

# Modifikace pultruzních profilů

Bc. Petr Hromada

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Hromada**  
Osobní číslo: **T13521**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace pultruzních profilů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracovat literární studii na dané téma**
- 2. Návrh experimentu**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení a diskuse provedeného experimentu**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. JANCÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
2. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1.vyd. Pra-ha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
4. DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Vyd.1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
5. ING. ZDENĚK KORÍNEK, CSc. Kompozity [online]. [cit. 2013-01-30].Dostup-né z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

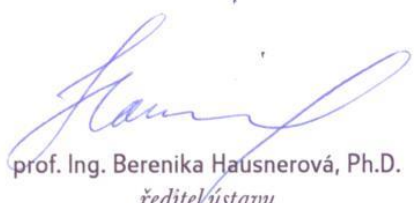
**13. května 2015**

Ve Zlíně dne 17. dubna 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: HROMADA PETR

Obor: PI

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 – diplomovou/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 diplomové/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 diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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 11.5.2015

Hromada

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá modifikací vysoce pevných pultruzních profilů. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část se skládá ze čtyř kapitol, přičemž v první kapitole jsou uvedeny definice kompozitních materiálů, jejich použití a samotné rozdělení. Zde je zaměřena především na využití kompozitních materiálů u sportovních aplikací. Na tuto kapitolu navazuje kapitola druhá, která se zabývá úlohou vláken, výztužemi a matricemi. Další kapitola se věnuje mechanickým zkouškám těchto materiálů, převážně tahem, tlakem a ohybem. Ve čtvrté kapitole je rozebrána technologie výroby pultruze. Praktická část práce se zabývá využitím pultruzních profilů v praxi, testováním zkušebních vzorků při normálních a zvýšených teplotách a to pomocí zkoušek 3-bodového ohybu a vrubové houževnatosti. Následně jsou tyto výsledky experimentálně vyhodnoceny.

Klíčová slova: Pultruze, kompozitní materiály, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the modification of high-strength pultrusion profiles. The work is divided into theoretical and practical part. The theoretical part consists of four chapters, the first chapter provides definitions of composite materials, their use and their distribution. It mainly focuses on the use of composite materials for sports applications. This chapter is followed by the second chapter, which discusses the role of fiber reinforcement and matrix. Another chapter is devoted to mechanical testing of these materials, mainly tensile, compression and bending. The fourth chapter deals with pultrusion technology. The practical part of the thesis analyses the application of pultrusion technology in practice and, in particular by testing sample which was supplied by the company Willer. Samples are tested at normal and elevated temperatures with a test of 3-point flexural and impact properties. Subsequently, the results are evaluated.

Keywords: Pultrusion, composite materials, mechanical properties

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce doc. Ing. Soni Rusnákové Ph.D., za její odborné vedení a čas, který mi věnovala při konzultacích a mimo jiné také za cenné rady a informace, které mi byly velkým přínosem při vypracování této diplomové práce. Mé poděkování patří dále také Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za pomoc při testování a vyhodnocení měření. Velký dík patří hlavně Vladimíru Kotrlovi a firmě Willer za poskytnutí materiálů a odborné konzultace při výrobě a přípravě zkušebních vzorků.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1    DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
1.2    ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	14
1.2.1    Paradoxy kompozitních materiálů.....	16
1.3    VYUŽITÍ U SPORTOVNÍCH APLIKACÍ.....	17
<b>2 VLÁKNA, VÝZTUŽE, MATRICE A JEJICH ÚLOHA V KOMPOZITU</b> .....	<b>18</b>
2.1    VLÁKNA .....	18
2.1.1    Skleněná vlákna .....	19
2.1.1.1    Výroba skleněných vláken.....	20
2.1.1.2    Shrnutí vlastností skleněných vláken.....	21
2.1.2    Uhlíková vlákna .....	22
2.1.2.1    Výroba uhlíkových vláken.....	23
2.1.2.2    Shrnutí vlastností uhlíkových vláken.....	24
2.2    VÝZTUŽE.....	25
2.3    MATRICE .....	26
2.3.1    Polymerní matrice .....	27
2.3.1.1    Epoxidové pryskyřice .....	29
2.3.1.2    Zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic .....	29
2.3.2    Vinylesterové pryskyřice .....	30
2.3.2.1    Zvláštní vlastnosti vinylesterových pryskyřic .....	30
<b>3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>31</b>
3.1    MECHANISMUS PORUŠOVÁNÍ.....	32
3.2    STATICKE ZATÍŽENÍ LAMINÁTU .....	33
3.3    TEPLOTA SKLENÉHO PŘECHODU $T_g$ .....	34
3.4    VLASTNÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	35
3.4.1    Tahová zkouška.....	36
3.4.2    Tlaková zkouška.....	37
3.4.3    Ohybová zkouška .....	38
3.4.4    Zkouška rázem v ohybu .....	40
3.4.5    Mechanické zkoušky za teplot odlišných od okolí .....	42
<b>4 TECHNOLOGIE VÝROBY PULTRUZE</b> .....	<b>44</b>
4.1    PULTRUZE .....	44
4.2    POSTUP VÝROBY .....	46
4.2.1    Další technologie výroby pultruze: .....	49
4.3    MODELÝ SDÍLENÍ TEPLA PŘI PULTRUZI .....	49
4.4    VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE .....	50
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>52</b>
<b>5 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>53</b>
<b>6 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE, PRINCIP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>54</b>



6.1	PRINCIP VÝROBY PULTRUZNÍCH PROFILŮ FIRMOU WILLER.....	55
6.2	VÝROBNÍ LINKA .....	56
<b>7</b>	<b>NORMY VZTAHUJÍCÍ SE K TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>60</b>
7.1	ČSN EN ISO 178: PLASTY – STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	60
7.2	ČSN EN ISO 179: METODA CHARPY.....	62
<b>8</b>	<b>NAVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ VZORKŮ .....</b>	<b>63</b>
8.1	PŘEHLED SLOŽENÍ VZORKŮ .....	63
8.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	63
<b>9</b>	<b>CHARAKTERISTIKY ZKUŠEBNÍCH STROJŮ.....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ A VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....</b>	<b>68</b>
10.1	TĚLESA TESTOVÁNA NA OHYBOVOU ZKOUŠKU.....	69
10.1.1	Uhlíková vlákna při teplotě 20 °C.....	69
10.1.2	Skelná vlákna při teplotě 20 °C.....	70
10.1.3	Uhlíková vlákna při teplotě 60 °C.....	71
10.1.4	Skelná vlákna při teplotě 60 °C.....	72
10.1.5	Uhlíková vlákna při teplotě 100 °C.....	73
10.1.6	Skelná vlákna při teplotě 100 °C.....	74
10.2	TĚLESA TESTOVÁNA CHARPYHO KLADIVEM .....	75
10.2.1	Uhlíková vlákna .....	75
10.2.2	Skelná vlákna .....	76
<b>11</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ GRAFICKY .....</b>	<b>77</b>
11.1	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	77
11.1.1	Srovnání uhlíkové a skelné výztuže .....	77
11.1.2	Srovnání uhlíkových vláken při různých teplotách.....	80
11.1.3	Srovnání sklených vláken při různých teplotách .....	81
11.2	ZKOUŠKA CHARPYHO KLADIVEM.....	82
11.2.1	Srovnání karbonové a sklené výztuže .....	82
<b>12</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>84</b>
12.1.1	Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 20 °C.....	84
12.1.2	Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 60 °C.....	85
12.1.3	Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 100 °C.....	85
12.1.4	Srovnání uhlíkové výztuže při různých teplotách.....	86
12.1.5	Srovnání sklené výztuže při různých teplotách.....	87
12.1.6	Vyhodnocení zkoušky Charpyho kladivem .....	87
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>98</b>

## ÚVOD

V dnešní době jsou kompozity jedny z nejpoužívanějších materiálů. Výhod, které tyto materiály mají, je hned několik. Jako hlavní výhodu lze uvést vysokou pevnost, chemickou odolnost, či nízkou hmotnost. Jednou z technologií, kterými lze kompozitní materiály vyrábět je technologie pultruze. V této práci se zabývám modifikací těchto pultruzních profilů. Této technologii není zatím mnoho využíváno a to především pro její náročnost. Dá se ovšem předpokládat, že se v následujících letech začne rozvíjet o mnoho intenzivněji. Největší výhodou této technologie je v získání vysokého počtu procent výztuže (přes 80%). Tento obsah výztuže nelze dosáhnout žádnou jinou technologií. Mimo to má využití tohoto materiálu neocenitelné vlastnosti pro mnohá odvětví, jako příklad lze uvést průmysl automobilový, stavební, ale také využití pro kosmickou techniku, výrobu lodí a letadel. V návaznosti na dřívější spolupráci jsem byl firmou Willer požádán o zjištění mechanických vlastností vzorkovaných materiálů a jejich vzájemné porovnání. Firma Willer, pro kterou byla tato práce zpracována jako podkladový materiál pro výrobu, se zabývá především průmyslem sportovním. Z produktů této firmy se vyrábí například lyže, běžky, hokejky, luky a mnoho dalších produktů pro sportovní účely.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V oblasti polymerních materiálů neexistuje žádná jiná skupina materiálů, která nabízí tak široké spektrum využití jako vláknové kompozity. Tyto materiály plní funkci konstrukce od jednoduchých technických aplikací v ruční nebo kusové výrobě až po extrémní aplikace v kosmonautice či letectví. Tento rozsah je značně vysoký a tím dává těmto materiálům značnou výhodu. [1]

### 1.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se skládají ze dvou, nebo více složek. Tyto složky mohou být chemicky a fyzikálně odlišné. Výztuž je tvrdší a tužší nespojitá složka, poddajnější spojitá složka, která vykonává funkci pojiva, se nazývá matrice. Podle současného pochopení pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky: [2]

- Podíl výztuže musí být větší než 5 %
- Vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší
- Výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- Kompozit musí být připraven smícháním složek

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze o různých rozměrech. Přímou v průmyslu mají největší význam mikrokompozitní materiály. Největší příčné rozměry vláken nebo částic se pohybují v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály menší hustotu a tudíž příznivý poměr pevnosti v tahu. Zároveň dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu. [2]

Definovat pojem kompozitní materiál není zcela jednoduchý úkol. Definice materiálu se mohou lišit z toho důvodu, že jsou využívány v mnoha oblastech a liší se dle účelu, ke kterému bylo nutno definici zformulovat. [3]

V knize Kompozitní materiály od autora A. Bareše se zohledňuje několik hledisek a pohledů, podle kterých samotné definice formulují.

Tyto hlediska mohou být například: [3]

- Ekonomické
- Encyklopedijní
- Legislativní
- Technické

Jelikož je velice těžké najít definici, která by přesně vystihovala podstatu kompozitního materiálu, uvedeme si zde definic více.

*„Kompozity jsou multifunkční materiálové systémy, které mají charakteristiky neobdržitelné žádným z jednotlivých materiálů. Jsou to kohezivní struktury, vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením a vlastnostmi a někdy tvarem.“* Tato definice klade důraz na jejich vícefunkčnost. [3]

I přesto, že je složité najít jednotnou definici, zformuloval ji Bareš takto: *„kompozity jsou takové heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálu se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídatnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.“* [3]

Definice MIL – NASA USA: *„Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí, ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“* [4]

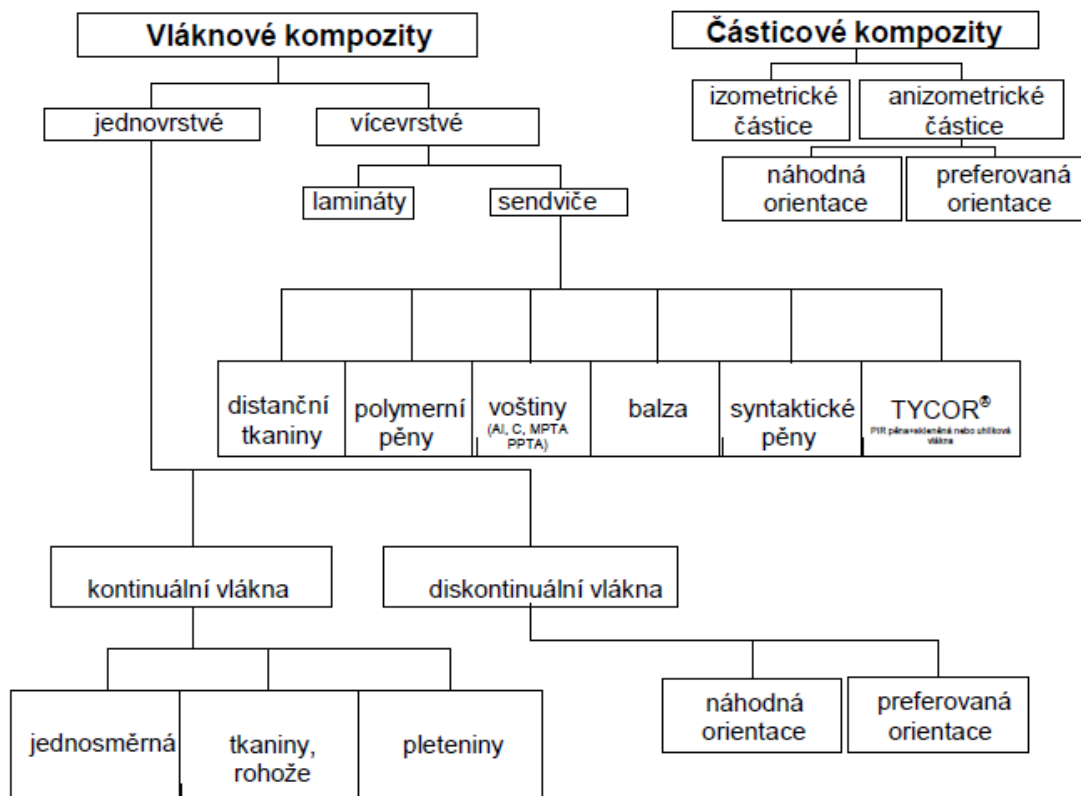
Definice G. F. Milтона, Cambridge: *„Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“* [4]

## 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit podle mnoha parametrů. Ty mohou být například dle typu výztuže, tvaru výztuže, uspořádání struktury, technologie výroby a mnohé další.

