snadno opracovatelné a odolné proti chemikáliím a vlhkosti. Jejich slabší stránkou jsou spíše průměrné mechanické vlastnosti a postupná únava materiálu ve vrstvách na hranici mezi jádrem a pryskyřicí. [1][42]

4.1.1.2 Polystyrenové pěny

Pěny na bázi polystyrenu se vyznačují o něco horšími mechanickými a izolačními vlastnostmi než pěny na bázi polyuretanu. Také jejich flexibilita a odolnost proti chemikáliím a vlhkosti je nižší. Jejich největší výhodou je ale velmi nízká hmotnost a také velmi nízká cena. Díky tomu nacházejí uplatnění v širokém pásmu odvětví. [1][42]

4.1.1.3 Polymetakrilimidové pěny

Tyto pěny mají nejlepší mechanické vlastnosti ze všech polymerních pěn. Mají také dobrou rozměrovou stabilitu a jsou i dobře obrobitelné. Díky jejich malé hmotnosti a odolnosti vůči vysokým teplotám se často používají v leteckém i kosmickém průmyslu. Jejich nevýhodou je vyšší cena než u výše zmíněných polymerních pěn a také možná ekologická zátěž na životní prostředí. [1][42]

4.1.2 3D Tištěná jádra

Relativně novou a prozatím ne příliš používanou možností je 3D tisk jader pro sendvičové struktury. Tato metoda s sebou přináší velkou řadu výhod i nevýhod, nicméně s globálním nárůstem používání technologie 3D tisku, lze předpokládat do

budoucná také častější používání této technologie i pro výrobu jader. Velkou výhodou je jednoduchost a efektivita výroby, která s sebou nenese velké množství odpadu tak jako třískové obrábění. Další naprosto nespornou výhodou je možnost tisku velmi složitých tvarů, které by při klasické výrobě byly velmi drahé a složitě vyráběné. Problémem této technologie však je často obtížná kompatibilita tištěných materiálů, a to jak s adhezivní vrstvou, tak i s potahem. Tištěný materiál totiž musí mít po vytištění dobrou adhezi, aby se kvalitně spojil se všemi nanášenými vrstvami a potahem. Měl by také mít určitou teplotní odolnost, protože při nanášení pryskyřic dochází k exotermické reakci. Velikosti vznikajících teplot jsou závislé na typu pryskyřice, a proto je nutné vždy předem ověřit, zda tištěný materiál vydrží toto exotermicky vydané teplo. Například velmi často používaná epoxidová pryskyřice ze sebe při vytvrzování obvykle vydá teplotu 60 - 150° C v závislosti na tloušťce vrstvy. [45][46][47]

Mezi nejvíce vyhovující materiály pro 3D tisk a následné laminování patří zejména:

- PETG (Polyethylene terephthalate glycol)
- Materiál PETG nabízí vynikající adhezni vlastnosti a také chemickou odolnost. Mezi jeho další výhody patří také poměrně dobré mechanické vlastnosti. Jeho nevýhodou je mírně náročnější tisk než materiálu PLA a také nižší teplotní odolnost oproti materiálu ABS. Po ukončení tisku je před laminací obvykle nutná úprava povrchu. Ta u materiálu PETG spočívá ve zdrsnění povrchu pro lepší působení pryskyřice. Epoxidová pryskyřice je dobře kompatibilní s PETG, ale například polyesterová pryskyřice může narušit tištěný povrch. [45][46][47]
- PLA (Polylactic acid)
- PLA je v mnoha ohledech podobný materiálu PETG. Také on má dobré adhezni vlastnosti a je kompatibilní s epoxidovou pryskyřicí. Tisk PLA je poměrně snadný, a navíc je PLA biodegradabilní. Jeho nevýhodou je poměrně nízká teplotní odolnost, a proto je nutné být při laminování opatrný a nanášet pryskyřici ve více tenkých vrstvách. Také u materiálu PLA je vhodná příprava povrchu před laminováním, která spočívá v mírném zdrsnění povrchu. [45][46][47]
- ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)
- Materiál ABS se vyznačuje opačnými vlastnostmi oproti výše zmíněným materiálům. Jeho největší výhodou je vysoká tepelná odolnost, díky čemuž je možné použít více druhů pryskyřic při laminování. Jeho nevýhodou však je podstatně horší adheze. To má za následek nutnost velmi důkladné přípravy

povrchu na laminování. Povrch je nejen dobré důkladně zdrsnit, ale také i odmastit a případně použít ještě jiný prostředek pro zvýšení adheze. V případě nedostatečné přípravy povrchu by se vrstvy laminátu mohly snadno odtrhnout. [45][46][47]

5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY VE SPORTU

Kompozitní materiály hrají stále významnější roli i ve sportovním odvětví. Jejich použití v moderních sportovních vybaveních je inherentní a přináší revoluční změny, které umožňují následný lepší výkon sportovců, zvyšují bezpečnost a mohou vést i k dosažení nových rekordů. Díky svým vlastnostem jsou kompozitní materiály používány již téměř ve všech typech sportů. Míra jejich použití je často kodependentní s jejich cenou a záleží na typu konkrétního sportu, jaký druh kompozitního materiálu a v jaké míře může být použit. Typickým příkladem používání kompozitních materiálů ve sportu je cyklistika, kde se stále častěji používají karbonové rámy pro svou lehkost a pevnost. Dalšími příklady mohou být tenisové rakety, golfové hole, šípky z uhlíkových a skelných vláken, nebo skluznice lyží. Použití těchto materiálů v motocyklových helmách je dnes již téměř standardní a má pozitivní vliv na zvýšení bezpečnosti v tomto sportu. [17][18][19]

5.1 Kompozitní materiály ve vodních sportech

Kompozity, zejména uhlíková a skelná vlákna, měla ohromný vliv i na vodní odvětví. Velkou změnou si prošel například jachtařský průmysl, kde se dříve užívané dřevo nebo jiné materiály pro trupy plachetnic většinou nahradily sklolaminátem. Také windsurfová a surfová prkna se již standardně vyrábějí se sendvičovou strukturou. Tyto konkrétní a další obdobné změny umožnily posouvat hranice sportů, protože díky úbytku váhy se celek zpravidla stává ovladatelnějším a výkonnějším. Vzhledem k tomu, že většina vodních sportů je založena na rychlosti a s tím spojeným překonáváním odporu vody, se v mnoha případech používá zařízení zvané hydrofoil, které si především díky kompozitním materiálům prošlo velkým vývojem. [18][20][21]

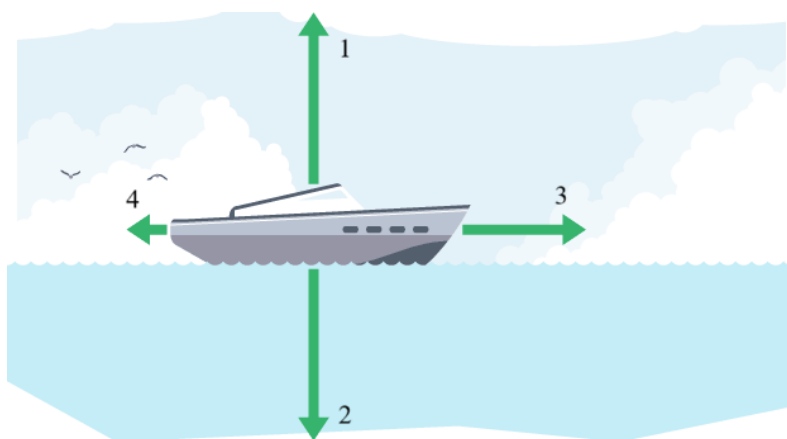
6 HYDROFOIL

Hydrofoil je zařízení používané pro generování vztlaku a zvednutí trupu lodi, nebo podobné věci, nad vodní hladinu. Tím dojde k žádoucímu účinku snížení odporu, který vodní hladina klade a je umožněn rychlejší a efektivnější pohyb na vodě. Hydrofoil má širokou škálu možného využití; od závodních plachetnic, přes rychlé trajekty až po armádní aplikace. První

prototypy hydrofoilu se objevují koncem 19. a začátkem 20. století, kdy Francouz Emmanuel Denis Farcot a Ital Enrico Forlanini každý patentovali své zařízení na zvednutí trupu lodě nad hladinu a snížení vodního odporu. Enrico Forlanini byl schopen díky svému hydrofoilu vyvinout rychlost až 68 km/h. [20][21][22]

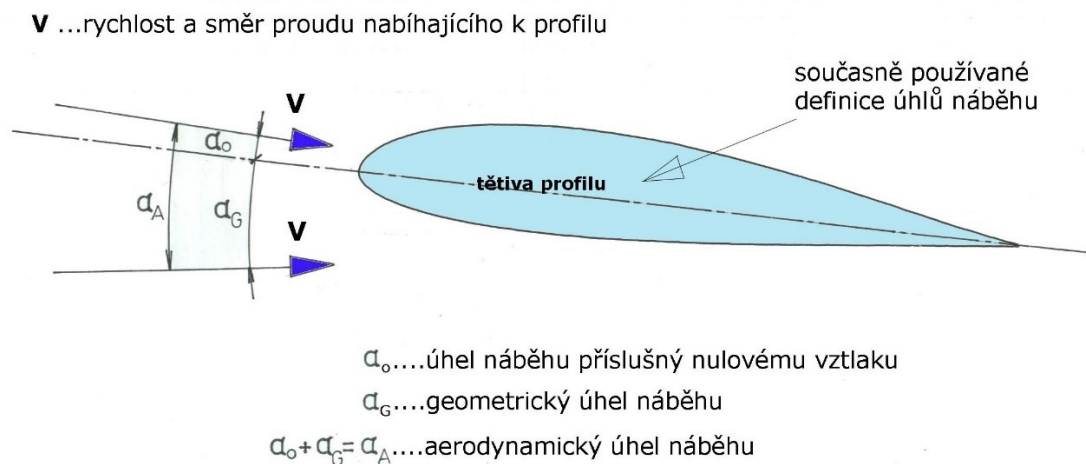
6.1 Princip funkce hydrofoilu

Na všechny lodě a podobné zařízení na vodě působí 4 základní síly a jejich výslednice určuje směr pohybu lodě. První a základní silou je síla směřující kolmo dolů způsobená váhou lodě. Kolmo proti ní působí druhá, výtlačná síla, která brání lodi v potopení. Třetí síla působící na loď je vyvolána pohonem lodě, kterým mohou být například plachty nebo motor. Čtvrtá síla je vyvolána odporem vody proti pohybu lodě. Z toho plyne, že rychlejšího pohybu na vodě lze dosáhnout buď zvětšením síly, která loď pohání, nebo zmenšením síly, která loď brzdí. Také je zřejmé, že pro zvednutí lodě nad hladinu vody musí být součet vztlačových sil vyšší než síla první, která loď tlačí dolů. [23][24][25]



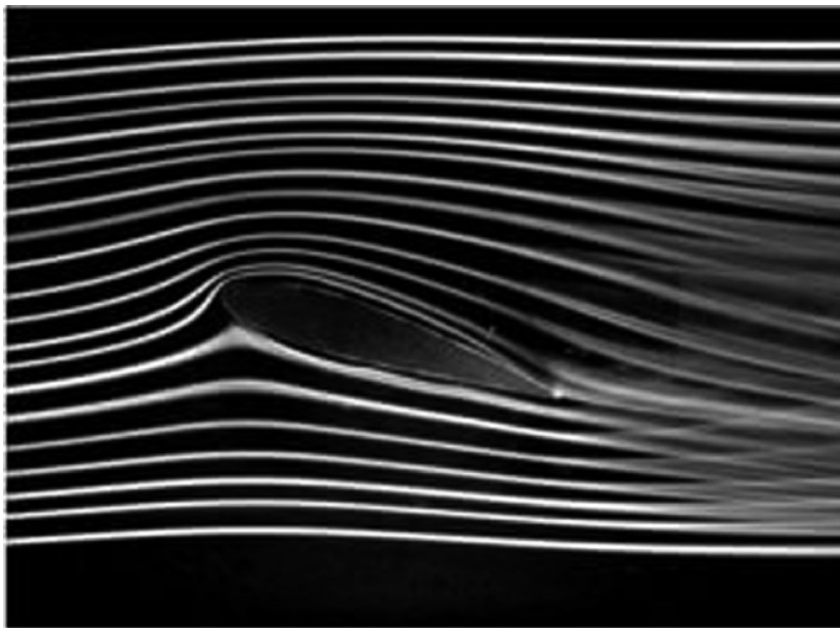
Obrázek 12 Síly působící na loď [26]

Hydrofoil funguje na podobném principu jako křídlo letadla. Díky svému tvaru a orientaci je schopen generovat vztlačovou sílu, která je při určité rychlosti dostatečně velká, aby zvedla požadovanou hmotnost lodě, či surfu. Kvůli rozdílnému prostředí oproti křídlu letadla se však hydrofoil v několika směrech liší. Například plocha křídel může být díky vyšší hustotě a viskozitě vody podstatně nižší a také úhel náběhu na křídlo nemusí být tak vysoký jako u křídel letadel. [21][23][24][25]



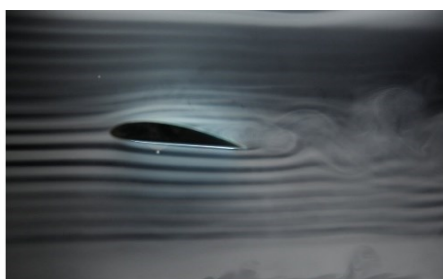
Obrázek 13 Úhel náběhu na křídle [27]

Podobně jako se letecké drony drží ve vzduchu tlačení vzduchu dolů, tak i hydrofoil efektivně tlačí proud vody dolů, což má za následek sílu směřující nahoru. Více podrobněji hydrofoil pracuje na stejném principu jako křídla letadel, totiž s rozdílem tlaků na horní a spodní straně křídla. Důležitý je i fakt, že u vody nemůže nastat situace, kdy by byl tlak vody záporný. Rozdíl oproti airfoilu (tvaru křídla letadla) je také ten, že molekuly vody, přestože se mohou volně pohybovat, zůstávají přibližně stále stejně vzdáleny od sebe. Proudění kapaliny je znázorněno na obrázku 14, ze kterého je patrné následující. V první řadě je dobře vidět směřování kapaliny dolů na spodní straně profilu vlivem pozitivního úhlu náběhu. Se zvyšujícím se úhlem náběhu roste i míra směřování kapaliny dolů a tím roste i vztlakový koeficient C_L . Dále je vidět, že proud jdoucí po horní straně profilu je u náběžné hrany nucen měnit svou dráhu a kopírovat profil křídla. Po dosažení vrcholu profilu nemůže proud pokračovat rovně, protože je tlakem okolních molekul nucen vyplnit prázdné místo, a tedy dále kopírovat tvar křídla. To vše má za následek, že proud na horní straně profilu proudí rychleji a po delší dráze než proud na spodní straně profilu. Z Bernoulliho rovnice pro mechaniku tekutin vyplývá, že tlak a rychlost proudění mají reciproční vztah a se zvyšující se rychlostí klesá tlak v kapalině. To tedy znamená, že na vrchní straně profilu bude tlak nižší než naopak na spodní straně profilu. [21][23][25][28]

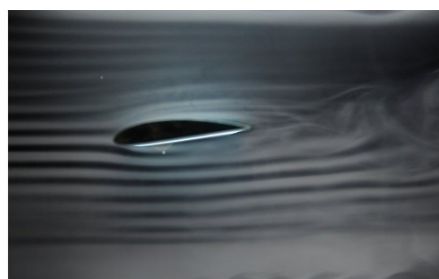


Obrázek 14 Vizualizace proudění kapaliny [28]

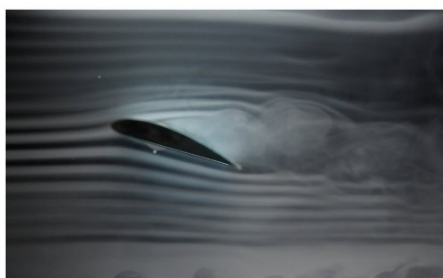
Proudění kapaliny ovšem nebývá zpravidla tak dokonalé, jako na obrázku 14. U odtokové hrany profilu (Trailing edge) se mohou tvořit víry a turbulence. To je vše závislé na mnoha aspektech, jako konkrétní profil křídla, Reynoldsovo číslo, nebo úhel náběhu. Se zvyšujícím se úhlem náběhu neroste totiž pouze vztlakový koeficient, ale i míra případných vírů. [21][23][25][28]



