

# **Analýza polymerních kompozitních materiálů při definovaných podmínkách**

Václav Hanák

---

Bakalářská práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav Hanák**

Osobní číslo: **T14088**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Analýza polymerních kompozitních materiálů při definovaných podmínkách**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše v oblasti kompozitních materiálů s polymerní maticí, rozdělení matic, výstužných systémů, vlastnosti a jejich vzájemné srovnání.
2. Vliv různých prostředí na fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.
3. Technologie výroby kompozitních materiálů.
4. Experimentální výroba kompozitních materiálů dle doporučení vedoucího práce.
5. Volba klimatických podmínek pro kompozitní materiály.
6. Testování fyzikálně-mechanických vlastností dle vedoucího práce.
7. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.
8. Závěr bakalářské práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle vedoucího BP.**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2017**


Termín odevzdání bakalářské práce:

**19. května 2017**

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Hanač Václav

Obor: Procesní inženýrství

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské 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.

Ve Zlíně 18.5.2014

Hanač

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce pojednává o problematice použití kompozitního systému v automobilovém průmyslu. Práce je zaměřena na výzkum vlivu klimatických prostředí na mechanické vlastnosti kompozitního systému.

Teoretická část práce je zaměřena na obecný popis kompozitního materiálu, technologií výroby, vliv prostředí a popis principu mechanických zkoušek.

Praktická část práce popisuje postup experimentálního zjištění mechanických vlastností zkoumaných vzorků ovlivněných agresivním prostředím. Mechanické vlastnosti byly analyzovány zkouškou v tahu, zkouškou v ohybu a rázovou zkouškou v ohybu metodou Charpy.

V závěru práce byly zjištěné hodnoty porovnány a vyhodnoceny.

Klíčová slova: kompozit, matrice, výztuž, polymer, prostředí, mechanické zkoušky, automobilový průmysl

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the use of the composite system in the automotive industry. The thesis is focused on the research of influence of climatic environments on the mechanical properties of the composite system.

The theoretical part is focused on the general description of composite material, production technologies, environmental impact and description of the principle of mechanical tests.

The practical part describes the procedure of experimental detection of mechanical properties of studied specimens influenced by aggressive environment. The mechanical properties were analyzed by tensile, bending and bending impact tests by the Charpy method.

At the end of the work the values were compared and evaluated.

Keywords: Composite, matrix, reinforcement, polymer, environment, mechanical tests, automotive industry

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborný přístup a vedení při vypracovávání bakalářské práce a panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za ochotu při provádění měření.

„Vědět málo je nebezpečné. Vědět mnoho, také.“

-Albert Einstein

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské 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 POLYMERNÍ KOMPOZITY</b> .....	<b>11</b>
1.1    OBECNÝ POPIS KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU .....	11
1.2    MATRICE .....	12
1.2.1    Reaktoplastové matrice .....	13
1.2.2    Termoplastové matrice .....	14
1.3    VÝZTUŽ.....	15
1.3.1    Skleněná vlákna .....	15
1.3.2    Uhlíková vlákna .....	16
1.3.3    Aramidová vlákna .....	17
<b>2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>19</b>
2.1    TECHNOLOGIE RUČNÍ LAMINACE .....	19
2.2    TECHNOLOGIE RTM.....	20
<b>3 VLIV PROSTŘEDÍ A VLASTNOSTI KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>21</b>
3.1    TEPLOTA .....	21
3.2    NAVLHAVOST.....	22
3.3    CHEMICKÁ ODOLNOST.....	24
<b>4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>25</b>
4.1    OHYBOVÉ ZKOUŠKY .....	25
4.2    TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	25
4.3    RÁZOVÉ ZKOUŠKY.....	26
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
<b>5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>29</b>
<b>6 VOLBA MATERIÁLU</b> .....	<b>30</b>
6.1    MATRICE .....	30
6.2    VÝZTUŽ.....	31
<b>7 TECHNOLOGIE VÝROBY A PŘÍPRAVA</b> .....	<b>32</b>
<b>8 VOLBA PODMÍNEK</b> .....	<b>34</b>
<b>9 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>36</b>
9.1    ZAŘÍZENÍ ZWICK .....	36
9.2    ZAŘÍZENÍ CAEST .....	37
9.3    STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ DLE ČSN EN ISO 527-4 .....	38
9.4    STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ DLE ČSN EN ISO 14125 .....	39
9.5    STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI CHARPY DLE ČSN EN ISO 179-2 .....	40
<b>10 EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ HODNOTY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK</b> .....	<b>41</b>

10.1	HODNOTY PRO STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	41
10.2	HODNOTY PRO STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	46
10.3	HODNOTY PRO STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI CHARPY.....	51
<b>11</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>67</b>



## ÚVOD

Kompozitní materiál je systém více složek, které jsou vzájemně propojeny. Každá složka má sama o sobě rozdílné vlastnosti, ale teprve jejich kombinací vznikne kompozitní materiál s vlastnostmi, které by samostatné složky nebyly schopny nikdy dosáhnout.

V dnešní době kompozitní materiál zaznamenává rozmach výroby a to především v odvětví automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu či lodním průmyslu a hlavně díky jeho vynikajícím vlastnostem.

Mezi hlavní výhody kompozitního materiálu patří především velká pevnost na poměry jeho plošné hmotnosti, skvělé dielektrické vlastnosti za přítomnosti skelných vláken, ale i tepelná odolnost s přidavkem retardérů hoření do matrice a použitím aramidových vláken.

Zvolený kompozitní systém je složen ze šesti vrstev aramidového vlákna a dvou vrstev skelného vlákna s epoxidovou matricí. Pro výrobu sestaveného návrhu kompozitního systému byla využita technologie ruční laminace. Po nařezání zkušebních vzorků dle nástřihového plánu se na vzorcích zkoumala pevnost v tahu, ohybu a rázová houževnatost v ohybu metodou Charpy.

Následující kapitoly pojednávají o popisu, technologii výroby a testování kompozitních materiálů pro použití v automobilovém průmyslu, jelikož kompozitní materiály mohou mít jednoho dne velký náskok oproti oceli. Tyto materiály se považují za lehčí, bezpečnější a více úspornější. Jako příklad můžeme uvést karbonové kompozity, které váží asi pětinu toho co ocel a přitom mají stejné nebo dokonce lepší vlastnosti z hlediska tuhosti a pevnosti.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 POLYMERNÍ KOMPOZITY

## 1.1 Obecný popis kompozitního systému

Kompozit je materiál, který vznikne kombinací dvou nebo více materiálů odlišných chemických a fyzikálních vlastností. Kompozitní materiál se skládá z výztuže (např.: elementárních vláken) a matrice (např.: polymerní pryskyřice). Aby se materiál mohl považovat za kompozit, musí být splněny tyto podmínky: [1]

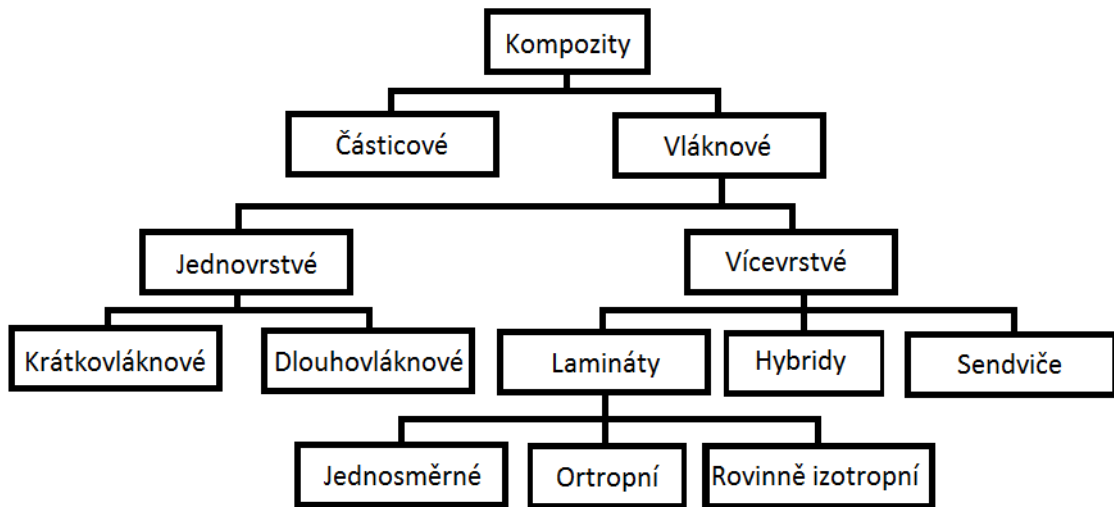
- Výztuž musí být pevnější a tužší než matrice
- Podíl matrice musí být méně jak 95 %
- Složky kompozitu musí být smíchány [2]

Kombinací materiálů vznikne nová vlastnost, kterou nelze dosáhnout při jednotlivém použití složek kompozitu. Vlastnosti polymerních kompozitních materiálů jsou následující: [1]

- Nízká hmotnost
- Odolnost vůči korozi
- Minimální tepelná vodivost
- Velké hodnoty modulu pevnosti a pružnosti [3]



Obr. 1 Trubice z kompozitu vyztuženého uhlíkovými vlákny [4]



Obr. 2 Základní rozdělení kompozitních materiálů [3]

## 1.2 Matrice

Materiálová složka plní funkci pojiva výtzuže. Výtzuž je plně prosycena matricí, tak že po době vytvrzování dochází k tvarové stálosti výrobku. Hlavním kritériem pro kvalitu kompozitního systému je dostatečná adheze matrice k vláknu. Pro zlepšení fyzikálních a chemických vlastností se využívá tzv. apretace, která se nanáší na vlákno.

Úkoly matrice jsou následující:

- Chránit vlákno před okolními vlivy
- Přenášet námahe na vlákna ale také přenos námahe z vlákna na vlákna
- Udržet tvarovou stálost a geometrickou polohu vláken [5]

U vláknových kompozitů se nejčastěji používá polymerní matrice, která je buď termoplastová nebo reaktoplastová.

Mezi nejvíce používané reaktoplastové matrice patří polyestery, epoxidy a vinylestery. Pro termoplastové matrice pak například polypropyleny a polyamidy [2]

### 1.2.1 Reaktoplastové matrice

Jedná se o matrice z reaktoplastů. Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nejrozšířenějšími konstrukčními kompozity. Jsou zastoupeny v celém měřítku světového průmyslu a to v procentuálním poměru 90%. [6]

Reaktoplasty mají při pokojové teplotě pevnost v tahu 20-80 MPa a modul pružnosti 2-5,2GPa. Vlastnosti jako chemická či tepelná odolnost a jiné, rozhodují při výběru vhodné matrice. [3]

Mezi výhody oproti termoplastovým matricím patří:

- Výrazně nižší teplota zpracování
- Slabá závislost vlastností na teplotě

Mezi typy reaktoplastových matric patří např.: epoxidové pryskyřice, fenolové pryskyřice, polyamidy aj. [7]

Epoxidová pryskyřice - jsou za pokojové teploty pevné až kapalné látky, které často obsahují přídavné látky. Tyto látky se přidávají v závislosti na požadovaných vlastnostech pojiva. Tvrdidlo se přidává v přesně stanoveném poměru a to jak v kapalné tak v pevné fázi k urychlení vytvrzovací doby. Epoxidové pryskyřice patří mezi nejlepší reaktoplasty s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, adhezí a geometrickou stálostí. Napříč těmito vlastnostmi jsou ale cenově nevýhodné (asi 3krát nákladnější, než nenasycené polyesterové pryskyřice).

Fenolické pryskyřice - jedná se o reaktivní pryskyřice vyráběné kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů. Jejich předností je chemická i tepelná odolnost a geometrická stálost. Vytvrzování pryskyřice probíhá velmi komplexním způsobem. Zahřátím na teplotu okolo 70 °C se začíná odpařovat volná voda, nevytvrzená hmota začíná měknout. Tyhle procesy probíhají až do teploty asi 110 °C. První zesíťovací reakce se objeví při teplotě 160 °C. Fenolické pryskyřice mají nízký podíl na výrobě vyztužených kompozitů kvůli komplexní výrobě a úzkých možnostech použití. [5]

### 1.2.2 Termoplastové matrice

Oproti reaktoplastovým matricím je použitím termoplastové matrice redukována cena o 25 až 80 %. Cenové úspory spočívají především ve snazší vyrobiteľnosti a to i složitějších tvarů. Hodnota mezi pevnosti je nižší než 100MPa a hodnota modulu pružnosti je 2 až 4 GPa. Mezi vlastnosti termoplastové matrice patří především geometrická stálost, odolnost proti opotřebení (hlavně s použitím uhlíkových vláken, s kterými zároveň klesá součinitel tření na 1/3), houževnatost. Avšak všechny vlastnosti závisí na výrobním postupu. [6]

Mezi výhody oproti reaktoplastovým matricím patří:

- Možnost recyklace
- Lepší obrana vůči poškození
- Větší prodloužení při lomu
- Větší houževnatost

Mezi typy termoplastové matrice patří např.: Polypropylen, Polystyren, Polyamid aj. [7]

Polyamidy - Kvůli přítomnosti amidové skupiny ve struktuře polyamidy vykazují vysokou mechanickou pevnost (přidáním skelných vláken), nízkou hodnotu tečení při dlouhodobém zatížení a dobrou teplotní, chemickou i fyzikální odolnost. Díky těmto atributům se zařazují do konstrukčních polymerů. Mezi jejich nevýhodu patří nasákavost (nutno sušit aby si zachovaly pružnost). [8]

Polypropylen - Materiál, který lze použít v rozmezí teplot 5 až 100 °C. je dobře chemicky odolný především vůči kyselinám a má téměř nulovou nasákavost. Vyniká velkou rázovou houževnatostí, to ovšem neplatí pro teploty pod bodem mrazu. [9]

### 1.3 Výztuž

Výztuž je složka kompozitního systému, která je prosycována matricí. Mezi výztuže používaných u polymerních kompozitů patří např.: aramidová vlákna, sklená vlákna, uhlíková vlákna. [3]

#### 1.3.1 Skleněná vlákna

Glass Fiber (GF) je anglicky výraz skleněných textilních vláken pravidelného kruhového průřezu tažené z trysky. Skleněná vlákna jsou velmi dobrými elektrickými izolanty, které také dobře propouštějí záření. Tato vlákna jsou označována jako E-vlákna a jejich sklovina jako E-sklovina. Jedná se o nejčastěji používanou sklovinou pro výrobu vláken (90% zastoupení na trhu). Kromě E-skloviny jsou známy např. R-skloviny, C-skloviny, ECR-skloviny nebo AR-skloviny. Možnost výroby skleněných vláken je tzv. tažením z trysek. [5]



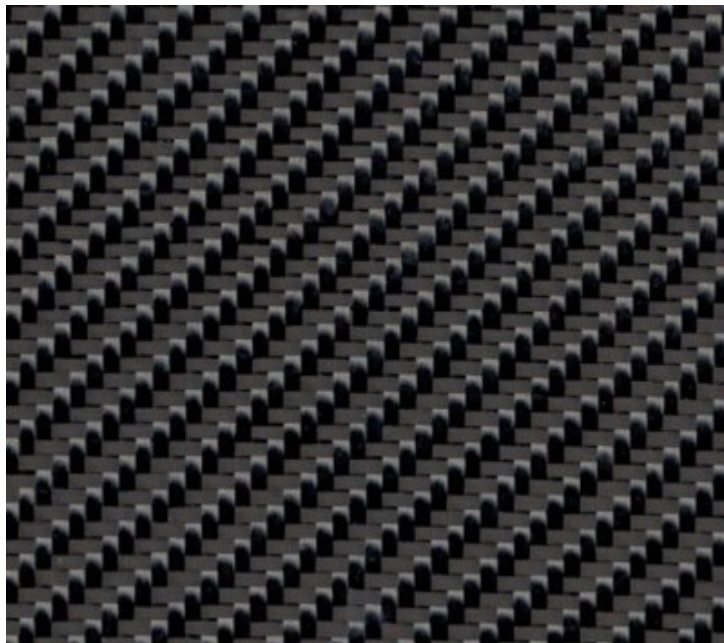
*Obr. 3 Tkanina ze skelných vláken [10]*

Mezi vlastnosti skleněných vláken patří:

- Skleněné vlákno se vyznačuje izotropní vlastností
- Hodnota modulu pružnosti v tahu je téměř stejně velká jako hliníku a asi třetinová k hodnotě modulu oceli. Pevnost v tahu je vyšší než u ostatních vláken a hodnota měrné pevnosti je obzvláště vysoká díky nižší hustotě skla
- Deformace je téměř elastická, i když mez průtažnosti má hodnotu asi 3%
- Mechanické vlastnosti se nemění ani při dlouhodobém teplotním zatížení při 250 °C. Tepelná vodivost dosahuje vyšších hodnot, výrazně však nižších jako u kovů
- Skelná vlákna jsou ohnivzdorná
- E-sklovina měkne nad 625 °C
- Součinitel délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů [5]

### 1.3.2 Uhlíková vlákna

Jedná se o vlákna s velmi vysokou tuhostí a pevností, avšak nízkou tažností. Výchozí suroviny, které mají vláknitý tvar, se prvně karbonizují. Během toho se odštěpují všechny prvky až na uhlík. Při stoupající teplotě se zvyšují mechanické vlastnosti a při teplotě 1800 °C je proces tvorby grafitové struktury ukončen. [3]



*Obr. 4 Tkanina z karbonových vláken [11]*

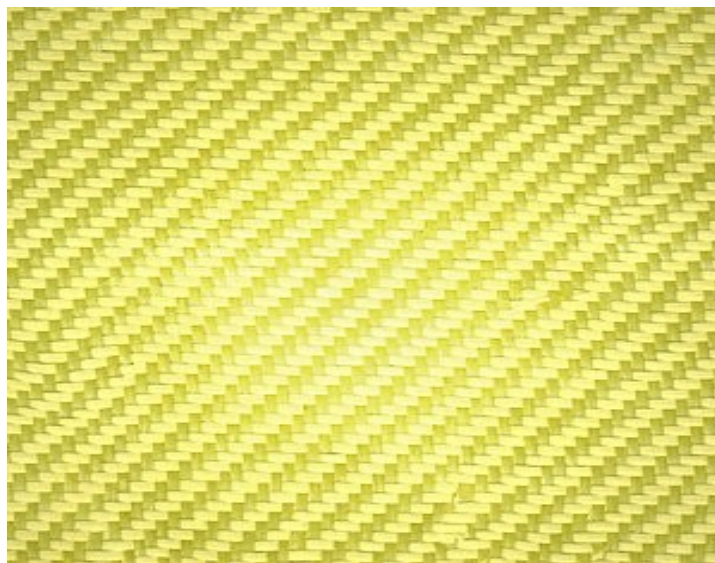


Mezi vlastnosti uhlíkových vláken patří:

- Hodnota modulu pružnosti v tahu roste se zvyšujícím se zatížením
- Nízká hustota
- Dobrá tepelná a elektrická vodivost
- Velmi dobrá odolnost vůči korozi
- Silně anizotropní v porovnání ze skelnými vlákny
- Je nutno je povrchově upravovat kvůli jejich křehkosti
- Při delším skladování ztrácejí ohebnost vlivem vytvrzení povrchové vrstvy
- Průchozí pro záření
- Vysoká odolnost proti dlouhodobému zatěžování
- Vlákná jsou hořlavá [5]

### 1.3.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou na bázi lineárních polymerů. Elementární vlákno je kruhového průřezu s lehce drsným povrchem. Kovalentní vazby jsou uspořádány dle osy vlákna. Výhodou těchto vláken je jejich dobrá tuhost a pevnost. Výroba spřádáním z taveniny není možná, jelikož teplota tavení je nad teplotou rozkladu, proto se aramidová vlákna vyrábějí spřádáním za přítomnosti koncentrované kyseliny sírové. Vlákná se vyrábí v různých variacích, které se liší zejména hodnotou modulu pružnosti v tahu (E-modulem) pro dosažení různých mechanických vlastností. Použití je vhodné pro lehké výrobky, které jsou namáhány na tah avšak nevhodné na výrobky namáhané na tlak či ohyb. [5]



Obr. 5 Tkanina z aramidových vláken [12]

Mezi vlastnosti aramidových vláken patří:

- Vysoká měrná pevnost v tahu díky nízké hustotě (hmotnosti).
- Silně anizotropní.
- Jsou hydrofilní (pojímají vlhkost). Vzhledem k této vlastnosti musí být vlákna před zpracováním vysušena, aby nedocházelo k poklesu jejich mechanických vlastností.
- Jako u většiny polymerů vystavených např. UV zářením k poklesu pevnosti.
- Vlákná v kompozitním systému odolávají teplotám až 300 °C. [5]

## 2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

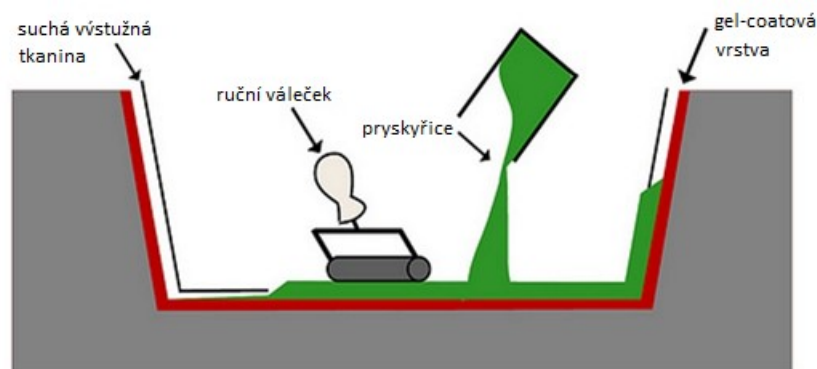
Výroba kompozitních materiálu je prováděna velkým množstvím způsobů, které se od sebe liší zpracovatelskou teplotou, tlakem či jinými parametry. Jednotlivé výrobní procesy většinou existují ve více modifikacích. Součástí procesu při výrobě bývá technologický postup, který nese informaci o druhu prováděné operace, výchozím materiálu, použitých pomůckách či času. [3]

Faktory ovlivňující volbu technologie: kvalita, vlastnosti, počet výrobku a jejich rozměry, ekonomické zohlednění. [13]

### 2.1 Technologie ruční laminace

Řadí se mezi nejjednodušší technologie výroby kompozitního materiálu. Vzhledem k časové náročnosti je tato technologie určena především pro malosériovou výrobu (velkoplošné díly, prototypy, aj.). [14]

Proces začíná nanesením separační vrstvy na formu, která zaručí snadné odformování výrobku. Pokud je vyžadována přítomnost hladkého povrchu je na separační vrstvu nanesen gel-coat. Hlavní částí procesu je nanesení katalyzované pryskyřice, na kterou je položena výztuž. Výztuž je poté prosycována pryskyřicí, která je opět prokládána další vrstvou výztuže. Tento krok je opakován, dokud není hodnota požadované tloušťky optimální. Po 24 hodinách, sloužících na vytvrzení pryskyřice, se výrobek odformuje. [15]



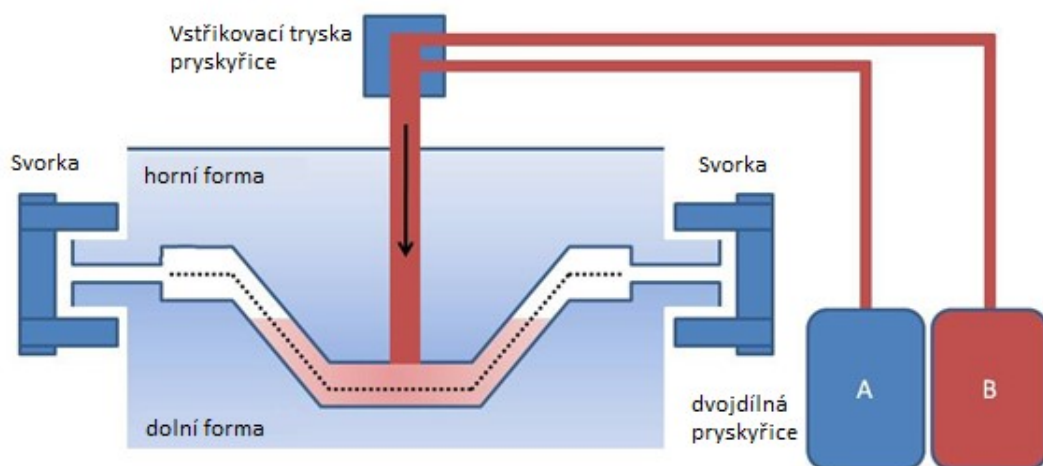
Obr. 6 Schéma technologie ruční laminace [3]

Mezi výhody ruční laminace patří jednoduchost, nízké náklady a téměř neomezená variace tvarů a rozměrů. Mezi nevýhody lze pak zařadit kvalitu výrobků (závislá na odbornosti a zkušenostech pracovníka), pouze jedna pohledová strana a relativně velké množství odpadu, které se těžce zpracovává. [15]

Touto technologií jsou vyráběny lodě, nádrže, prototypy.

## 2.2 Technologie RTM

Jedná se o technologii, při které se používá uzavřená forma. Výstužná rohož nebo tkaný roving se umístí do formy, která se uzavře a upne. Katalyzovaná, nízko hustotní pryskyřice se čerpá pod tlakem, než vyplní celou dutinu formy. Formy jsou většinou vyrobeny z kompozitu nebo niklu. Mezi výhody této technologie patří hladkost obou povrchů, rozměrová přesnost, úspora materiálů (méně odpadu) nebo úspora práce. [16]



Obr. 7 Schéma technologie RTM [17]

RTM je předmětem velkého zájmu pro různé aplikace, jelikož slibuje zvýšení výkonu a úspory materiálu oproti tradičním metodám. Některé z hlavních aplikací procesu RTM zahrnují:

- Lodní trupy
- Lopaty větrných turín
- Letecký a automobilový průmysl
- Lékařské kompozity [16]

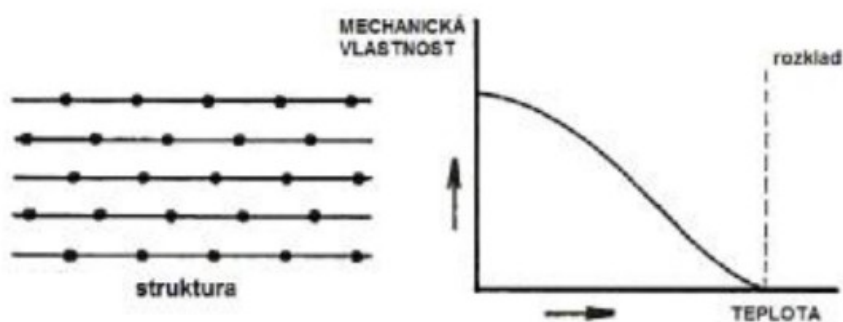
### 3 VLIV PROSTŘEDÍ A VLASTNOSTI KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

Chemická struktura makromolekul určuje všechny základní vlastnosti polymerů.

#### 3.1 Teplota

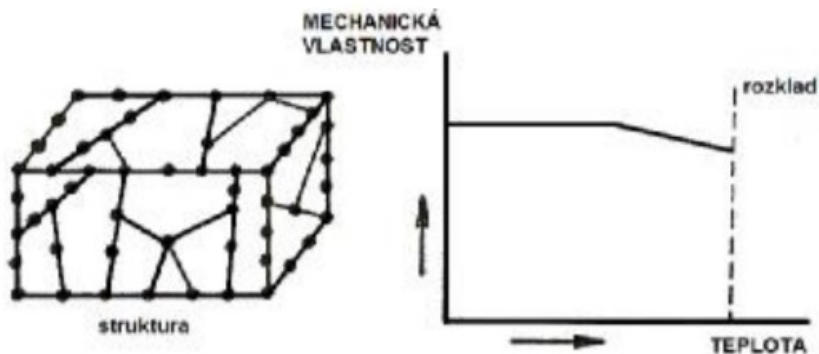
Teplotní vlastnosti jsou určovány zejména chemickou strukturou makromolekul. Rozhodujícím kritériem pro stanovení tepelných vlastností je poměr mezi hlavními a vedlejšími vazebnými silami. U polymerů vázaných lineárními řetězci rychle klesá pevnost s gradientem teploty. Naopak je tomu u polymerů, které mají vzájemně provázány makromolekuly (pevnost se v širokém měřítku nemění). [18]

Typickým příkladem lineárně nezesíťovaného polymeru jsou **termoplasty**, které při zahřívání měknou a lze je vratně deformovat. [19]



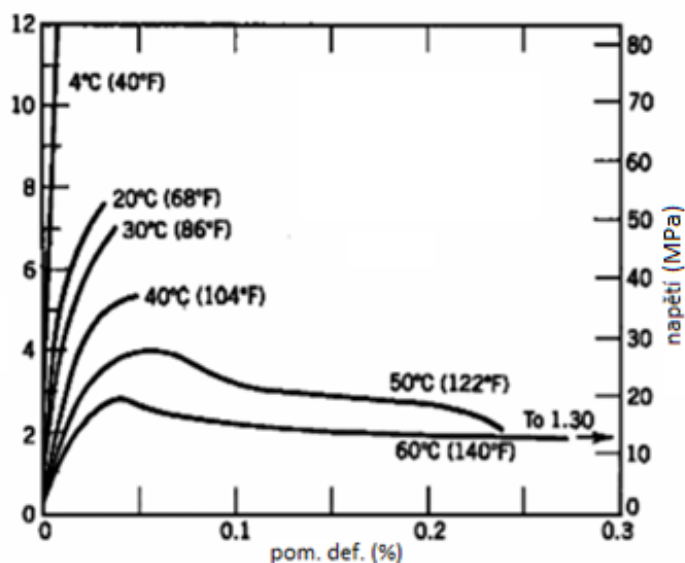
Obr. 8 Závislost mechanických vlastností termoplastů na teplotě [19]

Příkladem prostorově zesíťované molekuly jsou **reaktoplasty**, které jsou netavitelné a nerozpustné. [19]



Obr. 9 Závislost mechanických vlastností reaktoplastů na teplotě [19]

Obecně lze tedy konstatovat, že vlastnosti polymerů jsou silně závislé na teplotě a to dle grafu závislosti relativního prodloužení na napětí. [18]



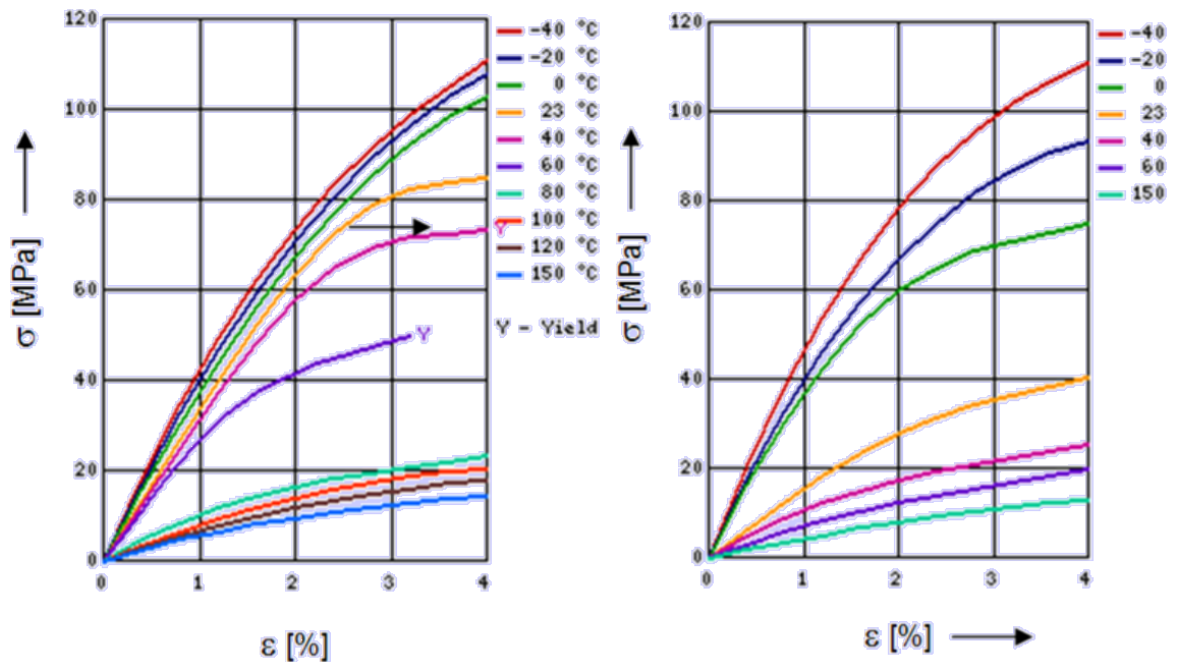
Obr. 10 Vliv teploty na mechanické vlastnosti [18]