Dle geometrického tvaru výztuže: [5] [2]

- Kompozity částicové
  - a) Sférické částice (izometrické)
  - b) Destičkové částice (anizometrické)
- Jeden útvar výztuže nesmí výrazně přesahovat ostatní vyztužující částice
- Mají tvar: kulový, destičkový, tyčinkový nebo nepravidelný
  
- Kompozity vláknové
  - a) S kontinuálními vlákny
  - b) S krátkými vlákny
- Vlákna (výztuže) jsou v jednom směru výrazně rozměrnější než ve směrech ostatních
- Dle délky vláken je můžeme dělit na kompozity s krátkými nebo dlouhými vlákny



Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [2]

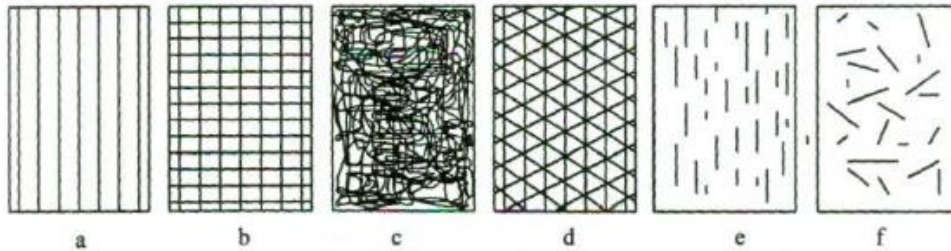
Další dělení mikrokompozitů je možné dle materiálů matrice, ta může být:

- Polymerní
- Kovová
- Uhlíková
- Skleněná
- Sklokeramická
- Keramická



Struktura vláknových kompozitů:

U kompozitů s kontinuálními vlákny mohou mít výztuže orientaci jednosměrnou, dvouosou, víceosou nebo uspořádanou nahodile. Krátká vlákna nebo whiskery mohou být také orientovány přednostně nebo nahodile. Příklady uspořádání vláknové výztuže lze najít na obrázku pod tímto textem. [2]



Obrázek 2 Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech a) jednosměrné uspořádání b) tkanina c) rohož d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna orientovaná jednosměrně f) krátká vlákna s nahodilou orientací [2]

### 1.2.1 Paradoxy kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů se projevuje několik paradoxů v chování. Abychom správně přistupovali k posuzování vlastností, musíme tyto paradoxy znát. [1] [6]

#### 1. Paradox pevného materiálu

Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočtená teoreticky. Je nutné rozlišit pevnost vlákna a pevnost kompaktního tělesa.

#### 2. Paradox vláknité struktury

Materiál ve formě vláken má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je pevnější.

#### 3. Paradox délky zatížení

Čím kratší je zatížená část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost.

#### 4. Paradox kompozitního materiálu

Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně.

### **1.3 Využití u sportovních aplikací**

Ve sportovních aplikacích, se vlastnosti vyztužených plastů, jako jsou vysoká pevnost a nízká hmotnost, zúročují nejvíce. Ploché lisované výrobky – lamináty se používají jako výztuhy do lyží a hokejek, tažené profily jako šípky pro sportovní lukostřelbu, pro výrobu udic a splávků pro rybáře, nosné tyče a ochrany sítí. [7]

Nízká hmotnost vyztužených plastů při zachování dobrých pevnostních vlastností se zúročí i v dopravě, zvláště u užitkových vozidel. Kompozitní materiály výrazně snižují hmotnost součástí používaných k výrobě přepravních systémů, jako jsou závodní automobily, skříňové a jiné nástavby nákladních vozů, což umožňuje zvýšení nákladové kapacity, aniž by došlo ke zvýšení zátěže náprav. Použití těchto materiálů v dopravě snižuje i nároky na údržbu vozového parku, díky jejich odolnosti vůči korozi. [7]

#### Přednosti kompozitů ve sportovních aplikacích:

- Vysoká měrná pevnost a specifická tuhost vzhledem k poměru hmotnosti
- Dlouhá životnost
- Nízká hmotnost
- Snadná manipulace
- Tlumení rázů

Mezi sporty, ve kterých se využívají kompozitní materiály, patří automobilový sport, letadla, jachty a čluny. Kompozitní materiály jsou využívány tam, kde se zúročí jejich vlastnosti jako pevnost pružnost, vysoký stupeň tuhosti a nízká hmotnost. Nejedná se přitom jen o tyto poměrně nákladné sporty, ale i o sporty klasické či veřejnosti více známé. Jedná se o sporty jako je lední hokej, lukostřelba, alpské a klasické lyžování, florbal, cyklistika aj. [7]

## 2 VLÁKNA, VÝZTUŽE, MATRICE A JEJICH ÚLOHA V KOMPOZITU

V kompozitu jsou základními stavebními prvky především vlákna, výztuže a matrice. V této části práce si představíme jednotlivé prvky. Z vláken si přiblížíme především vlákna uhlíková a skleněná. Z matric poté epoxidovou a vinylesterovou. Tato vlákna a matrice byly vybrány proto, že zkušební vzorky, které budeme testovat, budou především z těchto materiálů.

### 2.1 Vlákna

Jako konstrukční prvky se materiály ve formě vláken používají velmi zřídka. Zajímavé se stanou až v kompaktní formě. Kompozitní vlákna vyztužené plasty se skládají ze samotných vláken s vysokou měrnou pevností a tuhostí. Dále pak z rozmanitě přizpůsobivého materiálu, kterým je matrice. [1]

Pro výrobu kompozitů jsou nejčastěji vyráběna vlákna:

- Skleněná
- Uhlíková
- Polymerní
- Keramická
- Kovová

Všechna vlákna se dodávají navinuta na válcové cívce, které se říká roving. Další možnost je dodání v podobě textilií. Polymerní matrice se nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny nejen z důvodu vysoké ceny, ale také proto, že tyto vlákna mají větší hustotu. U kovových a keramických matric nelze použít vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností. Rozdělujeme tedy vlákna pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková, polymerní) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). [8]

Částice se do polymerních matric přidávají pro zvýšení tuhosti. Částice, které mají sférický tvar, by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost. Neměly by být ani příliš jemné, protože poté je velmi obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení. Nejvhodnější velikost částic je v rozmezí 1 až 10 $\mu\text{m}$ . Ty jsou považovány za tzv. velké částice. [8]

Anizometrické částice (tvar destiček, jehlic, disků) mohou matrici nejen vyztužit, ale také významně zpevnit. Nazýváme je aktivní částice. Poměr největšího rozměru částice k minimálnímu rozměru udává aspektivní (štíhlostní) poměr. [8]

Největší aspektivní poměr mají vlákna krátká a whiskery s poměrem délky k průměru až 200. Whiskery mají oproti vláknům krátkým jednu výhodu, vzhledem k jejich vysoké tahové pevnosti a malým příčným rozměrům (0,1 až 1  $\mu\text{m}$ .) nedochází při ohybovém namáhání, kterému jsou vystaveny při přípravě kompozitů, k jejich lámání. [2]

### 2.1.1 Skleněná vlákna

GF- Glass Fiber je společný název pro tenká vlákna, jejichž průměr je mezi 3,5 až 24 $\mu\text{m}$ . Tato vlákna mají pravidelný pruhový průřez. Jsou tažena z roztavené skloviny a používají se pro textilní účely. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou výborným elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření. Tato vlákna se také označují jako E-vlákna. Jsou nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken. Tato vlákna obsadila téměř 90% trhu. Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury na rozdíl od vláken uhlíkových a aramidových izotropní. [1]



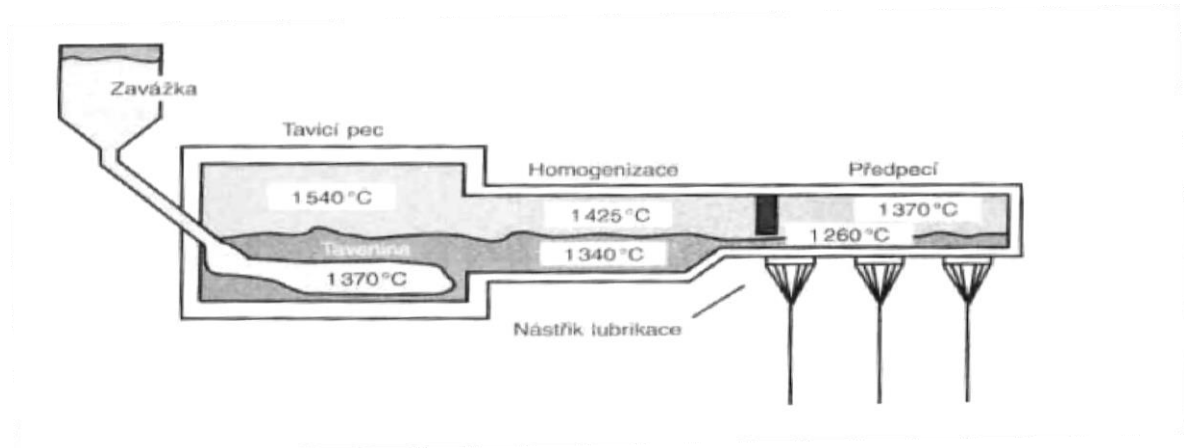
Obrázek 3 Skelná vlákna v pultruzním profilu [9]

Tabulka 1 Složení a důležité vlastnosti neupravených vláken I [1]

Sklovina	E	R nebo S	C	ECR	AR
<b>Složení (%)</b>					
SiO <sub>2</sub>	54	60	60 až 65	54 až 62	62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 až 15	25	2 až 6	12 až 13	-
CaO	-	14	14	21	5 až 9
MgO	20 až 24	3	1 až 3	4,5	1 až 4
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6 až 9	<1	2 až 7	<0,1	<0,5
K <sub>2</sub> O	<1	<1	8	0,6	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	12 až 15
<b>Vlastnosti</b>					
Hustota (g.cm <sup>-3</sup> )	2,6	2,53	2,52	2,27	2,68
Mez pevnosti v tahu (N.mm <sup>-2</sup> )	3400	4400	2400	3440	3000
E-modul (N.mm <sup>-2</sup> )	73000	86000	70000	73000	73000
Poměrné prodloužení (%)	<4,8	<4,6	<4,8	<4,8	<4,4
Teplota měknutí (°C)	850	980	750	880	770

### 2.1.1.1 Výroba skleněných vláken

Samotná skleněná vlákna se vyrábí tažením z trysek. Sklářská pec je vydlážděna žáruvzdornou keramikou. Při teplotě 1400°C neroztaví křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec na E-sklovinu. Poté se několik dnů čirí. Následně se vede v tekutém stavu kanálky před pecí do spřádacích trysek. Trysky, kterých je až 4000, jsou zahřáté na takovou teplotu, aby z nich sklovina pomalu vytékala a rychle tuhla do tvaru vláken. Při výstupu jsou vlákna asi 2 mm. široká. Teprve potom se dlužením vlákna kalibrují na zvolený průměr a prodlužují až na 40 000 násobnou délku. [1] [2]



Obrázek 4 Výroba textilních skleněných vláken tažených z trysek [1]

Na čerstvě tažená vlákna se následně nanáší lubrikace ve formě vodní emulze.

Úkolem lubrikace je: [2]

- Spojit jednotlivá vlákna
- Chránit povrch vláken
- Přizpůsobit vlákna dalšímu zpracovatelskému procesu
- Zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem

### 2.1.1.2 *Shrnutí vlastností skleněných vláken*

❖ Pevnost v tahu =  $3500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  pro čerstvě tažené vlákno

=  $1500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  po zpracování

❖ E – modul =  $75000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

- Mají vysokou pevnost, tuhost a poměrně nízkou cenu
- vysoká pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti, dobrá ohybová pevnost
- Odolávají vysokým teplotám, vnějšímu prostředí a vodě
- Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a činí asi 1/3 hodnoty oceli
- Tepelné vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti ostatních materiálů
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá, a tudíž ohnivzdorná. [1] [10]

### 2.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna neboli CF – Carbon Fiber jsou vlákna technická. Mají extrémně vysokou pevnost a tuhost, naopak poté nízkou tažnost.

Výchozí surovina pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály. [1] [3]

- Celulóza – vyrobená vlákna mají méně dokonalou strukturu. Jejich použití je převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty.
- Polyakrylonitrid (PAN) – vlákna z něj jsou považována za vlákna standardní
- Smola – z té se vlákna připravují nákladným způsobem. Konečná cena je, vzhledem k nízké ceně suroviny výchozí, příznivá. E-modul těchto vláken je velmi vysoký. Má velmi dobré tepelné a elektrické vlastnosti.

Uhlíková vlákna jsou tvořena z více než 90 % z uhlíku, dále to je 7% dusíku, 1% kyslíku, 0,3 % vodíku. Jejich průměr je 5 a 10  $\mu\text{m}$ . E - modul a pevnost se může měnit v širokém rozsahu. Závislé jsou na stupni orientace uhlíkových vrstev a také na výskytu vadných míst, které vzniknou ve vláknech během výroby. [1]

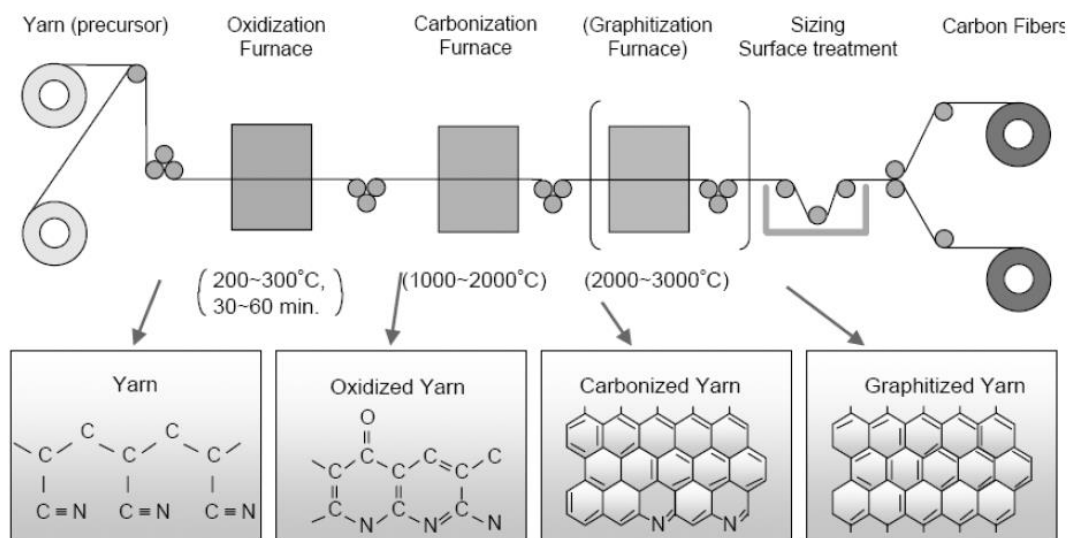


Obrázek 5 Uhlíková vlákna [11]