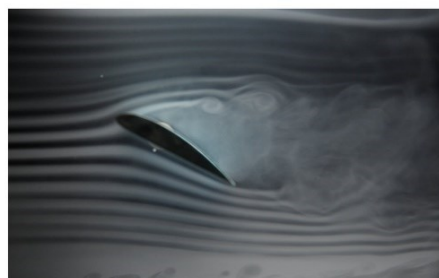
PROUDĚNÍ PŘI MÍRNÉM ÚHLU NÁBĚHU



PROUDĚNÍ PŘI NEGATIVNÍM ÚHLU NÁBĚHU



PROUDĚNÍ PŘI VELKÉM ÚHLU NÁBĚHU

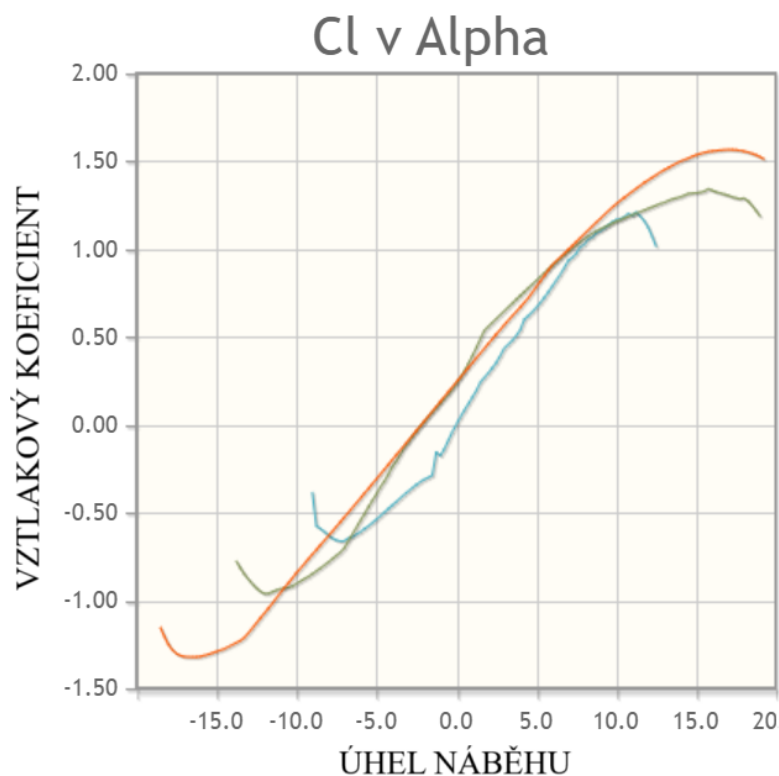


PROUDĚNÍ PŘI PŘETAŽENÍ

Obrázek 15 Vizualizace vírů při různých úhlech náběhu [29]

Růst vztlakového koeficientu s úhlem náběhu však platí pouze do určité hodnoty. V případě, že úhel náběhu přesáhne kritickou mez, dojde k razantnímu poklesu

vztakového koeficientu a profil přestává generovat vztlak a za horní hranou profilu už se tvoří pouze víry, protože kapalina nemůže efektivně kopírovat tvar křídla. Tento jev se nazývá přetažení, nebo také anglicky stall. Závislost vztakového koeficientu na úhlu náběhu je znázorněna na obrázku 16. Obrázek vykresluje závislost konkrétního široce používaného profilu NACA 2414 při třech různých Reynoldsových číslech. [23][25][28][30]

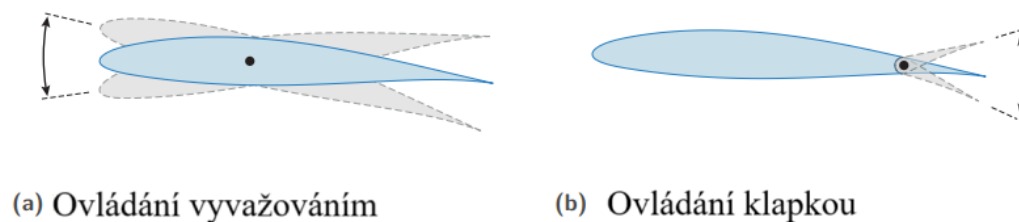


Obrázek 16 Závislost vztakového koeficientu na úhlu náběhu [30]

Z obrázku je vidět, že i při nulovém úhlu náběhu může profil generovat vztlak a také že přetažení obvykle nastává mezi 10 až 16 stupni úhlu náběhu. [28][30]

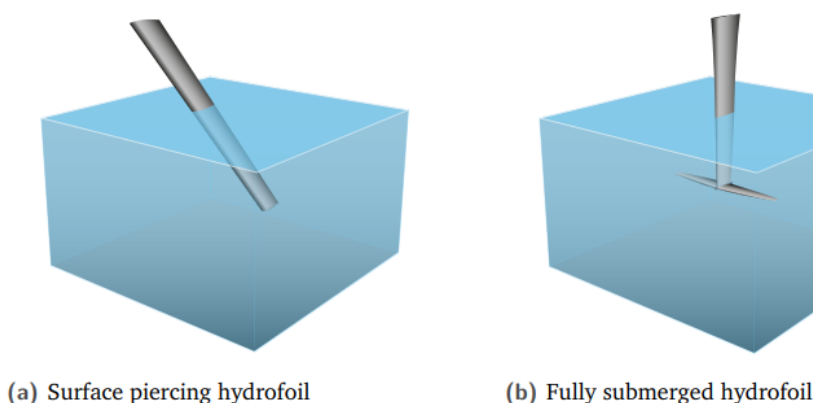
6.2 Typy hydrofoilů

Hydrofoily lze rozdělit do dvou základních skupin podle rozdílných konstrukčních řešení na: Surface piercing hydrofoily a fully submerged hydrofoily. Rozdíly těchto jednotlivých typů hydrofoilů jsou velmi podstatné, protože ovlivňují chování ve vodním proudu a také stabilitu. Fully submerged typy mají část, která generuje vztlak kompletně ponořenou pod hladinou a je zapotřebí stále kontroly stability a výšky nad hladinou. U velkých plavidel je k tomu zpravidla používáno klapky, které mění tvar profilu a tím i jeho vlastnosti. U menších aplikací vyvažování provádí člověk neustálým přenášením svého těžiště. [28][31]



Obrázek 17 Způsoby ovládání fully submerged hydrofoilu [31]

Naopak u surface piercing typů prochází část, která generuje vztlak skrz hladinu a je vždy částečně zanořená. Tyto hydrofoily mají tvar V a díky svému konstrukčnímu řešení jsou jednodušší, levnější a snazší na ovládání. Se zvyšující se rychlostí totiž exponenciálně roste velikost vztlakové síly, která je však vyvažována postupným vynořováním křídla, které tento vztlak vyvolává. Jejich nevýhodou je, že díky svému částečně zanořenému profilu mají velkou náchylnost na vlny, které poté mohou způsobit velké problémy při jízdě. [28][31]



Obrázek 18 Typy konstrukčních řešení hydrofoilů [31]

6.3 Nežádoucí hydrodynamické efekty

6.3.1 Spray

Spray je nežádoucí efekt týkající se především surface piercing hydrofoilů, kdy dochází za odtokovou hranou profilu (Trailing edge) ke vzniku souvislého vodního filmu ve větší míře a který se následně rozstříkuje do okolí v podobě kapek. Problémem tohoto efektu je, že zvyšuje odporovou sílu působící při jízdě. [31][32]



(a) FHE-400 "Bras d'Or"

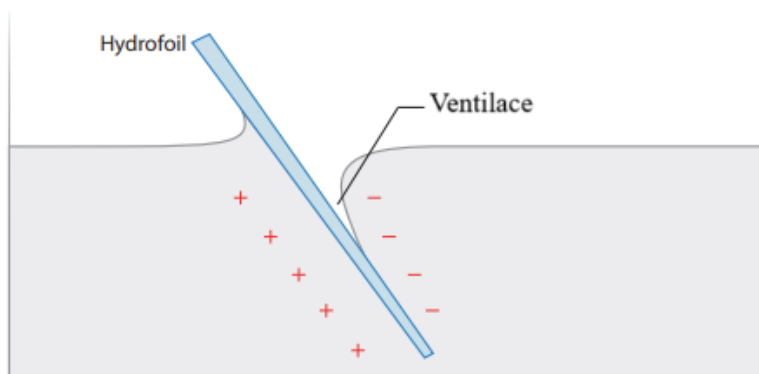


(b) Rodriguez RHS160

Obrázek 19 Zobrazení Spray efektu v zadní části hydrofoilu [31]

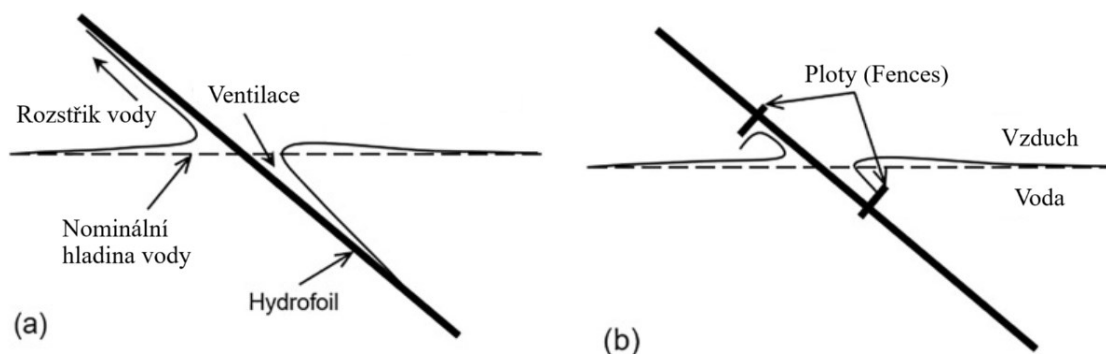
6.3.2 Ventilace

Ventilace je efekt, který se týká výhradně surface piercing hydrofoilů, protože interagují s vodní hladinou. Ventilace nastává, když na horní straně hydrofoilu, která generuje podtlak, klesne tlak na nižší hodnotu než atmosférický tlak. To vyústí v nasání vzduchu k povrchu hydrofoilu, pokles tvorby vztlaku a zvýšení odporu. U fully submerged hydrofoilů tento jev nenastává, protože část, která generuje vztlak je dostatečně hluboko a neprochází hladinou. [31][32]



Obrázek 20 Ventilace surface piercing hydrofoilu [31]

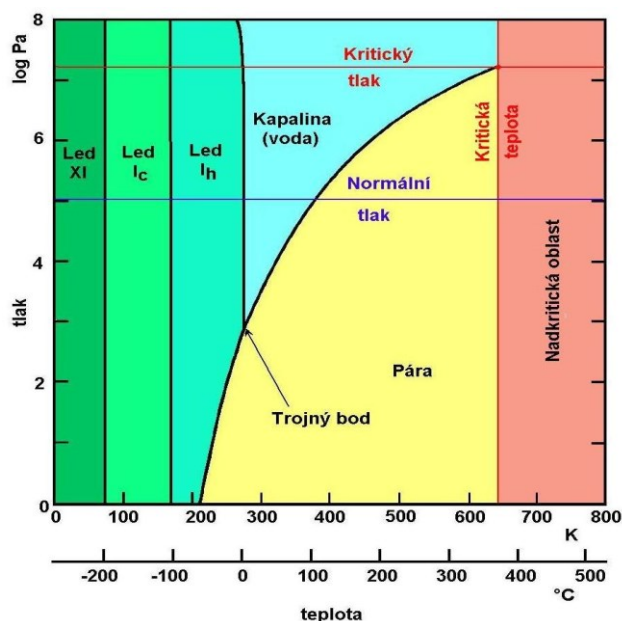
Ventilaci i spray efekt lze podstatně omezit použitím ohraničujících plotů (fences), což jsou tenké ploché zářežky, které významně snižují nežádoucí pohyby vody a tím udržují efektivní funkci hydrofoilu. Těchto zářežek může být několik a umísťují se blíže k sobě v místech nejčastější hladiny při provozu hydrofoilu. V místech, kde bývá hladina pouze zřídka, například při rozjezdu, jsou ploty od sebe vzdáleny podstatně více. [31][32]



Obrázek 21 Omezení ventilace použitím plotů [32]

6.3.3 Kavitace

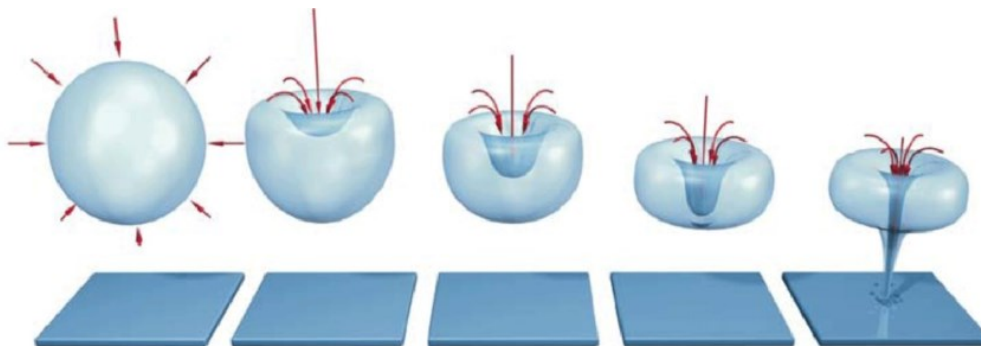
Kavitace je jev, při kterém dochází vlivem náhlého poklesu tlaku v kapalině ke vzniku bublin a jejich následné implozi. Tyto bubliny jsou tvořeny párou a podmínkou jejich vzniku je, že tlak musí klesnout pod hodnotu tlaku sytých par. Tento jev se nejčastěji objevuje u lopatkových strojů jako jsou turbíny, čerpadla, nebo lodní šrouby. Stejně jako dochází k fázové přeměně zvýšením teploty po izobaře, může k ní docházet i snížením tlaku po izotermě, jak vyplývá z obrázku 22. [31][33][34]



Obrázek 22 Fázový diagram vody [34]

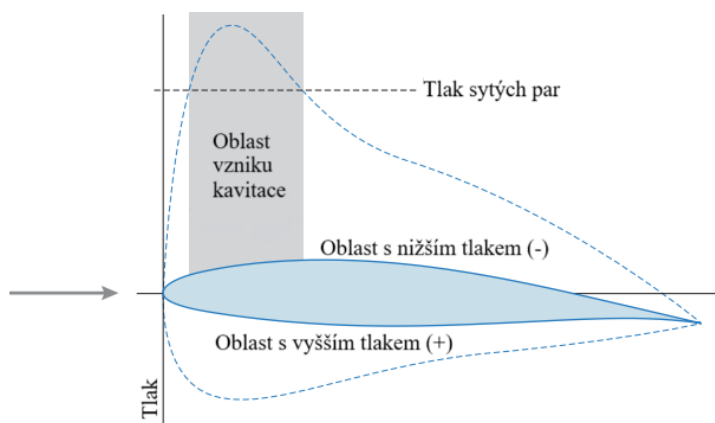
Pokud dojde k poklesu tlaku pod hodnotu tlaku sytých par, dojde k odpaření vody a zformování bublin páry, které se za určitou dobu vlivem vyrovnávání teplot a tlaků zhroutí do sebe. Při této implozi dochází k tlakové vlně a vytvoření takzvaného microjetu. Jde o miniaturní vír, který v blízkosti povrchu materiálu dokáže poškodit

stěnu materiálu a odstranit z ní malý kus. Tento jev se nazývá kavitační eroze a pokud k němu dochází po dostatečně dlouhou dobu, může zapříčinit naprosté selhání součásti. [31][33][35]



Obrázek 23 Kolaps bubliny v blízkosti stěny a vznik Microjetu [35]

I v případě, že ke kavitaci dochází mimo povrch součásti se stále jedná o problematický jev, protože prudce snižuje výkonost součásti a velmi zvyšuje hlučnost. Také u hydrofoílů je tento jev nežádoucí, protože způsobuje náhlou ztrátu výtaku, zvyšuje odpor a poškozuje povrch profilu křídla. [31][33]



Obrázek 24 Příčina vzniku kavitace u hydrofoílu [31]

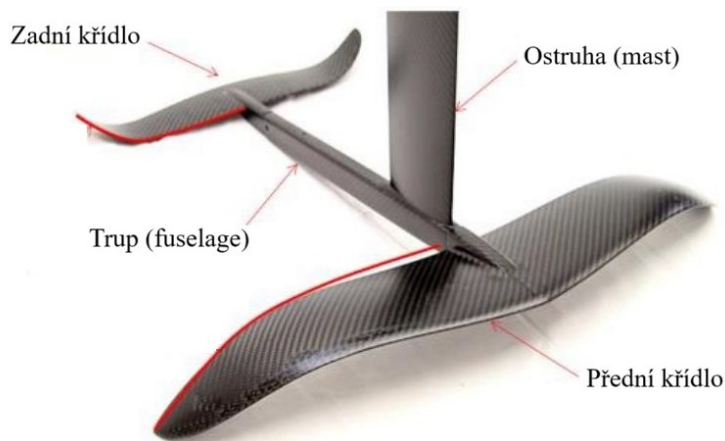
Z obrázku 24 je patrné, že kavitace má tendence vznikat v místech nejnižšího tlaku. Tato oblast se nachází na horní straně profilu křídla blízko náběžné hrany. Přesto, že kavitace může mít i pozitivní účinky, u lopatkových strojů, hydrofoílů a podobných zařízení se ji vždy snažíme eliminovat. Kavítaci lze zabráňovat přesným návrhem tvaru a následnými simulacemi proudění při vývoji, nebo snížením provozních rychlostí, které by vyvolávaly příliš nízké tlaky. Lze také použít anti-kavitační povlaky, které mají proti kavitační erozi značnou odolnost. [31][33]