### 3.2 Navlhavost

Vlhkost může být obsažena na povrchu jakéhokoliv polymeru, avšak jen některé jsou hydrofilní (navlhavost). Navlhavost lze obecně charakterizovat jako schopnost přijímat vlhkost z okolního prostředí. Nelze ji nazývat materiálovou konstantou, jelikož se jedná o dlouhodobý proces, při kterém se vlhkost látky snaží vyrovnat vlhkosti okolního prostředí a tím se dostat do tzv. rovnovážného stavu. [20] [21]

Absorpce vlhkosti má negativní vliv na vlastnosti polymeru. Mezi vlastnosti navlhnutého polymeru patří především:

- Rozměrová nepřesnost v důsledku změny objemu
- Pokles pevnosti a tuhosti
- Zhoršení dielektrických vlastností
- Zhoršení odolnosti látky vyšším teplotám
- Zvýšení tažnosti a houževnatosti [20]



Obr. 11 Vlastnosti PA66 v suchém a navlhlem stavu [21]

Mezi příčiny navlhavosti patří především chemické složení. Nejvíce navlhají polymery, které mají ve svém řetězci přítomny atomy silně elektronegativních prvků, jako jsou např. kyslík, dusík, vodík apod. Mezi polymery se silnou navlhavostí patří polyoxymethylen (POM), polykarbonát (PC) nebo polyamidy (PA). Naopak mezi polymery s velmi nízkou navlhavostí patří polyetylen (PE), polypropylen (PP) nebo polystyren (PS). [20]

Vliv prostředí se stává významnějším při zvýšení teploty, protože zvýšená teplota snižuje potenciálovou bariéru pro mnoho degradačních reakcí, takže dochází k jejich akceleraci ve srovnání s působením stejných látek při pokojové teplotě. Dalším důvodem, vedoucím ke zvýraznění vlivu prostředí na udržení mechanických vlastností za zvýšených teplot, je zvýšení molekulární pohyblivosti díky přibližování se vnější teploty teplotě skelného přechodu dané polyesterové matrice. To umožňuje zvýšení rychlosti difúze nízkomolekulárních látek polymerní sítí, vznik botnacích efektů a dodatečných vnitřních pnutí, které ovlivňují negativně mechanické vlastnosti kompozitů. Dochází rovněž snadněji k porušení mezivrstev a poklesu schopnosti mezivrstev přenášet napětí do vláken. Klesá tak vyztužující efektivnost a dochází k poklesu modulu pružnosti takto degradovaných kompozitů. Epoxidová matrice vykazuje výrazně vyšší odolnost proti většině prostředí i za zvýšených teplot. [22]

### 3.3 Chemická odolnost

Na vlastnosti jako pevnost, pružnost, barvu, hmotnost a rozměry polymeru mají zásadní vliv chemické látky. Změny ve vlastnostech jsou způsobovány dvěma druhy interakcí. Jedná se o **chemický vliv** na řetězce polymeru a o **fyzikální vliv**. Chemický vliv má za následek oxidaci, depolymerizaci, či reakci funkčních skupin. Fyzikální vliv se vyznačuje měknutím nebo botnáním.

Chemické složení a struktura polymeru rozhodují o tom, zda dojde ke znehodnocení materiálu a do jaké míry. Mezi faktory ovlivňující odpor vůči působení chemikálií patří teplota tlak, koncentrace, doba vystavení vlivu chemikálie aj. [23]

Tab. 1 Porovnání chemické odolnosti polymerů [24]

Polymer	Stupeň odolnosti proti					
	vodě	roztokům solí	kyselinám	zásadám	oxidačním činitelům	rozpouštědlům
Polyolefiny	1	1	1	1	2 až 3	1 až 2
Fluoroplasty	1	1	1	1	1	1
Polyvinylchlorid	1	1	1 až 2	1 až 2	2 až 3	1 až 3
Polystyrén	1	1	1 až 2	1	2 až 3	3 KN
Polymethylmethakrylát	2	1	2	2	2 až 3	3 KN
Polyakrylonitril	1	2 až 3	2 až 3	2 až 3	2 až 3	1 až 2
Polyethyltereftalát	1	1	2	3	3	1 až 3
Polykarbonáty	1	1	2 až 3	3	3	2 až 3 KN
Polyoxymethylén	1	1	2	2	3	1 až 3
Polyamidy	2	2	3 KN	2	3	1 až 3 KN
Polyurethany	2	2	3	2	3	1 až 3
Epoxidové pryskyřice	2	2	2	2	3	1 až 3
Polyesterové pryskyřice	1 až 2	1	1 až 2	3	3	1 až 2

Legenda: 1 - velká, 2 - střední, 3 - malá, NK - sklon ke korozi za napětí

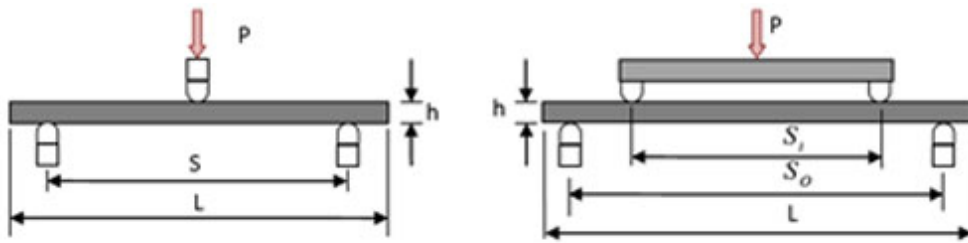


## 4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Kompozity vykazují větší rozptyl materiálových charakteristik než konvenční materiály.

### 4.1 Ohybové zkoušky

Použití ohybových zkoušek ke stanovení mechanických vlastností pryskyřic a laminátových vláken kompozitních materiálů je rozšířená napříč celým průmyslem vzhledem k relativní jednoduchosti, rychlému hodnocení a minimální odborné znalosti. K dispozici je široká škála standardních testovacích metod pro ohyb, které se řídí národní a mezinárodní normou. Obecně platí, že ohybové zkoušky se používají pro kontrolu kvality a výběr materiálů. [25]



Obr. 12 Princip tříbodové a čtyřbodové ohybové zkoušky [26]

Podstata zkoušky spočívá v tom, že na těleso obdélníkového průřezu, které je umístěno na dvou podpěrách působí síla (konstantní rychlostí). Síla působí ve středu zkoumaného tělesa a to do té doby, dokud se nezlomí na svém povrchu nebo pokud deformace nepřekročí 5%. Při tomto procesu je měřena působící síla a průhyb vzniklý na základě této síly. [27]

Výsledky zkoušky jsou:

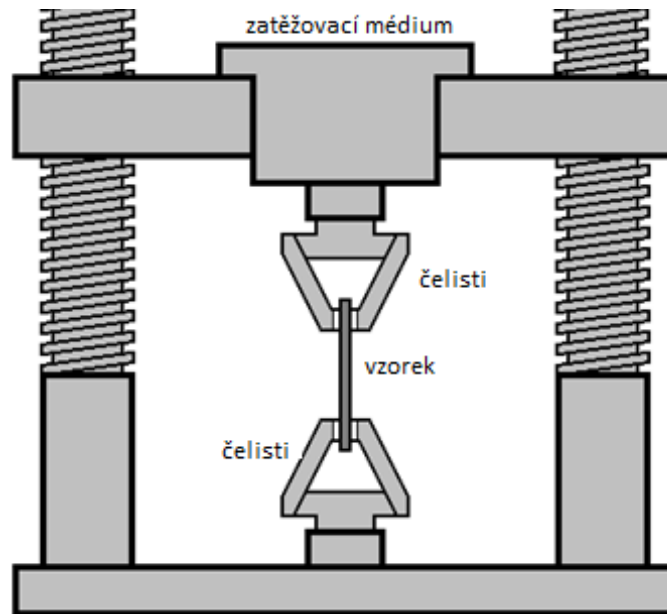
- Pevnost v ohybu
- Modul pružnosti v ohybu [28]

### 4.2 Tahové zkoušky

Tahové zkoušky jsou prováděny z různých důvodů. Výsledky zkoušek se používají pro výběr materiálu pro inženýrské aplikace nebo ověření specifikací materiálu kvůli kontrole kvality. Tahové vlastnosti se často měří v průběhu vývoje nových materiálů a postupů, aby

mohli být porovnány. V neposlední řadě jsou tahové zkoušky používány také pro předpověď chování materiálu, který je zatěžován ve více než jedné ose. [29]

Podstata zkoušky spočívá v protahování tělesa ve svém podélném směru osy (konstantní rychlostí) do porušení nebo do doby kdy napětí v tahu dosáhne jisté předem zvolené hodnoty. Při tomto procesu je měřeno zatížení a prodloužení vzorku. [27]



Obr. 13 Schéma tahové zkoušky [30]

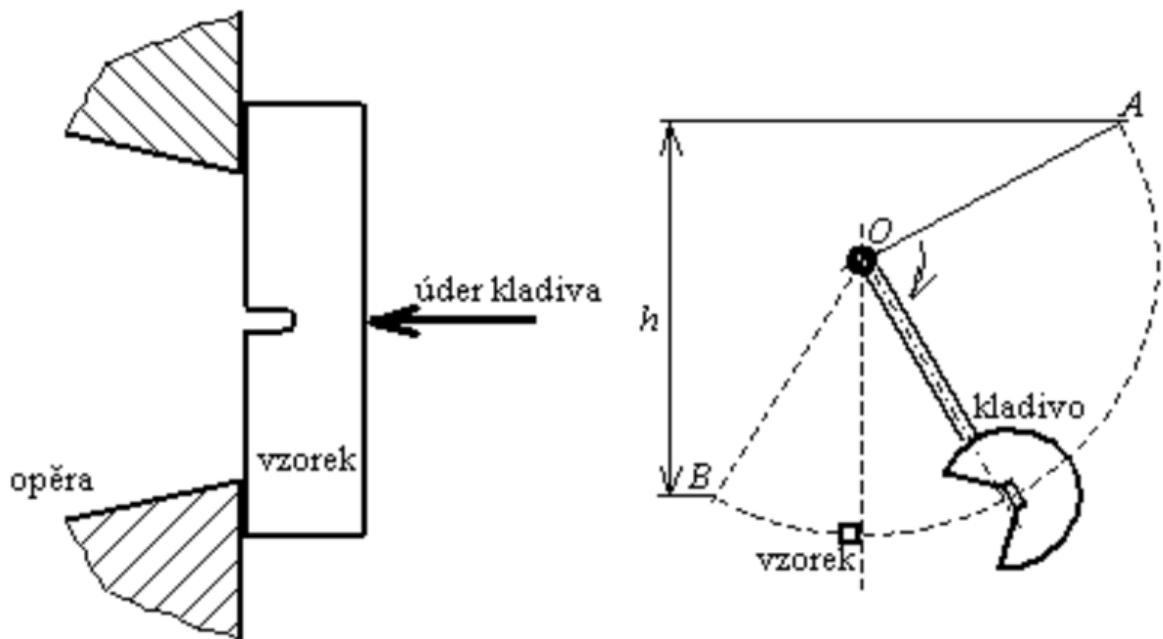
Výsledky zkoušky jsou:

- Pevnost v tahu
- Modul pružnosti v tahu
- Poissonovo číslo [28]

### 4.3 Rázové zkoušky

Jedná se o nejpoužívanější zkoušku charakterizující houževnatost nebo křehkost materiálu. Podstata metody spočívá v přeražení tělesa s vrubem. Vrub s geometrií „U“ nebo „V“ je umístěn uprostřed zkoušeného tělesa a to ze strany protilehlé místu úderu kladiva. Veškeré měření musí probíhat za konstantních podmínek, aby nebylo ovlivněno okolními změnami (teplota, vlhkost, aj.). [31] [32]

V počátku zkoušky se kladivo nachází v horní poloze (poloha A). Na opěry se umístí zkoumaný vzorek a kladivo se uvolní. Polohová energie kladiva se mění na kinetickou. V nejnižším místě své dráhy kladivo udeří do vzorku. Po přeražení vzorku kladivo ztratí část své kinetické energie a dostane se do spodní polohy (poloha B). Práci potřebnou na přeražení vzorku představuje rozdíl polohových energií v místech A a B. [33]



Obr. – Princip rázové zkoušky (Charpyho kladivo) [33]

Výsledky zkoušky jsou:

- Výsledná energie nutná k přeražení vzorku

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. Teoretická část

1. Vypracování literární rešerše v oblasti kompozitních materiálů s polymerní maticí, rozdělení matic, výstužných systémů, vlastnosti a jejich vzájemné srovnání.
2. Vliv různých prostředí na fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.
3. Technologie výroby kompozitních materiálů.

### II. Praktická část

4. Experimentální výroba kompozitního materiálu se skelnými a aramidovými vlákny prosyceny epoxidovou pryskyřicí technologií ruční laminace.
5. Volba benzínu, chladicí kapaliny a motorového oleje jakožto klimatických podmínek pro kompozitní materiál.
6. Testování fyzikálně-mechanických vlastností metodou tahu, ohybu a Charpy.
7. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.
8. Závěr bakalářské práce.

## 6 VOLBA MATERIÁLU

Při zkoumání kladů a záporů použitých komponentů se dospělo k závěru, že kompozitní systém složený z epoxidové pryskyřice, skelných vláken a aramidových vláken může být využit např. v **automobilovém průmyslu**, a to i ve více tepelně zatížených částech, díky přítomnosti aramidového vlákna, který dobře odolává vysokým teplotám. V možných vyšších teplotách se pak potlačí nedostatek navlhavosti skelných vláken a tím se zachová tvarová stálost dílce. Důvodem pro použití skelných vláken je dobrý mez kluzu v tlaku a ekonomická stránka, jelikož cena aramidového vlákna je asi 10x vyšší. Za zmínku také stojí vynikající dielektrické vlastnosti obou vláken.

### 6.1 Matrice

Pro účel zhotovení výrobku pro určení výsledných mechanických vlastností byla použita matrice z epoxidové pryskyřice typu LH 385 (MGS) a tužidlo H 285 (MGS) od firmy Havel Composites CZ s.r.o.

Pryskyřice se vyznačuje nízkou viskozitou. Při vytvrzování aminy nebo polyaminy nabízí vysoce kvalitní aplikační vlastnosti: jako vysoké mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné teplotní vlastnosti. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování. Předností směsi pryskyřice a doporučeného tužidla je jeho čírost. V následující tabulce jsou popsány vlastnosti epoxidové pryskyřice.

*Tab. 2 Vlastnosti epoxidové pryskyřice*

Skupenství	kapalina
Epoxidový hmotnostní ekvivalent (g/mol)	170-180
Barva	max. 3
Epoxidový index mol/1000g	0,51-0,56
Bod vznícení (°C)	nad 150
Viskozita (mPas.s při 25 °C)	400-800
Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	1,12 - 1,16

Pryskyřice s tužidlem vytvoří před laminací nízkoviskózní systém který umožňuje dobré smáčení za současného vytlačení bublin z laminovaného povrchu.