### 2.1.2.1 Výroba uhlíkových vláken

Při výrobě uhlíkových vláken se využívá především dvou postupů. V prvním případě se využívá polyakrylonitril, v případě druhém pak vychází ze surovin bohatých na uhlík. Polyakrylonitril se nejdříve dluží a dosáhne se co největší orientace molekul ve směru osy vlákna, vlákna se poté stabilizují a zahřívají na teplotu 200 až 300°C pod mechanickým napětím a za přístupu vzduchu. PAN se dehydruje a přemění v důsledku cyklizace na žebříčkový polymer. [12]



Obrázek 6 Výroba uhlíkových PAN-vláken a změna struktury PAN [2]

Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří etap: [13]

- **Stabilizace**

- při teplotách 220 až 300 °C, za působení tahového napětí
- v oxidačním prostředí je vlákno stabilizováno
- dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN a k vzájemnému zesíťování makromolekul kyslíkovými můstky
- vlákno v této etapě zčerná a stane se netavitelným

- **Karbonizace**
  - při teplotách od 1000°C do 1500°C
  - v inertním prostředí (velmi čistý dusík) proběhne karbonizace
  - vlákno dosahuje maximální pevnosti v tahu
  
- **Grafitizace**
  - teploty od 1800°C do 3000°C
  - v inertním prostředí se zvýší obsah uhlíku (umožní se vznik dokonalejších mikrokryсталů)
  - Vyvinutější mikrokryсталy vedou ke zvýšení tuhosti vlákna

#### ***2.1.2.2 Shrnutí vlastností uhlíkových vláken***

- vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost
- dobrá elektrická vodivost a odolnost vůči únavě materiálu
- velmi dobře tlumí vibrace, jsou chemicky odolné a nemění příliš své vlastnosti až do teploty 2000°C
- Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením roste hodnota E - modulu
- nízká hustota
- mimořádně vysoká korozní odolnost
- ve srovnání se skleněnými vlákny jsou silně anizotropní
- za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. [1] [3]

Tabulka 2 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních mat. [2]

Materiál	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [GPa]
skleněné vlákno E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
Sic monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

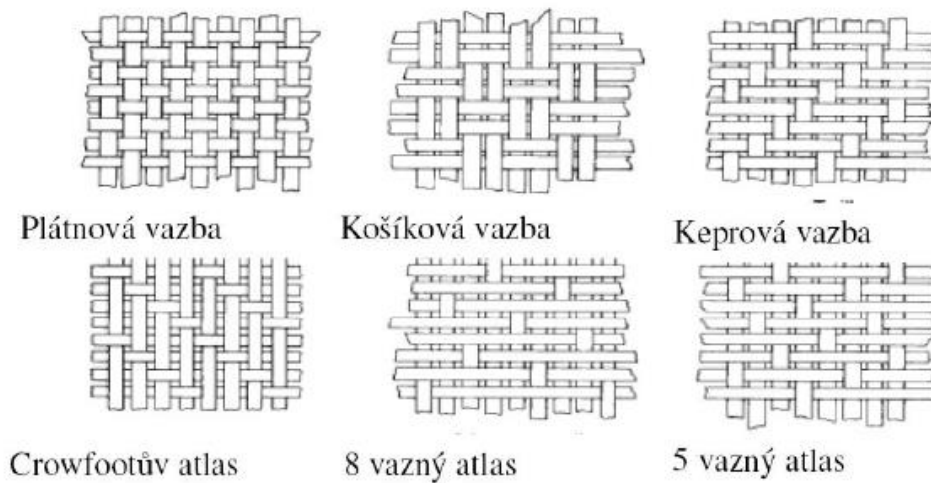
## 2.2 Výztuže

### Charakteristiky výztuže

Samotná vlákna jsou vždy o mnoho pevnější, než stejný materiál v kompaktní podobě. Pevnost těchto vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken, které mají malé průřezy malé, navíc jsou orientovány příznivě svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna závisí také samozřejmě na jeho délce. Části, které vzniknou porušením vlákna při tahovém namáhání, mají větší pevnost, než vlákno, které bylo původní. To proto, že k prvnímu lomu dojde z největšího defektu vlákna. Většina vláken, která se vyrábí, má kruhový průřez o průměru od 5 do 20  $\mu\text{m}$ . Použití menších průměrů se nedoporučuje z technických důvodů. Produkty, které jsou vytvořeny tenkými vlákny, se velice těžce prosycují maticí. [2]

### Formy výztuží:

- Prepreg
- Roving
- Tkanina
- Rohože



Obrázek 7 Vazby tkanin [2]

### 2.3 Matrice

Matrice je materiál, který je prosycen systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Tato surovina se označuje jako kompozit. Úkolem matrice u vláknových kompozitů je zaručení geometrického tvaru výrobku, převedení namáhání z vlákna na vlákno, ochrana vláken, zavedení a přenos namáhání na vlákna aj. Matrice mohou být kovové, polymerní a keramické. [1] [14]

Kvalitu kompozitu zásadním způsobem ovlivní kvalita přilnutí pryskyřice k vyztužujícímu materiálu. Fázové rozhraní matrice - vlákno označujeme místo, kde dochází ke kontaktu výztuže a pryskyřice. Tuto nežádoucí vlastnost eliminujeme použitím apretačního systému. [1] [14]

Funkci pojiva by měla matrice udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tyto požadavky však splňují matrice kovové a polymerní. [2]

V této práci se zabýváme především matricemi polymerními, obzvláště pak matricí epoxidovou a vinylesterovou. To hlavně z důvodu, že testované vzorky, jsou vyrobeny právě z těchto matric.

- Přenos namáhání na vlákna
- Převodění namáhání z vlákna na vlákno
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarová stálost
- Ochrana vláken před okolím



Obrázek 8 Schéma znázornění rozdílů v křivkách napětí – poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna [2]

### 2.3.1 Polymerní matrice

Nejpoužívanější matrice pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou matrice polymerní. A to buď reaktoplastické nebo termoplastické. Termoplastické pryskyřice se vyznačují velkou viskozitou, což je při výrobě nevýhodné. Může docházet k výskytu bublin nebo nedokonalému smočení pramenců vláken. Z tohoto důvodu se převážně používají matrice reaktoplastické. [1] [2] [15]

Nejvíce používané jsou:

- nenasycené polyestery (UP)
- vinylestery (VE)
- epoxidy (EP)

Z termoplastů jsou to:

- polypropyleny (PP)
- polyamidy (PA)

Aromatické termoplasty a reaktoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se díky své ceně používají především v průmyslu vojenském. [1] [2] [15]

Při výběru vhodné pryskyřice se musí přihlížet k následujícím vlastnostem:

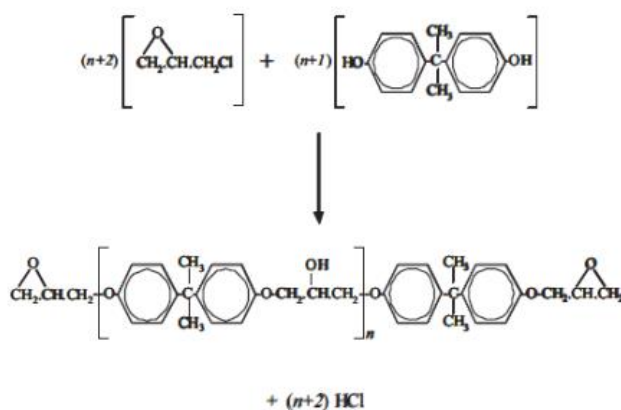
Tabulka 3 Vlastnosti závisující na výběru pryskyřice

Užitné vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba želatínace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Doba želatínace
Hořlavost	Obsah těkavých složek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty vytvrzování
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

### 2.3.1.1 Epoxidové pryskyřice

Tyto pryskyřice jsou všestranně využitelné v konstrukčních aplikacích. Mají velké množství modifikací. V závislosti na jejich chemické struktuře a použitém tvrdidle mají zdaleka největší rozsah vlastností. Velkou výhodou je také přilnavost epoxidové pryskyřice k výztuži. Přednost je také ve vhodnosti použití pro vysokopevnostní vlákna, dobrá přilnavost k mnoha druhům podkladu a tepelná odolnost. [1] [2]

Nevýhodou těchto pryskyřic je zatím jejich cena. Jsou až 3x dražší než nenasycené polyesterové pryskyřice. Další nevýhoda je jejich citlivost na přesné mísení tvrdidla a pryskyřice. [1] [2]



Obrázek 9 Epoxidová pryskyřice

### 2.3.1.2 Zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic

- Cenově nevýhodné, 3-4x dražší než nenasycené polyesterové pryskyřice UP-R
- Musí být dodržen přesný poměr mísení pryskyřice/plnidlo
- Velmi dobré mechanické vlastnosti, vhodné jako matrice pro vysokopevnostní vlákna
- Dobrá adheze k mnoha druhům podkladu
- Pro poměrně vysokou viskozitu a pomalou vytvrzovací reakci jsou hůře zpracovatelné
- Chemická odolnost je závislá na druhu tvrdidla
- Možné podráždění kůže a alergie při zpracování v kapalné formě [1]

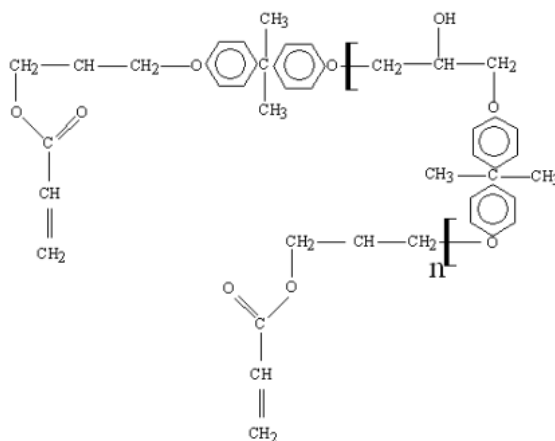


### 2.3.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterem je myšlen polymer s elastomerovou skupinou, která vzniká esterifikací a jedná se o lineární termoplastický polymer. Vinylesterová pryskyřice v sobě skrývá velmi úzké spektrum chemických sloučenin. Vzniká reakcí dienových epoxidů a kyseliny akrylové. Jsou tak nazývány epoxidové vinylestery nebo také vinylestery na epoxidové bázi. V tomto případě se jedná o termosety. [16]

Polyesterová pryskyřice, přesněji její makromolekula má více reaktivních míst než vinylesterová pryskyřice. Ta má dvojnou vazbu umístěnou pouze na koncích řetězce. To vede k větší ohebnosti a větší odolnosti vůči vzniku mikrotrhlin. Ve srovnání s polyesterovou pryskyřicí má větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost.

Vhodné jsou pro výrobu kompozitů, které jsou vyztužené skleněnými i uhlíkovými vlákny a pro náročnější aplikace. [1] [16]



Obrázek 10 Vinylesterová pryskyřice

#### 2.3.2.1 Zvláštní vlastnosti vinylesterových pryskyřic

- Při srovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi jsou houževnatější a dražší
- Velká variabilita při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače
- Aplikace v korozním prostředí
- Zatížení životního prostředí styrenem [1]

### 3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Zkoušky mechanických vlastností umožňují kvantitativně hodnotit chování materiálů při působení vnějších sil, případně i dalších vlivů. Některé z těchto hodnot mají i fyzikální význam (lze je tedy přepočítat i pro jiný tvar a rozměr). Oblast zkoušení materiálů je nezbytná pro kontrolu jakosti výrobků, ale i k zhodnocení úrovně technologie výroby.

V této práci se zabýváme zkouškami statickými, především pak zkoušce tahové/tlakové a ohybové. Zkoušené vzorky pak budou následně podrobeny zkouškám za zvýšených, či snížených teplot. [17]

Mechanické zkoušky můžeme dělit podle:

- charakteru zatěžování (statické, dynamické)
- zjišťovaných vlastností (pevnosti, tvrdosti, únavy ap.)
- druhu namáhání (tah, tlak, ohyb, krut ap.)
- teploty a prostředí

Pro zabezpečení reprodukovatelnosti a porovnatelnosti je nutnost jejich normování. Způsob odebrání vzorků může podstatně ovlivnit obdržené výsledky (materiál není homogenní a izotropní)

- zkušební kus
- zkušební vzorek místo odebrání
- volba průměrných vlastností
- nejvíce exponované místo

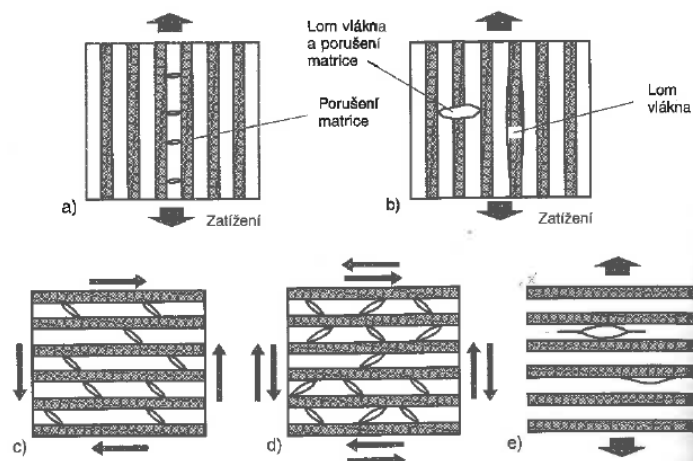
ČSN udává počet zkušebních vzorků dle množství a druhu výroby, potřeby bezpečnosti atd.

Obecné zásady pro odběr jsou: [17]

- reprezentace určité dávky, výroby, tavby ap.
- vyhnout se místům s předpokládanými vadami
- vzorek musí prodělat celý výrobní proces
- odběrem se nesmí ovlivnit vlastnosti
- brát ohled na anizotropii
- značení (nepoškozovat zkušební část, zůstat zachováno)

### 3.1 Mechanismus porušování

Pro lamináty, které jsou zatěžovány víceosým namáháním, existuje větší nebezpečí vzniku mezivláknového poškození než u vrstev, které jsou vyztuženy jednosměrně při namáhání ve směru vláken. Podle druhu zatížení lze očekávat vznik různých trhlin a nedostatků. [1]



Obrázek 11 Vznik trhlin v matrici v mikrostruktuře jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu [1]

- zatížení tahem podél vláken, vrubový násobný lom matrice*
- zatížení tahem podél vláken, lom vláken*
- mezivláknové trhliny pod úhlem 45° při smykovém zatížení*
- mezivláknové trhliny pod úhlem 45° při střídavém smykovém napětí*
- mezivláknové trhliny a odtržení vlákna od matrice v rozhraní při zatížení tahem ve směru kolmo k vláknům*

U jednosměrně vyztužených materiálů může docházet (dle tažnosti jednotlivých složek) k různým mechanismům poškození v závislosti na druhu namáhání.