Obrázek 25 Testování hydrofoilu v kavitačním tunelu [31]

6.4 Části fully submerged hydrofoilu

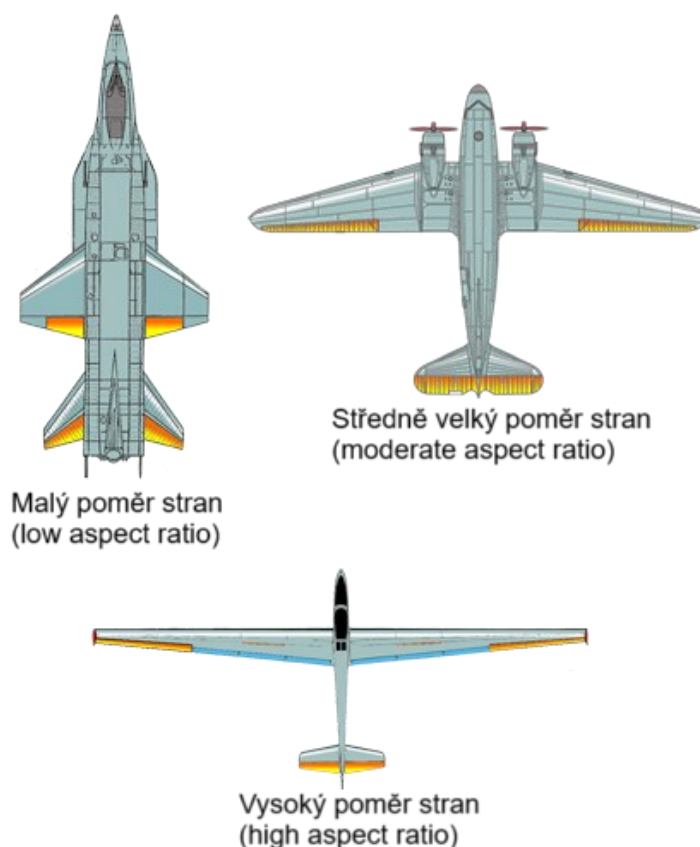
Fully submerged hydrofoils se skládají ze čtyř základních částí. První bývá nejčastěji nazývána jako ostruha (mast). Jde o dlouhou, aerodynamicky tvarovanou spojnicí mezi prknem a spodními částmi Hydrofoilu. Její účel je držet Hydrofoil ve správné pozici a přenášet zatížení. Druhá část tvoří základ celého Hydrofoilu a je nejdůležitějším prvkem. Jde o přední křídlo, které je hlavní složkou generování vztlaku. Jeho tvar a velikost určuje výsledné chování, ovladatelnost a pracovní rychlosti. Třetí částí je zadní křídlo. To také stejně jako i přední generuje vztlak, ovšem v mnohem menší míře. Jeho efekt je mnohem důležitější z hlediska stabilizace proudění a držení směru jízdy. Poslední částí je trup, který spojuje všechny zbylé části dohromady. Jednotlivé části se mohou obměňovat a vzájemně kombinovat (např. různá přední křídla s různými ostruhami, nebo zadními křídly). [36][37][38]



Obrázek 26 Části fully submerged hydrofoilu [39]

6.5 Tvary křídel

Na výsledné aspekty chování hydrofoilu při provozu má vliv mnoho věcí. Jedním z hlavních faktorů je i plocha a 3D tvar křídel, tedy ne pouze průřezový profil křídla, ale i jeho prostorové tvarování. Pro hydrofoily, které budou pracovat spíše ve vyšších rychlostech a bude zapotřebí jejich dobrá manévrovatelnost s menšími poloměry zatáček se křídla tvarují užší a s tvarem více do špičky. Naopak pro hydrofoily, které musejí generovat vztlak i při malých rychlostech a jsou spíše stabilní se křídla tvarují jako tenká s velkým rozsahem. Pro přesnější popis se používá poměr jednotlivých stran křídla (aspect ratio). Je-li tento poměr vysoký, křídla budou tvarována spíše do obdélníku a budou mít charakteristiku druhé výše popsané skupiny. V případě, že aspekt bude nižší, bude mít křídlo spíše tvar čtverce nebo trojúhelníku. Tento aspekt je běžně používán i v letectví, protože i u letadel určuje jejich klíčové vlastnosti. [37][40]



Obrázek 27 Křídla s různými poměry stran [40]

Křídla také mohou být nahnuta směrem dolů či nahoru, a to buď v celé své délce, nebo pouze na koncích. Jsou-li křídla nahnuta směrem nahoru, čímž křídla tvoří tvar V, jedná se o dihedralní prohnutí, které zvyšuje stabilitu. V opačném případě kdy jsou křídla orientována směrem dolů, se jedná o anhedralní prohnutí, které stabilitu snižuje. [37][40]

7 VÝROBCI HYDROFOILŮ

Firem vyrábějících hydrofoily pro soukromé sportovní účely je dnes nesčetné množství. Nabízený sortiment se vzájemně odlišuje tvarem křídel, použitým průřezovým profilem a různými konstrukčními způsoby uchycení křídel na trup a ostruhu na vrchní desku. Poslední odlišností je použitý materiál. Křídla se téměř vždy vyrábějí ze sendvičové struktury, kdy vrchní vrstvy tvoří uhlíková nebo skelná vlákna. Na trup a ostruhu je možno použít stejného materiálu, nebo je možné nahradit sendvičovou strukturu s uhlíkovým vláknem podstatně levnější slitinou hliníku. V závislosti na těchto faktorech se ceny pohybují od 11 000 až po 70 000 Kč za jeden kompletní hydrofoil bez dalšího přidaného příslušenství nebo elektrického pohonu (existují totiž i hydrofoily s elektrickým pohonem). Mezi nejrozšířenější výrobce hydrofoilů pro sportovní použití patří například společnost Axis. Dalšími známými společnostmi jsou společnosti F-one, která nabízí velkou variabilitu nabízených výrobků a společnost Starboard, která je jednou z nejinnovativnějších světových značek v tomto oboru a jejíž výrobky byly použity jako standardní vybavení pro olympijské hry v Paříži v roce 2024. [36][43][44]

8 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

První sekce teoretické části diplomové práce se věnovala kompozitním materiálům. Byly představeny jejich funkce, nejčastější typy a rozdělení. Následná kapitola popisovala velmi široce používanou skupinu disperzní fáze – vláknové kompozity. Vláknových kompozitů existuje mnoho druhů, ale pozornost byla věnována především skelným a uhlíkovým vláknům pro jejich vlastnosti a širokou škálu možností, jak je využít. Důležitým aspektem je anizotropie vláken a s tím i spojená nutnost dopředu předvídat místa největšího namáhání a nejpravděpodobnější směr namáhání. S ohledem na tyto faktory se orientují vlákna při laminování a zohledňuje se nutný počet vrstev vláken, či vláknových tkanin. Následně byly představeny matrice z polymerních materiálů, jejich vlastnosti, výhody a možnosti použití. Z této kapitoly vyplývá dobrá použitelnost zejména reaktoplastických pryskyřic, jako jsou polyesterová nebo epoxidová pryskyřice. Další důležitou sekcí popsanou v teoretické části jsou sendvičové struktury. Ty jsou totiž ideálními strukturami pro konstrukce, kde je nutná vysoká pevnost i určitá pružnost, a to vše při zachování co nejmenší hmotnosti. Tyto sendvičové struktury jsou ideální volbou při konstruování hydrofoilu a jejich výsledné vlastnosti závisí především na materiálu jádra, jako jsou tuhé pěny nebo voštiny a typu potahu. Poslední kapitola týkající se kompozitních materiálů se zabývala kompozitními materiály ve sportovním odvětví a jejich vlivem na posun zejména vodních sportů. Další sekce se již netýkala kompozitních materiálů, ale představila pojem hydrofoil a následně detailněji popisovala jeho funkci, využití a části. Důležitou informací z této kapitoly je především existence dvou základních typů hydrofoilu (surface piercing a fully submerged). Následující kapitola popisuje důležité nežádoucí efekty při provozu hydrofoilů. Spadají sem tři nejčastější jevy, z nichž nejvíce prostoru bylo věnováno kavitaci a to jak pro její důležitost, tak i z důvodu, že druhé dva jevy (spray a ventilace) se vyskytují pouze u surface piercing typů hydrofoilů. Jak popisuje kapitola 6.3, tak všem těmto jevům se snažíme předcházet již v procesu designu a to volbou správné geometrie, která k těmto efektům nepovede. Poslední část se věnuje různým tvarům křídel a jejich výrobcům. Z této kapitoly je jasně patrný velký význam tvaru křídel pro následné vlastnosti, jako jsou ovladatelnost a pracovní rychlost. Konkrétní profil křídel a aspekt poměru stran se volí podle kategorie použití, na niž je hydrofoil zamýšlen a zkušeností jedince, který bude hydrofoil používat.

II PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části diplomové práce je komplexní vývoj funkčního hydrofoilu, zahrnující návrh, analýzu, výrobu a ověření funkčnosti.

Všechny zásadní cíle praktické části jsou detailněji shrnuty v následujících bodech:

- Výpočet a návrh dvou konstrukčně odlišných variant předního křídla
- Simulace funkce obou variant
- Porovnání jejich vlastností
- Volba optimální varianty předního křídla
- Návrh zbývajících komponent hydrofoilu
- Volba optimálního jádra pro sendvičovou strukturu
- Výroba všech jednotlivých částí hydrofoilu
- Pevnostní testování
- Analýza výsledků – zda dosažená pevnost odpovídá nutným minimálním hodnotám
- Dokončení a sestavení hydrofoilu
- Kalkulace ceny a porovnání s komerčně prodávanými hydrofoily
- Testování hydrofoilu při praktickém použití

10 VÝPOČET HYDROFOILU

Veškeré návrhy a kalkulace byly provedeny ve dvou různých variantách, aby bylo možné zkoumat rozdíly v chování a vlastnostech a bylo posléze možné zvolit nejvhodnější variantu pro výrobu. Základní výchozí rovnicí pro veškeré kalkulace hydrofoilu je aerodynamická vztlaková rovnice 1.

$$L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (1)$$

Kde: L – Vztlaková síla [N]

C_L – Vztlakový koeficient [-]

ρ – Hustota [Kg/m^3]

v – Rychlost [m/s]

A – Plocha křídel [m^2]

Vztlaková síla, jakožto hlavní produkt pohybu hydrofoilu ve vodě, musí být větší než hmotnostní síla způsobená gravitací. Tato síla byla určena následujícím předpokladem zobrazeným v rovnici 2:

$$F_G = (m_U + m_H + Q) \cdot g \quad (2)$$

$$F_G = (67 + 5 + 10) \cdot 9,81 \cong 805 \text{ N}$$

Kde: F_G – celková gravitační síla [N]

m_U – hmotnost uživatele [Kg]

m_H – předpokládaná hmotnost celého hydrofoilu [Kg]

Q – bezpečnostní hmotnostní přídavek [Kg]

g – gravitační konstanta [m/s^2]

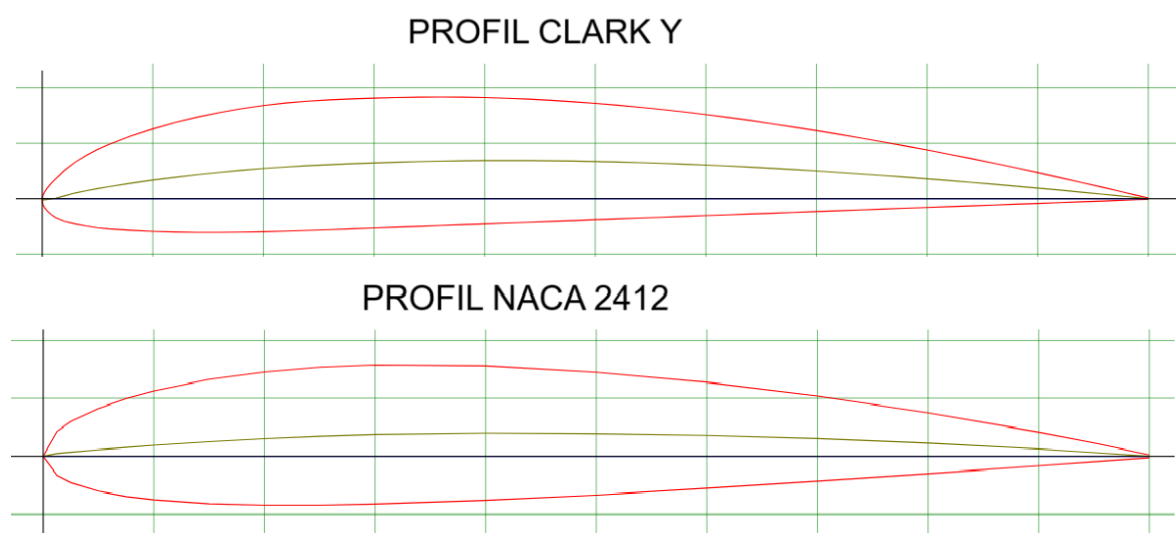
Vztlakový koeficient C_L je bez jednotkový a závisí na spoustě faktorů. Ve většině případů je stanovován experimentálně. U často používaných průřezů křídel je však možné tyto hodnoty odečíst z tabulek a grafů dostupných v odborných publikacích a na internetu. Mezi faktory, které nejvíce ovlivňují vztlakový koeficient patří: zvolený průřez křídla, prostředí, ale především úhel náběhu α . Se zvyšujícím se úhlem náběhu stoupá vztlakový koeficient, ale pouze do určitého bodu. V bodě přetažení dochází k prudkému poklesu vztlakového koeficientu a prudkému nárůstu odporové síly. Odporová síla se také mění s úhlem náběhu a vždy se snažíme pracovat v takových podmínkách, aby poměr vztlakového a odporového koeficientu byl co nejoptimálnější.

Rychlost v je pracovní rychlostí hydrofoilu a je dána účelem pro níž je hydrofoil vyráběn. Pro hydrofoily bez externího pohonu se pracovní rychlosti pohybují okolo 4 m/s. V případě výroby pro windsurfy, kitesurfy, surfy či lodě jsou pracovní rychlosti vyšší a plocha

hydrofoilu tedy nemusí být tak velká. Jak vyplývá ze vztakové rovnice 1, rychlost má na výslednou vztakovou sílu zdaleka největší vliv, protože každá změna v rychlosti je umocněna na druhou.

10.1 Volba průřezů křídla pro jednotlivé varianty

Pro dvě varianty hydrofoilu byly zvoleny průřezy křídel: Clark Y a NACA 2412. Profil Clark Y byl zvolen pro svůj jednoduchý a účelný tvar. Vzhledem k faktu, že spodní strana křídla je rovná, nabízí profil jednodušší výrobu a také jednodušší způsob upevnění na fuselage. Profil NACA 2412 byl zvolen pro svou univerzálnost a stabilní chování při různých pracovních podmínkách. Obrázek 28 porovnává tyto dva profily a zobrazuje jejich geometrické odlišnosti. Červenou barvou je vykreslen vnější tvar křídla, modrá přímka je tětíva (chord line), která nejkratší cestou spojuje náběhovou a odtokovou hranu, a tmavě zelenou barvou je zobrazena střední křivka (camber line), která prochází středem profilu mezi horní a dolní plochou křídla. Rozdíl mezi tětívou se střední křivkou se nazývá prohnutí (camber) a jeho míra se liší podle typu profilu. Například u symetrických profilů, jaký byl později použit v kapitole 12.2 a je zobrazen na obrázku 37, je tětíva a střední křivka shodná, a proto je prohnutí nulové.

