

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Studium vlivu složení kompozitního materiálu pro výrobu
veslařských lodí na jejich vlastnosti

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie Smetanová**
Osobní číslo: **C20439**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**
Téma práce: **Studium vlivu složení kompozitního materiálu pro výrobu veslařských lodí na jejich vlastnosti**
Zadávající katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární přehled hlavních typů polymerních matic a výztuží využívaných v lodním průmyslu se zaměřením na výrobu veslařských lodí.
2. V druhé části se zaměřte na přehled různých technologií výroby a zpracování kompozitních materiálů používaných pro výrobu lodí, především závodních veslařských lodí a vesel.
3. Připravte kompozitní materiály různého složení matrice a výztuže pomocí technologie ručního kladení z materiálů používaných pro výrobu závodních veslařských lodí. Z připravených desek nařežte zkušební tělíska daných rozměrů a proměřte jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti.
4. Studujte vliv složení kompozitních materiálů na sledované fyzikálně-mechanické vlastnosti a jejich navlhavost ve vodném prostředí.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky testovaných vlastností v závislosti na složení kompozitních materiálů, určených pro výrobu veslařských lodí.

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

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání diplomové práce: **17. prosince 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **6. května 2022**

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc. v.r.
děkan

L.S.

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

V Pardubicích dne 22. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem Studium vlivu složení kompozitního materiálu pro výrobu veslařských lodí na jejich vlastnosti jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 1. 5. 2022

Bc. Lucie Smetanová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za podporu a ochotu kdykoli pomoci. Zvláštní poděkování patří Janě a Martinovi Růžičkovým, výrobcům veslařských lodí značky ROSEMAN, za čas strávený v jejich dílně, trpělivost a všechno, čemu mě naučili. Poděkování za nařezání vzorků kompozitů dlužím společnosti SYNPO, a. s. Pardubice. V neposlední řadě děkuji všem lidem, kteří mi byli oporou.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá kompozitními materiály využívanými v lodním průmyslu se zaměřením na veslařské lodě. Literární rešerše pojednává o vlastnostech kompozitu, veslování, materiálech a technologiích výrob používaných v lodním průmyslu a výrobě veslařských lodí. Experimentální část je zaměřena na studium fyzikálně – mechanických vlastností kompozitů vyrobených ruční laminací. Především je zkoumán vliv obsahu výztuže na výsledné vlastnosti kompozitu pro různé typy tkanin a nasákavost vzorků ve vodě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozity, veslování, lodní průmysl, epoxidové pryskyřice, gelcoat, nasákavost

TITLE

Study of the influence of the composition of composite material used for the production of rowing boats on their properties.

ANNOTATION

This master's thesis is focused on composite materials utilized in the boat building industry, particularly the rowing boats. In the literature review, characteristics of composite materials are described, as well as rowing, materials, and production technologies used in construction of rowing boats. In the experimental part, a study on physical and mechanical properties of composite materials made by hand lay-up process is presented. The research on the effects of volume of the reinforcement on the final properties of the composite material and water absorption in various types of fabrics was emphasised.

KEYWORDS

Composites, rowing, shipping industry, epoxy resin, gelcoat, water absorption

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM GRAFŮ	12
SEZNAM ZKRATEK	13
ÚVOD.....	14
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	15
1.1. Kompozitní materiál.....	15
1.1.1. Vlastnosti kompozitního materiálu	16
1.2. Veslování.....	17
1.2.1. Závodní veslování.....	17
1.2.2. Veslařská loď a vesla	18
1.3. Materiály v lodním průmyslu.....	20
1.3.1. Gelcoat	22
1.3.2. Polymerní matrice	23
1.3.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)	23
1.3.2.2. Epoxidové pryskyřice (EP)	25
1.3.2.3. Vinylesterové pryskyřice (VP).....	28
1.3.3. Výztuž.....	29
1.3.3.1. Geometrie výztuže	29
1.3.3.2. Skleněná vlákna	32
1.3.3.3. Uhlíková vlákna	34
1.3.3.4. Aramidová vlákna	35
1.4. Technologie výroby	36
1.4.1. Ruční kladení („Hand Lay-up“).....	37
1.4.2. Stříkání („Spray-up process“).....	38
1.4.3. Lisování pomocí vakua („Bag Molding“)	38
1.4.4. Injektážní a infuzní technologie.....	39
1.4.4.1. Injekční vstřikování RTM („Resin transfer molding“)	40
1.4.4.2. Vakuo – injekční technologie.....	40
1.4.4.3. Vakuová infuze VIP („Vacuum Infusion Process“).....	41
1.4.5. Lisování („Compression Molding“)	42
1.5. Výroba veslařské lodi.....	42
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
2.1. Použité materiály.....	48

2.2.	Příprava vzorků	51
2.2.1.	Příprava vzorků matric.....	51
2.2.2.	Příprava vzorků kompozitů.....	51
2.2.3.	Příprava vzorků lodí.....	56
2.3.	Metodika měření	56
2.3.1.	Stanovení aminového čísla	56
2.3.2.	Stanovení epoxidových skupin podle Jaye	57
2.3.3.	Doba želatinace	57
2.3.4.	Extrahovatelný podíl.....	58
2.3.5.	DMA	58
2.3.6.	TMA.....	59
2.3.7.	Stanovení obsahu popela	59
2.3.8.	Stanovení obsahu výztuže.....	60
2.3.9.	Zkouška v tahu.....	60
2.3.10.	Zkouška v ohybu.....	61
2.3.11.	Rázová houževnatost metodou Charpy.....	61
2.3.12.	Vrubová houževnatost	62
2.3.13.	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	63
2.3.14.	Nasákavost ve vodě	63
3.	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	65
3.1.	Vzorky matric.....	65
3.1.1.	Charakteristika komponent	65
3.1.2.	Doba želatinace	65
3.1.3.	Extrahovatelný podíl.....	66
3.1.4.	DMA	66
3.1.5.	TMA.....	67
3.1.6.	Zkouška v tahu.....	67
3.1.7.	Vrubová houževnatost	68
3.1.8.	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	68
3.1.9.	Nasákavost ve vodě	68
3.2.	Vzorky kompozitů.....	70
3.2.1.	Stanovení obsahu popela	70
3.2.2.	Stanovení obsahu výztuže.....	71
3.2.3.	Zkouška v tahu.....	73
3.2.4.	Zkouška v ohybu.....	81

3.2.5.	Rázová houževnatost metodou Charpy.....	88
3.2.6.	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	90
3.2.7.	Nasákavost ve vodě	91
3.3.	Vzorky lodí.....	100
3.3.1.	Nasákavost ve vodě	100
4.	ZÁVĚR.....	102
5.	SEZNAM POUŽITÝCH ZRDOJŮ.....	104

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Synergický efekt.....	16
Obrázek 2: Vybavení veslařské lodi. [13]	19
Obrázek 3: "Hřeben" k uchycení nohavek vyrobený z krátkých uhlíkových vláken. [14].....	19
Obrázek 4: Nepárové veslo (nahore), párové veslo (dole). [15].....	20
Obrázek 5: Karbonovo – kevlarová struktura veslařské lodi. [12].....	21
Obrázek 6: Vliv nanočástic na zlepšení odolnosti gelcoatu proti vodě. [23]	22
Obrázek 7: Schéma výroby nenasyčené polyesterové pryskyřice. [27]	24
Obrázek 8: Vytvrzování nenasyčené polyesterové pryskyřice. [26]	25
Obrázek 9: Strukturální vzorec glycidylové (a) a epoxidové (b) skupiny. [25]	26
Obrázek 10: Schéma rovnice vzniku diandiglycidyletheru. [25]	27
Obrázek 11: Vytvrzování epoxidové pryskyřice alifatickým aminem. [25]	28
Obrázek 12: Porovnání chemické struktury UP (nahore) a VP (dole). [31].....	29
Obrázek 13: Dělení kompozitů podle geometrie výztuže. [2].....	30
Obrázek 14: Jednosměrná uhlíková vlákna.	30
Obrázek 15: Druhy vazeb tkanin: a – plátňová; b – keprová, c – atlasová. [8]	31
Obrázek 16: Materiál jádra: a – nomexová voština, b – Coremat®.	32
Obrázek 17: Tkanina ze skleněných vláken.	33
Obrázek 18: Tkanina z uhlíkových vláken.	34
Obrázek 19: Tkanina z kevlarových vláken.	36
Obrázek 20: Ruční kladení. [5].....	37
Obrázek 21: Stříkání. [38]	38
Obrázek 22: Lisování pomocí vakua. [5].....	39
Obrázek 23: Vysokotlaké vstřikování (RTM) [5].....	40
Obrázek 24: Vakuová infuze. [42].....	41
Obrázek 25: Lisování za tepla. [43].....	42
Obrázek 26: Celokarbonový závodní skif. [13].....	43
Obrázek 27: První fáze výroby:	44
Obrázek 28: První fáze laminace:	45
Obrázek 29: Dokončení laminace:	46
Obrázek 30: Fáze výroby po skončení laminace:	47
Obrázek 31: Příprava vzorků matric.	51
Obrázek 32: Příprava výztuže.	52
Obrázek 33: Výroba kompozitní desky.	53
Obrázek 34: Vytvrzené kompozitní desky.....	53
Obrázek 35: Nařezané kompozitní vzorky.	53
Obrázek 36: Voštinové vzorky lodí.	56
Obrázek 37: Vzorek ve tvaru "psí kosti" upevněný v čelistech trhacího stroje.....	60
Obrázek 38: Tříbodový ohyb na trhacím stroji.....	61
Obrázek 39: Rázová houževnatost metodou Charpy.	62
Obrázek 40: Vrubová houževnatost.....	62

Obrázek 41: Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest.	63
Obrázek 42: Zkouška nasákavosti ve vodě.	64
Obrázek 43: Delaminace vzorku s kevlarovou výztuží po zkoušce nasákavosti ve vodě.	98
Obrázek 44: Narušená struktura gelcoatu po zkoušce nasákavosti ve vodě.	101

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Mísící poměry pryskyřice a tvrdidel.	48
Tabulka 2: Specifikace pryskyřice.	48
Tabulka 3: Specifikace tužidel.	49
Tabulka 4: Charakteristika tkaniny S390.	49
Tabulka 5: Charakteristika tkaniny S163.	49
Tabulka 6: Charakteristika tkaniny C200.	49
Tabulka 7: Charakteristika tkaniny C93.	50
Tabulka 8: Charakteristika tkaniny C50J.	50
Tabulka 9: Charakteristika tkaniny A110.	50
Tabulka 10: Složení vzorků řady 50 % V5.	54
Tabulka 11: Složení vzorků řady 50 % V7.	55
Tabulka 12: Složení vzorků řady 40 % V7.	55
Tabulka 13: Složení vzorků řady 60 % V7.	55
Tabulka 14: Charakteristika epoxidové pryskyřice L 285 a tužidel 285, 287.	65
Tabulka 15: Hodnoty extrahovatelného podílu vzorků matric.	66
Tabulka 16: Charakteristické teploty vzorků matric.	66
Tabulka 17: Teploty T_g vzorků matric.	67
Tabulka 18: Zkouška pevnosti v tahu vzorků matric.	67
Tabulka 19: Vrubová houževnatost vzorků matric.	68
Tabulka 20: Zkouška tvrdosti podle Vickerse u vzorků matric.	68
Tabulka 21: Zkouška nasákavosti vzorků matric ve vodě.	69
Tabulka 22: Změna tvrdosti vzorků matric vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě.	70
Tabulka 23: Stanovení obsahu popela.	71
Tabulka 24: Vypočtené hodnoty obsahu výztuže u kompozitních vzorků.	71
Tabulka 25: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků S390.	74
Tabulka 26: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků S163.	74
Tabulka 27: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C200.	75
Tabulka 28: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C93.	76
Tabulka 29: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C50J.	77
Tabulka 30: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků A110.	78
Tabulka 31: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků S390.	81
Tabulka 32: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků S163.	82
Tabulka 33: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C200.	83
Tabulka 34: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C93.	83

Tabulka 35: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C50J.	84
Tabulka 36: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků A110.	85
Tabulka 37: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy.	88
Tabulka 38: Výsledky zkoušky tvrdosti podle Vickerse.	90
Tabulka 39: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S390.	91
Tabulka 40: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S163.	92
Tabulka 41: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C200.	93
Tabulka 42: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C93.	94
Tabulka 43: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C50J.	95
Tabulka 44: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků A110.	96
Tabulka 46: Změna tvrdosti vzorků kompozitů vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě.	99
Tabulka 47: Zkouška nasákavosti vzorků lodí ve vodě.	100

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Zkouška nasákavosti vzorků matric ve vodě.	69
Graf 2: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže S390.	74
Graf 3: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže S163.	75
Graf 4: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže C200.	76
Graf 5: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže C93.	77
Graf 6: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže C50J.	78
Graf 7: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže A110.	79
Graf 8: Souhrnné porovnání mezi pevností v tahu.	79
Graf 9: Souhrnné porovnání tažností.	80
Graf 10: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže S390.	81
Graf 11: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže S163.	82
Graf 12: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže C200.	83
Graf 13: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže C93.	84
Graf 14: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže C50J.	85
Graf 15: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže A110.	86
Graf 16: Souhrnné porovnání mezi pevností v ohybu.	86
Graf 17: Souhrnné porovnání průhybů při maximu.	87
Graf 18: Souhrnné porovnání rázových houževnatostí.	89
Graf 19: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S390.	92
Graf 20: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S163.	93
Graf 21: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C200.	94
Graf 22: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C93.	95
Graf 23: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C50J.	96
Graf 24: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků A110.	97
Graf 25: Souhrnné porovnání nasákavosti po ukončení zkoušky.	97
Graf 26: Zkouška nasákavosti vzorků lodí ve vodě.	101

SEZNAM ZKRATEK

C – sklo – chemicky odolné sklo

DETA; P11 – diethylentriamin

DMA – dynamická mechanická analýza

EP – epoxidová pryskyřice

E – sklo – základní typ skla

FISA – Mezinárodní veslařská federace (Fédération Internationale des Sociétés d'Aviron)

HM – vysokomodulová uhlíková vlákna

HS – vysokopevnostní uhlíková vlákna

L – RTM – modifikace injekčního vstřikování (Light RTM)

PAN – polyakrylonitril

RTM – injekční vstřikování (Resin Transfer Molding)

SCRIMP – modifikace vakuové infuze (Seemann Composites Resin Infusion Molding Process)

S – sklo – sklo se zvýšenou mechanickou pevností

T₁, T₂ – charakteristické teploty blízké T_g

TETA – triethylentetramin

T_g – teplota skelného přechodu

TMA – termomechanická analýza

UP – nenasyčená polyesterová pryskyřice

VARTM – modifikace RTM (Vacuum Asisted RTM)

VIP – vakuová infuze (Vacuum Infusion Process)

VP – vinylesterová pryskyřice

ÚVOD

Veslování se řadí mezi silově vytrvalostní sporty. Veslař sedí v lodi na pohyblivém sedátku neboli slajdu zády ke směru jízdy a v ruce svírá jedno nebo dvě vesla, pomocí kterých uvádí loď do pohybu. Veslařská loď jede pouze takovou rychlostí, jakou jí udělí lopatka vesla ve fázi zátahu a žádný další impuls síly tuto rychlost nedokáže zvýšit. Jedná se o technicky velmi náročný sport, který kromě síly a vytrvalosti vyžaduje také přesnost, smysl pro rytmus, dobrou psychickou odolnost a spoustu dalších vlastností. Při provedení veslařského tempa dochází k postupnému zapojení svalů celého těla. Sestává ze čtyř cyklicky se opakujících fází: fáze zaveslování (zanoření lopatky vesla do vody), zátahu (vystupňování rychlosti lodi), vyveslování (vyndání vesla z vody) a odhozu (návratu do výchozí pozice). Cílem veslaře či posádky je projet trať v co nejkratším čase. [1]

Veslování je komplexní sport provozovaný na několika úrovních. Je jak součástí olympiády, tak výkonnostním sportem či volnočasovou aktivitou v různých klubech, oddílech či na univerzitách po celém světě. Existuje proto mnoho aspektů volby správné lodi a dalšího vybavení, a to ne pouze z hlediska technických parametrů. Například je potřeba brát v potaz, zda loď bude využívat pouze daný člověk či posádka nebo bude loď sloužit širší škále veslařů v oddíle. Velkou roli hraje samozřejmě výkonnost a zkušenosti posádky. Od závodní lodi se očekává, že bude velmi lehká a rychlá, ale zároveň to znamená, že bude také křehká. V klubech je žádoucí loď odolná i za cenu vyšší hmotnosti. Dnešní veslařské lodě a vesla jsou až na pár detailů celé vyrobené z kompozitních materiálů. Právě volbou materiálu, jeho složením a zpracováním je dosaženo požadovaných vlastností.

Cílem této práce bylo porovnání fyzikálně-mechanických vlastností kompozitů vyrobených ruční laminací ze stejných materiálů, které využívá tuzemský výrobce veslařských lodí. Byly zkoumány systémy jedné epoxidové pryskyřice se 2 tužidly, a každé v kombinaci se 6 různými typy výztuží. Byla studována závislost obsahu výztuže v kompozitu na jeho výsledné vlastnosti s cílem najít optimální stupeň prosycenosti pro daný systém. U všech vyrobených kompozitů byla zkoumána nasákavost ve vodném prostředí v časovém úseku 3 měsíců, která je pro veslařské lodě velmi důležitým parametrem. Pro zkoušky nasákavosti ve vodě byly použity i vzorky z reálných lodí se sendvičovou strukturou.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Kompozitní materiál

Kompozitní materiál neboli kompozit je heterogenní materiál sestávající ze dvou nebo více složek. Tyto složky se liší chemickým složením, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Na rozdíl od slitin, které jsou také heterogenními materiály, se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek a tyto složky si ponechávají své charakteristiky. Kontinuální fáze se nazývá matrice a je pojivem pro výztuž kompozitu, která tvoří fázi diskontinuální a zajišťuje kompozitu vysokou pevnost a tuhost. Obsah výztuže v kompozitu musí být větší než 5 objemových procent. [2; 3; 4; 5]

Obecně uznávaná definice kompozitního materiálu neexistuje a vznikají tak sporné body, ve kterých se jednotlivé a méně obecné definice liší. Například není jasné, jedná-li se pouze o uměle vytvořené látky, nebo je možné započítat i látky přírodní. Typickým přírodním kompozitním materiálem je dřevo. Skládá se z vláken celulózy v ligninové matrici. [2]

- Definice užívaná v Anglii, pocházející z knihy Theory of Composites G. F. Milona: [4; 6]

„Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“

- Definice používaná v USA, Composite Materials Handbook: [4; 7]

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

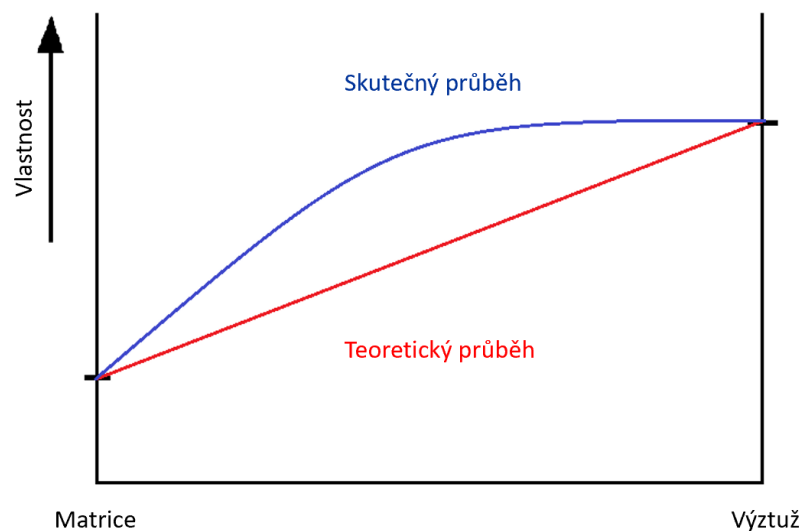
Nezávisle na tom, zda konkrétní definice pokládá přírodní materiály za kompozity, je prokázáno, že celá příroda je založená na kompozitních strukturách. Využívá synergických účinků materiálů k dosažení lepších vlastností. Dobrým příkladem může být vlna merino. Řez její buňkou nápadně připomíná strukturu příčného výbrusu epoxidové pryskyřice jednosměrně

vyztužené uhlíkovými vlákny. Liší se pouze rozměrem. Vrstevnatá struktura syntetického kompozitu lze velmi dobře porovnat se strukturou bambusového stonku. [8]

Kompozitní materiály nejsou novodobou záležitostí, ale byly používány již od starověku. Bloky sušené hlíny plněné slámou byly hlavním stavebním materiálem Židů. Kromě stavebních materiálů byly kompozity využívány k vylepšení zbraní. Příkladem mohou být mongolské luky, kde vnitřní části odolávající tlaku byly vyrobené z kukuřice a vnější napínané části byly kombinací dřeva a kravských šlach. Dalším příkladem mohou být japonské meče a šavle vyrobené z oceli a železa, jejichž struktura zajišťovala kombinaci pružnosti a rázové odolnosti čepelí. [4; 9]

1.1.1. Vlastnosti kompozitního materiálu

Typickou vlastností a samotnou podstatou kompozitu je synergický efekt. To znamená, že výsledné vlastnosti kompozitu výrazně převyšují vlastnosti, kterých by bylo možné dosáhnout pouhou sumací vlastností jednotlivých složek. Synergický efekt je znázorněn na obrázku 1. [2]



Obrázek 1: Synergický efekt.

Klasické stavební materiály vykazují izotropní chování. Jejich vlastnosti jsou stejné ve všech směrech. Některé kompozity mohou být také izotropní. Například kompozity vyztužené částicemi či krátkými vlákny s nahodilou orientací. Téměř u všech kompozitních materiálů vyztužených vlákny se vyskytuje anizotropie. Mechanické vlastnosti se výrazně liší

v různých směrech. Například pevnost v tahu kolmo na vlákna u kompozitní vrstvy epoxidové matrice vyztužené skleněnými vlákny tvoří pouze okolo 3 % pevnosti ve směru vláken. Velmi podobných hodnot dosahují také uhlíková vlákna a u kevlaru se tato hodnota pohybuje pouze okolo 2 %. [2; 4; 9]

Výsledné vlastnosti tedy nezávisí pouze na volbě vhodných materiálů matrice a vyztuže, ale také na její orientaci. Velmi důležitou roli hraje míra adheze na mezifázovém rozhraní vlákna a matrice, proto jsou vlákna povrchově upravována. [2]

1.2. Veslování

Veslování má velmi dlouhou historii a sahá až do dob faraónů. Závody ve starém Řecku byly součástí velkých athénských svátků konaných na počest bohyně Athény. První závodní veslařské lodě nacházejí své předky v pracovních veslicích brázdících především řeku Tyne a Temži v Anglii. Úkolem tamních vodáků bylo přepravit cestující nebo náklad na místo určení rychleji než konkurence, což svou podstatou připomínalo závod. Na počátku 19. století mezi sebou začali vodáci pořádat první závody o ceny a s nástupem parníků ztratily pracovní veslice význam. Z veslování se stala zábava a sportovní disciplína zejména na univerzitách a mezi bohatými lidmi, což vedlo ke zrození moderního veslařského sportu a vzniku závodních veslařských lodí. Přeměna z pracovních lodí v závodní přinesla lodím 4 nové prvky, a to krákorce, havlinky, slajd a vnitřní kýl. Materiálem bylo dřevo – smrkové, jasanové, dubové, javorové, ale největší význam mělo dřevo cedrové. Významným milníkem se stal rok 1829, kdy se konal první a dodnes velmi populární závod osmiveslic mezi univerzitami Oxford a Cambridge. Další významné inovace přišly až s použitím kompozitních materiálů, které začínaly jako experimenty s „exotickými“ materiály a později doslova rozpoutaly závod mezi výrobci lodí. První soutěž mezi kompozitními loděmi proběhla v roce 1972 na olympijských hrách v Mnichově. Postupné další inovace, zkušenosti a výzkum vedly ke vzniku dnešních špičkových závodních lodí. [10; 11; 12]

1.2.1. Závodní veslování

Veslování se dělí na párové a nepárové disciplíny a posádky s kormidelníkem nebo bez kormidelníka. Všechny kategorie od dětských až po dospělé se dělí na mužské a ženské a dospělé kategorie se ještě dále dělí podle hmotnosti veslaře či posádky na těžké a lehké váhy.

Všechny tyto parametry hrají důležitou roli při konstrukci lodí. Standardní závodní trat' měří 2000 m. [10]

- Při párovém veslování drží veslař v rukou dvě vesla a lodě se podle počtu osob nazývají: skif (1 veslař), dvojskif (2 veslaři), párová čtyřka (4 veslaři), párová čtyřka s kormidelníkem (4 veslaři + kormidelník) a párová osma (8 veslařů + kormidelník).
- Nepárové veslování znamená, že každý veslař drží v ruce pouze jedno veslo, což znamená, že nejnižší počet veslařů v lodi je 2. Lodě se nazývají dvojka (2 veslaři), čtyřka (4 veslaři) a osma (8 veslařů + kormidelník). Všechny nepárové disciplíny se jezdí také s kormidelníkem, pouze osma má kormidelníka vždy.

1.2.2. Veslařská loď a vesla

Konstrukce veslařských lodí byla založena na zkušenostech a kopírování úspěšných návrhů. První hydrodynamické testy v nádržích proběhly až během příprav na olympijské hry v roce 1936 v Berlíně. Moderní design závodních lodí je kombinací zkušeností, testů v nádržích a velmi detailních počítačových simulací. Neexistují žádná autorská práva ani patenty na hydrodynamický tvar, proto je kopírování tvaru lodí jiných výrobců možné. Mezinárodní veslařská federace FISA (Fédération Internationale des Sociétés d'Aviron) udává minimální povolenou hmotnost každého typu lodí, pod kterou se nesmí výrobce dostat. [11]

Veslařská loď se skládá z mnoha částí. Základem je obšívka ve tvaru písmene „U“, přední, zadní a vnitřní paluba. Součástí vybavení lodí jsou napevno přídělané boty zvané nohavky a slajd (pojízdné sedátko v kolejničkách). Křídlo – přední nebo zadní zakončené pohyblivými havlinkami, které slouží k uchycení vesla. U starších lodí se používaly místo křídel krákorce (kovové konstrukce po stranách lodí). Velmi důležitý je i dekl, který je v čase, kdy se loď pohybuje zavřený a po vynesení na souš se otevře. Zajistí to dokonalé vyschnutí lodí po skončení tréninku. Vybavení veslařské lodí je možné vidět na obrázku 2. [13]



Obrázek 2: Vybavení veslařské lodi. [13]

Většina částí lodí je z důvodu dosažení co nejnižší hmotnosti vyrobena z kompozitních materiálů: obšívka lodi, paluby, křídlo, slajd, lišty a další komponenty, jako například „hřeben“ sloužící k nastavení vzdálenosti nohavek v lodi. Na obrázku 3 je vidět „hřeben“ vyrobený z krátkých uhlíkových vláken.



Obrázek 3: "Hřeben" k uchycení nohavek vyrobený z krátkých uhlíkových vláken. [14]

Párová vesla jsou kratší než vesla nepárová (obrázek 4). Část vesla, kterou veslař drží v ruce, se nazývá pačina. S lopatkou je propojená trubkou zvanou žerď. Plastová část na žerdi slouží k zapření vesla v havlince a nazývá se věneček. Lopatky mají různé tvary a neustále

dochází k jejich inovacím. Často jsou vyhotoveny v barvách oddílů. Velmi významnou roli hraje tuhost vesla, protože každá závodní kategorie má jiné potřeby. Například žena z kategorie lehkých vah potřebuje pružnější veslo než muž z kategorie těžkých vah. Tuhost vesla se odvíjí od skladby kompozitu.



Obrázek 4: *Nepárové veslo (nahore), párové veslo (dole). [15]*

1.3. Materiály v lodním průmyslu

První kompozitní materiály použité při konstrukci lodí se objevily krátce po druhé světové válce. Úkolem bylo najít vhodný materiál, který by nahradil dřevo, jehož byl nedostatek a bylo stále dražší. Ze dřeva se vyráběla malá námořní plavidla a spolupůsobení mořské vody a organismů je brzy znehodnocovala, a proto vyžadovala časté opravy. V roce 1947 bylo z kompozitu pro námořnictvo Spojených států vyrobeno dvanáct malých člunů. Nespornou výhodou byly snadné opravy, a tak došlo k expanzi výroby kompozitních lodí. V období války ve Vietnamu se kompozity využívaly při konstrukci minolovek, vyloďovacích člunů či částí ponorek. Minolovky musí být z nemagnetického materiálu, aby nedošlo k aktivaci min. Nízká hmotnost celokompozitních hlídkových člunů umožňovala dosažení vyšší rychlosti a zároveň úsporu paliva. Hmotnost byla v porovnání s ocelovými čluny přibližně o 35 % nižší. Kompozity také nahradily některé kovové části. Výroba lodního šroubu ze slitiny niklu, hliníku a bronzu byla technologicky i finančně náročná. Kompozitní lodní šrouby navíc mají daleko lepší akustické tlumení. Kolem poloviny 20. století začala vznikat i první rekreační plavidla. [16; 17; 18; 19]

Lodě, čluny, jachty a ponorky jsou z finančních důvodů vyráběny z kompozitů vyztužených skleněnými vlákny v kombinaci s nenasyčenými polyesterovými nebo vinylesterovými pryskyřicemi. Výhodou těchto kompozitů je jejich nízká cena, vysoká specifická pevnost, odolnost proti korozi a dlouhá životnost materiálu. Nevýhodou je však nízký Youngův modul. Proto jsou kompozity vyztužené skleněným vláknem nevhodné pro výrobu velmi lehkých konstrukcí s odpovídající tuhostí. Pro náročnější konstrukce se proto

využívají drahá uhlíková, případně kevlarová, vlákna. Uplatnění špičkových materiálů se nachází ve sportovních a závodních aplikacích. [9; 17]

Kromě nízké hmotnosti, odolnosti proti korozi a výborných mechanických vlastností jsou kompozity v lodním průmyslu nepostradatelným materiálem kvůli snadnému a finančně dostupnému zpracování umožňující vyrobit prakticky jakýkoliv tvar. Materiál je schopný absorbovat hluk a vibrace. Navíc jde snadno opravovat. [16]

Materiály pro výrobu veslařských lodí se volí podle více faktorů. Mezi hlavní z nich patří samozřejmě cena, ale také využití lodi. Špičkové závodní lodě jsou využívány profesionálními závodníky. Tyto lodě jsou vyrobené většinou celé z karbonu. Jsou velmi lehké a křehké. Někteří výrobci využívají kombinaci vnější vrstvy z karbonu a vnitřní z kevlaru (obrázek 5). Většinou bývají vyrobené na míru pro daného veslaře nebo posádku, která musí být při manipulaci opatrná, aby nedošlo k poškození lodi. Opakem je loď klubová, která musí vydržet zacházení začátečníků, střídá se u ní velké množství lidí a hmotnost nehraje tak velkou roli. Využívá se kombinace karbonu se sklem, takže loď není tak křehká. Nejlevnější lodě se vyrábí z nenasycené polyesterové pryskyřice vyztužené skleněnými vlákny. Pro zlepšení odolnosti vůči nárazu se přidávají kevlarová vlákna. Rozdíl je i ve volbě materiálu jádra. Voština používaná v závodních lodích je lehčí než jádro pěnové, ale má nižší rázovou odolnost. Stejně materiály se využívají i pro výrobu vesel. [11; 12; 13; 20]

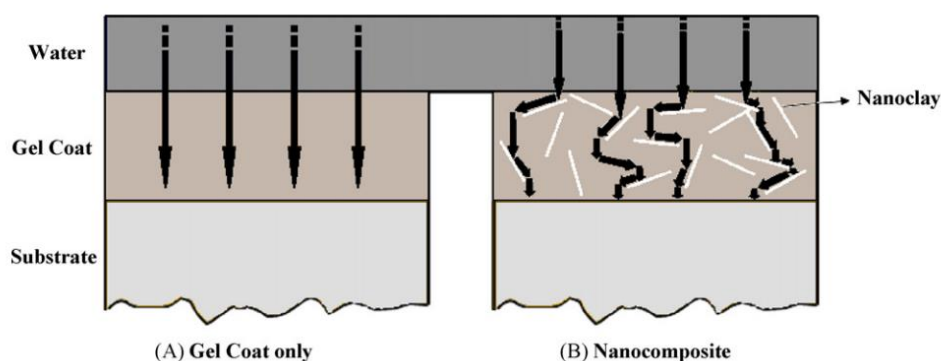


Obrázek 5: Karbonovo – kevlarová struktura veslařské lodi. [12]