V případě tahu lze rozlišit tyto případy: [1]

- při stejné tažnosti matrice nastává převážně porucha tvořením jednotlivých trhlin
- při rozdílných tažnostech mohou v závislosti na objemovém podílu vláken vznikat v jedné z obou komponent jak jednotlivé, tak i vícenásobné trhliny vedoucí k porušení.

V případě, že je tažnost matrice vyšší než tažnost vláken lze její velikost snížit přidáním plniv. Při rázovém namáhání může docházet k delaminaci. Delaminace jsou největší ve spodních vrstvách. Od spodní strany vzorku k horní se rozloha delaminace zmenšuje. [1]

### **3.2 Statické zatížení laminátu**

Pevnostní charakteristiky vykazují výraznější anizotropii než elastické, neboť pevnosti nezávisí jen na vlastnostech složek, ale ve větší míře na jejich vzájemné adhezi. Zatímco jsou elastické charakteristiky dle norem měřeny většinou při nízkých zatíženích, u kterých vlivy struktury (malá adheze, zbytkové napětí, bubliny) nehrají roli, projeví se tyto vlivy při vysokých zatíženích u pevnostních zkoušek, co vede k velkým rozptylům naměřených hodnot. [1]

Při víceosé napjatosti nelze z těchto důvodů odvodit žádné srovnávací napětí jako u materiálů, které jsou izotropní. Hypotézy porušení pro vyztužené plasty musí zohlednit různé typy porušení v různých směrech zatížení. Tedy i vícevrstvý charakter kompozitu - vzájemnou pevnost vrstev mezi sebou. [1]

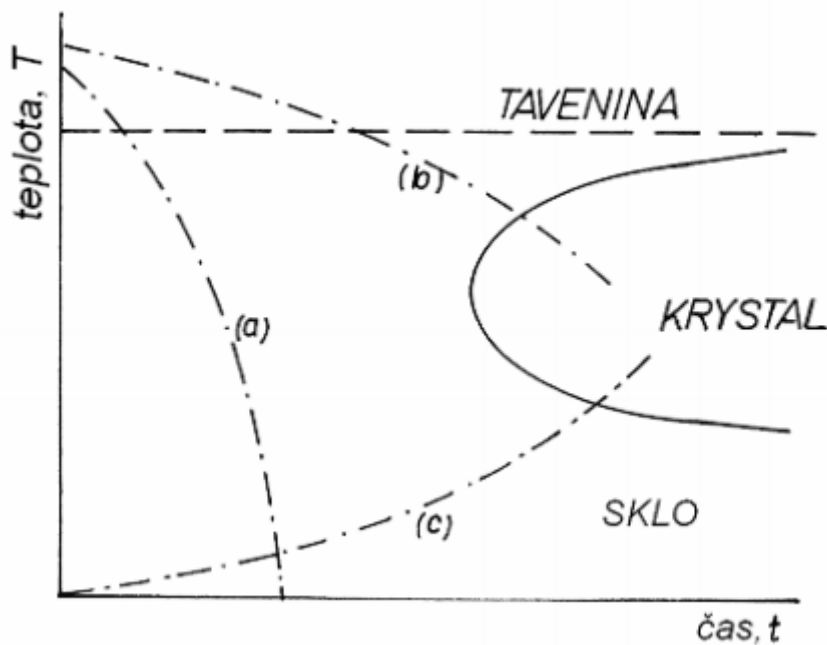
V případě kompozitů ovlivňuje jejich vlastnosti mnoho faktorů. Opačně je tomu u homogenních plastů.

### 3.3 Teplota skleného přechodu $T_g$

$T_g$  je charakteristická veličina pro amorfní polymery. Pod touto teplotou jsou polymery sklovité, tvrdé. Naopak nad touto teplotou jsou polymery elastické, kaučukovité nebo kapalné. Hodnotu  $T_g$  ovlivňuje ohebnost řetězců a jejich mezimolekulární soudržnost.

- $T_g > 20^\circ\text{C}$  tvrdá plastická hmota
- $T_g < 20^\circ\text{C}$  kaučuk, vratné deformace, tažnost
- $T_g$  cca  $20^\circ\text{C}$  nátěrové hmoty, lepidla

Skelný přechod je transformací, které odpovídá na ose teploty určitý časový interval. Jeho pomyslný střed se označuje jako  $T_g$  – teplota skelného přechodu. Hodnota  $T_g$  není konstanta, protože závisí na rychlosti chlazení kapaliny a to výrazně. V běžné praxi je užitečné definovat skelný přechod pomocí viskozity. Přechod mezi taveninou, sklem a krystalickou fází lze demonstrovat na TTT diagramu. Tento diagram se skládá ze třech veličin a to Time-Temperature-Transformation. [18]



Obrázek 12 T-T-T diagram [18]

Graf zkonstruovaný na základě teplot  $T_g$  – skelného přechodu ukazuje, že dochází k nadměrnému vzestupu  $T_g$  v závislosti na stupni vytvrzení. Teplota skelného přechodu  $T_g$  je u amorfních polymerů mírou pohyblivosti segmentů a reaguje na konci vytvrzování podstatně citlivěji než například metody, které měří reakční teplo nebo zbytková množství reakčních složek. Může tak stanovit i velmi vysoké hodnoty stupně vytvrzení. [1] [19]

Teplotu skelného přechodu můžeme určit bez problémů i v komplexních systémech. Výjimka jsou systémy s vysokým obsahem vody nebo dodatečně reagujících složek. Proto představuje stanovení teploty skelného přechodu  $T_g$  jednu z nejcitlivějších a nevhodnějších metod pro charakterizaci stavu vytvrzení pryskyřičných materiálů. [1] [19]

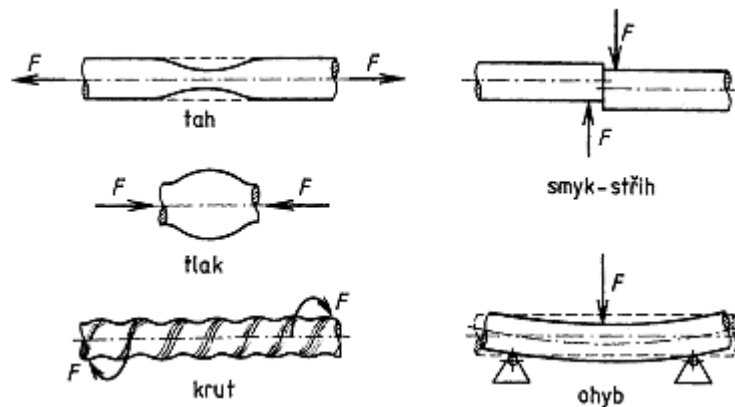
### 3.4 Vlastní mechanické zkoušky

V praktické části této práce jsou zkušební vzorky testovány převážně na tah/tlak, ohyb a zkoušky za zvýšených či snížených teplot. Proto se teď zaměříme především na tyto zkoušky a ostatním zkouškám nebudeme věnovat takovou pozornost. Mechanickými zkouškami se zabývají normy: [20] [21] [22]

ČSN EN ISO 604 – Plasty, stanovení tlakových vlastností.

ČSN EN ISO 527-5 - Stanovení tahových vlastností. Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny.

ČSN EN 13706-2 – Vyztužené plasty (kompozity). Specifikace pro tažené profily – Část 2: Metody zkoušení a obecné požadavky.



Obrázek 13 Zkoušky mechanických vlastností [23]

### 3.4.1 Tahová zkouška

Pro kompozitní materiály je navrženo mnoho tvarů a geometrií zkušebních těles v daných normách, které zohledňují stavbu kompozitu. U jednosměrně vyztužených laminátů ve formě tkaniny se osvědčila tělesa prizmatická se zesílením v místě upnutí. Materiál zesílení má mít modul pružnosti téměř rovný modulu zkušebního tělesa a zesílení má být na konci tělesa zkoseno. Tím pádem se sníží vliv koncentrace napětí. Samotný lom pak nastává uvnitř měřené délky, minimálně 10 mm od zesílených konců. [1]

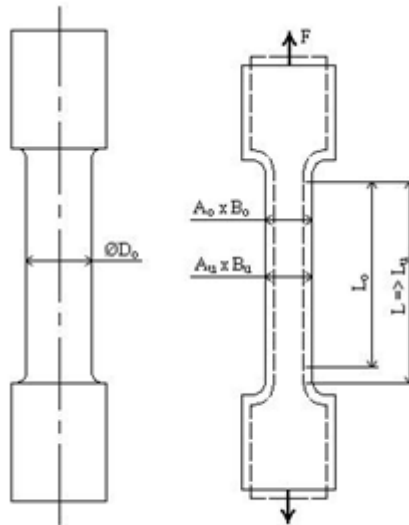
Pevnost v tahu ve směru kolmém na vlákna lze také měřit na vinutých plochých tělesech. Při měření elastických charakteristik musí být tělesa vyříznuta ze zkušební desky přesně ve směru os ortotropie. [1]

Pro upevnění tělesa v trhačím stroji se používají pneumatické nebo hydraulické. K přesnému určení podélné a příčné deformace (prodloužení a příčné zúžení) je používán elektronický průtahoměr. [2]

Výsledky tahové zkoušky jsou: [2] [21]

- modul pružnosti v tahu  $E_1$  a  $E_2$
- Poissonův součinitel  $\nu_{12}$
- pevnost v tahu  $\sigma_{pt1}$  a  $\sigma_{pt2}$
- poměrné prodloužení při přetržení





Obrázek 14 Zkušební tělesa pro zkoušku tahem [2]

### 3.4.2 Tlaková zkouška

U zkoušek, které určují pevnost v tlaku jednosměrně vyztuženého kompozitu, musí být zkušební vzorek pečlivě navržen. Vhodná jsou prizmata pravoúhlá, válce nebo trubky, protože zajišťují symetrické zatížení.

Při dobré adhezi vlákno-matrice nastane lom vlivem smyku. Při adhezi, která není dokonalá, vzniká lom vlivem delaminace. Aby se odstranilo rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením, byly navrženy různé přípravy, které slouží k vyloučení vybočení zkoušeného tělesa. [1]

Při zatížení tlakem je obtížné v celém zkušebním tělese realizovat jednosměrně čistý stav napjatosti během celé zkoušky. Plochy sloužící k zatížení musí být zcela rovnoběžné a rovné. Musí existovat jednoznačně homogenní stavy napjatosti i přetvoření a dobrá přístupnost k měřené oblasti. [1]

Stanovením tlakových vlastností plastů se zabývá norma ČSN EN ISO 604. Tato norma specifikuje metody pro stanovení vlastností plastů ze zkoušky tlakem za stanovených podmínek. Je definováno standardní zkušební těleso. Metoda se používá ke zkoumání zkušebních těles při namáhání tlakem a ke stanovení meze pevnosti v tlaku, modulu pružnosti v tlaku a dalších charakteristik. [1] [20]

Podstatou zkoušky je stlačování podél hlavní osy stálou rychlostí do porušení, nebo do okamžiku, kdy zatížení nebo zkrácení délky dosáhne definované hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso.

Zkušební tělesa musí mít tvar přímého pravoúhlého hranolu, válce nebo trubky.

Tabulka 4 Rozměry testovacích vzorků

Typ zkušebního tělesa	Měřený parametr	Délka, l	Šířka, b	Tloušťka, h
A	Modul pružnosti	50±2	10±0,2	4±0,2
B	Pevnost	10±0,2		

Počet zkušebních těles v případě izotropních materiálů musí být alespoň pět od každého vzorku. V případě anizotropních materiálů musí být od každého vzorku zkoušeno alespoň 10 zkušebních těles, pět ve směru kolmém k hlavní ose anizotropie a pět ve směru rovnoběžném s touto osou. [20]

Výsledky tlakové zkoušky jsou: [2] [20]

- modul pružnosti v tlaku  $E_d$
- Poissonův součinitel v tlaku  $\nu_d$
- pevnost v tlaku  $\sigma_{pd1}$  a  $\sigma_{pd2}$
- poměrné zkrácení při porušení

### 3.4.3 Ohybová zkouška

Pevnost laminátu při ohybu je velice silně závislá na jejím vrstvení. U laminátů, které mají jednoznačným směrem tahového namáhání, musí mít krajní vrstvy vlákna orientována ve směru tahového napětí. Velmi velkou únosnost mají při zkoušce ohybem sendvičové konstrukce. [1] [32]

Modul pružnosti v ohybu u laminátů není shodný modulem pružnosti naměřeným při tahovém namáhání. K měření ohybových vlastností je používáno buď tříbodového (ASTM D7901) nebo čtyřbodového ohybu (ASTM D62722), podpory jsou válečky o průměru 12,7 mm a délce 63,5 mm. Poměr vzdálenosti podpor k tloušťce tělesa by měl být minimálně 16:1, aby smykové zatížení bylo malé. Normy ASTM doporučují poměry 16:1, 32:1, 40:1 a 60:1. [1] [32]

Při stanovení pevnostních a elastických charakteristik zkoušky ohybem předpokládáme lineární rozložení normálových napětí po průřezu. Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu výrazně závisí na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. [1]

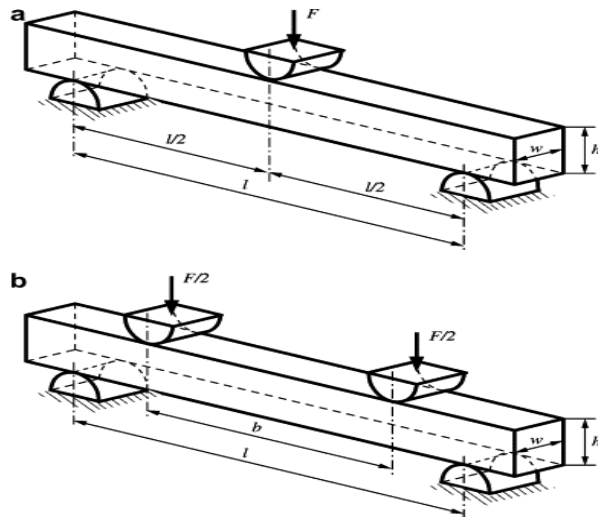
Samotná zkouška ohybem probíhá při tří – nebo čtyřbodovém uložení. U zkoušky s čtyřbodovým ohybem je značná výhoda v konstantním ohybovém momentu po celé délce rozteče uložení vzorku. To je velice významné při stanovení modulu pružnosti. [1]

