

# **Příprava polyuretanových zkušebních semiproductů a optimalizace způsobu jejich výroby**

Bc. Filip Ševčík

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Filip Ševčík</b>
Osobní číslo:	<b>T22636</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Výrobní inženýrství</b>
Forma studia:	<b>Kombinovaná</b>
Téma práce:	<b>Příprava polyuretanových zkušebních semiproductů a optimalizace způsobu jejich výroby</b>

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární řešení na zadané téma.
2. Výběr materiálového systému pro přípravu zkušebních struktur.
3. Návrh metodiky zpracování vybraného materiálového systému.
4. Příprava zkušebních struktur a optimalizace procesu výroby.
5. Vyhodnocení a stanovení závěrů výsledků diplomové práce.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. a VLK M. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
2. BEHNISCH, Felix, Carl-Christoph HÖHNE, Lukas MANAS, Philipp ROSENBERG a Frank HENNING. Flame retardant investigations on carbon fibre-reinforced polyurethane resin parts for aircraft applications produced by wet compression moulding. *Fire and Materials* [online]. ISSN 0308-0501.
3. RANDALL, David a Steve LEE, c2002. *The polyurethanes book*. [Everberg, Belgium: Distributed by John Wiley. ISBN 978-0-470-85041-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. března 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Filip Ševčík

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Kompozitní materiály se v současné době stávají klíčovým prvkem v konstrukci leteckých a automobilových vozidel. Jejich využití přináší značné výhody v oblasti snižování hmotnosti vozidel a tím i provozních nákladů. Vzhledem k rostoucímu tlaku na redukci emisí CO<sub>2</sub> a nákladů spojených s provozem je snaha automobilových a leteckých výrobců nalézt inovativní řešení, která by vedla k efektivnějšímu využití paliva a snížení provozních nákladů.

Tato diplomová práce se proto zabývá optimalizací vlastností pro materiál do akrobatického letounu. Optimalizovaný materiál je zamýšlen jako náhrada za původní plechové provedení, což má potenciál ke zlepšení nejen estetičnosti, ale také ulehčit práci, slevnit výrobu a taktéž díky snížené hmotnosti slevnit provoz letadla.

Klíčová slova: kompozity, polymery, aerospace, letadla, optimalizace vlastností, RTM, zkouška tříbodým ohybem

## **ABSTRACT**

Composite materials are now becoming a key element in the design of aerospace and automotive vehicles. Their use brings significant benefits in terms of reducing vehicle weight and thus operating costs. With increasing pressure to reduce CO<sub>2</sub> emissions and operating costs, automotive and aerospace manufacturers are striving to find innovative solutions that lead to more efficient fuel use and reduced operating costs.

This thesis therefore focuses on optimising the properties for aerobatic aircraft material. The optimised material is intended to replace the original sheet metal design, which has the potential to improve not only aesthetics, but also to make the aircraft easier to work with, cheaper to manufacture and also cheaper to operate due to the reduced weight.

Keywords: composites, polymers, aerospace, aircraft, hairline optimization, RTM, three-point bending test

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, rady a poskytnutí prostoru a dozoru v laboratořích i přes velkou časovou náročnost v posledních týdnech.

Dále bych rád poděkoval nejbližší rodině za podporu to nevzdávat. Taktéž patří velké díky panu Ing. Dominiku Knedlovi za všechnu pomoc a rady, které mi v průběhu studia poskytoval.

V neposlední řadě patří díky mému nadřízenému panu Ing. Miloslavu Tutterovi, který mi bez jakýchkoliv výhrad poskytl možnost provozovat toto studium v průběhu pracovního poměru.

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

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD DO KOMPOZITŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 VZNIK A VÝVOJ</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 APLIKACE KOMPOZITŮ</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 VYUŽITÍ V AUTOMOTIVE .....	13
1.2.2 VYUŽITÍ PRO VESMÍRNÉ APLIKACE .....	13
1.2.3 VYUŽITÍ U SPORTOVNÍHO VYBAVENÍ.....	14
1.2.4 VYUŽITÍ U LETOUNŮ .....	14
<b>2 SLOŽKY KOMPOZITŮ</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 MATRICE</b> .....	<b>15</b>
2.1.1 FUNKCE A VLASTNOSTI .....	15
2.1.2 TYPY MATRIC .....	16
<b>2.2 VÝZTUŽNÉ VLÁKNA</b> .....	<b>22</b>
2.2.1 FUNKCE A VLASTNOSTI .....	22
2.2.2 TYPY VÝZTUŽNÝCH VLÁKEN.....	23
<b>3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 RUČNÍ KLADENÍ</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2 NASTŘÍKÁVÁNÍ</b> .....	<b>29</b>
<b>3.3 RTM</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4 SRIM</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5 VAKUOVÁ INFUZE</b> .....	<b>31</b>
<b>4 ZKOUŠKY KOMPOZITŮ V LETECTVÍ</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1 ASTM NORMY</b> .....	<b>33</b>
4.1.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	34
4.1.2 TLAKOVÁ ZKOUŠKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	37
4.1.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	39
<b>5 OPTIMALIZACE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ</b> .....	<b>41</b>
<b>5.1 ZPŮSOB STANOVENÍ RACIONÁLNÍCH REŽIMŮ     VYTVRZOVÁNÍ PRODUKTŮ Z POLYMERNÍCH     KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>41</b>
<b>5.2 VLIV PODMÍNEK VYTVRZOVÁNÍ NA STRUKTURNÍ VÝVOJ A     MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYURETAN-     AKRYLÁTOVÝCH POVLAKŮ VYTVRZOVANÝCH UV     ZÁŘENÍM</b> .....	<b>41</b>

5.3	VÝVOJ VÝKONNOSTI POLYURETANOVÝCH ELASTOMERNÍCH KOMPOZITŮ V RŮZNÝCH KONSTRUKČNÍCH A VYTVRZOVACÍCH PROSTŘEDÍCH.....	42
II.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	45
7	DŮVOD ZMĚNY MATERIÁLŮ A JEJICH UMÍSTĚNÍ .....	46
8	POUŽITÉ MATERIÁLY .....	48
8.1	POLYURETANOVÝ SYSTÉM.....	48
8.2	VÝZTUHA.....	49
8.3	ZÁKLADNÍ SEPARAČNÍ ČINIDLO .....	49
8.4	SEPARAČNÍ ČINIDLO.....	50
9	VÝBĚR TECHNOLOGIE VÝROBY .....	51
9.1	SCHÉMA RTM OBVODU .....	51
9.2	KOMPONENTY RTM OBVODU .....	51
9.3	TEMPERACE FORMY .....	54
10	URČENÍ PODMÍNEK A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH SEMIPRODUKTŮ.....	55
10.1	NÁVRH PODMÍNEK VÝROBY .....	55
10.1.1	STAVY TEPLOT A TLAKŮ.....	55
10.1.2	DOBA PRO ODFORMOVÁNÍ.....	55
10.2	VÝROBA .....	57
11	ZKOUŠENÍ SEMIPRODUKTŮ.....	60
11.1	MNOŽSTVÍ MATRICE VE VÝZTUŽI.....	60
11.2	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	62
11.2.1	OHYBOVÁ ZKOUŠKA 1. STAVU .....	63
11.2.2	OHYBOVÁ ZKOUŠKA 2. STAVU .....	64
11.2.3	OHYBOVÁ ZKOUŠKA 3. STAVU .....	65
11.2.4	OHYBOVÁ ZKOUŠKA 4. STAVU .....	66
	ZÁVĚR A VYHODNOCENÍ.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	76
	SEZNAM TABULEK.....	78



## ÚVOD

Kompozitní materiály, skládající se z kombinace různých materiálů, představují revoluční řešení v oblasti technických materiálů. Jejich vynikající vlastnosti, jako je vysoká pevnost při nízké hmotnosti, odolnost vůči korozi a možnost tvarování do složitých forem, je činí atraktivními pro širokou škálu průmyslových odvětví.

Historie kompozitních materiálů sahá až do starověku, avšak jejich moderní využití začalo nabírat na významu až v 20. století s rozvojem polymerů a vláknových materiálů. V leteckém a automobilovém průmyslu jsou kompozitní materiály nezbytnými součástmi konstrukce letadel, vozidel a dalších součástí díky jejich výjimečným mechanickým vlastnostem a schopnosti snižovat celkovou hmotnost finálních produktů. Jejich využití v těchto odvětvích přináší řadu výhod, jako je nižší spotřeba paliva, zvýšená bezpečnost a snížení emisí, což má pozitivní dopad na provozní náklady a životní prostředí. Nicméně, kompozitní materiály nejsou omezeny pouze na letecký a automobilový průmysl, ale nacházejí své uplatnění i v jiných oblastech, jako jsou energetika, stavebnictví a sportovní vybavení, kde přinášejí inovativní a efektivní řešení.

S narůstajícím důrazem na efektivitu a udržitelnost se očekává, že využití kompozitních materiálů bude nadále expandovat, přičemž se očekává jejich další uplatnění v oblasti dopravy a průmyslu, kde mohou přispět k celkovému snížení nákladů a zlepšení životního prostředí. Díky svým unikátním vlastnostem se kompozitní materiály stávají klíčovým prvkem v moderních technologiích, přičemž neustále rostoucí požadavky na výkon a efektivitu podporují jejich další inovace a vývoj.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ÚVOD DO KOMPOZITŮ

Podobně jako příroda využívá složení různých materiálů pro zlepšení vlastností, tak i kompozity využívají dvou či více složek spojených do jednoho celku. Tyto složky od sebe lze pohledem rozlišit díky jejich jasnému rozhraní. [1, 2]

Využití kompozitních materiálů nese velkou výhodu v kombinaci vlastností jednotlivých složek. Moderní kompozitní materiály jsou optimalizovány nejen z pohledu strukturních vlastností, ale také z pohledu vlastností elektrických, termálních, tribologických a environmentálních. [1]

### 1.1 Vznik a vývoj

Kompozitní materiály se v dnešní době používají už již v celém světě. Aktuálně je využívá již v podstatě veškerý průmysl, tedy od běžně spotřební, elektronický, přes sportovní potřeby až po automobilový a letecký. [3]

Tomu však nebylo vždy. Počátek rozšiřování tohoto odvětví průmyslu započalo koncem 40. a počátkem 50. let. Rozšiřování odstartovala v široké míře především komerční aplikace pro námořní lodě. [3]

V padesátých letech dvacátého století se kompozitní materiály vyztužené skleněnými vlákny začaly šířit do letectví díky strukturně vynikajícím vlastnostem a zároveň nízké hustotě. Další obrovskou výhodou kombinace skelného vlákna a polymeru pro letectví je korozivzdornost. [1]

V šedesátých letech se začaly kompozitní materiály silně šířit do spotřebního sportovního zboží. Díky vyššímu odběru narostly možnosti vylepšování designu a zároveň se snížila cena díky novým výrobním možnostem. [1]

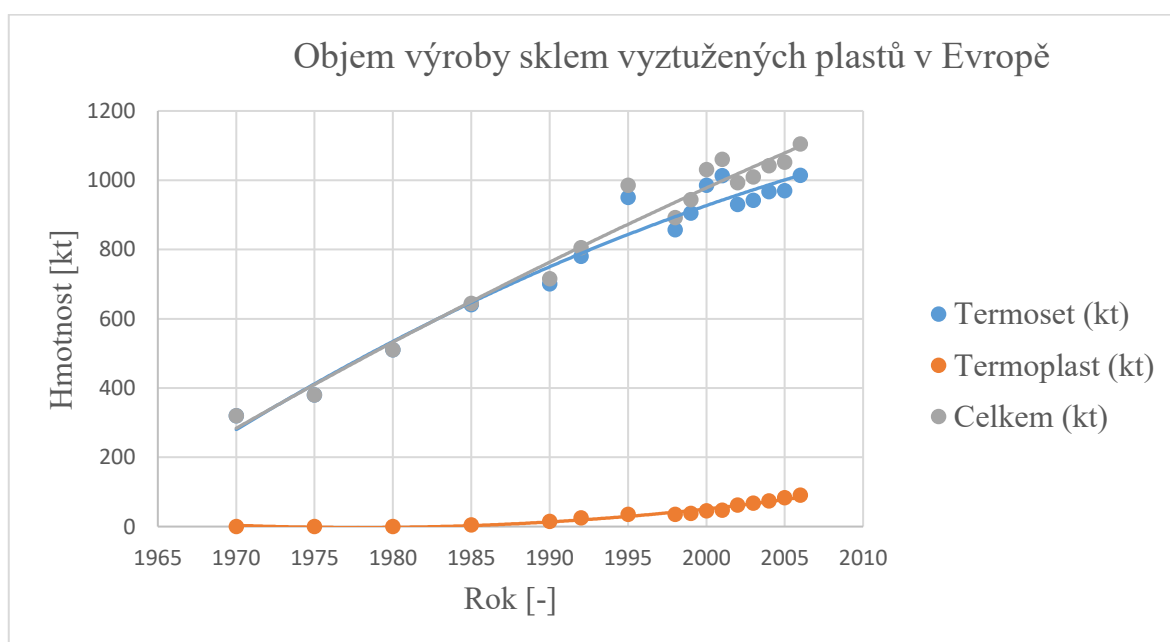
Další velký rozmach kompozitní výroby zajistil průběh studené války, kdy se masivně investovalo do vývoje nových high-tech materiálů. Následné objednávky velkých počtů vojenských letounů pro obranu států zajistily ideální prostředí pro vývoj odvětví. [1]

Rychlost nárůstu lze pozorovat na následující tabulce ukazující využití sklem vyztužených plastů v jednotlivých letech. [1]

Tabulka 1 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě [3]

Rok	Termoset (kt)	Termoplast (kt)	Celkem (kt)
1970	320	-	320
1975	380	-	380
1980	510	0	510
1985	640	4	644
1990	700	15	715
1992	780	25	805
1995	950	35	985
1998	857	35	892
1999	905	38	943
2000	985	45	1030
2001	1013	47	1060
2002	930	62	992
2003	942	67	1009
2004	967	74	1041
2005	969	83	1052
2006	1014	90	1104

Z předchozí tabulky nám vyplývá graf, z kterého můžeme sledovat od devadesátých let tendence zvětšování nárůstu výroby s využitím termoplastické matrice a naopak ustupujícího růstu výroby pomocí termosetů. Celkový růst využití skelným vláknem vyztužených plastů však nadále pokračuje víceméně konstantně. [2]



Obrázek 1 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě [2]

## 1.2 Aplikace kompozitů

Aplikace pokročilých kompozitních materiálů má v některých ohledech natolik velké výhody oproti konvenčním materiálům, že jsou nyní již považovány za všeobecně přijímané jako inženýrské materiály. [1]

### 1.2.1 Využití v automotive

Z hlediska úspory pohonných hmot tkví největší úspory ve zlepšování účinnosti motorů vozidel, snížení hmotnosti pohonného ústrojí a ve zlepšení aerodynamiky karosérie. Poslední výzkumy USCAR ukázaly, že 30% snížení hmotnosti vozidla mohou snížit spotřebu pohonných hmot až o 30%. Největší potenciál ke snížení hmotnosti se jeví v podvozku, který obsahuje odpružení, hnací ústrojí, brzdový systém, komponenty řízení a samozřejmě také veškerý nosný systém. [1]

Poměr vysoké pevnosti a nízké hmotnosti dělá z kompozitních materiálů ideálního kandidáta pro aplikaci na těchto komponentech. Avšak skrze to, že materiál se zpracovává do finální podoby jinými technologickými postupy než konvenční materiály, tak není možné pouze změnit polotovary pro výrobu dílce. Dalším kritériem je vyšší cena výsledného dílce. Z těchto důvodů vidíme nástup na tyto pozice velmi pozvolný. [1]

### 1.2.2 Využití pro vesmírné aplikace

Komponenty pro vesmírnou aplikaci vyžadují vysokou tuhost zpravidla v kombinaci s nízkou tepelnou roztažností a velkou rozměrovou stabilitou. Obrovskou výhodou je opět nízká hmotnost. [1]

Snížená hmotnost zde hraje klíčovou roli při výběru materiálu. Ta totiž přímo ovlivňuje návratnost. Například pro vynesení antény na orbitu se pohybuje 1 kilogram vnesené váhy v rozmezí 20 000 až 100 000 americký dolarů. Snížení váhy o 25 kilogramů tedy znamená úsporu přinejmenším 500 000 dolarů. [1]

Pro tyto aplikace se kompozity používají pro obaly elektronických skříní přes nosné konstrukce pro solární panely či antény až po ochranné obaly motorů. [1]

### 1.2.3 Využití u sportovního vybavení

Tyto materiály se začínají dostávat masivně i do spotřebního odvětví sportu. Patrně nejznámější materiál je zde uhlíkové vlákno v kombinaci s dalšími vlákny a samozřejmě matricemi. [1]

Zástupci sportovních pomůcek mohou být:

- tenisové rakety, které musí být schopny odrazit tenisový míč s rychlosti 160 km/h,
- golfové hole, které získávají lehčí tělo a na oplátku možnost vyšší hmotnosti hlavy,
- cyklistická kola, u kterých větší flexibilita v designu napomáhá lepší aerodynamice,
- dále například snowboardy, lyže či windsurfy. [1]

### 1.2.4 Využití u letounů

Pro mnoho letounů se v posledních dekádách staly vláknové kompozity skvělou alternativou díky své velmi vysoké únavové mezi. Ukázalo se, že když jsou důkladně zváženy provozní podmínky a prostředí, kde se letoun používá, tak jsou komponenty velmi výdržné. [1, 4]