1.3.1. Gelcoat

Gelcoat je vrchní ochrannou a estetickou vrstvou kompozitu. Nejběžněji se využívají gelcoaty na bázi nenasyčených polyesterových nebo epoxidových pryskyřic v organickém rozpouštědle, nejčastěji styrenu. Vyrábí se bílé nebo čiré a barevných povrchů výrobků se dosáhne přidávkem speciálních pigmentových past do čirého gelcoatu. Chrání kompozit před mechanickým poškozením, UV zářením, vodě, ale třeba také proti hořlavosti. Speciálních požadovaných vlastností pro danou aplikaci je dosaženo přidávkem aditiv, které není možné přidat přímo do samotného kompozitu, protože by mohlo dojít k narušení adheze mezi matricí a vláknem nebo k nerovnoměrnému rozložení výztuže a následnému zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností výrobku. Vrstvu gelcoatu je možné aplikovat na hotový kompozit válečkem, štětcem či nástřikem, ale upřednostňovaný je postup nanesení vrstvy gelcoatu do formy a následná laminace. Dojde tak k lepšímu propojení vrstev. V případě druhého postupu je nezbytné mít dokonale hladkou a čistou formu, jinak dojde k poškození vrchní vrstvy výrobku. [21; 22]

V lodním průmyslu je nejdůležitější ochrana trupu lodi proti vodě. Již samotný gelcoat poskytuje ochranu, ale stále probíhají pokusy o zvýšení účinnosti. Odolnost gelcoatu proti nasákavosti je možné zvýšit přidávkem malého množství nanočástic. Například přidávkem 1–2 % montmorillonitu (jílový minerál) došlo k výraznému zlepšení. Efekt působení nanočástic je znázorněn na obrázku 6. Při pokusu přidavku většího množství minerálu došlo k opačnému efektu, který je možný vysvětlit tvorbou agregátů nanočástic, tedy k jejich nerovnoměrnému rozložení a následné zvýšení prostupu vlhkosti. [21; 23]



Obrázek 6: Vliv nanočástic na zlepšení odolnosti gelcoatu proti vodě. [23]

1.3.2. Polymerní matrice

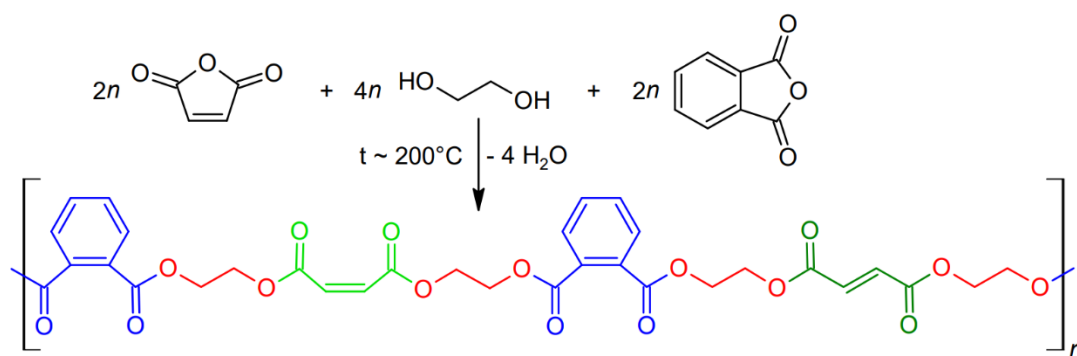
Matrice je spojitou (kontinuální) fází kompozitu. V kompozitech vyztužených vlákny plní tři základní funkce: zajišťuje geometrickou polohu vláken a tvarovou stálost výrobku, přenáší napětí mezi vlákny a chrání vlákno před okolními vlivy a mechanickým poškozením. Polymerní matrice se dělí do dvou skupin na termoplastické a reaktoplastické. Termoplasty mají jednoduchou strukturu, která se roztavením a opětovným ochlazením nemění. To umožňuje recyklaci. U reaktoplastů tomu tak není, protože během vytvrzení dochází k síťování molekul a jedná se o ireverzibilní změnu chemické struktury. Výhodou polymerních matric oproti matricím kovovým a keramickým je jejich nízká hustota, odolnost proti korozi a to, že nevyžadují povrchovou úpravu. [2; 8; 19, 24]

Pro kompozity používané v lodním průmyslu se používají reaktoplastické pryskyřice. Oproti termoplastům mají mnohonásobně nižší viskozitu během zpracování, což usnadňuje výrobní proces. Vlákna se snadno prosycují a výrobní proces je energeticky méně náročný. Nevýhodou v porovnání s termoplasty je poměrně dlouhá doba vytvrzování a nemožnost recyklace. Dosahují vysokých hodnot pevnosti a tuhosti, ale jsou křehké. Houževnatost je možné zlepšit přidáním modifikačních přísad. Nejčastěji jsou používány nenasycené polyesterové pryskyřice (UP), epoxidové pryskyřice (EP) a vinylesterové pryskyřice (VP). [8; 11]

1.3.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Nenasycené polyesterové pryskyřice se vyrábí polyesterifikací diolů s nenasycenými dikarboxylovými kyselinami. Jedná se tedy o roztoky lineárních nenasycených polyesterů v monomerech schopných polymerace. Nejčastěji používaným monomerem je styren. Výsledný systém je kapalný, což umožňuje dobrou manipulaci. Z diolů mají největší význam ethylenglykol a propylenglykol. Z kyselin je to maleinanhydrid a kyselina fumarová. Čisté glykolmaleinátové polyestery mají nevyhovující vlastnosti, proto se používají modifikující nasycené dikarboxylové kyseliny – nejčastěji ftalanhydrid. Schéma výroby UP reakcí maleinanhydridu, ethylenglykolu a ftalanhydridu je znázorněno na obrázku 7. V průběhu reakce dochází k přeměně části kyseliny maleinové na reaktivnější kyselinu fumarovou, která zlepšuje fyzikální vlastnosti vytvrzených produktů. Za běžných reakčních podmínek k této přeměně dochází až z 90 %. Molární poměr mezi nenasycenými a modifikujícími kyselinami je závislý na tom, k jakému účelu bude pryskyřice sloužit. Pohybuje se v rozmezí 0,3 – 2

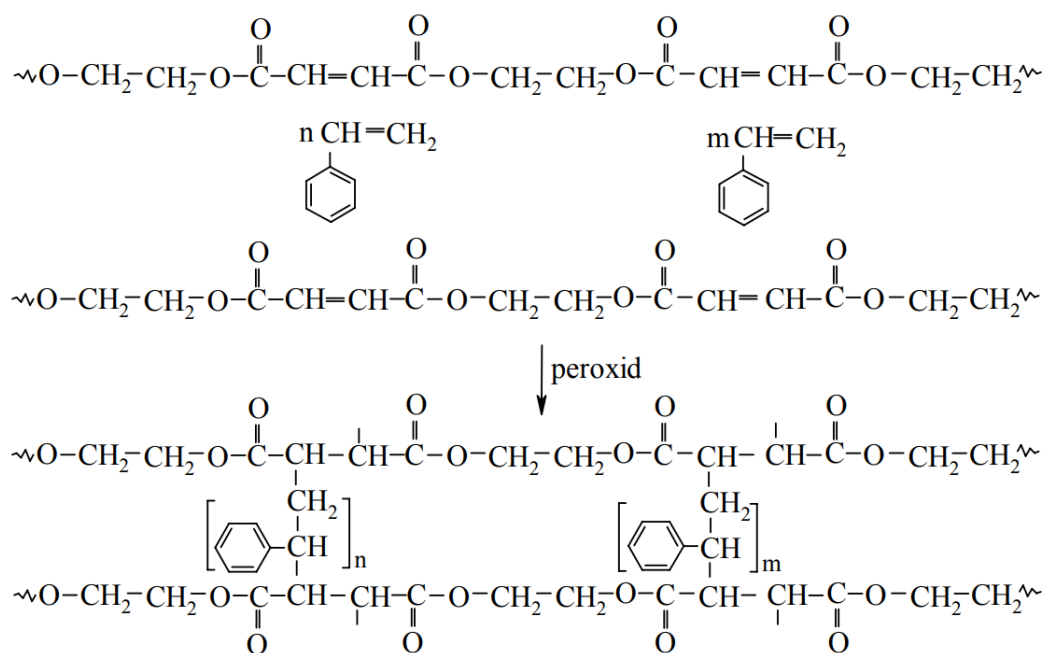
a u univerzálních typů je roven 1. Polyesterifikace se provádí v tavenině v teplotním rozmezí 180–220 °C v inertní atmosféře a průběh reakce je sledován číslem kyselosti. Číslo kyselosti vyjadřuje množství KOH v mg potřebné k neutralizaci 1 g látky. Poskytuje nám informaci o množství volných karboxylových skupin v reakční směsi a je jednou ze základních charakteristik polyesterových pryskyřic. Toto číslo tedy v průběhu reakce klesá a reakce je ukončena zpravidla kolem hodnot 50 mg KOH na 1 g pryskyřice. Získané pryskyřice mají relativní molekulovou hmotnost v rozmezí 1200–2000. Problémem UP na bázi ethylenglykolu je jejich omezená mísitelnost se styrenem. To se řeší buď jeho nahrazením propylenglykolem nebo snížením polaritu polyesteru terminací monofunkčním alkoholem – nejčastěji cyklohexanolem. [24; 25, 26]



Obrázek 7: Schéma výroby nenasycené polyesterové pryskyřice. [27]

Aplikační vlastnosti UP závisí na volbě vstupních surovin. Například přítomnost aromatických jader zvyšuje mechanickou pevnost a chemickou odolnost. Používá se kyselina tereftalová nebo izoftalová či 1,4-cyklohexandimethanol. Delší alifatické řetězce kyseliny adipové a 1,4-butandiolu zlepšují vláčnost. Přítomnost bromu a chloru v molekule fungují jako retardéry hoření. [8; 25]

Zatímco výroba UP probíhá polykondenzační reakcí, vytvrzování se řadí do skupiny řetězovitých reakcí. Kopolymerace dvojných vazeb lineálních nenasycených řetězců s dvojnými vazbami styrenu probíhá radikálovým mechanismem (obrázek 8). Jako iniciátory se používá široká škála organických peroxidů a jejich volba závisí na požadovaných podmínkách vytvrzování. Hojně využívaným organickým peroxidem je dibenzoylperoxid. K iniciaci se v kombinaci s peroxidy používají urychlovače. Většinou se jedná o kovové soli a příkladem může být kobaltooktoát. Vytvrzením vzniká tvrdá polymerní síť. [8; 25; 26]



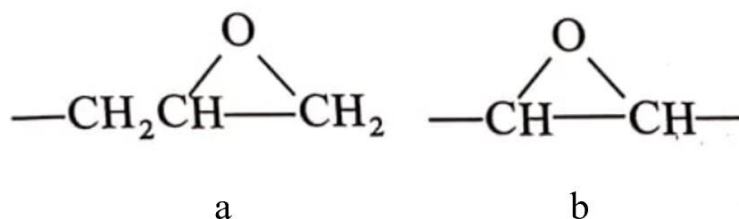
Obrázek 8: Vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice. [26]

Výhodou těchto pryskyřic je jejich příznivá cena, dobré mechanické vlastnosti, velká variabilita volby složení a z toho plynoucí mnohostranné použití pryskyřic. Díky své chemické odolnosti se často využívají k výrobě potrubí a různých nádrží v průmyslu. Nevýhodou je poměrně velké objemové smrštění během vytvrzování, které činí až 10 %. Přes 70 % výroby UP je zpracováno ve formě kompozitů. Typickou výztuží pro UP matrice jsou skleněná vlákna. Uhlíková a aramidová vlákna se používají zcela výjimečně. [2; 5; 8]

1.3.2.2. Epoxidové pryskyřice (EP)

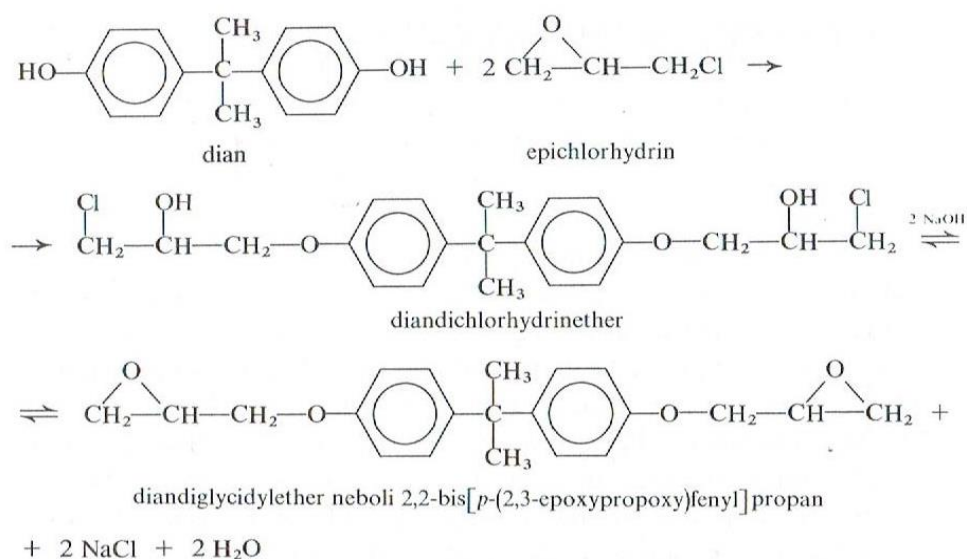
Epoxidové pryskyřice je možné definovat jako sloučeniny obsahující v molekule více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Slovo „epoxy“ je odvozeno z řecké předpony „ep“ znamenající „mezi“ a slova „oxy“, odvozeného od kyslíku a vzniklo z popisu struktury tříčlenného kruhu epoxidové skupiny. Oxiranová skupina je velmi reaktivní a reaguje s velkým množstvím látek, což vede k široké škále produktů od lepidel, přes lakařské pryskyřice a zalévací hmoty až k matricím kompozitů. Podle striktní definice by za epoxidové pryskyřice měly být považovány pouze nezesíťované oligomery, protože vytvrzené pryskyřice již žádné epoxidové skupiny neobsahují, ale v praxi se tento termín uchytil a běžně se používá i pro vytvrzené pryskyřice. EP lze rozdělit v zásadě na 2 skupiny. První skupinou jsou pryskyřice obsahující glycidylové (2,3-epoxypropylové) skupiny (obrázek 9–a), které

se připravují reakcí epichlorhydrinu s dalšími vhodnými surovinami. Druhou skupinu tvoří pryskyřice obsahující epoxidové skupiny (obrázek 9–b) připravené epoxidací nenasycených sloučenin, nejčastěji pomocí kyseliny peroxyoctové. [24; 25; 28]



Obrázek 9: Strukturní vzorec glycidylové (a) a epoxidové (b) skupiny. [25]

Nejrozšířenějším typem, přibližně 85 % všech vyrobených EP, je na bázi dianu. Jedná se o produkty alkalické kondenzace epichlorhydrinu s bisfenolem A (dian; 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan). Polykondenzace probíhá ve dvou hlavních reakcích. V první fázi dochází k adici epoxidové skupiny epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl v přítomnosti NaOH, který reakci katalyzuje. Následuje odštěpení chlorovodíku ze vzniklých chlorhydrinetherů za vzniku epoxidových skupin. Následnou reakcí epoxidové skupiny s fenolickým hydroxylem další molekuly dianu vznikají výšemolekulární produkty. S rostoucím polymeračním stupněm reakce se zvyšuje počet hydroxylových skupin, které zlepšují přilnavost pryskyřice k povrchům. Kromě hlavní reakce dochází i k reakcím vedlejším. Schéma výroby diandglycidyletheru ukazuje obrázek 10. Relativní molekulová hmotnost připravených pryskyřic se pohybuje v rozmezí 340–3800 a je možné jí regulovat molárním poměrem vstupních monomerů. Molekulová hmotnost je tím vyšší, čím méně epichlorhydrinu připadá na 1 mol dianu. Produkty vzniklé reakcí mohou být tedy jak viskózní kapaliny, tak i tuhé a křehké pryskyřice. Výrobní proces z hlediska technologických podmínek i postupů se u nízkomolekulárních, středně molekulárních a výše molekulárních pryskyřic liší. Čím výše molekulární pryskyřice se vyrábí, tím vyšších teplot je při výrobě potřeba. [8; 25]

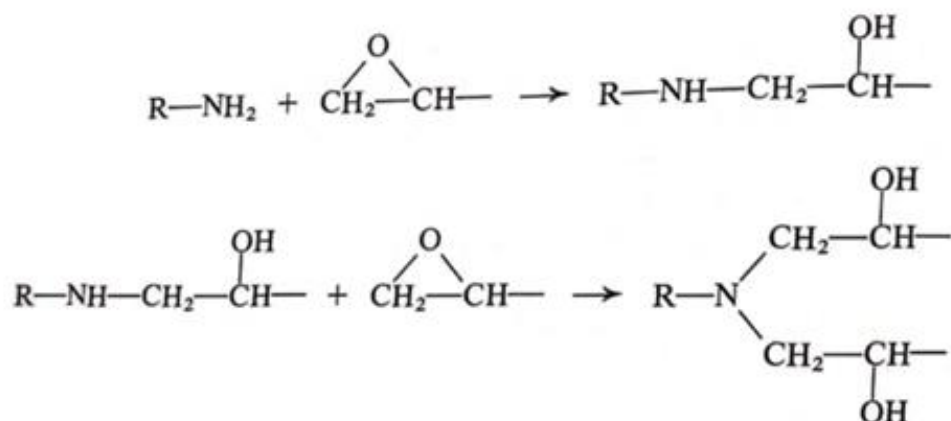


Obrázek 10: Schéma rovnice vzniku diandiglycidyletheru. [25]

Mezi epoxidy na jiné bázi, než na bázi dianu patří například pryskyřice na bázi jiných fenolů – tetrabromdianu či bisfenolu F (4,4'-bis(hydroxyfenyl)methan). Reakcí epichlorhydrinu s nízkomolekulárními novolaky vznikají epoxynovolaky. Další možností je epoxidace dvojně vazby kyselinou peroxyoctovou za vzniku epoxidové pryskyřice obsahující epoxidové skupiny namísto glycidylových. [28; 29]

Vytvrzování epoxidových pryskyřic je možné provést několika způsoby. Nejvýznamnějším způsobem je vytvrzování polyaminy a anhydridy polykarboxylových kyselin. Vytvrzování primárními a sekundárními polyaminy probíhá polyadičním mechanismem. Vzniká hydroxylová skupina a sekundární aminoskupina, která v následujícím kroku dále reaguje a dochází ke vzniku terciární aminoskupiny. Mechanismus vytvrzování EP diaminem je znázorněn na obrázku 11. Výhodou této reakce je, že probíhá za normální teploty. Podmínkou vzniku polymerní sítě při vytvrzování je přítomnost minimálně 3 aktivních vodíků v molekule polyaminu. Mezi známá a hojně využívaná alifatická polyaminová tvrdidla patří diethylentriamin (DETA; P11) a triethylentetramin (TETA). Pro EP s vyšší tvarovou stálostí za tepla, lepší chemickou odolností a lepšími mechanickými vlastnostmi se používají aromatické polyaminy. Příkladem může být m-fenylendiamin. Vytvrzování je potřeba provádět za zvýšené teploty. Za zvýšené teploty probíhá také vytvrzování anhydridy polykarboxylových kyselin za přítomnosti urychlovačů. Používaným anhydridem může být například ftalanhydrid. Dalšími možnostmi je vytvrzování polythioly a polymerace epoxidových skupin. Zatímco v UP

je katalyzátor pouze donorem radikálu a přidává se v katalytických množstvích, epoxidové systémy se skládají ze vzájemně reagujících molekul pryskyřice a tvrdidla a tyto složky je potřeba mísit v přesném stechiometrickém poměru. EP je charakterizována tzv. epoxidovým ekvivalentem, který udává, kolik epoxidových skupin obsahuje hmotnostní jednotka. [8; 25; 29]



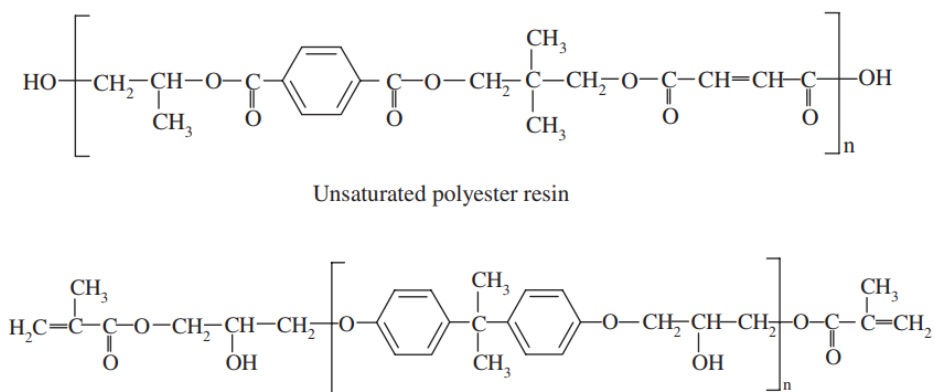
Obrázek 11: Vytvrzování epoxidové pryskyřice alifatickým aminem. [25]

Vytvrzené EP vykazují vynikající přilnavost k materiálům, jako jsou kovy, sklo, keramika či dřevo. Mají dobré elektroizolační vlastnosti, vynikající mechanickou pevnost a houževnatost, odolnost vůči chemikáliím, vlhkosti a korozi. Nemají žádné emise těkavých látek a malé objemové smrštění během vytvrzování (pod 5 %). To je jedinečná kombinace vlastností, díky kterým nacházejí uplatnění v takovém množství aplikací. Používají se jako lepidla, nátěrové hmoty, v elektrotechnice, energetice, dopravě, letectví atd. Pouze asi 8 % objemu produkce EP se využívá do kompozitů. Používají se v kombinaci s uhlíkovými, kevlarovými i skleněnými vlákny. V lodním průmyslu se kompozity na bázi epoxidových pryskyřic používají k opravám všech typů kompozitních, ale i ocelových konstrukcí. Je to díky jejich vysoké reaktivitě a přilnavosti ve srovnání s polyestery a vinylestery. [8; 25; 28; 29; 30]

1.3.2.3. Vinylesterové pryskyřice (VP)

Vinylesterové pryskyřice vznikají reakcí epoxidové pryskyřice s kyselinou akrylovou nebo methakrylovou. Dříve byly na základě podobnosti chemické struktury (obrázek 12) zařazeny do skupiny nenasycených polyesterových pryskyřic, nicméně v porovnání s konvenčními UP mají vinylesterové pryskyřice pozoruhodnou odolnost proti korozi a výborné

mechanické vlastnosti, takže dnes tvoří vlastní skupinu pryskyřic. Stejně jako UP vznikají polykondenzační reakcí, rozpouštějí se ve styrenu a vytvrzování probíhá radikálovým mechanismem. [31; 32]



Obrázek 12: Porovnání chemické struktury UP (nahore) a VP (dole). [31]

VP leží vlastnostmi i cenou na pomezí EP a UP. Oproti UP mají lepší chemickou odolnost, lepší mechanické vlastnosti a vyšší odolnost proti korozi. Také jsou odolnější proti vodě a mají menší objemové smrštění, a přesto si zachovávají jednoduchost zpracování a rychlé vytvrzování typické pro UP. Nacházejí uplatnění ve výrobě potrubí, nádrží na chemikálie, ale také ve stavebnictví, v konstrukčních dílech automobilů a lodním průmyslu. Běžně se používají jako matrice vyztužené skleněnými vlákny. [5; 28; 31; 32]

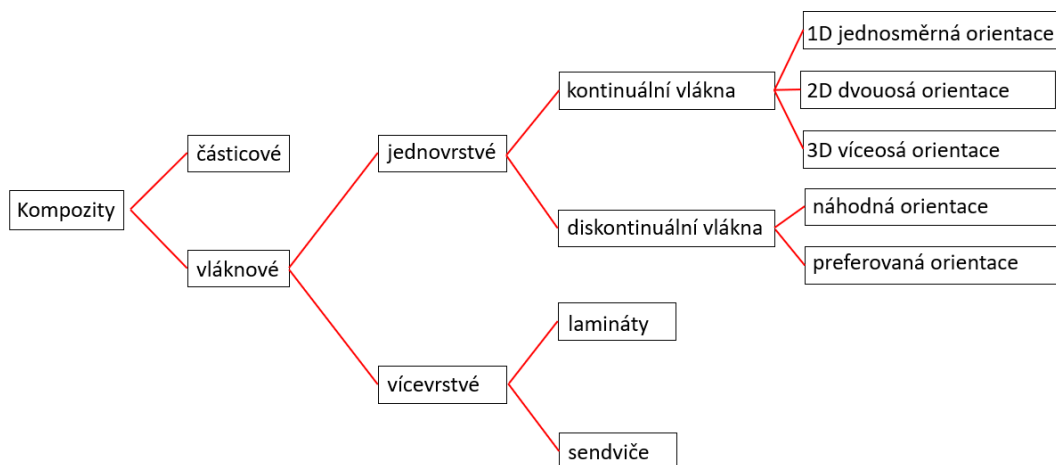
1.3.3. Výztuž

Výztuž je nespojitou (diskontinuální) fází kompozitu, vykazuje vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti E. Kompozitu poskytuje výslednou tuhost a pevnost. Základním parametrem charakterizace kompozitu je obsah výztuže. Udává se jako hmotnostní nebo objemový podíl celku. Kombinace vynikající matrice a výztuže sama o sobě by nemusela vést ke vzniku kompozitu s vynikajícími vlastnostmi. Záleží totiž na kvalitě fázového rozhraní mezi vláknem a matricí. Pro zvýšení adheze výztuže s matricí se vlákna musí apretovat. Apretace je povrchová úprava vláken. [2; 8]

1.3.3.1. Geometrie výztuže

Kromě volby materiálu výztuže záleží také na jejím uspořádání. Základní dělení výztuží kompozitu je znázorněno na obrázku 13. Výztuž se dělí do dvou základních skupin, a to

na výztuže částicové a vláknové. Částicové výztuže slouží především pro zlepšení vlastností matrice. Je možné upravovat například tepelnou a elektrickou vodivost, mechanickou a chemickou odolnost a další vlastnosti dle konkrétní aplikace. Pro výrobu lodí a jejich částí jsou podstatné zejména kompozity vyztužené vlákny. [2; 8]



Obrázek 13: Dělení kompozitů podle geometrie výztuže. [2]

Jednosměrná vlákna

Jednosměrná tkanina (obrázek 14), v praxi krátce nazývaná „jednosměr“, patří do skupiny vláken s jednosměrnou orientací. Vlákna nejsou spojena vzájemným tkaním, jako je tomu u typických tkanin, ale jsou podšitá jemnou nití. Jednosměrná vlákna jsou napřímená, takže nedochází ke ztrátě pevnosti vlivem jejich deformace. Tato výztuž má vysoký modul pružnosti E a používá se pro mechanicky velmi namáhané díly. Nevýhodou je obtížná manipulace při výrobě kompozitu. [9]

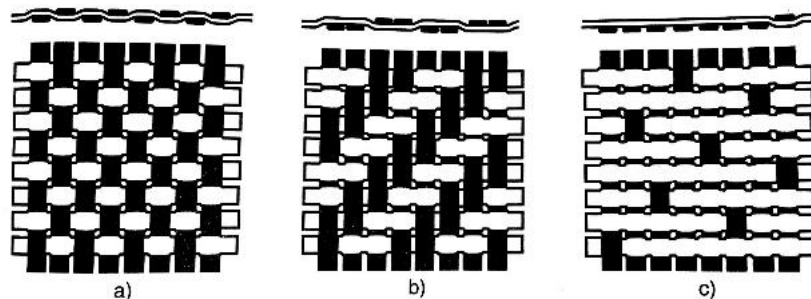


Obrázek 14: Jednosměrná uhlíková vlákna.

Tkaniny

Tkaniny jsou tvořeny vlákny nebo pramenci vláken orientovanými ve dvou na sebe kolmých směrech. Jeden směr se nazývá osnova a druhý útek. Vlákná jsou tkaná dohromady, což znamená, že dochází ke vzájemnému křížení a zvlnění vláken. Právě tato deformace vláken způsobuje, že tuhost vrstvy tkaniny bude vždy nižší než tuhost dvou na sebe kolmo položených vrstev jednosměru. V porovnání s jednosměrnými vlákny dosahují také nižších hodnot pevnosti v tlaku, vykazují však lepší pevnost v tahu. Výhodou je snazší manipulace a jednodušší prosycování. Změnami počtu vláken v osnově dochází ke vzniku rozdílných typů křížení vláken, které se nazývají vazby (obrázek 15): [8; 9]

- **Plátnová vazba** je základním typem vazby. Zvlnění vláken je zde nejvýraznější, což vede k největšímu zhoršení tuhosti vláken ze všech typů vazeb. Pevná vazba vláken mezi sebou usnadňuje manipulaci s výztuží, protože tolik nedochází k otřepu. Také to znamená, že je méně poddajná a tím pádem není vhodná k tvarování složitějších prvků.
- **Keprová vazba** má menší zvlnění vláken, vazba není tak pevná, takže se výztuž snáz tvaruje, ale otřep je výraznější než u vazby plátnové.
- **Atlasová (saténová) vazba** díky malému vychýlení vláken umožňuje zpracování technologicky náročnějších prvků. Povrch kompozitu je hladší a nedochází k tak výraznému snížení mechanických vlastností vláken.

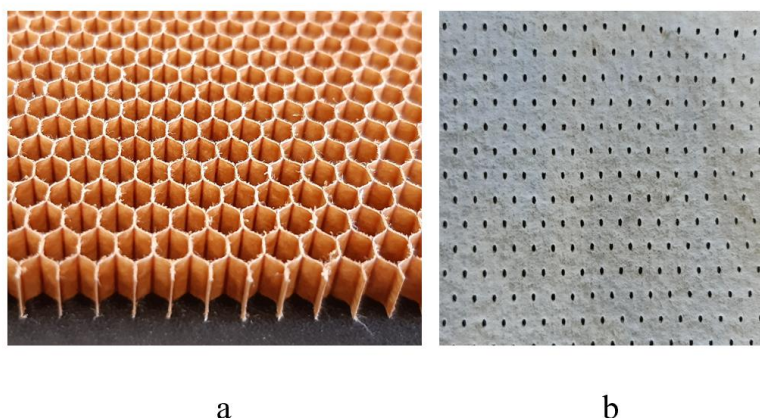


Obrázek 15: Druhy vazeb tkanin: a – plátnová; b – keprová, c – atlasová. [8]

Sendvičové struktury

Sendvičové struktury se využívají v lehčených konstrukcích a sestávají z lehkého jádra z obou stran překrytého tenkou a tuhou vrstvou kompozitu. Úkolem materiálu jádra

je poskytnout kompozitu pevnost, tuhost a kontinuitu v celé konstrukci, a to s minimálním zvýšením hmotnosti. Používá se lehké dřevo, jako například balsa, voštiny či polymerní pěny. V lodním průmyslu se využívají i kovové a hybridní materiály. Jádrem lehkých závodních lodí je nomexová voština (obrázek 16–a). Při konstrukci klubových lodí je výhodnější využívat tvrdé polyurethanové či akrylátové pěny. V porovnání s voštinou při stejné tuhosti jader bude sice pěnové jádro těžší, ale bude mít výrazně lepší rázovou odolnost. Dalším možným řešením materiálu jádra je Coremat® (obrázek 16–b) na bázi polyesterové tkaniny, který je levný a efektivně zvyšuje tuhost kompozitu. [11; 33; 34; 35]



Obrázek 16: Materiál jádra: a – nomexová voština, b – Coremat®.