U zkoušky tříbodovým ohybem existuje ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení. Maximální smykové napětí pak leží mezi vrstvami prostřed tloušťky tělesa. [1]

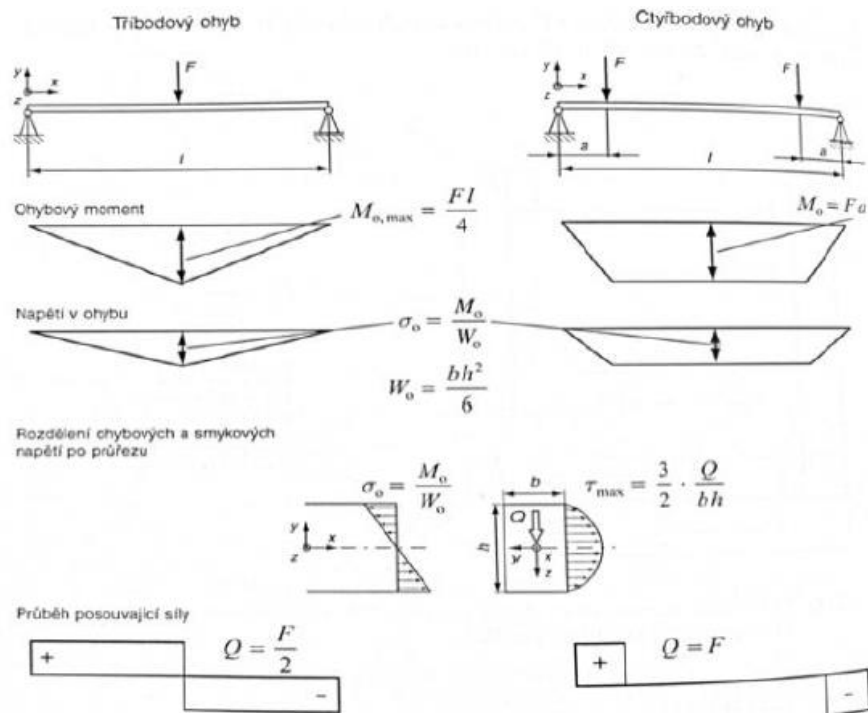
Stanovené veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Je zde nutné sledovat druh porušení. Druh porušení ohýbaného nosníku, který je akceptovatelný je porucha vzorku lomem vyvolaný tlakem nebo tahem. [1]

Výsledky ohybové zkoušky jsou: [1] [10]

- modul pružnosti v ohybu  $E_o$
- pevnost v ohybu  $\sigma_o$



Obrázek 15 Zkouška ohybem – a) tříbodový ohyb b) čtyřbodový ohyb [1]



Obrázek 16 Porovnání ohybových momentů u tří a čtyř bodového ohybu [1]

### 3.4.4 Zkouška rázem v ohybu

Účelem dynamických zkoušek při rázovém namáhání je stanovení vlastností materiálu za působení dynamických sil. Dynamické zkoušky rázem slouží k určení houževnatosti materiálu při rázovém namáhání, jejímž měřítkem je práce (energie) spotřebovaná

na porušení zkušebního tělesa. Mohou se uskutečnit v tahu, tlaku, ohybu a kroucení. Rázová zkouška v ohybu má z rázových zkoušek největší význam.

U této metody se zjišťuje rázová energie pomocí závěsného kyvadla. Toto kyvadlo má v horní poloze H potenciální energii. Po spuštění kladivo padá, prochází bodem maximální kinetické, které je v něm rovna té potenciální. V tomto bodě je umístěn střed zkoušeného tělesa, na který působí největší kinetická energie. Výška kladiva je v každém okamžiku měřítkem energie. Energie polohová se při klesání kladiva přeměňuje na kinetickou energii. Kinetická energie se spotřebuje na přeražení a odmrštění zkušebního tělesa, část se spotřebuje také třením. Část energie, která zůstane, se vyčerpá na vykývnutí kladiva na stranu druhou do polohy h. [1] [26]

Práce potřebná k přeražení tyče by se měla vztahovat na deformovaný objem tyče. Jeho přesné vymezení je však nemožné. Proto se u zkoušky Charpyho vztahuje spotřebovaná práce na nejmenší průřez zkušební tyče v místě vrubu.

Vznik křehkého lomu podporují: [26]

- Nízká teplota
- Složitý stav napjatosti
- Rychlost deformace

Zkouška vrubové houževnatosti:

Tato zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče a určení nárazové práce, která se spotřebuje na toto přeražení. Houževnatost je spotřebovaná práce vztažená na plochu pod vrubem.

U této zkoušky zjišťujeme:

KU – nárazová práce

- Je to práce spotřebovaná po přeražení zkušební vzorku

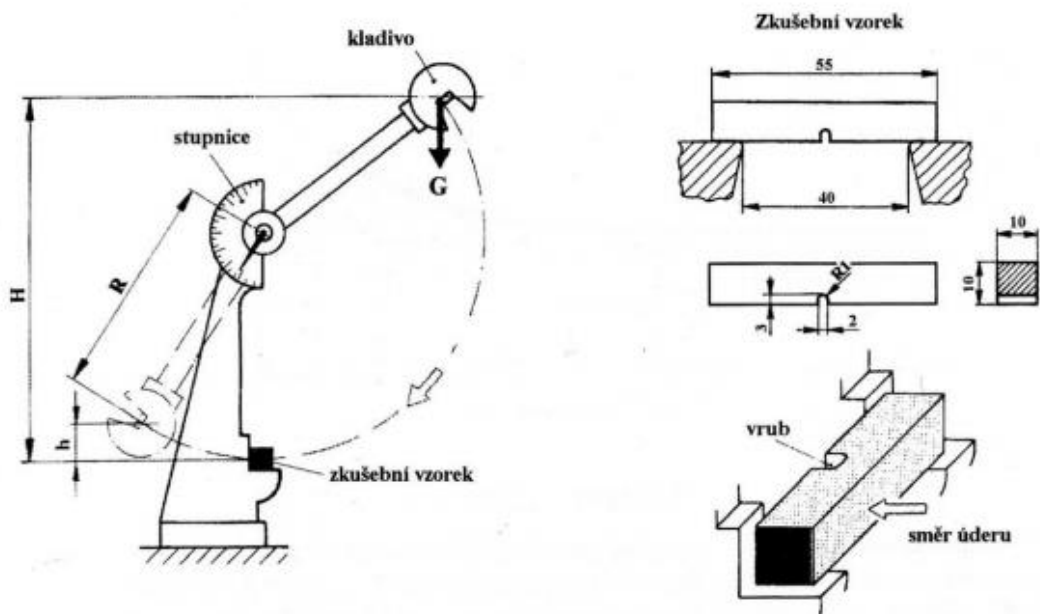
$$KU = G \cdot (H - h) \quad [J] \quad (1)$$

KCU – vrubová houževnatost

- Je to podíl nárazové práce KU a původního průřezu tělesa  $S_0$

$$KCU = \frac{KU}{S_0} \quad [\text{J.cm}^{-2}] \quad (2)$$

Vliv na hodnotu vrubové houževnatosti má tvar vrubu, hloubka vrubu, šířka vrubu a zkušební tyče nebo orientace vláken.



Obrázek 17 Charpyho kladivo [25] [26]

### 3.4.5 Mechanické zkoušky za teplot odlišných od okolí

Všechny součásti jsou při svém provozu vystaveny teplotám, které jsou odlišné od teploty okolí. Z tohoto důvodu musíme ověřit, do jaké míry teplota ovlivňuje mechanické vlastnosti. Za tímto účelem jsou prováděny zkoušky mechanických vlastností za zvýšených či snížených teplot. [27]

Zkoušky mechanických vlastností za zvýšených teplot [27]

Pro technologii a konstrukci je třeba znát, jaké vlastnosti má zkoušený materiál za vyšších než obvyklých teplot. Zkoušky mechanických vlastností za zvýšených teplot jsou dvojího druhu.

- krátkodobé, při kterých se zpravidla zjišťují vlastnosti materiálu za účelem posouzení jeho vhodnosti k technologickým operacím
- dlouhodobé, při kterých se zjišťují vlastnosti materiálu za účelem posouzení jeho vhodnosti k použití do zařízení pracujících při zvýšených teplotách

Zkoušky mechanických vlastností za snížených teplot [27]

Metodika zkoušek je shodná s postupy, které se provádí za běžných teplot. Zkušební stroj je doplněn o chladicí zařízení. Toto zařízení musí umožnit rovnoměrné ochlazení zkušební vzorku na předepsanou teplotu a udržení této teploty během zkoušky.

Obvyklé chladicí prostředí: [27]

- směs tuhého kysličníku uhličitého a metylalkoholu (do - 70 °C)
- směs kapalného dusíku a petrolétheru (do - 150 °C)
- kapalný dusík (do - 190 °C)
- kapalné helium (pod - 190 °C).

## 4 TECHNOLOGIE VÝROBY PULTRUZE

Výroba kompozitu pomocí technologie pultruze pochází z padesátých let minulého století. Evropská produkce pultruzových kompozitů se odhaduje na 16 000 tun ročně. Tato technologie má dva postupy. Jedná se o technologii s otevřeným nebo uzavřeným výrobním postupem. [2]

### 4.1 Pultruze

Tato technologie není zatím mezi výrobci mnoho rozšířená. Hlavní důvod je náročnost výroby a potřeba zkušenosti pracovníků. Patří ovšem mezi nejperspektivnější výrobní technologie, které produkují kompozitní materiály. Samotná pultruze je kontinuální proces. Princip technologie spočívá ve vedení vysocepevnostních vláken (výztuž), která jsou impregnována matricí. Vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, který zajistí rovnoměrné rozmístění vláken. Tato naimpregnovaná vlákna jsou poté vedena do vyhřívané vytvrzovací formy, kde dochází k zafixování tvaru při konstantní teplotě. Teplota formy hraje velice důležitou roli. Teplota nesmí kolísat. Nejčastěji využívanou matricí je reaktoplastová, přesněji jsou to UP pryskyřice. Po zafixování tvaru se hotový profil nařeže na požadované délky. [10] [28] [29]

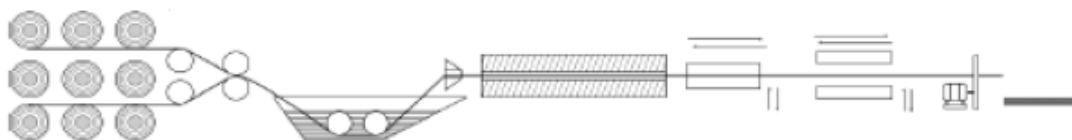
Tato metoda nám zaručuje konstantní kvalitu. Výrobky vyrobené touto technologií mají větší obsah výztuže než běžné kompozity. Vyrobené kompozity mohou mít až přes 80 hm. % výztuže. Mají vynikající mechanické vlastnosti, nízkou tepelnou vodivost, nízkou hmotnost, vysokou korozní odolnost, vysokou rozměrovou stálost, elektrickou nevodivost a teplotní roztažnost srovnatelnou s kovy. Mezi další výhody patří nízká navlhavost, takřka neomezená velikost výsledného profilu, různost profilů i nízké náklady. [28] [29]



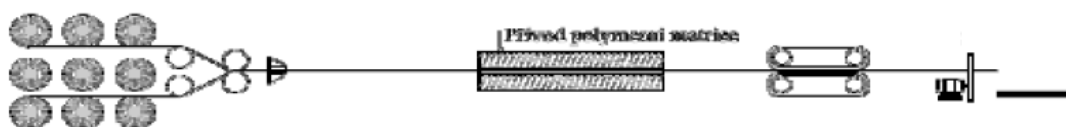
### Způsoby výroby pultruze

Rozeznáváme dva hlavní způsoby výroby a impregnace. První způsob je impregnace s otevřenou lázní. Tento způsob bývá značně jednodušší. Druhý způsob je uzavřenou tlakovou impregnací. U technologie s otevřeným postupem se vlákna vedou přes ponořovací válce do impregnační vany, kde se prosycují a dále pokračují do vyhřáté formy. Při použití technologie s uzavřeným postupem (vstříkváním) dochází k tažení výztuže do formy, do které se následně vstříkuje pryskyřice. Ve formě se profil prohřeje a dojde k vytvrzení. Tento postup je vhodný pro velkoobjemovou výrobu. Dosáhneme většího počtu objemu vláken, lepší impregnace a snížíme styrenové emise. [28]

a)



b)



Obrázek 18 Nákres pultruzních linek a) s otevřenou lázní b) s přímým přívodem pryskyřice [28]

## 4.2 Postup výroby

Hlavní části pultruzní linky jsou zásobník výztuží, naváděcí systém, sekce s impregnací, tvarovací a vytvrzovací forma, sekce odtahů a dělicí zařízení. [2] [10] [16] [28]



Obrázek 19 Pultruzní linka [30]

### 1) Zásobník výztuží

Ve většině případů se jedná o konstrukci, na níž jsou připraveny cívky s vlákny, které jsou připevněny tak, aby se mohly otáčet a kontinuálně zásobovat celé zařízení. Velice důležité je také samotné uspořádání pramenců a cívek k dosažení maximálních výsledků. Cívky buď ve stojanu stojí vertikálně a vlákno se odvíjí středem cívky, nebo je cívka umístěna horizontálně. Pro tažení klasických profilů je počet cívek v rozmezí mezi 10 až 100. [2] [10] [16]



## 2) Naváděcí zařízení

Naváděcí zařízení je většinou ve formě desek, které jsou kolmé ke směru tažení. Skládá se ze soustavy otvorů a štěrbin. Samotné otvory by měly být opracovány, popřípadě obloženy, aby nedocházelo k porušení vláken a tím ke zhoršení vlastností profilu. Hlavní funkce je správné prostorové uspořádání rovingů před vstupem do impregnační zóny. [2] [10] [16]