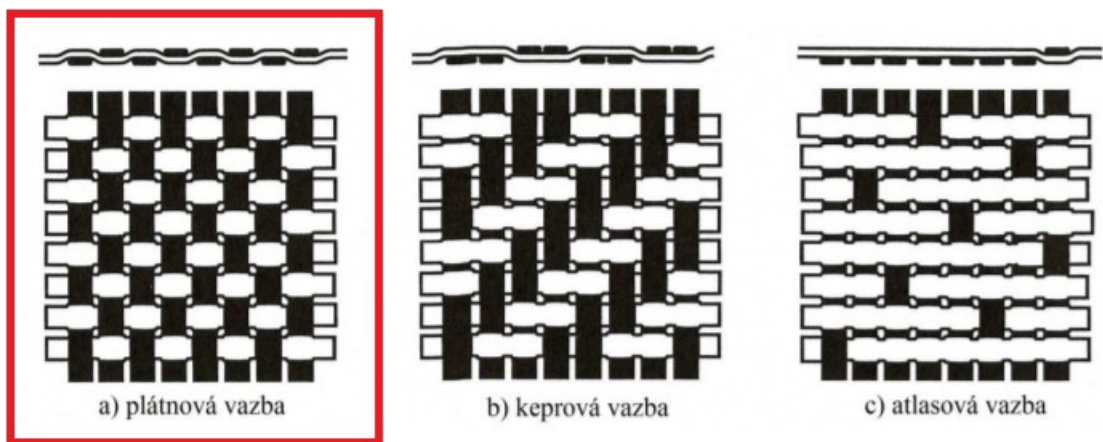
Vlastnosti systému s tužidlem H 285:

- Teplotní odolnost: 80°C
- Zpracovatelnost: 50 min

- Poměr pryskyřice k tužidlu: 100:40 (g)

## 6.2 Výztuž

Jelikož byly kladeny požadavky na možnost víceosého namáhání bez větších změn vlastností, byla jako výztuž zvolena tkanina. Jako vazba tkaniny byla z nejběžnějších třech (plátňová, keprová, atlasová) zvolena plátňová kvůli rovnoměrnému rozložení napětí po celé ploše dílce a také kvůli univerzálnímu použití.



Obr. 14 Nejběžnější typy vazeb

Kompozitní systém byl sestaven ze šesti různých tkanin s plátňovou vazbou bez křížení vrstev  $[0_6]$ .

Plošná hmotnost tkanin:

- Aramidová tkanina -  $173 \frac{g}{m^2}$
- Skelná tkanina -  $200 \frac{g}{m^2}$

Uložení tkanin v kompozitním systému bylo zvoleno následovně:



Obr. 15 Schéma uložení tkanin v kompozitním systému

## 7 TECHNOLOGIE VÝROBY A PŘÍPRAVA

Zkušební tělesa byla vyrobena technologií ruční laminace. Jedná se o nejjednodušší technologii výroby kompozitního systému pro následnou preparaci zkušebních těles. Proces výroby probíhal následovně:

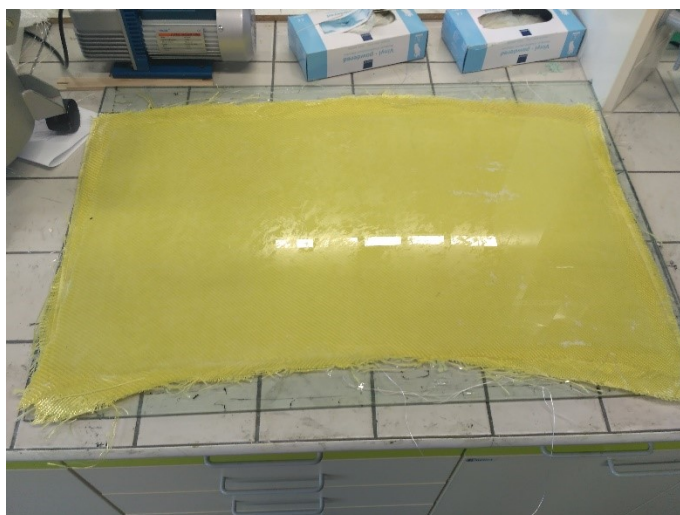
- Příprava matrice a výztuže
- Příprava formy
- Kladení vrstev a prosycování
- Odformování

V prvním kroku byla nastříhána výztuž (skelná a aramidová vlákna) ve formě tkaniny s plátňovou vazbou. Nastříhaná výztuž se navázila, aby bylo možno vyjádřit množství potřebné epoxidové pryskyřice a tužidla v poměru doporučeném výrobcem 100:40.

Po přípravě výchozích surovin byla připravena forma. Forma byla nejprve důkladně očištěna a následně na ni byl nanesen separátor ve třech vrstvách. Každá vrstva byla po nanesení rozleštěna.

Na připravenou formu byla ručním válečkem nanесena vrstva matrice (pryskyřice + tužidlo), na kterou byla položena první tkanina. Po vytlačení vzduchových kapes byla vrstva tkaniny prosycena matricí. Tento postup byl opakován u všech šesti vrstev.

Po vytvrzení při laboratorní teplotě 23°C byl kompozitní systém odformován a připraven k nařezání na zkušební tělesa ke zkoumání mechanických vlastností.

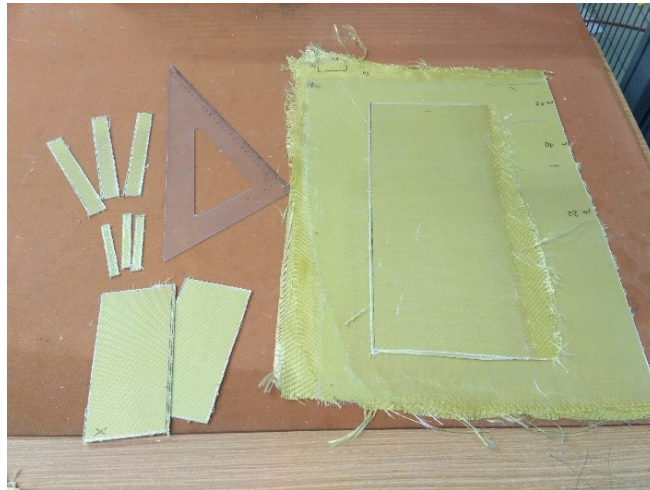


*Obr. 16 Vytvrzený kompozitní systém*



Připravená kompozitní deska byla nařezána dle nástřihového plánu na zkušební vzorky, které byly následně podrobeny mechanickým zkouškám. Z desky bylo nařezáno celkem 120 vzorků s rozměry:

- 150 x 20 x 1,7 mm
- 80 x 10 x 1,7 mm



*Obr. 17 Příprava vzorků*

Vzhledem k problematice stříhání aramidového vlákna bylo potřeba vzorky nastříhat s pomocí stolové pily Scheppach hs 80 a ručních pákových nůžek.

Z desky se nejprve nařezaly pásy na stolové pile, které se dál musely zpracovávat na pákových nůžkách vzhledem k špatné jakosti povrchu způsobené stolovou pilou (delaminace) a také kvůli bezpečnosti práce.



*Obr. 18 Stolová pila*



*Obr. 19 Pákové nůžky*

## 8 VOLBA PODMÍNEK

Jak již bylo zmíněno, výsledný kompozitní systém tvořený především tkaninou z aramidového vlákna je vhodný pro aplikace např. v **automobilovém průmyslu** vzhledem k tepelné odolnosti aramidových vláken. Tato vlastnost tvoří první kritérium pro zmíněnou aplikaci. Druhým kritériem byla chemická odolnost, která by měla zabezpečit protekci vůči degradaci a tvarové nestálosti dílce.

Pro účely stanovení mechanických zkoušek byla zvolena 3 prostředí, která interagují s aplikací pro automobilový průmysl.

Prostředí byla zvolena následovně:

- Chladicí kapalina
- Benzín
- Motorový olej



*Obr. 20 Zkušební tělesa v prostředí*

Zkušební vzorky byly vystaveny vlivu prostředí po dobu stanovenou normou v počtu 1000 hodin.

- Chladicí kapalina

Chemický Etylenglykol je alkohol se dvěma OH skupinami, který je jedovatý. Nese sladkou chuť, je bez barvy a zápachu. Pro práci byla zvolena chladicí kapalina G12.

- Benzin

Jedná se o těkavou kapalinu ropného původu používaného především pro pohon spalovacích motorů. Pro práci byl zvolen benzin s označením Natural 95 E5.

- Motorový olej

Jedná se o minerální olej používaný v motorech pro snížení tření a odvod tepla. Pro práci byl zvolen vyjetý polosyntetický motorový olej značky 10W-40.



Obr. 21 Chladicí kapalina, motorový olej a benzin

## 9 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

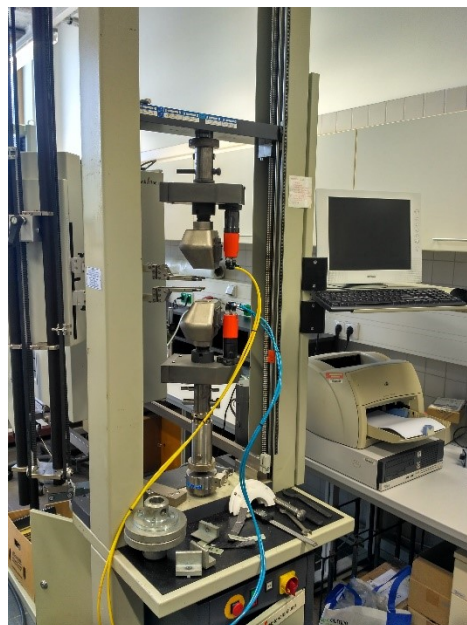
### 9.1 Zařízení Zwick

Jedná se o zařízení sloužící k měření statických mechanických zkoušek. V našem případě měření se jednalo především o statickou zkoušku v tahu a ohybu. Výsledky měření lze využít v odvětví výzkumu, vývoje či kontroly kvality. Materiálovou charakteristikou zkoumaného materiálu je například mez pevnosti v tahu.

Měření na tomto zařízení probíhalo na FT UTB s následujícími parametry stroje.

Parametry stroje ZWICK:

- Celková výška: 2012mm
- Celková šířka: 630mm
- Strojová výška: 2184mm
- Pracovní šířka: 420mm
- Rozpětí běžných čelistí: 15mm
- Hmotnost: 150kg
- Maximální zkušební síla: 100kN



*Obr. 22 Přístroj ZWICK*

## 9.2 Zařízení Caest

Jedná se o zařízení, na kterém se provádí měření dynamického mechanického namáhání v ohybu, tzv. vrubová houževnatost. Na tomto zařízení probíhá zkouška dle Charpyho, proto se zařízení obecně pojmenovává jako Charpyho kladivo. Materiálovou charakteristikou zkoumaného materiálu je nárazová práce.

Měření na tomto zařízení probíhalo na FT UTB s následujícími parametry stroje.

Parametry stroje CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR:

- Celková výška: 900 mm
- Celková šířka: 500 mm
- Typ: manuální
- Potenciální energie 1 – 25 J
- Váha: 180 kg
- Napájení: 230 V, 50 – 60 Hz



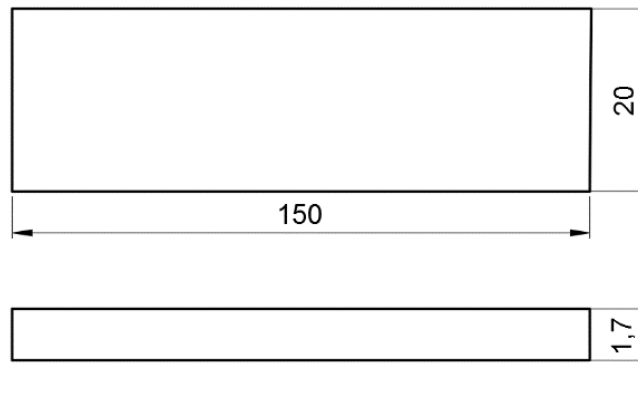
*Obr. 23 CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR*



### 9.3 Stanovení tahových vlastností dle ČSN EN ISO 527-4

Tahová zkouška byla provedena na trhacím stroji Zwick, jehož součástí byl program pro zpracování dat TestXpert. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-4.

Pro měření byly použity zkušební vzorky s těmito rozměry:



Obr. 24 Rozměry vzorku pro tah

Při průběhu tahové zkoušky se na zkušební vzorky působilo silou, která způsobovala tahovou deformaci, jejíž velikost se konstantně zvyšovala s časem až do přetržení. Před začátkem zkoušky bylo zapotřebí ručně vložit vstupní hodnoty do programu TestXpert jako šířka a tloušťka zkušebního vzorku. Tyto a další vstupní hodnoty zaznamenané siloměrem (síla) a extenzometrem (délka) byly programem vyhodnoceny dle následujících vztahů:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

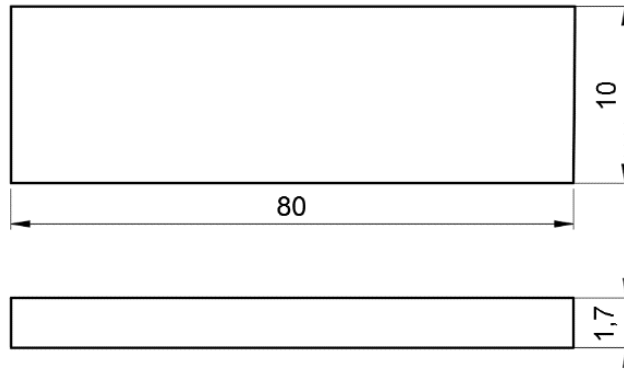
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Poměr hodnot vyjádřených rovnicemi (1) a (2) vyjadřuje zkoumanou materiálovou konstantu E.

#### 9.4 Stanovení ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 14125

Ohybová zkouška byla provedena na stroji Zwick, jehož součástí byl program pro zpracování dat TestXpert. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14125.

Pro měření byly použity zkušební vzorky s těmito rozměry:



Obr. 25 Rozměry vzorku pro ohyb

Při průběhu ohybové zkoušky se na zkušební vzorky působilo silou, která způsobovala ohybovou deformaci, jejíž velikost se konstantně zvyšovala s časem až do porušení. Před začátkem zkoušky bylo zapotřebí ručně vložit vstupní hodnoty do programu TestXpert jako šířka, tloušťka zkušebního vzorku a vzdálenost podpěr. Tyto a další vstupní hodnoty zaznamenané siloměrem (síla) byly programem vyhodnoceny dle následujících vztahů:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2hb^2} \quad (3)$$

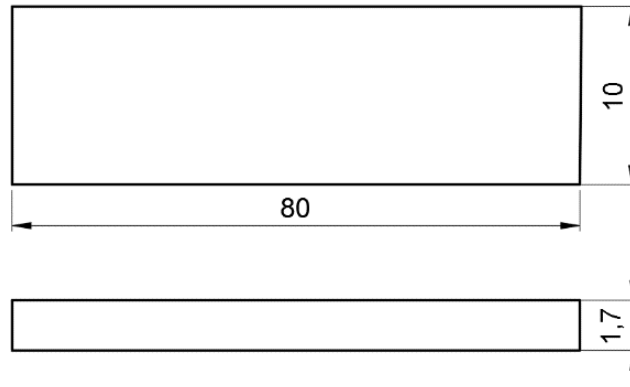
$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (4)$$

Poměr hodnot vyjádřených rovnicemi (3) a (4) vyjadřuje zkoumanou materiálovou konstantu  $E_f$ .

## 9.5 Stanovení rázové houževnatosti Charpy dle ČSN EN ISO 179-2

Rázová zkouška byla provedena metodou Charpy na stroji CEAST, jehož součástí byl program pro zpracování dat DAS8WIN. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 179

Pro měření byly použity zkušební vzorky s těmito rozměry:



Obr. 26 Rozměry vzorku pro ráz

Při průběhu rázové zkoušky se na zkušební vzorky působilo rázovou silou, která způsobovala neúplné porušení vzorků. Před začátkem zkoušky bylo zapotřebí ručně vložit vstupní hodnoty do programu DAS8WIN jako např. startovací pozice ramena. Tyto a další vstupní hodnoty byly programem vyhodnoceny dle následujících vztahů:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \times 10^3 \quad (5)$$

Hodnota  $a_{cU}$  vypočtená dle vztahu (5) vyjadřuje množství práce nutné k přeražení zkušebního vzorku bez vrubu. V literatuře označována jako rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu.