Prepregy

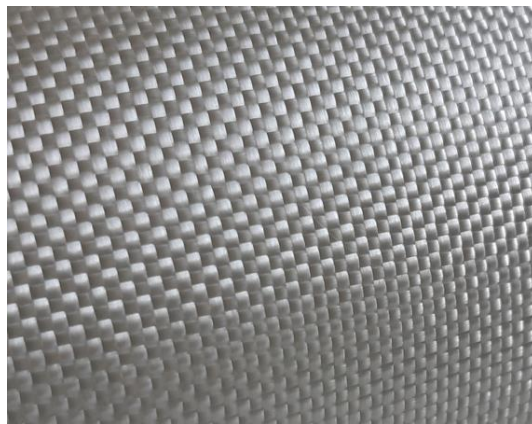
Prepregy jsou předimpregnované vrstvy výztuže částečně vytvrzenou pryskyřicí. Výhodou je přesné množství a rovnoměrné rozložení matrice. Doba skladovatelnosti před zpracováním je pro epoxidové prepregy při teplotě 23 °C zhruba týden. Je však možné je skladovat i půl roku, ale v mrazících boxech při teplotě -18 °C, což je energeticky a následně i finančně velmi náročné. Zpracovávají se lisováním nebo v autoklávu, kde dojde k jejich vytvarování a vytvrzení. [2; 24]

1.3.3.2. Skleněná vlákna

Skleněná vlákna (obrázek 17) jsou nejčastěji využívaným typem výztuže v kompozitech s polymerní matricí. Mají amorfni strukturu, ze které plynou jejich izotropní vlastnosti. Vlákna jsou pravidelného kruhového průřezu o průměru od 3,5 do 24 μm . Silné kovalentní vazby mezi

křemíkem a kyslíkem ve struktuře skloviny jsou důvodem relativně vysoké hodnoty pevnosti a modulu E. Podle vlastností a složení skloviny existuje několik druhů skel: [8; 19]

E – sklo je základním typem skla pro výrobu vláken. Tvoří téměř 90 % všech skleněných vláken používaných v kompozitech. Sklovina se skládá z SiO_2 (54 %), MgO (20 – 24 %), Al_2O_3 (15 %) a B_2O_3 (do 10 %). **S – sklo** je druhým nejčastěji používaným typem skleněných vláken v kompozitech. Vykazuje oproti E – sklu vyšší pevnost a modul E. Také odolává vyšším teplotám. Náklady na výrobu jsou vyšší a využití nachází například v materiálech pro letectví. Sklovina obsahuje větší množství SiO_2 (60 %). Dalšími složkami jsou Al_2O_3 (25 %), CaO (14 %) a MgO (3 %). Dalším typem skla je například **C – sklo**. Je to chemicky odolné sklo, ale v porovnání s E – sklem má nižší pevnost.



Obrázek 17: Tkanina ze skleněných vláken.

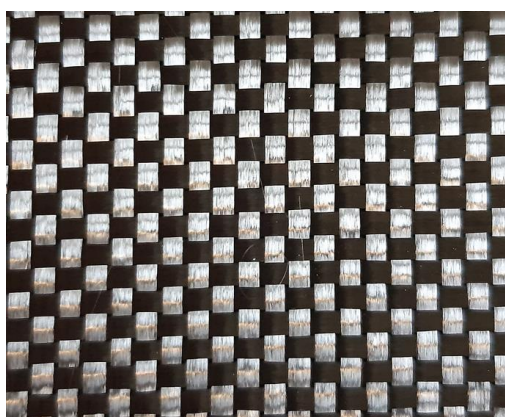
Skleněná vlákna se vyrábí tažením z platinových trysek. Surovinami pro E – sklovinu jsou: křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec. Vstupní suroviny se při teplotě kolem 1400 °C roztaví ve sklářské peci na sklovinu a několik dnů probíhá čiření. Poté se v tekutém stavu vedou do platinových sprádacích trysek. Ty jsou nahřáté na takovou teplotu, aby sklovina pomalu vytékala a tuhla do tvaru vláken o průměru kolem 2 mm. Počet trysek závisí na zpracovatelském zařízení, ale může jich být až 4000. Konečný průměr vláken se získává dloužením a je korigován rychlostí pohybu navíjecího zařízení. V průběhu tažení je na vlákna nanášena lubrikace ve formě vodní emulze. [8]

Lubrikace se skládá ze 4 složek a každá z nich má svou funkci. První je filmotvorná složka, nejčastěji na bázi vinylacetátů, epoxidů nebo polyesterů. Chrání elementární vlákna a spojuje je do pramenců. Druhou složkou jsou maziva zabraňující vzájemné abrazi vláken. Nejčastěji se používá polyethylenglykol. Třetí složkou je apretace na silanové bázi. Jejím úkolem je zajistit vynikající adhezi mezi vláknem a matricí. Typ apretace se volí podle

materiálu matrice. Čtvrtou složku tvoří antistatika odvádějící elektrostatický náboj z povrchu vláken, k jehož vzniku v průběhu výroby dochází. Jsou na bázi anorganických solí. [8; 36]

1.3.3.3. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (obrázek 18) jsou složena převážně z uhlíku, mají kruhový tvar a průměr mezi 5–10 μm . Typickými vlastnostmi je extrémně vysoká pevnost a tuhost, ale nízká tažnost. Jsou silně anizotropní, což plyne ze struktury grafitu. Uhlíková vlákna mohou být označována i jako grafitová a toto označení závisí na procentu obsaženého uhlíku, kdy převažuje buď amorfní uhlík, nebo krystalický grafit. [2; 8]



Obrázek 18: Tkanina z uhlíkových vláken.

Uhlíková vlákna je možné připravit třemi způsoby, a to tepelným rozkladem uhlovodíků, odpařováním z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami nebo pyrolýzou polymerů, což je dnes nejčastěji využívaná metoda. K výrobě kvalitních vláken pyrolýzou polymerů se využívá polyakrylonitril (PAN) nebo mezofázové smoly obsahující kapalné krystaly. Méně kvalitní a levnější uhlíková vlákna se vyrábí ze smol. [2]

Prvním krokem výroby vláken z PAN je stabilizace, kdy probíhá oxidace při teplotách v rozmezí 200–300 $^{\circ}\text{C}$ za přítomnosti vzduchu. Dochází k zesílení makromolekuly kyslíkovými můstky, vlákno zčerná a je netavitelné. Druhým krokem výroby je karbonizace. Ta probíhá v inertní atmosféře dusíku při teplotách dosahujících maximálně 1600 $^{\circ}\text{C}$. Tímto způsobem lze připravit tzv. vysokopevnostní vlákna – HS (s pevností více než 5 GPa). Obsah uhlíku je kolem 95 %. Ve třetím kroku teplota dosahuje až 2500 $^{\circ}\text{C}$. Probíhá v atmosféře dusíku s argonem. Nazývá se grafitizace a vyrábí se jím vlákna vysokomodulová – HM (s hodnotami modulu E přesahujícími 400 GPa), ale zároveň ztrácí vysokou pevnost. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku

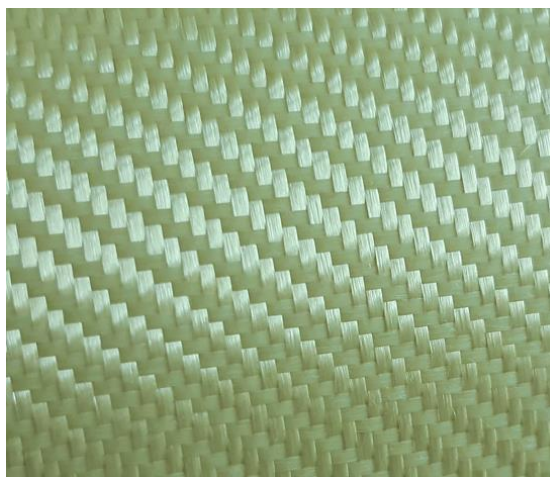
až na 99 % a vzniká grafitická struktura. Působící tahové napětí zajistí usměrnění uhlíkových vrstev vlákna rovnoběžně s jeho osou. Pevnost vlákna klesá s rostoucí velikostí krystalků, a to je důvod, proč je možné vyrábět grafitová vlákna buď s vysokou pevností, nebo s vysokým modulem. [2; 8; 24]

Povrch uhlíkových vláken je chemicky inertní, což vede k nízké adhezi mezi vláknem a matricí. Aby byl vysoký potenciál uhlíkových vláken v kompozitech plně využitý, je potřeba provést úpravu jejich povrchu. A to buď zdrsněním povrchu vlákna, nebo zavedením reaktivních funkčních skupin. Většina metod kombinuje obě úpravy. Nejčastěji se využívají oxidační procesy různými plyny nebo kyselinami a úprava povrchu plazmou. Také je možné na vlákna nanést speciální nátěr. Příkladem může být kopolymer na bázi styren – maleinanhidridu. [24; 37]

1.3.3.4. Aramidová vlákna

Aramidová vlákna se řadí do skupiny polymerních vláken. Mají kruhový průřez s mírně drsným povrchem a jejich průměr se pohybuje kolem 12 μm . Vykazují silně anizotropní vlastnosti. S hustotou $1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ jsou nejlehčím vláknem vyztužující kompozity. Jsou hydrofilní, což znamená, že absorbují vlhkost, která ovlivňuje jak kvalitu adheze mezi vláknem a matricí, tak snižuje i pevnost samotného vlákna. Adheze vláken k matrici je nižší než u ostatních vláken. Vyrábějí se dva hlavní typy – s nízkým modulem E a vyšší tažností a s vysokým modulem E a nižší tažností. [8]

Název aramidy vznikl zkrácením slova polyarylamidy, které jsou po chemické stránce lineární aromatické polyamidy. Vyrábí se polykondenzací chloridů aromatických dikarboxylových kyselin s aromatickými diaminy. Aromatická jádra v řetězci zajišťují vysokou tuhost a vodíkové vazby způsobují silné vazby mezi hlavními řetězci. Polykondenzací dichloridu kyseliny tereftalové s p-fenylendiaminem vzniká poly(p-fenylentereftalamid), známý pod obchodním názvem Kevlar (firma DuPont). Kevlarová vlákna (obrázek 19) jsou typickým zástupcem aramidů. Záměnou dichloridu kyseliny tereftalové za dichlorid kyseliny isoftalové a p-fenylendiaminu za m-fenylendiamin vzniká poly(m-fenylenisoftalamid). Ten je známý pod obchodním názvem Nomex (firma DuPont) a používá se jako materiál pro výrobu voštin. [8; 25]



Obrázek 19: Tkanina z kevlarových vláken.

Aramidová vlákna je nutno vyrábět z roztoku. Výroba z taveniny není možná, protože teplota roztavení přesahuje teplotu tepelného rozkladu. Spřádají se z vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové, poté se mnohonásobně propírají a neutralizují a na závěr ošetřují aviváží, která zlepšuje zpracovatelské vlastnosti. [8]

Kevlarová vlákna, podobně jako vlákna uhlíková, vykazují špatnou adhezi mezi vláknem a matricí. Také se využívají oxidační procesy nebo leptání povrchu vlákna plazmou. Jinou možností je tvorba reaktivních aminových skupin na povrchu vlákna, které reakcí s epoxidovými skupinami vytváří pevné kovalentní vazby na fázovém rozhraní vlákna a matrice. [24]

1.4. Technologie výroby

Klíčovou roli při výrobě kompozitu hraje volba správné technologie výroby. Ta závisí na mnoha faktorech, jako jsou typ matrice a výztuže, obsah a orientace výztuže, zpracovatelská teplota, rozměry výrobku, objem produkce či sériovost výroby. Technologie musí být vhodná pro daný výrobek a zároveň je potřeba brát ohled i na ekonomickou stránku výroby. [2]

V základu se výrobní technologie dělí do dvou skupin na „mokrě“ technologie, kdy jsou výztuže prosycovány pryskyřicí přímo ve formě a „suché“ technologie, při nichž se využívají prepregy. K výrobě lodí se využívají technologie, jako jsou ruční kladení kombinované s lisováním pomocí vakua, injektážní a infuzní technologie. Veslařské lodě se vyrábí buď ručním kladením s lisováním pomocí vakua, nebo lisováním z prepregů. Existuje velké

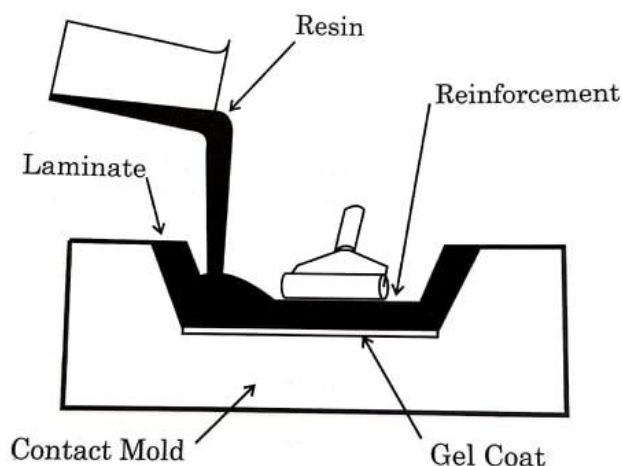
množství modifikací základních technologií, které si každá firma vyvine podle vlastních specifických potřeb. [2; 11; 29]

Formy pro ruční kladení

Jelikož hydrodynamický tvar nepodléhá patentu, dochází v běžné praxi ke kopírování tvarů lodí. Formy pro výrobu veslařských lodí jsou negativní formy převzaté z pozitivních tvarů lodí. Nazývají se kopyta. Proces výroby nové formy je poněkud pracný. Nejprve se vyrobí pracovní forma okopírováním tvaru lodi. V této pracovní formě se vyrobí loď, která se dle požadavků upraví a teprve z této lodi se získá konečná nová forma. Vyrábí se většinou z kompozitů vyztužených skleněnými vlákny. Pro výrobu větších lodí se v konstrukci formy využívá i dřevo. Samotná výroba formy může trvat déle než rok. Dnes se samozřejmě při konstrukci forem využívají i nejrůznější počítačové programy a výpočty. Všechny formy mají ale jednu věc společnou, a to dokonale hladký povrch. Seběmenší defekt formy či nečistota by způsobily defekt na povrchu výrobku. [11]

1.4.1. Ruční kladení („Hand Lay-up“)

Základní a nejjednodušší technologií je ruční kladení (obrázek 20). Zaváděcí cena technologie je nízká, protože se při ní používají levné pracovní pomůcky. Dalšími výhodami je možnost zpracování velkoplošných dílů a prototypů, možnost výroby sendvičových struktur a jednoduchost procesu. Nevýhodami však jsou závislost kvality výrobku na zkušenostech pracovníka, vysoké emise těkavých látek a možnost výrobku pouze s jednou hladkou stranou. [2; 5]

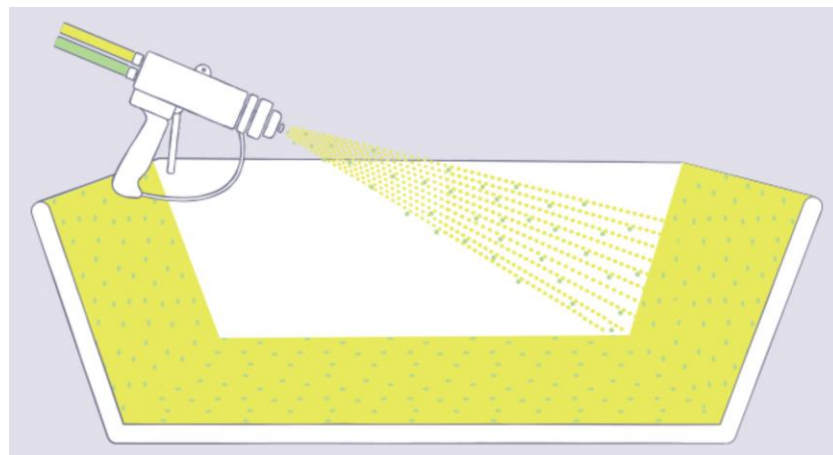


Obrázek 20: Ruční kladení. [5]

Využívají se dřevěné, kompozitní i kovové formy. Forma musí být dokonale čistá a hladká a ošetřená separačním činidlem. První vrstvou je gelcoat o tloušťce 0,3 – 1 mm. Po jeho částečném vytvrzení následuje kladení jednotlivých vrstev výztuže a jejich prosycování štětcem nebo válečkem. Na závěr je rýhovaným válečkem odstraňována přebytečná pryskyřice a vzduchové bubliny. Vytvrzování může probíhat za normální teploty a tlaku. Vyšší tepelné odolnosti výrobku je možné dosáhnout postupným zvyšováním teploty. Technologii je také možné kombinovat s použitím vakua, které se uplatňuje při výrobě sendvičových struktur. Částečným zautomatizováním výroby je využití technologie stříkání. Rozdíl oproti klasickému ručnímu kladení je ve způsobu aplikace vlákna a výztuže do formy. [2; 5]

1.4.2. Stříkání („Spray-up process“)

Kontinuální vlákno je speciální pistolí sekáno a sprejováno současně s pryskyřicí do formy (obrázek 21). Pomocí štětce a válečku je materiál potřeba rovnoměrně rozmístit do všech ohybů formy. Tímto postupem je možné vyrábět i velkorozměrové výrobky, jako jsou celé trupy lodí. Nastříknutou vrstvu je možné kombinovat s dalšími ručně kladenými vrstvami tkanin. [38]

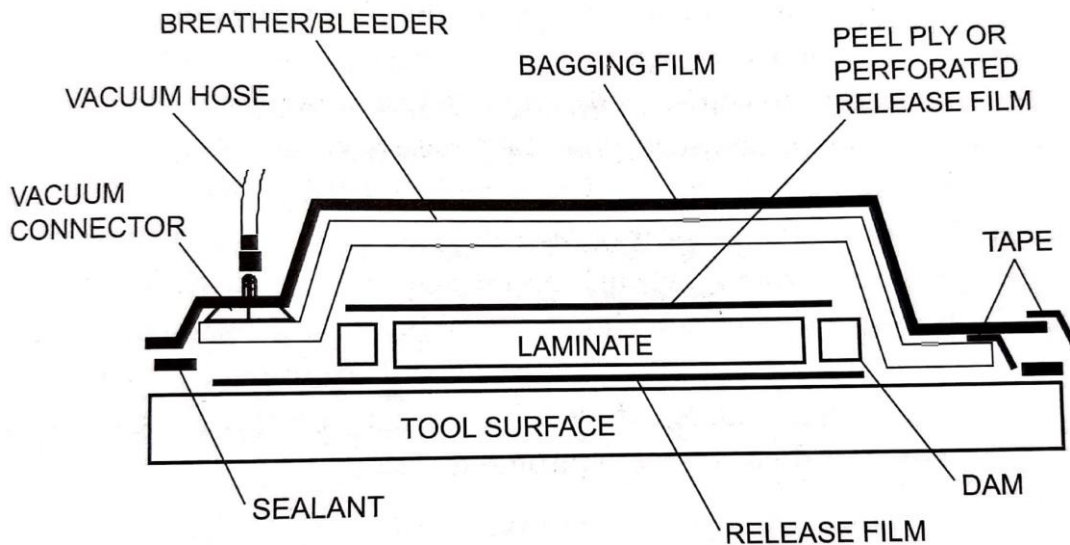


Obrázek 21: Stříkání. [38]

1.4.3. Lisování pomocí vakua („Bag Molding“)

Stejně jako při ručním kladení se při lisování pomocí vakua (obrázek 22) používá jednodílná forma. Díky vakuu je možné vyrábět kompozity s vyšším obsahem výztuže a kompozity se sendvičovou strukturou s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Přítomný podtlak odstraní vzduchové bublinky z kompozitu, zajistí dokonalé prosycení výztuže

a propojení voštiny s dalšími vrstvami kompozitu. Pořizovací náklady jsou kromě ceny vakuové pumpy relativně nízké. [2; 39]



Obrázek 22: Lisování pomocí vakua. [5]

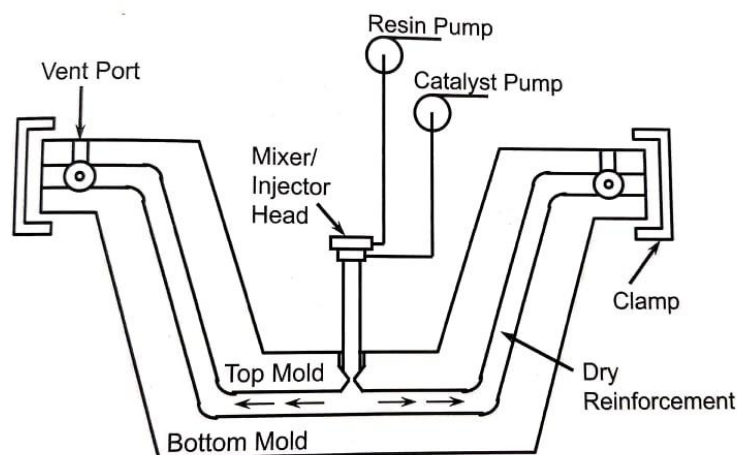
Na očištěnou a naseparovanou formu se kladou vrstvy výztuže, které se prosycují válečkem (ruční kladení). Po dokončení aplikace materiálu do formy se na prosycené vrstvy položí strhávací tkanina ze syntetických vláken. Slouží ke snadnému stržení z povrchu kompozitu po vytvrzení. Na strhávací tkaninu se klade perforovaná separační fólie a odsávací rohož, která slouží k odsátí přebytečného množství pryskyřice. Vrchní vrstvou je vakuovací (krycí) fólie, která slouží k utěsnění. K těsnění se využívají různé těsnící pásky, oboustranně lepící pásky nebo ve větších výrobních polyurethanové tmely. Poté se kompozit vyvakuuje. Podtlak je relativně malý. Hodnoty se pohybují od 0,3 do 0,9 bar. [2; 39]

1.4.4. Injektážní a infuzní technologie

Při injektážních a infuzních technologiích je suchá výztuž prosycována pryskyřicí až ve formě pomocí injektáže, vakua nebo jejich kombinací. Tyto technologie a jejich modifikace se řadí do skupiny uzavřených technologií, což vede ke snížení emisí zdraví škodlivých těkavých látek. [2]

1.4.4.1. Injekční vstřikování RTM („Resin transfer molding“)

Technologie RTM (obrázek 23) je injektážní technologií a někdy se nazývá jako vysokotlaké vstřikování. Použité formy jsou velmi robustní konstrukce, které musí vydržet vysoké tlaky. Vyrobeny jsou většinou z kovu nebo polymerbetonu, tedy z vysoce plněné pryskyřice. Jsou opatřeny vstupem pro zavedení pryskyřice a výstupem pro únik vzduchu. Zpracování probíhá ve dvou fázích. V první fázi je vyroben předlisek, který je vložen do formy opatřené gelcoatem. Ve druhé fázi probíhá prosycení výztuže ve formě. Pryskyřice je současně s iniciátorem pomocí vakuové pumpy dávkována vstupním otvorem do formy pod tlakem do 5 barů až do jejího naplnění. Vytvrzování probíhá 10–20 minut. Po vytvrzení se forma otevře a vyjme se finální výrobek. Technologie je vhodná jak pro kusovou, tak sériovou výrobu. Umožňuje vyrábět kompozity komplikovaných tvarů v reprodukovatelné kvalitě. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena výrobního zařízení. Touto technologií se vyrábějí například čluny, kajaky, paluby lodí nebo třeba lodní šrouby. [2; 39; 40]



Obrázek 23: Vysokotlaké vstřikování (RTM) [5]

Variantou této technologie je vstřikování za použití nižšího tlaku – L – RTM („Light RTM“). Používají se nižší tlaky, pryskyřice má nižší viskozitu a vrchní část formy je nahrazena fólií, takže forma je lehčí a levnější. [40]

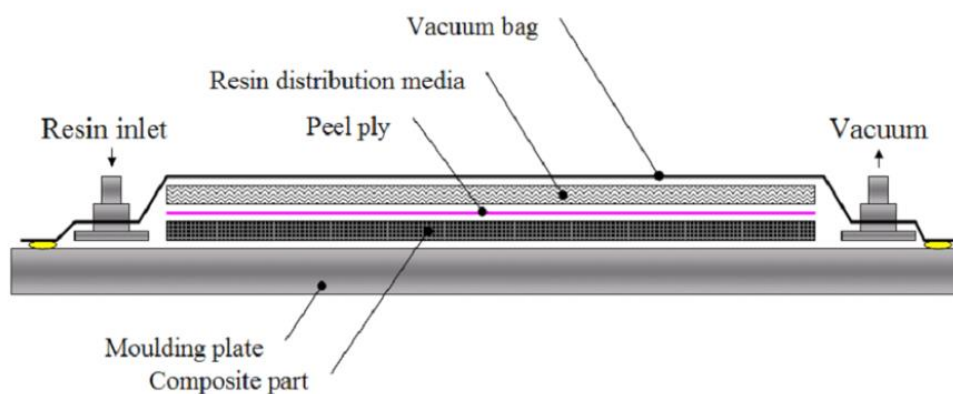
1.4.4.2. Vakuo – injekční technologie

VARTM („Vacuum Asisted RTM“) je modifikací technologie RTM. K prosycování se využívá kombinace injektáže a vakua, které prosycování urychlí a zároveň umožní používat nižší tlaky (většinou do 1 baru). Díky tomu nejsou potřeba tak robustní a drahé formy.

Také je možná výroba sendvičových struktur, ale pouze ve velmi omezeném množství. Příkladem mohou být pěnová jádra, která vydrží působící tlak. Voštiny u variací těchto technologií nejde použít vůbec, protože by došlo k zaplnění jejich buněk pryskyřicí. Technologie umožňuje zpracování velkých dílců, jako jsou trupy lodí. [2; 39]

1.4.4.3. Vakuová infuze VIP („Vacuum Infusion Process“)

Vakuová infuze (obrázek 24) neboli vakuové prosycování je technologie využívající k prosycování výztuže vakuum. Na rozdíl od technologie VARTM nepoužívá injekční zařízení. Nejprve dojde k vyvakuování výztuže ve formě, pryskyřice je aplikována až poté. Technologie je vhodná pro menší až střední série velkorozměrových dílců, u kterých by ruční kladení bylo příliš pracné a lisování nebo vysokotlaké vstřikování příliš nákladné. Umožňuje také vyrábět sendvičové struktury. Vakuovou infuzí se vyrábí například jachty, katamarány nebo záchranné čluny. [29; 41; 42]



Obrázek 24: Vakuová infuze. [42]

Technologie se používá ve třech variantách: [39]

Vakuové prosycování s pružnou vrchní částí formy: Spodní část formy je tuhá, vrchní má určitou pružnost a reguluje přítlak.

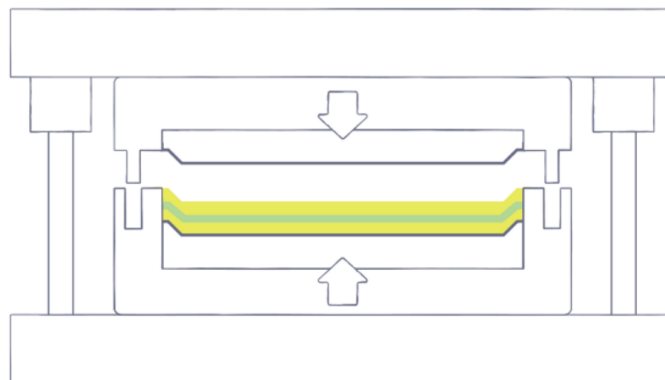
Vakuové prosycování pod pružnou fólií: Technologie je podobná lisování pomocí vakua. Vrchní část formy je nahrazena pružnou fólií. Fólie je po obvodu formy připevněna těsnicí páskou. Iniciované pojivo je přisáváno ze zásobníku. Pro výrobu velkorozměrných dílců se k rozvodu pojiva do vzdálenějších míst využívají perforované trubičky.

Metoda SCRIMP („Seemann Composites Resin Infusion Molding Process“):

Metoda je stejná jako vakuové prosyčování pod pružnou fólií, ale rozvod pryskyřice je zajišťován speciální sítčkou umístěnou přes celý povrch suché výztuže.

1.4.5. Lisování („Compression Molding“)

Lisování je možné provádět několika způsoby – za studena, za tepla, pomocí vakua nebo v autoklávu. Lisování za tepla (obrázek 25) je technologií využívající prepregy, což znamená, že proces je relativně čistý a výrobek má přesně definované složení. Používají se dvoudílné vyhřívané formy. Výrobek je pod velkým tlakem lisován při teplotě 100–150 °C. Technologie je vhodná pro velkosériovou výrobu malých a středně velkých výrobků. Výrobní cykly jsou krátké a je zaručena reprodukovatelnost kvality výrobku. Touto technologií se vyrábějí například jednotlivé části vesla, slajdy a další komponenty v lodi. [2; 11; 43]



Obrázek 25: Lisování za tepla. [43]

1.5. Výroba veslařské lodi

V této kapitole budou přiblíženy a popsány jednotlivé kroky výroby veslařské lodi tuzemským výrobcem Roseman, který vyrábí celokarbonové zavodní a klubové lodě tzv. „mokrým“ způsobem. Následující text vyplývá ze zkušeností a poznatků výrobce a jeho ochoty nahlédnout do výrobního procesu. [13]

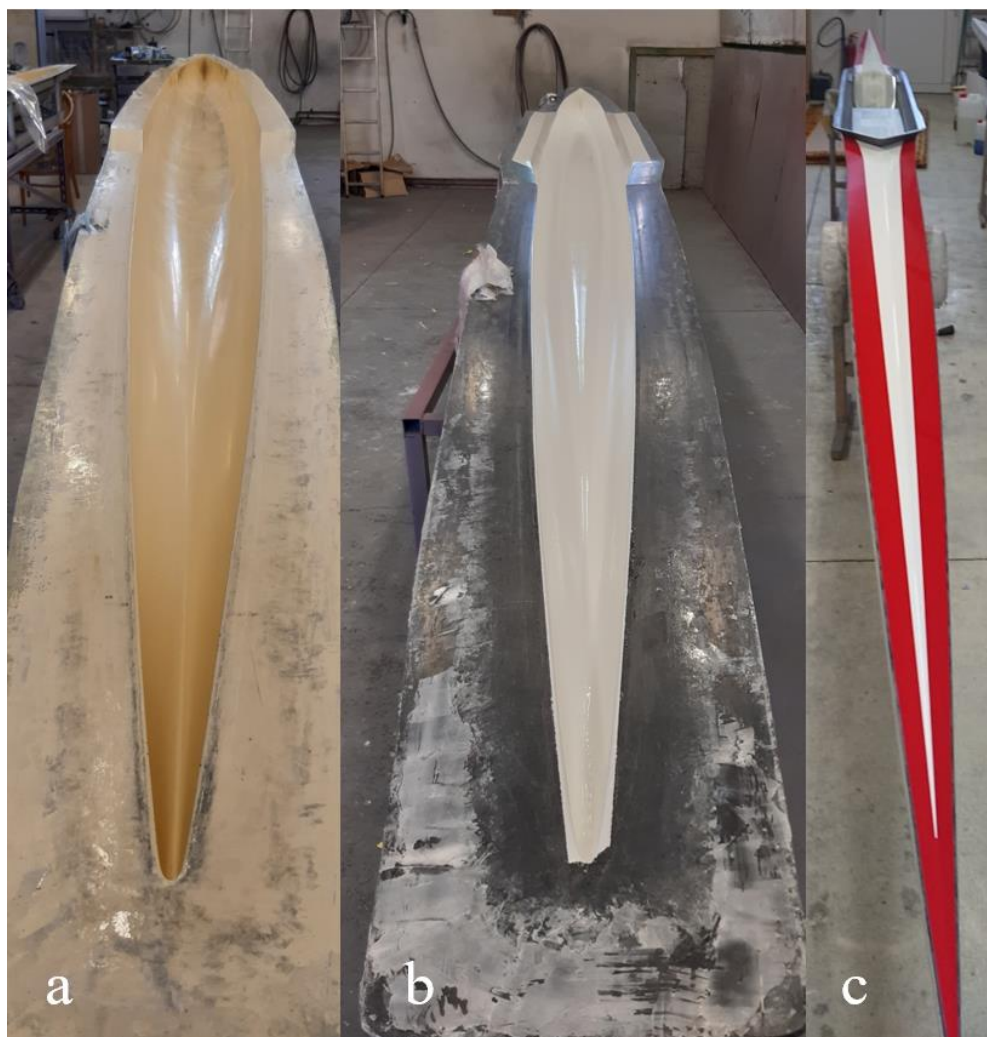
Výroba sestává z kombinace technologie ručního kladení a lisování pomocí vakua a následného vytvrzování za tepla. K výrobě je potřeba forma, materiál na loď, váleček na prosyčování výztuže, strhávací tkanina, separační fólie, odsávací rohož, krycí fólie, tmel na utěsnění krycí fólie, vakuová pumpa, pec a další nářadí.

Časová náročnost se odvíjí od velikosti lodi. Nejkratší dobu zabere výroba skifu (obrázek 26). Čistá výrobní doba se pohybuje odhadem okolo 75 hodin. Kvůli technologickým přestávkám však zabere výroba skifu minimálně 3 týdny.



Obrázek 26: Celokarboonový závodní skif. [13]

Výroba začíná přípravou formy, kterou je potřeba dokonale očistit a naseparovat separačním voskem (obrázek 27–a). Jako první vrstva se do formy nanáší polyesterový gelcoat (obrázek 27–b), který má ochrannou a designovou funkci. V případě složitějšího barevného designu (obrázek 27–c) se nanáší gelcoat ve více vrstvách, vždy po zavednutí předchozí vrstvy. Gelcoat je potřeba nechat zaschnout.