## 3-4) Impregnační sekce

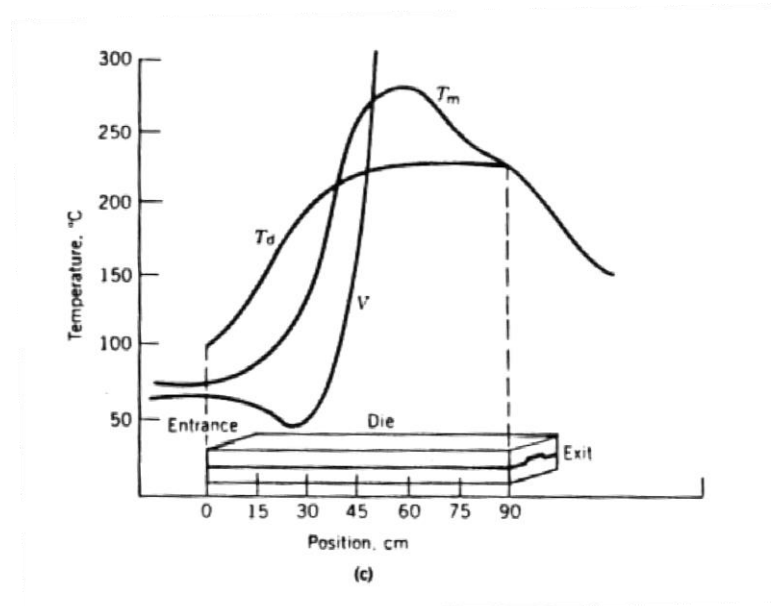
Impregnační sekce je tvořena vanou, ve které je napuštěna matrice (pryskyřice). Jednotlivé vlákna, rovingy nebo jiné vyztužující prvky jsou přes naváděcí zařízení a válce vedena do pryskyřičné lázně. Zde se vlákna dokonale prosytí a jsou vedena ke stírací desce, kde se setře přebytečná pryskyřice. Poté putují do pultruzní hlavy. Samotné způsoby impregnace jsou různé. Můžeme použít také prosycování s přímým přívodem do pultruzní hlavy. Nedokonalá impregnace vede ke zhoršení mechanických vlastností kompozitu. [2] [10] [16]



## 5) Pultruzní tvarovací a vytvrzovací hlava

Materiál je do pultruzní hlavy přiváděn pomocí tažných sil. Tato síla působí od tažného zařízení. Tato síla je značně vysoká, protože musí překonat odpor, který vzniká v důsledku tlaku při průběhu vytvrzování a změnách objemu pryskyřice. Tlak není konstantní po celé délce hlavy. Podobně je tomu také u rozdělení teplot, kde můžeme použít přehřev. Pultruzní hlava bývá konstruována na 1-4 teplotní zóny. Pro sledování přesné teploty hlavy bývá nainstalováno přídavné zařízení s termočlánky pro kontrolu a udržování konstantní teploty. Pultruzní hlava bývá dvoudílná s leštěným povrchem. [2] [10] [28]





Obrázek 20 Rozdělení teplot hlavy  $T_d$ , vytvrzované směsi  $T_m$ , tlaku  $p$ , viskozity  $V$  po délce pultruzní hlavy [29]

## 6) Tažná sekce a řezání materiálu

Odtah materiálu je umístěn za pultruzní hlavou. Jejím úkolem je mechanicky odtahovat již vytvrzený profil konstantní rychlostí. Tím, že hotový profil odtahuje, automaticky vtahuje do hlavy další prosycenou výztuž. Tažné zařízení bývá umístěno na dvou místech. První bývá za vytvrzovací hlavou a druhé před dělicí sekci. [2] [10] [16]



Poslední částí pultruzní linky je **pohyblivá pila**. Slouží k dělení materiálu na požadované délky. U menších linek není tato pila plně automatická a dělení se provádí pomocí ručních elektrických kotoučových pil. U velkoobjemové výroby bývá výhodnější použití pohyblivé automatické pily, která má schopnost se při řezání pohybovat souběžně s posunujícím se profilem. [2] [29] [16]

#### 4.2.1 Další technologie výroby pultruze:

##### Pulforming:

- Pultruze lze použít i pro výrobu zakřivených profilů.
- Jde o kombinaci pultruze a BMC (“Bulk Molding Compaund”) technologie.
- Tažený profil je pomocí mikrovlnného ohřevu ohřát, vložen polotovar BMC a profil je dotvarován a vytvrzen.

##### PDM pultruze:

- PDM pultruze PDM (“Post Die Manipulation Pultrusion”), neboli „3D“ pultruze
- umožňuje řízené proměnné zakřivení profilu.
- Vlastní vytvrzení profilu nastává UV zářením za tvarovací částí (tažnicí).

##### Pullwinding:

- Je to kontinuální technologický proces kombinující ovíjení a pultruzi.
- Výhodou je lepší kombinace podélné a příčné pevnosti. [14] [2]

### 4.3 Modely sdílení tepla při pultruzi

#### Základní matematický model [29]

- Vytvrzování nenasyčených polyesterových pryskyřic je exotermní reakce
- V průběhu této reakce probíhá síťování a uvolňuje se teplo
- Jedná se o složitý simultánní proces sdílení tepla vedení kompozitem a vznik tepla exotermní reakcí
- Se zvyšujícím se stupněm konverze se mění tepelné vlastnosti kompozitu

#### Tento děj lze obecně popsat jako:

$$\rho c_p = \frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \nabla^2 T + S_C \quad (3)$$

Kde  $S_C$  je rychlost vzniku tepla v objemové jednotce a je obecně složitou funkcí stupně konverze  $\alpha$ , který je závislý na rozdělení teploty v čase a prostoru. Další komplikace je změna tepelné vodivosti  $\lambda$  se zvyšujícím se stupněm konverze. Na základě této rovnice bylo publikováno několik modelů popisujících jednodušší tvary zkušebních těles, jako jsou válec nebo deska. [29]

Válec:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \left( \gamma \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \rho H \quad (4)$$

$$\dot{H} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} H_R \quad (5)$$

Pomocí měření teploty uvnitř vzorku, DSC měřením a použitím empirických vztahů je možno určit stupeň a rychlost konverze.

#### 4.4 Využití technologie pultruze

Mezi přední vlastnosti výrobků vyrobených touto technologií patří především:

- vynikající mechanické vlastnosti
- nízká hmotnost
- obsah výztuže několikanásobně větší než u běžných kompozitů
- odolnost proti korozi
- nízká tepelná vodivost
- teplotní roztažnost srovnatelná s kovy
- rozměrová stálost
- elektricky nevodivé
- nízká navlhavost
- téměř neomezená délka (kontinuální technologie)
- nízké výrobní náklady

Kvalita těchto materiálů je značně vysoká, mnohokrát převyšuje kompozity ručně skládané nebo za studena tvarované. V poslední době se využívá také této technologie pomocí vstřikování, kdy lze vyrábět i sendvičové panely nebo prepregy. [2] [16] [31]

Tyto tažené profily mají vynikající vlastnosti ve směru vláken. Podstatně horší vlastnosti má materiál ve směru napříč vlákny, ale to už vyplývá z jejich struktury. Pultruzní profily se osvědčily jako výborný technický materiál, který má zastoupení v mnoha různých průmyslových odvětvích, jako například: [31]

- elektrotechnika
- chemický průmysl
- stavební průmysl
- letecký průmysl
- dopravní průmysl
- sportovní průmysl

Využití kompozitních materiálů je v současné době hojně zastoupeno. Tyto materiály můžeme nalézt v podstatě v každém průmyslu, či odvětví. Do budoucna můžeme počítat s ještě progresivnějším zastoupením těchto materiálů. S tím souvisí i posun ve vývoji technologií, který se nebude vyhýbat ani technologii pultruze. [16] [31]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je studium kompozitních materiálů vyrobených za pomoci technologie pultruze a dále prozkoumání jejich mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách.

Materiál je testován především na tříbodový ohyb a zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN 178 a ČSN EN ISO 179.

Cíle diplomové práce můžeme shrnout do následujících bodů:

- I. Výběr materiálového složení pultruzních profilů s různými typy epoxidových pryskyřic, které mají různou teplotu  $T_g$
- II. Příprava zkušebních těles dle vybraných norem ČSN EN ISO 178 a ČSN EN 13706-2
- III. Experimentální testování vzorků dle zvolených metodik
- IV. Vyhodnocení získaných výsledků a vzájemné srovnání
- V. Diskuse dosažených výsledku a stanovení závěru

## 6 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE, PRINCIP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Technologie výroby kompozitních materiálů pomocí pultruze a její technické ohraničení je uvedeno již v teoretické části této práce, konkrétně ve 4. kapitole. Díky poměrně detailním informacím uvedených v teoretické části jsou zde představeny pouze hlavní informace o této technologii, které jsou dále doplněny o zaměření na sportovní aplikace.

Mezi hlavní výhody této technologie patří bezesporu vysoká produktivita práce a vysoký stupeň automatizace. S tím souvisí i minimální nároky na obslužný personál. Z výrobní linky vychází hotový profil s nekonečnou délkou. Variabilita vyrobených profilů je takřka neomezená. Hotový profil má vysokou kvalitu provedení a vlastnosti, které by jiné materiály nemohly spolehlivě zaručit. Nejvíce preferované vlastnosti jsou vysoká pevnost, nízká hmotnost, pružnost. Další velice oblíbenou vlastností je poměrně nízké opotřebení, vysoká měrná pevnost a tuhost vzhledem k poměru hmotnosti, dlouhá životnost, tlumení rázů a vibrací nebo snadná manipulace.

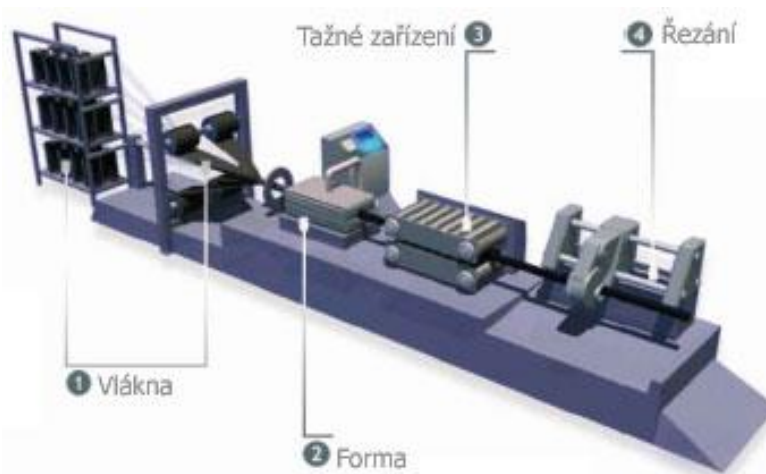
Mezi nevýhody se řadí relativně drahý provoz linky, vysoká cena vstupních materiálů, tedy i velké investiční náklady na pořízení technologie a výrobu. Výrobní linka potřebuje i kvalitní a složitý řídicí systém. [16] [34] [35]

V dalších kapitolách se práce věnuje technologii pultruze uskutečňované ve firmě Willer. Společnost Willer hockey equipment se v první řadě zabývá výrobou hokejových a hokejbalových čepelí, spojovacích a prodlužovacích kolíků. V jejich sortimentu lze nalézt především kompozitové, karbonové a hybridní čepele. Testovaný materiál se využívá při výrobě luků, výztuží do lyží a pro mnoho jiných sportovních odvětví.

## 6.1 Princip výroby pultruzních profilů firmou Willer

Při výrobě pultruzních profilů rozlišujeme dva postupy výroby. První technologií je postup s otevřenou lázní, který je více používaný a technologicky méně náročný. Druhou technologií je postup uzavřenou tlakovou impregnací. Tato technologie je velice podobná vstřikování.

Vzorky, které byly dodány k testování, jsou vyrobeny pomocí postupu s otevřenou lázní. Vytvrzující vlákna, která jsou namotána do rolí, jsou uložena ve stojanu, odtud jsou přes srovnávací hřebeny naváděny do pryskyřičné lázně. Srovnávací hřebeny plní velice důležitou funkci. Musí jednotlivé rovingy přesně srovnat a navést do lázně. V opačném případě by nebylo zaručeno přesné rozmístění vláken a utrpěla by kvalita výrobku. Po důkladném prosycení vláken se přebytečná pryskyřice setře stírací deskou. Vlákna, která vstupují do lázně, nesmí být nijak znečištěna či zamaštěna. Došlo by k nedokonalému prosycení. Následně jsou vlákna vedena do vytvrzovací formy, která musí mít přesnou teplotu. Teplota vytvrzovací formy je nejdůležitější pro výsledný výrobek. Teplota nesmí kolísat a je pro každý typ materiálu přesně definována. Po vytvrzení a zformování vychází z formy hotový profil, který je pak dále řezán na požadované délky. [36]



Obrázek 21 Schéma výrobní linky [36]

## 6.2 Výrobní linka

Firma Willer má k dispozici dvě výrobní linky, které mají podobnou konstrukci. Obě jsou opatřeny technologií s otevřenou lázní.



Obrázek 22 Výrobní linka (vlastní zpracování)

Proces výroby začíná prvním krokem, který je ustavení výztužného materiálu do stojanů. Stojan je složen z pěti pater a na něm jsou uloženy role materiálu. Počet rolí se mění dle požadavku na výrobek a jeho procentuálního složení. Obvykle se pohybuje v počtu od 35 do 70 rolí a váha jedné role je 20 kg.



Obrázek 23 Umístění a navádění rovingů (vlastní zpracování)

Jednotlivé rovingy jsou dále nataženy do srovnávacích hřebenů. Pramence rovingů se nesmí nikde zamotat a musí být navedeny přesně. Jejich tažení z rolí musí být uskutečněno přesně, v opačném případě by výrobek nebyl dostatečně zásobován výztuží a trpěla by kvalita výrobku. Po srovnání těchto pramenců jsou přesně uloženy vedle sebe a navedeny do prosycovací vany. Vždy musí dojít k dokonalému prosycení. Pokud tomu je naopak, z vytvrzovací formy vychází materiál, na kterém jsou zjevná bílá místa. Tato část materiálu má značně horší mechanické vlastnosti a jeho pevnost se rovná zhruba jen pevnosti vyztužujícího materiálu. Do prosycovací vany se nesmí dostat žádné nečistoty. Při znečištění pryskyřice by byl výsledek obdobný jako u nedokonalého prosycení. Prosycené pramence pak putují do vyhřívané vytvrzovací formy, která udá tvar budoucího výrobku.



Obrázek 24 Navádění rovingů do srovnávacích hřebenů (vlastní zpracování)

Důležitá je teplota uvnitř formy. Při nízké teplotě není materiál připraven k odtahu, při vysoké teplotě dojde k přepalování materiálu. Nejcitlivější místo celé výroby je právě přesně stanovená teplota formy, která nesmí kolísat. Zde je důležité využít zkušenosti pracovníků a stanovit přesné teploty pro jednotlivé materiály.