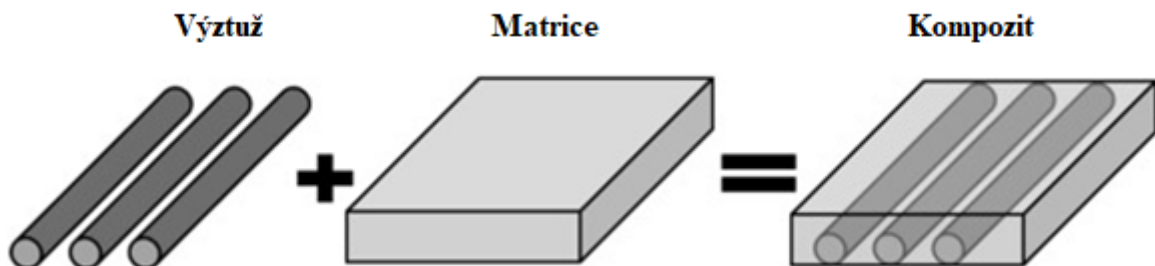
Původně byly kompozitní materiály používány převážně pro vojenské letouny, například F-14 a jeho kompozitní dveře a horizontální ocasní plochy. Tímto se inspirovalo i civilní letectví a kompozitní materiály zaměřily do dopravních letounů. Například Boeing 757 již využívá kompozitní materiály pro celou řadu komponentů, včetně většiny ovládacích prvků, jako je směrové a výškové kormidlo, křídélka i vztlakové klapky. [1]

Dnešní velká dopravní letadla, jako například Boeing 757 a Boeing 767, obsahují průměrně 1526 kg kompozitních materiálů, čímž ušetří 1445 kg na váze. [1]

Trendy ukazují, že využívání kompozitních materiálů v letectví bude růst. To však závisí také na rychlosti vývoje a objevování kombinací nových materiálů, které umožní dosahovat spektra možných kombinací vlastností u high-endových kompozitů. [1]

## 2 SLOŽKY KOMPOZITŮ

Kompozity jsou materiály složené alespoň za dvou různých složek s cílem kombinace vlastností, jako například snížení hmotnosti při zachování stejné pevnosti.[1, 5]



Obrázek 2 Skladba kompozitního materiálu [5]

Skládají se z matrice a z výztuže. Pro matrice se dá použít mnoho materiálů v podobě termoplastů i termosetů. Pro výztuž je možné použít také široké spektrum materiálů, ať už tkanin a návinů, které jsou složeny z vláken, tak i voštin. [1]

Cílem kompozitní sestavy je dosažení co nejefektivnějšího přenosu působících sil pomocí vláken kompozitu. Z důvodu rozdílnosti chemických složení vláken a kompozitů se používají předúpravy výztuží pomocí apretury. Apertury se vyrábějí z organosilanů přidávajících se do lubrikace pro prevence abrazy výztuží. Apertura s dalšími funkčními materiály tvoří mezifázi mezi výztuží a matricí. [2]

### 2.1 Matrice

Pod matricí se u kompozitů myslí materiál, kterým je prosycována nosná část. [2]

#### 2.1.1 Funkce a vlastnosti

Matrice slouží pro napojování jednotlivých výztuží k sobě a následné přenášení zatížení na vlákna. Přenos zatížení zajišťuje adheze na fázovém rozhraní vlákna a matrice. Pro správné spojení matrice s vlákny musí mít matrice vhodnou viskozitu a povrchové napětí. Vlákna se pak dobře smočí bez vzniku bublin. [2]

Po vytvrzení matrice zajišťuje geometrickou polohu spolu s tvarovou stálostí. Zajišťuje také přenos namáhání na vlákna. Neméně důležitá role je také ochrana výztuží před vnějším prostředím. [2, 6]

Výběr matrice je velmi důležitý, protože udává podmínky, za kterých může být kompozitní sestava použita. Významné vlastnosti, na které je nutné brát zřetel, jsou:

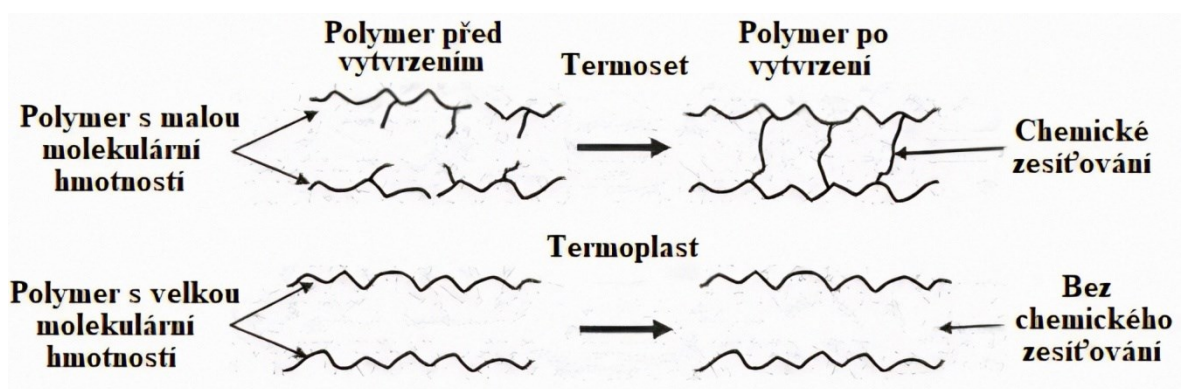
- Maximální únosná teplota,
- Odolnost proti navlhání a nasákání,
- Teplotní stabilita,
- Oxidační stabilita,
- UV stabilita. [6]

### 2.1.2 Typy matric

Typy matric můžeme dělit na 2 velké skupiny, podle toho, zda se jedná o termosety nebo termoplasty. Do termosetů řadíme například epoxidy, polyuretany, polyestery, vinyl estery, kyanátové estery, polyimidy či polyuretany. Termoplastické pryskyřice jsou v praxi mnohem méně využívány a nemají zdaleka takový výčet komečních materiálů jako termosetové pryskyřice. Pro příklad si můžeme uvést polyetheretherketon (PEEK) či polypropylen (PP) [1, 6]

Mechanismus zesíťování termosetů probíhá třírozměrným zesíťováním makromolekul, čímž se stane materiál nerozpustným a neroztavitelným. Samotné zesíťování probíhá chemickou reakcí, která je poháněna dodaným teplem. Poté co se pryskyřice zesíťuje, tak ztuhne a již ji není možné roztavit. [6]

Oproti termosetům nejsou termoplasty chemicky síťovány. Z tohoto důvodu nevyžadují dlouhé vytvrzování. Termoplasty je možné roztavit a přetvářet do jiných tvarů. [6]



Obrázek 3 Porovnání struktury termosetu a termoplastu [6]



### 2.1.2.1 Epoxidové pryskyřice (EPR)

Jedná se o nejvyužívanější pryskyřice u vysoce výkonnostních kompozitních materiálů používaných pro nižší až střední teploty, tedy do 135°C. [6, 7]

Epoxidové pryskyřice mají v porovnání s ostatními materiály skvělou pevnost a adhezi. Další výhodou epoxidů je jeho univerzální zpracovatelnost. [6, 7]

Za normální teploty je epoxidová pryskyřice v kapalném až pevném stavu a může obsahovat rozpouštědla. Většinou obsahuje v molekule 2 epoxidové sloučeniny skupiny, které jsou nezbytné pro stavbu makromolekuly. Pro zesíťování je nutno k pryskyřici přidat tvrdidlo, které započne reakci. [2, 7]

Epoxidy jsou jako matrice hojně využívány v leteckém průmyslu. Jejich nevýhodou je velmi náročná recyklace. Z tohoto důvodu by bylo pro podobné aplikace vhodné nalézt ekvivalentní náhradu s možností efektivnější recyklace. [8]

Vlastnosti epoxidových pryskyřic:

- Cenově náročnější oproti ostatním pryskyřicím,
- Je nutno dodržovat přesný stechiometrický poměr pryskyřice a tvrdidla a zároveň jsou také hůře zpracovatelné než polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice,
- Z důvodu svých vynikajících mechanických vlastností je vhodný v kombinaci s vysokopevnostními vlákny,
- Má dobrou adhezi s mnohými vlákny,
- Chemická odolnost epoxidů se odvíjí od druhu tvrdidla. [2]

### 2.1.2.2 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UPR)

Jejich využití je teplotně podobné jako u epoxidových pryskyřic, tedy do 135°C. Využívají se však pro méně náročné kompozity skrze její horší mechanické vlastnosti. Dalším negativem je horší odolnost proti vnějšímu prostředí než mají epoxidové pryskyřice. [6]

Nenasycená polyesterová pryskyřice se skládá z pravidla z nenasycené karbové kyseliny a ještě alespoň jedné další složky, která je alkohol. Pryskyřice je rozpuštěná v monomerním rozpouštědle, nejčastěji ve styrenu. Styren je s touto pryskyřicí kopolymerizovatelný. [2]

Mezi typické vlastnosti pryskyřice můžeme řadit to, že je pryskyřice levná a spolehlivá. Má dobrou odolnost proti povětrnostnímu namáhání. Její vhodné použití je ve formě lící hmoty. V rámci zpracování bohužel dochází k velkému smrštění, které se pohybuje mezi 6 % až 9 %. Velkou roli ve smrštění hraje zgelovatění materiálu. Při výběru jednotlivých složek obsahuje širokou škálu katalyzátorů i urychlovačů. Z důvodu obsahu styrenu klade materiál velké nároky na životní prostředí. [2]

### **2.1.2.3 Vinylesterové pryskyřice (VER)**

Má velmi podobné vlastnosti jako polyesterové pryskyřice a proto se také používá spíše do komerčních kompozitů bez vysokých nároků. [6]

U vinyl esterových pryskyřic probíhá zesíťování na konci metakrylátových skupin, kde reagují esterové vazby. Pryskyřice je rozpuštěná v monomerním rozpouštědle, nejčastěji ve styrenu. Styren je s touto pryskyřicí kopolymerizovatelný. [2]

Při porovnání vinylesterových pryskyřic s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi lze říct, že VER je o něco dražší, ale také houževnatější. Při zpracování platí velká variabilita z důvodu různosti dávkování styrenu a urychlovače. [2]

Využívají se jako náhrady v prostředí s vysokým korozním namáháním, například pro chladicí věže, pračky, potrubí, stavba lodí. Dále je materiál využitelný díky své houževnatosti ve formě výlisků, například pro nárazníky aut. [2]

### **2.1.2.4 Kyanátové esterové pryskyřice (CER)**

Tento relativně nový materiál má především výhodu v menší nasákavosti vlhkosti a v atraktivních elektrických vlastnostech. To si však bohužel nese také vysokou cenu. [6]

Chemické složení: Složení komerčně dostupných kyanátových esterových pryskyřic se nejčastěji vyrábí z halogenidu kyanogenu, například chloridu kyanogenu, spolu s alkoholem nebo fenolem v přítomnosti terciálního aminu. [1]

Materiál má nižší hustotu příčných vazeb, čímž má více volného prostoru. Toto vyúsťuje v:

- Nižší absorpci vlhkosti,
- Malé smršťování,
- Malý koeficient teplotní roztažnosti,
- Malou dielektrickou konstantu,
- Malé dielektrické ztráty. [1]

Materiál se s výhodou používá u výroby radomů, tedy ochranných krytů radarových systémů. Tyto kryty jsou tenké štíty, které chrání radary před povětrnostními vlivy a jiným mechanickým poškozením. Největší výhodou pro toto použití tkví v elektrických vlastnostech, protože materiál je vysoce propustný elektromagnetickým signálem. Radomy se velmi často používají na vyspělých letadlech.

S ohledem k objemu výroby se CER pryskyřice využívají nejvíce v odvětví elektronických komponent. Plně zde totiž nahrazuje epoxidové systémy. Majoritní využití je zde u desek s plošnými spoji. Výhody jsou ve vysoké teplotní odolnosti, dobrých dielektrických vlastnostech, velmi nízkém obsahu chloridů, nízké absorpci vlhkosti a možnosti úpravy pro splnění požadavků hořlavosti.[1]

### **2.1.2.5 Polyimidové pryskyřice (PIR)**

Polyimidové pryskyřice mají využití zejména při použití za vysokých teplot. [6]

Chemicky se polyimidové pryskyřice dělí na 2 typy. První je ve formě termoplastických imidů vyráběných pomocí kondenzační reakce mezi anhydridy a diaminy. Druhý typ jsou polyimidy s příčnými vazbami získané pomocí adiční reakce z imidových monomerů či polymerů.[1]

Dle jednotlivých složení mohou teploty dosahovat až 315°C nárazově a až 230°C pro delší časové úseky. Materiál má excelentní mechanické i adhezivní vlastnosti za pokojových i zvýšených teplot. Materiál je také označován nehořlavostí, takže nebude podporovat další hoření. [1, 6]

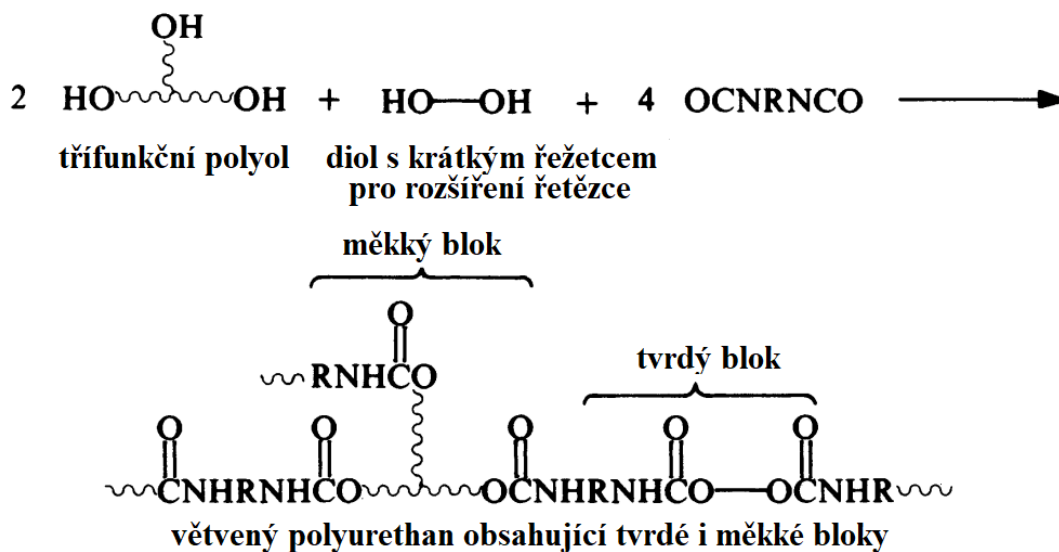
Polyimidové pryskyřice se využívají pro tekuté krystaly. Fotosenzitivní polyamidy se využívají pro mikroelektroniku. [9]

### 2.1.2.6 Polyuretanové pryskyřice (PUR)

Polyuretany jsou organické materiály s vlastnostmi dosahujících kvalit epoxidových systémů a proto se jeví jako dobrá náhrada epoxidových pryskyřic. Jeho výhodou také spočívá v již zmíněné problémové recyklaci epoxidů. Polyuretany se totiž dají chemicky zrecyklovat pomocí solvolýzy. [8]

Polyuretan se vyrábí polymerační reakcí dvou látek, obecně označovaných A a B. Vznik polyuretanu můžeme dle literatury dělit na 2 přístupy a to na výrobu s jednorázovou polymerací a pak na výrobu s předpolymerací. [10, 11, 12]

Při jednorázové polymeraci diisokyanáty nebo polyisokyanáty zastupují komponent A. Polyol s diolem, který má krátký řetězec, nebo s aminem, který rozšiřuje řetězec, tvoří komponentu B. Tyto jsou smíchány za použití katalyzátorů, plniv, změkčovadel a případně dalších používaných přísad. Směs je následně aplikována a za tepla vytvrzována. Alternativou vytvrzování za tepla je použití vysokého množství směsných katalyzátorů nebo vhodně reagujících izokyanátů a materiálů obsahujících vodík. [10]



Obrázek 4 Výroba polyuretanu jednorázovou polymerací [10]

Jejich hořlavost i rychlost hoření na chemickém složení a na skupenství. Při hoření pevného materiálu jsou plameny výsledkem rozkládání materiálu. Při rozkládání materiálu se uvolňují hořlavé plyny, které následně hoří a vytváří zdroj dalšího tepla. Pokud jsou uvolňované plyny schopny držet materiál na rozkladné teplotě, tak materiál nadále samovolně hoří i bez původního zdroje tepla. [13]

Hořlavost lze ovlivňovat pomocí retardantů hoření. Výběr těchto retardantů závisí na mnoha faktorech, například omezení na dlouhodobé degradování materiálu, zdravotní a bezpečnostní zabezpečení, atp. Fungují na principu absorpce tepla, což vede k brždění šíření ohně. Pro pevné polyuretany lze použít široké spektrum retardantů, například:

- DEEP,
- Uhličitán vápenatý,
- Síran barnatý,
- Trihydrát hliníku. [13]

Příklad z komerčně dostupných výrobků můžeme najít například na stránkách firmy Easy Composites Ltd. v technickém listu pro polyuretan s názvem *Xencast P6 Toughened Polyuretane Resin*. Tento se skládá z polyolu a isokyanátu. Při větší tloušťce je dle katalogového listu také doporučeno přidat trihydrát hliníku jako plnivo pro předejití přehřátí polyuretanu. Trihydrát hliníku totiž slouží jako retardant hoření. [14, 15]

*Tabulka 2 Tabulka vlastností Polyuretanu Xencast P6 v nevytvrzeném stavu [14]*

Vlastnost	Jednotka	Součást A	Součást B	Kombinace
Materiál	-	Složený polyol	Isokyanát	Polyuretan
Vzhled	-	Čiráka palina	Čiráka palina	Čirá kapalina
Viskozita při 25°C	mPa*s	300-500	100-150	100-350
Hustota při 25°C	g/cm <sup>3</sup>	1.25-1.30	1.08-1.13	1.16-1.21
Minimální tloušťka odlití	mm	-	-	2
Maximální tloušťka odlití	mm	-	-	15