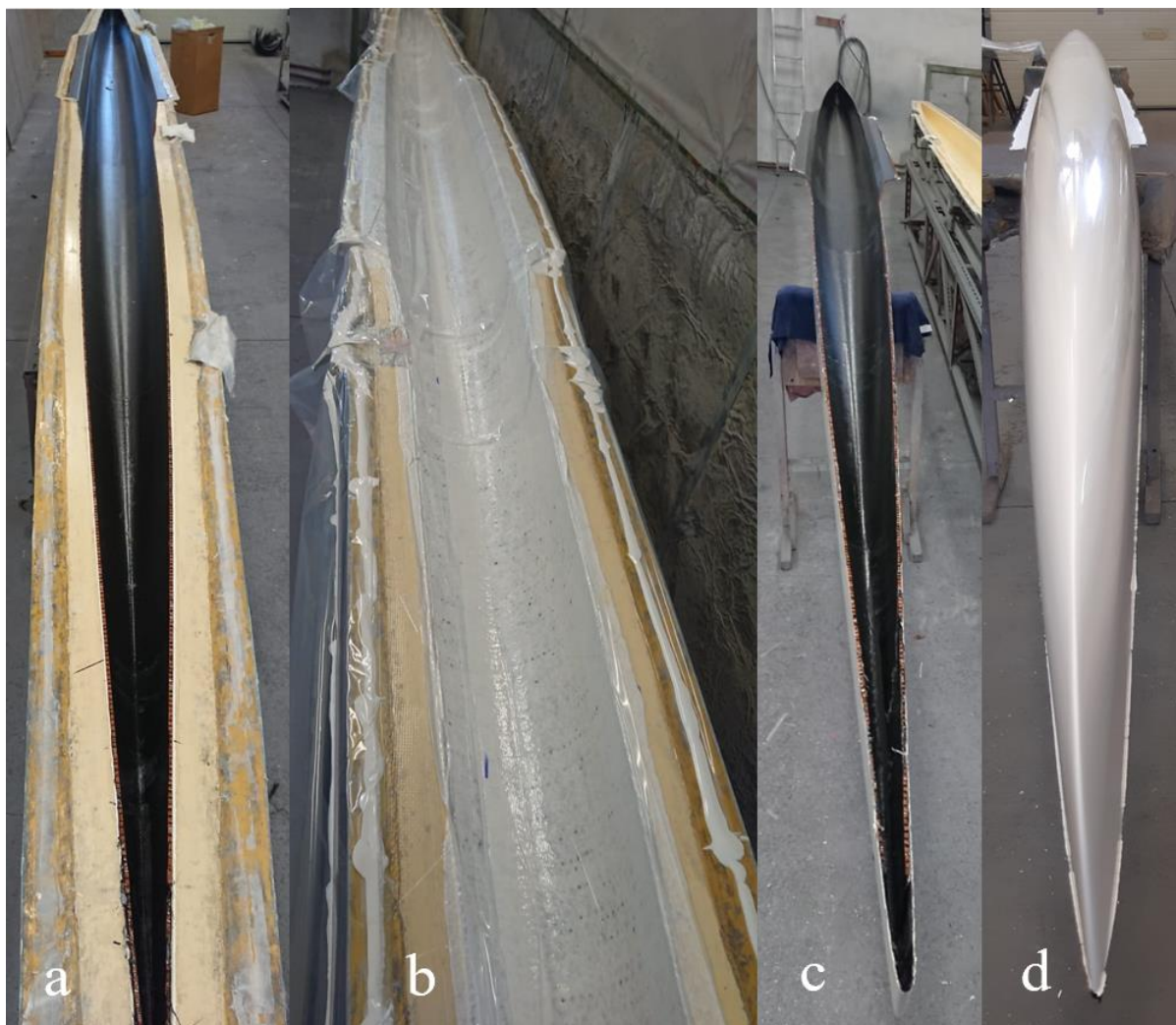
Obrázek 27: První fáze výroby:
a – očištěná a naseparovaná forma;
b – vrstva polyesterového gelcoatu;
c – ukázka tvorby designu pomocí barevného gelcoatu.

Na suchý gelcoat se naklade výztuž a válečkem se prosytí epoxidovou pryskyřicí (Obrázek 28–a). Poté se do formy naskládá voština (obrázek 28–b), která se překryje krycí fólií, utěsní, vyvakuje (obrázek 28–c) a dá se do pece vytvrdit. Zajistí se tak propojení voštiny s uhlíkovou výztuží.



Obrázek 28: První fáze laminace:
a – prosycená uhlíková tkanina;
b – vrstva nomexové voštiny;
c – vyztužující vrstvy pod krycí fólií po odsátí.

Ve druhé fázi laminace se na voštinu klade další vrstva uhlíkové výztuže (obrázek 29–a). V místě kokpitu lodi a na vnitřních palubách je její dokonalé rozložení velmi důležité kvůli estetice. Je překrytá pouze čirým gelcoatem nebo lakem a tvoří typický „karbonový“ design. Po prosycení se na výztuž naskládají jednotlivé vrstvy fólií a tkanin (obrázek 29–b), kompozitní díl se odsaje a dá se temperovat do pece. Vytvrzuje se při teplotě 60 °C po dobu 15 hodin. Po dokončení vytvrzování a pomalém zchladnutí se loď vybalí a vyjme z formy (obrázek 29–c, d). Proběhne vizuální kontrola a vážení.



Obrázek 29: Dokončení laminace:
a – prosycené všechny vrstvy výztuže;
b – vyvakuovaný kompozit připravený do pece;
c – loď po vytvrzení vyjmutá z formy – pohled shora;
d – loď po vytvrzení vyjmutá z formy – pohled zespodu.

V další fázi výroby dochází k sérii činností, jako je spojení obšívky lodi s palubami, vlnolamem a dalších částí veslařské lodi (obrázek 30–a). Namáhané části je potřeba vyztužit a vytmelit. Vlepují se lišty pro uchycení nohavek a kolejničků. Následuje přebroušení kokpitévé části lodi, lakování, a ještě závěrečné přebroušení a lakování. Takto vyrobená loď je připravená k finální kompletaci, tedy k montáži křídla, nohavek, kolejničků, slajdů a dalších komponent. Po kompletaci a posledních estetických přípravách je loď hotová (obrázek 30–b) a připravená na cestu k novému majiteli.



Obrázek 30: Fáze výroby po skončení laminace:
a – spojení palub s obšívkou;
b – hotová loď po finální kompletaci.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1. Použité materiály

Všechny materiály použité v této diplomové práci jsou materiály používané přímo výrobcem lodí. Veškerá data jsou převzata z technických listů výrobců a z katalogů dodavatelů materiálů. V případě neuvedeného výrobce je uveden alespoň dodavatel.

Epoxidová pryskyřice L 285, tužidla 285, 287

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, používaný pro výrobu kompozitů vyztužených skleněnými, uhlíkovými a kevlarovými vlákny. Vhodný pro výrobu kluzáků, motorových kluzáků a letadel, lodí, sportovního nářadí, leteckých modelů, forem a nástrojů. Teplotní odolnost výrobků vytvrzených za pokojové teploty se pohybuje v rozmezí -60–60 °C, u výrobků vytvrzených za tepla v rozmezí -60–100 °C. Doba zpracovatelnosti je závislá na použitém typu tužidla a teplotě prostředí při laminování. Pohybuje se od 45 minut do 6 hodin. Poměry mísení složek jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Mísící poměry pryskyřice a tvrdidel.

Mísící poměry	Pryskyřice L 285 : Tužidlo 285, 287
Složky hmotnostně	100 : 40 (±2)
Složky objemově	100 : 50 (±2)

Epoxidová pryskyřice EPIKOTE™ Resin MGS® LR 285 na bázi bisfenolu A od německého výrobce Hexion™. Číselně střední molekulová hmotnost 700. Specifikace pryskyřice je v tabulce 2.

Tabulka 2: Specifikace pryskyřice.

	Pryskyřice L 285
Hustota (25 °C) [g·cm ⁻³]	1,18–1,23
Viskozita (25 °C) [mPa·s]	600–900
Epoxidový ekvivalent [g·mol ⁻¹]	165–170
Epoxidové číslo [mol·g ⁻¹]	0,59–0,65

Tužidla EPIKURE™ Curing Agent MGS® LH na bázi alifatických polyaminů od německého výrobce Hexion™. Specifikace tužidel je v tabulce 3.


Tabulka 3: Specifikace tužidel.

	Tužidlo 285	Tužidlo 287
Hustota (25 °C) [g·cm ⁻³]	0,94–0,97	0,93–0,96
Viskozita (25 °C) [mPa·s]	50–100	80–100
Aminové číslo [mg KOH·g ⁻¹]	480–550	450–500


Tkaniny:

Pro výrobu kompozitů bylo použito celkem 6 druhů výztuží. Dvě skleněné tkaniny (S390 a S163), tři uhlíkové (C200, C93 a C50J) a kevlarová tkanina (A110). Specifikace jednotlivých typů tkanin jsou v tabulkách 4–9.


Tabulka 4: Charakteristika tkaniny S390.

Tkanina: S390	
Dodavatel: Havel Composites	
Materiál: sklo (E – sklo, Aeroglass)	
Vazba: plátno	
Gramáž: 390 g·m ⁻²	


Tabulka 5: Charakteristika tkaniny S163.

Tkanina: S163	
Dodavatel: Havel Composites	
Materiál: sklo (E – sklo, Aeroglass)	
Vazba: kepr 2/2	
Gramáž: 163 g·m ⁻²	


Tabulka 6: Charakteristika tkaniny C200.

Tkanina: C200	
Výrobce: G. Angeloni	
Materiál: uhlík (HR carbon, 3K)	
Vazba: plátno	
Gramáž: 193 g·m ⁻²	


Tabulka 7: Charakteristika tkaniny C93.

Tkanina: C93	
Výrobce: G. Angeloni	
Materiál: uhlík (HR carbon, Toray T/300 1K)	
Vazba: plátno	
Gramáž: 95 g·m⁻²	

Tabulka 8: Charakteristika tkaniny C50J.

Tkanina: C50J	
Výrobce: Unicarbon®	
Materiál: uhlík (DowAksa, Toray, Zoltek fibers)	
Vazba: jednosměrná tkanina	
Gramáž: 50 g·m⁻²	

Tabulka 9: Charakteristika tkaniny A110.

Tkanina: A110	
Dodavatel: Havel Composites	
Materiál: kevlar	
Vazba: kepr 2/2	
Gramáž: 110 g·m⁻²	

Pomocné materiály a příslušenství:

Forma – teflonová deska.

Silikonový olej v toluenu – separační činidlo.

Těsnící hmota (páska) na vakuování LSM1310, 12 mm x 2,5 mm x 15 m, do 110 °C (dodavatel: Havel Composites).

Strhávací tkanina – 105 g/m², šířka 150 cm, nylonová tkanina teplotně odolná do 200 °C (dodavatel: Havel Composites).

Vakuovací fólie – PE rukáv, šířka 1000 mm, tloušťka 0,1 mm (dodavatel: Havel Composites).

Lakovací váleček Blaufaden 13 mm, délka 7 cm (dodavatel: Havel Composites).

Vakuová pumpa Boc Edwards XDS-5C.

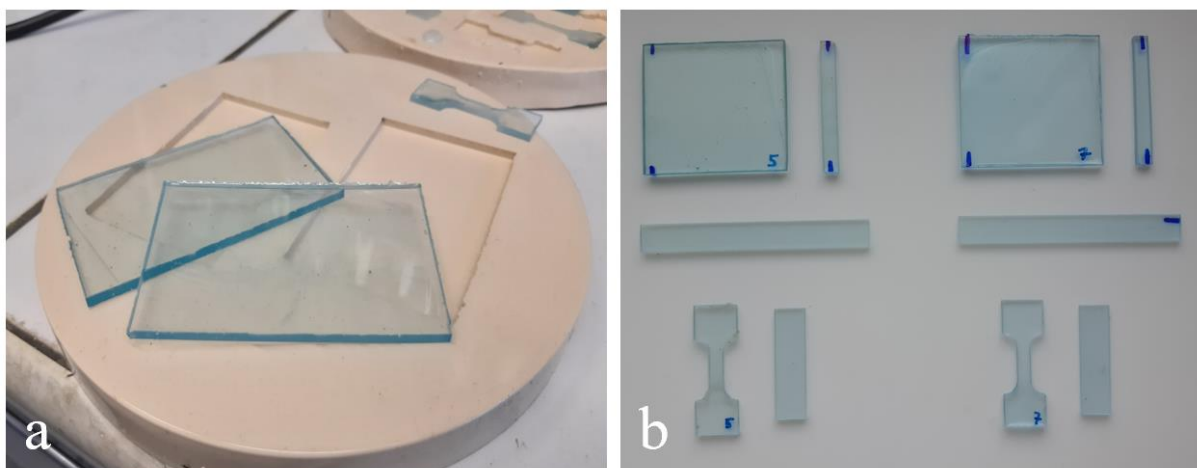
Sušárna – pro vytvrzování vzorků za tepla.

2.2. Příprava vzorků

2.2.1. Příprava vzorků matric

Připravené vzorky: Epoxy L285 + tužidlo 285 (E + 285); Epoxy L285 + tužidlo 287 (E + 287).

Smícháním 150 g pryskyřice se 60 g tužidla byly připraveny 2 epoxidové systémy. Oba systémy byly odstředěny, aby došlo k odstranění bublin a následně byly odlity do předem připravených forem. Od každého systému byla do předem sestavené a naseparované kovové formy odlita deska o tloušťce přibližně 2 mm a ze zbývajících množství byly do silikonových forem odlity vzorky pro tahovou zkoušku podle normy ASTM D1708 a 2 menší desky (obrázek 31–a). Odlité vzorky byly vytvrzovány při teplotě 60 °C po dobu 24 hodin. Po vytvrzení a vyjmutí desek z forem z nich byly nařezány vzorky pro další měření. (obrázek 31–b).



Obrázek 31: Příprava vzorků matric.

U vzorků matric byla stanovena doba želatinace, extrahovatelný podíl a byly provedeny zkoušky DMA, TMA, zkouška v tahu, vrubová houževnatost, tvrdost podle Vickerse a nasákavost ve vodě.

2.2.2. Příprava vzorků kompozitů

Připravené vzorky: 24 kompozitních desek (viz tabulky 10–13) o rozměrech 25x25 cm a tloušťce $2 \pm 0,5$ mm. Počet vrstev jednotlivých typů výztuže v kompozitu byl stanoven experimentálně před zahájením výroby desek.

Vzorky byly vyrobeny technologií ručního kladení s lisováním pomocí vakua, tedy stejnou technologií jako se vyrábí veslařské lodě „za mokra“. Technologie byla upravena a převedena do laboratorních podmínek. Největším rozdílem bylo vynechání použití odsávací rohože, a to kvůli řízení hodnoty obsahu výztuže v kompozitu v jednotlivých koncentračních řadách vzorků.

V prvním kroku byla připravena výztuž (obrázek 32) nařezáním nebo nastříháním příslušného počtu vrstev tkaniny a výztuž byla zvážena. Druhým krokem byla příprava formy. Teflonová deska byla důkladně očištěna a odmaštěna acetonem. Po obvodu formy byla nalepena těsnící páska a do ní na straně upevněna hadice s tlačkou pro regulaci podtlaku. Takto připravená forma (obrázek 33–a) byla naseparována silikonovým olejem v toluenu. Podle hmotnosti výztuže bylo namícháno odpovídající množství systému epoxid : tužidlo. Jednotlivé vrstvy výztuže byly kladeny do formy a rovnoměrně pomocí válečku prosycovány. Po dokončení laminace (obrázek 33–b) byla na kompozit položena strhávací tkanina a přes ní krycí fólie, která byla dokonale spojená s formou pomocí těsnící pásky. Takto připravený systém byl vyvakován na hodnotu 0,5 baru (obrázek 33–c). Hotový kompozit byl vytvrzován při teplotě 60 °C po dobu 24 hodin.



Obrázek 32: Příprava výztuže.

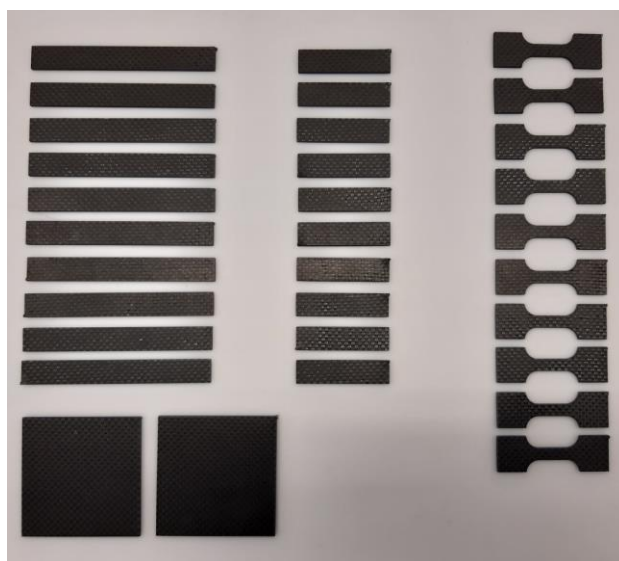


Obrázek 33: Výroba kompozitní desky.

Po dokončení vytvrzování byly desky vyndány z formy (obrázek 34). Desky byly ve společnosti SYNPO, a. s. Pardubice nařezány na vzorky o normovaných rozměrech pro následné mechanické zkoušky (obrázek 35).



Obrázek 34: Vytvrzené kompozitní desky.



Obrázek 35: Nařezané kompozitní vzorky.

U kompozitních vzorků byla provedena zkouška v tahu a ohybu, rázová houževnatost metodou Charpy, zkouška tvrdosti podle Vickerse, nasákavosti ve vodě, stanovení obsahu popela a stanovení obsahu výztuže v kompozitu.

Celkem bylo vyrobeno 24 kompozitních desek kombinací jedné epoxidové pryskyřice, dvou tužidel a šesti druhů výztuží, a to následovně: od každého typu výztuže byla vyrobena koncentrační řada kompozitů obsahující 40, 50 a 60 % výztuže s použitím tužidla 287 (40 % V7, 50 % V7 a 60 % V7). Řada vzorků s obsahem výztuže 50 % byla vyrobena navíc i s tužidlem 285 (50 % V5) a sloužila pro porovnání vlastností tužidel mezi sebou. Tužidlo 287 bylo pro výrobu koncentrační řady zvoleno z technologických důvodů, protože doba zpracovatelnosti se v závislosti na podmínkách pohybuje okolo 3 hodin. Z tohoto důvodu je toto tužidlo primárně využíváno při výrobě veslařských lodí, protože je potřeba laminovat velkorozměrové díly. Doba zpracovatelnosti tužidla 285 se pohybuje okolo 45 minut a ve výrobě lodí nachází uplatnění při laminaci menších dílů, u kterých je žádoucí, aby došlo k rychlému „zavadnutí“ potřebnému pro další manipulaci a zpracování. Přehled řad vyrobených vzorků kompozitních desek, jejich složení, hmotnosti jednotlivých komponent a počet vrstev jsou uvedeny v tabulkách 10–13. Označení vzorků vychází z jejich složení – první číslo udává obsah výztuže v % a číslo za písmenem „V“ nese informaci použitého tužidla. Číslo 5 značí použité tužidlo 285 a číslo 7 tužidlo 287.

Tabulka 10: Složení vzorků řady 50 % V5.

Vzorky 50 % V5			
Obsah výztuže: 50 %, tužidlo 285			
Výztuž	Hmotnost výztuže [g]	Počet vrstev výztuže	Pryskyřice : tužidlo [g]
S390	120,98	5	86,43 : 34,57
S163	134,37	13	95,98 : 38,39
C200	96,88	8	69,20 : 27,68
C93	88,81	15	63,44 : 25,37
C50J	72,43	20	51,74 : 20,69
A110	72,08	10	51,49 : 20,59

Tabulka 11: Složení vzorků řady 50 % V7.

Vzorky 50 % V7			
Obsah výztuže: 50 %, tužidlo: 287			
Výztuž	Hmotnost výztuže [g]	Počet vrstev výztuže	Pryskyřice : tužidlo [g]
S390	121,00	5	86,43 : 34,57
S163	135,69	13	96,92 : 38,77
C200	95,86	8	68,47 : 27,39
C93	89,08	15	63,63 : 25,45
C50J	72,17	20	51,55 : 20,62
A110	72,19	10	51,56 : 20,63

Tabulka 12: Složení vzorků řady 40 % V7.

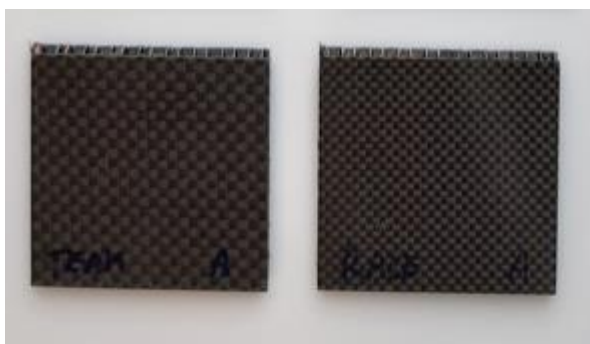
Vzorky 40 % V7			
Obsah výztuže: 40 %, tužidlo: 287			
Výztuž	Hmotnost výztuže [g]	Počet vrstev výztuže	Pryskyřice : tužidlo [g]
S390	121,94	5	130,65 : 52,26
S163	134,56	13	144,17 : 57,67
C200	96,64	8	103,54 : 41,42
C93	87,65	15	93,91 : 37,57
C50J	73,00	20	78,21 : 31,29
A110	72,07	10	77,22 : 30,89

Tabulka 13: Složení vzorků řady 60 % V7.

Vzorky 60 % V7			
Obsah výztuže: 60 %, tužidlo: 287			
Výztuž	Hmotnost výztuže [g]	Počet vrstev výztuže	Pryskyřice : tužidlo [g]
S390	124,10	5	59,10 : 23,64
S163	135,86	13	64,69 : 25,88
C200	97,56	8	46,46 : 18,58
C93	87,39	15	41,61 : 16,65
C50J	72,58	20	34,56 : 13,83
A110	69,21	10	32,96 : 13,18

2.2.3. Příprava vzorků lodí

Vzorky lodí (obrázek 36) byly vyrobeny ve firmě Roseman. Technologie výroby je popsána v kapitole 1.5. Jedná se o voštinové vzorky lodí, konkrétně imitaci složení obšivek skifů z řady RACE a TEAM. Ty se od sebe liší hmotností, protože řada lodí RACE je určena na závody a prioritou je co nejnižší hmotnost. V modelu TEAM je v obšivce použita uhlíková tkanina s gramáží 200 g/m², zatímco model RACE využívá kombinaci uhlíkové tkaniny o gramáží 93 g/m² s vrstvou uhlíkové jednosměrné tkaniny o gramáží 50 g/m². Výsledná gramáž těchto 2 vrstev je tedy 143 g/m². Vzorky byly nařezány ve společnosti SYNPO, a. s. Pardubice a byla u nich provedena pouze zkouška nasákavosti ve vodě. Hrany vzorků bylo nutno před zkouškou zatřít epoxidovou pryskyřicí plněnou skleněnými mikrobalonky, aby nedošlo k nasáknutí vody voštinou. Z technologických důvodů nebylo kvůli obsažené voštině možné u těchto vzorků provést další mechanické zkoušky. Struktura voštiny způsobovala nerovnoměrné rozložení působících sil v průběhu mechanických zkoušek a často docházelo k delaminaci vrstev kompozitu.



Obrázek 36: Voštinové vzorky lodí.

2.3. Metodika měření

2.3.1. Stanovení aminového čísla

Aminové číslo (č. a.) udává počet mg KOH ekvivalentním aminovým skupinám v 1 g vzorku. Je důležitou charakteristickou hodnotou při hodnocení látek obsahující aminové skupiny. Velký význam má pro zjištění čistoty polyaminů používaných jako tvrdidla EP. Jedná se o analytickou metodu, kdy je vzorek rozpuštěn v ledové kyselině octové a následně je tento roztok titrován 0,1M roztokem kyseliny chloristé v ledové kyselině octové na indikátor krystalová violet' do modrozeleného zbarvení. Stanovení bylo provedeno 2x pro každé tužidlo.

Výpočet byl proveden podle vzorce:

$$\check{c}. a. = \frac{(A-B) \cdot f \cdot 5,611 \cdot z}{n},$$

kde $\check{c}.a.$ – aminové číslo [mg KOH/1 g vzorku],

A – spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci [ml],

B – spotřeba 0,1 M HClO₄ na slepý pokus [ml],

f – faktor 0,1 M HClO₄,

z – zředovací faktor,

n – celková navážka vzorku [g].

2.3.2. Stanovení epoxidových skupin podle Jaye

Metoda využívá adice bromovodíku vzniklého in situ z kvartérní amoniové soli (hexadecyltrimethylamoniumbromid) a odměrného roztoku kyseliny chloristé. Vzorek pryskyřice je rozpuštěn v chloroformu, přidá se kvartérní amoniová sůl a vzorek je titrován odměrným roztokem do modrozeleného zbarvení. Použitým indikátorem je krystalová violet. Stanovení bylo provedeno 2x.

Výpočet byl proveden podle vzorce:

$$EE/kg = \frac{(A-B) \cdot f \cdot 0,1}{n},$$

kde EE/kg – epoxidový ekvivalent/kg,

A – spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci [ml],

B – spotřeba 0,1 M HClO₄ na slepý pokus [ml],

f – faktor 0,1 M HClO₄,

n – celková navážka vzorku [g].

2.3.3. Doba želatinace

Doba želatinace, někdy také nazývána doba zpracovatelnosti, udává čas potřebný ke zgelovatění systému. Je velmi důležitým parametrem epoxidového systému. Především proto, aby nedošlo ke zgelovatění již v průběhu laminace kompozitu. Tato doba je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou se zkracuje. Pro stanovení bylo do polypropylenového kelímku namícháno 50 g epoxidového systému. V pravidelných intervalech byl epoxidový systém zamíchán skleněnou tyčinkou a ode dna kelímku bylo vytaženo vlákno. Doba želatinace

odpovídá času, ve kterém dojde k lomu vytaženého vlákna. Zkouška probíhala za laboratorní teploty a byla provedena pro každý systém 1x.

2.3.4. Extrahovatelný podíl

Extrahovatelný podíl udává množství nečistot ve vytvrzeném epoxidovém systému, které zhoršují jeho výsledné vlastnosti. Na pilníku bylo připraveno zhruba 0,5 g pilin vytvrzeného epoxidového systému. Hmotnost pilin byla přesně zvážena na analytických vahách a v Erlenmayerově baňce byla rozpuštěna v 50 ml chloroformu. Pro urychlení rozpouštění byla směs třepána v třepačce po dobu 20 minut. Obsah baňky byl zfiltrován na předem vysušené a zvážené fritě S3 a poté byla fritu sušena při teplotě 105 °C po dobu 20 hodin. Měření bylo pro každý systém provedeno 2x.

Výpočet byl proveden podle vzorce:

$$E = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 ,$$

kde m_1 – hmotnost původně navážených pilin,
 m_2 – hmotnost pilin po extrakci.

2.3.5. DMA

Dynamická mechanická analýza je založena na principu mechanického namáhání vzorku definovanou silou (neboli napětím) a na měření deformační odezvy vzorku za různých podmínek s měnící se teplotou. Vyhodnocením získaných průběhů napětí a deformace dostaneme závislost modulu pružnosti a ztrátového úhlu na teplotě a dále i na čase, frekvenci působící síly a velikosti deformace. Stanovené průběhy slouží k určení charakteristických vlastností materiálu, kterým je teplota skelného přechodu, stupeň krystalizace, bod gelace, míra orientace, ztráty v materiálu (jeho tlumící schopnosti) a měření tečení metodou creepu. Měření bylo prováděno na přístroji DMA DX04T firmy R.M.I. Stanovení teplot T_1 a T_2 blízkých teplotě T_g bylo provedeno z grafické závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti na teplotě. Teplota T_1 byla odečtena jako tangenta ze závislosti reálné složky modulu pružnosti, teplota T_2 jako maximum ze závislosti imaginární složky modulu pružnosti. Byly měřeny vzorky o rozměrech 30 x 5 x 2 mm.

Podmínky měření:

Uspořádání: jednoduchý vetknutý nosník, konstantní deformace $\pm 0,15$ mm

Frekvence: 1 kHz

Teplotní režim: z laboratorní teploty do teploty 150 °C, rychlost ohřevu 3 °C/ min.

2.3.6. TMA

Termomechanická analýza je metoda založená na měření změn výšky vzorku v závislosti na čase, teplotě a vložené síle. Touto metodou stanovujeme teplotu skelného přechodu T_g , koeficient tepelné roztažnosti α v daném teplotním intervalu nebo jeho závislost na teplotě a body měknutí a tání analyzovaných materiálů. Zkouška byla provedena na přístroji TMA CX04R firmy R.M.I. Byly měřeny vzorky o rozměrech 5 x 5 x 2 mm.

Podmínky měření:

Síla: 50 mN

Krok 1: 150 °C, 3 °C/min

Krok 2: 25 °C, 3 °C/min

Krok 3: 150 °C, 3 °C/min

Krok 4: 25 °C, 3 °C/min

Teplota skelného přechodu byla odečtena z 2. chlazení (krok 4).

2.3.7. Stanovení obsahu popela

Principem zkoušky je stanovení obsahu nespalitelných složek. Zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 3451-1 a je určena pro stanovení obsahu skleněných vláken v kompozitu. Do předem vyžíhaného a zváženého porcelánového kelímku byl na analytických vahách navážen cca 1 g vzorku. Kelímek se vzorkem byl vložen do pece a spalování probíhalo při teplotě 600 °C po dobu 1 hodiny. Poté byl kelímek s popelem umístěn do exsikátoru a po vychladnutí zvážen. Každý vzorek byl měřen 2x. Obsah popela byl spočítán podle vzorce:

$$\% = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100,$$

kde m_1 – hmotnost suché navážky zkušební vzorku [g],

m_2 – hmotnost popela [g].

2.3.8. Stanovení obsahu výztuže

Pro stanovení reálného obsahu výztuže v kompozitu byl použit výpočet založený na základě znalosti hmotnosti výztuže, která je neměnná a hmotnosti vzorku kompozitu. Výpočet byl proveden podle vzorce:

$$\% = \frac{m_r}{m_c} \cdot 100,$$

kde m_r – hmotnost výztuže v kompozitu [g],

m_c – hmotnost kompozitu [g].

Výpočet byl proveden pro všechny typy výztuží a byl pro kontrolu porovnán s výsledky zkoušek stanovení obsahu popela v kompozitech se skleněnými vlákny.

2.3.9. Zkouška v tahu

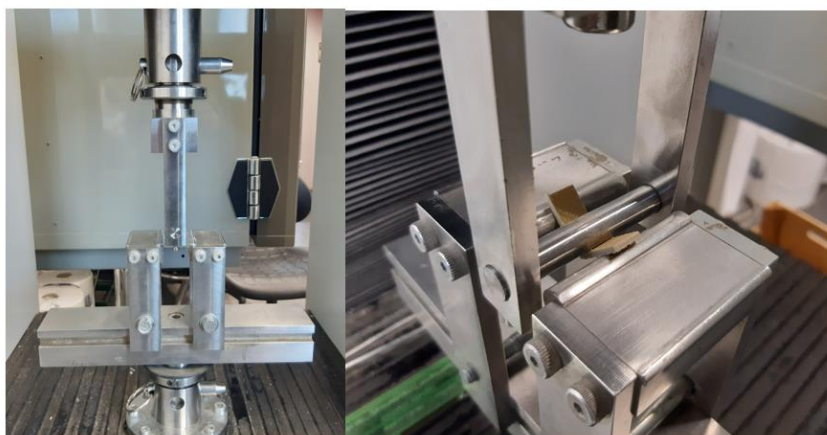
Zkouška v tahu spočívá v namáhání zkušebního tělesa tahem při stanovené rychlosti deformace. Měření bylo provedeno na trhacím stroji INSTRON 1122 5500R a bylo inspirováno normou ASTM D1708. Vzorky ve tvaru „psí kosti“ o rozměrech 50 x 5 x 2 ± 0,5 mm byly upevněny v čelistech trhacího stroje (obrázek 37). Upínací délka byla 30 mm a rychlost posunu 5 mm/ min. Každý vzorek byl měřen 10x. Byla stanovena maximální síla [N], mez pevnosti v tahu [MPa] a tažnost [%]. U vzorků matric byl stanoven i modul pružnosti v tahu [MPa].



Obrázek 37: Vzorek ve tvaru "psí kosti" upevněný v čelistech trhacího stroje.