Obrázek 25 Vytvrzovací forma s odtahem materiálu (vlastní zpracování)

Materiál, který vychází z formy je odtahován značným tlakem pomocí pryžových a ocelových válečků rychlostí 14 m/hod. Následně se stáčí do rolí nebo je řezán na požadované délky.



A)

Obrázek 26 A) Odtahové válce linky



B)

B) Výsledný materiál připraven k řezání

## 7 NORMY VZTAHUJÍCÍ SE K TESTOVÁNÍ

Pro testování a přípravu vzorků využijeme několik norem, které se samotného testování týkají. Jsou to především normy pro stanovení ohybových vlastností pro plasty a tažené profily a normy pro zkoušku vrubové houževnatosti – Charpyho zkouška.

### 7.1 ČSN EN ISO 178: Plasty – Stanovení ohybových vlastností

Tato norma stanovuje ohybové vlastnosti plastů za definovaných podmínek. Definováno je standardní zkušební těleso. Pro účely testování lze volit alternativní rozměry vzorků. [32]

Norma se používá ke zjištění:

- pro stanovení pevnosti v ohybu
- modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací
- chování zkušebních těles při namáhání ohybem

Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčným trnem uprostřed jejich rozpětí - tříbodový ohyb.

Metoda je vhodná pro následující materiály:

- vlákny vyztužené reaktoplastové a termoplastové kompozity
- vstříkované a vytlačované termoplasty
- lisovací reaktoplasty

Podpěry a zatěžovací trn

Poloměr trnu ( $R_1$ ) a poloměr podpěr ( $R_2$ ) musí být následující:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm pro tloušťky tělesa} \leq 3 \text{ mm}$$



Přednostní typ tělesa

délka  $l = (80 \pm 2)$  mm, šířka  $b = (10 \pm 0,2)$  mm, tloušťka  $h = (4 \pm 0,2)$  mm

**Rozpětí podpěr  $L$** 

- nastaví se tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %):

$$L = (16 \pm 1)h \quad (6)$$

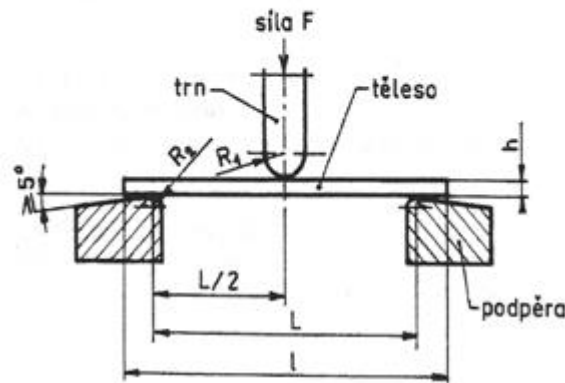
**Rychlost zkoušky**

- nastaví se dle požadavků v předmetové normě zkoušeného materiálu.
- Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu.
- To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 2 mm/min pro přednostní těleso).

Shrnutí zkoušky: [32] [37]

- Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky síla (napětí) – průhyb, ze kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty.
- Zkouška dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné.
- V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušební tělesa.
- Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.
- Napětí v ohybu je podílem ohybového momentu  $M$  při zatížení  $F$  ku modulu průřezu zkušební tělesa  $W$ .

Obrázek tříbodového systému ohybové zkoušky:



Obrázek 27 Tříbodový ohyb [37]

## 7.2 ČSN EN ISO 179: Metoda Charpy

### Rázová a vrubová houževnatost [33]

Rázová houževnatost je energie spotřebována k porušení zkušebních těles. Je vztažena na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předem stanovených podmínek. Označuje se  $a_n$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). Vrubová houževnatost neboli plocha kritického průřezu v místě vrubu, se označuje  $a_k$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). Vrubové číslo, vrubová citlivost (poměrná rázová houževnatost) je poměr vrubové a rázové houževnatosti. Označení  $K^Z$  (číslo menší než 1)

### Shrnutí zkoušky: [33]

- Kyvadlové kladivo s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles, bývá opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie  $W$  (spotřebovaná práce) odečítá přímo
- Odečtené hodnoty mají ležet mezi 10 a 80 % celkového rozsahu stupnice
- Vruby ve zkušebních tělesech mohou mít různé tvary (normováno)
- Při zkoušce se tělesa ukládají tak, aby vrub byl v tahové oblasti (opačná strana tělesa, než je provedena deformace)
- Vliv vrubu je značný, vrubová houževnatost až 10 krát nižší než rázová

## 8 NAVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ VZORKŮ

K testování jsou určeny dva vzorky. Každý ze vzorků je podroben testování, přičemž je testováno 12 kusů, jak uvádí ČSN o síle 1 mm.

První vzorek se skládá z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů. Jako matrice byla zvolena Epoxid 1787. Výztuž u tohoto vzorku obsahuje 83 hm% skelné výztuže. Teplota skelného přechodu je zhruba 70 °C. Rychlost odtahu pak 14 m/hod.

Druhý vzorek je složen z jednosměrně uložených přímých uhlíkových rovingů. Matrici tvoří epoxid LH 270. Výztuž obsahuje 83 hm%. Teplota skelného přechodu je vyšší a to 100 °C při stejné rychlosti odtahu.

### 8.1 Přehled složení vzorků

Tabulka 5 Přehled složení vzorků

Označení	Uložení vlákna	Matrice	Tloušťka [mm]	Hm% výztuže [%]	Odtah [m/hod]	Tg [°C]
A	Přímé jednosměrné skelné vlákna	Epoxid 1787	1	83	14	~ 70
B	Přímé jednosměrné uhlík. vlákna	Epoxid LH 270	1	83	14	~ 100

### 8.2 Příprava zkušebních těles

Materiál byl dodán ve formě dlouhých pásů. Rozměry těchto pásů byly 2000 x 50 x 1 mm. Tyto pásy byly upraveny na normované rozměry. Příprava spočívala v nastříhání zkušebních těles na dílenských nůžkách na rozměry 50 x 20 x 1 mm a 50 x 15 x 1 mm dle normy. Vzorky byly před nastříháním řádně orýsovány a zúhlovány.



Obrázek 28 Zkušební materiál ve formě pultruzních pásů (vlastní zpracování)

Tabulka, která je níže uvedená se dělí na vzorky uhlíkové a skelné. Toto rozdělení využijeme pro oddělení těles při mechanických zkouškách. Tělesa určena pro ohybovou zkoušku jsou testována při teplotě 20, 60 a 100 °C.

Tabulka 6 Rozměry zkušebních těles

Vzorek [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Testováno
Uhlík	1	20	50	Ohyb
Uhlík	1	15	50	Charpy
Sklo	1	20	50	Ohyb
Sklo	1	15	50	Charpy

## 9 CHARAKTERISTIKY ZKUŠEBNÍCH STROJŮ

Měření bylo provedeno na zkušebním stroji ZWICK 1456. Tento stroj využívá software testXpert v7.11. Na stroji lze provádět několik druhů zkoušek např. tahové, tlakové, ohybové. Snímače síly jsou nastaveny do 2,5kN a do 20 kN. Na tomto stroji lze využít i teplotní komory k měření za zvýšených či snížených teplot. Všechny naměřené hodnoty a jejich výpočty provádí software automaticky a výsledky zaznamenává do tabulek a grafů.

Tabulka 7 Charakteristika stroje ZWICK

Testovací stroj ZWICK 1456	
Teplotní komora	-80 až +250°C
Max. posuv příčniku	800 mm/min
Snímače teploty	2,5 a 20 kN
Zkoušky	Tah / Tlak / Ohyb



Obrázek 29 Zkušební stroj ZWICK 1456 (vlastní zpracování)

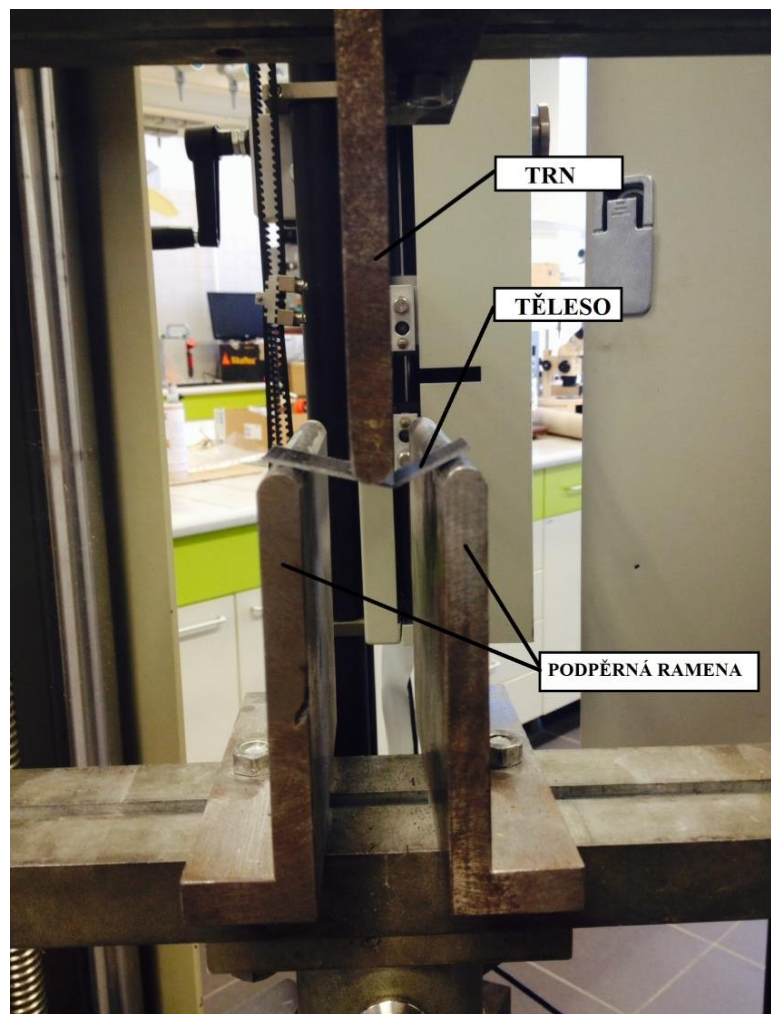
Pro testování vrubové houževnatosti metodou Charpy bylo potřeba zkušebního stroje CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR. Tento stroj může provádět různá měření, je charakterizován rozměry stroje, do kterých se řadí např. rozpětí podpor, délka kyvadla, úhel břitu. Do popisu dynamiky stroje spadá energie a rychlost rázu.

Tabulka 8 Charakteristika stroje Ceast resil

CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR	
Úhel břitu	30±1 °
Délka kyvadla	225 mm
Rozpětí podpěry	40-62-70 mm
Úhel vychýlení kyvadla	160 °
Dynamika stroje	
Energie	1,25 J



Obrázek 30 Zkušební stroj CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR (vlastní zpracování)

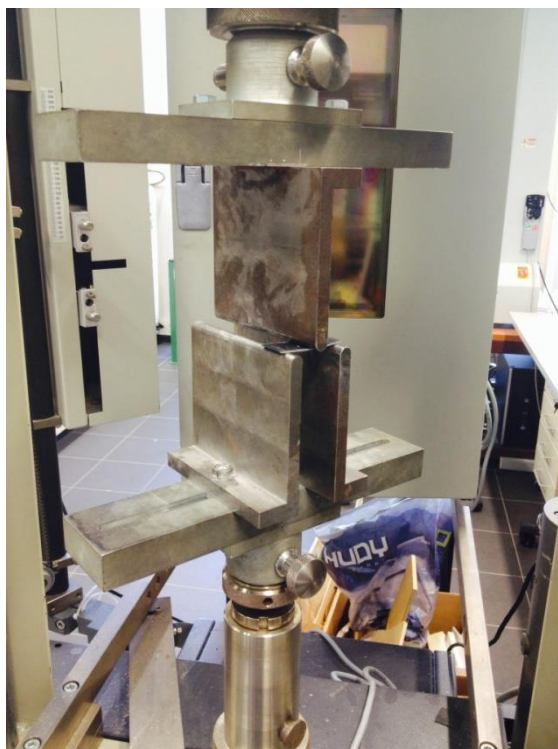


Obrázek 31 Popis upnutí tělesa (vlastní zpracování)



## 10 STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ A VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Testovací stroje nám poskytly číselné a grafické údaje o testování, ty byly dle platných norem vyhodnoceny. Zpracované výsledky se nachází v následujících tabulkách a grafech. Jako první vyhodnocujeme ohybovou zkoušku, ta byla rozdělena na šest sérií měření. V každé sérii bylo použito dvanáct testovacích těles. Druhá v pořadí se nachází zkouška Charpyho kladivem. Zde se provedly dvě měření rovněž po dvanácti kusech. Naměřená data byla poté srovnána. U zkoušky ohybem porovnáváme modul pružnosti a mez pevnosti u uhlíkové a skelné výztuže při teplotách 20°C, 60°C a 100°C. Dále sledujeme porovnání modulů pružnosti a meze pevnosti samostatně u všech karbonových i skelných vzorků. U zkoušky Charpyho kladivem porovnáváme maximální sílu, která působí na karbonové a skelné vzorky, rázovou houževnatost a práci potřebnou k přeražení tělesa.