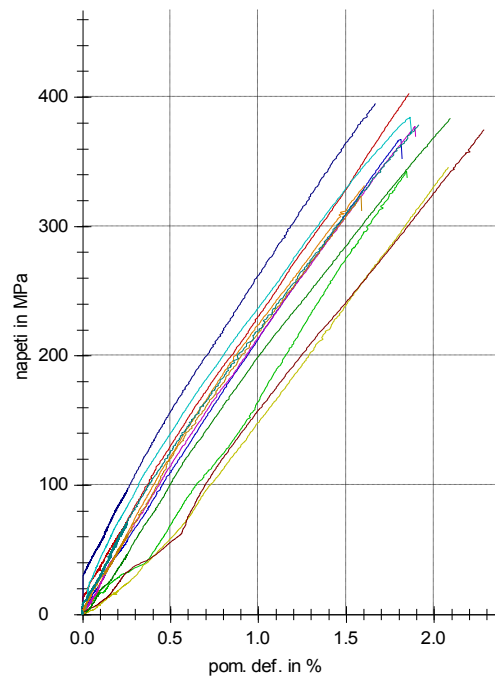
## 10 EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ HODNOTY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

### 10.1 Hodnoty pro stanovení tahových vlastností

- Zkušební vzorky bez vlivu prostředí

Tab. 3 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (tah)

	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_M$ [MPa]	h [mm]	b [mm]
1	22800	1,9	403	1,6	20
2	11900	1,8	343	1,6	20,3
3	21700	1,8	367	1,6	20,8
4	25800	1,6	332	1,6	20
5	24800	1,9	377	1,6	20,1
6	27900	1,9	384	1,6	20,7
7	10500	2,1	346	1,6	21
8	14900	2,3	375	1,6	20,5
9	18400	2,1	384	1,6	20,15
10	26800	1,7	395	1,6	20,2
$\bar{x}$	20550	1,91	370,6	1,6	20,375
S	6302,248	0,2079	23,41509	2,34E-16	0,355317
v	28,28	10,99	6,94	0	1,67

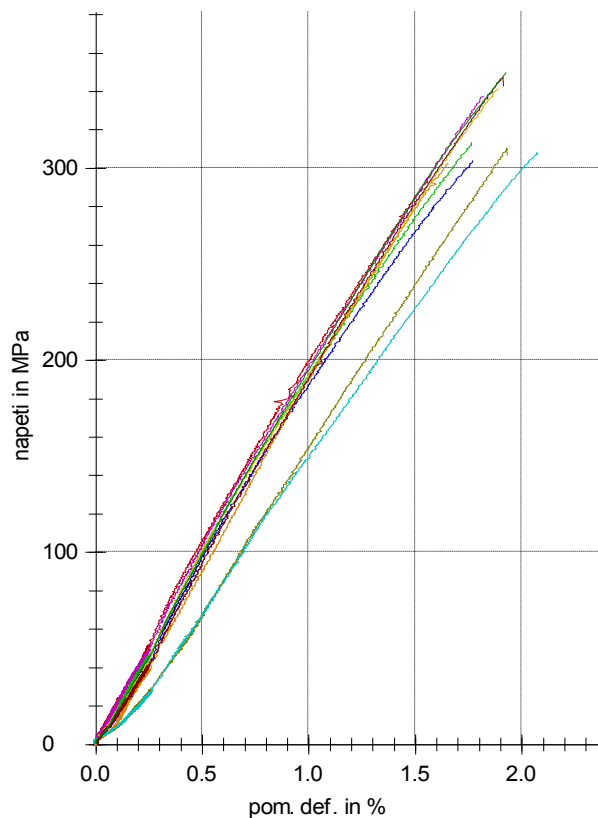


Obr. 27 Graf naměřených hodnot vzorků bez vlivu prostředí (tah)

- Zkušební vzorky v prostředí **benzinu**

Tab. 4 Naměřené hodnoty pro prostředí benzinu (tah)

	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_M$ [MPa]	h [mm]	b [mm]
1	11500	1,9	311	1,7	20,5
2	18900	1,6	296	1,7	20,1
3	18900	1,8	314	1,7	20,4
4	18400	1,8	304	1,7	19,6
5	18100	1,7	303	1,7	21,2
6	19200	1,8	338	1,7	20,2
7	10500	2,1	308	1,7	20,3
8	17200	1,9	342	1,7	21,4
9	17100	1,9	348	1,7	21,5
10	19000	1,9	350	1,7	20,3
$\bar{x}$	16900	1,8	321	1,7	20,55
S	3200	0,1	20,6	0	0,6169
v	18,93	8,06	6,42	0	3

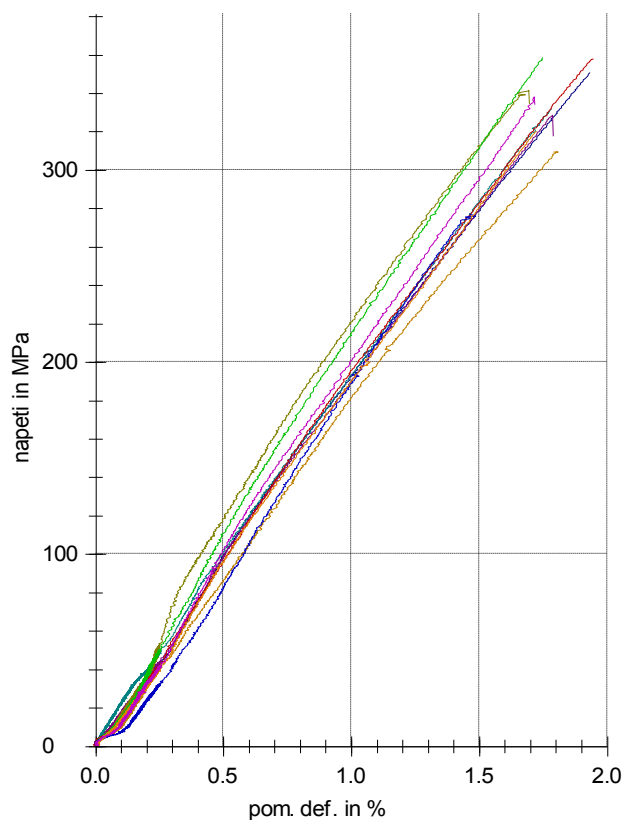


Obr. 28 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí benzinu (tah)

- Zkušební vzorky v prostředí **chladičí kapaliny**

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro prostředí chladičí kap. (tah)

	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_M$ [MPa]	h [mm]	b [mm]
1	17700	1,9	351	1,7	20,2
2	19400	1,8	310	1,7	19,8
3	17600	1,8	329	1,7	21,4
4	17700	1,8	332	1,7	20,2
5	22100	1,7	342	1,7	20,2
6	18000	1,9	358	1,7	20,2
7	22800	1,7	359	1,7	21,1
8	16100	1,5	277	1,7	20,2
9	17100	1,7	320	1,7	20,5
10	19500	1,7	338	1,7	20
$\bar{x}$	18800	1,8	332	1,7	20,38
S	2170	0,1	24,8	0	0,4962
v	11,56	7,7	7,48	0	2,43

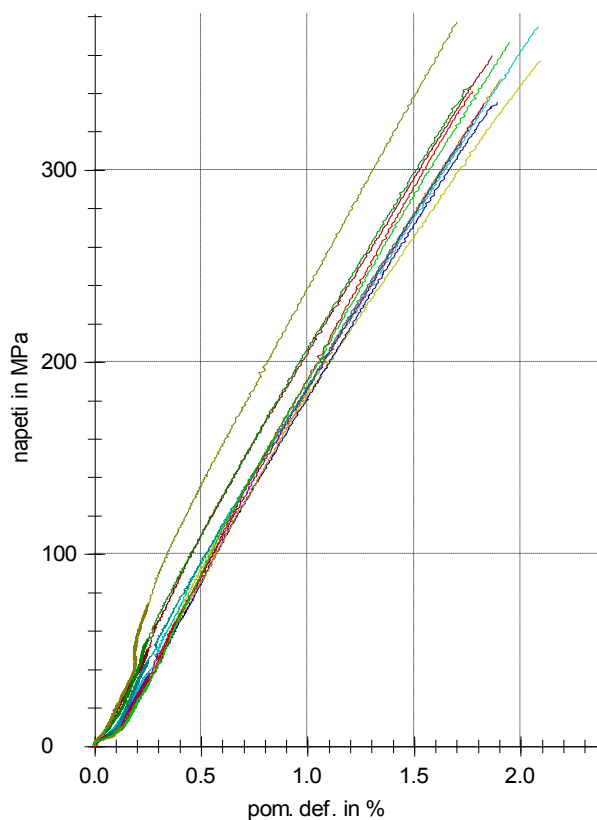


Obr. 29 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí chladičí kapal. (tah)

- Zkušební vzorky v prostředí **motorového oleje**

Tab. 6 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (tah)

	E [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_M$ [MPa]	h [mm]	b [mm]
1	17500	2,1	375	1,7	20,6
2	16600	2,1	357	1,7	20,1
3	20200	1,9	360	1,7	20,6
4	26000	1,8	344	1,7	20,1
5	15300	1,9	335	1,7	21
6	17600	1,9	348	1,7	21,3
7	16900	1,8	335	1,7	20,8
8	22900	1,7	315	1,7	20
9	16500	1,8	341	1,7	20,3
10	16000	1,9	367	1,7	20,2
$\bar{x}$	20100	1,9	367	1,7	20,57
S	6040	0,1	18,9	0	0,4777
v	30,1	7,07	5,4	0	2,32



Obr. 30 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí oleje (tah)

Následující obrázek ukazuje vzhled zkušebních vzorků po tahové zkoušce:



*Obr. 31 Zkušební vzorky po tahové zkoušce*

Optická analýza:

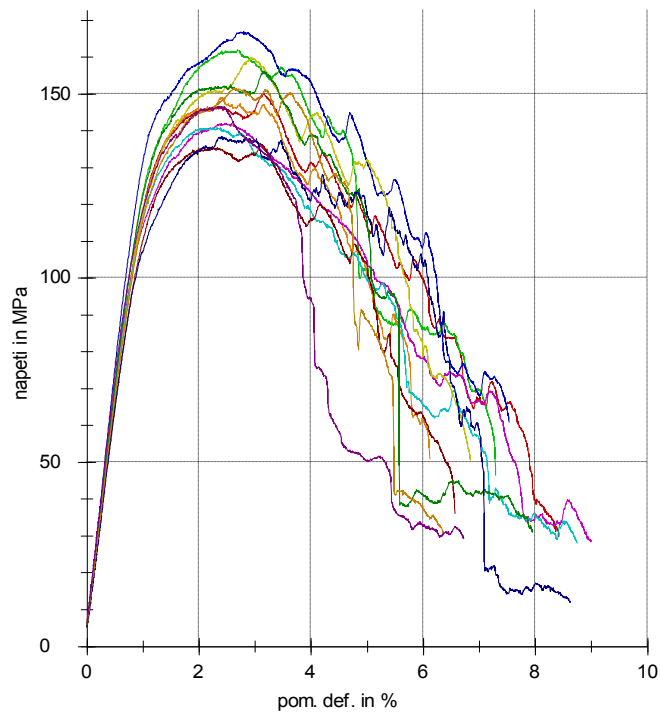
- lom je veden příčně na podélný směr na koncích zkušebního vzorku
- lom nebyl veden ve svíracích čelistech ale těsně nad nimi
- při průběhu zkoušky byl zkušební vzorek deformován do částečného porušení

## 10.2 Hodnoty pro stanovení ohybových vlastností

- Zkušební vzorky bez vlivu prostředí

Tab. 7 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (ohyb)

	$E_r$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$h$ [mm]	$b$ [mm]
1	12500	3,2	150	1,7	10,3
2	12800	2,7	162	1,7	11
3	14000	2,7	167	1,7	11,5
4	12500	2,4	149	1,7	11,5
5	13300	2,5	142	1,7	11,8
6	12700	2,2	141	1,7	11,1
7	12400	2,9	160	1,7	10,5
8	12000	3,1	137	1,7	10,5
9	13200	3,1	156	1,7	10,2
10	11800	2,4	138	1,7	10,5
$\bar{x}$	12720	2,72	150,2	1,7	10,89
S	647,7311	0,345768	10,6854	2,34E-16	0,568526
v	5,04	12,43	6,47	0	4,91



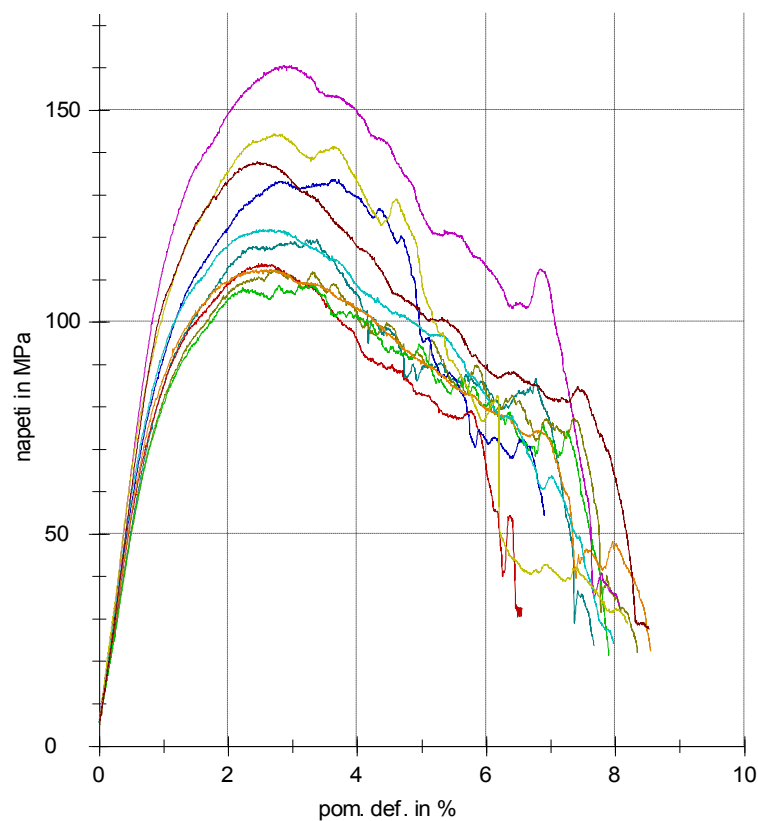
Obr. 32 Graf naměřených hodnot vzorků

bez vlivu prostředí (ohyb)

- Zkušební vzorky v prostředí benzínu

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro prostředí benzínu (ohyb)

	$E_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$h$ [mm]	$b$ [mm]
1	8890	3,4	120	1,7	11,3
2	8680	2,7	113	1,7	10,5
3	9410	2,5	114	1,7	10,8
4	8490	3,3	109	1,7	10,7
5	10200	3,6	134	1,7	10,3
6	9650	2,6	113	1,7	10,7
7	11400	2,9	160	1,7	10,9
8	10900	2,5	122	1,7	10,9
9	11600	2,7	144	1,7	11,4
10	10300	2,4	138	1,7	10,9
$\bar{x}$	9960	2,9	127	1,7	10,84
S	1120	0,4	16,9	0	0,3307
v	11,22	14,29	13,36	0	3,05

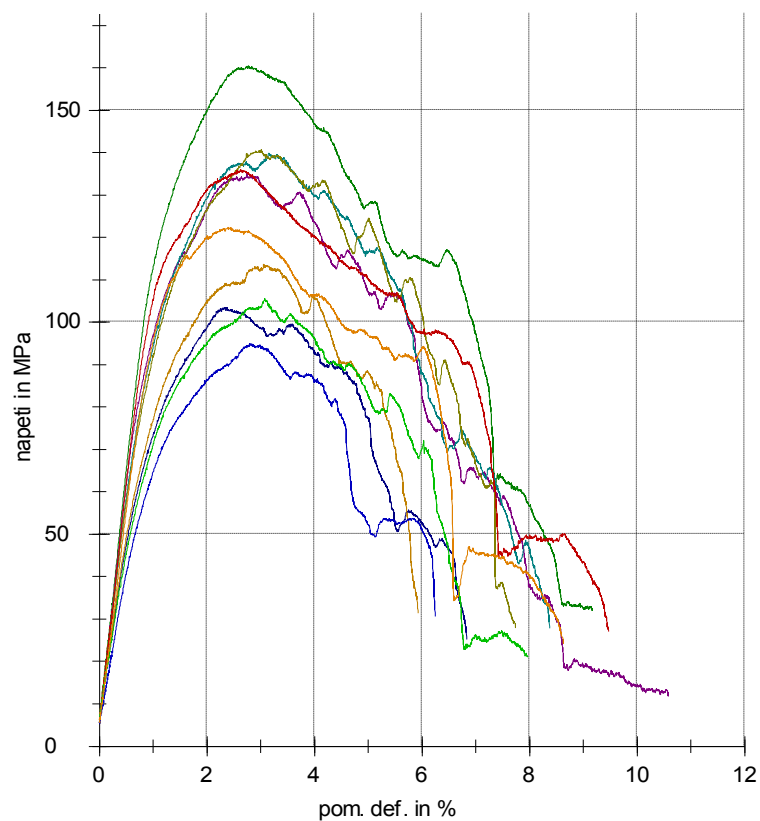


Obr. 33 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí benzínu (ohyb)