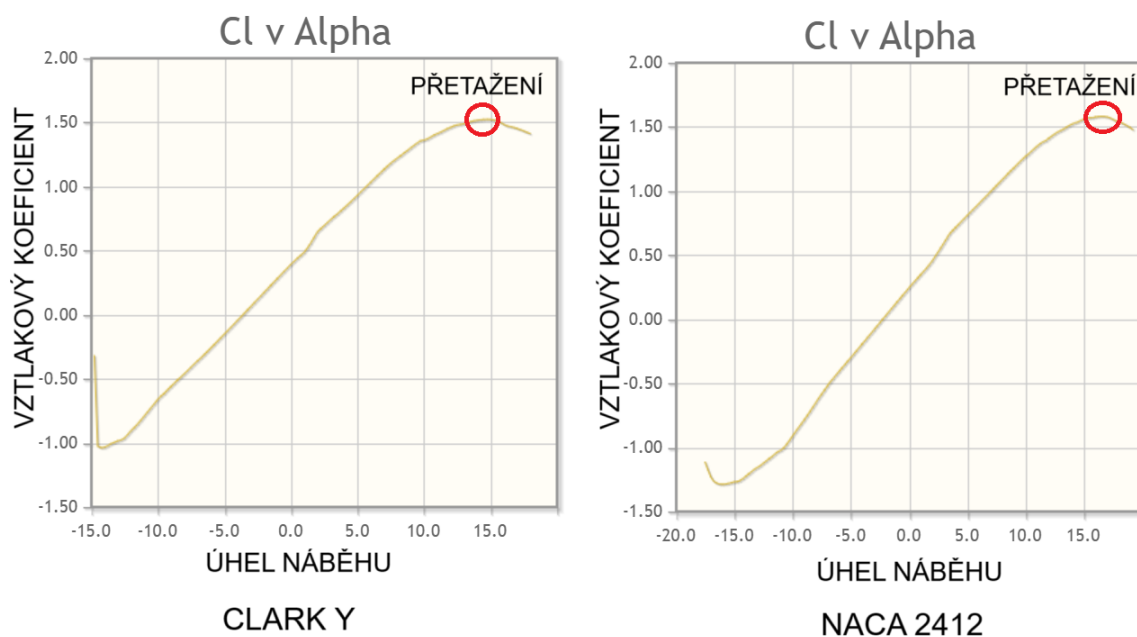


Obrázek 28 Srovnání průřezů profilů

Jak je patrné z obrázku 29, profil Clark Y má při nulovém úhlu náběhu mírně vyšší vztakový koeficient. Z obrázku 30 je zase patrná větší stálost chování profilu NACA 2412 při nejlepším poměru vztakového a odporového koeficientu. U obou profilů začíná oblast nejlepšího poměru vztakového a odporového koeficientu okolo 2° . V případě profilu NACA 2412 tato oblast trvá do 5° a poté opět prudce klesá. U profilu Clark Y se tato oblast táhne

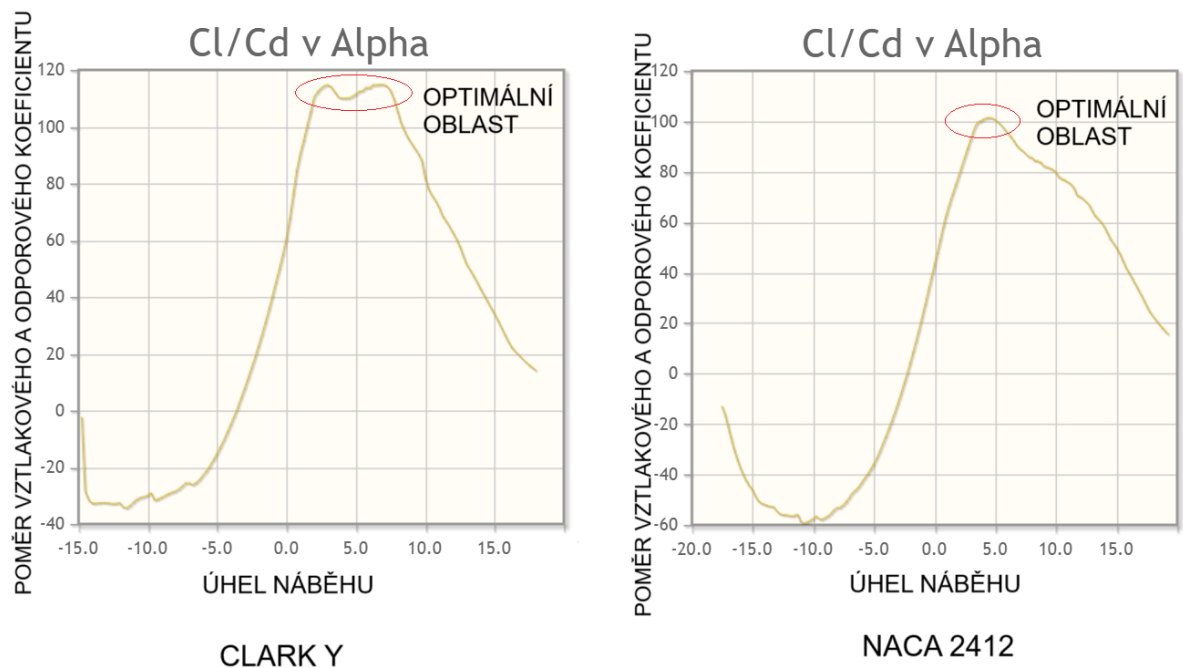
až přibližně k 7° , což předpokládá dobré chování a malý odpor i při větší variaci úhlů náběhu. Vzhledem k faktu, že oběma profilům začíná optimální oblast okolo 2° úhlu náběhu, byla tato hodnota zvolena jako výchozí pro výpočty i pro budoucí konstrukční řešení. Úhel náběhu se bude během provozu průběžně měnit, jak bude uživatel vyvažovat rovnováhu, ale jeho hodnota při rovném chodu bude konstruována na 2° .

ZÁVISLOST VZTLAKOVÉHO KOEFICIENTU NA ÚHLU NÁBĚHU



Obrázek 29 Porovnání závislostí vztlakového koeficientu na úhlu náběhu

ZÁVISLOSTI POMĚRU VZTLAKOVÉHO A ODPOROVÉHO KOEFICIENTU NA ÚHLU NÁBĚHU



Obrázek 30 Závislosti poměru vztlakového a odporového koeficientu na úhlu náběhu

10.2 Výpočty křídél

Z obrázku 29 můžeme vyčíst hodnoty vztlakového koeficientu při 2° úhlu náběhu pro obě varianty. Pro profil Clark Y je tato hodnota přibližně 0,62 a pro profil NACA 2412 přibližně 0,49. Pro výpočet rozměrů je nutné vyjádřit ze vztlakové rovnice 1 plochu křídél A:

$$\begin{aligned}
 L &\geq 805N \\
 L &= \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \rightarrow \\
 \rightarrow A &\geq \frac{2 \cdot L}{C_L \cdot \rho \cdot v^2} \\
 A &\geq \frac{2 \cdot 805}{Cl \cdot 1000 \cdot 4^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

10.2.1 Výpočty pro variantu Clark Y

Při výpočtu bylo za vztahový koeficient dosazeno 0,62 získaných z obrázku 29 při 2° úhlu náběhu.

$$A \geq \frac{2 \cdot 805}{0,62 \cdot 1000 \cdot 4^2} \quad (4)$$

$$A \geq 0,1623 \text{ m}^2 \rightarrow 1,623 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Z rovnice 4 vychází, že plocha křídel musí být nejméně 0,1623 m², aby generovala vztahovou sílu 805 N. Rozpětí křídel a délka tělvy byly spočítány z poměru stran (aspect ratio) v rovnici 5. Pro ne příliš zkušené uživatele se doporučuje aspect ratio nejméně 7.

$$AR = \frac{\text{Rozpětí}}{\text{Délka tělvy}}$$

$$A = \text{Rozpětí} \cdot \text{Délka tělvy}$$

$$\rightarrow AR = \frac{\text{Rozpětí} \cdot \text{Rozpětí}}{A} \rightarrow \text{Rozpětí} = \sqrt{AR \cdot A} \quad (5)$$

$$\text{Rozpětí} = \sqrt{7 \cdot 1,623 \cdot 10^5} = 1065,9 \text{ mm}$$

$$\text{Délka tělvy} = \frac{A}{\text{Rozpětí}} = \frac{1,623 \cdot 10^5}{1065,9} = 152,3 \text{ mm}$$

Vzhledem k tomu, že délka tělvy se bude v délce rozpětí křídel měnit, slouží tyto výpočty jako orientační a jejich hodnoty budou pouze základem při návrhu 3D tvaru křídel.

10.2.2 Výpočty pro variantu NACA 2412

Při výpočtu bylo za vztahový koeficient dosazeno 0,49 získaných z obrázku 29 při 2° úhlu náběhu. Následující rovnice 6 vychází z již výše použité rovnice 4, pouze s jinou hodnotou Cl.

$$A \geq \frac{2 \cdot 805}{0,49 \cdot 1000 \cdot 4^2} \quad (6)$$

$$A \geq 0,2054 \text{ m}^2 \rightarrow 2,054 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Z rovnice 6 plyne, že plocha křídel musí být nejméně 0,2054 m², aby generovala vztahovou sílu 805 N. Po porovnání výsledků rovnic 4 a 6 lze vidět, že plocha křídel s profilem NACA 2412 by musela být o 0,413 m² větší, aby dokázala generovat stejnou vztahovou sílu.

$$AR = \frac{\text{Rozpětí}}{\text{Délka tětiny}}$$

$$A = \text{Rozpětí} \cdot \text{Délka tětiny}$$

$$\rightarrow AR = \frac{\text{Rozpětí} \cdot \text{Rozpětí}}{A} \rightarrow \text{Rozpětí} = \sqrt{AR \cdot A} \quad (7)$$

$$\text{Rozpětí} = \sqrt{7 \cdot 2,054 \cdot 10^5} = 1199 \text{ mm}$$

$$\text{Délka tětiny} = \frac{A}{\text{Rozpětí}} = \frac{2,054 \cdot 10^5}{1199} = 171,3 \text{ mm}$$

Výše použitá rovnice 7 je opět obdobná jako rovnice 5, pouze s hodnotami pro variantu NACA 2412.

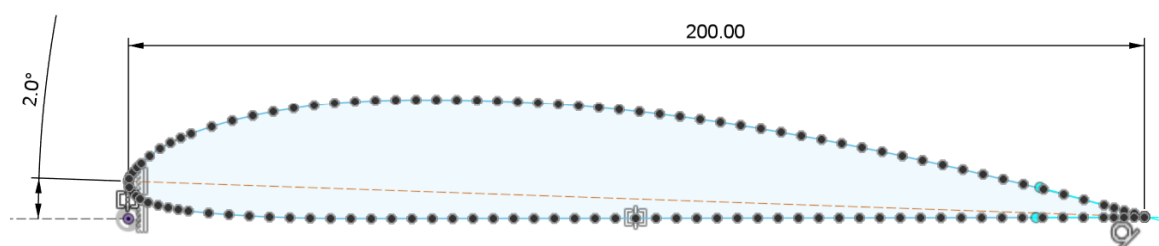
11 NÁVRH 3D TVARU

Pro tvorbu 3D modelu byl zvolen program Autodesk Fusion pro svou funkci, která umožňuje importovat průřezy křídel a je dobře kompatibilní s programem Autodesk CFD, kde byly následně prováděny simulace.

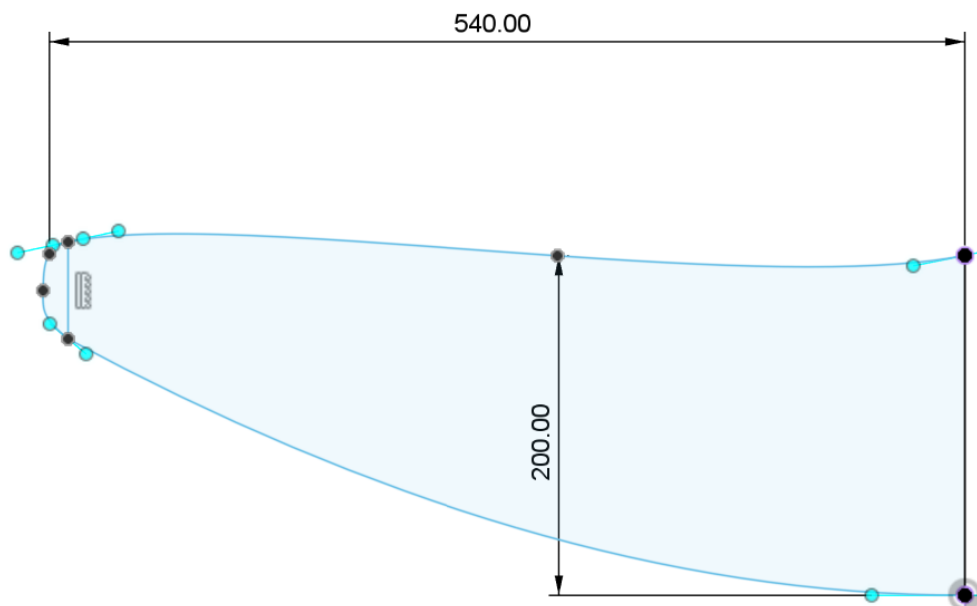
11.1 Modelování první varianty

Nejprve byl do programu Fusion importován průřez profilu Clark Y v rozměrech, aby délka tětiny přesahovala dříve spočítanou hodnotu 152,3 mm. Tětiva musí být na počátku o něco delší, protože s délkou rozpětí dochází k jejímu ztenčování.

Následně byl navrhnut tvar křídla z půdorysu. Veškeré přechody hran byly udělány s tangenciální návazností, aby křídlo mělo co nejvíce aerodynamický tvar.



Obrázek 31 Importovaný profil Clark Y



Obrázek 32 Půdorys profilu křídla Clark Y

Následným spojením těchto profilů vznikl 3D model křídla, do kterého byly ještě přidány díry pro uchycení.

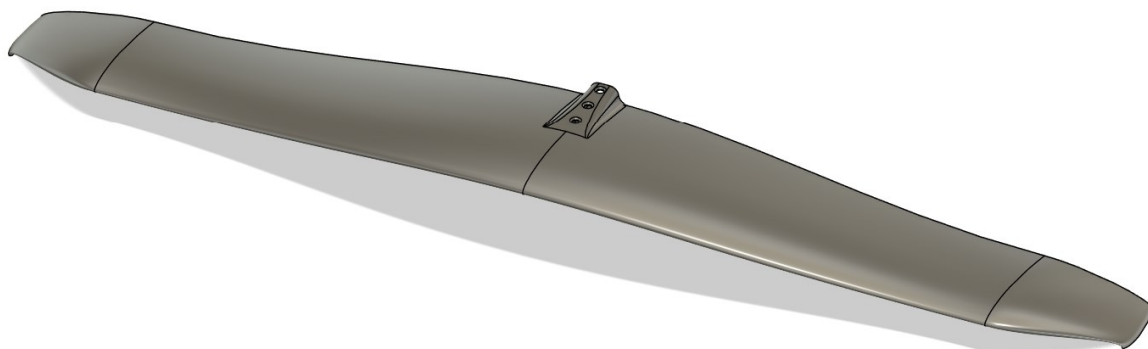


Obrázek 33 3D model křídla Clark Y

11.2 Modelování druhé varianty

Import průřezu profilu proběhl stejně jako u první varianty. Protože by ale druhá varianta křídla měla být podle výpočtů větší než křídlo první varianty, bylo by toto křídlo při ovládání těžkopádnější. Z tohoto důvodu bylo křídlo druhé varianty navrženo s anhedrálním prohnutím pro zvýšení manévrovatelnosti. Také systém upnutí zde nebylo možné vyřešit pouhými dírami pro připevnění, protože profil NACA 2412 nemá zespod rovnou hranu a

nebylo by tedy možné zaručit úhel náběhu 2° . Proto byla ve středu křídla vytvořena kapsa pro zasunutí špičky trupu.



Obrázek 34 3D model křídla NACA 2412



Obrázek 35 Anhedrání prohnutí křídla při pohledu zepředu

První varianta křídla s profilem Clark Y má programem spočítanou celkovou plochu křídel $1,639 \times 10^5 \text{ mm}^2$ a druhá varianta s profilem NACA 2412 $2,077 \times 10^5 \text{ mm}^2$, takže obě varianty splňují podmínku spočítanou v kapitole 10.2.

12 TVORBA ZBYLÝCH ČÁSTÍ HYDROFOILU

12.1 Zadní křídlo

Pro zadní křídlo bylo jako předloha vzato křídlo první varianty a zmenšeno v měřítku 0,5, což je běžný poměr mezi velikostí předního a zadního křídla. Také byly upraveny díry pro uchycení, které nebudou na zadním křídle namáhány tolik jako na předním křídle.