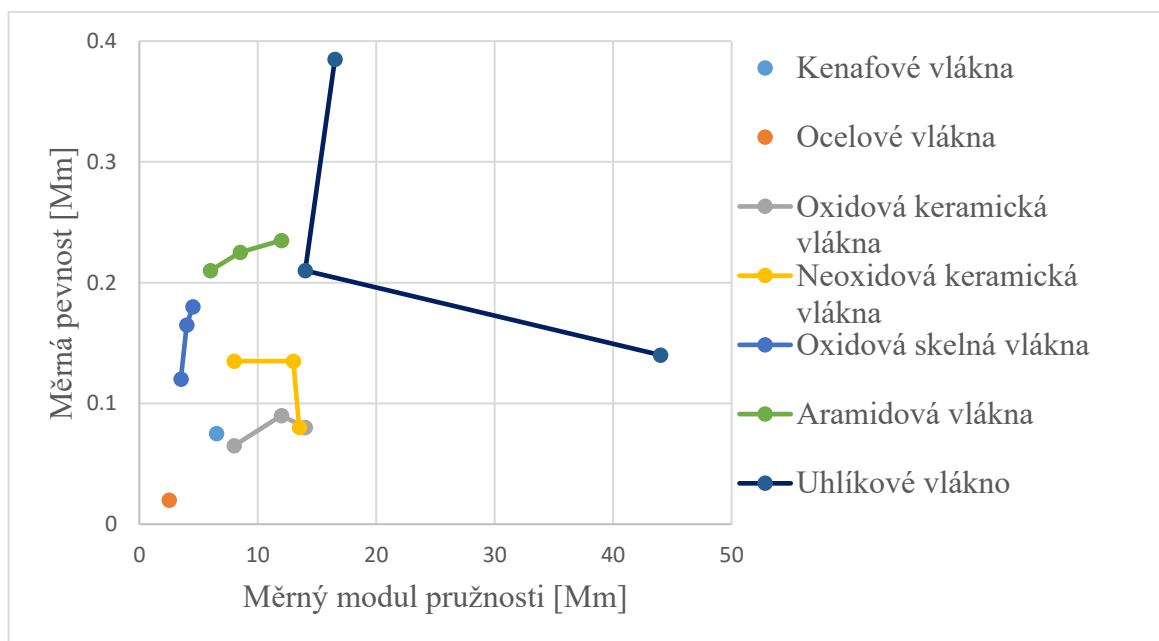
## 2.2 Výztužné vlákna

Výztužená vlákna kompozitů jsou klíčovou složkou kompozitu. Při pohledu na kompozit z mechanického hlediska jsou to právě ony, jež zajišťují velkou část mechanických vlastností. [9]

### 2.2.1 Funkce a vlastnosti

Výztužná vlákna polymerně matricových kompozitů (PMC) jsou hlavním faktorem pro určení mechanických vlastností. Můžeme je dělit na vlákna uměle vytvořená a na vlákna přírodní [1, 9, 16]

Jejich užitná hodnota závisí především na pevnosti a modulu pružnosti. V aplikacích, kde záleží také na hmotnosti, užitnou hodnotu určuje také hustota. V případě zahrnutí hustoty jako jednoho z rozhodujících faktorů začínáme uvažovat s měrnou pevností a měrným modulem pružnosti, kterou jsou běžně určovány v jednotkách  $Mm$  ( $10^6$  m). [1]



Obrázek 5 Měrné mechanické vlastnosti jednotlivých vláken [1]

Dalším důležitým faktorem je houževnatost vláken. Tato veličina ukazuje, kolik energie je materiál schopen přesunout do plastické deformace před tím než praskne. Vysoké houževnatosti dosahují například skelná vlákna. [1]

V některých situacích mohou být důležité i jiné vlastnosti než mechanické, v závislosti na použití. Někdy mohou být důležité elektrické vlastnosti a to buď vysoká vodivost nebo

naopak elektrická izolace nebo vlastnost redukování vibrací, například aby byl díl v provozu tišší. [1]

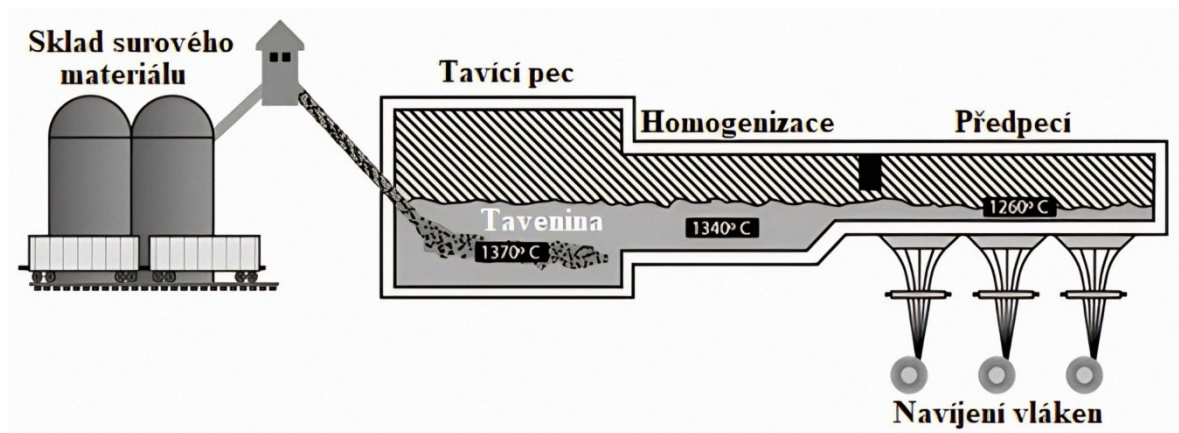
## 2.2.2 Typy výztužných vláken

Nejběžnější komerčně dostupné vlákna jsou skleněná, aramidová, uhlíková a keramická. [1]

### 2.2.2.1 Skelná vlákna

Sklená vlákna, neboli anglicky Glass Fiber (GS), se řadí mezi nejuniverzálnější vlákna, co se kompozitů týče. [1]

Suroviny pro výrobu skleněných vláken všech druhů jsou  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{Na}_2\text{O}$ . Dle poměrů jednotlivých složek dostáváme skelné vlákna s různými vlastnostmi. Složky jsou vloženy do sklářské pece, kde se při teplotě  $1370^\circ\text{C}$  roztaví a několik dní čirí. Následně se v tekutém stavu zavedou do spřádacích trysek z platinové slitiny. Z těchto trysek materiál pomalu vytéká a rychle tuhne do tvaru vláken. Ztuhlá vlákna dosahují tloušťky okolo 2 mm. Vlákna se při navíjení dleží a tloušťka se zmenšuje na 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ . [2]



Obrázek 6 Proces výroby skelného vlákna [2, 17]

Charakteristické vlastnosti skelných vláken:

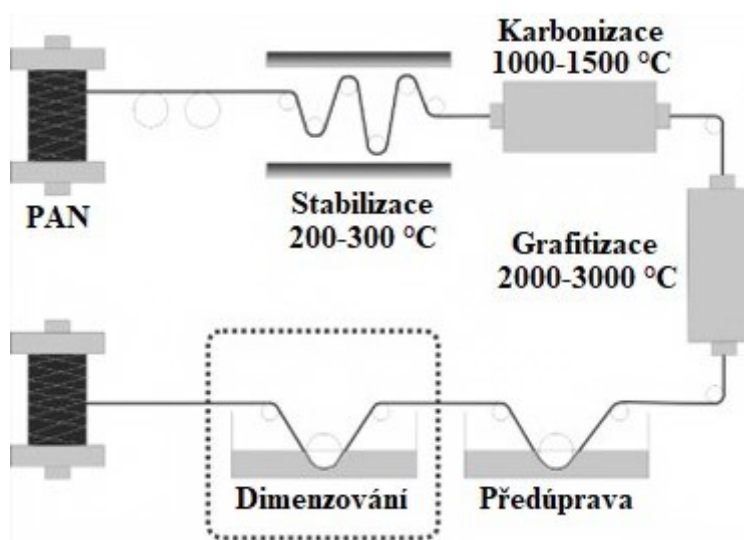
- Skelné vlákno je izotropní, jeho vlastnosti jsou tedy stejné jak v podélném, tak v příčném stavu,
- Modul pružnosti v tahu je podobný hliníku,

- Pevnost v tahu je podstatně vyšší než u ocelí a vzhledem k nízké hustotě skelného vlákna je měrná pevnost obzvláště vysoká,
- Dlouhodobě odolává teplotám při 250°C,
- Tepelná vodivost je podstatně nižší než u kovů,
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá a tudíž ohnivzdorná,
- Bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625 °C,
- Součinitel teplotní roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [2]

### 2.2.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna, neboli anglicky Carbon Fibres (CF), jsou charakteristická svou extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale naopak nízkou tažností. [2]

Výrobu uhlíkových vláken je možné provést dvěma způsoby. Technicky významnější je za použití polyakrylonitrilu. Ten je v prvním stupni nejprve dlužen z důvodu dosažení optimální orientace molekul ve směru vlákna. Poté jsou vlákna stabilizována při teplotě 200 až 300 °C za mechanického napětí s přístupem vzduchu. Při stabilizování vlákna probíhá dehydratace a přeměna na žebříčkovitý polymer. V druhém stupni se vlákna karbonizují na grafitickou strukturu v inerní atmosféře při teplotách do 1600 °C. Ve třetím stupni probíhá žihání vlákna až při 3000 °C. Tento proces připomíná rekrytalizaci. [2, 18]



Obrázek 7 Proces výroby uhlíkového vlákna [18]

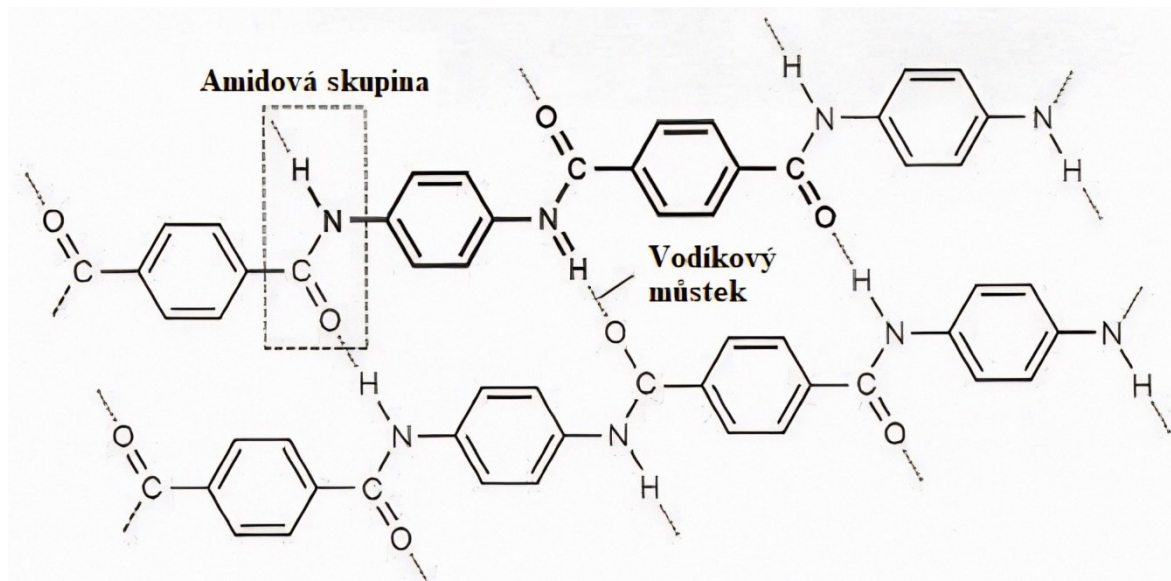


Charakteristické vlastnosti uhlíkových vláken:

- Jsou silně anizotropní,
- Mají progresivní chování – se stoupajícím zatížením se zvedá hodnota modulu elasticity,
- Vysoká pevnost i modul elasticity až do 500 °C,
- Nízká hustota – 1,6 až 2 g/cm<sup>3</sup>,
- Při delším skladování dochází k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost,
- Mimořádně vysoká korozivzdornost (výjma silně oxidačního prostředí),
- Dobrá elektrická i tepelná vodivost,
- Snášelnivost s tělesnými tkáněmi, možnost využití jako implantáty,
- Dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek,
- Mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání a tudíž jsou dynamické vlastnosti kompozitních materiálů lepší než u ostatních konstrukčních materiálů,
- Uhlíková vlákna jsou hořlavá, ale hoří velmi pomalu. [2]

### 2.2.2.3 *Aramidová vlákna*

Aramidová vlákna, neboli anglicky Aramid Fibers (AF), jsou tvořena na bázi organických polymerů s kovalentními vazbami, které jsou směřovány ve směru osy vlákna. Molekuly jsou navzájem spojovány vodíkovými můstky. Přednost těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. [2]



Obrázek 8 Struktura aramidových vláken [2]

Výroba aramidových vláken probíhá spřádáním vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá elementární vlákna se následně spojí a pro zlepšení zpracovatelnosti mnohokrát propírají, neutralizují a propírají aviváží pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností. [2]

Charakteristické vlastnosti aramidových vláken:

- Jedná se o výztužné vlákno s nejnižší hustotou  $1,45 \text{ g/cm}^3$ ,
- Jsou silně anizotropní, tedy rozdílná v různých směrech,
- Mez pevnosti v tahu je mnohem vyšší než mez pevnosti v tlaku,
- Jsou hydrofilní a proto musí být vlákna před použitím vysušena, protože by vlhkost ovlivňovala pevnost,
- Aramidová vlákna jsou náchylná na vystavení záření s vysokou energií, např. UV záření, skrze snížení pevnosti,
- Jakožto organické vlákno nevydrží vysokou teplotu, ve formě kompozitu do  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Vlákno je neroztavitelné, proto se dá použít např. pro protipožární obleky,
- Teplota skelného přechodu je  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , teplota rozkladu je  $480 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Po vytvrzení jsou kompozity z aramidových vláken těžko obrobitelné. [2]

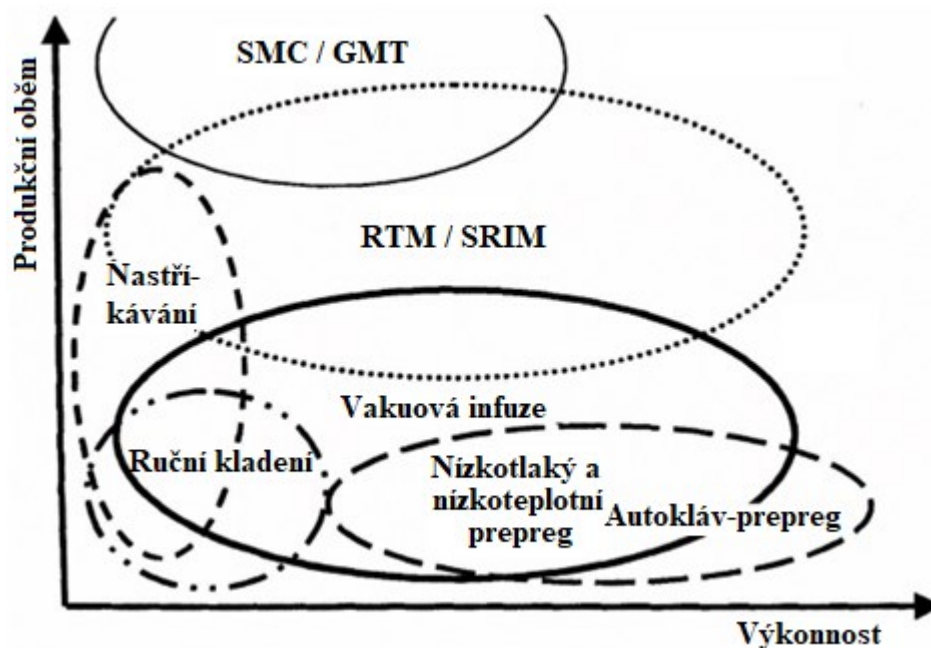
### 3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ

Na rozdíl od tradičních materiálů, které jsou při začátku výrobního procesu finálního dílu již v pevném stavu a běžně ve formě univerzálních polotovarů, je situace u kompozitů odlišná. U kompozitů jsou většinou složky připraveny samostatně a poté spojeny. Kupříkladu vyrobená rohož se nastříhá na příslušnou velikost a tvar a až poté se pokračuje v další operaci, která se určuje v závislosti na použité technologii. [1]

Typ technologie výroby určuje především:

- Sériovost dílce,
- Velikost a členitost výrobku,
- Kvalita povrchu,
- Požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost,
- Limit nákladů. [19]

Pro porovnání sériovosti většiny výrobních technologií lze nahlédnout na následující graf.