- Zkušební vzorky v prostředí **chladicí kapaliny**

Tab. 9 Naměřené hodnoty pro prostředí chladicí kap. (ohyb)

	$E_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$h$ [mm]	$b$ [mm]
1	11600	2,8	161	1,7	10,8
2	8490	2,3	103	1,7	10,7
3	8660	3,1	114	1,7	9,8
4	11300	2,7	135	1,7	10,8
5	10400	3,2	140	1,7	10,1
6	10400	3	141	1,7	10,8
7	10700	2,6	136	1,7	9,7
8	7980	3,1	106	1,7	10,3
9	7200	2,8	95	1,7	10,8
10	9640	2,4	122	1,7	10,8
$\bar{x}$	9630	2,8	125	1,7	10,46
S	1480	0,3	20,6	0	0,4477
v	15,39	10,18	16,47	0	4,28



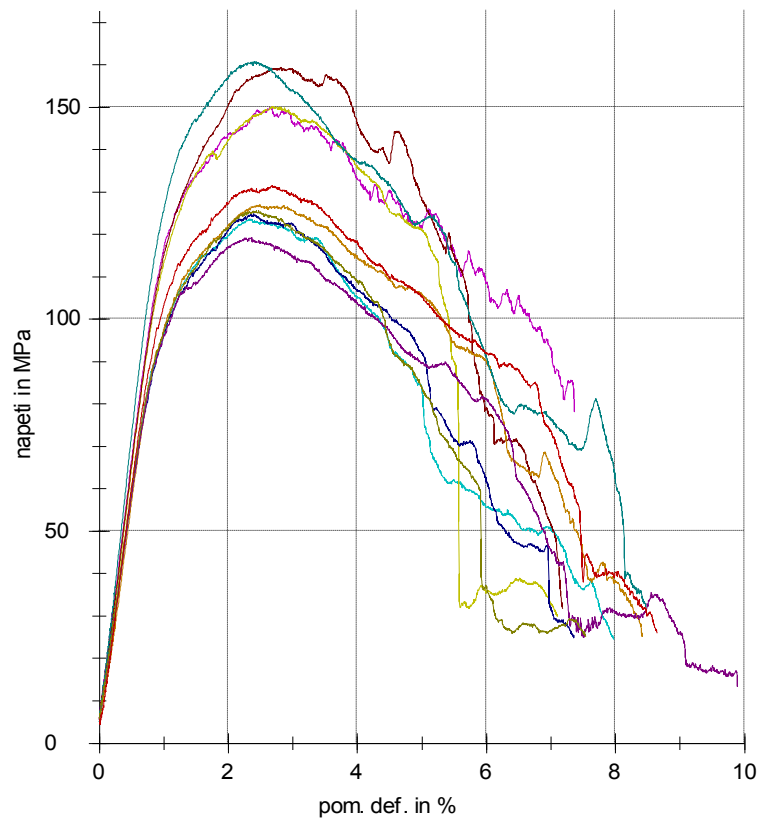
Obr. 34 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí chladicí kap. (ohyb)



- Zkušební vzorky v prostředí **motorového oleje**

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (ohyb)

	$E_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{fM}$ [MPa]	h [mm]	b [mm]
1	11800	2,7	150	1,7	10
2	10200	2,3	124	1,7	11,1
3	11400	2,7	150	1,7	11,1
4	11600	2,8	159	1,7	10,8
5	10200	2,4	125	1,7	10,5
6	9230	2,5	127	1,7	10,4
7	9890	2,4	119	1,7	10,3
8	13000	2,4	161	1,7	10,3
9	10400	2,4	126	1,7	10,8
10	11200	2,7	131	1,7	10,6
$\bar{x}$	10900	2,5	137	1,7	10,59
S	1120	0,2	16	0	0,3604
v	10,24	7,07	11,68	0	3,4



Obr. 35 Graf naměřených hodnot vzorků  
v prostředí oleje (ohyb)

Následující obrázek ukazuje vzhled zkušebních vzorků po ohybové zkoušce:



*Obr. 36 Zkušební vzorky po tahové zkoušce*

Optická analýza:

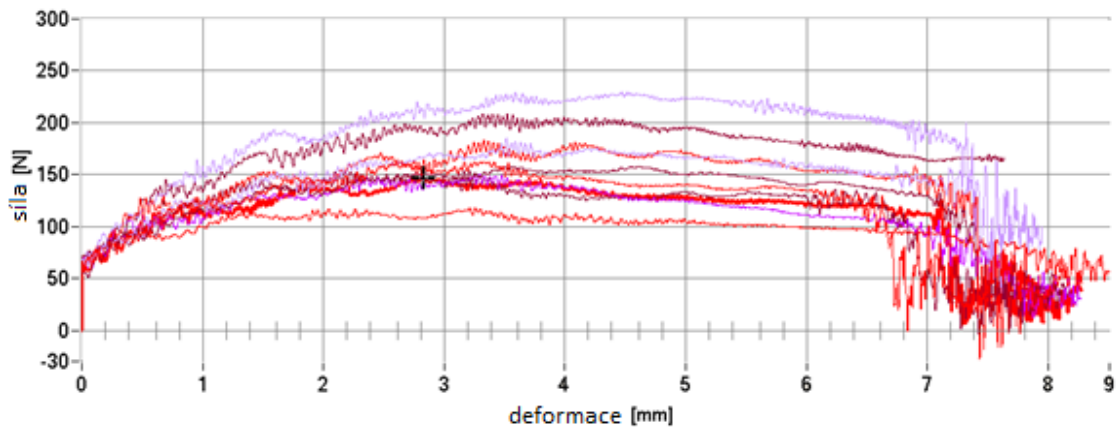
- lom je veden příčně na podélný směr ve středu zkušebního vzorku
- při průběhu zkoušky nebyl zkušební vzorek deformován až do úplného porušení

### 10.3 Hodnoty pro stanovení rázové houževnatosti Charpy

- Zkušební vzorky bez vlivu prostředí

Tab. 11 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (ráz)

	$F_M$ [N]	$S_M$ [mm]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$Ab$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	146,61	2,82	17,66	49,33
2	153,77	3,2	21,89	49,99
3	150,79	3,29	21,42	49,54
4	117,41	3,21	17,7	44,59
5	208,6	3,32	28,06	70,79
6	228,86	4,47	43,87	76,47
7	182,97	3,33	24,64	59,57
8	157,94	3,57	24,06	53,47
9	184,76	3,52	25,79	62,15
10	162,11	3,33	23,08	48,39
$\bar{x}$	169,382	3,406	24,817	56,429
$S$	32,47161	0,42539	7,4541816	10,55848
$v$	0,191706	0,1249	0,3003659	0,187111

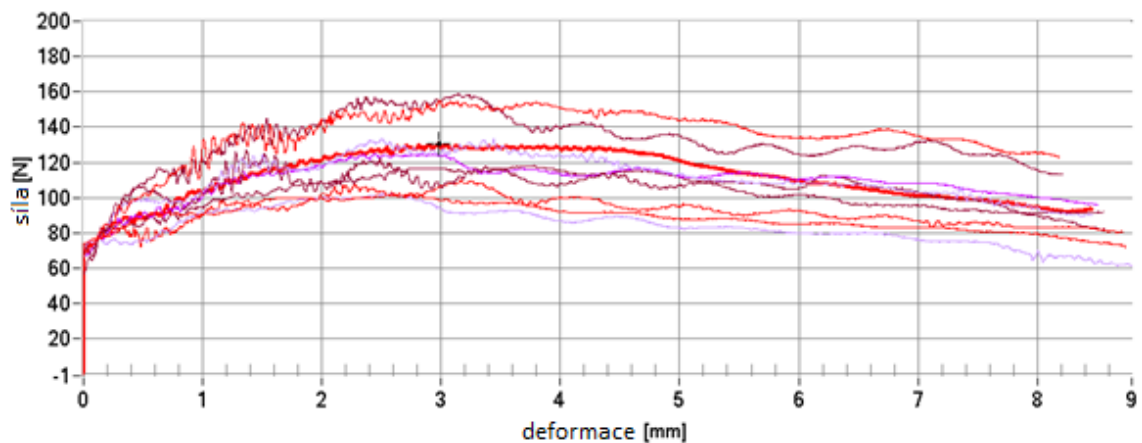


Obr. 37 Graf naměřených hodnot vzorků bez vlivu prostředí (ráz)

- Zkušební vzorky v prostředí **benzinu**

Tab. 12 Naměřené hodnoty pro prostředí benzinu (ráz)

	$F_M$ [N]	$S_M$ [mm]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$Ab$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	130,52	2,98	18,84	54,55
2	118,6	3,78	22,6	51,53
3	124,56	2,45	14,63	53,63
4	110,26	3,17	17,15	46,41
5	126,95	1,36	7,74	51,13
6	102,51	2,57	13,39	42,61
7	102,51	2,74	14,77	44,93
8	159,13	3,15	23,71	62,23
9	132,91	2,51	15,75	54,16
10	154,96	2,99	21,79	63,93
$\bar{x}$	126,291	2,77	17,037	52,511
S	19,47264	0,633859	4,87231	6,90068
v	0,154189	0,22883	0,285984	0,131414

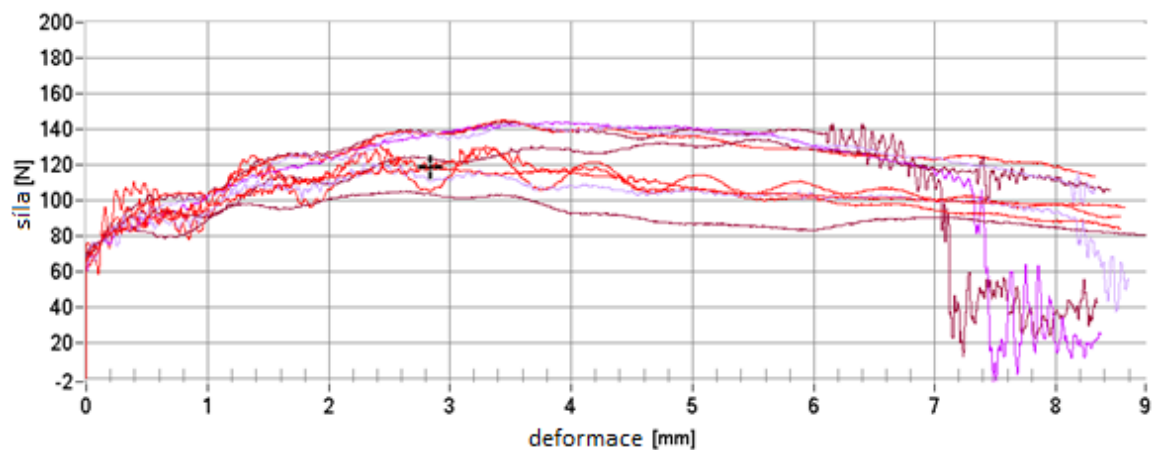


Obr. 38 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí benzinu (ráz)

- Zkušební vzorky v prostředí **chladičí kapaliny**

Tab. 13 Naměřené hodnoty pro prostředí chladičí kap. (ráz)

	$F_M$ [N]	$S_M$ [mm]	$a_{cu}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$Ab$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	132,31	2,34	13,89	52,52
2	144,23	3,46	23,86	54,99
3	143,63	3,88	26,48	53,37
4	144,83	3,45	23,61	60,11
5	134,1	5,52	36,81	56,95
6	143,04	3,56	24,07	59,75
7	129,93	3,36	21,18	51,54
8	104,89	2,63	14	45,73
9	120,39	2,3	12,88	50
10	118,6	2,83	16,64	51,65
$\bar{x}$	131,595	3,333	21,342	53,661
S	13,44857	0,940721	7,361778	4,440749
v	0,102197	0,282245	0,344943	0,082756

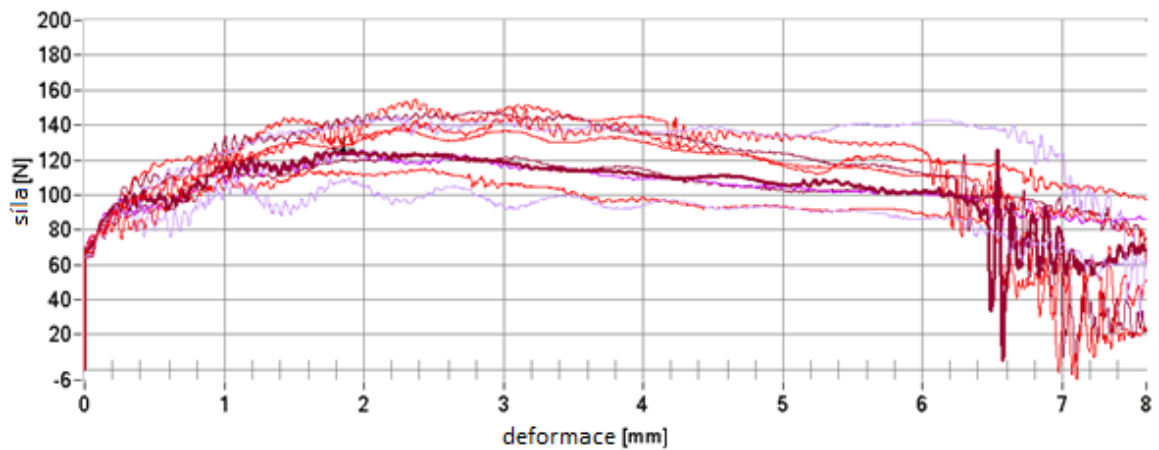


Obr. 39 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí chladičí kap. (ráz)

- Zkušební vzorky v prostředí **motorového oleje**

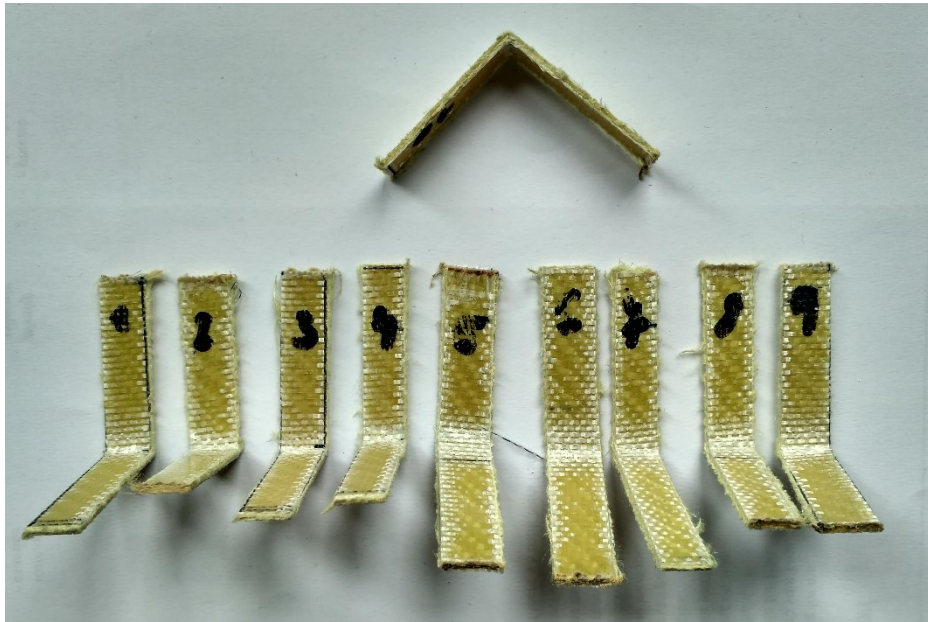
Tab. 14 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (ráz)

	$F_M$ [N]	$S_M$ [mm]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$Ab$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	154,36	2,95	20,74	56,54
2	123,37	3,03	17,88	50,62
3	126,95	2,27	13,23	50,54
4	138,27	2,78	17,82	54,76
5	147,81	3,48	24,72	54,71
6	146,02	2,81	18,94	59,43
7	115,03	3,06	17,49	43,17
8	126,35	2,34	13,95	49,82
9	110,26	2,41	12,53	44,13
10	149,59	3,78	25,67	56,76
$\bar{x}$	133,801	2,891	18,297	52,048
S	15,475	0,486266	4,48305	5,396573
v	0,115657	0,1682	0,245016	0,103685