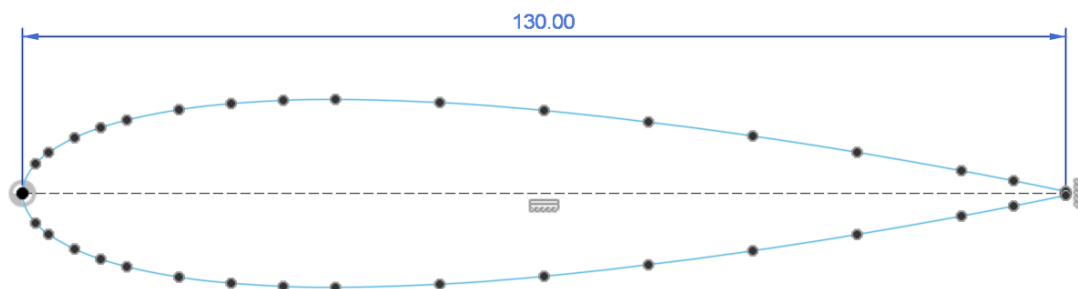


Obrázek 36 3D model zadního křídla

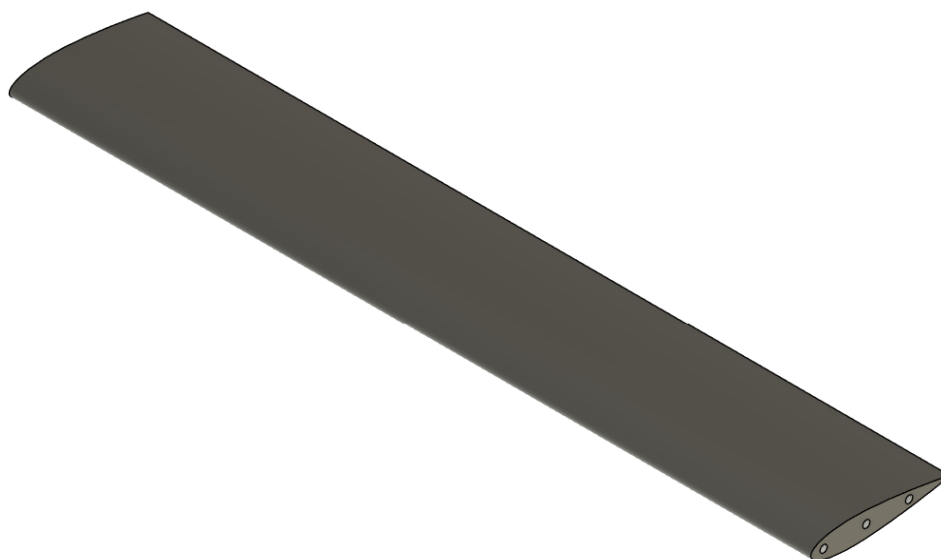
12.2 Ostruha (Mast)

Hlavní funkcí ostruhy je přenášet vztlakovou sílu generovanou křídly pod uživatele, a přitom způsobovat co nejmenší odpor. Délky ostruh se obvykle pohybují mezi 600 až 800 mm. S ohledem na univerzálnost použití byla délka ostruhy zvolena 750 mm. Aby byl odpor snížen na co nejmenší míru, byl pro profil průřezu zvolen aerodynamický symetrický tvar

křídla NACA 0018. Ostruha byla následně vytažena do již výše zmíněné délky a byly přidány díry pro uchycení.



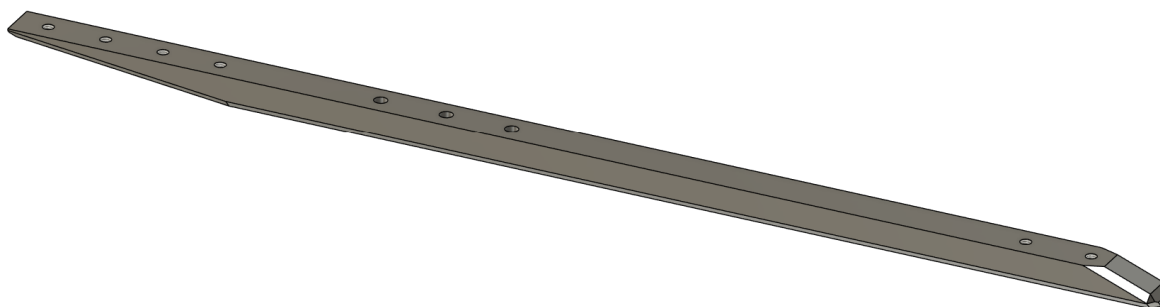
Obrázek 37 Profil ostruhy NACA 0018



Obrázek 38 3D model ostruhy

12.3 Trup (Fuselage)

Celý trup byl navržen pro dobré a pevné spojení všech částí s ohledem na co největší jednoduchost výroby. Musel být vyhotoven ve dvou provedeních, protože každá varianta křídel je upnuta jiným způsobem.



Obrázek 39 3D model trupu první varianty

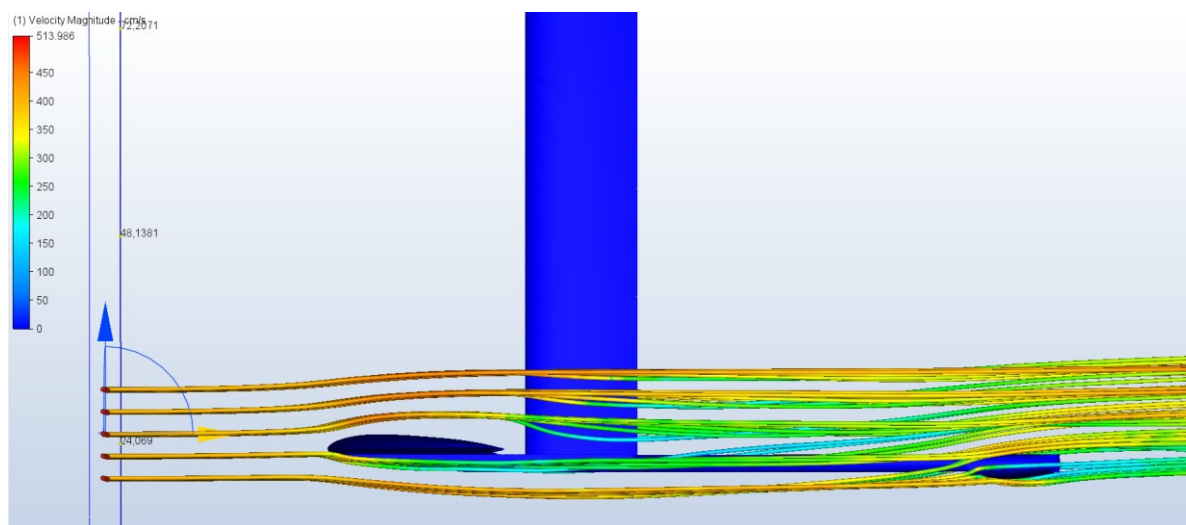


Obrázek 40 3D model trupu pro druhou variantu

13 SIMULACE PROUDĚNÍ

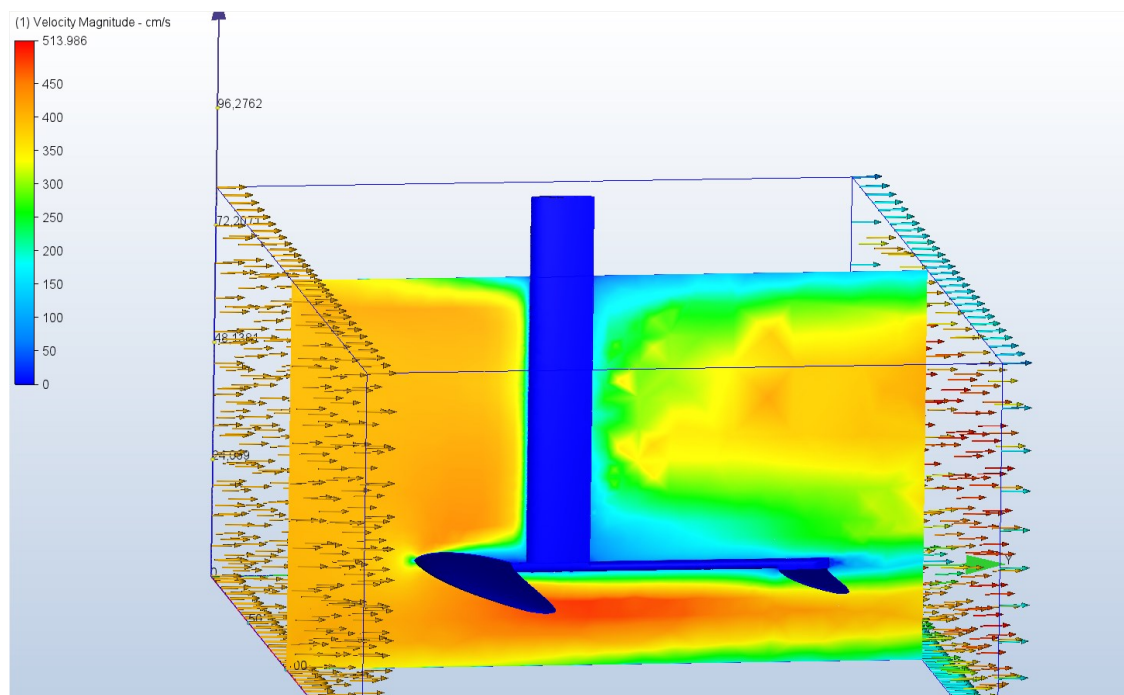
Pro vizualizaci obtékání vody kolem celého hydrofoilu a případné zjištění chyb byl použit program Autodesk CFD, který dobře spolupracuje s programem Fusion. V programu CFD byl nejprve vytvořen model aerodynamického tunelu, jehož vlastnosti byly následně nadefinovány tak, aby co nejpřesněji odpovídaly chování vody a rychlosti proudění okolo hydrofoilu.

13.1 Simulace proudění první varianty



Obrázek 41 Simulace proudění vody u první varianty – zobrazení proudových linek

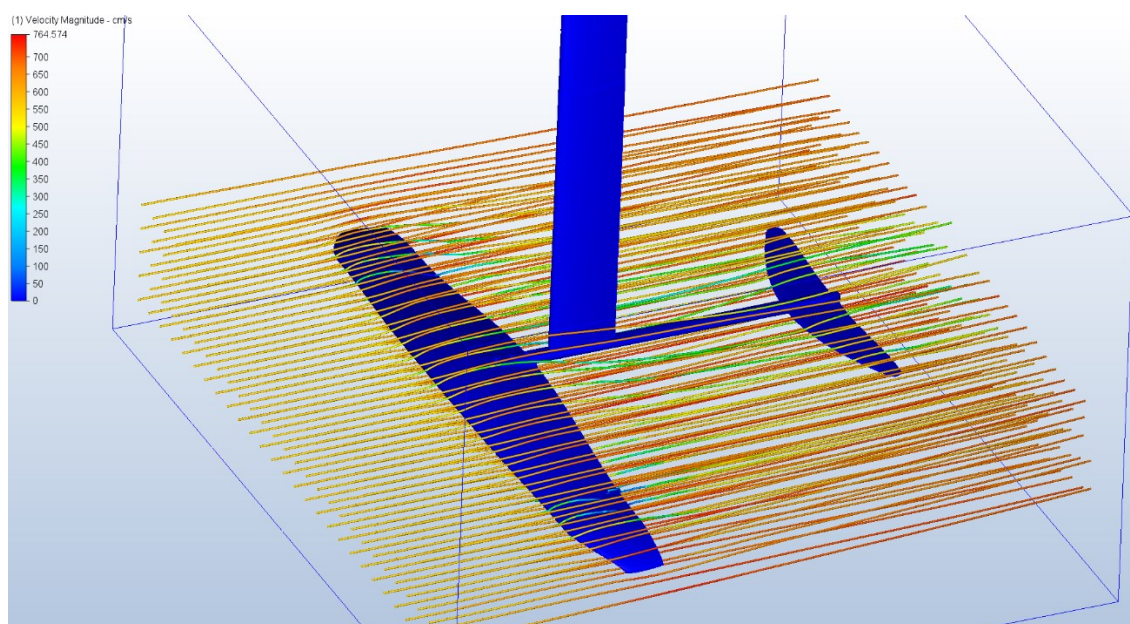
Na obrázku 41 je vidět, jak proudové linky dobře obtékají profil křidel. Měnící se barva linek zobrazuje rychlost proudění. Je tedy patrné, že na horní straně předního křídla proudí voda rychleji, což bude mít za následek generování vztlaku. Na obrázku 42 si pak lze všimnout tvorby mírných vírů za ostruhou, které budou hydrofoil zpomalovat.



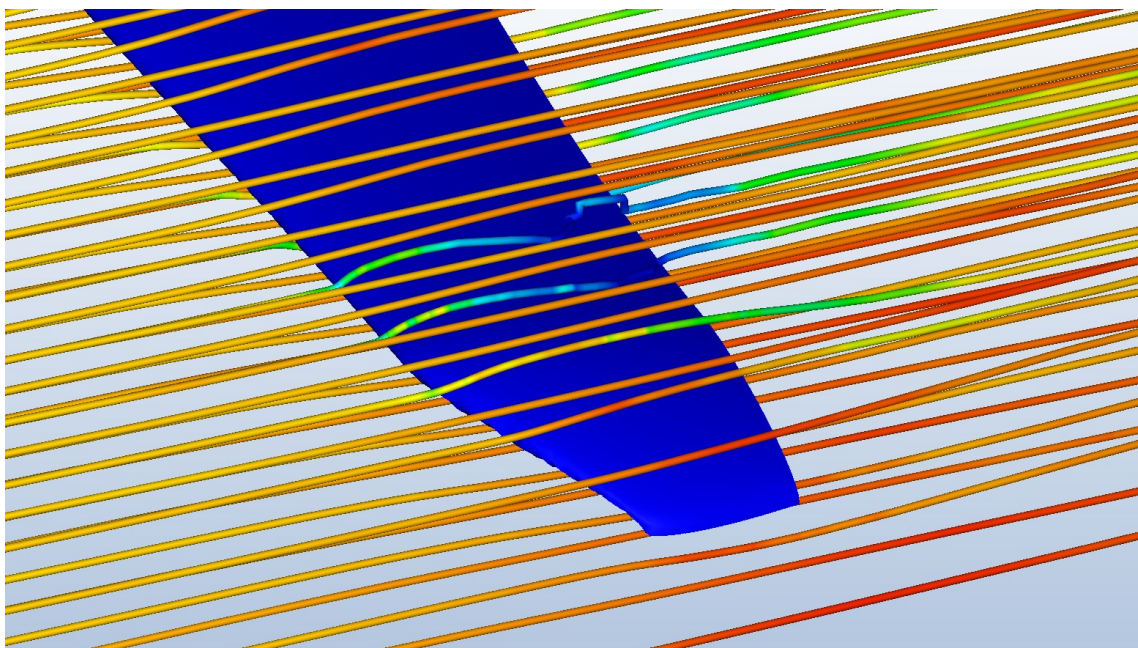
Obrázek 42 Simulace proudění vody u první varianty – zobrazení v řezu

13.2 Simulace proudění druhé varianty

U druhé varianty dochází u konců křídel k tvorbě vířivých proudů, které jsou silně nežádoucím efektem, protože nejen zvyšují odpor, ale také podstatně snižují křídlem generovaný vztlak. Tyto víry jsou vidět na obrázku 43 a detailněji na obrázku 44. Tento jev je způsoben horším designem křídla oproti první variantě, kde tento jev nevznikal.



Obrázek 43 Simulace proudění vody u druhé varianty – zobrazení proudových linek



Obrázek 44 Detail tvorby vírů na křídle

14 VOLBA VARIANTY

Na základě porovnání obou navržených variant předního křídla bylo pro finální realizaci zvoleno křídlo, které vykazovalo celkově výhodnější parametry z hlediska konstrukce i funkčnosti. Jedná se o první variantu s profilem průřezu Clark Y. Zvolená varianta disponuje jednodušším geometrickým tvarem a menšími rozměry, což výrazně usnadňuje výrobu. Simulace proudění pomocí Autodesk CFD navíc ukázaly větší tvořivost nežádoucích vírů ve srovnání se zvolenou první variantou. Konstrukční řešení rovněž umožňuje jednodušší a stabilnější způsob uchycení na trup hydrofoilu. Dílčí výhodou je také mírně vyšší součinitel vzlaku C_l , což přispívá k lepší účinnosti křídla při provozu. Jedinou nevýhodou této varianty je méně stabilní chování v optimální oblasti výkonu, jak výše ukázal obrázek č.30.

15 VOLBA JÁDRA

Při návrhu konstrukce hydrofoilu bylo důležité zvolit vhodný materiál jádra, které slouží jako základ pro následnou laminaci. Zvažovány byly dvě hlavní možnosti: jádro z tuhých konstrukčních pěn (například PVC nebo PU pěna) a jádro vyrobené metodou 3D tisku. Tuhé pěny jsou v kompozitních aplikacích běžně využívány pro svou nízkou hmotnost, dobrou opracovatelnost a velmi dobrou adhezi k epoxidovým pryskyřicím. V případě této aplikace by však vznikaly výrazné komplikace z hlediska výroby – vzhledem ke složitosti geometrie předního křídla by bylo náročné zhotovit přesný tvar jádra klasickým obráběním. Problémem by bylo zejména složité upnutí měkkého materiálu do frézovacího zařízení, stejně jako potřeba vícenásobného obrábění nebo použití víceosé CNC technologie. Oproti

tomu 3D tištěné jádro nabízí výrazně jednodušší cestu k výrobě složitých tvarů tím, že umožňuje přesnou realizaci detailních geometrií bez potřeby následného opracování. Přestože má metoda FDM tisku určité nevýhody, jako je vyšší hmotnost výsledného dílu a o něco nižší přilnavost povrchu k pryskyřici, tyto nevýhody byly stále akceptovatelné vzhledem ke stále možnému následnému laminování. Jako tiskový materiál bylo zvoleno PLA, které se vyznačuje stabilními rozměrovými vlastnostmi a na rozdíl od jiných běžných termoplastů, jako je například ABS, vykazuje relativně dobrou adhezi k epoxidovým pryskyřicím. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto využít 3D tištěné jádro jako nejefektivnější řešení z hlediska konstrukce, času i nákladů. Pouze díl trupu (fuselage) je dostatečně tvarově jednoduchý a malý, aby mohl být levně zhotoven klasickým třískovým obráběním z velmi lehkého a pevného materiálu – slitiny hliníku AW 7075.