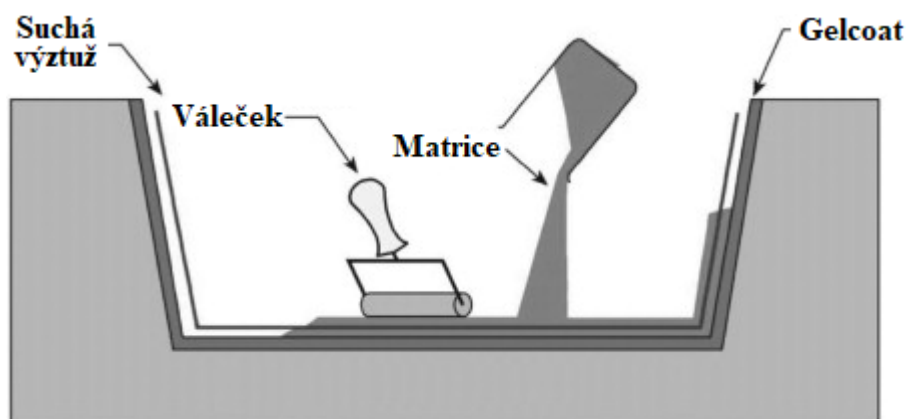
Obrázek 9 Sériovost jednotlivých laminovacích technologií [1]

Po vybrání vhodné výrobní metody, všech materiálů a výroby formy vyžaduje výroba kompozitních dílů důkladnou kontrolu procesu, zejména předepsaných tlaků a teplot. [1]

### 3.1 Ruční kladení

Ruční kladení, neboli anglicky *hand lay-up*, se řadí mezi nejstarší a nejjednodušší metody, ale zároveň stále také mezi nejrozšířenější. [19]

Nástrojem pro tuto metodu je negativní forma. Ta se nejprve důkladně naseparuje. Po separaci většinou následuje nanesení gelcoatu, sloužící jako povrchová vrstva výrobku. Po částečném zatuhnutí gelcoatu se začnou skladat jednotlivé vrstvy výztuží, které se prosycují matricí. Rovnoměrné rozprostření matrice zajišťuje následné roztírání štětcem či rolování válečkem. [19, 20]



Obrázek 10 Laminace ručním kladením [20]

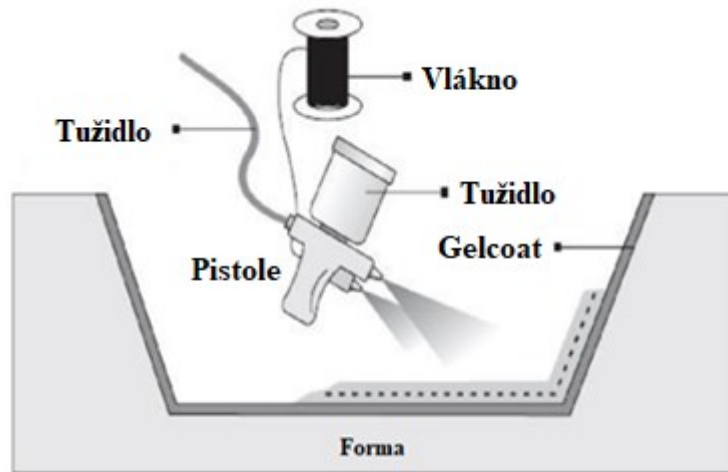
Výhodou této technologie je její jednoduchost a velká volnost při designu dílů a také relativně jednoduché úpravy, pokud je to potřeba. Zároveň je technologie ve srovnání s ostatními levná v počátečních fázích výroby, tedy není potřeba specializovaných strojů. [1]

Nevýhody však spočívají ve velké nepraktičnosti pro použití na vyšší sérii z důvodu dlouhých cyklů na díl. Výsledný díl má pouze jednu pohledovou stranu na straně formy při laminaci. Dalším úskalím je nemožnost vyrobit ostré rohy a hrany. [1]

### 3.2 Nastříkávání

Nastříkání, neboli anglicky spray-up, je technologie velmi podobná ručnímu kladení. [19]

Proces je až po nanášení gelcoatu totožný. Po částečném vytvrzení gelcoatu se však začne matrice nastříkávat spolu s nasekanými vlákny pomocí speciální pistole. [1]



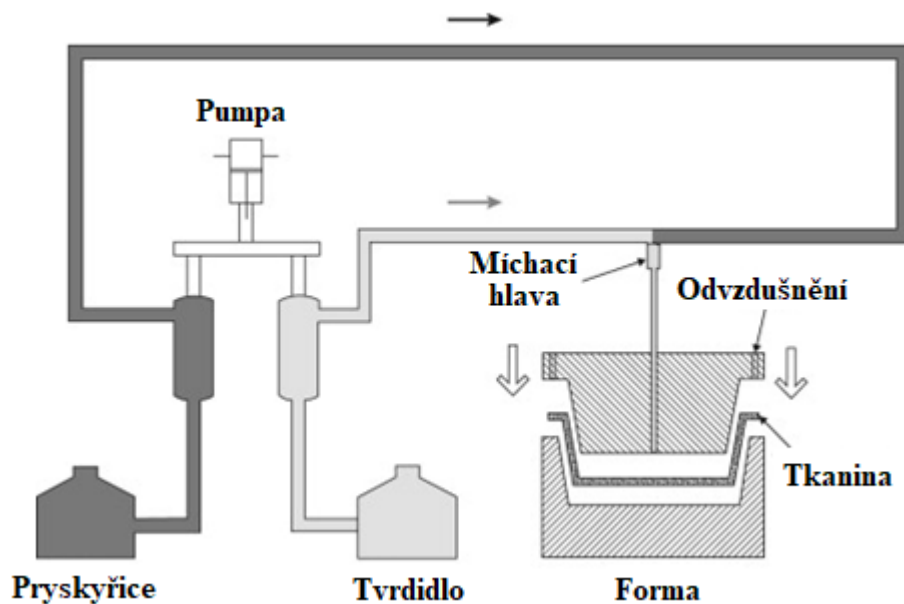
Obrázek 11 Laminace nastříkáním [19]

Výhody i nevýhody jsou vzhledem k podobnosti technologie k ruční laminaci totožné. [1]

### 3.3 RTM

Technologie RTM, pocházející ze zkratky z anglického Resin Transfer Molding, patří do skupiny označované jako tzv. kapalné kompozitní tvarování. Technologie se řadí do středních sérií, tedy v tomto ohledu lepší než ruční laminování, ale horší než lisování. [1, 19]

Výrobní postup technologie začíná umístěním výztuží do utěsněné dutiny formy. Po uzavření se začne za zvýšeného tlaku vstříkovat předpřipravená matrice do dutiny. Po vytvrzení matrice je možno díl vyjmout. Následně je nutno odstranit vtok a v případě potřeby také okraje, které byly ve styku s těsněním. [1, 19, 21]



Obrázek 12 Laminace pomocí RTM [21]

Velkou výhodou technologie je její rozmanitost, kdy se dá velmi flexibilně pohybovat se vstupními parametry. Technologie je také automatizovatelnější než například ruční laminování a není tedy z daleka tak náročná na obsluhu. Při vyrábění dílů ve vyšších přesnostech se jednodušeji ovládá tloušťka dílce, protože je udána dutinou forem. Další výhodou je pohledová strana z obou stran dílů. [1]

Nevýhoda je však ve vyšší pořizovací ceně celého aparátu. V odvětví aerospace však tvoří možné slevnění výroby při přechodu z dražší prepregů. [1]

Nadstavbou této technologie je VARTM, která navíc obsahuje výstup do komory obsahující vákuum, což napomáhá prosycování tkanin. [19]

### 3.4 SRIM

Technologie SRIM, pocházející z anglického Structural Reaction Injection Molding, patří taktéž do skupiny kapalného kompozitního tváření. [1]

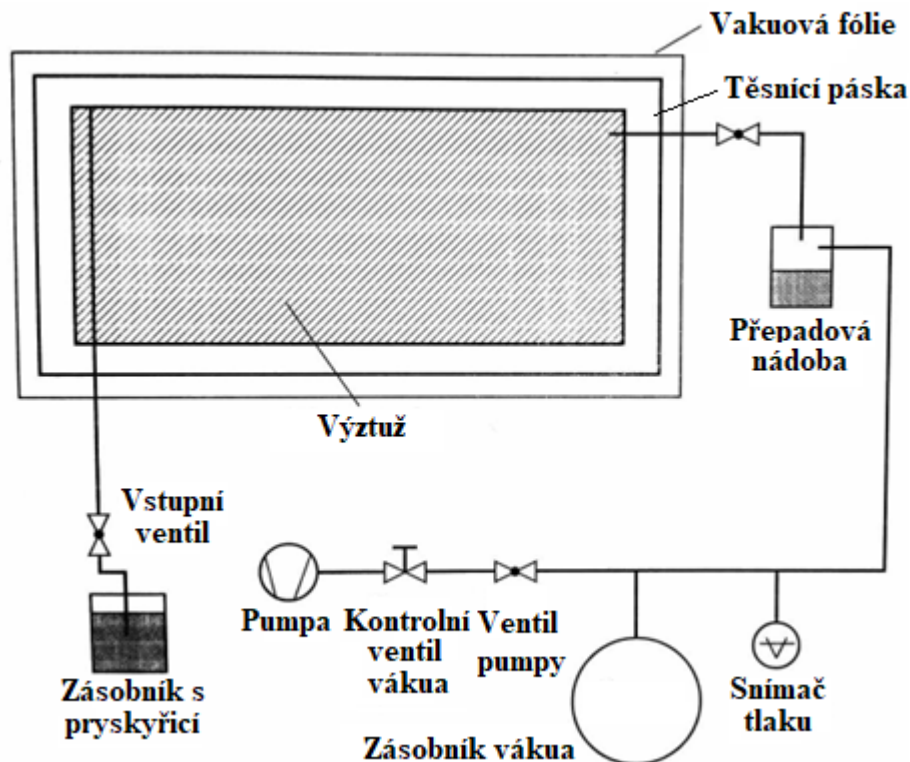
Tato technologie je velmi podobná technologii RTM. Velmi zde však záleží na chemii nízkoviskozních polyuretanů s velmi rychlou reaktivní rychlostí. Přívod obsahuje 2 větve, jedna pro isokyanát a druhá pro polyol, případě navíc 3. větev pro přidávání aditiv. Nádrže jsou vyhřívané a průběžně jsou promíchávány pro zaručení konzistentních výsledků. Mixovací hlava je vybavena samočištěním a forma je vyhřívána pro zajištění rychlejší reakce. [1]

Výhodou oproti RTM je v rychlosti výroby dílů, avšak za vyšší náročnosti i pořizovací ceny. [1]

### 3.5 Vakuová infuze

Vakuová infuze je technologicky odvozena z technologie RTM. Rozdíl mezi RTM a vakuovou infuzí, kromě formy, spočívá v rozdílnosti postupu tlaků. U vakuové infuze se pracuje pouze s vakuem, namísto zvyšování tlaků. [1, 20]

Principiálně tedy technologie funguje naopak, než RTM. Pumpa vytvoří vakuum v celém systému. Následně se otevře vstupní ventil u zásobníku s pryskyřicí. Zásobník je umístěn neuzavřen a za atmosferického tlaku. V důsledku rozdílu tlaků se začne pryskyřice nasávat do systému. Přebytečná pryskyřice se nasákne do odsávací rohože a vyteče do přepadové nádoby. Takto se následně nechá vytvrdit. [1, 2, 19]



Obrázek 13 Laminace pomocí vakuové infuze [1]

Technologie má největší výhodu v možnosti výroby velkých dílů. Formy jsou také levnější než u vysokotlakých dílů skrze menší tlaky. [1]

Nevýhodou je opět to, že díly jsou pohledové pouze z jedné strany a také to, že se jedná o ruční neautomatizovanou výrobu. Je vhodné tedy na menší série. [1]



## 4 ZKOUŠKY KOMPOZITŮ V LETECTVÍ

Všechny aspekty vlastností kompozitních materiálů, které jsou anizotropní a nehomogenní a jsou určeny pro použití v náročných konstrukčních oblastech, vyžadují rozsáhlé testování. Pro určení objemových charakteristik je nezbytné provádět testy tahem, tlakem a smykovými zkouškami. [22]

Zkoušení kompozitních materiálů pro letecké aplikace je bez pochyb jedna z nejnáročnějších oblastí testování. Na laboratoře je kladena řada výzev pro dodržení všech podmínek. Mezi nejvýznamější patří:

- Všechny zkoušky musí probíhat v souladu s širokou škálou norem,
- Schopnost udržet a prokázat přesné nastavení široké škály úchytů a přípravků,
- Rychlá a efektivní výměna zkušebních přípravků, pro umožnění testování široké škály dílů,
- Udržení správného zkušebního prostředí. [22]

Testování kompozitních materiálů bylo standardizováno prostřednictvím řady organizací. Klíčovými mezinárodními standardy pro tyto zkoušky jsou normy ASTM, ISO a CEN (Evropský výbor pro normalizaci).

### 4.1 ASTM normy

Všeobecně jsou v letectví doporučovány a také často využívány ASTM normy. Doporučení k těmto, můžeme nalézt například v příručce MIL-HDBK-17. Je zde také odkázáno na konkrétní normy ke konkrétním zkouškám pro kompozity:

- Pro tahové zkoušky kompozitů je odkázáno na ASTM D3039,
- Pro tlakové zkoušky kompozitů je odkázáno na ASTM D3410,
- Pro ohybové zkoušky kompozitů je odkázáno na ASTM D790. [23]

Mimo norem se lze také dočíst různých dovysvětlení v již zmíněném MIL-HDBK-17 a DOT/FAA/AR-03/19. Obě jsou však nezávazné a je nutno se neodchylovat od samotných norem. [24, 23]

#### 4.1.1 Tahová zkouška kompozitních materiálů

Tahová zkouška probíhající podle normy ASTM D3039 slouží pro určení mechanických vlastností zkoušených v jedné rovině. Pro tuto zkoušku jsou materiály omezeny na polymerní matrice vyztužené vlákny s vysokým modulem. Dalším omezením je symetričnost materiálu s ohledem na směr zkoušení. [25]

Pomocí této zkušební metody lze získat následující vlastnosti materiálu:

- Mez pevnosti v tahu,
- Mezní deformace v tahu,
- Modul pružnosti v tahu,
- Poissonova konstanta v tahu,
- Přechodová deformace. [25]

Vzorek je vyráběn z tenkého rovného materiálu s konstantním průřezem. Jednotlivé rozměry vzorku jsou udány v následující tabulce. V případě že se používá podložka ochraňující vzorek, tak je také nutno dodržet předepsané parametry, které jsou taktéž uvedeny v následující tabulce. [25]

*Tabulka 3 Požadavky na rozměry vzorku a podložky k tahové zkoušce [25]*

	Parametr	Požadavek
Vzorek	Tvar	Konstantní průřez obdelníku
	Minimální délka	Upnutí + dvojnásobek šířky + vzdálenost měrky
	Šířka	Dle skutečného dílu
	Tolerance šířky	±1% šířky
	Tloušťka	Dle potřeby
	Tolerance tloušťky	±4% tloušťky
	Rovinnost	Rovná s lehkým tlakem prstu
Podložka	Materiál	Dle skutečného dílu
	Orientace vláken	Dle skutečného dílu
	Tloušťka	Dle skutečného dílu
	Rozdílnost tloušťky výložek	±1% tloušťky podložky
	Úhel zkosení výstupku	Od 5° do 90° včetně
	Přechod podložky na vzorek	Postupné zužování vzorku

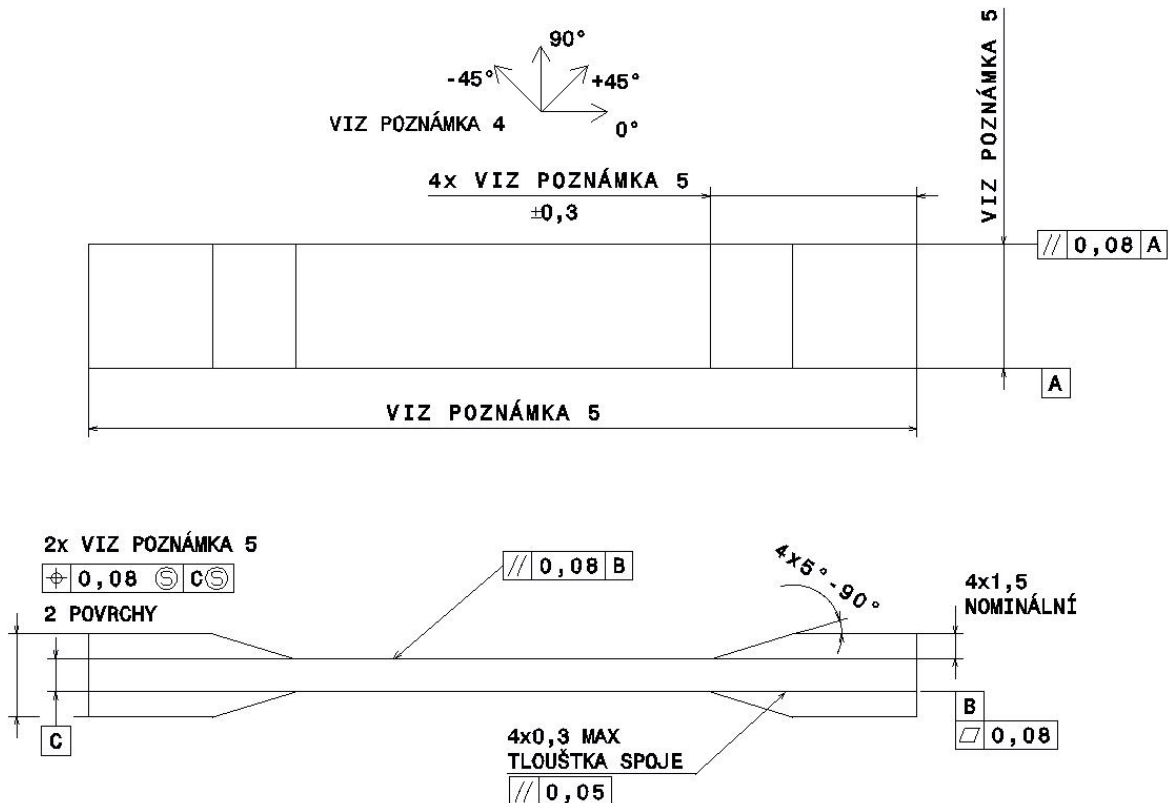
Další tabulka pak ukazuje normou doporučené rozměry vzorků i proložek, které spolehlivě fungují pro širokou škálu materiálů. [25]

*Tabulka 4 Doporučení pro geometrii vzorků pro tahovou zkoušku [25]*

Orientace vláken	Šířka [mm]	Celková délka [mm]	Tloušťka [mm]	Délka podložek [mm]	Tloušťka podložek [mm]	Zkosení podložek [°]
0° jednosměrné	15	250	1.0	56	1.5	7 nebo 90
90° jednosměrné	25	175	2.0	25	1.5	90
Vyvážené a symetrické	25	250	2.5	Smirkové plátno	X	X
Náhodné, přerušované	25	250	2.5	Smirkové plátno	X	X

Pro uchycení vzorku není vyžadováno použití podložky mezi vzorkem a upínacími čelistmi. Jsou však doporučeny z důvodu předejití poškození vzorku v nevhodném místě a to zejména u jednosměrně vyztužených kompozitů. [25]

Norma dále udává výkres pro výrobu vzorku i případné podložky, který je vyobrazen na následujícím obrázku.