2.3.10. Zkouška v ohybu

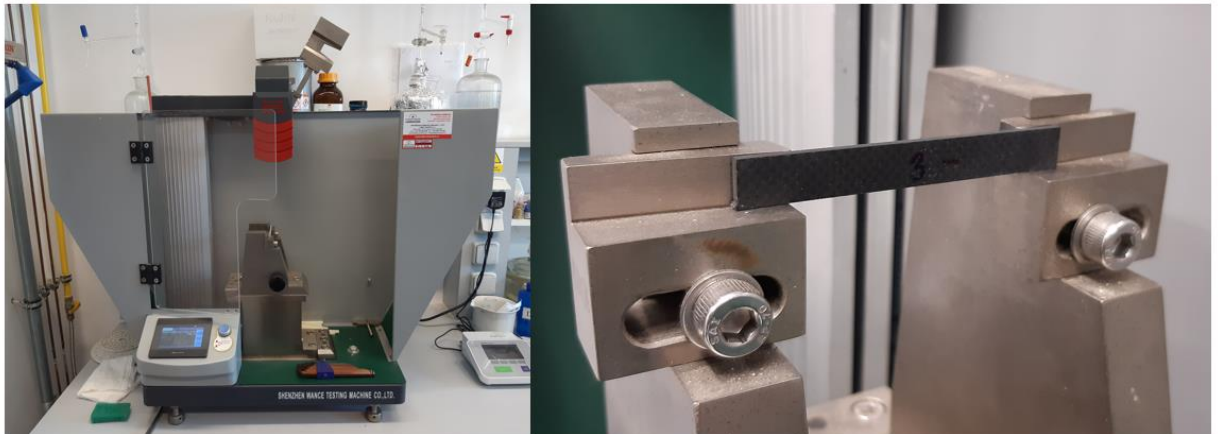
Podstata zkoušky v ohybu spočívá v zatěžování zkušební tělesa volně položeného na podpěrách. Měření bylo provedeno na trhacím stroji MTS-4/M jako tříbodový ohyb (obrázek 38). Měření pevnosti v ohybu bylo uskutečněno dle normy ČSN EN ISO 178. Vzorky byly o rozměrech $40 \times 10 \times 2 \pm 0,5$ mm. Vzdálenost podpěr byla 32 mm a rychlost posunu příčnicku 1 mm/min. Každý vzorek byl měřen 10x. Byla stanovena maximální síla [N], mez pevnosti v ohybu [MPa] a průhyb při maximu [%].



Obrázek 38: Tříbodový ohyb na trhacím stroji.

2.3.11. Rázová houževnatost metodou Charpy

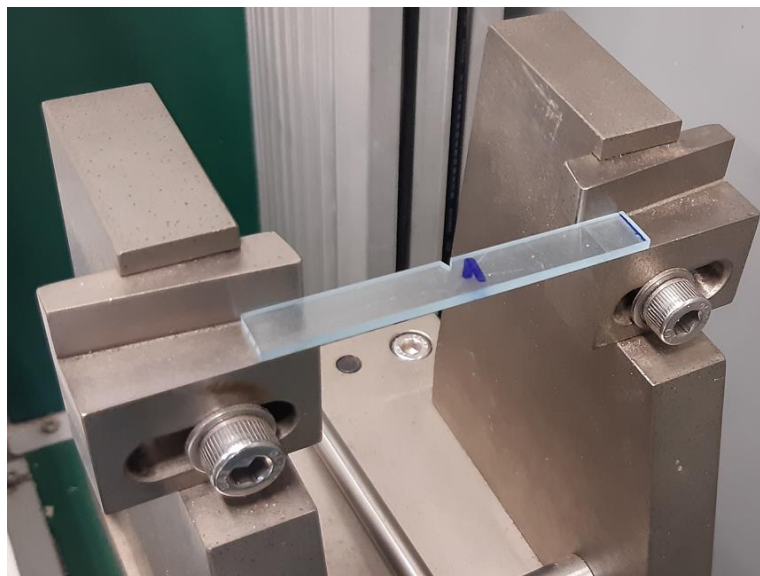
Podstatou měření rázové houževnatosti metodou Charpy (obrázek 39) je rozdíl mezi nulovým kyvem kladiva a kyvem při nárazu na zkušební těleso, kdy dochází k měření rázové práce potřebné k porušení zkušební tělesa. Vztažením této hodnoty práce na plochu dostaneme hodnotu rázové houževnatosti materiálu. Zkouška byla provedena na přístroji PIT 501J podle normy ČSN EN ISO 179. Vzorek o rozměrech $80 \times 10 \times 2 \pm 0,5$ mm byl volně umístěn na podpěry, širší stranou kolmo na směr rázu. Vzdálenost podpěr byla 62 mm. Rázová houževnatost metodou Charpy byla měřena u kompozitních vzorků a každý vzorek byl měřen 10x.



Obrázek 39: Rázová houževnatost metodou Charpy.

2.3.12. Vrubová houževnatost

Zkouška vrubové houževnatosti se provádí u pružných vzorků. Princip a postup zkoušky je stejný jako u rázové houževnatosti metodou Charpy. Rozdílem je však to, že je vzorek opatřen vrubem a na podpěrách je položen širší stranou. Vrub směřuje na opačnou stranu, než dopadá kladivo. Zkušební vzorek s vrubem a jeho uložení jsou znázorněny na obrázku 40. Zkouška byla provedena na přístroji PIT 501J podle normy ČSN EN ISO 179. Vzorek o rozměrech $80 \times 10 \times 2 \pm 0,5$ mm byl opatřen vrubem typu „A“. Vzdálenost podpěr byla 62 mm. Vrubová houževnatost byla měřena u vzorků matric a každý vzorek byl měřen 5x.



Obrázek 40: Vrubová houževnatost.

2.3.13. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška byla provedena na univerzálním tvrdoměru Nemesis 9000 – Innovatest (obrázek 41). Jedná se o statickou zkoušku tvrdosti materiálu popsanou v normě ČSN EN ISO 6507-1. Principem metody je vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem 136° určitou silou do materiálu. Vzorky matric byly měřeny 5x pod zatížením 20 kgf a kompozitní vzorky 10x pod zatížením 50 kgf.



Obrázek 41: Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest.

2.3.14. Nasákavost ve vodě

Zkouškou nasákavosti získáme údaj o množství vody pohlcené tělesem. Zkouška byla prováděna po dobu cca 3 měsíců, konkrétně 84 dní za laboratorní teploty. Vzorky byly při teplotě 40°C vysušeny do konstantní hmotnosti, zváženy a poté ponořeny do vody (obrázek 42) odebrané z Labe. Říční voda byla zvolena z důvodu povahy vzorků, jelikož se jedná o materiály používané ve veslařských lodích. Vzorky byly v průběhu pokusu váženy, a to ve dnech 1, 3, 7, 14, 28, 56 a 84. Po skončení pokusu nasákavosti byla u vzorků změřena tvrdost. Vzorky byly při teplotě 40°C vysušeny do konstantní hmotnosti a poté byla opět změřena tvrdost. Pro zkoušku nasákavosti byly použity vzorky o rozměrech $50 \times 50 \times 2 \pm 0,5$ mm a od každého materiálu byly testovány 2 vzorky. Obsah vody ve vzorku byl spočítán podle vzorce:

$$\% = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \cdot 100,$$

kde m_1 – hmotnost suchého vzorku [g],

m_2 – hmotnost vzorku po vyndání z vody [g].



Obrázek 42: Zkouška nasákavosti ve vodě.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1. Vzorky matric

3.1.1. Charakteristika komponent

Charakteristika komponent matrice, tedy použité epoxidové pryskyřice a obou tužidel, byla velmi důležitá pro ověření jejich jakosti. Obě látky byly testovány titračními metodami. U epoxidové pryskyřice bylo provedeno stanovení obsahu epoxidových skupin podle Jaye a u tužidel byla stanovena jejich aminová čísla. Stanovené hodnoty a jejich porovnání s údaji z technických listů jsou v tabulce 14.

Tabulka 14: Charakteristika epoxidové pryskyřice L 285 a tužidel 285, 287.

	Stanovená hodnota:	Údaj z technického listu:
Epoxidová pryskyřice	Epoxidové číslo [EE/100 g]	Epoxidové číslo [EE/100 g]
L 285	0,59	0,59–0,65
Tužidlo	Aminové číslo [mg KOH/g]	Aminové číslo [mg KOH/g]
285	490	480–550
287	453	450–500

Epoxidové číslo epoxidové pryskyřice i aminová čísla tužidel odpovídala rozsahu hodnot uvedených v technických listech.

3.1.2. Doba želatinace

Doba želatinace udává čas, během kterého je možné s laminačním systémem pracovat, aniž by došlo ke gelovatění systému. Tento čas je ovlivněn okolními podmínkami, jako je především teplota, ale třeba i vlhkost. Rostoucí teplota a vlhkost zkracují dobu želatinace. To je důležitá informace pro zpracovatele, se kterou musí počítat. Jedná se však o subjektivní stanovení, které navíc může být ovlivněno i počtem míchání a tažení vlákna v průběhu experimentu. Je proto potřeba brát výsledek pouze orientačně.

Doba želatinace epoxidového systému s tužidlem 285 byla při laboratorní teplotě stanovena na 55 minut. Technický list udává při této teplotě dobu 60 minut. Epoxidový systém s tužidlem 287 se však od údaje uvedeného v technickém listu lišil. Čas stanovený experimentálně byl 510 minut (8,5 hodiny), zatímco technický list při dané teplotě udával čas v rozmezí 300–360 minut (5–6 hodin). Tento rozdíl mohl být způsoben právě subjektivním hodnocením, ale třeba také nižší vzdušnou vlhkostí v laboratoři.

3.1.3. Extrahovatelný podíl

U vytvrzených vzorků matric byl stanoven extrahovatelný podíl. Hodnota udává množství nevytvrzených zbytků a nečistot v % ve vytvrzeném systému a je ukazatelem kvality vytvrzené sítě. Čím je vytvrzená síť kvalitnější, tím je hodnota extrahovatelného podílu nižší. Hodnota extrahovatelného podílu roste spolu se stárnutím komponent systému. Je ovlivněna především degradací aminových tužidel. Stanovené hodnoty jsou v tabulce 15.

Tabulka 15: Hodnoty extrahovatelného podílu vzorků matric.

Vzorek	Extrahovatelný podíl [%]
E + 285	2,99
E + 287	0,88

Z výsledných hodnot je patrné, že epoxidový systém s tužidlem 287 je velmi kvalitní, neboť jeho obsah nečistot je nižší než 1 %. Systém s tužidlem 285 má hodnotu extrahovatelného podílu o něco vyšší – téměř 3 %. To může poukazovat na to, že tužidlo 285 mohlo být starší a mohla proběhnout jeho částečná degradace. K tomuto úsudku se navíc přiklání i fakt, že použité látky pocházely přímo od výrobce lodí, kde dochází k velké spotřebě, a tudíž i obratu, tužidla 287, zatímco tužidlo 285 je používáno pouze omezeně. Je tedy objednáno v delších intervalech a následně je i skladováno déle. Nicméně aminové číslo odpovídá technickému listu.

3.1.4. DMA

Dynamickou termomechanickou analýzou byly u vzorků matric stanoveny charakteristické teploty T_1 a T_2 blízké teplotě T_g . Teploty byly odečteny z grafické závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti. Teplota T_1 byla odečtena jako tangenta ze závislosti reálné složky modulu pružnosti, teplota T_2 jako maximum ze závislosti imaginární složky modulu pružnosti. Odečtené teploty pro oba epoxidové systémy jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16: Charakteristické teploty vzorků matric.

Vzorek	T_1 [°C]	T_2 [°C]
E + 285	76,52	87,00
E + 287	85,08	93,00

Charakteristické teploty epoxidového systému s tužidlem 285 jsou nižší, než je tomu u systému s tužidlem 287.

3.1.5. TMA

Pomocí termomechanické analýzy byly stanoveny teploty T_g obou vzorků matric. Stanovené teploty jsou uvedeny v tabulce 17. Teplota T_g je jednou z nejdůležitějších charakteristik materiálu. Jedná se o teplotu, při které přechází polymer z tuhého sklovitého stavu do stavu kaučukovitého a stává se ohebným díky vzájemným pohybům řetězců makromolekul. Teplota T_g by se v ideálním případě měla pohybovat v intervalu charakteristických teplot T_1 a T_2 stanovených metodou DMA.

Tabulka 17: Teploty T_g vzorků matric.

Vzorek	T_g [°C]
E + 285	78,5
E + 287	88,6

Stanovené teploty T_g obou epoxidových systémů odpovídaly intervalům charakteristických teplot T_1 a T_2 stanovených metodou DMA. T_g systému s tužidlem 285 byla téměř o 10 °C nižší než T_g systému s tužidlem 287.

3.1.6. Zkouška v tahu

U vzorků matric byla provedena zkouška v tahu za účelem stanovení modulu pružnosti v tahu [MPa], maximální síly [N], meze pevnosti v tahu [MPa] a tažnosti [%]. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 18.

Tabulka 18: Zkouška pevnosti v tahu vzorků matric.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
E + 285	809,53 ± 40,32	62,45 ± 3,27	3,17 ± 0,10	2602,76 ± 109,31
E + 287	745,54 ± 49,74	59,22 ± 4,46	3,67 ± 0,14	2240,48 ± 208,21

Z naměřených hodnot lze vidět, že epoxidový systém s tužidlem 285 vykazoval v porovnání se systémem obsahujícím tužidlo 287 nepatrně vyšší maximální sílu, mez pevnosti v tahu i modul pružnosti. Jeho tažnost byla naopak o něco nižší. Ovšem rozdíly mezi systémy jsou velmi malé a v rámci chyby měření by se dalo říct, že jsou srovnatelné.

3.1.7. Vrubová houževnatost

Dále byla u vzorků matric měřena vrubová houževnatost, jejíž výsledky jsou zaznamenány v tabulce 19.

Tabulka 19: Vrubová houževnatost vzorků matric.

Vzorek	Práce potřebná k přeražení tělesa [J]	Vrubová houževnatost [kJ/m ²]
E + 285	0,10 ± 0,01	5,59 ± 0,51
E + 287	0,08 ± 0,01	5,21 ± 0,43

Stejně jako u zkoušky v tahu, s ohledem na chybu měření, lze výsledky vrubové houževnatosti v tahu u obou epoxidových systémů považovat za srovnatelné.

3.1.8. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Poslední fyzikálně – mechanickou zkouškou vzorků matric byla zkouška tvrdosti podle Vickerse s použitým zatížením 20 kgf. Výsledky měření jsou v tabulce 20.

Tabulka 20: Zkouška tvrdosti podle Vickerse u vzorků matric.

Vzorek	Tvrdost dle Vickerse [HV 20]
E + 285	19,87 ± 0,28
E + 287	17,97 ± 0,22

Z naměřených hodnot tvrdosti podle Vickerse vyplývá, že epoxidový systém s tužidlem 285 dosahuje o něco vyšších hodnot, než epoxidový systém s tužidlem 287. Rozdíl není nijak výrazný, ale již není v rámci chyby měření.

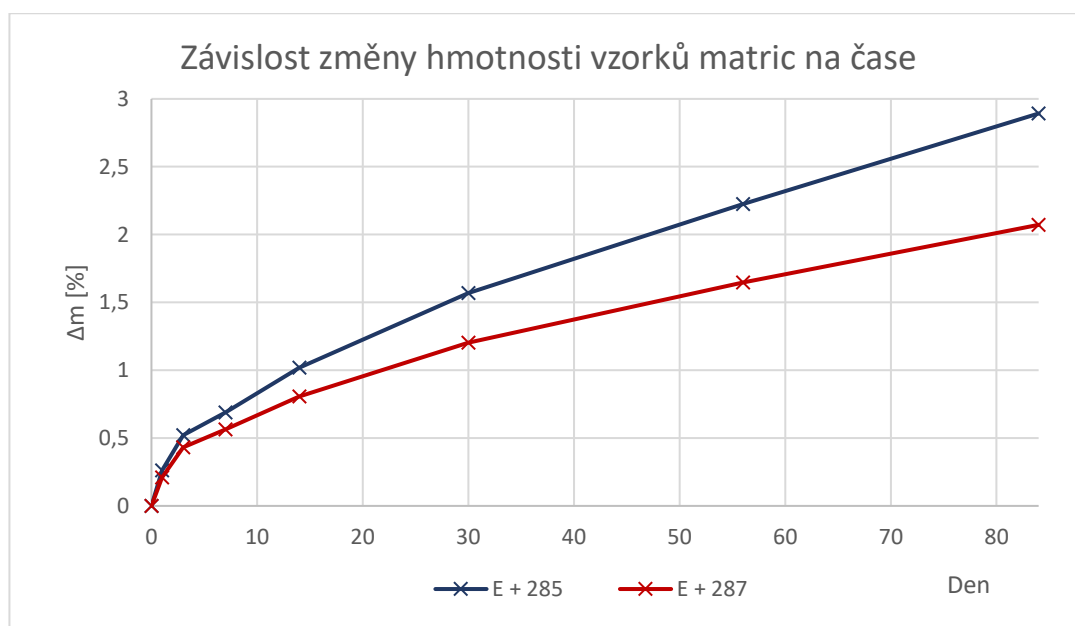
3.1.9. Nasákavost ve vodě

Jelikož se jedná o materiály používané pro výrobu veslařských lodí, byla provedena zkouška nasákavosti ve vodě. Byla sledována závislost nárůstu hmotnosti v čase (graf 1). První vážení vzorků bylo provedeno po jejich vysušení do konstantní hmotnosti a poté byly ponořeny do vody. Další vážení proběhla po 1, 3, 7, 14, 28, 56 a 84 dnech. Po ukončení zkoušky nasákavosti ve vodě, tedy po cca 3 měsících, byla u vzorků provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Následně byly vzorky vysušeny při 40 °C do konstantní hmotnosti, zváženy a opět byla změřena tvrdost podle Vickerse. Kromě závislosti nasákavosti materiálů vodou v čase

byl tedy sledován i vliv dlouhodobého působení vody na tvrdost materiálů a následná zkouška reverzibility tohoto děje s ohledem na výslednou hmotnost a tvrdost po opětovném vysušení vzorků do konstantní hmotnosti. Hodnoty nárůstu hmotnosti vzorku v čase v průběhu zkoušky nasákavosti vodou jsou v tabulce 21. Změny tvrdosti vzorků matric způsobené vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě jsou uvedeny v tabulce 22.

Tabulka 21: Zkouška nasákavosti vzorků matric ve vodě.

Den/ vzorek	Δm [%]	
	E + 285	E + 287
0	0	0
1	0,26	0,21
3	0,52	0,43
7	0,69	0,56
14	1,02	0,81
28	1,57	1,20
56	2,22	1,65
84	2,89	2,07
po vysušení	1,33	0,84



Graf 1: Zkouška nasákavosti vzorků matric ve vodě.

Z naměřených hodnot lze vidět, že epoxidový systém s tužidlem 285 sákl vodu rychleji, než systém s tužidlem 287. Po 84 dnech obsahoval vzorek E + 285 téměř 3 % vody, zatímco vzorek E + 287 ve stejné době obsahoval pouze okolo 2 % vody. Po vysušení do konstantní hmotnosti se ani jeden ze vzorků nedostal zpět na svou původní hmotnost. Vzorek E + 285

byl o 1,33 % těžší a vzorek E + 287 o 0,84 %, což znamená, že nereverzibilní změna hmotnosti tvořila necelou polovinu celkové změny hmotnosti.

Tabulka 22: Změna tvrdosti vzorků matric vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě.

Vzorek	Tvrdost dle Vickerse [HV 20]	Tvrdost dle Vickerse po nasákavosti [HV 20]	Tvrdost dle Vickerse po vysušení [HV 20]
E + 285	19,87 ± 0,28	15,83 ± 0,04	17,54 ± 0,24
E + 287	17,97 ± 0,22	16,55 ± 0,13	17,22 ± 0,04

Z naměřených hodnot je patrné, že vlivem dlouhodobého působení vody došlo k poklesu tvrdosti u obou vzorků. K výraznějšímu poklesu došlo u vzorku E + 285 a zároveň po vysušení vzorku do konstantní hmotnosti došlo k částečnému navrácení původní tvrdosti – téměř z 50 %. Vyšší pokles tvrdosti vzorku souvisel s jeho vyšší nasákavostí vody, která byla pravděpodobně způsobena o něco horší kvalitou vytvrzené polymerní sítě. Pokles tvrdosti vzorku E + 287 nebyl tak výrazný. Po vysušení vzorku do konstantní hmotnosti opět došlo k částečnému navrácení původní tvrdosti, a to dokonce v podobné míře jako u vzorku E + 285.

3.2. Vzorky kompozitů

3.2.1. Stanovení obsahu popela

Stanovením obsahu popela získáváme informaci o podílu nespalitelných složek v kompozitu. U kompozitů vyztužených skleněnými vlákny je tato hodnota rovna podílu výztuže. Znalost obsahu výztuže v kompozitu slouží pro ověření kvality přípravy vzorků. Uhlíková a kevlarová vlákna však bohužel touto metodou stanovit nelze, protože dochází k jejich částečnému či úplnému spálení. Obsah výztuže u kompozitních vzorků se skleněnou výztuží stanovený spalnou zkouškou je uveden v tabulce 23.

Tabulka 23: Stanovení obsahu popela.

Vzorek		Obsah výztuže [%]
S390	50 % V5	65,1
	50 % V7	65,3
	40 % V7	61,5
	60 % V7	68,7
S163	50 % V5	59,0
	50 % V7	59,6
	40 % V7	54,5
	60 % V7	63,0

Ze stanovených hodnot je vidět, že obsah výztuže u všech vzorků byl oproti plánu vyšší. Tato problematika bude blíže rozebrána v podkapitole 3.2.2. zabývající se stanovením obsahu výztuže u všech druhů kompozitů. Tato spalná zkouška sloužila pouze pro ověření přesnosti výpočtové metody použité pro stanovení obsahu výztuže.

3.2.2. Stanovení obsahu výztuže

Jak již bylo zmíněno, stanovení obsahu výztuže v kompozitu slouží pro ověření kvality připraveného kompozitu. Jelikož stanovení obsahu popela je zkouška vhodná pouze pro skleněnou výztuž, tak všechny obsahy výztuže byly vypočteny. Výpočet byl založen na známé hmotnosti vzorku a znalosti hmotnosti výztuže, která zůstává neměnná. Vypočtené hodnoty obsahu výztuže vzorků jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24: Vypočtené hodnoty obsahu výztuže u kompozitních vzorků.

Vzorek		Obsah výztuže [%]
S390	50 % V5	66,8
	50 % V7	64,1
	40 % V7	59,8
	60 % V7	69,5
S163	50 % V5	59,0
	50 % V7	61,0
	40 % V7	53,1
	60 % V7	64,1
C200	50 % V5	59,5
	50 % V7	58,5
	40 % V7	52,2
	60 % V7	64,6

C93	50 % V5	56,5
	50 % V7	56,4
	40 % V7	51,0
	60 % V7	61,6
C50J	50 % V5	51,7
	50 % V7	52,4
	40 % V7	41,1
	60 % V7	58,1
A110	50 % V5	54,4
	50 % V7	54,7
	40 % V7	49,7
	60 % V7	59,6

Porovnáním vypočtených hodnot obsahu výztuže s hodnotami získanými spalnou zkouškou je možné říci, že výpočet byl dostatečně přesný a vypočtené hodnoty lze považovat za směrodatné.

Ze získaných hodnot obsahu výztuže v kompozitních vzorkách je na první pohled patrné, že se neshodují s teoretickými hodnotami – všechny hodnoty jsou vyšší. Tento problém byl způsoben použitou technologií, konkrétně aplikací vakua. Při standardních výrobcích kompozitních dílů touto technologií je používána odsávací rohož. Kompozit je prosycen a po aplikaci vakua, kdy dojde ke stlačení prosycených vrstev výztuže, je přebytečná pryskyřice odsáta právě touto rohoží. Znamená to tedy, že ve výztuži zůstane přesně potřebné množství pryskyřice. Ideální množství pryskyřice se liší podle typu výztuže. Není tedy například dosaženo stejného obsahu skleněné a uhlíkové výztuže v kompozitech, ale je zajištěna reprodukovatelnost stejného obsahu výztuže u jednoho konkrétního typu, protože při dané hodnotě podtlaku v konkrétní výztuži zůstane vždy stejné množství pryskyřice. Navíc značnou výhodou této technologie je dosažení nejnižší možné hmotnosti kompozitu.

V této diplomové práci byla záměrně odsávací rohož vynechána, jelikož cílem bylo vyrobit koncentrační řadu kompozitních vzorků s obsahem 40, 50 a 60 % výztuže a zkoumat právě vliv obsahu výztuže na jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti. Kompozitní vzorek byl připraven ruční laminací s daným poměrem výztuže a pojiva. Po aplikaci vakua a stlačení vrstev došlo k odtoku přebytečné pryskyřice z kompozitní desky do okolního prostoru, což ve výsledku způsobilo vyšší obsah výztuže, než jakého mělo být dosaženo. Jelikož množství pryskyřice a výztuže bylo počítáno jako hmotnostní podíly, k největším odchylkám došlo

u nejtěžších výztuží. Sklo v porovnání s uhlíkem nebo kevlarem je daleko těžší, a proto k laminaci bylo použito větší množství pojiva vedoucí k velkým přetokům pryskyřice.

Největší odchylku obsahu výztuže od teoretické hodnoty měly vzorky s výztuží S390, kdy bylo dosaženo koncentrační řady přibližně 60, 65 a 70 %. Prostřední vzorek obsahoval absolutně o 15 % výztuže více a rozdíl mezi krajními vzorky byl pouze 10 %. Koncentrační řady vzorků s výztužemi S163 a C200 měly podobné hodnoty pohybující se okolo 52, 60 a 65 % s rozdílem mezi krajními vzorky okolo cca 13 %. Vzorky s výztužemi C93 a A110 dosahovaly koncentrační řady 50, 55 a 60 % s celkovým rozdílem 10 %. Vzorek s výztuží C50J se blížil ideálu. Vyrobena koncentrační řada odpovídala 40, 50 a 60 % a bylo tedy dosaženo celkového 20% rozdílu v obsahu výztuže mezi krajními vzorky. Tato výztuž byla velmi lehká, a proto bylo pro laminaci vzorků použito velmi malé množství pryskyřice. Prosycování bylo velmi náročné, ale po vyvakuování nedošlo k odtoku žádného množství pryskyřice. Ačkoli realita neodpovídala teorii, bylo zajímavé vidět chování jednotlivých druhů výztuží jak z hlediska procesu prosycování, tak i množství potřebné pryskyřice přijaté materiálem. Nevýhodou však je znesnadněné porovnávání fyzikálně – mechanických vlastností napříč koncentračními řadami vzorků, kdy bude potřeba brát ohled na reálné hodnoty obsahu výztuže. Kladnou zprávou je, že všechny dvojice hodnot prostředních vzorků koncentračních řad jednotlivých druhů výztuží vycházejí velmi podobně, což je dobrá zpětná kontrola kvality vyrobených vzorků.

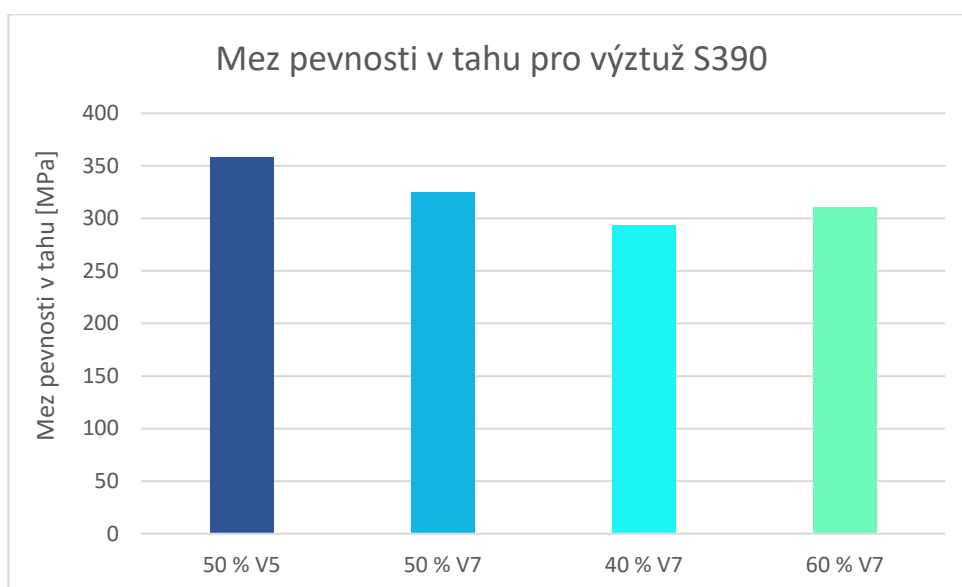
3.2.3. Zkouška v tahu

U vzorků kompozitů byla provedena zkouška v tahu za účelem stanovení maximální síly [N], meze pevnosti v tahu [MPa] a tažnosti [%]. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 25–30. Maximální síla u vzorků kompozitů nemá příliš vypovídající hodnotu, protože vlivem koncentrační řady byla tloušťka vzorků celkem dost variabilní v intervalu od 1,5 mm do 2,5 mm. Proto je daleko přesnějším parametrem mez pevnosti, kdy je síla vztažena na plochu vzorku. Přesto však v naměřených hodnotách maximální síly nebyly výrazné rozdíly. Porovnání mezí pevnosti koncentračních řad jednotlivých typů výztuží jsou v grafech 2–7. Souhrnné porovnání mezí pevnosti a tažností všech typů výztuží mezi sebou je znázorněno v grafech 8 a 9.

Tabulka 25: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků S390.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	
S390	50 % V5	2825,98 ± 114,57	358,03 ± 12,63	12,70 ± 1,01
	50 % V7	2604,55 ± 149,64	324,65 ± 19,72	13,58 ± 1,07
	40 % V7	3013,24 ± 113,53	294,00 ± 18,85	13,79 ± 1,10
	60 % V7	2618,56 ± 122,26	310,35 ± 11,78	10,98 ± 0,79

Hodnoty tažnosti vycházejí velmi podobně a pohybují se okolo hodnoty 13 %. Nižších hodnot dosahuje pouze vzorek s nejvyšším podílem výztuže, což odpovídá teoretickým předpokladům.



Graf 2: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže S390.

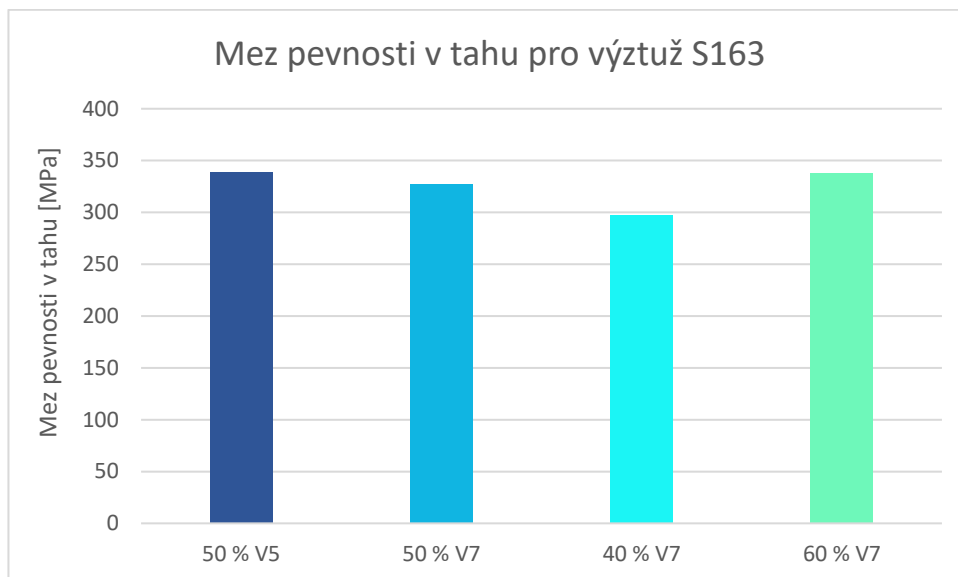
Z grafu 2 vyplývá, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosahuje vzorek 50 % V5, jehož hodnota je 358,03 MPa. Hodnoty ostatních vzorků se po přihlédnutí k chybě měření pohybují okolo 300 MPa.

Tabulka 26: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků S163.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	
S163	50 % V5	3756,37 ± 170,17	338,86 ± 13,03	14,79 ± 0,33
	50 % V7	3319,22 ± 168,23	327,75 ± 16,48	9,85 ± 0,75
	40 % V7	3870,14 ± 229,06	297,21 ± 18,46	12,05 ± 1,04
	60 % V7	3346,96 ± 192,09	337,88 ± 20,72	9,97 ± 0,54

Vzorek 50 % V5 v porovnání se vzorkem 50 % V7 dosahuje o něco vyšší hodnoty tažnosti. U vzorku 50 % V7 došlo k výraznému poklesu tažnosti oproti teoretickému

předpokladu, podle kterého by měl vzorek dosahovat podobné hodnoty jako vzorek 50 % V5. Zhoršená tažnost mohla být způsobena méně kvalitním provedením přípravy vzorku ruční laminací. Vzorek 60 % V7 dosahuje opět dle předpokladu nižších hodnot.