16 VÝROBA SENDVIČOVÉ STRUKTURY

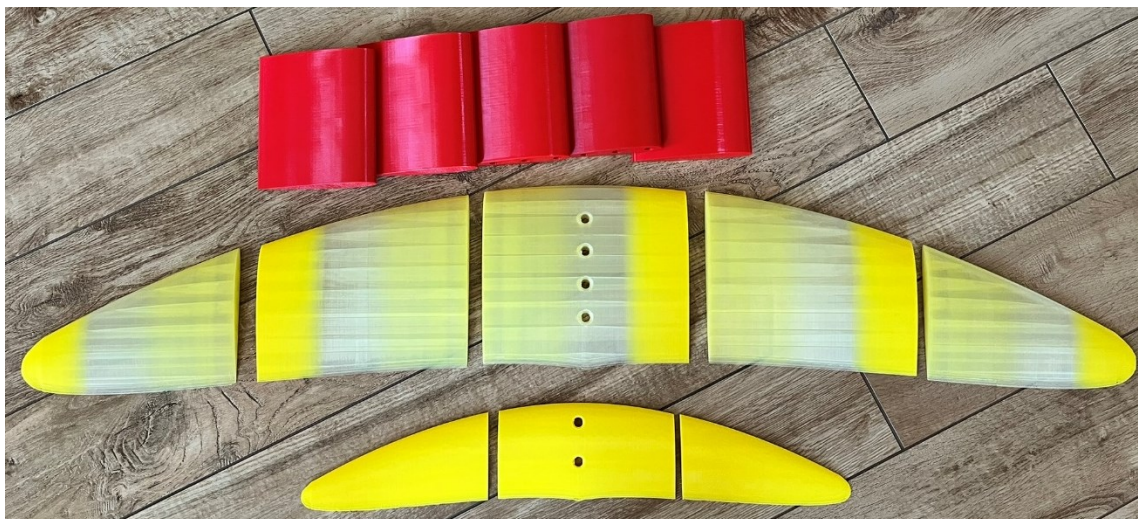
16.1 Výroba jader

Všechna jádra byla vytištěna z materiálu PLA na tiskárně Raise3D Pro2 plus s šířkou trysky 0,6 mm. Parametry tisku byly nastaveny na výšku vrstvy 0,4 mm a hustotu výplně 10% při vzoru čtvercové mřížky. Teplota extruderu byla nastavena na 220°C.



Obrázek 45 Vnitřek křídla s mřížkovou výplní 10%

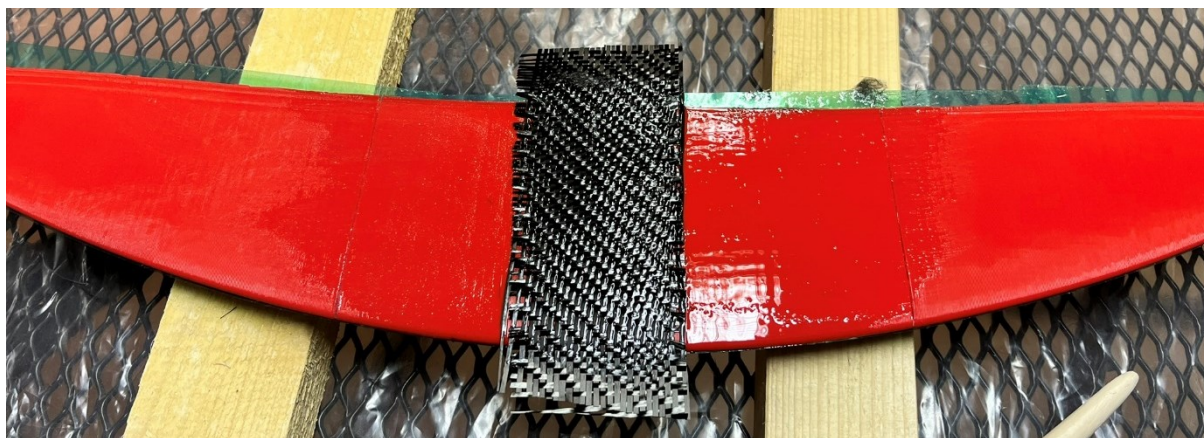
S těmito výrobními parametry byly vytisknuty všechny díly. Pro své velké rozměry však byly rozděleny na několik částí, které byly po dokončení tisku slepeny k sobě. Zadní křídla byla vyrobena a laminována dvě, protože jedno bylo následně použito při testování.



Obrázek 46 Jednotlivé díly jader po vytištění

16.2 Laminování jader

Poté co byly jednotlivé části jader slepeny k sobě, byla jádra laminována nejprve ze spodní strany. K laminování byla použita uhlíková keprová tkanina s hmotností 200g/m^2 a epoxidová pryskyřice, která se míchala spolu s tužidlem v poměru 100:40. Na spodní straně křídel bylo použito 5 vrstev uhlíkové tkaniny. První dvě vrstvy nepokrývají celou plochu křídel, ale slouží jako výztuž v nejvíce namáhaném místě křídel (uprostřed okolo děr).



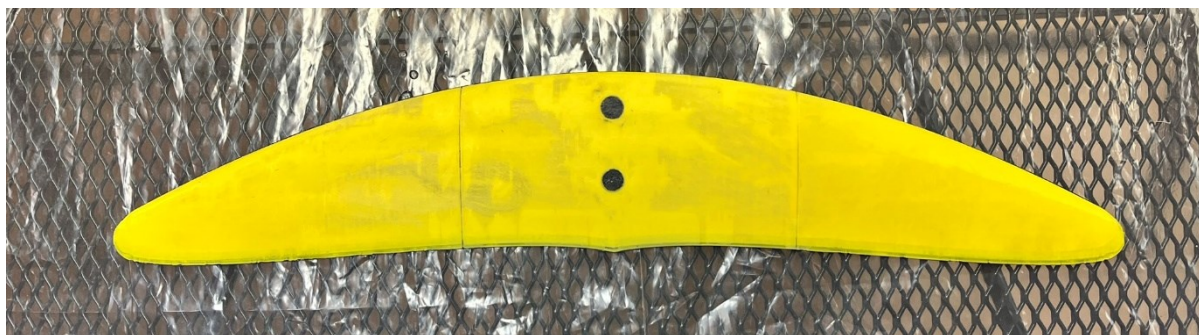
Obrázek 47 Laminování první výztuže zadního křídla ze spodní strany

Po těchto dvou vrstvách byly použity další tři vrstvy ve střídavé orientaci 0° a 45° , které již zakrývají a zpevňují celou spodní plochu křídla.



Obrázek 48 Spodní strana zadního křídla po laminování

Po vytvrzení všech vrstev byly přesahující okraje vybroušeny zpět do požadovaného tvaru a díry pro šrouby byly zality směsí pryskyřice a jemně nastříhaného uhlíkového vlákna, aby i vnitřní stěny děr měly později dobrou pevnost.



Obrázek 49 Vybroušené zadní křídlo se zalitými dírami

Stejným způsobem a se stejným počtem vrstev bylo křídlo laminováno i z vrchní strany a po vytvrzení byly znovu vyvrtány díry, tentokrát již pro požadovaný průměr. Přední křídlo se laminovalo stejným způsobem, ale protože přední křídlo je hlavní nosnou složkou, byla přidána jedna vrstva jako výztuha doprostřed a také jedna vrstva na celou plochu křídla. Jelikož má ostruha dobrý symetrický tvar, nebylo nutné ji laminovat ze dvou stran zvlášť. Hlavní plocha byla tedy laminována dohromady čtyřmi střídavě orientovanými vrstvami 0° a 45° . Po vytvrzení byly opět přebytečné okraje vybroušeny a díry zality směsí pryskyřice a uhlíkového vlákna. Na závěr byly vyvrtány díry pro šrouby a do ostruhy byly dány závitové vložky, aby mohla být ostruha přidělána k trupu.



Obrázek 50 Laminování ostruhy



Obrázek 51 Obroušené kraje ostruhy se zalitými dírami

16.3 Výroba trupu

Výroba trupu hydrofoilu probíhala na 3-osé CNC fréze z hranolového kusu slitiny hliníku AW7075 o rozměrech 20x25x700 mm. Hranolu byly nejprve sraženy hrany podle CAD modelu a následně vyvrtány požadované díry, do kterých byly na závěr vyřezány závity pro šrouby.



Obrázek 52 Frézování trupu



Obrázek 53 Hotový trup hydrofoilu

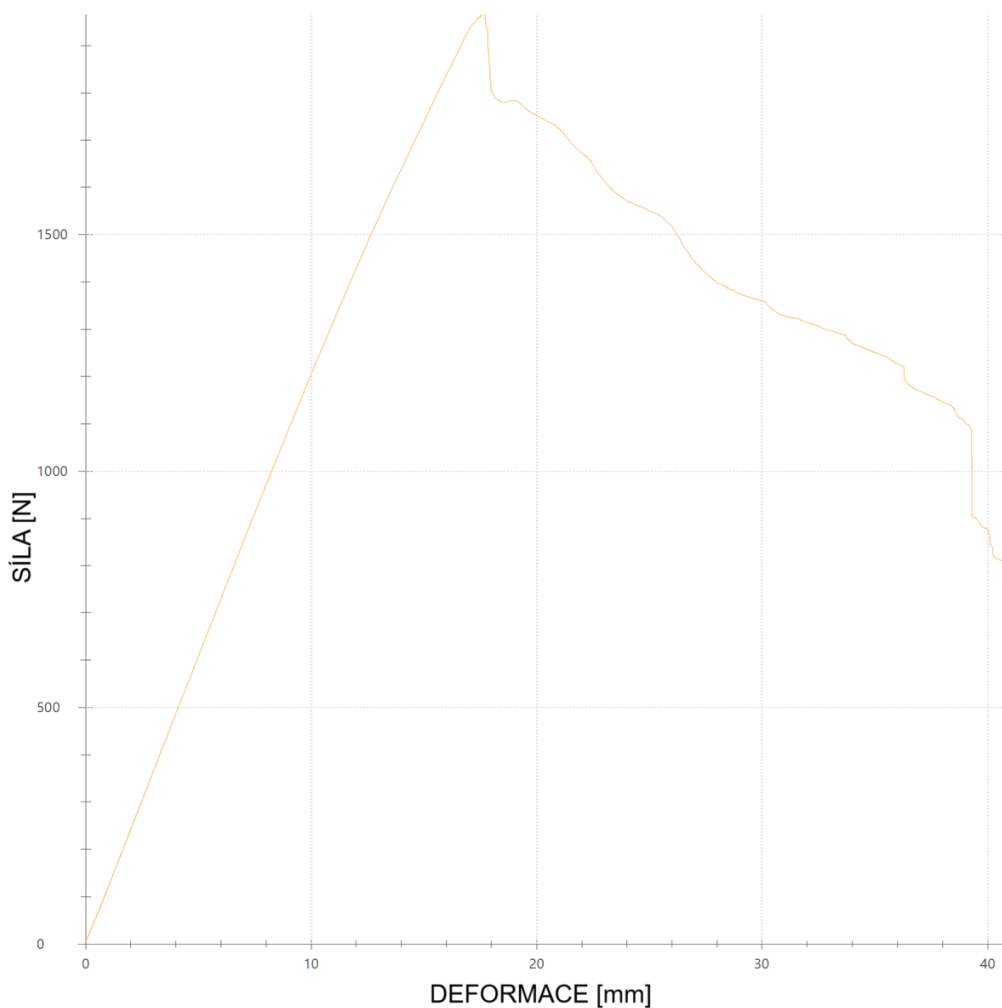
17 ZKOUŠKA V OHYBU ASTM D790

Tříbodová ohybová zkouška podle normy ASTM D790 je běžně používaná metoda pro stanovení mechanických vlastností materiálů a kompozitních struktur, zejména jejich pevnosti a tuhosti v ohybu. Principem této zkoušky je zatěžování vzorku podporovaného na dvou krajních bodech silou působící ve střední části, čímž dochází k jeho ohybové deformaci. Zkušební přístroj zaznamenává aplikovanou sílu a způsobenou deformaci. V rámci této práce byla tříbodová zkouška aplikována na zadní křídlo hydrofoilu. Zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji Zwick/Roell Z020, přičemž rozvor mezi podpěrami činil 380 mm a zatěžovací síla byla aplikována ve středu vzorku.



Obrázek 54 Zkouška tříbodovým ohybem

Cílem zkoušky bylo experimentálně ověřit pevnost laminované konstrukce a posoudit, zda je navržený sendvičový kompozit dostatečně tuhý a odolný pro použití v podmínkách vodních sportů. Vzorek odolal maximální síle 1970 N, při které došlo k jeho destrukci. Průhyb vzorku byl 17,6 mm v momentě největšího zatížení a 40,8 mm v momentě úplného prasknutí vzorku. Tyto hodnoty a celý průběh zkoušky je graficky znázorněn na obrázku 55.



Obrázek 55 Závislost průhybu křídla na síle při zkoušce tříbodovým ohybem

Protože ovšem zkoušeným vzorkem bylo zadní křídlo s proměnlivým tvarem a průřezem, a ne normalizovaný zkušební vzorek, nelze z výsledků vyvozovat stejné závěry jako při běžné zkoušce tříbodovým ohybem a získaná data je nutné brát jako spíše orientační. Maximální zatížení je však reálný údaj, který vzorek vydržel, a protože tato síla odpovídá váze téměř dvou set kilo můžeme odhadovat, že při reálném použití bude pevnost křídla dostačující. Maximální ohybové napětí lze spočítat z rovnice 8:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (8)$$

$$M_o = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} \quad (9)$$

$$W_o = \frac{I}{y_{MAX}} \quad (10)$$

Kde: σ_o – Ohybové napětí [MPa]

M_o – Ohybový moment [mm²]

W_o – Moment průřezu v ohybu [mm²]

F – zatěžující síla

l – rozvor podpěr

I – Kvadratický moment průřezu [mm⁴]

y_{MAX} – Maximální vzdálenost od neutrální osy

$$M_o = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} = \frac{1970 * 380}{4} = 187150 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Maximální ohybový moment, který při zkoušce tříbodovým ohybem působil, byl spočítán z rovnice 11, která vznikla dosazením hodnot do rovnice 9. Kvadratický moment průřezu I , potřebný pro rovnici 12, byl programem Autodesk Inventor spočítán na: 5190,18 mm⁴ a maximální vzdálenost od neutrální osy na: 6,385 mm.

$$W_o = \frac{I}{y_{MAX}} = \frac{5190,18}{6,385} = 812,9 \text{ mm}^3 \quad (12)$$

Maximální ohybové napětí je tedy:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{187150}{812,9} = 230,2 \text{ MPa} \quad (13)$$

Tento výpočet byl proveden pro průřez přímo ve středu profilu, kde je geometrie oslabena dírami pro šrouby. V místě, kde již díry nejsou je však kvadratický moment 7038,9 mm⁴ a z toho důvodu zde působí podstatně nižší ohybové napětí, které bylo spočítáno v následujících rovnicích 14 a 15.

$$W_o = \frac{I}{y_{MAX}} = \frac{7038,9}{6,385} = 1102,4 \text{ mm}^3 \quad (14)$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{187150}{1102,4} = 170 \text{ MPa} \quad (15)$$

Porovnáním výsledků rovnic 13 a 15 můžeme vidět, že v místě, kde nejsou díry pro šrouby je profil pod napětím o 60,2 MPa menším, což matematicky potvrzuje fakt, že nejvíce namáhaná oblast je okolo děr pro šrouby, a proto došlo k deformaci v tomto místě.



Obrázek 56 Zadní křídlo po zkoušce tříbodovým ohybem



Obrázek 57 Nejvíce namáhaný průřez po zkoušce

Ze zkoumání průřezu po zkoušce tříbodovým ohybem vyšlo najevo, že v pár místech nebyl povrch dostatečně prosycen. Těmto vadám v materiálu by se při případné budoucí optimalizaci procesu dalo předejít použitím formy, místo ručního laminování. V případě použití formy by také nebylo nutné povrch po laminování brousit. Vzrostla by tím ale cena hydrofoilu, protože výroba formy je nákladná.

18 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY PRO HLAVNÍ KŘÍDLO

Vzhledem k faktu, že přední i zadní křídlo mají stejný tvar i materiál a jsou pouze vyrobeny v jiném měřítku, lze dopočítat teoretickou maximální sílu, kterou by mělo hlavní křídlo vydržet. Z programu CAD byla zjištěna hodnota kvadratického momentu průřezu I , která má pro hlavní křídlo hodnotu $83577,6 \text{ mm}^4$. Hodnota maximální vzdálenosti y_{MAX} je podle programu CAD $12,8 \text{ mm}$, což odpovídá dvounásobku hodnoty y_{MAX} zadního křídla. Známeli tyto hodnoty, pak dosazením do rovnice 10 dostaneme moment průřezu v ohybu pro přední křídlo.

$$W_o = \frac{I}{y_{MAX}} = \frac{83577,6}{12,8} = 6529,5 \text{ mm}^3 \quad (16)$$

Vycházíme-li z předpokladu, že maximální napětí, které je tato sendvičová konstrukce schopna vydržet je 230,2 MPa, pak vyjádřením ohybového momentu z rovnice 8 lze spočítat jeho hodnotu.