**POZNÁMKY K VÝKRESU:**

1. INTERPRETOVAT VÝKRES V SOULADU S NORMOU ANSI Y14.5M-1982 ZA NÁSLEDUJÍCÍCH PODMÍNEK:
2. VŠECHNY ROZMERY V MILIMETRECH S NÁSLEDUJÍCÍMI DESETINNÝMI TOLERANCEMI:  

ŽÁDNÉ DESETINÁSOBKY	.X	.XX
$\pm 3$	$\pm 1$	$\pm 0,3$
3. VŠECHNY ÚHLY MAJÍ TOLERANCI  $\pm 0,5^\circ$
4. TOLERANCE SMERU ORIENTACE VRSTEV VUCI ZÁKLADNE V ROZMEZÍ  $\pm 0,5^\circ$
5. POVRCHOVÁ ÚPRAVA NA OBROBENÝCH HRANÁCH NESMÍ PRESÁHNOUT  $Ra 1,6$
6. HODNOTY, KTERÉ JE TREBA UVÉST PRO NÁSLEDUJÍCÍ POLOŽKY, S VÝHRADOU PŘÍPADNÝCH ROZSAHU UVEDENÝCH V POLI VÝKRESU: MATERIÁLOVÉ USPOŘÁDÁNÍ, REFERENČNÍ ORIENTACE VRSTVY VZHEDEM K ZÁKLADNE A, CELKOVÁ DÉLKA, ROZMEROVÁ DÉLKA, TLOUSTKA KUPÓNU, MATERIÁL ZÁLOŽKY, TLOUSTKA PROLOŽKY, DÉLKA PROLOŽKY, ÚHEL ZKOSENÍ PROLOŽKY, LEPIDLO NA PROLOŽCE
7. V TÉTO OBLASTI NEJSOU POVOLENY ŽÁDNÉ NÁNOSY LEPIDLA

Obrázek 14 Výkres tahového vzorku s podložkami [25]

Výroba testovacích vzorků začíná výrobou kompozitní desky. Zde je důležitá kontrola uspořádání vláken pro zabránění zhoršení mechnických vlastností. Z desky se následně obráběním vytvoří finální tvar vzorku. Při obrábění je nutné brát zřetel na odštěpy, podkosity, hrubé povrchy či delaminace vzorku. Doporučené technologie obrábění jsou řezání, frézování a broušení. Nakonec je nutné vzorky také označit, aby se předešlo jejich promíchání. [25]

Vzorky jsou nejprve uloženy do laboratorních podmínek. Tyto jsou normou předepsány na  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  a  $50 \pm 10\%$  relativní vlhkosti. Za stejných podmínek probíhá i samotné testování, pokud není určeno jinak. Na základě výsledků z tahové zkoušky se následně vyhodnotí jednotlivé parametry materiálu. [24, 25]

#### 4.1.2 Tlaková zkouška kompozitních materiálů

Tlaková zkouška probíhající podle normy ASTM D3410 slouží pro určení mechanických tlakových vlastností zkoušených v jedné rovině. Pro tuto zkoušku jsou materiály omezeny na polymerní matrice vyztužené vlákny s vysokým modulem.[27]

Tlakové vlastnosti, které lze získat pomocí této zkušební metody jsou:

- Mez pevnosti v tlaku,
- Mezní deformace v tlaku,
- Modul pružnosti v tlaku,
- Poissonův poměr v tlaku,
- Přechodová deformace. [27]

Pro získání výsledků se vzorek spolu s připevněnými podložkami upne to klínových čelistí, vloží se do stroje a postupně se začne zatěžovat tlakem. Mezní napětí v tlaku materiálu, získané pomocí tohoto zkušebního tělesa a vzorku, lze zjistit z maximální síly přenesené před porušením. Deformace se sleduje pomocí snímačů tahu nebo posunutí, takže lze určit odezvu materiálu na napětí a deformaci, z níž se určí mezní únosnost. [27]

Vzorek je vyráběn z tenkého rovného materiálu s konstantním průřezem. Jednotlivé rozměry vzorku jsou udány v následující tabulce. V případě že se používá podložka ochraňující vzorek, tak je také nutno dodržet předepsané parametry, které jsou taktéž uvedeny v následující tabulce. [27]

Tabulka 5 Požadavky na rozměry vzorku a podložky k tlakové zkoušce [27]

	Parametr	Požadavek
<b>Vzorek</b>	Tvar	Konstantní průřez obdelníku
	Délka měřené části	Dle potřeby
	Šířka	Dle potřeby
	Tloušťka	Dle předpokládaného napětí dle normy
	Tolerance šířky	$\pm 1\%$ šířky
	Tolerance tloušťky	$\pm 2\%$ tloušťky
<b>Podložka</b>	Odchyly tloušťky na koncích podložek	$\pm 1\%$ tloušťky

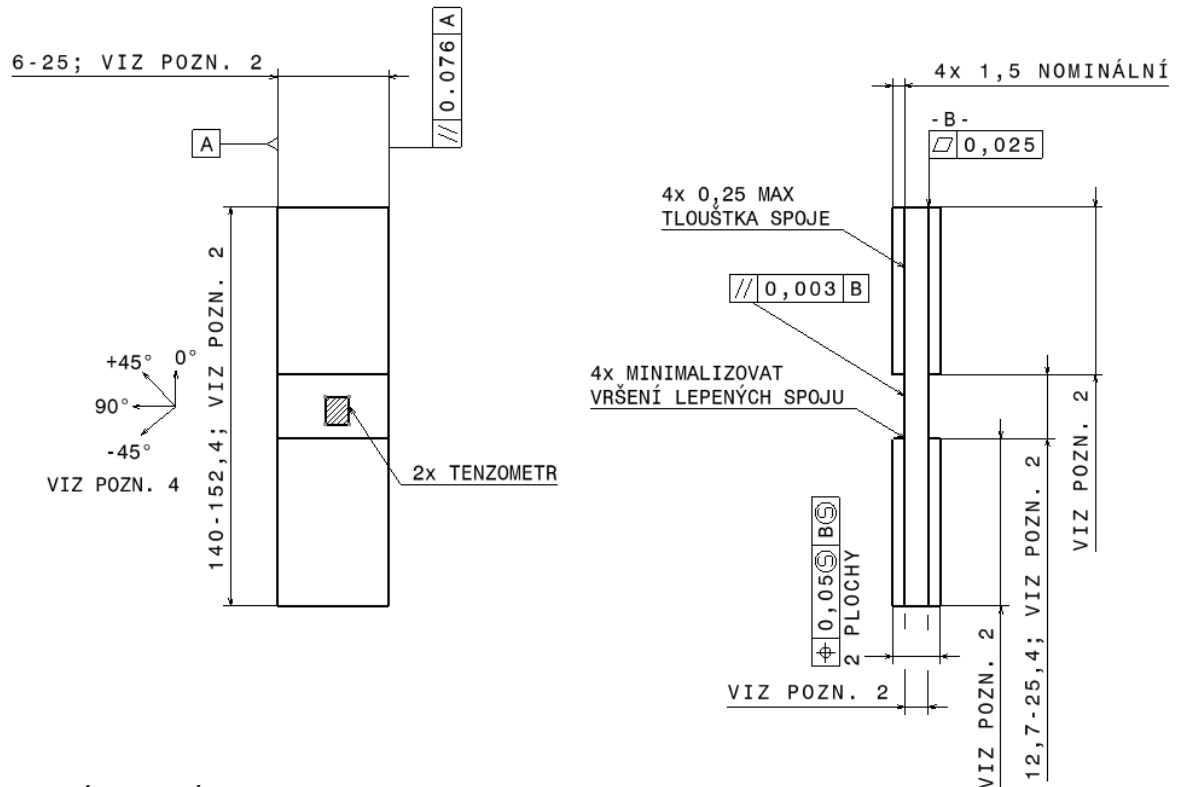
Další tabulka pak ukazuje normou doporučené rozměry vzorků i proložek. [27]

Tabulka 6 Doporučení pro geometrii vzorků pro tlakovou zkoušku [27]

Orientace vláken	Šířka [mm]	Měřená délka [mm]	Délka podložek [mm]	Celková délka [mm]	Tloušťka podložek [mm]
0° jednosměrné	10	10-25	65	140-155	1,5
90° jednosměrné	25	10-25	65	140-155	1,5
Speciální ortotropické	25	10-25	65	140-155	1,5

Pro uchycení vzorku není vyžadováno použití podložky mezi vzorkem a upínacími čelistmi. Jsou však doporučeny z důvodu předejití poškození vzorku v nevhodném místě a to zejména u jednosměrně vyztužených kompozitů. [26, 27]

Norma dále udává výkres pro výrobu vzorku i případné podložky, který je vyobrazen na následujícím obrázku.



**POZNÁMKY K VÝKRESU:**

1. Výklad výkresu podle ANSI Y14.5M-1982 a ANSI/ASME B46.1-1985
2. Hodnoty požadované nebo doporučené šířky, tloušťky, rozmerové délky, délky záložky a celkové délky jsou uvedeny v oddíle 8 a v tabulce 2 a 3 zkušební normy
3. Hodnoty materiálu, orientace vrstev, použití záložek, materiálu záložek, úhlu záložek a lepidla na záložky viz zkušební norma
4. Tolerance orientace vrstev v  $\pm 0,5^\circ$

*Obrázek 15 Výkres tlakového vzorku s podložkami [27]*

Výroba vzorků a jejich označení a samotné testování probíhá za totožných podmínek jako pro tahové vzorky v předchozí kapitole. [24, 27]

### 4.1.3 Ohybová zkouška kompozitních materiálů

Ohybová zkouška probíhá podle normy ASTM D790. Norma je určena pro zjišťování ohybových vlastností i u vlákniny vyztužených plastů, včetně vysokomodulových vláken. Zjištění vlastností probíhá pomocí 3 bodové ohybové zkoušky. [28]

Ze zkoušky je možno dostat následující vlastnosti:

- Napětí v ohybu,
- Ohybová pevnost,
- Posun v ohybové mezi kluzu,
- Nejvyšší dosažitelné napětí v ohybu,
- Deformace v ohybu,
- Modul pružnosti v ohybu. [28]

Přijatelné jsou zkušební vzorky vyřezané z plechů, desek nebo tvarovaných či vytlačovaných dílců nebo tvarované do požadovaných konečných rozměrů. Skutečné použité rozměry se měří v souladu se zkušební metodou D5947. Hloubka vzorku je definována jako tloušťka materiálu. Hloubka nesmí být větší než šířka. Průřez vzorků musí být obdélníkový s protilehlými stranami rovnými a rovnoběžnými a sousedními stranami kolmými po celé délce vzorku. [28]

Rozměry vzorků jsou určeny v závislosti na typu materiálu a způsobu jeho výroby. Například pro kompozity vyztužené vysokopevnostními vlákny musí být délka dostatečná, aby se udržel na čelistech rozevřených na 16 krát hloubky vzorku v případě, že je pevnost v tahu 8x větší než pevnost ve střihu. Avšak v případě, že má laminát relativně malou pevnou ve střihu a vysokou pevnost, tak je doporučeno 32x nebo až 40x hloubka vzorku. Pro vstřikované výrobky je jednoduše dáno 127 délka 12,7 šířka a 3,2 hloubka. Pro desky od 1,6 mm do 3,2 mm je šířka taktéž 12,7 a zároveň je nutno, aby byl vzorek o 10% a zároveň o 6,4 mm delší z každé strany, než je upnutí pro zkoušku. [28]

Pokud je to možné, původní povrch musí zůstat neobroben. Pokud to však není možné, brousí se jeden či oba povrchy pod podmínkou zaznamenání hloubky broušení z obou stran. Je nutno také specifikovat, která strana byla na straně tahu a která byla na straně tlaku. Pokud je nutno vzorek leštit, je nutno toto provádět ve směru podélném. [28]

Pro samotné zkoušky předepisuje podmínky prostředí při uložení a zkoušení norma ASTM D618 v návaznosti na rozměry vzorku a druhu procesu. Pokud je určeno specificky jinak z důvodu provozních podmínek finálního dílu, tak pro ten případ norma pozbývá na platnosti v parametrech, které se vymykají důvodnému předepsání. [28]



## 5 OPTIMALIZACE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ

Optimalizací vlastností kompozitních materiálů s polymerní maticí se zabývalo již mnoho výzkumů a proto v této části bude provedena rešerše studií změn vlastností za různých vstupních podmínek vytvrzování.

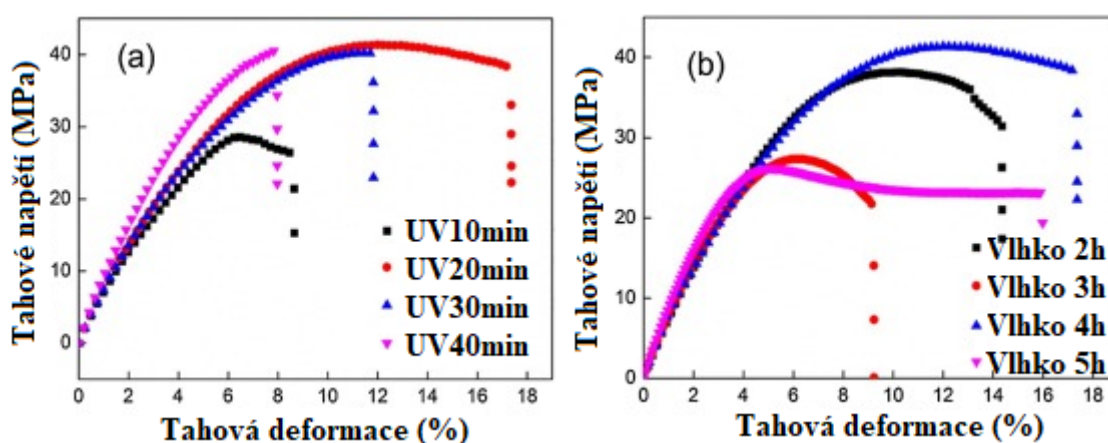
### 5.1 Způsob stanovení racionálních režimů vytvrzování produktů z polymerních kompozitních materiálů

Ze studie vyplývá, že gelovací čas se prodlužuje v závislosti na rychlosti ohřívání. A tím čím rychleji stoupá teplota matrice, tím více se prodlužuje doba gelace. [29]

Ze studie taktéž vyplývá, že teplotní vodivost a teplotní kapacita závisí na stupni vytvrzení. [29]

### 5.2 Vliv podmínek vytvrzování na strukturní vývoj a mechanické vlastnosti polyuretan-akrylátových povlaků vytvrzovaných UV zářením

Na PUA fóliích byla provedena jednoosá tahová zkouška s různou dobou vytvrzování UV zářením a vlhkostí, aby se zjistil vliv podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti PUA fólií. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny reprezentativní grafy, které ukazují, [12]



Obrázek 16 a 17 Mechanické vlastnosti při různých dobách vytvrzování UV zářením a vlhkostí [12]

U grafů s různými dobami vytvrzování UV zářením je na všech patrná nelineární oblast, která se nachází před bodem kluzu, kde dochází ke vzniku hrdla. Poté pouze vzorky s UV

10 min a UV 20 min představují pro nominální pokles napětí v důsledku lokálního poklesu plochy průřezu v bodě podél délky vzorku. Ve všech případech však téměř nedochází k dalšímu tažení za studena. U grafů s různými dobami vytvrzování vlhkostí se u všech vzorků projevuje jev krčkování, po kterém následuje pokles napětí. [12]

### **5.3 Vývoj výkonnosti polyuretanových elastomerních kompozitů v různých konstrukčních a vytvrzovacích prostředích**

Mechanické vlastnosti polyuretanových elastomerů jsou přímo závislé také na podmínkách vytvrzování. [11]

Studie zkoumá vlastnosti polyuretanu, který byl modifikován mikro práškem ultravysokomolekulárního polyethylenu. Následně byl tento polyuretan testován ve 3 různých prostředích:

- V pokojovém prostředí,
- V hygrotermálním prostředí,
- V chladném prostředí. [11]

Z výsledků studie vychází:

- Po 7 dnech vytvrzování za pokojových podmínek je dosaženo 95% finálních vlastností.
- V hygrotermálním prostředí je rychlost vytvrzování urychlena a finálních hodnot je dosaženo po 3 až 6 hodinách. Zároveň je však kvůli hygrotermálnímu prostředí dosaženo o 6 až 7 % zhoršené absorpce energie a o 50 až 60 % pevnosti a tuhosti materiálu.
- Chladné prostředí zpomalí vytvrzování do finálních vlastností až na 30 dnů a zároveň také zhorší vlastnosti o 12 až 14 % u schopnosti absorpce energie a o 45 až 50 % u pevnosti a tuhosti materiálu.
- Při vytvrzování polyuretanového elastomeru vykazuje silnou korelaci v pevnosti roztržení, v pevnosti v tahu i v prodloužení při roztržení. Koeficient korelace těchto 3 hodnot se pohybuje mezi 0,7 až 0,9.
- Vlastnosti pohlcování energie se postupně zvyšují a vykazují nelineární pozitivní korelaci s mechanickou pevností a pružností s korelačním koeficientem 0,89.

Tlumičí vlastnost zůstává stabilní a neexistuje žádná významná interakce s jednotlivými ukazateli. [11, 30]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce se zabývá hledáním vhodného polyuretanového systému s výztuží. Tato kombinace materiálů musí následně splňovat konzistentní výsledky. Proto musí být předdefinovány všechny proměnné, které by mohly vlastnosti výsledného materiálu negativně ovlivňovat. Tím je zároveň možno předdefinovat podmínky tak, aby byly získány lepší vlastnosti. Z toho důvodu budou vyrobeny kompozitní desky za různých podmínek, z nichž budou vyrobeny vzorky a ty budou testovány na mechanické vlastnosti.

Jednotlivé etapy diplomové práce jsou děleny následně:

- Důvod změny materiálu a jejich umístění
- Výběr materiálového systému
- Stanovení parametrů výroby pro jednotlivé desky
- Výroba zkoušených semiproductů
- Zkoušení semiproductů pomocí jednotlivých zkoušek
- Vyhodnocení výsledků zkoušek

## 7 DŮVOD ZMĚNY MATERIÁLŮ A JEJICH UMÍSTĚNÍ

Využití nového materiálového systému pro sestavy z kompozitních materiálů je zamýšleno jako náhrada za aktuálně využívané hliníkové plechy u akrobatického dvoumístného letounu Z242L Zeus ve vnitřních prostorách kokpitu.