Obr. 40 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí oleje (ráz)

Následující obrázek ukazuje vzhled zkušebních vzorků po zkoušce rázové houževnatosti:



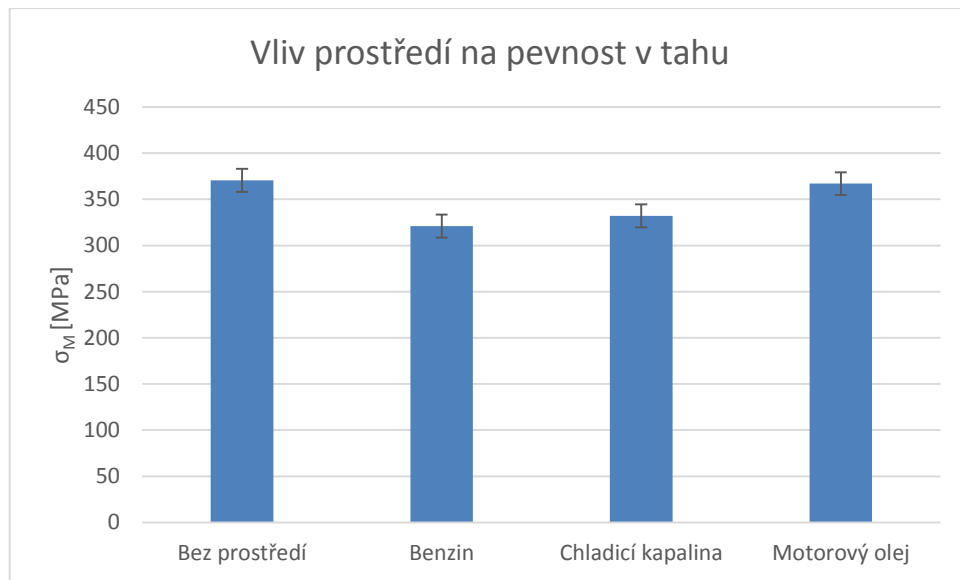
*Obr. 41 Zkušební vzorky po zkoušce rázové houževnatosti*

Optická analýza:

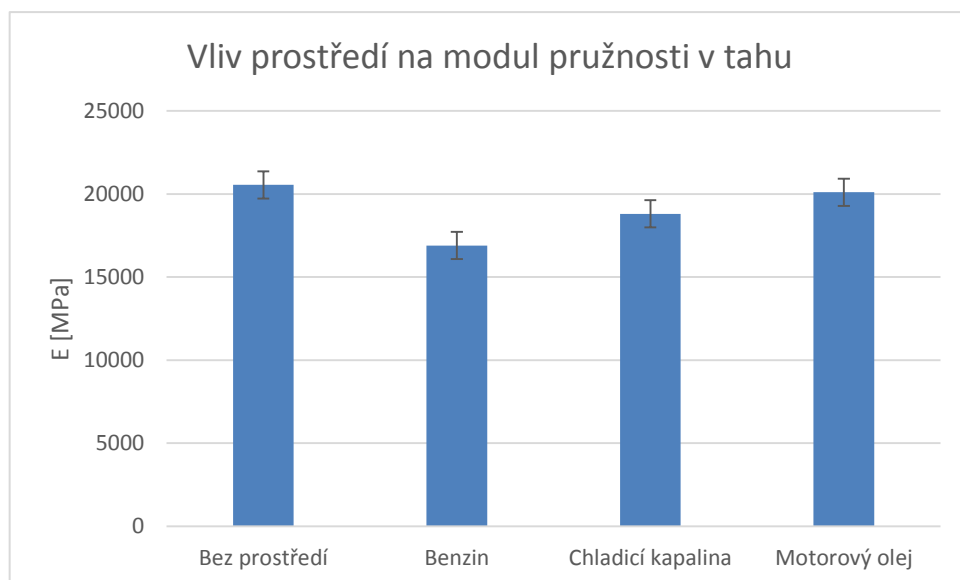
- lom je veden příčně na podélný směr ve středu zkušebního vzorku
- při průběhu zkoušky nebyl zkušební vzorek deformován až do úplného porušení

## 11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z výsledku měření pomocí tahové zkoušky bylo zjištěno, že pokles pevnosti vzorků ve srovnání se vzorky bez prostředí činil v prostředí benzínu 13,3 %, v prostředí chladicí kapaliny 10,4 % a v prostředí motorového oleje 1 %. V následujících sloupcových grafech je zakreslena závislost hodnot pevnosti a modulu pružnosti na zvolených prostředích.



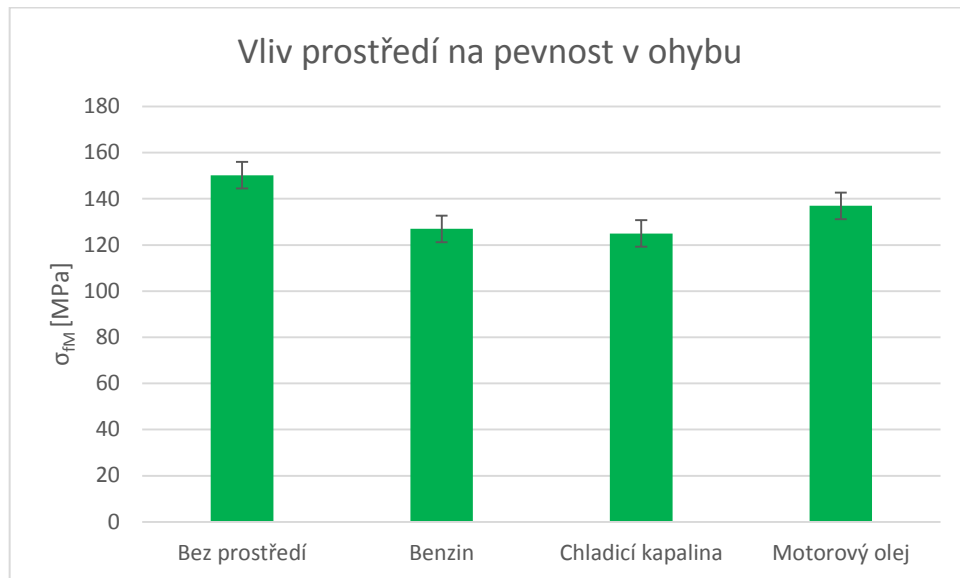
Obr. 42 Vliv prostředí na pevnost v tahu



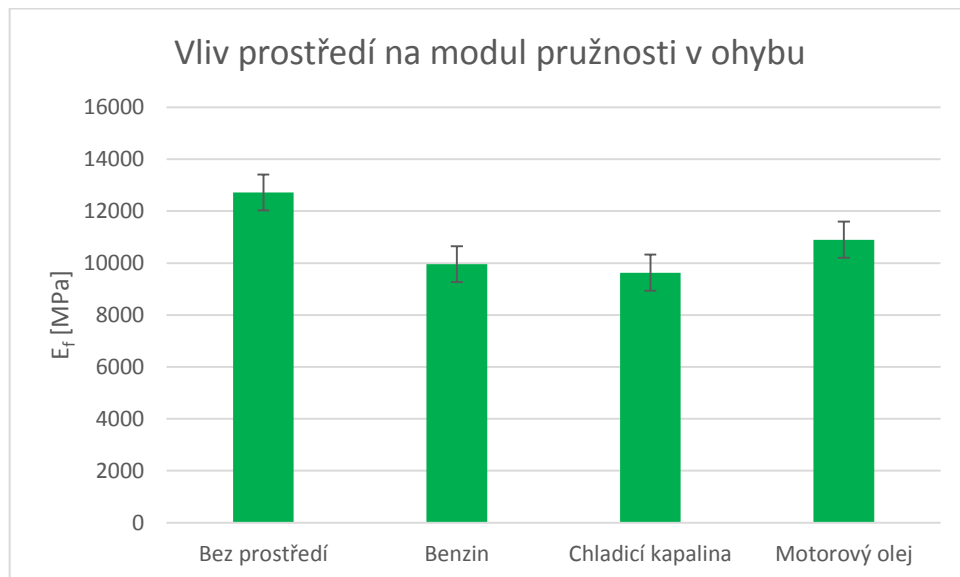
Obr. 43 Vliv prostředí na modul pružnosti v tahu



Z výsledku měření pomocí ohybové zkoušky bylo zjištěno, že pokles pevnosti vzorků ve srovnání se vzorky bez prostředí činil v prostředí benzínu 15,4 %, v prostředí chladicí kapaliny 16,8 % a v prostředí motorového oleje 18,8 %. V následujících sloupcových grafech je zakreslena závislost hodnot pevnosti a modulu pružnosti na zvolených prostředích.

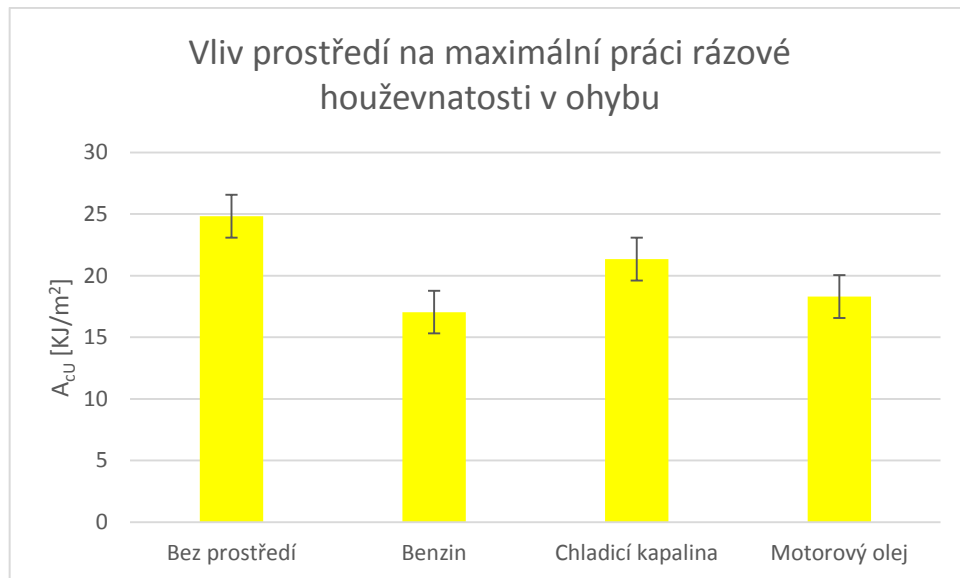


Obr. 44 Vliv prostředí na pevnost v ohybu

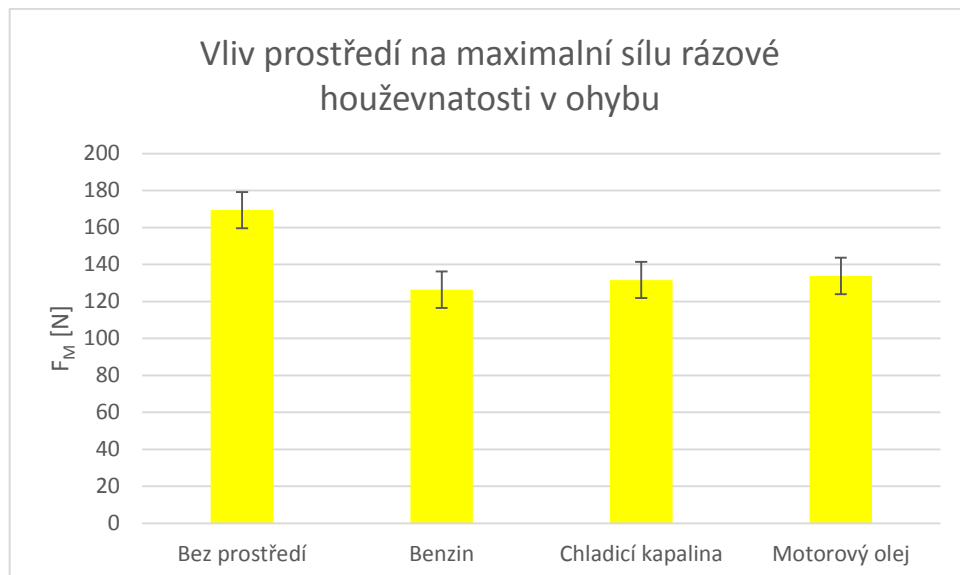


Obr. 45 Vliv prostředí na modul pružnosti v ohybu

Z výsledku měření pomocí ohybové zkoušky bylo zjištěno, že pokles rázové houževnatosti vzorků ve srovnání se vzorky bez prostředí činil v prostředí benzínu 31,3%, v prostředí chladicí kapaliny 14 % a v prostředí motorového oleje 26,3 %. V následujících sloupcových grafech je zakreslena závislost hodnot rázové houževnatosti a maximální síly na zvolených prostředích.



Obr. 46 Vliv prostředí na rázovou houževnatost v ohybu



Obr. 47 Vliv prostředí na maximální sílu rázové zkoušky v ohybu

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá vlivem klimatických podmínek na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu, především na jeho pevnost a tuhost. S ohledem na použití v automobilovém průmyslu byly zvoleny prostředí benzínu, chladicí kapaliny a motorového oleje pro demonstraci vhodnosti materiálu. Zkušební materiály byly prostředím ovlivňovány celkem 1000 hodin za konstantní teploty 23 °C. Po vyjmutí ze svého prostředí byly zkušební vzorky podrobeny mechanickým zkouškám a to zkouškou v ohybu a tahu, jejíž analýza probíhala na zařízení Zwick, a zkouškou rázové houževnatosti v ohybu metodou Charpy, která probíhala na zařízení Caest.

Z výsledku měření bylo zjištěno, že zkušební vzorky v prostředí benzínu mají hodnotu pevnosti v tahu 321 MPa, hodnotu pevnosti v ohybu 127 MPa a hodnotu rázové houževnatosti 17,04 kJ·m<sup>-2</sup>. Dále zkušební vzorky v prostředí chladicí kapaliny mají hodnotu pevnosti v tahu 332 MPa, hodnotu pevnosti v ohybu 125 MPa a hodnotu rázové houževnatosti 21,34 kJ·m<sup>-2</sup>. A zkušební vzorky v prostředí motorového oleje mají hodnotu pevnosti v tahu 367 MPa, hodnotu pevnosti v ohybu 137 MPa a hodnotu rázové houževnatosti 18,3 kJ·m<sup>-2</sup>.

Jelikož pokles mechanických vlastností zkušebních vzorků ovlivněný prostředím nebyl příliš „výrazný“, dá se předpokládat, že při výrobě kompozitního systému se postupovalo korektně a správnost výrobního procesu byla tímto verifikována za splnění podmínky, že daný kompozitní systém je odolný vůči těmto agresivním prostředím.

Kompozitní systém lze tedy použít ve většině aplikacích pro automobily od krytů a jiných konstrukčně nenáročných dílců až po konstrukčně náročnější dílce jako např. spojovací ramena, tlumící pružiny a karoserie.