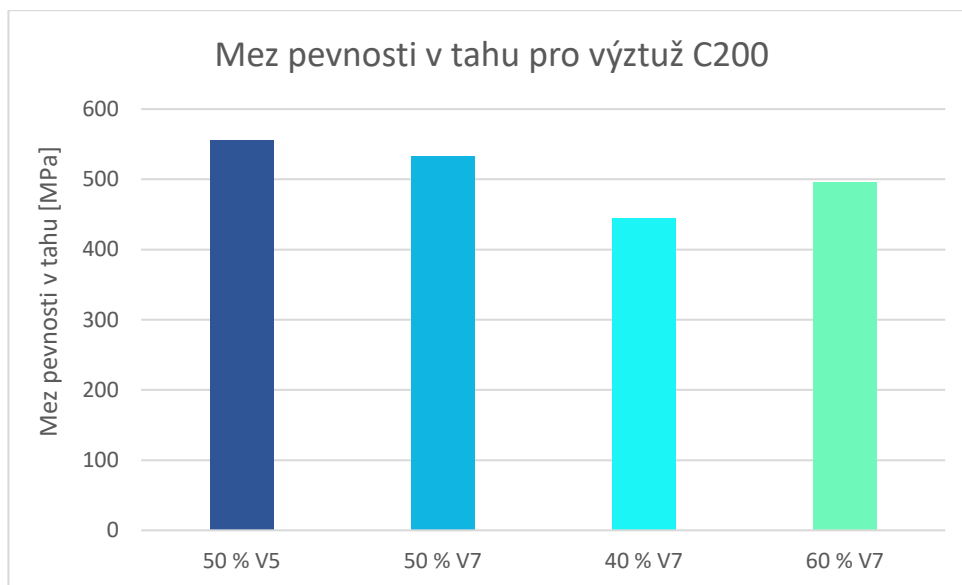
Graf 3: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže S163.

Z grafu 3 vyplývá, že vzorky 50 % V5, 50 % V7 a 60 % V7 dosahují podobných hodnot v rozmezí přibližně 330–340 MPa. Nižší meze pevnosti v tahu dosahuje vzorek s nejnižším obsahem výztuže (40 % V7), jehož hodnota je necelých 300 MPa.

Tabulka 27: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C200.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	
C200	50 % V5	4973,66 ± 163,96	556,18 ± 19,04	14,19 ± 1,85
	50 % V7	4603,66 ± 295,75	532,55 ± 30,04	13,37 ± 1,06
	40 % V7	5043,12 ± 237,62	445,28 ± 24,73	11,62 ± 1,04
	60 % V7	4541,06 ± 295,79	496,23 ± 39,50	12,77 ± 0,98

Hodnoty tažností koncentrační řady vzorků C200 vycházejí po přihlédnutí k chybě měření vcelku podobně. Pohybují se v průměru kolem 13 %. Vzorek 40 % V7 dosahuje o něco nižší hodnoty.



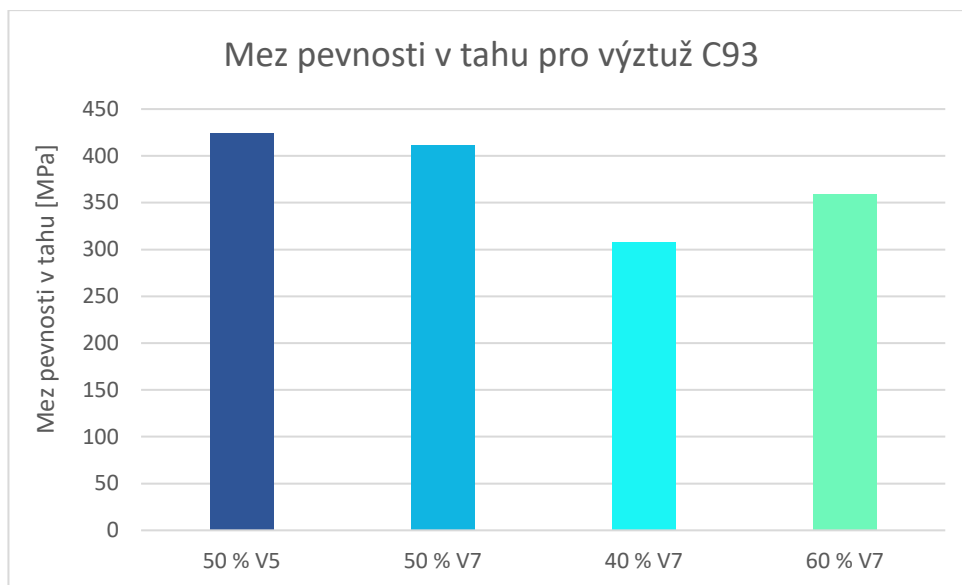
Graf 4: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže C200.

Z grafu 4 vyplývá, že vzorky ze středu koncentrační řady (50 % V5 a 50 % V7) dosahují podobných hodnot přesahujících 500 MPa. Nižší meze pevnosti v tahu dosahuje vzorek 60 % V7 a nejnižší hodnotu má opět vzorek 40 % V7.

Tabulka 28: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C93.

	Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
C93	50 % V5	3509,88 ± 233,53	424,24 ± 23,45	9,86 ± 1,12
	50 % V7	3565,87 ± 153,43	411,51 ± 35,48	11,78 ± 0,71
	40 % V7	3271,63 ± 255,26	308,22 ± 25,00	8,63 ± 1,15
	60 % V7	3153,78 ± 162,00	359,36 ± 19,19	5,25 ± 0,68

Tažnost vzorků koncentrační řady C93 je v porovnání s tažností vzorků koncentrační řady C200 celkově nižší. Nejvyšší hodnoty dosahuje vzorek 50 % V7. Hodnota tažnosti vzorku 50 % V5 je o něco nižší. Pravděpodobně to bylo opět způsobené o něco horší kvalitou připraveného vzorku. Došlo k poklesu tažnosti u obou vzorků z krajů koncentrační řady. V případě vzorku 60 % V7 došlo k významnému snížení jeho tažnosti v porovnání se vzorkem 50 % V7, a to přibližně o polovinu.



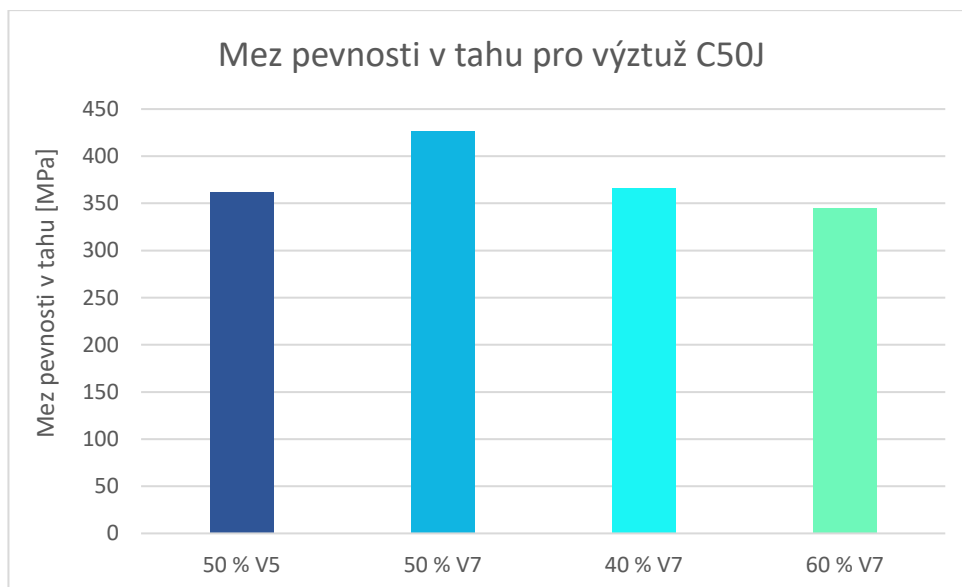
Graf 5: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže C93.

Graf 5 ukazuje, že vzorky vyztužené uhlíkovou tkaninou C93 vykazují analogické chování ke vzorkům vyztuženým uhlíkovou tkaninou C200 – nejvyšší meze pevnosti dosahují vzorky ze středu koncentrační řady, nejnižší s nejmenším podílem výztuže. V porovnání s nimi však dosahují nižších absolutních hodnot, přibližně o 100 MPa nižších.

Tabulka 29: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků C50J.

	Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
C50J	50 % V5	3536,39 ± 338,39	361,83 ± 24,29	10,26 ± 2,02
	50 % V7	3483,81 ± 213,12	427,18 ± 30,10	10,90 ± 0,50
	40 % V7	4157,00 ± 124,51	366,59 ± 14,24	11,21 ± 0,75
	60 % V7	3200,88 ± 116,85	345,19 ± 13,52	7,32 ± 0,99

Výsledná hodnota tažnosti vzorku 50 % V5 je poněkud překvapivá, protože tento vzorek dosahuje stejné hodnoty jako vzorek 50 % V7, a to i přes to, že kvalita připraveného vzorku byla neuspokojivá. Špatná kvalita prosycení vzorku 50 % V5 se projevila na většině fyzikálně – mechanických vlastnostech, na tažnost však vliv neměla. Nejlepší tažnosti dosahuje vzorek 40 % V7. Dle teoretického předpokladu nejhorší hodnoty tažnosti dosahuje opět vzorek s nejvyšším obsahem výztuže.



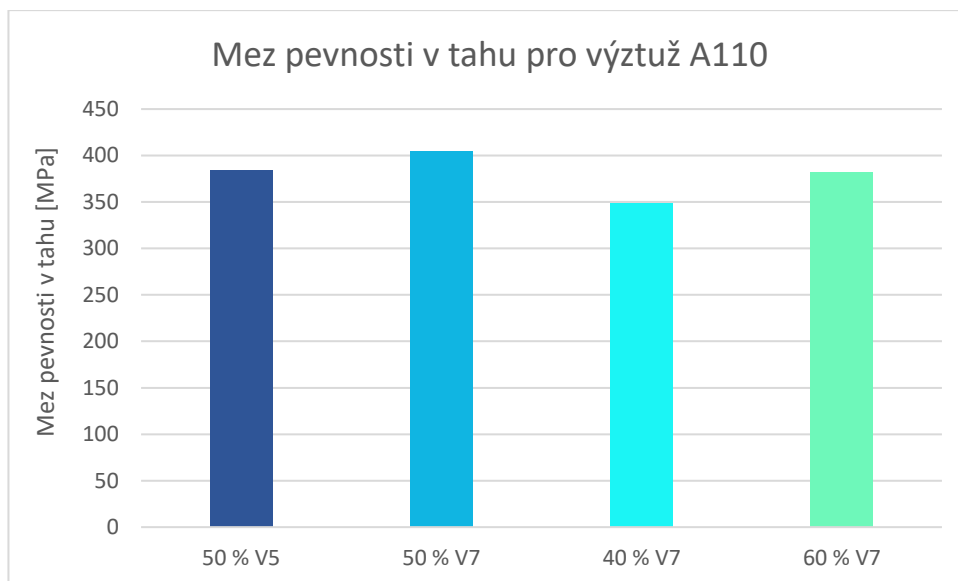
Graf 6: Porovnání mezí pevnosti v tahu výztuže C50J.

Z grafu 6 vyplývá, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosahuje vzorek 50 % V7, a to 427,18 MPa. Vzorek 50 % V5 byl pravděpodobně ovlivněn nekvalitním provedením ruční laminace, jelikož práce s jednosměrnou tkaninou byla velmi specifická a tento vzorek byl vyroben jako první. Vzorek 40 % V7 přesahuje hodnotami meze pevnosti vzorku 60 % V7. Tento výsledek byl očekávaný, protože vzorek obsahující 60 % výztuže již nebylo možné malým množstvím pryskyřice kvalitně prosytit. To vedlo k poklesu jeho mechanických vlastností.

Tabulka 30: Výsledky tahové zkoušky řady vzorků A110.

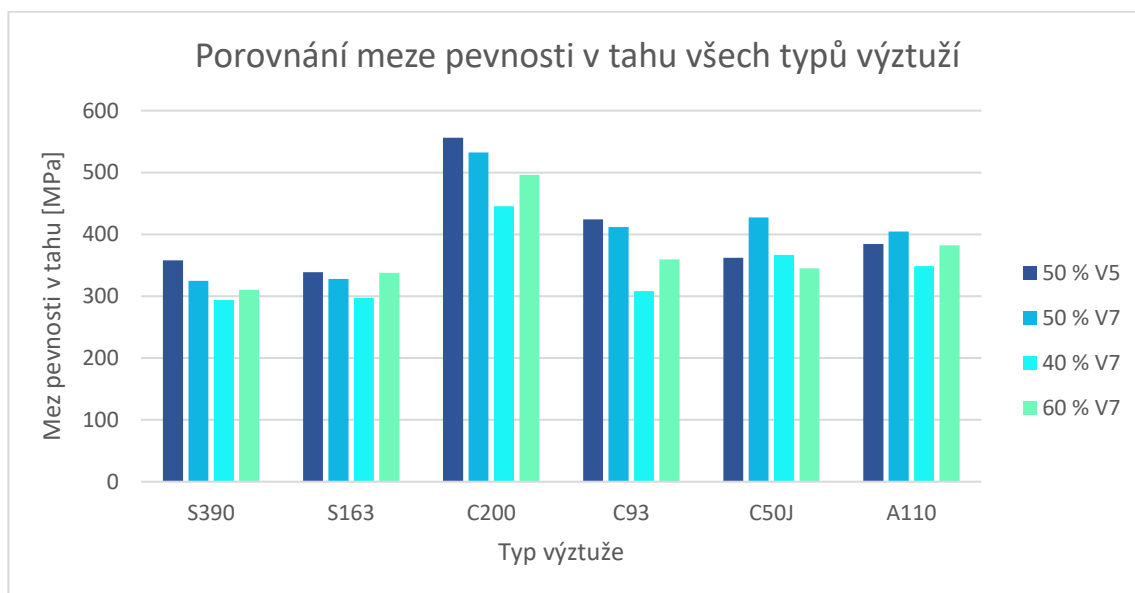
Vzorek		Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
A110	50 % V5	3163,58 ± 160,30	384,38 ± 23,07	8,83 ± 0,60
	50 % V7	3362,05 ± 198,53	404,50 ± 20,65	12,60 ± 0,77
	40 % V7	3203,66 ± 217,70	348,71 ± 24,44	9,15 ± 1,08
	60 % V7	3230,59 ± 225,12	382,30 ± 24,98	10,35 ± 1,17

U koncentrační řady vzorků je opět možné pozorovat vliv kvality provedení přípravy vzorku na výslednou tažnost, kdy došlo k poklesu tažnosti u vzorku 50 % V5. Nejvyšší hodnoty dosahuje vzorek 50 % V7. Vzorky z obou krajů koncentrační řady dosahují po přihlédnutí k chybě měření podobných hodnot. V Porovnání se vzorkem 50 % V7 je jejich hodnota nižší o více než 2 %.



Graf 7: Porovnání mezi pevnosti v tahu výztuže A110.

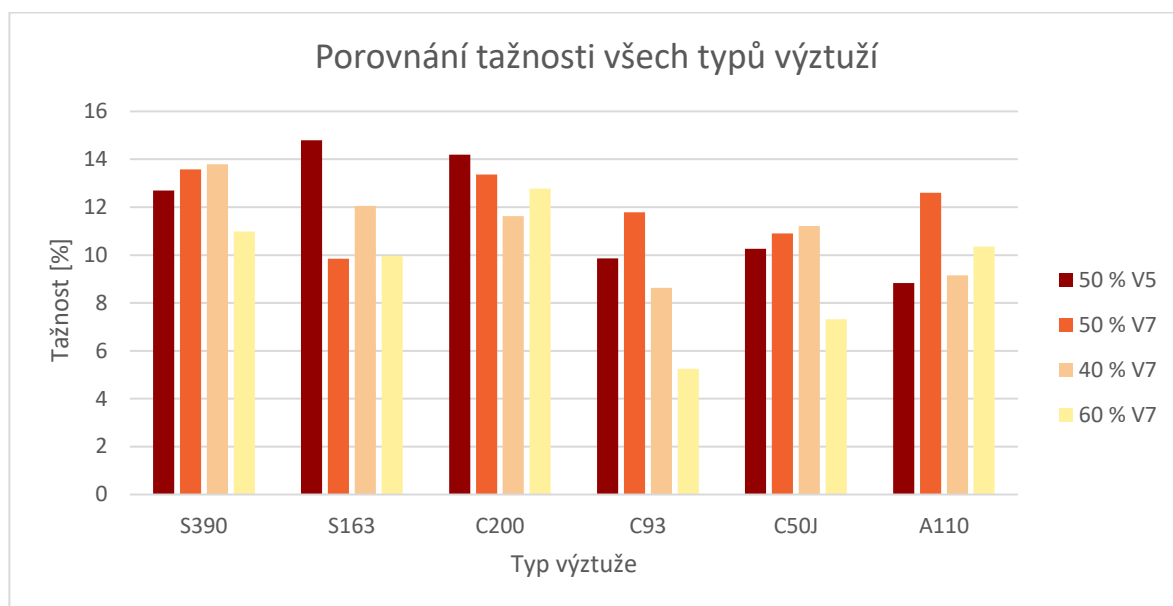
Z grafu 7 vyplývá, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosahuje vzorek 50 % V7. Je však nutné podotknout, že po přihlédnutí k chybě měření velmi podobných hodnot dosahují i vzorky 50 % V5 a 60 % V7 (okolo 400 MPa). Nejnižší hodnotu má vzorek obsahující nejméně výztuže, rozdíl oproti ostatním vzorkům však není nijak výrazný.



Graf 8: Souhrnné porovnání mezi pevností v tahu.

Graf 8 umožňuje porovnání jednotlivých typů použitých tkanin mezi sebou. Základním rysem koncentračních řad je, že nejvyšších hodnot meze pevnosti dosahují prostřední vzorky těchto řad a nejnižší hodnoty mají vzorky s nejmenším podílem výztuže. Toto pravidlo porušují

pouze vzorky z řady C50J vyztužené jednosměrnou uhlíkovou tkaninou, kde je mez pevnosti vzorku 60 % V7 již limitována kvalitou prosycení, a proto vzorek na druhé straně koncentrační řady, i přes o 20 % nižší obsah výztuže, dosahuje lepších vlastností. Z hlediska výztuží dosahuje nejlepších hodnot uhlíková výztuž C200. Uhlíkové tkaniny C93, C50J a kevlarová tkanina A110 dosahují srovnatelných hodnot. O něco nižších hodnot mezí pevnosti v tahu dosahují skleněné tkaniny S390 a S163.



Graf 9: Souhrnné porovnání tažností.

Graf 9 obsahuje souhrnné porovnání tažností jednotlivých typů výztuží mezi sebou. V obecné rovině by se dalo říci, že vyšších hodnot tažnosti po zprůměrování dosahují vzorky s výztužemi S390, S163 a C200, a to hodnot pohybuje se kolem 12 %. U těchto výztuží je také možno říci, že vliv koncentračních řad u daného typu výztuže po přihlédnutí k chybě měření není nijak zvlášť výrazný. Vzorky s výztužemi C93, C50J a A110 dosahují obecně v průměru nižších hodnot tažnosti – v rozmezí 9–10 %. U vzorků s výztužemi C93 a C50J dochází k velmi výraznému poklesu tažnosti u vzorků s nejvyšším podílem výztuže. Tento efekt je možno vysvětlit nedostatečným prosycením výztuže. Oba typy tkanin jsou velmi lehké a bylo tak použito malé množství pryskyřice, ještě k tomu navíc na velký počet vrstev výztuže (15 a 20). U vzorků s výztuží A110 není pozorován pokles hodnoty tažnosti u vzorku s nejvyšším podílem výztuže, a to i přes to, že se jedná také o tkaninu s nízkou hmotností a při laminaci bylo použito stejně malé množství pryskyřice, jako tomu bylo u vzorku C50J. Vysvětlení by mohla být dvě následující: počet vrstev byl pouze poloviční (10) v porovnání

se vzorkem C50J, což mohlo vést ke kvalitnějšímu prosycení a navíc se jedná o úplně jiný druh materiálu, který může mít stupeň ideálního prosycení jinde, než uhlík.

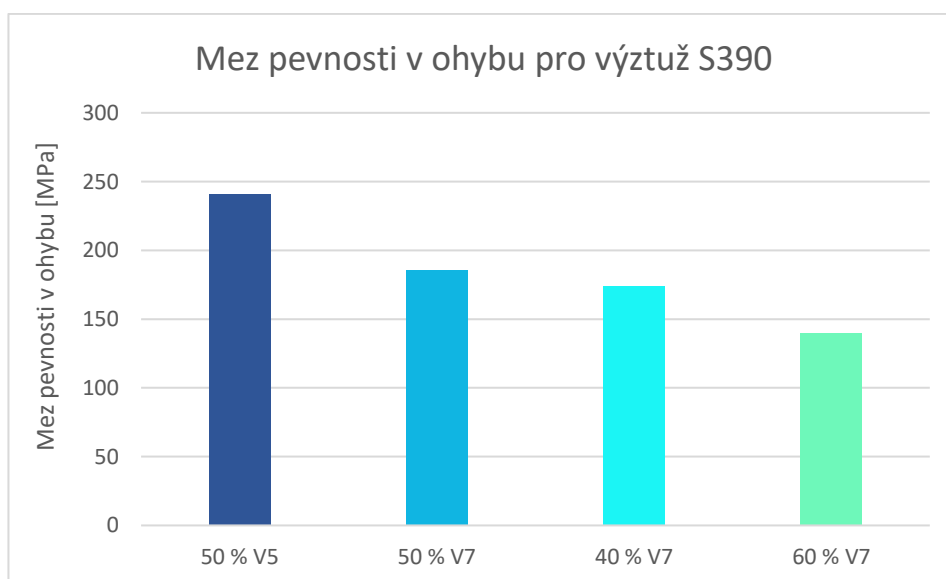
3.2.4. Zkouška v ohybu

U vzorků kompozitů byla dále provedena zkouška v ohybu za účelem stanovení maximální síly [N], meze pevnosti v ohybu [MPa] a průhybu při maximu [%]. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 31–36. Maximální síla nemá, ze stejných důvodů jako tomu bylo u zkoušky v tahu, příliš vypovídající hodnotu, a proto je sledována mez pevnosti v ohybu. Porovnání mezí pevnosti koncentračních řad jednotlivých typů výztuží jsou v grafech 10–15. Souhrnné porovnání mezí pevnosti a průhybů při maximu všech typů výztuží mezi sebou jsou znázorněny v grafech 16 a 17.

Tabulka 31: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků S390.

Vzorek		Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]
S390	50 % V5	149,9 ± 16,3	241,23 ± 18,34	2,49 ± 0,34
	50 % V7	111,7 ± 5,4	185,94 ± 8,63	2,31 ± 0,27
	40 % V7	136,4 ± 3,3	173,82 ± 6,88	2,50 ± 0,30
	60 % V7	85,9 ± 2,8	139,55 ± 5,05	1,94 ± 0,16

Hodnoty průhybu při maximu u vzorků 50 % V5, 50 % V7 a 40 % V7 vycházejí velmi podobně okolo 2,5 %. Nižší hodnoty průhybu dosahuje pouze vzorek 60 % V7.



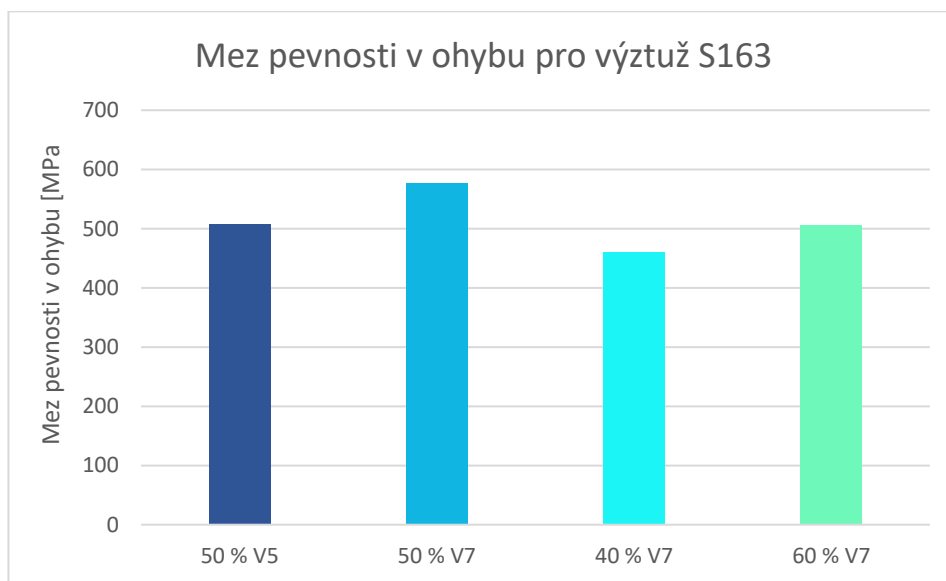
Graf 10: Porovnání mezí pevnosti v ohybu výztuže S390.

Z grafu 10 vyplývá, že výrazně nejvyšší hodnoty meze pevnosti v ohybu dosahuje vzorek 50 % V5 s hodnotou 241,23 MPa. Nejnížší hodnoty dosahuje vzorek 60 % V7 s hodnotou 139,55 MPa. Rozdíl mezi nimi je tedy přes 100 MPa. Vzorek 50 % V7 vykazuje o něco málo vyšší hodnotu meze pevnosti než vzorek 40 % V7.

Tabulka 32: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků S163.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]	
S163	50 % V5	518,7 ± 30,9	508,05 ± 16,90	2,85 ± 0,24
	50 % V7	542,3 ± 20,3	576,35 ± 22,34	3,14 ± 0,13
	40 % V7	622,5 ± 38,1	460,35 ± 18,56	3,05 ± 0,3
	60 % V7	413,6 ± 22,8	505,32 ± 17,11	2,66 ± 0,24

Vzorky 50 % V7 a 40 % V7 dosahují podobných hodnot mírně přesahujících 3 %. Vzorky 50 % V5 a 60 % V7 dosahují hodnot průhybu při maximu o něco nižších. V rámci chyby měření však všechny vzorky vycházejí velmi podobně.



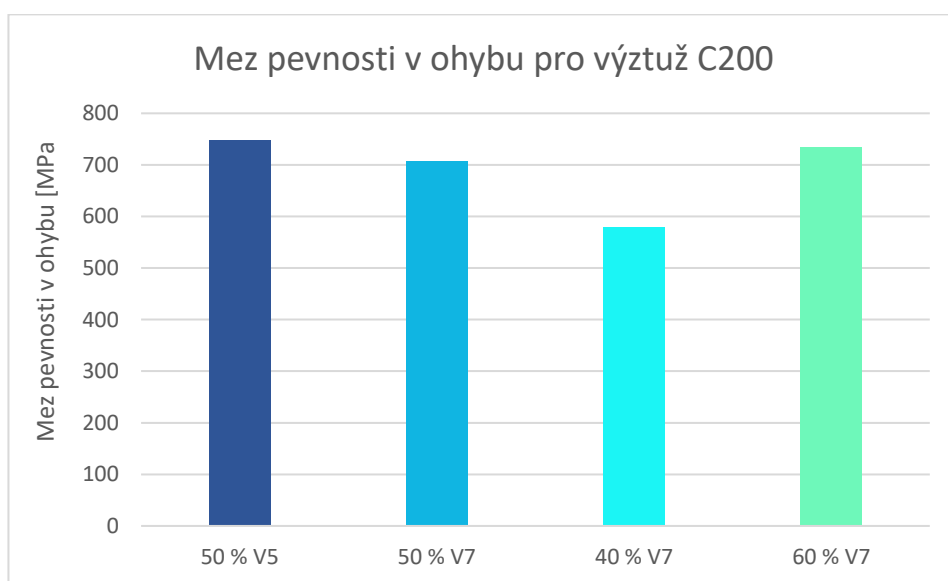
Graf 11: Porovnání mezí pevnosti v ohybu výztuže S163.

Z grafu 11 vyplývá, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti v ohybu dosahuje vzorek 50 % V7 s hodnotou 576,35 MPa. Nejnížší hodnoty dosahuje vzorek 40 % V7 s hodnotou 460,35 MPa. Vzorky 50 % V5 a 60 % V7 dosahují hodnot podobných.

Tabulka 33: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C200.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]	
C200	50 % V5	557,6 ± 17,9	748,29 ± 24,01	1,68 ± 0,10
	50 % V7	521,7 ± 32,3	705,91 ± 49,66	1,64 ± 0,15
	40 % V7	578,1 ± 45,9	578,76 ± 41,87	1,79 ± 0,18
	60 % V7	475,0 ± 23,0	734,64 ± 40,89	1,61 ± 0,12

Hodnoty průhybu při maximu koncentrační řady vzorků s výztuží C200 vycházejí velmi podobně, okolo hodnoty 1,7 %. Mírně vyšší hodnoty dosahuje vzorek 40 % V7, nicméně rozdíl je malý a v rámci chyby měření.



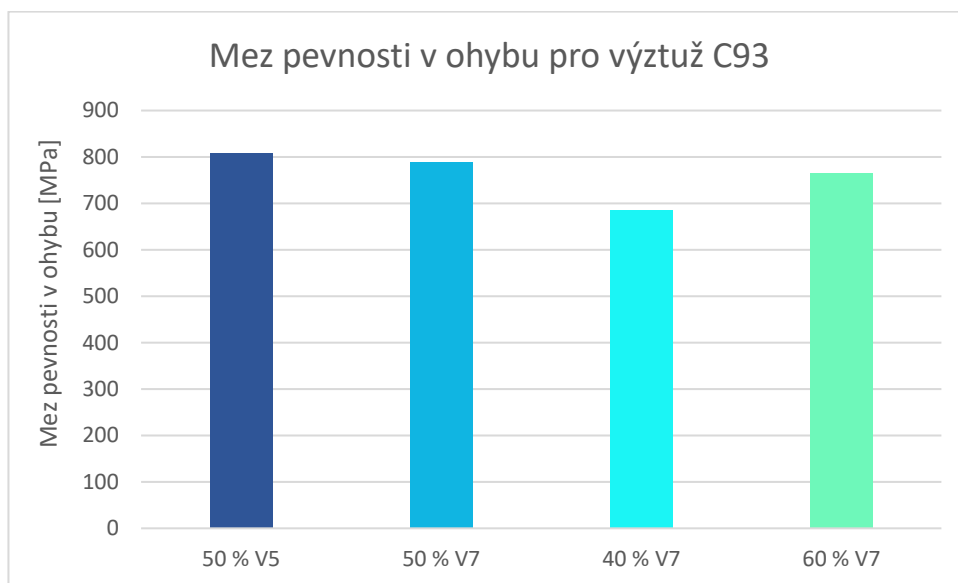
Graf 12: Porovnání mezí pevnosti v ohybu výztuže C200.

Z grafu 12 vyplývá, že vzorky 50 % V5, 50 % V7 a 60 % V7 vycházejí v rámci chyby měření podobně. Jejich hodnota přesahuje 700 MPa. Výrazně nižší hodnoty dosahuje vzorek 40 % V7.

Tabulka 34: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C93.

Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]	
C93	50 % V5	537,5 ± 18,0	807,78 ± 38,35	1,57 ± 0,05
	50 % V7	563,7 ± 21,7	788,66 ± 27,79	1,64 ± 0,04
	40 % V7	588,5 ± 38,4	684,83 ± 33,95	1,60 ± 0,09
	60 % V7	436,8 ± 23,7	766,15 ± 39,51	1,67 ± 0,06

Hodnoty průhybu při maximu koncentrační řady vzorků s výztuží C93 vycházejí opět velmi podobně, okolo hodnoty 1,6 %. Odchytky mezi vzorky jsou v rámci chyby měření.



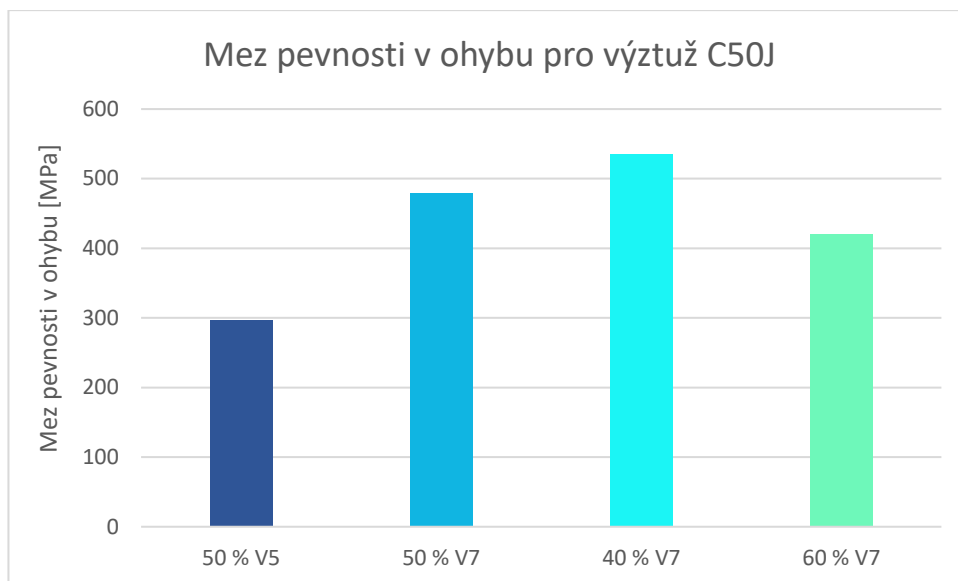
Graf 13: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže C93.