*Obrázek 18 Akrobatický letoun Z242L Zeus [31]*

Příležitost k záměně za moderní a lehčí materiály je umožněna zejména díky aktuálně probíhající inovaci interiéru, který bude převeden z velké části na kompozitní materiály.

Výhodou převodu na kompozitní materiály je zaručení konzistentní sériovosti z důvodu otisku pohledových stran z formy. Nad rámec toho bude značně zjednodušená montáž celé vnitřní skořápky do letounu díky dosažitelnosti komplexních tvarů při laminování dílů ve formě. Díky tomu je totiž možné se zbavit široké škály klepířských prací na složitých sestavách skládajících se z velkého množství tvarovaných hliníkových plechů a dalších spojovacích materiálů.

Materiál tedy bude zaměřen na široké škále krycích ploch jako je například zavazadlový prostor, pohledové tunely, atp. Změna materiálu nebude zahrnovat bezpečnostně kritické celky, jako je například konstrukce bezpečnostních sedaček, kniplu, či palubní desky.



*Obrázek 19 Aktuální vnitřní prostory cockpitu [32]*

## 8 POUŽITÉ MATERIÁLY

Vyrobené vzorky se skládají ze samotného polyuretanového systému a výztuže. Kromě těch je nutno také formu vyčistit a naseparovat.

### 8.1 Polyuretanový systém

Jako polyuretanový systém byl vybrán materiál s obchodním názvem Elastolit R8889/101. Tento typ je vhodný pro výrobu kompozitů pomocí technologii RTM, což je také doporučeno samotným výrobcem BASF. [33]

Tento materiálový systém je složen ze 2 složek. Složka A je polyolová komponenta. Složka B je iso-komponenta, konkrétně kyselina isokyanová a polymethylen polyfenyl ester, výrobcem označované jako IsoPMDI 92140. [33]

Vlastnosti jednotlivých složek jsou uvedeny v následující tabulce:

*Tabulka 7 Vlastnosti jednotlivých komponent Elastolitu R8889-101 [33]*

Parametr	Jednotka	Polyol-komponenta	Iso-komponenta	Metoda
Hustota (25°C)	g/cm <sup>3</sup>	1,06	1,24	G 133-08
Viskozita (25°C)	mPa*s	524	210	G 133-07
Použitelnost	měsíců	3	6	

Výrobce také udává doporučené množství jednotlivých komponent, které je určeno pomocí kelímkového testu:

*Tabulka 8 Typické parametry procesu vytvrzování Elastolitu R8889-101 [33]*

Parametr	Jednotka	Hodnota	Metoda
Míchací poměr	Částí dle hmotnosti	A = 100; B = 118	G 132-12
Gelovací čas	s	1600	



V poslední řadě výrobce v materiálovém listu také udává vlastnosti již vytvrzené polyuretanové pryskyřice, již po proběhlém postcureu:

Tabulka 9 Vlastnosti vytvrzeného Elastolitu R8889-101 [33]

Parametr	Jednotka	Změřená hodnota	Metoda
Postcure (120°C/1h)			
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1210	DIN EN ISO 1183-1
Tvrdość Shore	D	82	DIN ISO 7619-1
Pevnost v tahu	N/mm <sup>2</sup>	77	DIN EN ISO 527
Modul pružnosti	N/mm <sup>2</sup>	3012	
Pevnost v ohybu	N/mm <sup>2</sup>	112	DIN EN ISO 178
Modul pružnosti v ohybu	N/mm <sup>2</sup>	2712	
Skelný přechod - DSC 2. průběh	°C	105	DSC
HDT / Metoda B	°C	82	DIN EN ISO 75

## 8.2 Výztuha

Jako výztužný materiál byla použita skelná rohož prášková, která je distribuována společností Havel Composites. Tato skelná rohož má plošnou hustotu 300g/m<sup>2</sup>. [36]

## 8.3 Základní separační činidlo

Základem pod separační činidlo pro formu je použit produkt Frekote B-15. Frekote B-15 je speciálně navrhnut pro ocelové a kompozitní formy, které mají problém s mikropórovitostí, škrábanci či jinými nedokonalostmi povrchu. [34]

Výrobce v technickém listu deklaruje následující parametry:

- Vzhled je bezbarvý a průzračný
- Chemický typ je polymer na bázi rozpouštědel,
- Zápach má po rozpouštění,
- Vytvrzování probíhá za pokojové teploty, následně je tepelně stály do 400°C,

- Teplota aplikace je při 20 až 60°C. [34]

#### **8.4 Separační činidlo**

Jako separační činidlo je použit produkt Frekote 700-NC. Frekote 700-NC nabízí excelentní separační vlastnosti pro nejvíce náročné aplikace a je všestranně použitelný. [35]

Výrobce v technickém listu deklaruje stejné vlastnosti jako pro FREKOTE B-15, vyjma teploty aplikace od 13 až do 135°C. [35]

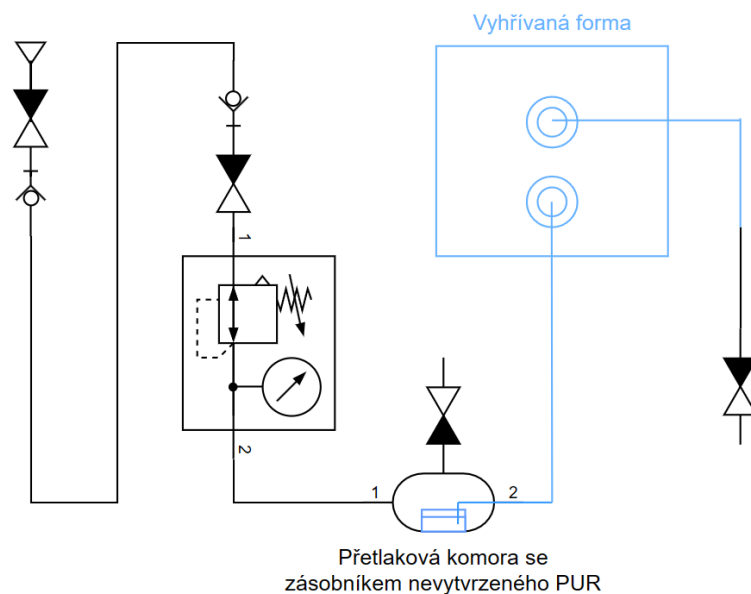
## 9 VÝBĚR TECHNOLOGIE VÝROBY

V závislosti na výběru polyuretanového materiálu a z hlediska použití dílů dovnitř kokpitu pro nekritické a méně namáhané komponenty je zvolena technologie RTM, která po odladění dovoluje vyrábět díly efektivním způsobem a s konzistentními výsledky. Všeobecnými informacemi o mechanismu fungování a o možnostech používání této technologie se lze dočíst v teoretické části této diplomové práce.

### 9.1 Schéma RTM obvodu

Schéma bylo vytvořeno pomocí programu PneuDraw, který zprostředkovává společnost *SMC CEE-group*. [37]

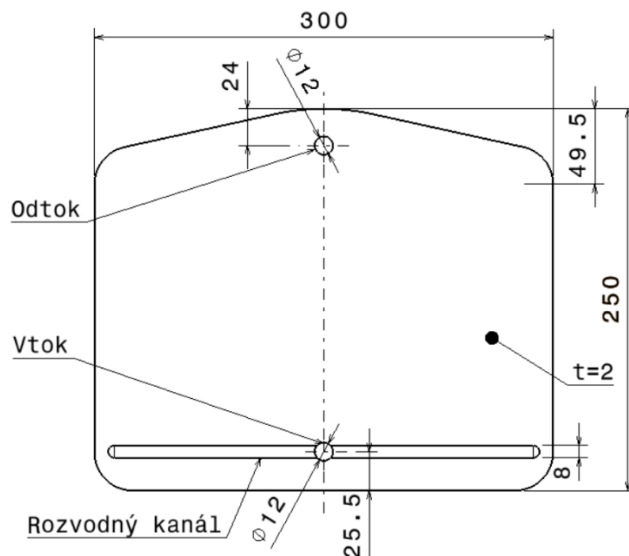
Ve schématu je znázorněn celý pneumatický obvod spolu s tlačnou polyuretanovou pryskyřicí. Místa zaplňovaná pouze vzduchem jsou kreslena černou barvou, zatímco místa, kudy je tlačena pryskyřice, jsou kreslena modrou barvou.



Obrázek 20 Schéma sestaveného RTM obvodu

### 9.2 Komponenty RTM obvodu

Pro výrobu zkušebních vzorků je využita ocelová forma s dutinou. Dutina slouží jako prostor pro vytvrzování samotného materiálového systému. Konkrétní rozměry dutiny je možno vyčíst na obrázku níže.



Obrázek 21 Rozměry dutiny formy

Přetlaková komora obsahuje smíchanou polyuretanovou pryskyřici, která je vytlačovaná vysokým tlakem do formy. Zvýšení tlaku v systému je zajištěno rozvodem stlačeného vzduchu v budově, jež je zajišťováno vzdálenými kompresory.

Ze zdroje se šíří vzduch přes uzavíratelný kulový kohout, který slouží pro rychlé přerušování napájení vzduchem. Za kohoutem je umístěn regulátor tlaku pro umožnění ovládnutí velikosti tlaku v systému. Regulátor tlaku je opatřen manometrem, díky kterému je možná průběžně kontrolovat hodnotu tlaku v systému.

Přetlaková komora mimo vstup pro stlačený vzduch a výstup pro pryskyřici obsahuje také kulový kohout sloužící k uvolnění tlaku v přetlakové komoře po vytvrzení pryskyřice.



Obrázek 22 a 23 Vlevo regulátor tlaku s manometrem, vpravo zapojená přetlaková komora

Do dutiny formy je vháněn materiál spodním otvorem, tedy vtokem. Vtok je propojen vysokotlakou hadicí s přetlakovou komorou, která je navedena až do kádinky obsahující tekutou polyuretanovou pryskyřici.

Jakmile je forma naplněna pryskyřicí, začne PUR unikat odtokem. Na horní otvor, tedy na odtok, je připevněna vysokotlaká hadice, která na konci obsahuje kulový kohout. Ten je nutno zatáhnout, jakmile se pryskyřice začne tlačit do odtokové hadice. Uzavřením kohoutu začne posouvající se tekutá pryskyřice stlačovat vzduch v nyní zaslepené hadici. Pryskyřice se zastaví, jakmile se hodnota tlaku vyrovná hodnotě tlaku nastavené na regulátoru tlaku, potažmo hodnotě tlaku v přetlakové komoře.

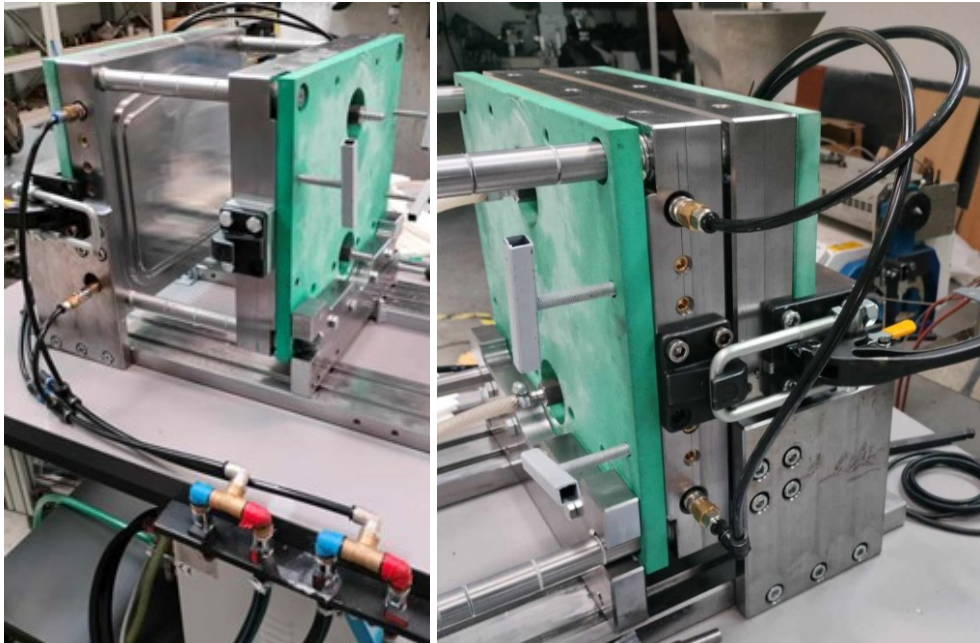
Odtoková hadice s otevřeným ventilem slouží také jako odvětrávací kanál při pronikání pryskyřice formou.



Obrázek 24 a 25 Vlevo dutina formy, vpravo forma zepředu

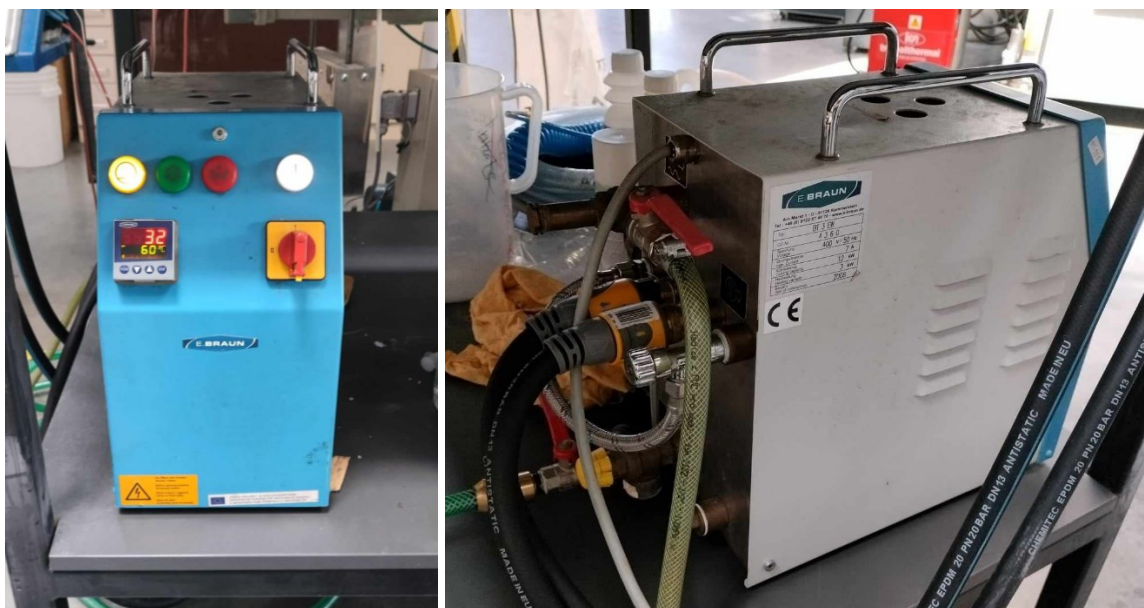
### 9.3 Temperace formy

Forma je ohřívána pomocí temperačního média vody. V okruhu koluje mezi vyvrtanými otvory ve tvárníku i tvárnici a zdrojem ohřívání vody.



Obrázek 26 a 27 Temperační obvod tvárnice a tvárníku

Zdrojem ohřívání vody temperační přístroj od firmy E.BRAUN, s katalogovým označením BT3EW. Samotný přístroj je schopen ohřívát teplotu vody až na 100°C. Samotný přístroj obsahuje také čerpadlo, jehož výkon může dosáhnout na 27 litrů vody za minutu. [38]



Obrázek 28 a 29 Temperační přístroj BT3EW

## 10 URČENÍ PODMÍNEK A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH SEMIPRODUKTŮ

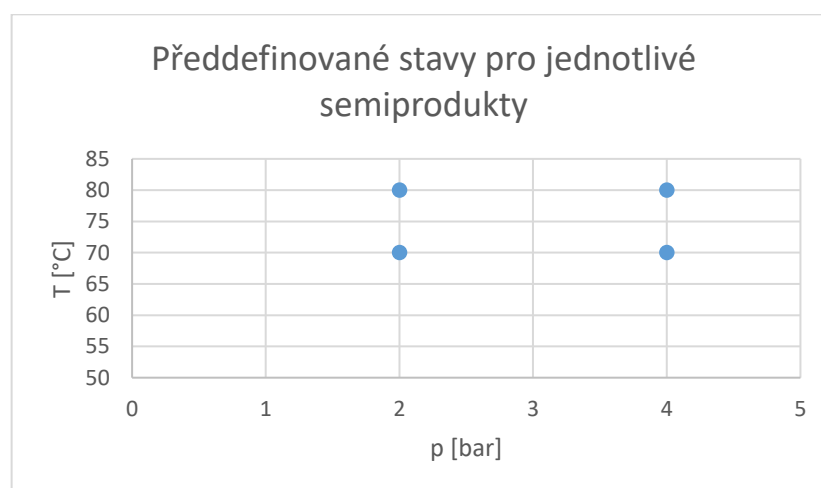
V této části se budeme zabývat návrhem podmínek pro výrobu polyuretanových zkušebních semiproductů a jejich následnou výrobou.

### 10.1 Návrh podmínek výroby

Rozlišnost podmínek je odvozena na základě parametrů, které jsem schopen měnit u zvoleného a sestaveného RTM systému. Jedná se tedy o tlak a teplotu. V závislosti na teplotě taktéž o čas, po dobu kterého je nutno nechat vytvrzování probíhat.

#### 10.1.1 Stavby teplot a tlaků

Na následujícím grafu je možno vidět 4 různé stavy, za kterých probíhá výroba desek ve formě. Ty byly voleny v závislosti na tom, jaké jsou komponenty RTM systému dohromady schopny dosahovat.



Obrázek 30 Předdefinované stavy pro jednotlivé semiproducty

#### 10.1.2 Doba pro odformování

Geltime použitého polyuretanového systému Elastolit R8889/101 je 1600 sekund. Ve formě však musí zůstat až do svého vytvrzení, aby se deska při odformování nepoškodila.