Pokračováním této bakalářské práce by mohl být detailnější výzkum vlastností kompozitního systému, např. hořlavosti, jelikož pro automobilový průmysl je nejvyšší prioritou se vyvarovat nežádoucímu vlivu ohně a to především z hlediska bezpečnosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Gdpkoral. *Gdpkoral: Co jsou to kompozitní materiály* [online]. Tišnov: KOMPOZITY, VYZTUŽENÉ PLASTY GDP KORAL s.r.o., 2006 [cit. 2017-02-05]  
Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/co-jsou-kompozitni-materialy/w6>
- [2] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Matrice* [online]. ČR, 2016 [cit. 2017-02-06].  
Dostupné z:  
[https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI\\_vckxkMGhoMjYtbWs/view](https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vckxkMGhoMjYtbWs/view)
- [3] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Zlín, 2016.
- [4] *Obr. 1 Trubky* [online]. b.r. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z:  
[http://img.talkandroid.com/uploads/2013/06/Carbon\\_Fiber.jpg](http://img.talkandroid.com/uploads/2013/06/Carbon_Fiber.jpg)
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- [7] BENEŠ, Libor. *Kompozitní materiály* [online]. b.r. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z:  
[users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/.../07\\_Kompozity.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/.../07_Kompozity.pdf)
- [8] ZÁLEŠÁK, Martin. *Kvantifikace vlivu aditiv na mechanické vlastnosti plastů a kompozitů pro palné zbraně* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z:  
Kvantifikace vlivu aditiv na mechanické vlastnosti plastů a kompozitů pro palné zbraně
- [9] *VM plast* [online]. Nedakonice: VM Plast s.r.o., 2012 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z:  
<http://www.vmplast.cz/sortiment/polypropylen/>
- [10] *Textilelearner* [online]. Bangladesh: Textile Learner, 2017 [cit. 2017-02-26].  
Dostupné z: <http://textilelearner.blogspot.cz/2012/12/dyeing-process-of-glass-fiber-filaments.html>
- [11] *Carbon Fabrics Tapes Yards Rolls* [online]. The Variety Pack, 2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <https://carbonsales.com/Carbon-Fabrics-Tapes-Yards-Rolls/>

- [12] Alibaba [online]. 2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com)
- [13] Havel composites [online]. *Přáslavice: THE CREATIVE-ZONE, 2010* [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejichpopis-a-schemata.html>
- [14] BODLÁK, Lukáš. Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů [online]. Zlín, 2016 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [www.stag.utb.cz](http://www.stag.utb.cz)
- [15] ZAPLETAL, Ladislav. Mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitů na bázi akrylátových vysoce plněných matric [online]. Zlín, 2012 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [www.stag.utb.cz](http://www.stag.utb.cz)
- [16] AZOM [online]. *London: AZoNetwork, 2000* [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8620>
- [17] Flickr [online]. *USA: Yahoo, b.r.* [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)
- [18] SUCHÝ, Marek. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17446](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17446)
- [19] LUTONSKÝ, Zbyňek. *Vliv teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů* [online]. Zlín, 2007 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2757/lutonsk%C3%BD\\_2007\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2757/lutonsk%C3%BD_2007_dp.pdf?sequence=1)
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery [online]. 1.* Svitavy: publi.cz, 2016 [cit. 2017-02-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [21] BĚHÁLEK, Luboš. *Teorie zpracování nekovových materiálů [online]*. Liberec, 2010 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c5/Navlhavost.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c5/Navlhavost.pdf)
- [22] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [23] JANDA, Roman. Chemická odolnost radiačně síťovaných polymerů [online]. Zlín, 2010 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z:

- [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14690/janda\\_2010\\_dp.pdf?sequence=&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14690/janda_2010_dp.pdf?sequence=&isAllowed=y)
- [24] SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi. 1.* Praha: Verlag Dashöfer, 1999 2001. ISBN 80-862-2915-7.
- [25] HODGKINSON, J. *Mechanical testing of advanced fibre composites. Cambridge, England: Woodhead*, 2000. ISBN 18-557-3312-9.
- [26] *Technická zařízení budov* [online]. ČR: Topinfo s.r.o., 2016 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://m.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10137-zkousky-ohybem-a-diagramy-odolnosti-vlaknobetonu-s-recyklaty>
- [27] KOS, Petr. Vlastnosti polymerních dlouhovláknových kompozitů s různými výztužemi [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf12/2540.pdf>
- [28] HRUĐÁK, Miroslav. Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny [online]. Praha, 2004 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: [http://www.kompozity.info/clanky/compdb/DP\\_Hrudnak.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/compdb/DP_Hrudnak.pdf)
- [29] *Tensile Testing* [online]. USA, 2004 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: [http://www.asminternational.org/documents/10192/3465262/05105G\\_Chapter\\_1.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/3465262/05105G_Chapter_1.pdf) e13396e8-a327-490a-a414-9bd1d2bc2bb8
- [30] Engineering archives [online]. USA: *Engineering Archives*, 2012 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.engineeringarchives.com>
- [31] *Destruktivní zkoušky materiálu* [online]. ČR, 2006 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: [http://sps.watzke.cz/dl/mat/stt/06\\_zkousky\\_materialu\\_destruktivni.pdf](http://sps.watzke.cz/dl/mat/stt/06_zkousky_materialu_destruktivni.pdf)
- [32] ČSN ISO 148-1: Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [33] HAMERNÍK, Jan. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení [online]. ČR, 2006 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\sigma_f$	Ohybové napětí
$\varepsilon$	Poměrná deformace v tahu
F	Síla
$E_c$	Kinetická energie
$S_0$	Počáteční plocha průřezu
$\Delta l$	Rozdíl délky
$l_0$	Počáteční délka
$\varepsilon_f$	Poměrná deformace v ohybu
l	Délka
h	Výška
s	Průhyb
h	Tloušťka
b	Šířka
E	Modul pružnosti v tahu
$\sigma_M$	Tahové napětí
$E_f$	Ohybový modul pružnosti
$\sigma_{fM}$	Maximální ohybové napětí
$F_M$	Maximální síla
$S_M$	Deformace při maximální síle
$a_{cU}$	Maximální práce
Ab	Celková práce
$\sigma_f$	Ohybové napětí

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Trubice z kompozitu vyztuženého uhlíkovými vlákny</i> .....	12
<i>Obr. 2 Základní rozdělení kompozitních materiálů</i> .....	12
<i>Obr. 3 Tkanina ze skelných vláken</i> .....	15
<i>Obr. 4 Tkanina z karbonových vláken</i> .....	16
<i>Obr. 5 Tkanina z aramidových vláken</i> .....	17
<i>Obr. 6 Schéma technologie ruční laminace</i> .....	19
<i>Obr. 7 Schéma technologie RTM</i> .....	20
<i>Obr. 8 Závislost mechanických vlastností termoplastů na teplotě</i> .....	21
<i>Obr. 9 Závislost mechanických vlastností reaktoplastů na teplotě</i> .....	21
<i>Obr. 10 Vliv teploty na mechanické vlastnosti</i> .....	22
<i>Obr. 11 Vlastnosti PA66 v suchém a navlhém stavu</i> .....	23
<i>Obr. 12 Princip tříbodové a čtyřbodové ohybové zkoušky</i> .....	25
<i>Obr. 13 Schéma tahové zkoušky</i> .....	26
<i>Obr. 14 Nejběžnější typy vazeb</i> .....	31
<i>Obr. 15 Schéma uložení tkanin v kompozitním systému</i> .....	31
<i>Obr. 16 Vytvrzený kompozitní systém</i> .....	32
<i>Obr. 17 Příprava vzorků</i> .....	33
<i>Obr. 18 Stolová pila</i> .....	33
<i>Obr. 20 Zkušební tělesa v prostředí</i> .....	34
<i>Obr. 21 Chladicí kapalina, motorový olej a benzin</i> .....	35
<i>Obr. 22 Přístroj ZWICK</i> .....	36
<i>Obr. 23 CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR</i> .....	37
<i>Obr. 24 Rozměry vzorku pro tah</i> .....	38
<i>Obr. 25 Rozměry vzorku pro ohyb</i> .....	39
<i>Obr. 26 Rozměry vzorku pro ráz</i> .....	40
<i>Obr. 27 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	41
<i>Obr. 28 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	42
<i>Obr. 29 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	43
<i>Obr. 30 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	44
<i>Obr. 31 Zkušební vzorky po tahové zkoušce</i> .....	45
<i>Obr. 32 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	46
<i>Obr. 33 Graf naměřených hodnot vzorků</i> .....	47



---

<i>Obr. 34 Graf naměřených hodnot vzorků .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 35 Graf naměřených hodnot vzorků .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 36 Zkušební vzorky po tahové zkoušce .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 37 Graf naměřených hodnot vzorků bez vlivu prostředí (ráz).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 38 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí benzínu (ráz) .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí chladicí kap. (ráz) .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40 Graf naměřených hodnot vzorků v prostředí oleje (ráz) .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 41 Zkušební vzorky po zkoušce rázové houževnatosti .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 42 Vliv prostředí na pevnost v tahu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 43 Vliv prostředí na modul pružnosti v tahu .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 44 Vliv prostředí na pevnost v ohybu .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 45 Vliv prostředí na modul pružnosti v ohybu .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 46 Vliv prostředí na rázovou houževnatost v ohybu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 47 Vliv prostředí na maximální sílu rázové zkoušky v ohybu.....</i>	<i>58</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Porovnání chemické odolnosti polymerů .....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2 Vlastnosti epoxidové pryskyřice .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (tah) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 Naměřené hodnoty pro prostředí benzínu (tah) .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5 Naměřené hodnoty pro prostředí chladicí kap. (tah) .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (tah) .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (ohyb).....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty pro prostředí benzínu (ohyb).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 9 Naměřené hodnoty pro prostředí chladicí kap. (ohyb).....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (ohyb) .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 11 Naměřené hodnoty bez vlivu prostředí (ráz) .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 12 Naměřené hodnoty pro prostředí benzínu (ráz) .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 13 Naměřené hodnoty pro prostředí chladicí kap. (ráz) .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 14 Naměřené hodnoty pro prostředí oleje (ráz) .....</i>	<i>54</i>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha PI: Technický list epoxidové pryskyřice LH 385

Příloha PII: Technický list tužidla H 285

# PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE LH 385



[HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.](http://www.havel-composites.cz)  
[Svědlice 67](mailto:svědlice@havel-composites.cz)  
[783 54 Píšťavice](mailto:783 54 Píšťavice)  
tel.: +420 585 129 011  
fax: +420 585 129 040  
[www.havel-composites.com](http://www.havel-composites.com)  
IČ: 25907379  
DIČ: CZ25907379

## TECHNICKÝ LIST

### EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE LH 385

#### Všeobecně:

Epoxidová pryskyřice LH 385 se vyznačuje nízkou viskozitou. Při vytvrzování aminy nebo polyaminy nabízí vysoce kvalitní aplikační vlastnosti jako vysoké mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné teplotní vlastnosti atd. Lze ji využít i jako epoxidový lak, s vhodným tužidlem.

Jedná se o pryskyřici nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 400-800 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování. Předností směsi pryskyřice a doporučeného tužidla je jeho čírost.

Zvláštní vlastnosti: Pryskyřice je i při teplotě 0 - 10°C čirá, nedochází k zakalení tak, jako u některých epoxidových pryskyřic. Pryskyřice s tužidlem vytvoří před laminací nízkoviskozní systém, který umožňuje dobré smáčení za současného vytlačení bublin z laminovaného povrchu.

Doba zpracovatelnosti /tzv. pot life/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin podle použitého tužidla.

Teplotní odolnost výrobku bez výrazných změn jejich parametrů:

> + 50-100 °C

Zpracování: Při teplotách mezi 10 °C až 50 °C, všechny běžné metody zpracování

Schválení: není

Použití: lodě, pádla, kapoty

Systémy laminačních pryskyřic pro vytvrzování při pokojové teplotě

Pro vytvrzování při pokojové teplotě od 10 - 30 °C lze uplatnit různé kombinace laminační pryskyřice a tužidel. Tyto systémy byly upraveny takovým způsobem, že při pokojové teplotě zcela vytvrdnou.

Teplelné odolnosti 40 - 60 °C lze dosáhnout vytvrzováním při pokojové teplotě /tzv. pravidlo palce: vytvrzovací teplota + 30 °C = maximální tepelná odolnost/. Tepelná odolnost těchto systémů může být zvýšena na přibližně 90 °C postupným tepelným temperováním při teplotě 50 -70 °C

Použitá tužidla

Tužidlo	teplotní odolnost (°C)	zpracovatelnost (v min)	poměr LH 385 k tužidlu v gramech
H 533	80	15	100 : 35
H 534	80	20	100 : 35
H 535	80	30	100 : 35
H 536	80	50-70	100 : 35
H 538	90	60-80	100 : 35
H 285	80	50	100 : 40
H 286	100	90	100 : 40
H 287	150	240	100 : 40

Lze také dobarvovat pigmentem.

Vlastnosti pryskyřice

Skupenství	kapalina
Epoxidový hmotnostní ekvivalent (g/mol)	170 - 180
Barva (Gardner)	max. 3
Epoxidový index mol/1000 g	0,51 - 0,56
Bod vznícení (°C)	nad 150
Viskozita (mPa.s při 25°C)	400 - 800
Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	1,12- 1,16

Skladování

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách pod + 15 °C do 0°C pryskyřice nekystalizuje.

Vypracoval: ing. Vojtěch Grecman  
[info@havel-composites.cz](mailto:info@havel-composites.cz)

Datum 13.1.2014  
Revize: Ing. Richard Moravec dne 5.4.2016

# PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA H 285



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.  
Svésedlice 67  
783 54 Přeaslavice  
tel.: +420 585 129 011  
info@havel-composites.com  
www.havel-composites.com  
IČ: 25907379  
DIČ: CZ25907379

## Tužidlo H 285

### Technický list, instrukce k použití

<b>Charakteristika:</b>	Tekuté tužidlo do epoxidových pryskyřic.
<b>Aplikace:</b>	Výroba laminátů s požadavkem na vysokou kvalitu Poměry míchání 100:40 hmotnostně L 285 (MGS) LH 160 LH 210 LH 385 Zpracovatelnost při 20°C cca 50 min.
<b>Procesní teplota:</b>	10-80°C alespoň 3°C nad rosným bodem Vytvrzení: 24h při 23°C+15h při 50-80°C
<b>Aplikační metody:</b>	Ruční laminace aj.
<b>Speciální vlastnosti:</b>	Zvýšená UV stabilita Extra čirost Extrémně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Teplotní odolnost až do 100°C

#### Úvod

Systém laminační pryskyřice a tužidla byl vyvinut jako přímá náhrada známého systému LR 285 výrobce MGS (Hexion). Je vhodný pro výrobu kompozitů s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Předpokládá se, že po tepelném dotvrzení (post curing) při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C. Pro takovou aplikaci je třeba nechat si systém certifikovat.

Doporučený poměr míchání epoxid:tužidlu 100:40 hmotnostně. Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 50 minut. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobaly, bavlněné vločky, kovový prášek apod.  
**Uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.**

#### **Atesty**

Nejsou

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

#### **Aplikace**

Výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje, stavebnictví, kamenné chodníčky. Pro dosažení nejlepších vlastností je vhodné výrobek temperovat, vytvrzení proběhne ale i při teplotě 25°C

#### **Aditiva**

Bez plniv

#### **Fyzikální a chemické vlastnosti**

		Tužidlo H 285
Hustota	g/cm <sup>3</sup> / 25 °C	0,94 - 0,97
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	460 – 550 (AE=64)
Barva		Modrá transparentní

#### **Skladování**

Tužidlo H 285 je dodáváno v sudech, nebo menších 30l, 25l, 10l, 5l, 3l, 1l kanystrech. Ideální skladovací podmínky jsou v uzavřeném obalu při konstantní teplotě 20°C mimo sluneční světlo. Při dodržení těchto podmínek je doba skladování max. 6 měsíců.

#### **BOZP**

Přečtěte si prosím samostatný podklad – Bezpečnostní list materiálu.

Vytvrzování je exotermická reakce, míchejte jen takové množství, které stihnete včas zpracovat!!

#### **Poznámka pro čtenáře**

Společnost Havel Composites CZ s.r.o. (Havel) byla přesvědčena o přesnosti zde uvedených informací v době přípravy tohoto materiálu nebo tyto informace byly převzaty ze zdrojů, o kterých byla společnost přesvědčena, že jsou spolehlivé; uživatel ovšem zodpovídá za prostudování ostatních relevantních zdrojů informací a porozumění jim tak, aby dodržoval všechny zákony a postupy aplikovatelné na bezpečnou manipulaci a zacházení s výrobkem, a za stanovení vhodnosti daného výrobku k zamýšlenému užití. Pro všechny výrobky dodávané společností Havel platí prodejní termíny a podmínky společnosti Havel. SPOLEČNOST HAVEL NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ZÁRUKU, AŽ UŽ VÝSLOVNOU ČI IMPLIKOVANOU, NA JAKÉKOLI VÝROBKU NEBO JEJICH PRODEJNOST ČI ZPŮSOBILOST K JAKÉMKOLI ÚČELU. SPOLEČNOST HAVEL DÁLE NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ZÁRUKU TÝKAJÍCÍ SE PŘESNOSTI JAKÝCHKOLI INFORMACÍ UVEDENÝCH SPOLEČNOSTÍ HAVEL, kromě záruky, že její výrobky budou odpovídat technickým parametrům společnosti Havel. Žádné zde uvedené informace nepředstavují nabídku prodeje jakéhokoli výrobku.

Vytvořil: Ing. Richard Moravec

Dne: 11.2.2016

Datum vydání: 11.2.2016