Z grafu 13 vyplývá, že vzorky 50 % V5, 50 % V7 a 60 % V7 vycházejí opět v rámci chyby měření podobně. Jejich hodnota se pohybuje okolo hranice 800 MPa. Vzorek 40 % V7 dosahuje nižší hodnoty.

Tabulka 35: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků C50J.

Vzorek		Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]
C50J	50 % V5	270,0 ± 12,2	296,82 ± 17,36	2,19 ± 0,22
	50 % V7	274,2 ± 31,4	478,61 ± 30,87	1,50 ± 0,14
	40 % V7	567,1 ± 53,0	534,79 ± 22,79	2,15 ± 0,16
	60 % V7	247,4 ± 21,4	420,90 ± 27,48	1,68 ± 0,07

Nejvyšších hodnot průhybu při maximu dosahují vzorky 50 % V5 a 40 % V7. Oba přesahují 2 %. To je vcelku zajímavé, protože vzorek 50 % V5 je považován za nejméně kvalitní z hlediska prosycenosti a kvality přípravy a naopak vzorek 40 % V7 za nejkvalitnější. Vzorky 50 % V7 a 60 % V7 dosahují hodnot nižších.



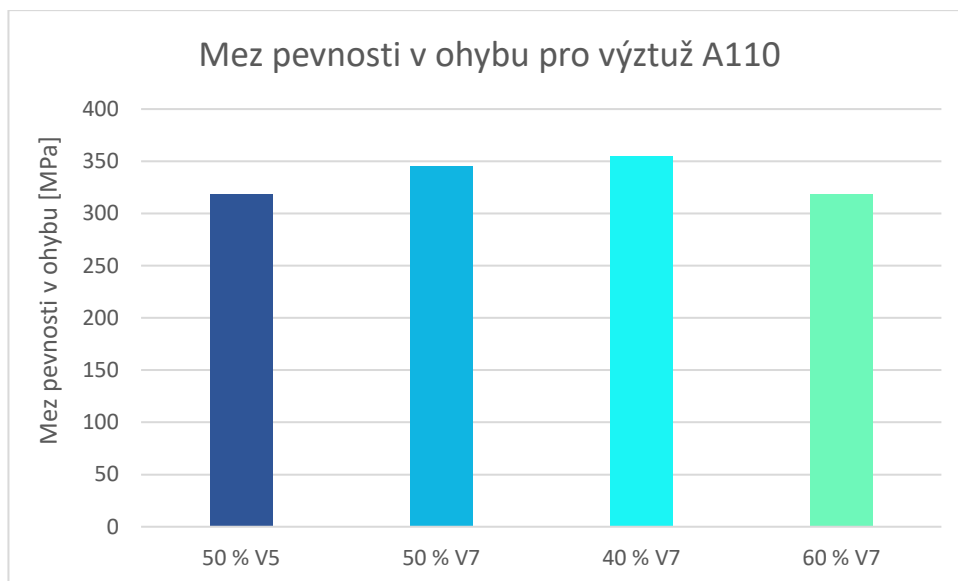
Graf 14: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže C50J.

Z grafu 14 vyplývá, že nejlepší hodnoty v koncentrační řadě vzorků s výztuží C50J, stejně jako u meze pevnosti v tahu, dosahuje vzorek 40 % V7 (534,79 MPa). Stejně tak nejhůře vychází vzorek 50 % V5 (296,82 MPa). Naměřené hodnoty potvrzují kvalitu a prosycenost připravených kompozitních desek.

Tabulka 36: Výsledky ohybové zkoušky řady vzorků A110.

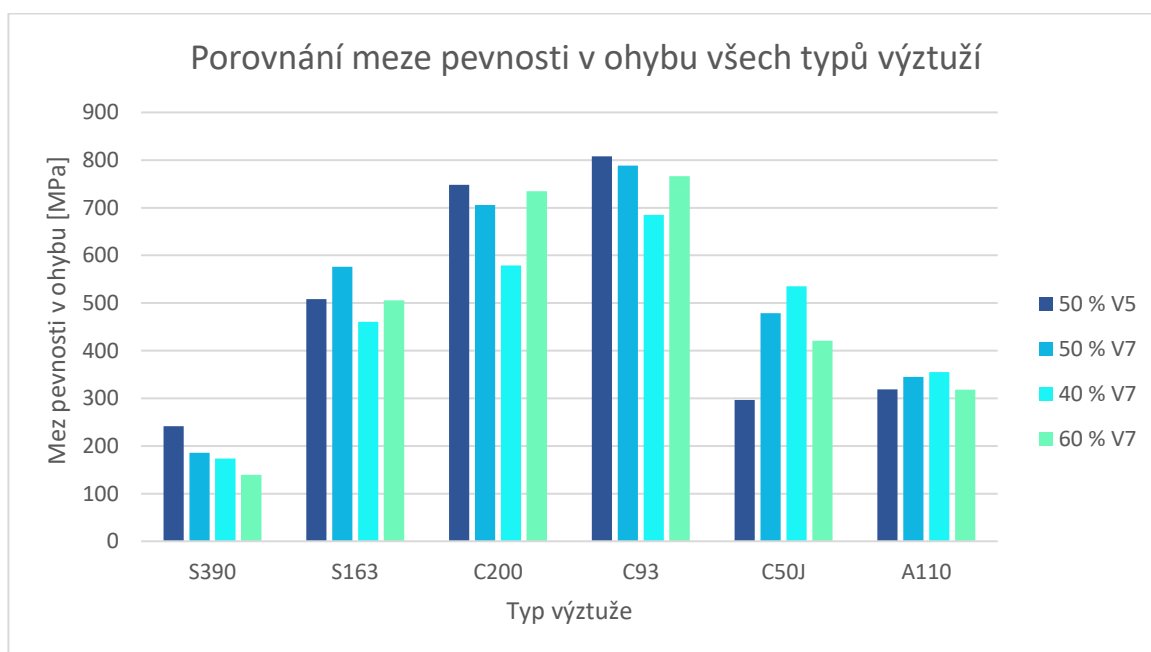
Vzorek	Síla max. [N]	Mez pevnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]	
A110	50 % V5	205,7 ± 7,2	318,50 ± 10,38	4,07 ± 0,43
	50 % V7	211,6 ± 22,9	344,82 ± 26,97	5,00 ± 0,55
	40 % V7	259,6 ± 7,4	354,85 ± 12,01	4,26 ± 0,37
	60 % V7	171,2 ± 7,8	318,19 ± 15,14	4,33 ± 0,36

Hodnoty průhybu při maximu koncentrační řady s výztuží A110 vykazují jednoznačně nejvyšší hodnoty ze všech zkoumaných typů výztuží. Vycházejí nad hranicí 4 % a nejvyšší hodnoty dosahuje vzorek 50 % V7, a to 5 %.



Graf 15: Porovnání mezi pevnosti v ohybu výztuže A110.

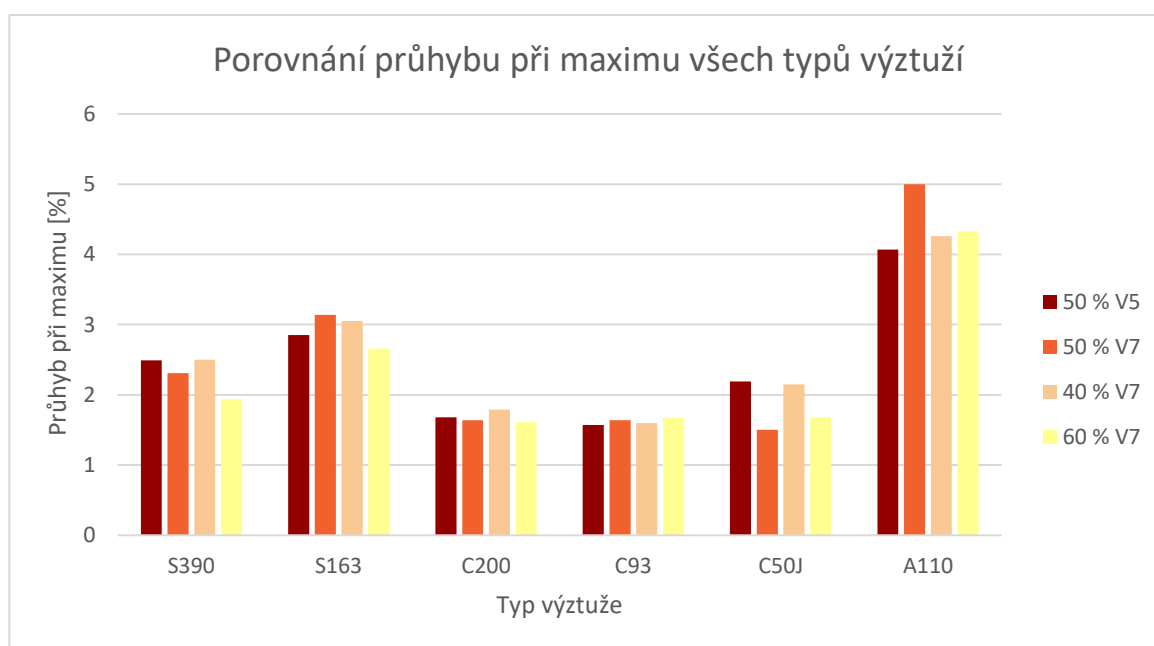
Z grafu 15 vyplývá, že vzorky 50 % V7 a 40 % V7 vycházejí podobně. Hodnota jejich mezí pevnosti v ohybu se pohybuje okolo 350 MPa. Vzorky 50 % V5 a 60 % V7 dosahují hodnot o něco nižších.



Graf 16: Souhrnné porovnání mezi pevností v ohybu.

Graf 16 umožňuje porovnání jednotlivých typů použitých tkanin mezi sebou. Žádný jednotný rys koncentračních řad není pozorován. Pouze u koncentračních řad vzorků s výztužemi S163, C200 a C93 je viditelný pokles v hodnotách mezí pevnosti

u vzorků s nejmenším obsahem výztuže. Ostatní hodnoty těchto koncentračních řad vycházejí s přihlédnutím k chybám měření celkem srovnatelně. U vzorků vyztužených tkaninou S390 vykazuje zhoršené vlastnosti naopak vzorek s nejvyšším obsahem výztuže. Řada vzorků C50J potvrzuje nejhorší mechanické vlastnosti u vzorku 50 % V5 a nejlepší u 40 % V7. U vzorků A110 není pozorován žádný výrazný vliv koncentrační řady na výsledné hodnoty meze pevnosti v ohybu. Z hlediska typu výztuže nejlepších hodnot (přes 700 MPa) dosahují vzorky vyztužené uhlíkovými tkaninami C200 a C93. Nižších hodnot dosahují vzorky se skleněnou výztuží S163 (okolo 500 MPa), s uhlíkovou výztuží C50J (okolo 450 MPa) a s kevlarovou výztuží A110 (přes 300 MPa). Výrazný propad v hodnotách meze pevnosti v ohybu však nastává u vzorků se skleněnou výztuží S390, kdy se průměrná hodnota pohybuje okolo hranice 150 MPa. V porovnání se vzorky se skleněnou výztuží S163 tak nedosahují ani jejich třetinové hodnoty. Tento značný rozdíl by mohl být ovlivněn velkým rozdílem v počtu vrstev obou výztuží. Výztuže S390 bylo použito pouze 5 vrstev, zatímco výztuže S163 13.



Graf 17: Souhrnné porovnání průhybů při maximu.

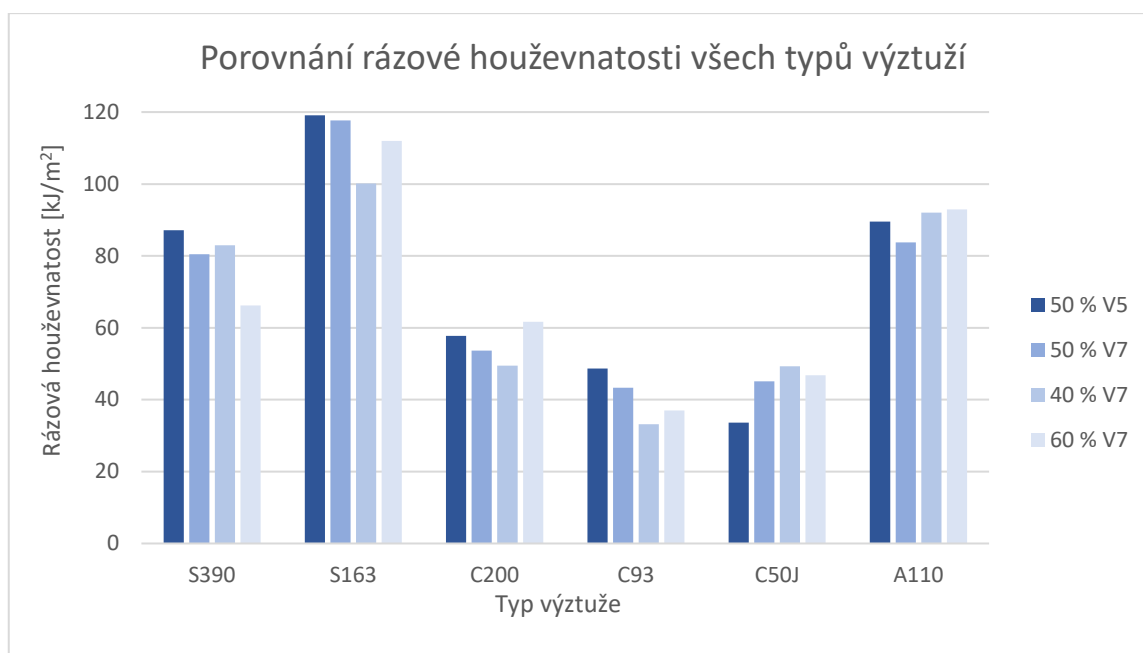
Z grafu 17 je patrné, že množství obsahu výztuže v kompozitu nemělo u jednotlivých výztuží velký vliv na hodnotu průhybu při maximu. Značný vliv na tuto hodnotu však měl druh výztuže. Nejnižších hodnot průhybu při maximu dosahovaly uhlíkové tkaniny pohybující se okolo hodnoty 1,5 %. Skleněné tkaniny měly vyšší hodnoty – S390 kolem 2,5 % a S163 kolem 3 %. Zřetelně nejvyšší průhyb měl kevlar, který dosahoval hodnot 4 % a vzorek 50 % V7 dokonce dosáhl hranice 5 %.

3.2.5. Rázová houževnatost metodou Charpy

Velmi důležitou a sledovanou vlastností kompozitních veslařských lodí je odolnost vůči rázu. U jednotlivých typů výztuží a jejich koncentračních řad byla provedena zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy. Naměřené hodnoty práce potřebné k přeražení tělesa [J] a hodnoty rázové houževnatosti [kJ/m^2] jsou uvedeny v tabulce 37. Porovnání hodnot rázové houževnatosti všech tkanin je znázorněno v grafu 18.

Tabulka 37: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy.

Vzorek		Práce potřebná k přeražení tělesa [J]	Rázová houževnatost [kJ/m^2]
S390	50 % V5	$1,51 \pm 0,10$	$87,14 \pm 5,55$
	50 % V7	$1,39 \pm 0,04$	$80,48 \pm 2,22$
	40 % V7	$1,62 \pm 0,15$	$82,96 \pm 5,80$
	60 % V7	$1,11 \pm 0,08$	$66,17 \pm 4,49$
S163	50 % V5	$2,67 \pm 0,11$	$119,07 \pm 4,23$
	50 % V7	$2,60 \pm 0,11$	$117,65 \pm 4,76$
	40 % V7	$2,69 \pm 0,10$	$100,10 \pm 4,50$
	60 % V7	$2,26 \pm 0,08$	$111,97 \pm 3,73$
C200	50 % V5	$1,09 \pm 0,09$	$57,72 \pm 5,09$
	50 % V7	$1,02 \pm 0,05$	$53,67 \pm 2,54$
	40 % V7	$1,13 \pm 0,07$	$49,50 \pm 2,80$
	60 % V7	$1,09 \pm 0,06$	$61,66 \pm 3,96$
C93	50 % V5	$0,90 \pm 0,04$	$48,68 \pm 2,64$
	50 % V7	$0,81 \pm 0,06$	$43,31 \pm 3,59$
	40 % V7	$0,69 \pm 0,05$	$33,13 \pm 2,66$
	60 % V7	$0,63 \pm 0,05$	$37,01 \pm 3,21$
C50J	50 % V5	$0,72 \pm 0,08$	$33,61 \pm 3,36$
	50 % V7	$0,78 \pm 0,06$	$45,06 \pm 3,24$
	40 % V7	$1,16 \pm 0,09$	$49,32 \pm 3,63$
	60 % V7	$0,80 \pm 0,04$	$46,82 \pm 3,73$
A110	50 % V5	$1,61 \pm 0,07$	$89,52 \pm 4,02$
	50 % V7	$1,48 \pm 0,12$	$83,73 \pm 6,57$
	40 % V7	$1,75 \pm 0,07$	$92,06 \pm 3,60$
	60 % V7	$1,48 \pm 0,10$	$92,89 \pm 6,69$



Graf 18: Souhrnné porovnání rázových houževnatostí.

Z grafu 18 vyplývá, že vzorky s tužidlem 285 obecně vykazují o něco málo vyšší hodnoty rázové houževnatosti v porovnání se vzorky s tužidlem 287. Jedinou výjimku v tomto pravidle tvoří vzorky C50J, ale tato skutečnost byla způsobena nižší kvalitou vyrobeného vzorku 50 % V5. Kromě této skutečnosti opět není pozorován žádný jednotný rys ve vlivu koncentrační řady na výsledné mechanické vlastnosti, avšak pro koncentrační řady jednotlivých typů výztuží platí stejné charakteristiky, jako tomu bylo u hodnocení výsledků mezí pevnosti v ohybu pod grafem 16.

Uhlík v porovnání se sklem a kevlarem vykazuje daleko nižší hodnoty rázové houževnatosti – nejvyšší hodnoty dosahovaly vzorky s tkaninou C200, a to maximálně 60 kJ/m², hodnoty ostatních uhlíkových tkanin se pohybovaly dokonce okolo hodnot 40 kJ/m². Vzájemně podobných hodnot dosahovaly vzorky vyztužené skleněnou tkaninou S390 a vzorky vyztužené kevlarovou tkaninou. Nejlepší rázovou houževnatost vykazovaly vzorky se skleněnou tkaninou S163, jejichž hodnoty se pohybovaly nad hranicí 100 kJ/m². Tyto hodnoty potvrzují důležitost role skleněných a kevlarových výztuží v klubových veslařských lodích, u kterých je požadována zvýšená odolnost proti rázu v porovnání se závodními celokarbonovými a velmi lehkými loděmi.

3.2.6. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse byla u kompozitních vzorků měřena se zatížením 50 kgf. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 38.

Tabulka 38: Výsledky zkoušky tvrdosti podle Vickerse.

Vzorek		Tvrdost dle vickerse [HV 50]
S390	50 % V5	35,26 ± 2,21
	50 % V7	34,62 ± 0,93
	40 % V7	33,17 ± 0,44
	60 % V7	36,61 ± 0,22
S163	50 % V5	36,76 ± 2,38
	50 % V7	34,51 ± 1,55
	40 % V7	36,42 ± 0,21
	60 % V7	36,29 ± 0,51
C200	50 % V5	41,85 ± 1,19
	50 % V7	41,40 ± 0,48
	40 % V7	39,50 ± 0,25
	60 % V7	41,68 ± 0,46
C93	50 % V5	42,87 ± 0,89
	50 % V7	41,52 ± 0,39
	40 % V7	38,11 ± 0,21
	60 % V7	39,97 ± 0,14
C50J	50 % V5	30,91 ± 0,60
	50 % V7	30,63 ± 0,56
	40 % V7	32,45 ± 1,74
	60 % V7	32,54 ± 0,42
A110	50 % V5	30,91 ± 0,03
	50 % V7	29,90 ± 0,64
	40 % V7	28,89 ± 0,61
	60 % V7	32,38 ± 0,37

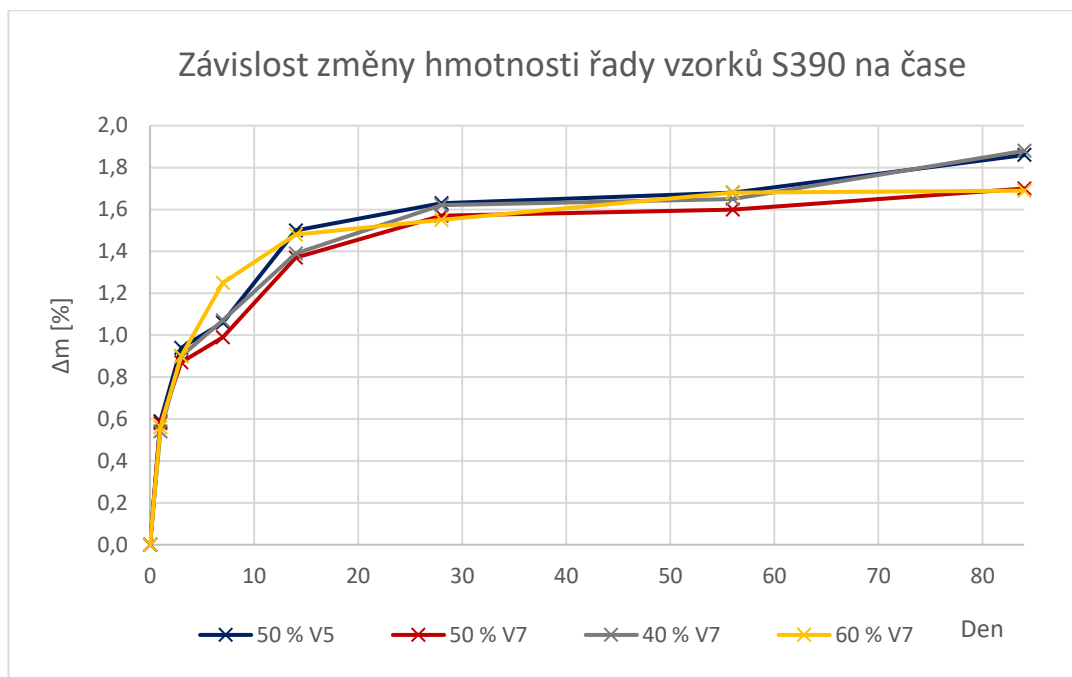
Z naměřených hodnot vyplývá, že není pozorován vliv obsahu výztuže v kompozitu na jeho výslednou tvrdost. Nejvyšších hodnot tvrdosti dosahují vzorky s uhlíkovými tkaninami C200 a C93 – okolo 40 HV 50. Nižších hodnot pohybujících se okolo 35 HV 50 dosahují skleněné tkaniny S390 a S163 a nejnižších hodnot okolo 30 HV 50 dosahuje dvojice uhlíkové tkaniny C50J a kevlarové tkaniny A110.

3.2.7. Nasákavost ve vodě

Stejně jako u vzorků matric byla u vzorků kompozitů provedena zkouška nasákavosti ve vodě. Byla sledována závislost nárůstu hmotnosti vzorků v čase (grafy 19–24). První vážení vzorků bylo provedeno po jejich vysušení do konstantní hmotnosti a poté byly ponořeny do vody. Další vážení proběhla po 1, 3, 7, 14, 28, 56 a 84 dnech. Po ukončení zkoušky nasákavosti ve vodě, tedy po cca 3 měsících, byla u vzorků provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Následně byly vzorky vysušeny při 40 °C do konstantní hmotnosti, zváženy a opět byla změřena tvrdost podle Vickerse. Kromě závislosti nasákavosti materiálů vodou v čase byl tedy sledován i vliv dlouhodobého působení vody na tvrdost materiálů a následná zkouška reverzibility tohoto děje s ohledem na výslednou hmotnost a tvrdost po opětovném vysušení vzorků do konstantní hmotnosti. Hodnoty nárůstu hmotností vzorků v čase v průběhu zkoušky nasákavosti vodou pro jednotlivé typy výztuží jsou zaznamenány v tabulkách 39–44. Souhrnné porovnání celkového množství nasáknuté vody u všech typů výztuží po ukončení zkoušky nasákavosti je znázorněno v grafu 25. Změny tvrdosti vzorků kompozitů způsobené vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě jsou uvedeny v tabulce 45.

Tabulka 39: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S390.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	0,59	0,58	0,54	0,56
3	0,94	0,87	0,9	0,9
7	1,06	0,99	1,07	1,25
14	1,50	1,37	1,39	1,48
28	1,63	1,57	1,62	1,55
56	1,68	1,60	1,65	1,68
84	1,86	1,70	1,88	1,69
po vysušení	0,14	-0,18	0,08	-0,12

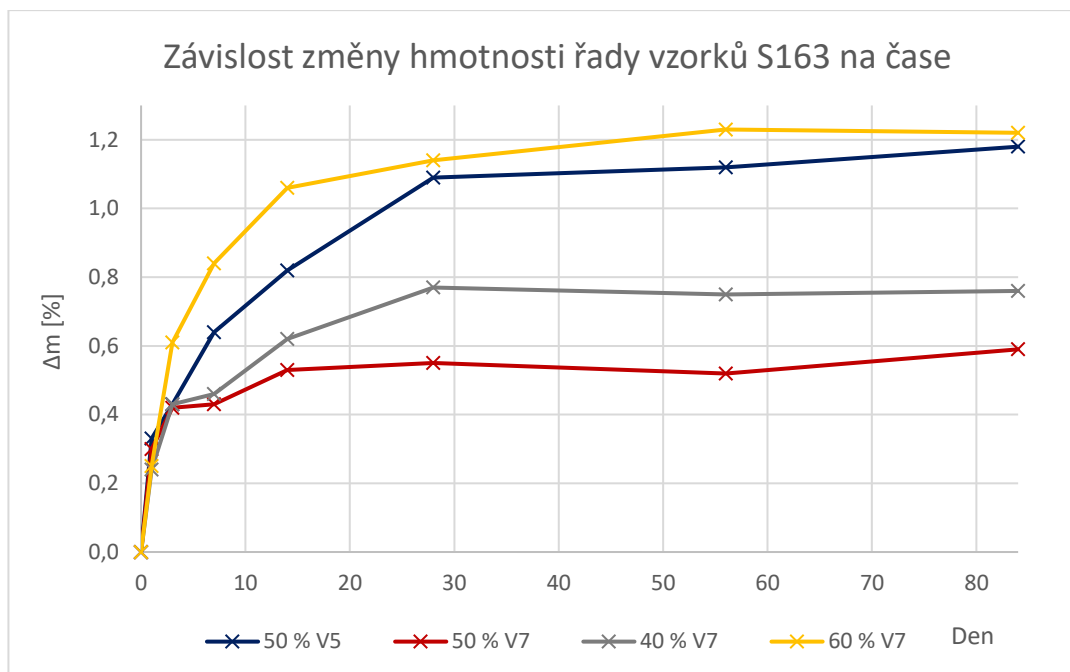


Graf 19: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S390.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že průběh nasákavosti ve vodě u všech vzorků koncentrační řady S390 je velmi podobný. Po 84 dnech všechny vzorky obsahovaly necelé 2 % vody. Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření dostaly zpět na svou původní hmotnost.

Tabulka 40: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S163.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	0,33	0,30	0,24	0,25
3	0,43	0,42	0,43	0,61
7	0,64	0,43	0,46	0,84
14	0,82	0,53	0,62	1,06
28	1,09	0,55	0,77	1,14
56	1,12	0,52	0,75	1,23
84	1,18	0,59	0,76	1,22
po vysušení	0,15	0,00	0,12	0,04

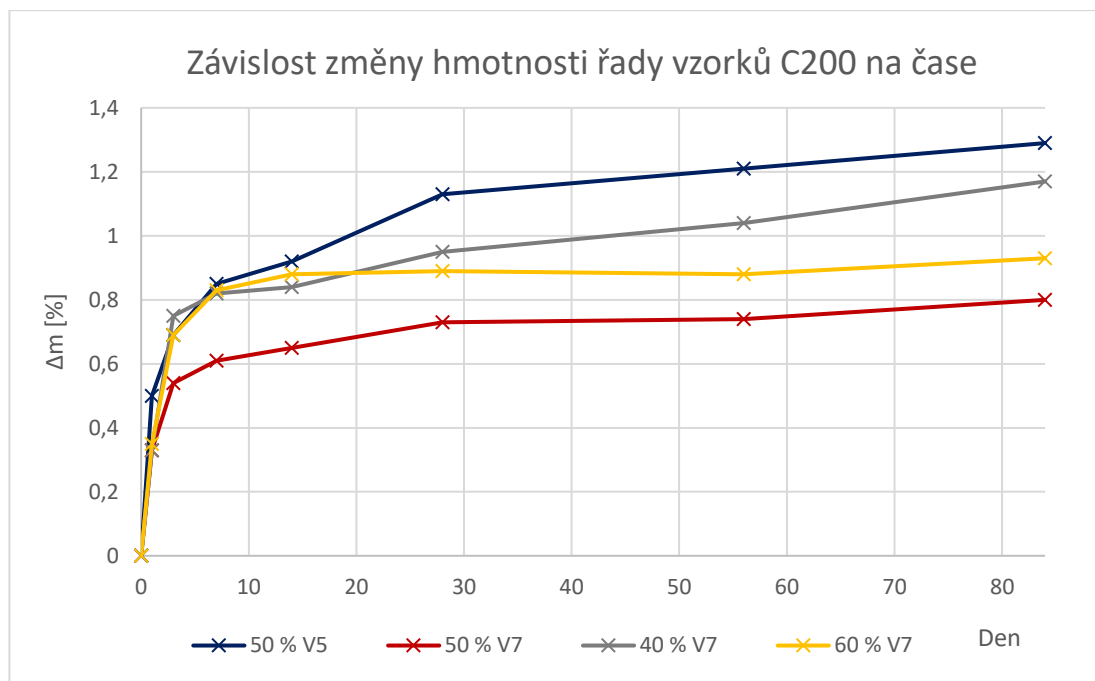


Graf 20: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků S163.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejrychleji a v největším množství vodu absorboval vzorek 60 % V7. Po 84 dnech obsahoval kolem 1,2 % vody. Velmi podobné množství vody nasákl také vzorek 50 % V5. Nejméně vody absorboval vzorek 50 % V7, který po ukončení pokusu obsahoval pouze poloviční množství vody. Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření opět dostaly zpět na svou původní hmotnost.

Tabulka 41: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C200.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	0,50	0,33	0,33	0,35
3	0,69	0,54	0,75	0,69
7	0,85	0,61	0,82	0,83
14	0,92	0,65	0,84	0,88
28	1,13	0,73	0,95	0,89
56	1,21	0,74	1,04	0,88
84	1,29	0,80	1,17	0,93
po vysušení	0,06	-0,04	0,07	0,03

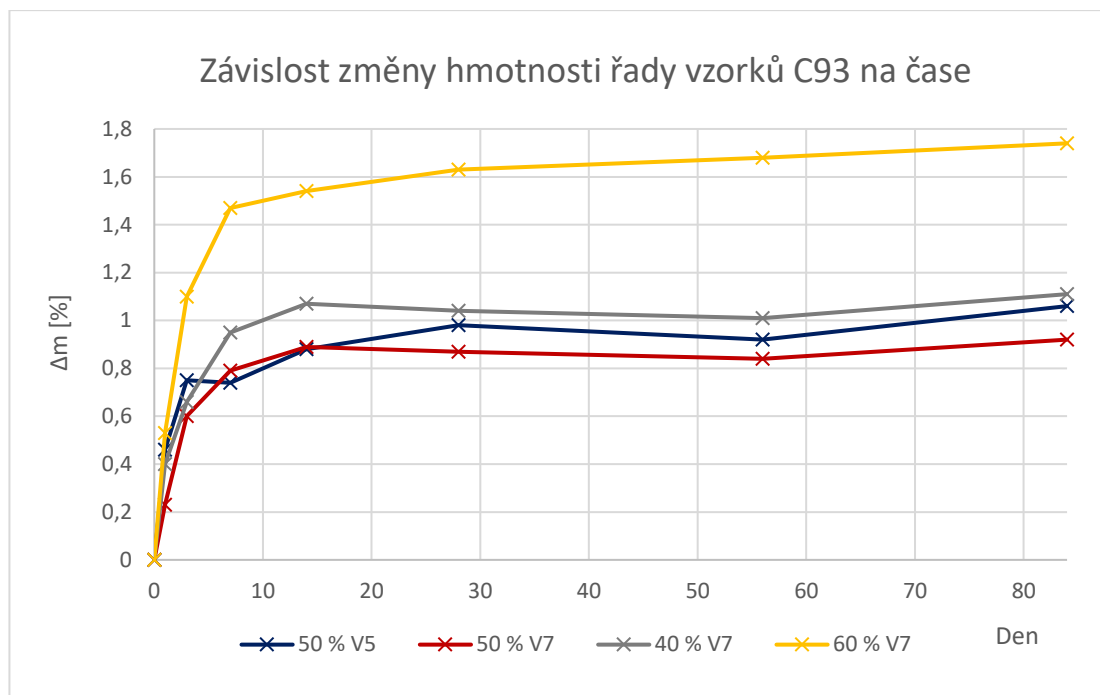


Graf 21: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C200.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejrychleji a v největším množství vodu absorboval vzorek 50 % V5. Po 84 dnech obsahoval kolem 1,3 % vody. Nejméně vody nasákl opět vzorek 50 % V7, který po ukončení pokusu obsahoval pouze 0,8 % vody. Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření dostaly zpět na svou původní hmotnost.