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (17)$$

$$\rightarrow M_o = \sigma_o * W_o = 230,2 * 6529,5 = 1503090,9 \text{ N/mm}$$

Podobně byla i z rovnice 9 vyjádřena maximální působící síla. Protože je celé přední křídlo oproti zadnímu křídlu ve dvounásobném měřítku, je nutné počítat i s dvakrát větším rozvorem podpěr, tedy 760mm.

$$M_o = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} \quad (18)$$

$$\rightarrow F_o = \frac{4 * M_o}{l} = \frac{4 * 1503090,9}{760} = 7911 \text{ N}$$

Spočítaná maximální síla 7911 N odpovídá hmotnosti 806,4 Kg, kterou by mělo přední křídlo teoreticky unést. Je však třeba si uvědomit, že tato síla je opravdu teoretická a spíše přibližná, a to z několika důvodů:

- 1) Výpočet předpokládá stejný počet laminovaných vrstev, což neplatí, protože na hlavní křídlo bylo použito o jednu výztuhu i hlavní vrstvu více, a to z obou stran.
- 2) Výpočet předpokládá stejné prosycení laminovaných vrstev, což je u ručního laminování nemožné dodržet
- 3) Výpočet předpokládá stejnou kvalitu materiálu, stejný počet materiálových vad a případných delaminací

19 DOKONČENÍ A SESTAVENÍ HYDROFOILU

Po dokončení všech laminovacích operací byly díly ručně broušeny brusným papírem, aby se dosáhlo nižší drsnosti povrchu a mohlo docházet k dobrému obtékání profilu při budoucím použití.



Obrázek 58 Porovnání povrchů před (vlevo) a po broušení

Následujícím krokem bylo přidání závitových vložek na oba konce ostruhy, aby ostruha mohla být přidělána k trupu a horní desce. Závitové vložky byly dány do předem vytištěných děr, které byly – stejně jako díry pro šrouby u křídel – zality směsí uhlíkového vlákna s pryskyřicí a poté znovu vyvrtány s menším průměrem.



Obrázek 59 Závitové vložky v ostruze



Obrázek 60 Sestavený hydrofoil

Po vložení všech šesti závitových vložek mohl být kompletní hydrofoil sestaven. Celá sestava hydrofoilu má včetně použitých šroubů hmotnost 3,29 kg, což je jen mírně vyšší hodnota než průměrná hmotnost komerčně prodávaných hydrofoilů. Hmotnosti hydrofoilů se obvykle pohybují v rozpětí od 2 do 4 kg bez horní desky. Hmotnost okolo dvou kilogramů mají závodní a velmi výkonné hydrofoily s cenou pohybující se od 30 000 až 60 000 Kč. Nejběžnější modely pak mívají hmotnost zhruba 3 kilogramy a jejich cena bývá v rozmezí 14 000 a 25 000 Kč. U těchto modelů se hmotnost často mění i v závislosti na materiálu ostruhy, který někteří výrobci vyrábějí ze slitiny hliníku a někteří z uhlíkového vlákna. Modely, které váží 4 kilogramy a více se řadí spíše k levným a méně kvalitním výrobkům.

Na vrchní stranu ostruhy pak byla ještě přidělena deska pro uživatele, která umožňuje stabilní stání a ovládání hydrofoilu přenášením těžiště.



Obrázek 61 Sestava hydrofoilu s deskou

Samotná deska má hmotnost 3,6 kilogramů, čímž celková hmotnost hydrofoilové sestavy stoupla na 6,89 kilogramů. Tato hodnota je pro používání přijatelná, protože z bezpečnostních důvodů se výpočty prováděly s hmotností 15 kilogramů.

Cena výroby hydrofoilu byla spočítána v následující tabulce. Výsledky výpočtů nemohou být brány jako naprosto přesné, protože laminovaná plocha byla počítána s 30% rezervou a také cena uhlíkové tkaniny byla zvolena jako přibližně průměrná hodnota ceny na trhu.

Tabulka 1 Kalkulace ceny hydrofoilu

KALKULACE CENY HYDROFOILU							
1. VÝDAJE PŘI LAMINOVÁNÍ							
	Část hydrofoilu	Plocha [mm²]	Počet vrstev	Spotřeba tkaniny [m²] bez rezervy	Spotřeba tkaniny [m²] s rezervou (30%)	Cena za 1 m²	Celková cena
	Přední křídlo	163 820	4	0,655	0,852	750 Kč	639 Kč
	Zadní křídlo	40 955	3	0,123	0,16	750 Kč	120 Kč
	Ostruha	202 400	4	0,81	1,053	750 Kč	790 Kč
	Epoxidová pryskyřice	-	-	-	-	219,9 Kč	454 Kč
	Celkem	-	-	1,588 m ²	2,065 m ²	-	2 003 Kč
2. VÝROBA TRUPU							
	Výdaj	Cena					
	Materiál + obrobení trupu	6 000 Kč					
3. ZBYLÉ VÝDAJE							
	Výdaj	Cena					
	Závitové vložky	96 Kč					
	štetec na laminování	50 Kč					
	rukavice	42 Kč					
	šrouby	32 Kč					
	brusný papír	129 Kč					
	těsnící páska	140 Kč					
	CELKOVÁ CENA HYDROFOILU	8 492 Kč					

Celková cena za výrobu hydrofoilu činí přibližně 8492 Kč, což je výrazně nižší cena než u komerčně prodávaných hydrofoilů, kde se cena pohybuje od 14 000 výše. Je však nutné dodat, že výroba metodou ručního laminování se odrazila na několika parametrech výsledného produktu. Vlastní hydrofoil vykazuje nižší rozměrovou přesnost, vyšší povrchovou drsnost, kvůli které bylo nutné provést dodatečné ruční broušení, a celkově horší estetický vzhled oproti komerčně vyráběným modelům. Dále vykazuje mírně vyšší hmotnost, způsobenou odlišným materiálem jader oproti komerčně prodávaným typům. Rizikem je také vyšší pravděpodobnost výskytu materiálových vad způsobených ručním

postupem laminace. Také je nutné zmínit, že v celkové kalkulaci nákladů nebyla zahrnuta cena 3D tištěných jader, ani vlastní práce nezbytná pro výrobu jednotlivých dílů. Finální povrch hydrofoilu by pro dosažení lepšího vzhledu mohl být případně lakován.

20 TESTOVÁNÍ PŘI PRAKTICKÉM POUŽITÍ

Pro ověření celkové funkčnosti byl hydrofoil vyzkoušen při běžném použití. Testování potvrdilo generování vztlaku předním křídlem i správné nastavení všech ostatních komponentů. Tím byla prokázána správná funkce hydrofoilu v provozu, i když je nutné zmínit, že testování prováděl amatérský uživatel. Křídlem generovaný vztlak však byl dostatečný pro udržení uživatele i se sestavou nad hladinou. Důležitý je i fakt, že i samotný hydrofoil plave a to jak celá sestava, tak i spodní část bez horní dřevěné desky. Díky tomu nehrozí obavy, že by hydrofoil v případě nehody zmizel na dně.



Obrázek 62 Testování hydrofoilové sestavy

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřila na problematiku kompozitních materiálů, jejich strukturu, vlastnosti a možnosti aplikace, s důrazem na sendvičové konstrukce a jejich využití v oblasti vodních sportů, konkrétně pro výrobu hydrofoilu. V teoretické části byla nejprve provedena literární rešerše zaměřená na druhy kompozitů, používané typy výztuží a matric, technologické postupy výroby a vlastnosti finálních materiálů. Dále byla popsána problematika hydrofoilů – princip jejich funkce, konstrukční řešení, rozdělení typů a byly také popsány některé nežádoucí jevy, jako je například kavitace, která může výrazně ovlivnit funkci hydrofoilu při vyšších rychlostech.

V praktické části byl nejprve vytvořen kompletní návrh hydrofoilu zahrnující trup, přední a zadní křídlo a ostruhu. Návrh předního křídla byl vytvořen ve dvou variantách, které byly porovnávány pomocí simulace proudění v softwaru Autodesk CFD. Tento proces využíval simulaci aerodynamického tunelu s fyzikálními vlastnostmi nakonfigurovanými pro chování vody. Výsledky simulací vedly k výběru varianty křídla, která kromě snadnější výroby nabídla také menší rozměry, lepší aerodynamické charakteristiky, vyšší součinitel vztlaku C_l a výhodnější možnosti upevnění k trupu hydrofoilu.

Pro výrobu konstrukce bylo rozhodováno mezi použitím jádra z tuhých pěn a jádra vyrobeného technologií 3D tisku. Ačkoliv pěnová jádra nabízejí nižší hmotnost a lepší adhezi pro laminování, bylo nakonec zvoleno 3D tištěné jádro z materiálu PLA. Toto řešení bylo výhodnější z hlediska snadnější výroby složitých tvarů, nižší ceny a lepší dostupnosti technologie. Byl také zohledněn fakt, že při výrobě jádra z lehkých pěn by vznikly komplikace související s upnutím do CNC strojů a frézováním složitých tvarů, což by proces výrazně prodražilo. Materiál PLA byl zvolen, protože nabízí lepší adhezi k pryskyřicím v porovnání například s materiálem ABS, což zvyšuje kvalitu spojení mezi jádrem a kompozitními vrstvami.

Samotné díly byly následně ručně laminovány pomocí uhlíkové tkaniny s hmotností 200 g/m² a keprovou vazbou. Jádra byla laminována v několika vrstvách, jejichž orientace se střídala pod 45° pro co nejvíce izotropní chování. Po laminaci bylo nutné provést ruční broušení všech dílů za účelem dosažení hladkého povrchu, protože při ručním laminování dochází k vyšší nerovnosti povrchu oproti profesionálním výrobním postupům.

K ověření mechanických vlastností byl na zadním křídle proveden test tříbodového ohybu na zkušební stroji Zwick/Roell Z020. Vzorek dosáhl maximální síly 1 970 N při rozvoru podpěr 380 mm. Z této hodnoty bylo vypočítáno maximální napětí v ohybu 230,2 MPa. Na

základě těchto údajů byl následně proveden teoretický výpočet pevnosti hlavního křídla se shodným tvarem, ale ve dvojnásobném měřítku. Výpočty ukázaly, že díky nárůstu kvadratického momentu by bylo zvětšené křídlo teoreticky schopné nést odpovídajícím způsobem vyšší zatížení (přibližně 7911N), což potvrzuje dostatečnou rezervu pevnosti konstrukce.

Dále bylo provedeno cenové srovnání vlastního hydrofoilu s komerčně dostupnými modely. Výroba vlastního hydrofoilu včetně všech potřebných materiálů vyšla na přibližně 8 450 Kč. Tato částka je výrazně nižší než běžná cena komerčních hydrofoilů, které se pohybují v rozmezí od 14 000 Kč výše. Ruční výroba a použití 3D tištěného jádra se však odrazily v některých nevýhodách výsledného výrobku. Hmotnost hydrofoilu činí 3,29 kg, což je mírně více než průměrná hmotnost u sériově vyráběných karbonových hydrofoilů. Také povrchová kvalita je nižší, a to jak z hlediska rozměrové přesnosti, tak estetického vzhledu. Navíc v ceně výroby nebyla zohledněna práce ani náklady na výrobu 3D tištěných jader.

Poslední částí diplomové práce bylo ověření funkčnosti hydrofoilové sestavy při běžném použití. V této části byly naplněny předpoklady, že křídlem generovaný vztlak bude dostatečný pro běžný provoz a že jeho funkčnost je dostatečná pro použití ve vodních sportech.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny a celkově práce prokázala, že výroba funkčního kompozitního hydrofoilu s využitím dostupných technologií a materiálů je možná i v domácích podmínkách za velmi konkurenceschopnou cenu. Přes některé zmíněné nevýhody z hlediska hmotnosti a kvality povrchu lze konstatovat, že dosažené mechanické vlastnosti, pevnostní rezervy a celková funkčnost konstrukce umožňují praktické použití vyrobeného hydrofoilu v reálných podmínkách vodních sportů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. 1. Taylor & Francis, 1998. ISBN 1560327014.
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. Praha: SNTL, ISBN 978-80-151-1040.
- [4] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 9788073722791.
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 8070839724.
- [6] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 9788074540158.
- [7] *The Essential Chemical Industry – Composites*. Online. The Essential Chemical Industry. 2013. Dostupné z: <https://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html>. [cit. 2024-03-19].
- [8] FAZAL, Adnal. *Polymer Fibre Composites: Investigation Into Performance Enhancement through Viscoelastically Generated Pre-stress*. Disertační práce. Kingston upon Hull: University of Hull, 2014.
- [9] AGARWAL, Bhagwan D. a BROUTMAN, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury
- [10] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 156 s. ISBN 80-704-3273-X.
- [11] CAMPBELL, F. C. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 9781613441244.
- [12] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály*. Online. [2010]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/progtech/Kompozity%20_%20ZCU.pdf. [cit. 2024-04-02].
- [13] ABDULLAH, S. a ZULKIFLI, R. *Failure Characterization in Polymer Matrix Composite for Un-notched and Notched (open-hole) Specimens under Tension Condition*. Odborný článek. Malaysia: The National University of Malaysia, 2014.
- [14] MA, Wenguang a ELKIN, Russel. *Sandwich Structural Composites*. Online. CRC Press, 2021. ISBN 9781003035374. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781003035374>. [cit. 2024-10-01].

- [15] CALLISTER, William D. a RETHWISCH, David G. *Materials science and engineering: an introduction*. 9th ed. Hoboken, NJ.: Wiley, v2014. ISBN 9781118324578
- [16] CASTANIE, Bruno; BOUVET, Christophe a GINOT, Malo. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. Online. *Composites Part C: Open Access*. 2020, roč. 1. ISSN 26666820. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>. [cit. 2024-10-01].
- [17] *How Composite Materials in Sports Equipment Enhance Performance and Safety*. Online. GMS Composites. Dostupné z: <https://www.gmscomposites.com/how-composite-materials-in-sports-equipment-enhance-performance-and-safety/>. [cit. 2024-10-14].
- [18] *Sport and Recreation Applications of Composites*. Online. Composites lab. Dostupné z: <https://compositeslab.com/where-are-composites-used/sport-recreation-applications/index.html>. [cit. 2024-10-14].
- [19] *Composites in Sports and Leisure*. Online. Impact Materials. Dostupné z: <https://ictfibers.com/industry/composites-in-sports-leisure/>. [cit. 2024-10-14].
- [20] *The History of Hydrofoils*. Online. Mewburn Ellis. Dostupné z: <https://www.mewburn.com/news-insights/the-history-of-hydrofoils>. [cit. 2024-10-14].
- [21] LIAO, Yingqian a GARG, Nitin. *Viscous Fluid Structure Interaction Response of Composite Hydrofoils*. Online. University of Michigan, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.043>. [cit. 2024-10-14].
- [22] *Early Hydrofoils*. Online. International Hydrofoils Society. Dostupné z: <https://foils.org/library/bibliography/early-hydrofoils/>. [cit. 2024-10-23].
- [23] ROSALDO, Tina. *Hydrofoils*. Online. Massachusetts Institute of Technology. Dostupné z: <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>. [cit. 2024-10-23].
- [24] *How Does a Hydrofoil Work*. Online. Aerofoils. 2023. Dostupné z: https://aerofoils.de/blogs/blog/how-does-a-hydrofoil-work?srsId=AfmBOooqBwaRvJISYkbV8_IAXQd_6tF6EC-ErPfHa8QhxMqfJdWfTCmF. [cit. 2024-10-23].
- [25] *How Hydrofoils Work: Physics and Limitations*. Online. Pump foiling Community. 2023. Dostupné z: <https://pumpfoiling.community/how-a-hydrofoil-works/>. [cit. 2024-10-23].
- [26] *Forces – AQA Synergy*. Online. British Broadcasting Corporation. Dostupné z: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zq94y4j/revision/3>. [cit. 2024-10-23].