Čas pro odformování byl určen experimentálně se závislostí na teplotě za atmosferického tlaku. Toto bylo provedeno na naseparovaném ocelovém plátu, který je temperován na příslušnou teplotu. Na plát byla následně nanášena vrstva Elasolitu.



*Obrázek 31 Měření doby dostatečného vytvrzení Elastolitu R8889/101 pro odformování*

Po uplynutí doby gellimu, byla pravidelně kontrolována souvislost a elasticita vytvrzovaného plátu postupným odloupáváním.



*Obrázek 32 Postupné odloupávání tvrzené pryskyřice*

Na základě tohoto byla stanovena doba pro odformování následovně:

- Pro teplotu 70°C se jedná o 105 minut
- Pro teplotu 80°C se jedná o 97 minut



## 10.2 Výroba

Nejprve byly nastříhány skelné rohože na velikost dutiny formy. Rohože byly naskládány do 3 vstev a následně připevněny do formy.



Obrázek 33 a 34 Kontrola rozměrů a hmotnosti spojených rohoží

Nejprve bylo nutno připravit směs isokyanátu a polyolu ve správných množstvích pro optimální reakci systému. Technický list PUR systému Elastolit 8889/101 uvádí hmotnost poměr složky A (polyolu) ku složce B (isokyanátu). Ten je 100 dílů složky A ku 118 dílům složky B.

K objemu RTM systému, kterým protéká smíchaná pryskyřice, je nutno připočítat objem na spodu zásobníku pryskyřice v přetlakové komoře, aby systém nezačal nasávat stlačený vzduch z komory. Pro náš případ se tedy jedná o 455 cm<sup>3</sup> včetně přídavku na přelévání mezi nádobami. Hustota směsi pro tento hmotnostní poměr vychází 1,157 g/cm<sup>3</sup> a hmotnost jedné dávky je tedy 526,44g. To dělá 241,49 g polyolu a 284,95 g isokyanátu.



Obrázek 35, 36 a 37 Vlevo odvažování polyolu, uprostřed isokyanátu a vpravo smíchaná směs

Po naplnění systému v kelímku z původních 512 g zůstalo 126 g. Množství tedy vyhovuje tak, aby se při naplnění formy kelímek vyprázdnil a nezačal nasávat vzduch do systému, ale zároveň také, aby materiálem nebylo plýtváno.

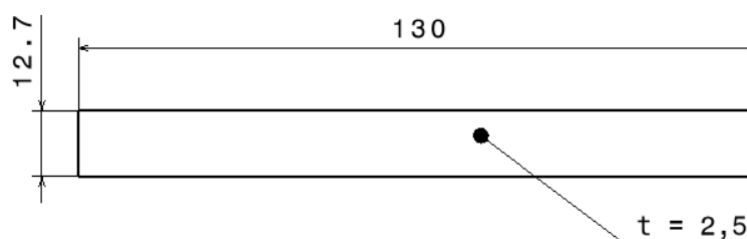
Poté byly vyrobeny desky v dutině formy za předdefinovaných stavů a časů.



Obrázek 38 a 39 Odformování desky a odečítání hmotnosti

Veškeré vyrobené desky byly hned po vyjmutí z formy označeny pro následnou identifikaci pomocí lihového fixu. Značení probíhalo podle předdefinovaných výrobních stavů.

Následně byl v souladu s normou ASTM D790 navržen rozměr pro zkoušecí tělíska, poté vyřezán a obroušen.



Obrázek 40 Rozměry zkoušecího tělíska pro ohybovou zkoušku

Vzorky byly řezány separátně, deska po desce, aby se opět zamezilo záměně jednotlivých zkušebních tělísek. Ihned po obrobení byly zanceny lihovým fixem systémem:

1. Určená zkouška, v tomto případě OHYB,
2. Číslo pořadí stavu, v tomto případě 4,
3. Písmenně označené pořadí zkoušeného vzorku pro odlišení vzorků mezi sebou, v tomto případě D.



*Obrázek 41 Značení zkušebních tělísek*

Po mechanickém obrobení vzorků desek se vyrobené zkušební tělíska již mohly temperovat hromadě. Temperace proběhla na 120°C po dobu 1 hodiny z důvodu postcuringu. Tyto parametry jsou explicitně předepsány výrobcem BASF pro použitý polyuretanový systém. [33]

## 11 ZKOUŠENÍ SEMIPRODUKTŮ

Nyní následuje část zaměřená na zkoumání vlastností zkušebních tělísek.

### 11.1 Množství matrice ve výztuži

Na základě velikosti vstupních hmotností do výroby u jednotlivých látek toto nelze hodnotit z důvodu velké nepřesnosti. Bylo tedy nutno zvážit jednotlivé obrobené zkušební vzorky a na základě jejich hmotnosti a obsahu z řezného plánu vyhodnotit poměr jednotlivých složek.

Pro vzorky z prvního stavu je výsledná průměrná hodnota hmotnostního procenta rohože 0,27:

*Tabulka 10 Hmotnostní složení desky 1. stavu*

Označení	Hmotnost [g]	Délka vzorku [mm]	Šířka vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	m (rohož) [g]	m (pryskyřice) [g]	Hmotnostní procento rohože
<b>OHYB 1A</b>	5.4	131	12.3	2.5	1.45	3.95	0.27
<b>OHYB 1B</b>	5.3	131	12.6	2.4	1.49	3.81	0.28
<b>OHYB 1C</b>	5.5	131	12.6	2.5	1.49	4.01	0.27
<b>OHYB 1D</b>	5.4	131	12.4	2.5	1.46	3.94	0.27
<b>OHYB 1E</b>	5.4	131	12.5	2.5	1.47	3.93	0.27
<b>Průměr</b>	5.4	131.0	12.5	2.5	1.47	3.93	<b>0.27</b>
<b>Sm. Odchylka</b>	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0

Pro vzorky z druhého stavu je výsledná průměrná hodnota hmotnostního procenta rohože 0,28:

*Tabulka 11 Hmotnostní složení desky 2. stavu*

Označení	Hmotnost [g]	Délka vzorku [mm]	Šířka vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	m (rohož) [g]	m (pryskyřice) [g]	Hmotnostní procento rohože
OHYB 2A	5.4	131	12.3	2.4	1.45	3.95	0.27
OHYB 2B	5.4	131	12.7	2.5	1.50	3.90	0.28
OHYB 2C	5.3	131	12.7	2.4	1.50	3.80	0.28
OHYB 2D	5.5	131	12.7	2.4	1.50	4.00	0.27
OHYB 2E	5.4	131	12.8	2.5	1.51	3.89	0.28
<b>Průměr</b>	5.4	131.0	12.6	2.4	1.49	3.91	<b>0.28</b>
<b>Sm. Odchylka</b>	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0

Pro vzorky z třetího stavu je výsledná průměrná hodnota hmotnostního procenta rohože 0,26:

*Tabulka 12 Hmotnostní složení desky 3. stavu*

Označení	Hmotnost [g]	Délka vzorku [mm]	Šířka vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	m (rohož) [g]	m (pryskyřice) [g]	Hmotnostní procento rohože
OHYB 3A	5.8	131	12.5	2.8	1.47	4.33	0.25
OHYB 3B	5.8	131	12.5	2.7	1.47	4.33	0.25
OHYB 3C	5.7	131	12.7	2.7	1.50	4.20	0.26
OHYB 3D	5.9	131	12.7	2.7	1.50	4.40	0.25
OHYB 3E	5.8	131	12.5	2.8	1.47	4.33	0.25
<b>Průměr</b>	5.8	131	12.58	2.74	1.48	4.32	<b>0.26</b>
<b>Sm. Odchylka</b>	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0

Pro vzorky z čtvrtého stavu je výsledná průměrná hodnota hmotnostního procenta rohože 0,28:

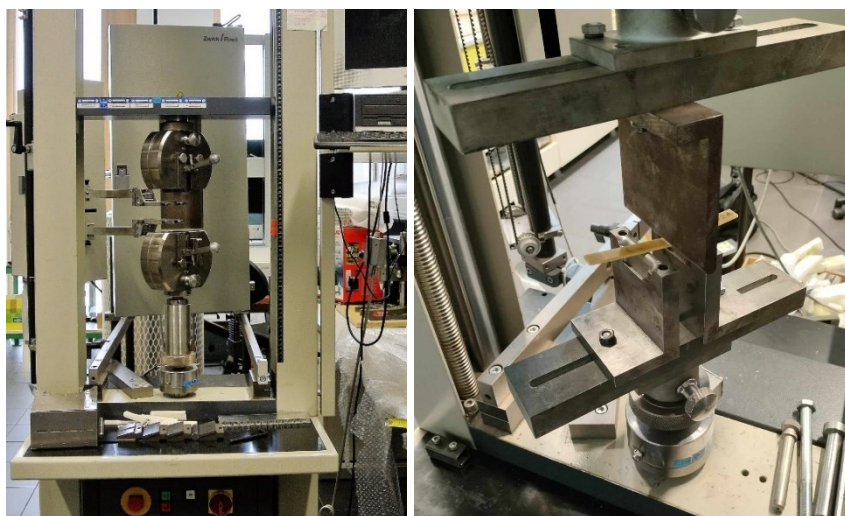
*Tabulka 13 Hmotnostní složení desky 4. stavu*

Označení	Hmotnost [g]	Délka vzorku [mm]	Šířka vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	m (rohož) [g]	m (pryskyřice) [g]	Hmotnostní procento rohože
<b>OHYB 4A</b>	5.2	131	12.6	2.7	1.49	3.71	0.29
<b>OHYB 4B</b>	5.2	131	12.8	2.8	1.51	3.69	0.29
<b>OHYB 4C</b>	5.3	131	12.7	2.8	1.50	3.80	0.28
<b>OHYB 4D</b>	5.4	131	12.7	2.7	1.50	3.90	0.28
<b>OHYB 4E</b>	5.2	131	12.7	2.7	1.50	3.70	0.29
<b>Průměr</b>	5.26	131	12.7	2.74	1.50	3.76	<b>0.28</b>
<b>Sm. Odchylka</b>	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0

## 11.2 Ohybová zkouška

Pro porovnání mechanických vlastností kompozitních materiálů je jedna z nejvhodnějších ohybová zkouška.

Zkouška bude probíhat na univerzálním zkušebním stroji Zwick/Roell 1456. Stroj používá testovací software testXpert a má maximální zatížení 20kN. [39]



*Obrázek 42 a 43 Univerzální zkušební stroj Zwick/Roell 1456, Zwick/Roell 1456 se zkoušeným tělískem [39]*

Zkouška je prováděna dle normy ASTM D790, přičemž z každého stavu bylo vyrobeno 5 zkušebních tělísek, která byly následně odzkoušeny.

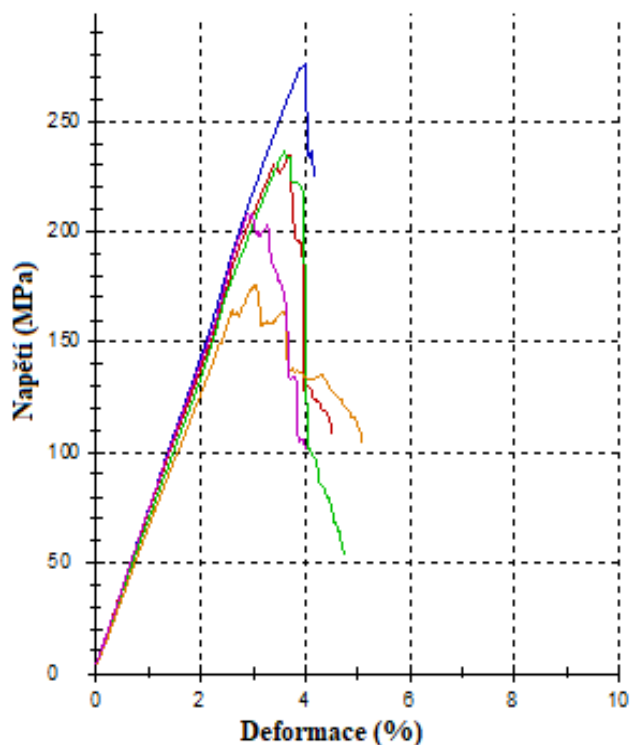
### 11.2.1 Ohybová zkouška 1. stavu

Byla provedena zkouška na dílech vyrobených za podmínek pro první desku, tedy za teploty 70°C a za tlaku 2 bary. Výsledná hodnota zkoušky pro tento stav je pevnost v ohybu 226 MPa s rozptylem 34,6 MPa a modul pružnosti s průměrnou hodnotou 6582 MPa s rozptylem 381 MPa.

Následující hodnoty a graf vyhodnotil program testXpert na základě provedené zkoušky.

Tabulka 14 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 1

Pořadí	Označení	Počet vrstev rohože	Modul pružnosti	Pevnost v ohybu
			Mpa	Mpa
1	OHYB 1A	3	6760	234.9
2	OHYB 1B	3	6530	243.1
3	OHYB 1C	3	6820	267.6
4	OHYB 1D	3	5940	177.6
5	OHYB 1E	3	6860	207.0
<b>Průměr</b>	-	-	<b>6582</b>	<b>226.0</b>
<b>Sm. odchylka</b>	-	-	381	34.6



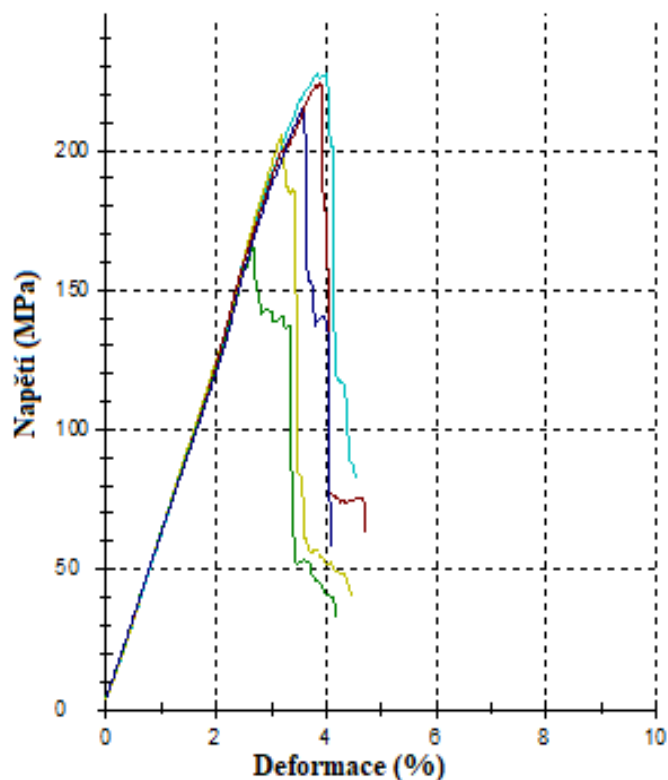
Obrázek 44 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 1

### 11.2.2 Ohybová zkouška 2. stavu

Další ohybová zkouška proběhla na zkoušených semiproduktech vyrobených za stavu 2, tedy za teploty 80°C a tlaku 2 barů. Výsledná hodnota zkoušky pro tento stav je pevnost v ohybu 210,6 MPa s rozptylem 24,4 MPa a modul pružnosti s průměrnou hodnotou 5534 MPa s rozptylem 288 MPa.

Tabulka 15 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 2

Vzorek	Označení	Počet vrstev rohože	Modul pružnosti	Pevnost v ohybu
			Mpa	Mpa
1	OHYB 2A	3	5120	233.7
2	OHYB 2B	3	5370	203.5
3	OHYB 2C	3	5670	228.9
4	OHYB 2D	3	5660	172.6
5	OHYB 2E	3	5850	214.2
<b>Průměr</b>	-	-	<b>5534</b>	<b>210.6</b>
<b>Sm. odchylka</b>	-	-	288	24.4



Obrázek 45 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 2

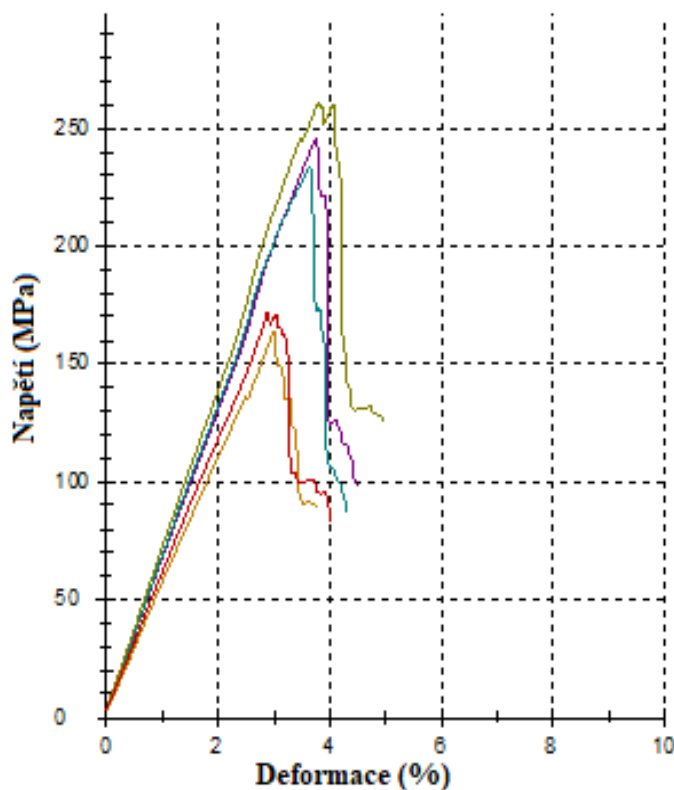


### 11.2.3 Ohybová zkouška 3. stavu

Další ohybová zkouška proběhla na zkoušených semiproduktech vyrobených za stavu 2, tedy za teploty 80°C a tlaku 2 barů. Výsledná hodnota zkoušky pro tento stav je pevnost v ohybu 196,8 MPa s rozptylem 45,1 MPa a modul pružnosti s průměrnou hodnotou 5916 MPa s rozptylem 605 MPa.