Tabulka 42: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C93.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	0,46	0,23	0,4	0,53
3	0,75	0,60	0,66	1,1
7	0,74	0,79	0,95	1,47
14	0,88	0,89	1,07	1,54
28	0,98	0,87	1,04	1,63
56	0,92	0,84	1,01	1,68
84	1,06	0,92	1,11	1,74
po vysušení	0,08	0,00	0,03	-0,07

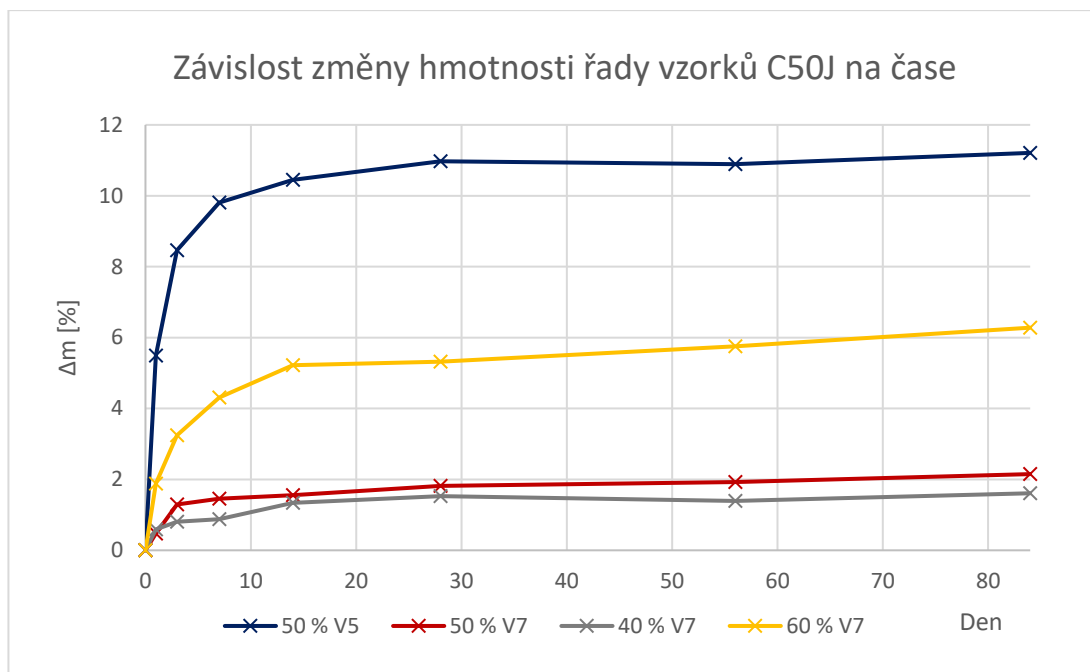


Graf 22: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C93.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejrychleji a v největším množství vodu absorboval vzorek 60 % V7. Po 84 dnech obsahoval kolem 1,7 % vody. Ostatní vzorky absorbovaly vodu podobně a v porovnání se vzorkem 60 % V7 výrazně méně – kolem 1 %. Nejméně však opět vodu absorboval vzorek 50 % V7. Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření dostaly zpět na svou původní hmotnost.

Tabulka 43: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C50J.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	5,49	0,47	0,59	1,88
3	8,46	1,29	0,81	3,24
7	9,81	1,46	0,88	4,31
14	10,45	1,56	1,34	5,22
28	10,97	1,82	1,53	5,32
56	10,89	1,93	1,39	5,75
84	11,21	2,15	1,61	6,28
po vysušení	-0,23	-0,21	-0,01	-0,28

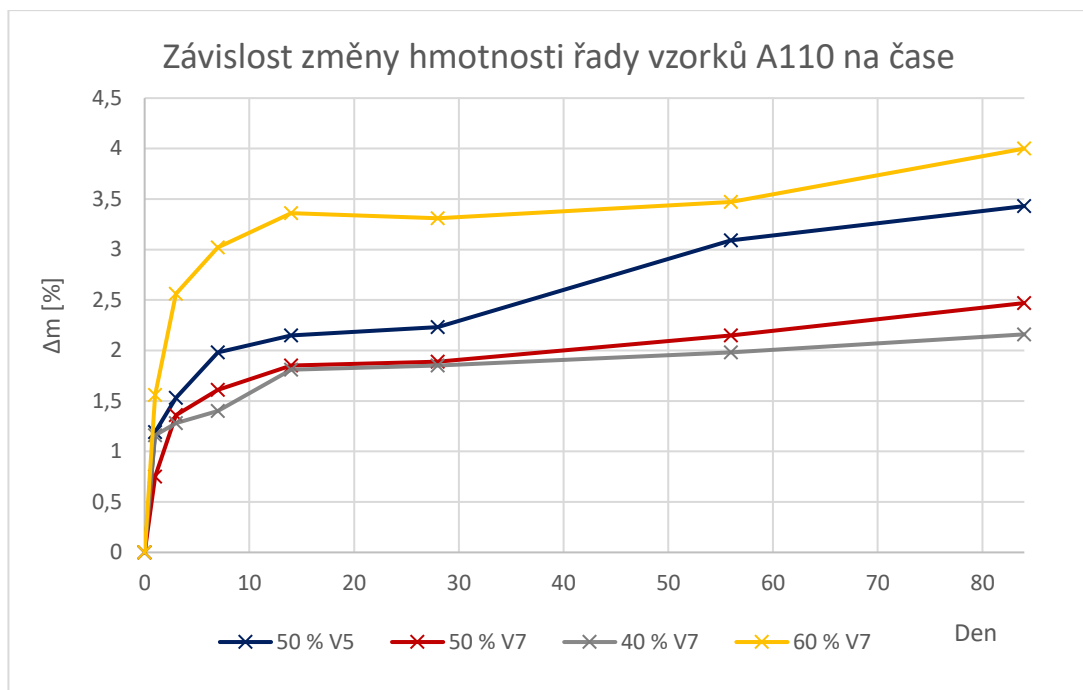


Graf 23: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků C50J.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejrychleji a v největším množství vodu absorboval vzorek 50 % V5. Po 84 dnech obsahoval přes 11 % vody. Velmi vysoká nasákavost byla způsobena špatnou kvalitou připravené desky. Velké množství vody absorboval také vzorek 60 % V7, a to přes 6 %. Na těchto vzorkách je velmi dobře vidět, že nedostatečné prosycení výztuže vede k obrovskému nárůstu nasákavosti kompozitu ve vodě. Nejméně vody absorboval vzorek 40 % V7 (1,6 %). Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření dostaly zpět na svou původní hmotnost.

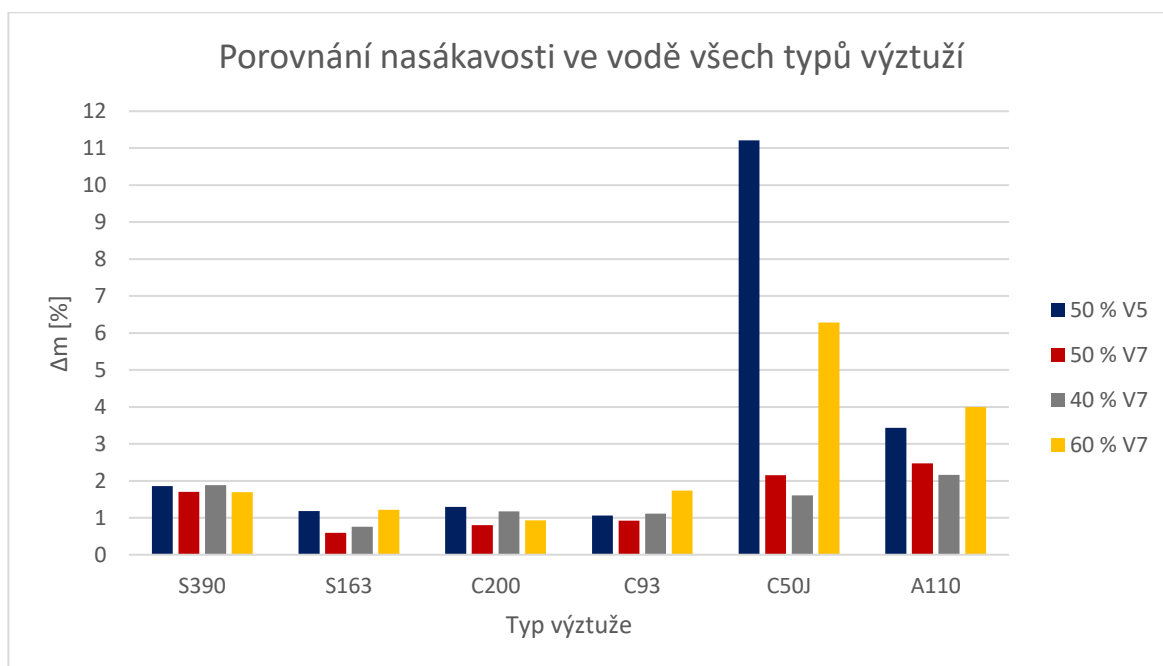
Tabulka 44: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků A110.

Den/ vzorek	Δm [%]			
	50 % V5	50 % V7	40 % V7	60 % V7
0	0	0	0	0
1	1,19	0,75	1,16	1,56
3	1,53	1,36	1,28	2,56
7	1,98	1,61	1,4	3,02
14	2,15	1,85	1,81	3,36
28	2,23	1,89	1,85	3,31
56	3,09	2,15	1,98	3,47
84	3,43	2,47	2,16	4
po vysušení	-0,09	0,04	0,07	0,12



Graf 24: Zkouška nasákavosti ve vodě řady vzorků A110.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejrychleji a v největším množství vodu absorboval vzorek 60 % V7. Po 84 dnech obsahoval kolem 4 % vody. Vzorek 50 % V5 absorboval téměř 3,5 % vody a vzorky 50 % V7 a 40 % V7 méně než 3 %. Po vysušení do konstantní hmotnosti se vzorky v rámci chyby měření dostaly zpět na svou původní hmotnost.



Graf 25: Souhrnné porovnání nasákavosti po ukončení zkoušky.

Graf 25 umožňuje porovnání celkového množství vody absorbované všemi vzorky po ukončení zkoušky nasákavosti ve vodě, tedy po době 84 dnů. Obecně rychleji a více sáknou vodu vzorky 50 % V5 v porovnání se vzorky 50 % V7. Stejný jev byl pozorován již u nasákavosti samotných vzorků matric a byl vysvětlen vyšším extrahovatelným podílem vytvrzeného epoxidového systému s tužidlem 285, kdy je vytvrzená polymerní síť méně kvalitní, a proto sáknou více vody. Velmi značný vliv na nasákavost vzorků vodou má kvalita a prosycenost vzorku. Vliv kvality připraveného vzorku je velmi dobře pozorovatelný na vzorku C50J 50 % V5, kdy, jak již bylo zmíněno dříve, došlo k problémům v průběhu laminace způsobených velmi specifickým chováním jednosměrné výztuže. Připravený vzorek byl nekvalitně prosycen. Nasákavost vzorku přes 11 % byla způsobena spíše vyplněním nedostatečně prosycených míst vodou než samotnou absorpcí materiálem. K podobnému efektu pravděpodobně dochází i u vzorků materiálů prosycených méně, než je jejich optimum – například u vzorků 60 % V7 s výztužemi C93, C50J a A110. Skleněná ani uhlíková vlákna vodu nesají, proto nedocházelo v průběhu pokusu k žádným, okem pozorovatelným změnám u vzorků vyztužených těmito vlákny. Jinak tomu je u vláken kevlarových. U těchto vzorků bylo pozorovatelné měknutí a rozmočení hran. U jednoho vzorku také došlo k delaminaci, která je zdokumentována na obrázku 43. Absorpce vody u vzorků koncentrační řady A110 je tedy uskutečněna jak matricí, tak i výztuží, a proto jsou výsledné hodnoty nasákavosti vody v porovnání s ostatními typy výztuží vyšší.



Obrázek 43: Delaminace vzorku s kevlarovou výztuží po zkoušce nasákavosti ve vodě.

Tabulka 45: Změna tvrdosti vzorků kompozitů vlivem zkoušky nasákavosti ve vodě.

Vzorek		Tvrdość dle Vickerse [HV 50]	Tvrdość dle Vickerse po nasákavosti [HV 50]	Tvrdość dle Vickerse po vysušení [HV 50]
S390	50 % V5	35,26 ± 2,21	10,56 ± 0,18	34,77 ± 0,19
	50 % V7	34,62 ± 0,93	10,80 ± 0,05	34,48 ± 0,04
	40 % V7	33,17 ± 0,44	9,46 ± 0,43	33,16 ± 0,24
	60 % V7	36,61 ± 0,22	11,19 ± 0,13	35,96 ± 0,05
S163	50 % V5	36,76 ± 2,38	20,14 ± 0,42	36,35 ± 0,03
	50 % V7	34,51 ± 1,55	20,80 ± 0,02	34,33 ± 0,09
	40 % V7	36,42 ± 0,21	19,29 ± 0,65	35,68 ± 0,24
	60 % V7	36,29 ± 0,51	20,15 ± 0,07	34,34 ± 0,12
C200	50 % V5	41,85 ± 1,19	32,91 ± 0,82	41,52 ± 0,27
	50 % V7	41,40 ± 0,48	33,87 ± 0,08	40,96 ± 0,01
	40 % V7	39,50 ± 0,25	31,48 ± 0,32	40,50 ± 0,12
	60 % V7	41,68 ± 0,46	34,19 ± 0,11	40,97 ± 0,20
C93	50 % V5	42,87 ± 0,89	34,20 ± 0,11	42,46 ± 0,02
	50 % V7	41,52 ± 0,39	34,22 ± 0,16	41,36 ± 0,04
	40 % V7	38,11 ± 0,21	32,71 ± 0,36	38,10 ± 0,02
	60 % V7	39,97 ± 0,14	35,52 ± 0,12	40,72 ± 0,34
C50J	50 % V5	30,91 ± 0,60	37,98 ± 0,14	29,63 ± 0,24
	50 % V7	30,63 ± 0,56	36,37 ± 0,95	28,32 ± 0,04
	40 % V7	32,45 ± 1,74	32,67 ± 0,13	32,47 ± 0,37
	60 % V7	32,54 ± 0,42	37,60 ± 0,37	31,96 ± 0,12
A110	50 % V5	30,91 ± 0,03	24,39 ± 0,41	30,09 ± 0,53
	50 % V7	29,90 ± 0,64	23,96 ± 0,49	28,69 ± 1,70
	40 % V7	28,89 ± 0,61	22,81 ± 0,59	28,13 ± 0,43
	60 % V7	32,38 ± 0,37	24,90 ± 0,02	31,43 ± 0,36

Z naměřených hodnot je patrné, že vlivem dlouhodobého působení vody došlo k poklesu tvrdosti u všech vzorků a po jejich vysušení do konstantní hmotnosti došlo opět k návratu na jejich původní hodnoty. Výjimku tvoří pouze řada vzorků vyztužených tkaninou C50J, kdy po nasákavosti došlo naopak k navýšení hodnot tvrdosti. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že vzorky obsahují velmi malé množství pryskyřice a v průběhu měření došlo k průniku indentoru až k vláknům výtzuže, jejichž tvrdost je v porovnání s tvrdostí matrice vyšší. Vzorek 40 % V7 z této koncentrační řady obsahoval větší množství pryskyřice, a proto u něj jako u jediného k této anomálii již nedošlo. U vzorků se skleněnou výtzuží S390 došlo k velmi výraznému poklesu tvrdosti po nasákavosti, a to dokonce na hodnotu nižší než třetinovou. To bylo pravděpodobně způsobeno naopak velkým množstvím pryskyřice obsaženým v této řadě vzorků v kombinaci s pouhými pěti vrstvami výtzuže. Množství matrice

mezi jednotlivými vrstvami výztuže tak bylo velké a indentor mohl změřit pouze tvrdost samotné pryskyřice. Závěrem je tedy možno konstatovat, že dlouhodobé působení vody je z hlediska množství absorbované vody kompozitními vzorky a jejich tvrdosti plně reverzibilním dějem.

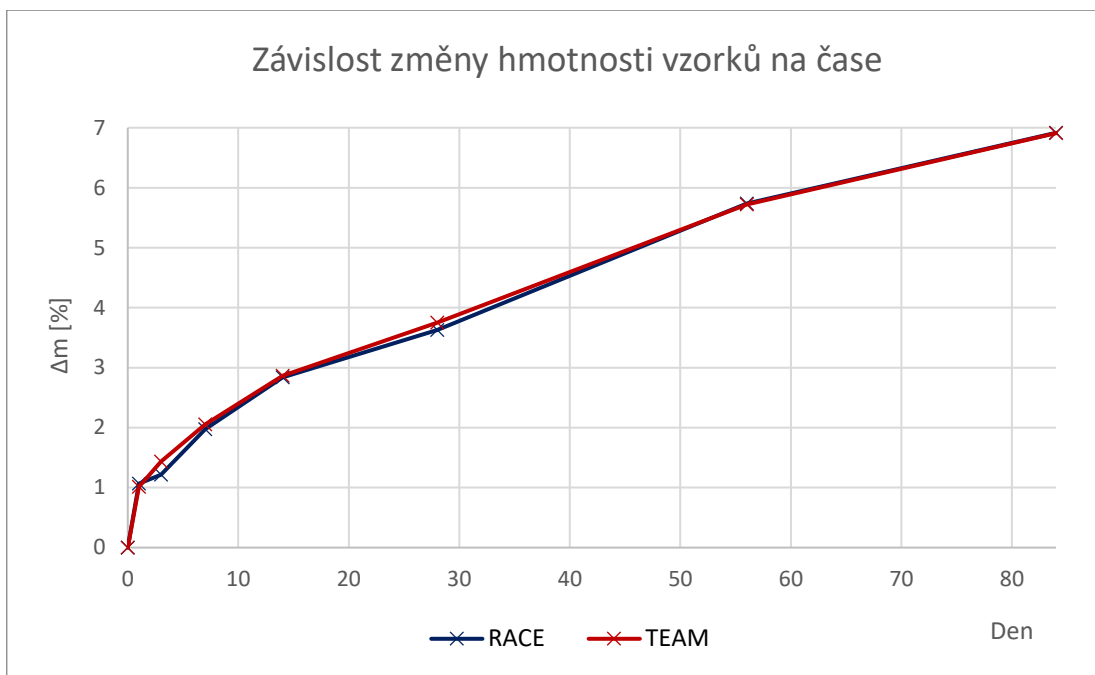
3.3. Vzorky lodí

3.3.1. Nasákavost ve vodě

Zkouška nasákavosti ve vodě u vzorků lodí byla provedena stejným způsobem a s identickými podmínkami jako zkouška nasákavosti ve vodě u vzorků kompozitů. Z technologických důvodů nebylo možné provést měření tvrdosti vzorků a byla tedy sledována pouze závislost nárůstu hmotnosti vzorků lodí vodou v čase (graf 26). Hodnoty nárůstu hmotností vzorků v čase v průběhu zkoušky nasákavosti vodou jsou zaznamenány v tabulce 46.

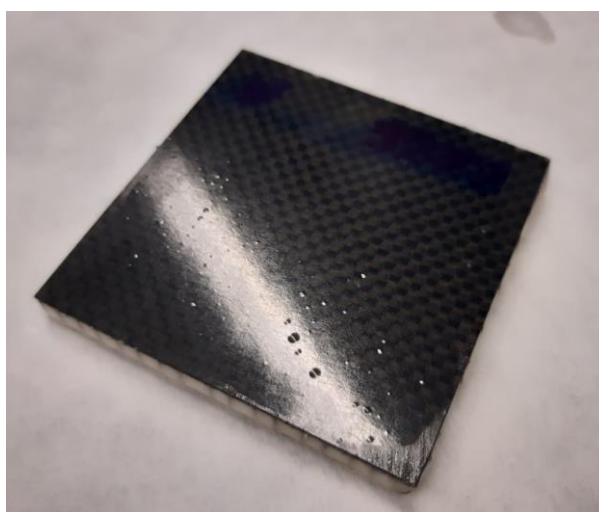
Tabulka 46: Zkouška nasákavosti vzorků lodí ve vodě.

Den/ vzorek	Δm [%]	
	RACE	TEAM
0	0	0
1	1,06	1,01
3	1,22	1,44
7	1,97	2,05
14	2,84	2,87
28	3,63	3,75
56	5,74	5,72
84	6,92	6,91
po vysušení	0,07	0,05



Graf 26: Zkouška nasákavosti vzorků lodí ve vodě.

Z naměřených hodnot je patrné, že průběh zkoušky nasákavosti ve vodě probíhal u obou vzorků lodí stejným způsobem. Zkoumané vzorky RACE a TEAM se vzájemně liší složením druhé vrstvy kompozitu, která je chráněná první vrstvou polyesterového gelcoatu. Použitý typ tkaniny ve druhé vrstvě tedy nemá vliv na výslednou nasákavost vzorku. Vzorky po 84 dnech obsahovaly přibližně 7 % vody. Po necelých 3 měsících ve vodě bylo pozorováno narušení vrstvy gelcoatu, které se projevilo formou bublinek tvořících se na povrchu vzorku (obrázek 44). Po vysušení do konstantní hmotnosti se gelcoat vrátil do původní podoby bez známek poškození a vzorky se dostaly zpět na svou původní hmotnost.



Obrázek 44: Narušená struktura gelcoatu po zkoušce nasákavosti ve vodě.

4. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla věnována tématu veslařských lodí. Literární rešerše sestávala z pěti hlavních částí, které se zabývaly obecnou teorií kompozitního materiálu a jeho vlastnostmi, veslováním, materiály využívanými v lodním průmyslu se zaměřením se na veslařské lodě a technologiemi výrob. Poslední část vznikala ve spolupráci s tuzemským výrobcem závodních veslařských lodí a umožnila nahlédnout do míst, kde z relativně obyčejných materiálů vznikají doslova mistrovská díla.

V experimentální části byl zkoumán vliv obsahu výztuže v kompozitu na jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti. Cílem bylo připravit koncentrační řady vzorků s obsahem výztuže 40, 50 a 60 %, a to pro každou z 6 typů výztuží. Řada s 50% obsahem výztuže byla připravena 2x, pokaždé s jiným tužidlem a sloužila pro studium vlivu použitého tužidla na výsledné vlastnosti kompozitů. Vzorky byly připraveny ruční laminací za použití vakua, kdy koncentračních řad mělo být dosaženo navážením daných hmotnostních poměrů výztuže a pryskyřice. Bylo zjištěno, že ani vynecháním odsávací rohože při této technologii není možné dosáhnout žádané koncentrační řady vzorků. Vlivem vakua došlo k odtoku určitého množství pryskyřice mimo připravenou desku, což vedlo ke zvýšení obsahu výztuže ve všech vzorkách a k posunu koncentračních řad. Tento posun závisel na hmotnosti použité tkaniny, kdy se nejvíce projevil u nejtěžších tkanin, u kterých bylo použito také nejvíce pryskyřice.

Vliv použitého tužidla na fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitů byl jednoznačně pozorován pouze u rázové houževnatosti metodou Charpy, kdy vzorky s tužidlem 285 vykazovaly o něco vyšší hodnoty v porovnání se vzorky s tužidlem 287. U mechanických zkoušek vykazovaly nejlepší vlastnosti většinou vzorky z prostředku koncentrační řady, pouze uhlíkový jednosměr a kevlar dosahovaly lepších výsledných vlastností s nižším obsahem výztuže, což v reálných hodnotách odpovídalo u jednotlivých tkanin následujícím hodnotám obsahu výztuže: S390 - 65 %, S163 a C200 – 60 %, C93 – 56 %, C50J – 40 % a A110 – 50 %. Vliv obsahu výztuže byl pozorován především u hodnot mezí pevnosti v tahu a v ohybu. Naopak u zkoušky tvrdosti na množství výztuže nezáleželo vůbec.

Porovnáním materiálů výztuží mezi sebou bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot meze pevnosti v tahu a v ohybu a také tvrdosti dosahovaly vzorky vyztužené uhlíkovými tkaninami C200 a C93. Skleněné tkaniny S390 a S163 spolu s kevlarovou tkaninou A110 zase prokázaly výborné vlastnosti rázové houževnatosti. Tyto vlastnosti velmi dobře vystihují podstatu funkce těchto materiálů v lodích, kdy sklo a kevlar jsou přidávány za účelem snížení jejich křehkosti.

Poslední část diplomové práce byla věnována zkoušce nasákavosti ve vodě. Nižší nasákavost vody byla sledována u vzorků s ideálním obsahem výztuže. Byl zkoumán vliv nasákavosti na výslednou hmotnost a tvrdost kompozitních vzorků. Bylo zjištěno, že dlouhodobé působení vody je z hlediska množství absorbované vody kompozitními vzorky a jejich tvrdosti plně reverzibilním dějem. U vzorků lodí byla zkoumána pouze závislost vlivu nasákavosti na hmotnost vzorku, která se po vysušení vzorků do konstantní hmotnosti také vrátila zcela na svou původní hodnotu. To znamená, že i když každá veslařská loď sákně určité množství vody, tak po vysušení se vždy vrátí do původního stavu.

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZRDOJŮ

- [1] PANUŠKA, P. *Veslařský trénink*. 1, vydání. Praha: Český veslařský svaz, 2001.
- [2] SMETANOVÁ, L. *Sportovní aplikace kompozitních materiálů s různými typy matic a výztuží*. Pardubice, 2019. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, fakulta chemicko-technologická.
- [3] MÍŠEK, B. *Kompozity*. 1. vydání. Brno: Technický dozorčí spolek Brno – Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [4] DAŘOUREK, K. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] BARBERO, E. J. *Introduction to composite materials design*. 2nd ed. Boca Raton: FL: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-7915-9.
- [6] MILTON, G. W. *The Theory of Composites*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [7] Military Handbook, MIL – HDBK – 17. *Composite Materials Handbook*, vol. 1–5, Washington, 1997.
- [8] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] GAY, D.; HOA, S. V. *Composite materials – design and applications*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4519-2.
- [10] Český veslařský svaz. [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.veslo.cz>.
- [11] SUBIC, A.. *Materials in sport equipment*. 2. vydání. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. ISBN 978-0-08-102582-6.
- [12] Empacher. [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.empacher.com>.
- [13] Roseman. [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.roseman.cz>.
- [14] Filippi. [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.filippiboats.com>.
- [15] Vermont. [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.vermontc2.com>.
- [16] SELVARAJU, S.; ILAIYAVEL, S. *Applications of composites in marine industry*. Journal of engineering research and studies [online]. 2011, 2 (2), 89-91. [cit. 2022-03-26]. ISSN 0976-7916.
- [17] MOURITZ, A. P.; KOOTSOOKOS, A., MATHYS, G. *Stability of polyester-and vinyl ester-based composites in seawater*. Journal of materials science [online]. Kluwer Academic Publishers, 2004, 39 (19), 60073–6077. [cit. 2022-03-26]. ISSN 0022–2461. Dostupné z: doi:10.1023/B: JMSC.0000041704.71226.ee.

- [18] MOURITZ, A. P.; GELLERT, E.; BURCHILL, P.; CHALLIS, K. *Review of advanced composite structures for naval ships and submarines*. Composite structures [online]. 2001, 53 (1), 21-42. [cit. 2022-03-26]. ISSN 0263–8223. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6).
- [19] HULL, D.; CLYNE T. W. *An introduction to composite materials*. 2. vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38190-8.
- [20] Brača Sport. [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://rowing.braca-sport.com/oars/shafts/construction>.
- [21] POMÁZI, Á.; TOLDY, A. *Multifunctional gelcoats for fiber reinforced composites*. Coatings [online]. 2019, 9 (3), 173. [cit. 2022-03-27]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings9030173>.
- [22] SUMMERSCALES, J. *Composites manufacturing for marine structures*. Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites [online]. Woodhead Publishing, 2016, 19-55. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-250-1.00002-8>.
- [23] SEE, S. C.; ZHANG, Z. Y.; RICHARDSON, M. O. W. A. *Study of water absorption characteristics of a novel nano-gelcoat for marine application*. Progress in Organic Coatings [online]. 2009, 65 (2), 169-174. [cit. 2022-03-27]. ISSN 0300-9440. Dostupné z: [doi:10.1016/j.porgcoat.2008.11.004](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.11.004).
- [24] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. 3. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [25] MLEZIVA, J.; ŠŇUPÁREK, J. *Polymery: Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [26] PROKOPOVÁ, I. *Makromolekulární chemie*. 2. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [27] HONZÍČEK, J. *Chemie filmotvorných látek*. Univerzita Pardubice, říjen 2020. Prezentace v PowerPointu.
- [28] *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2000. [cit. 2022-03-29]. ISBN 3527306730.
- [29] GIBSON, G. *Epoxy Resins*. Brydson's Plastics Materials [online]. Elsevier, 2017, 773-797. [cit. 2022-03-29]. ISBN 9780323358248. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-323-35824-8.00027-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00027-X).
- [30] JIN, F.; LI, X.; PARK, S. *Synthesis and application of epoxy resins: A review*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry [online]. 2015, 29, 1-11 [cit. 2022-03-29]. ISSN 1226086X. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jiec.2015.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026).
- [31] JASWAL, S; GAUR, B. *New trends in vinyl ester resins*. Reviews in Chemical Engineering [online]. 2014, 30(6). [cit. 2022-03-29]. ISSN 2191-0235. Dostupné z: [doi:10.1515/revce-2014-0012](https://doi.org/10.1515/revce-2014-0012).

- [32] LAUNIKITIS, M. B. *Vinyl Ester Resins*. Handbook of Composites [online]. Boston, MA: Springer US, 1982, 38-49. [cit. 2022-03-29]. ISBN 978-1-4615-7141-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4615-7139-1_3.
- [33] Generalplastics. [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.generelplastics.com>.
- [34] Lantor Composites. [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.lantorcomposites.com>.
- [35] PALOMBA, G.; EPASTO, G.; CRUPI, V. *Lightweight sandwich structures for marine applications: a review*. Mechanics of Advanced Materials and Structures [online]. 1-26. [cit. 2022-03-30]. ISSN 1537-6494. Dostupné z: doi:10.1080/15376494.2021.1941448.
- [36] CEVAHIR, A. *Glass fibers*. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites [online]. Elsevier, 2017, 99-121. [cit. 2022-03-30]. ISBN 9780081018712. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9.
- [37] TIWARI, S.; BIJWE, J. *Surface Treatment of Carbon Fibers – A Review*. Procedia Technology [online]. 2014, 14, 505-512. [cit. 2022-03-30]. ISSN 22120173. Dostupné z: doi:10.1016/j.protcy.2014.08.064.
- [38] Compositeslab. [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://compositeslab.com>.
- [39] Havel Composites – Technologie výroby kompozitů. [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com>.
- [40] Technologie zpracování plastů. [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>.
- [41] SPASOJEVIC, P. M. *Thermal and Rheological Properties of Unsaturated Polyester Resins-Based Composites*. Unsaturated Polyester Resins [online]. Elsevier, 2019, 367-406. [cit. 2022-03-31]. ISBN 9780128161296. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816129-6.00015-6.
- [42] ResearchGate. [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Normal-procedure-for-vacuum-infusion-process-9_fig1_325017393.
- [43] Kompozit.com. [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://www.kompozit.com/compression-molding>