- [27] *Slovník pojmů*. Online. Airspace. 2011. Dostupné z: https://www.airspace.cz/akademie/slovník/slovník_pojmu.php. [cit. 2024-10-23].
- [28] DECHER, Reiner. *The Vortex and the Jet*. Online. Springer, 2022. ISBN 978-981-16-8028-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8028-1>. [cit. 2024-10-23].
- [29] *Flow Visualization*. Online. Smart Blade. 2023. Dostupné z: <https://www.smart-blade.com/windtunnel-desi>. [cit. 2024-10-23].
- [30] *Airfoil Data*. Online. Airfoil Tools. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/index>. [cit. 2024-10-23].
- [31] PLOË, Patrick. *Surrogate-based optimization of hydrofoil shapes using RANS simulations*. Online, Disertační práce. Nantes: École Centrale de Nantes, 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331396400_Surrogate-based_optimization_of_hydrofoil_shapes_using_RANS_simulations. [cit. 2024-11-13].
- [32] *Numerical simulation of air ventilation and its suppression on inclined surface-piercing hydrofoils*. Online. Elsevier, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.040>. [cit. 2024-11-14].
- [33] *Measuring cavitation and its cleaning effect*. Online. Elsevier, 2015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>. [cit. 2024-11-18].
- [34] *Fázové rovnováhy, fázový diagram jednosložkové soustavy*. Online. Obecná chemie. 2018. Dostupné z: <https://chemie-obecna.blogspot.com/2011/07/fazove-rovnovahy-fazovy-diagram.html>. [cit. 2024-11-18].
- [35] *Cavitation in Blast Induced Traumatic Brain Injury: The Occurrence, Mechanism, Threshold and Implication*. Online, Disertační práce. London: Imperial College London, 2022. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/362826746_Cavitation_in_blast_induced_traumatic_brain_injury_the_occurrence_mechanism_threshold_and_implication#full-text. [cit. 2024-11-18].
- [36] *F-one Hydrofoil*. Online. Baks distribution. 2016. Dostupné z: <https://bayareakitesurf.com/2016/08/25/new-product-introducing-f-one-hydrofoil/>. [cit. 2024-11-18].
- [37] *Hydrofoil types and their differences*. Online. McConks. 2020. Dostupné z: <https://mcconks.com/hydrofoil-types-and-their-differences-mcconks-guide/>. [cit. 2024-11-18].

- [38] *Guide and tips on how to choose a hydrofoil*. Online. Surfoon. 2024. Dostupné z: <https://surfoon.com/en/blogs/tips/guide-and-tips-on-how-to-choose-a-hydrofoil-for-wing-foil>. [cit. 2024-11-18].
- [39] *What are hydrofoils*. Online. Lyahawaii. 2023. Dostupné z: <https://lyahawaii.com/what-are-hydrofoils/>. [cit. 2024-11-18].
- [40] *The Wings*. Online. L'avionnaire. 2010. Dostupné z: <https://www.lavionnaire.fr/AngWings.php>. [cit. 2024-11-18].
- [41] ASHBY, M. F. a JOHNSON, Kara. *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Online. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, c2010. ISBN 978-1-85617-497-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpMDTASMS2/toc?cid=kpMDTASMS2>. [cit. 2025-01-13].
- [42] HÁNA, Tomáš. *Funkční polymerní pěny*. Online, Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/ac33364a-81b4-4851-ae26-5657d643b2d7/content>. [cit. 2025-01-13].
- [43] *Starboard - Hydrofoil*. Online. Starboard. 2025. Dostupné z: <https://www.starboard.cz/>. [cit. 2025-02-19].
- [44] *Foil Brands*. Online. Surf FX. 2025. Dostupné z: <https://www.surffx.com.au/collections/foil-brands?srltid=AfmBOor7tckdT8lO2fWJqR786q7caiVy-fDXmRqp32lC6gQh6VIHtCI4>. [cit. 2025-02-19].
- [45] KUMAR, S a SINGH, I. On Laminated Object Manufactured FDM-Printed ABS/TPU Multimaterial Specimens: An Insight into Mechanical and Morphological Characteristics. Online. *MDPI Polymers*. 2022, s. 19. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14194066>. [cit. 2025-03-17].
- [46] KRUPNIN, Arthur E.; ZAKIROV, Arthur R.; SEDUSH, Nikita G.; ALEXANYAN, Mark M.; AGANESOV, Alexander G. et al. Theoretical and Experimental Investigation of 3D-Printed Polylactide Laminate Composites' Mechanical Properties. Online. *Materials*. 2023, roč. 16, č. 22, s. 13. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16227229>. [cit. 2025-03-17].
- [47] LIU, Zengguang; WANG, Yanqing; WU, Beicheng; CUI, Chunzhi; GUO, Yu et al. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology. 2019, roč. 102, č. 9-12, s. 2877-2889. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03332-x>. [cit. 2025-03-17].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Zobrazení vláknových kompozitů [7]	13
Obrázek 2 Rozvoj trhliny ve vláknovém kompozitu [8].....	14
Obrázek 3 Rozdělení kompozitů podle výztuže [10].....	15
Obrázek 4 Vliv průměru skelného vlákna na pevnost [1].....	16
Obrázek 5 Závislost pevnosti kompozitu na úhlu vláken [1].....	17
Obrázek 6 Orientace vrstev laminátu [11]	18
Obrázek 7 Uspořádání skelných vláken [13]	20
Obrázek 8 Typy křížení tkanin [1].....	20
Obrázek 9 Rozdělení uhlíkových vláken [1].....	22
Obrázek 10 Sendvičová struktura [16].....	25
Obrázek 11 Druhy buněk voštin [14].....	26
Obrázek 12 Síly působící na loď [26]	30
Obrázek 13 Úhel náběhu na křídle [27]	31
Obrázek 14 Vizualizace proudění kapaliny [28].....	32
Obrázek 15 Vizualizace vírů při různých úhlech náběhu [29].....	32
Obrázek 16 Závislost vztlakového koeficientu na úhlu náběhu [30].....	33
Obrázek 17 Způsoby ovládání fully submerged hydrofoilu [31].....	34
Obrázek 18 Typy konstrukčních řešení hydrofoilů [31]	34
Obrázek 19 Zobrazení Spray efektu v zadní části hydrofoilu [31]	35
Obrázek 20 Ventilace surface piercing hydrofoilu [31].....	35
Obrázek 21 Omezení ventilace použitím plotů [32]	36
Obrázek 22 Fázový diagram vody [34].....	36
Obrázek 23 Kolaps bubliny v blízkosti stěny a vznik Microjetu [35]	37
Obrázek 24 Příčina vzniku kavitace u hydrofoilu [31]	37
Obrázek 25 Testování hydrofoilu v kavitačním tunelu [31]	38
Obrázek 26 Části fully submerged hydrofoilu [39]	38
Obrázek 27 Křídla s různými poměry stran [40]	39
Obrázek 28 Srovnání průřezů profilů.....	45
Obrázek 29 Porovnání závislostí vztlakového koeficientu na úhlu náběhu.....	46
Obrázek 30 Závislosti poměru vztlakového a odporového koeficientu na úhlu náběhu	47
Obrázek 31 Importovaný profil Clark Y	49
Obrázek 32 Půdorys profilu křídla Clark Y	50
Obrázek 33 3D model křídla Clark Y	50
Obrázek 34 3D model křídla NACA 2412.....	51

Obrázek 35 Anhedralní prohnutí křídla při pohledu zepředu	51
Obrázek 36 3D model zadního křídla	51
Obrázek 37 Profil ostruhy NACA 0018	52
Obrázek 38 3D model ostruhy	52
Obrázek 39 3D model trupu první varianty	52
Obrázek 40 3D model trupu pro druhou variantu	53
Obrázek 41 Simulace proudění vody u první varianty – zobrazení proudových linek.....	53
Obrázek 42 Simulace proudění vody u první varianty – zobrazení v řezu.....	54
Obrázek 43 Simulace proudění vody u druhé varianty – zobrazení proudových linek	54
Obrázek 44 Detail tvorby vírů na křídle	55
Obrázek 45 Vnitřek křídla s mřížkovou výplní 10%.....	56
Obrázek 46 Jednotlivé díly jader po vytištění	57
Obrázek 47 Laminování první výztuže zadního křídla ze spodní strany.....	57
Obrázek 48 Spodní strana zadního křídla po laminování	58
Obrázek 49 Vybroušené zadní křídlo se zalitými dírami	58
Obrázek 50 Laminování ostruhy.....	59
Obrázek 51 Obroušené kraje ostruhy se zalitými dírami.....	59
Obrázek 52 Frézování trupu	60
Obrázek 53 Hotový trup hydrofoilu.....	60
Obrázek 54 Zkouška třibodovým ohybem.....	61
Obrázek 55 Závislost průhybu křídla na síle při zkoušce třibodovým ohybem	62
Obrázek 56 Zadní křídlo po zkoušce třibodovým ohybem.....	64
Obrázek 57 Nejvíce namáhaný průřez po zkoušce	64
Obrázek 58 Porovnání povrchů před (vlevo) a po broušení	66
Obrázek 59 Závitové vložky v ostruze	66
Obrázek 60 Sestavený hydrofoil.....	66
Obrázek 61 Sestava hydrofoilu s deskou	67
Obrázek 62 Testování hydrofoilové sestavy.....	69

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Kalkulace ceny hydrofoilu	68
---	----

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	[N]	Síla
L	[N]	Vztlačková síla
C_L	[-]	Vztlačkový koeficient
ρ	[Kg/m ³]	Hustota
v	[m/s]	Rychlost
A	[m ²]	Plocha
C_D	[-]	Koeficient odporu
α	[°]	Úhel náběhu
F_G	[N]	Gravitační síla
m_U	[Kg]	Hmotnost uživatele
m_H	[Kg]	Hmotnost hydrofoilu
Q	[Kg]	Bezpečnostní hmotnostní přídavek
g	[m/s ²]	Gravitační konstanta
AR	[-]	Poměr stran křídel
NACA	[-]	National Advisory Committee for Aeronautics
CFD	[-]	Computational fluid dynamics
σ_O	[MPa]	Ohybové napětí
M_O	[mm ²]	Ohybový moment
W_O	[mm ³]	Moment průřezu v ohybu
l	[mm]	Rozvor podpěr při zkoušce tříbodovým ohybem
I	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
y_{MAX}	[mm]	Maximální vzdálenost od neutrální osy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list polymerního jádra PLA

Příloha P II: Materiálový list uhlíkové tkaniny

Příloha P III: Materiálový list epoxidové pryskyřice – L 285

Příloha P IV: Materiálový list trupu hydrofoilu

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST POLYMERNÍHO JÁDRA PLA

Raise3D Premium PLA_TDS

Dec.2024 Version 6.0

Raise3D Premium PLA Technical Data Sheet

Raise3D Premium PLA is a premium PLA designed for all desktop FDM/FFF printers. It ensures consistent extrusion and prevents nozzle jams.

Physical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Density (g/cm ³ at 21.5 °C)	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.2
Glass transition temperature (°C)	DSC, 10 °C /min	62.3
Vicat Softening temperature (°C)	ASTM D1525 (ISO 306 GB/T 1633)	62.7
Melt index (g/10 min)	210 °C, 2.16 kg	6.0
Melting temperature (°C)	DSC, 10 °C/min	150.9

Note:

Tested with 3D printed specimen of 100% infill.

Mechanical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Young's modulus (MPa, X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2681 ± 215
Tensile strength (MPa, X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	40 ± 1
Elongation at break (% , X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2.5 ± 0.6
Bending modulus (MPa, X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	2700 ± 154
Bending strength (MPa, X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	68 ± 2
Impact strength (KJ/m ² , X - Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	13.4 ±1.2
Tensile strength (MPa, Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	36 ± 5
Young's modulus (MPa, Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	2551 ± 335
Elongation at break (% , Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	6.0 ± 2.4
Hardness Shore D	ASTM D2240 (ISO 7619, GB/T 531)	84

Note:

All testing specimens were printed under the following conditions:



WWW.RAISE3D.COM
AMERICA · ASIA · EUROPE

nozzle temperature = 210 °C, printing speed = 45 mm/s, build plate temperature = 25 °C, infill = 100%
All specimens were conditioned at room temperature for 24h prior to testing.

Recommended Printing Conditions¹

Parameter	Recommended Setting
Nozzle temperature (°C)	190 - 220
Recommended build surface	BuildTak®, Blue Tap
Build plate temperature (°C)	30-60
Model cooling fan	Turned on
Printing speed (mm/s)	30 - 70
Retraction distance (mm)	1 - 3
Retraction speed (mm/s)	30 - 60
Recommended environmental temperature (°C)	Room temperature - 45
Threshold overhang angle (°)	45
Recommended support materials	Raise3D Premium PVA
Other Comments	
Premium PLA can be printed under conditions similar to most other PLA filaments	

Note:

Based on 0.4 mm nozzle and ideaMaker. Printing conditions may vary with different nozzle diameters.



PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST UHLÍKOVÉ TKANINY



Technical Data Sheet

Product : CCT 200

Fiber	Warp	Tenax 3K 200 tex
	Weft	Tenax 3K 200 tex
Area weight	200 g/m ² ± 3%	
Binding	Plain 1/1, Twill 2/2	
Width	100, 120, 125 cm	
Sett of (per 1 cm)	Warp	5
	Weft	5
Compatibility	Epoxy, phenolic	
Standard packing	100 m	

ISO 9001 : 2015

ISO 14001 : 2015



Kordcarbon a.s., 696 74 Velká nad Veličkou 890, Czech Republic
email : info@kordcarbon.com, www.kordcarbon.com

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

– L 285

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

Návod k použití, technické listy

Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - □ + 50-60 °C za temperování - 60 °C - □ + 80-+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extrémně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se nerozlije na tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobaly, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Použití

Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm 3 / 25	1,18 - 1,23
Viskozita °C	mPas / 25	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota °C	g/cm3 / 25	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita °C	mPas / 25	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo G	mg KOH /	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva Gardner		max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(*) Vztahuje se pouze k průsvitnému tužidlu - tužidla mají průsvitně modrou barvu

Podrobnosti pro zpracování

	Pryskyřice L 285	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Průměrná EP - hodnota	0,62	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	64	64	64

Technické informace o zesílené pryskyřici

Statické testy

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 80 °C		G R C Skelné vlákno G F K	C R C Uhlík. vlákno C F K	S R C Kevlar.vlákno S F K
Pevnost v ohybu 10 ₃ psi x N/mm ²		74 - 81 510 - 560	104 - 112 720 - 770	51 - 55 350 - 380
Pevnost v tahu 10 ₃ psi x N/mm ²		67-73 460 - 500	74 - 80 510 - 550	58 - 70 400 - 480
Pevnost v tlaku 10 ₃ psi x N/mm ²		59 - 64 410 - 440	67 - 74 460 - 510	20 - 23 140 - 160
Pevnost ve střihu 10 ₃ psi x N/mm ²		6,1 - 6,7 42 - 46	6,8 - 8,0 47 - 55	4,2 - 4,9 29 - 34
Modulus pružnosti 10 ₃ psi x N/mm ²		2,9 - 3,5 20 - 24	5,8 - 6,5 40 - 45	2,3 - 2,8 16 - 19
GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 8 H satén, 296 g/m², 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m², 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m², 4 mm silné Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol% Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.				

Míchací poměry

	Pryskyřice L 285: Tužidlo 285, 286, 287
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hod.	přibl. 3 - 4 hod.	přibl. 5 - 6 hod.
40 - 45 °C	přibl. 45 - 60 min.	přibl. 60 - 90 min.	přibl. 80 - 120 min

POZNÁMKA:

Překlad byl pořízen doslovně z manuálu "TECHNICKÉ INFORMACE" vydaného firmou MGS Kunstharzprodukte GmbH. Podrobnější či upřesňující informace Vám rádi podáme na telefonním čísle 585 129 011, na GSM: 603 847 655 (p.Havel) nebo 603 841 749 (p.Šuran).

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST TRUPU HYDROFOILU



Válcované desky EN AW

EN AW 7075

TECHNICKÝ LIST

EN AW 7075

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 7075 [AlZn5,5MgCu]
Typ slitiny	vytvrditelná
Povrch	T651
Stav materiálu	válcovaný povrch

Mechanické vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	240 - 460
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	360 - 540
Tažnost A_{50}	[%]	2 - 8
Tvrdost HBW	[2,5/62,5]	104 - 160

Fyzikální vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,80
Modul pružnosti	[GPa]	71
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm ²]	19 - 23
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,4
Tepelná vodivost	[W/m · K]	130 - 160
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	862

Technologické vlastnosti ²⁾	
Tvarová stálost/Vnitřní pnutí	5 - 6
Obrobitelnost	1
Vhodnost k erozivnímu obrábění	1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)	6 / 6 / 6 / 2 / 5
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětří / SpRK)	5 / 5 / 3
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) ³⁾	90 / 120
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) ⁴⁾	4/ 6/ 2
Leštitelnost	1
Vhodnost k leptání struktur	1
Kontakt s potravinami (podle EN 602)	ne

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] ⁵⁾	Tloušťka [mm]	Délka & šířka [mm]
10 - 200	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte ≤ 150			DIN ISO 2768-1m
Zuschnitte > 150			-0 / +5 mm

Dodávané formáty	
Formáty [mm]	1 520 × 3 020 u tlouštěk od 10 - 200 mm
Tloušťky na skladě	10 ; 12 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50
	55 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 120 ; 130 ; 140 ; 150 ; 160 ; 180 ; 200

Další tloušťky podle poptávky!

Datum: 12.07.2016

1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.

2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů: od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).

3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.

4) Vylučné technické anodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.

5) Tolerance rovinnosti se měří vylučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.