Tabulka 16 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 3

Vzorek	Označení	Počet vrstev rohože	Modul pružnosti	Pevnost v ohybu
			Mpa	Mpa
1	OHYB 3A	3	5090	143.6
2	OHYB 3B	3	6070	226.1
3	OHYB 3C	3	6120	215.2
4	OHYB 3D	3	6700	244.7
5	OHYB 3E	3	5600	154.2
<b>Průměr</b>	-	-	<b>5916</b>	<b>196.8</b>
<b>Sm. odchylka</b>	-	-	605	45.1



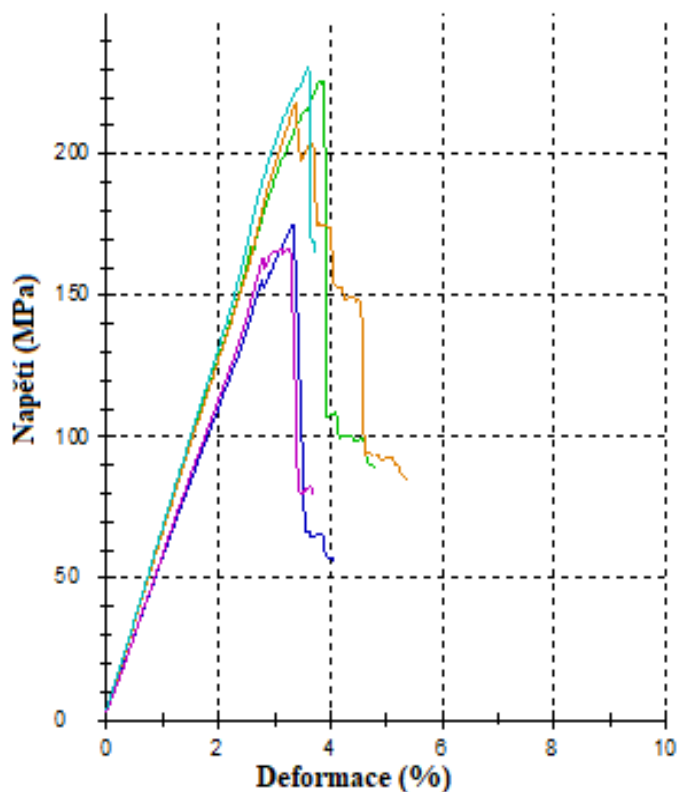
Obrázek 46 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 3

### 11.2.4 Ohybová zkouška 4. stavu

Další ohybová zkouška proběhla na zkoušených semiproduktech vyrobených za stavu 4, tedy za teploty 80°C a tlaku 4 barů. Výsledná hodnota zkoušky pro tento stav je pevnost v ohybu 186,5 MPa s rozptylem 29,7 MPa a modul pružnosti s průměrnou hodnotou 5766 MPa s rozptylem 562 MPa.

Tabulka 17 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 4

Vzorek	Označení	Počet vrstev rohože	Modul pružnosti	Pevnost v ohybu
			Mpa	Mpa
1	OHYB 4A	3	6160	208.2
2	OHYB 4B	3	5270	155.8
3	OHYB 4C	3	6090	196.3
4	OHYB 4D	3	5050	154.3
5	OHYB 4E	3	6260	217.7
<b>Průměr</b>	-	-	<b>5766</b>	<b>186.5</b>
<b>Sm. odchylka</b>	-	-	562	29.7



Obrázek 47 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 4

## ZÁVĚR A VYHODNOCENÍ

Záměrem diplomové práce je návrh optimálních podmínek výroby kompozitního materiálu do kokpitu letounu Z242L. Pro toto bylo navrženo skelné vlákno práškové s plošnou hustotou  $300\text{g/m}^2$  v kombinaci s polyuretanovou pryskyřicí R8889/101, která je výrobcem BASF produkována přímo na RTM aplikace.

Tento polyuretanový materiál v kombinaci s formou a pneumatickým obvodem na bázi RTM fungoval velmi dobře. Delší doba vytvrzování tohoto polyuretanového systému, tedy přes 1,5 hodiny, vždy dala dostatek prostoru pro přípravu na další dávku. Ačkoliv pro práci ve více lidech by bylo vhodnější se poohlédnout po polyuretanu pro RTM s rychlejší dobou reakce z důvodu větší produktivity.

Kvalita zkoušených vzorků otištěných ve formě byla velmi dobrá při pohledu na díl po výrobě nebylo co vytknout. Nicméně s ohledem na samotnou formu s pneumatickým obvodem by bylo nutné zajistit výměnu těsnění za jiný typ. Tlak 4 bary udrží těsnění při správném spojení bez problému, ale je až příliš tuhé a úpínky formy ho nestlačí dostatečně na to, aby ocelové plochy formy dosedly na sebe a vytvrzovaná polyuretanová pryskyřice se tak nedostala až k těsnění.

Z hlediska snahy pro nejvyšší možné množství vláken v kompozitu a tedy lepší poměru pevnosti ku hmotnosti vychází nejlépe vytvrzování při  $80^\circ\text{C}$ , které obě obsahují 0,28 hmotnostních procent vláken. Je tak patrně z důvodu teplotní roztažnosti polymeru a při ochlazování z vyšší teploty se více smrskává než při ochlazování z nižší teploty.

Pro zhodnocení pro teplotu se z ohledu pružnosti zdá být výhodnější naopak při teplotě nižší, kdy u stavu 1 ( $70^\circ\text{C}$ , 2bar) vyšel modul pružnosti 6582 MPa, tedy vyšší než u stavu 2 ( $80^\circ\text{C}$ , 4bar), kde vyšel 5534 MPa. V porovnání stavu 3 a 4 vychází také při stejných tlacích lépe nižší teplota, konkrétně o 150 MPa. Korelace mezi teplotou a pevností nebyla nalezena. Patrně je tak z důvodu dodatečného postcuringu, který pak supluje pozitivní vlivy vyšších teplot při samotné výrobě. Teplota má však významný vliv na rychlost vytvrzování a při použití totožného polyuretanového systému stojí za zvážení, zda-li nezvyšovat teplotu z důvodu zvýšení efektivnosti pracoviště.

S tlakem nebyl nalezena korelace v datech ani v ohledu na pevnost, ani v ohledu na modul pružnosti.

Při navrhování technologického postupu pro díly v kokpitu letounu Z242L je tedy vhodné se zaměřit na teplotu a tu optimalizovat v již zmíněném směru zlepšování pružných vlastností dílů, což se zejména do kokpitu letounů hodí ve formě deformačních zón jako jeden z bezpečnostních prvku.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MIRACLE, Daniel B. a Steven L. DONALDSON, 2002. ASM handbook. Volume 21, Composites. Ohio: ASM International. ISBN 0-87170-703-9.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] AGARWAL, BHAGWAN D. a BROUTMAN, LAWRENCE J., 1987. Vláknové kompozity
- [4] JOLLIVETA, Thomas, Catherine PEYRACB a Fabien LEFEBVREB, 2013. Damage of composite materials: Fatigue composite. Elsevier.
- [5] AKANKWASA, Nicholus Tayari a Dieter VEIT, 2021. Advances in Modeling and Simulation in Textile Engineering. Elsevier. ISBN 978-0-12-822977-4.
- [6] CAMPBELL, F.C., 2010. Structural Composite Materials. ASM International. ISBN 978-1-61344-124-4.
- [7] LEE, Henry a Kris NEVILLE, 1957. Epoxy Resins: Their applications and technology. New York: McGraw-Hill.
- [8] BEHNISCH, Felix et al., 2022. Flame retardant investigations on carbon fibre-reinforced polyurethane resin parts for aircraft applications produced by wet compression moulding. Fire and Materials [online]. 46(1), 181-191 [cit. 2024-03-03]. ISSN 0308-0501. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2965
- [9] VINSON, Jack R. a Tsu-Wei CHOU, 1975. Composite materials and their use in structures. London: Applied Science. ISBN 0853345937.
- [10] ALLEN, Geoffrey a John C. BEVINGTON, 1996. Comprehensive Polymer Science and Supplements [online]. Pergamon: Elsevier [cit. 2024-02-25]. ISBN 978-0-08-096701-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com>

- [11] CHEN, A. et al., 2023. Performance development of polyurethane elastomer composites in different construction and curing environments: Lecture Notes from the 2nd ERCOFTAC Summerschool held in Stockholm, 10-16 June, 1998. Construction and Building Materials [online]. 365 [cit. 2024-02-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.130047
- [12] DONG, Fei et al., 2018. Effects of curing conditions on structural evolution and mechanical properties of UV-curable polyurethane acrylate coatings. Progress in Organic Coatings [online]. 114, 58-67 [cit. 2024-02-25]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2017.09.018
- [13] RANDALL, David a Steve LEE, ed., 2002. The Polyurethanes Book. The United Kingdom: Huntsman International. ISBN 0-470-85041-8.
- [14] EASY COMPOSITES LTD. Polyurethane Resin. Easycomposites [online]. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.eu/polyurethane-resin>
- [15] LIANG, Yongsheng et al., 2013. Flammability and thermal properties of bitumen with aluminium trihydroxide and expanded vermiculite. Construction and Building Materials [online]. 48, 1114-1119 [cit. 2024-02-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.074
- [16] KUMAR PATEL, Krishna a Dr.V. P. SINGH, 2023. Study of chemically treated natural plant fibers in soil reinforcement technology: A review. Materials Today: Proceedings [online]. 78, 55-61 [cit. 2024-02-29]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.11.039

- [17] The making of glass fiber, 2020. In: GARDINER, Ginger. Composites World [online]. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>
- [18] ISHIDA, Hatsu a Tarek AGAG, 2011. Handbook of Benzoxazine Resins. Elsevier. ISBN 978-0-444-53790-4.
- [19] HAVEL-COMPOSITES. Technologie výroby kompozitů. HAVEL-COMPOSITES [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [20] ZWEBEN, Carl, 2000. Comprehensive Composite Materials. Pergamon: Elsevier. ISBN 978-0-08-042993-9.
- [21] Natural Fibre Composites, 2014. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-524-4.
- [22] MCENTEGGART, Ian. Mechanical Testing of Composites [online]. In: . s. 1 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91960-mechanical-testing-of-composites>
- [23] COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK [online], 2002. USA: Department of Defense [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: [https://indico.fnal.gov/event/13241/contributions/18146/attachments/12002/15271/MIL\\_Handbook\\_17.pdf](https://indico.fnal.gov/event/13241/contributions/18146/attachments/12002/15271/MIL_Handbook_17.pdf)
- [24] OFFICE OF AVIATION RESEARCH, 2003. Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems. DOT/FAA/AR-03/19.
- [25] ASTM INTERNATIONAL, 2000. D 3039/D 3039M – 00: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [26] OFFICE OF AVIATION RESEARCH, 2002. Tabbng Guide for Composite Test Specimens. DOT/FAA/AR-02/106.

- [27] ASTM INTERNATIONAL, 2003. D 3410/D 3410M – 03: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.
- [28] ASTM INTERNATIONAL, 2017. D790 – 17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [29] YANGYANG, Chen a Galina MALYSHEVA, 2019. Method for Determining the Rational Regimes of Curing Products from Polymer Composite Materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 11, 128-133 [cit. 2024-02-25]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2018.12.119
- [30] ABALI, Bilen Emek et al., 2021. Experimental investigation for modeling the hardening of thermosetting polymers during curing. *Polymer Testing* [online]. 102 [cit. 2024-02-25]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2021.107310
- [31] ZLIN AERO A.S., c2024. ZLIN [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.zlinaircraft.eu/>
- [32] Palubní deska ZLIN, b.r. In: NATO VADÁSZPILÓTAKÉPZÉS [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [https://nftc.hu/kepek/muszerfal\\_2.jpg](https://nftc.hu/kepek/muszerfal_2.jpg)
- [33] Elastolit R8889/101: Technical data sheet [Online], 2018. BASF Polyurethanes.
- [34] Loctite Frekote B-15: Technical data sheet [Online], 2018. Loctite.
- [35] Loctite Frekote 700-NC: Technical data sheet [Online], 2015. Loctite.



- [36] HAVEL COMPOSITES. Sklená rohož 300g/m<sup>2</sup> prášková. Havel composites [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/skelna-rohoz-300g-m2-praskova-prodej-na-kg-788-4106>
- [37] SMC CORPORATION, 2020. SMC Pneudraw v6.0. Etools [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://etools.smc.at/pneudraw/>
- [38] E. BRAUN GMBH. Temperature- control units. E-BRAUN [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.e-braun.de/en/temperiergeraete/>
- [39] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI. Katalog: strojní, přístrojové a laboratorní vybavení ÚVI. Univerzita Tomáše Bati fakulta technologická [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

USCAR	United States Council for Automotive Research
EPR	Epoxidové pryskyřice
UPR	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VER	Vinyl esterové pryskyřice
CER	Kyanátové esterové pryskyřice
PIR	Polyimidové pryskyřice
PUR	Polyuretanové pryskyřice
PMC	Polymerně matricové kompozity
DEEP	Diethyl ethyl phosphonate
Mm	Megametr
GS	Skleněná vlákna
SiO <sub>2</sub>	Oxid Křemičitý
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
CaO	Oxid vápenatý
MgO	Oxid hořečnatý
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid boritý
K <sub>2</sub> O	Oxid draselný
Na <sub>2</sub> O	Oxid sodný
CF	Uhlíková vlákna
°C	Stupeň Celsia
AF	Aramidová vlákna
g/cm <sup>3</sup>	Gramy na centimetr krychlový
UV	Ultrafialové
Ltd.	Limited
P-MA	Retardant hoření na bázi fenylfosfonátu

---

FAA	Federal Aviation Administration
Mm	Milimetr
ASTM	American Society for Testing and Materials
MIL-HDBK-17	Military Handbook 17
APP	Polyfosfát amonný
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
Al(OH) <sub>3</sub>	Hydroxidu hlinitého
SiO <sub>2</sub>	Oxidu křemičitého
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxidu železitého
RTM	Resin Transfer Molding
SRIM	Structural Reaction Injection Molding

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě [2]

Obrázek 2 Skladba kompozitního materiálu [5]

Obrázek 3 Porovnání struktury termosetu a termoplastu [6]

Obrázek 4 Výroba polyuretanu jednorázovou polymerací [10]

Obrázek 5 Měrné mechanické vlastnosti jednotlivých vláken [1]

Obrázek 6 Proces výroby skelného vlákna [2, 17]

Obrázek 7 Proces výroby uhlíkového vlákna [18]

Obrázek 8 Struktura aramidových vláken [2]

Obrázek 9 Sériovost jednotlivých laminovacích technologií [1]

Obrázek 10 Laminace ručním kladením [20]

Obrázek 11 Laminace nastříkáním [19]

Obrázek 12 Laminace pomocí RTM [21]

Obrázek 13 Laminace pomocí vakuové infuze [1]

Obrázek 14 Výkres tahového vzorku s podložkami [25]

Obrázek 15 Výkres tlakového vzorku s podložkami [27]

Obrázek 16 a 17 Mechanické vlastnosti při různých dobách vytvrzování UV zářením a vlhkostí [12]

Obrázek 18 Akrobatický letoun Z242L Zeus [31]

Obrázek 19 Aktuální vnitřní prostory cockpitu [32]

Obrázek 20 Schéma sestaveného RTM obvodu

Obrázek 21 Rozměry dutiny formy

Obrázek 22 a 23 Vlevo regulátor tlaku s manometrem, vpravo zapojená  
přetlaková komora

Obrázek 24 a 25 Vlevo dutina formy, vpravo forma zepředu

Obrázek 26 a 27 Temperační obvod tvárnice a tvárníku

Obrázek 28 a 29 Temperační přístroj BT3EW

Obrázek 30 Předdefinované stavy pro jednotlivé semiprodukty

Obrázek 31 Měření doby dostatečného vytvrzení Elastolitu R8889/101 pro  
odformování

Obrázek 32 Postupné odloupávání tvrzené pryskyřice

Obrázek 33 a 34 Kontrola rozměrů a hmotnosti spojených rohoží

Obrázek 35, 36 a 37 Vlevo odvažování polyolu, uprostřed isokyanátu a vpravo  
smíchaná směs

Obrázek 38 a 39 Odformování desky a odečítání hmotnosti

Obrázek 40 Rozměry zkoušecího tělíska pro ohybovou zkoušku

Obrázek 41 Značení zkušebních tělísek

Obrázek 42 a 43 Univerzální zkušební stroj Zwick/Roell 1456, Zwick/Roell 1456  
se zkoušeným tělískem [39]

Obrázek 44 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 1

Obrázek 45 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 2

Obrázek 46 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 3

Obrázek 47 Průběh jednotlivých tahových zkoušek testovací vzorků za stavu 4

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Objem výroby sklem vyztužených plastů v Evropě [3]

Tabulka 2 Tabulka vlastností Polyuretanu Xencast P6 v nevytvrzeném stavu [14]

Tabulka 3 Požadavky na rozměry vzorku a podložky k tahové zkoušce [25]

Tabulka 4 Doporučení pro geometrii vzorků pro tahovou zkoušku [25]

Tabulka 5 Požadavky na rozměry vzorku a podložky k tlakové zkoušce [27]

Tabulka 6 Doporučení pro geometrii vzorků pro tlakovou zkoušku [27]

Tabulka 7 Vlastnosti jednotlivých komponent Elastolitu R8889-101 [33]

Tabulka 8 Typické parametry procesu vytvrzování Elastolitu R8889-101 [33]

Tabulka 9 Vlastnosti vytvrzeného Elastolitu R8889-101 [33]

Tabulka 10 Hmotnostní složení desky 1. stavu

Tabulka 11 Hmotnostní složení desky 2. stavu

Tabulka 12 Hmotnostní složení desky 3. stavu

Tabulka 13 Hmotnostní složení desky 4. stavu

Tabulka 14 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 1

Tabulka 15 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 2

Tabulka 16 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 3

Tabulka 17 Mechanické vlastnosti materiálu tvrzeného za stavu 4