Obrázek 32 Testování ohyb (vlastní zpracování)

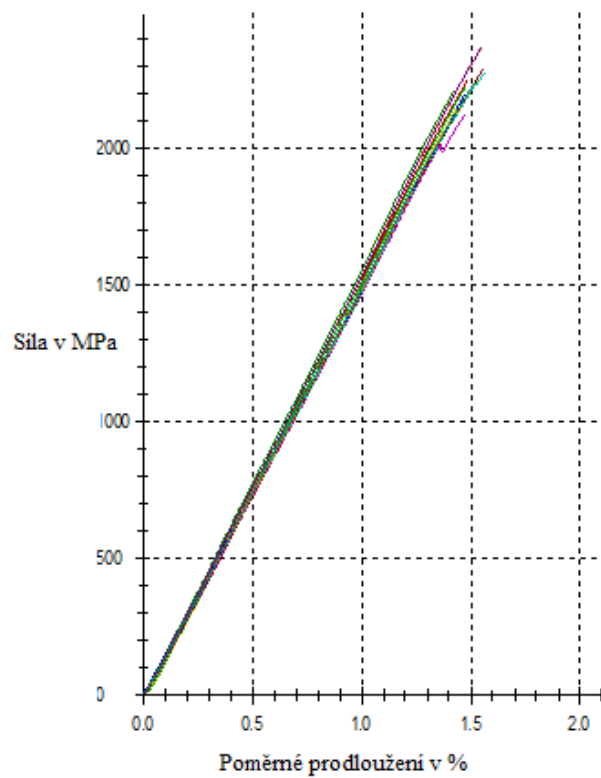


## 10.1 Tělesa testována na ohybovou zkoušku

### 10.1.1 Uhlíková vlákna při teplotě 20 °C

Tabulka 9 Statistika pro uhlík 20 °C

Uhlík při teplotě 20°C				
n =12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{FM}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	148888	2230	1,5	1484,74
s	2260	94,9	0,1	138,39
v	1,53	4,26	4,03	9,32

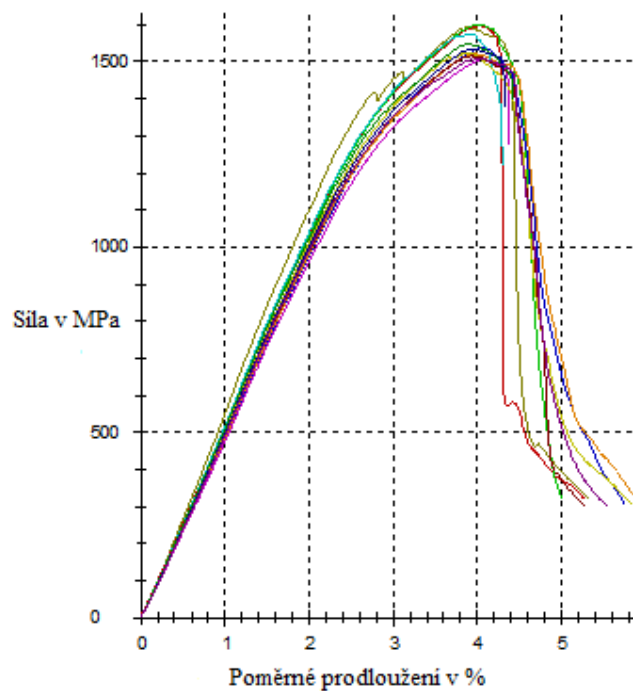


Graf 1 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 20 °C

## 10.1.2 Skelná vlákna při teplotě 20 °C

Tabulka 10 Statistika pro sklo 20 °C

Sklo při teplotě 20°C				
n = 12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\epsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	47500	1550	4	3534,2
s	1680	35,6	0,1	123,77
v	3,54	2,3	1,9	3,5

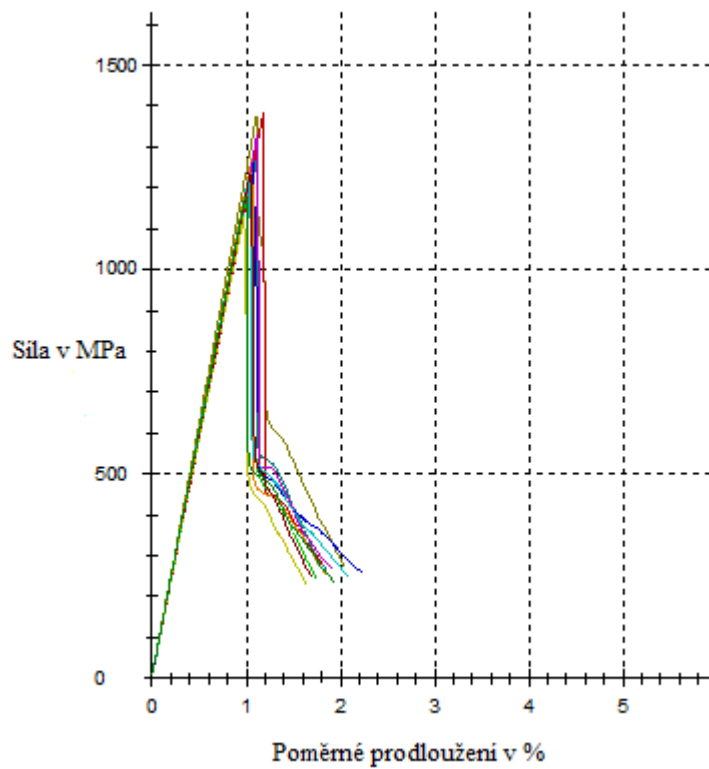


Graf 2 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 20 °C

## 10.1.3 Uhlíková vlákna při teplotě 60°C

Tabulka 11 Statistika pro uhlík 60 °C

Uhlík při teplotě 60°C				
n =12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	119000	1270	1,1	643,24
s	1700	79,8	0,1	67,64
v	1,43	6,3	5,76	10,52

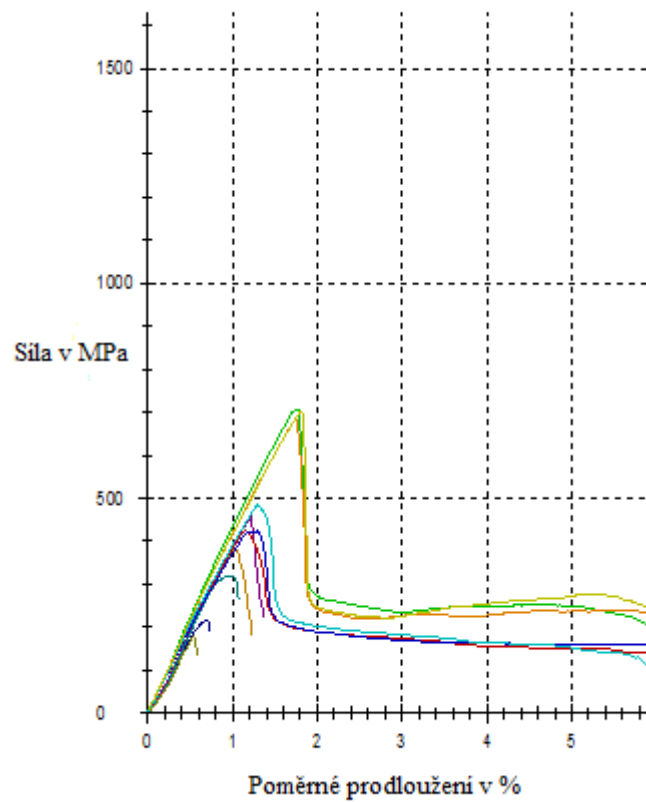


Graf 3 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 60 °C

## 10.1.4 Skelná vlákna při teplotě 60 °C

Tabulka 12 Statistika pro sklo 60 °C

Sklo při teplotě 60°C				
n =12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{FM}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	35800	453	1,2	318,33
s	4850	188	0,4	221,54
v	13,54	40,53	34,54	69,6

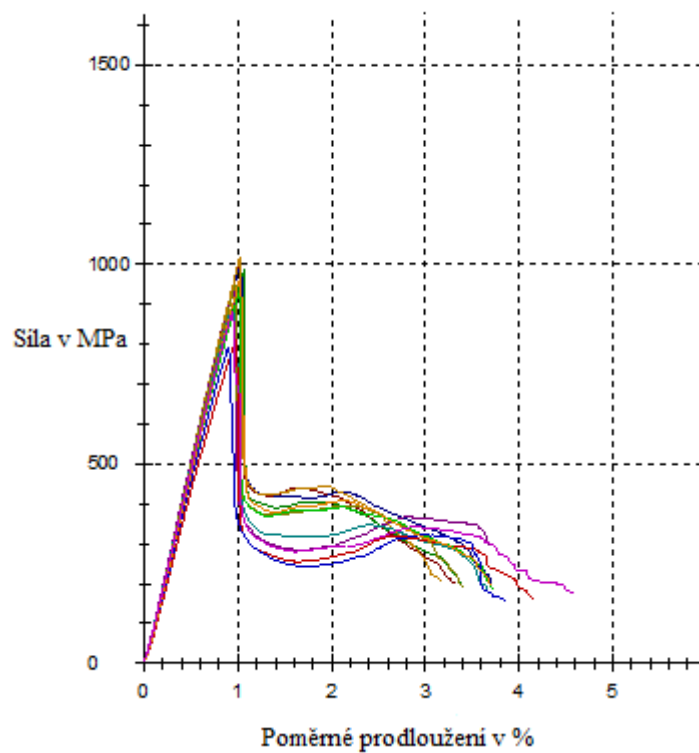


Graf 4 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 60 °C

## 10.1.5 Uhlíková vlákna při teplotě 100°C

Tabulka 13 Statistika pro uhlík 100 °C

Uhlík při teplotě 100°C				
n =12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	97900	930	1	445,24
s	4570	72	0,1	52,56
v	4,66	7,74	4,59	11,8

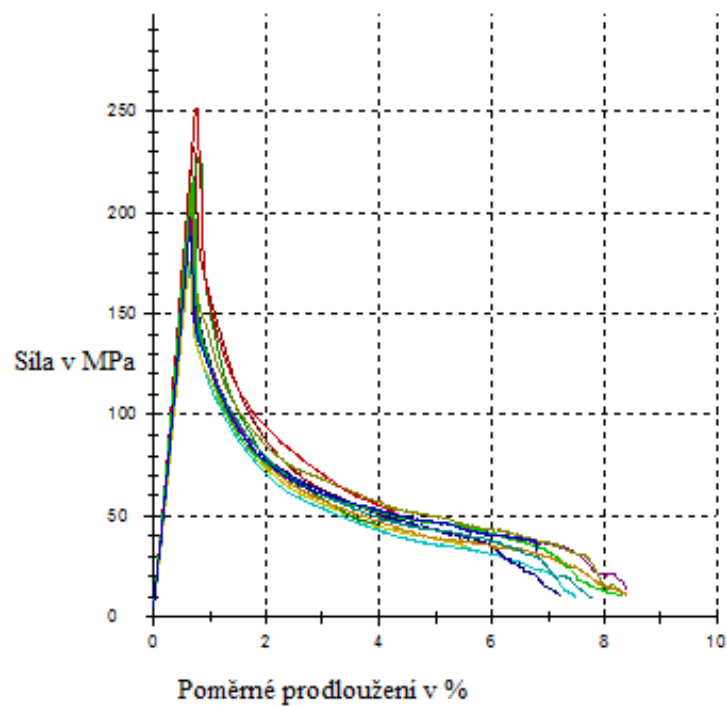


Graf 5 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 100 °C

## 10.1.6 Skelná vlákna při teplotě 100 °C

Tabulka 14 Statistika pro sklo 100 °C

Sklo při teplotě 100°C				
n =12	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{FM}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
$\bar{x}$	27900	204	0,7	69,1
s	1750	24	0,1	13,16
v	6,27	11,74	8,48	19,04



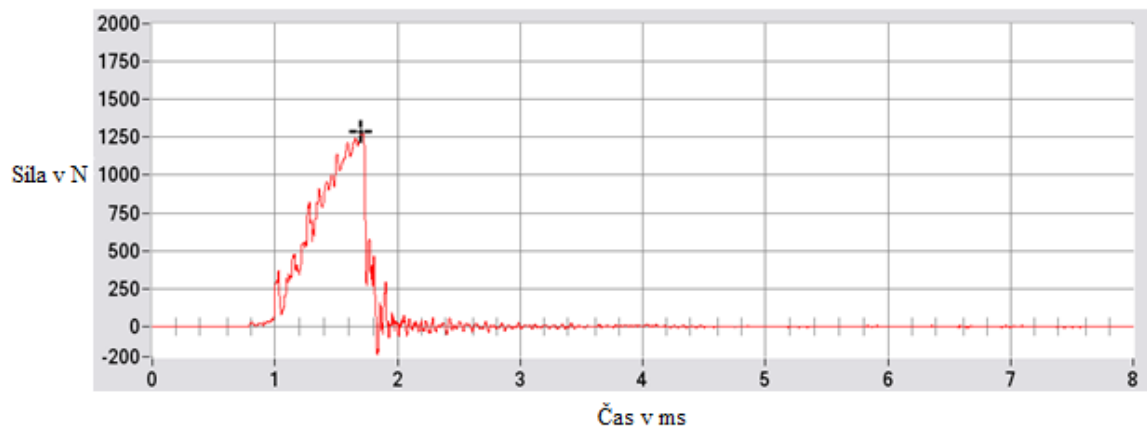
Graf 6 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 100 °C

## 10.2 Tělesa testována Charpyho kladivem

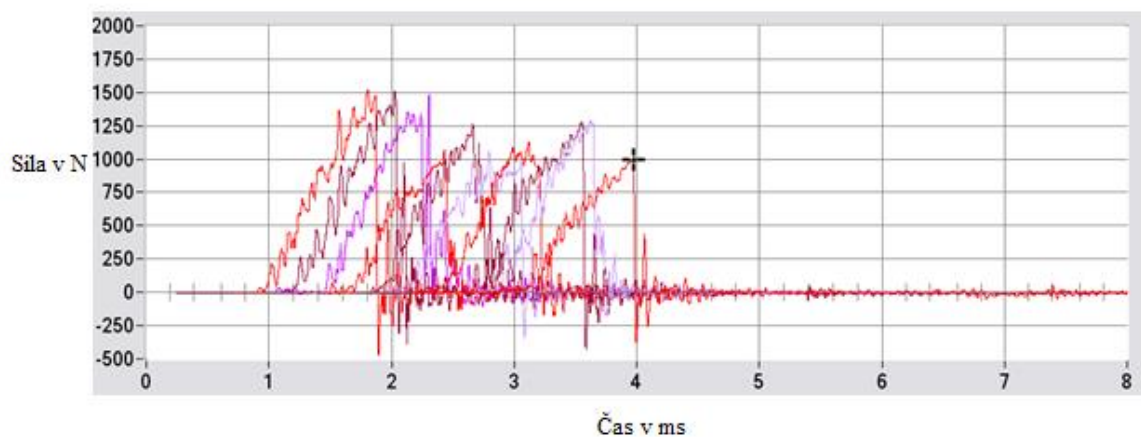
### 10.2.1 Uhlíková vlákna

Tabulka 15 Statistika pro uhlík- Charpy

Uhlík při testování Charpy			
n =12	Fm[N]	Am[Kj/m2]	Ab[Kj/m2]
$\bar{x}$	1188,3	94,06	120
s	153,96	18,15	13,77
v	0,12	0,19	0,13



Graf 7 Grafické znázornění nejčastějšího průběhu zkoušky pro uhlík

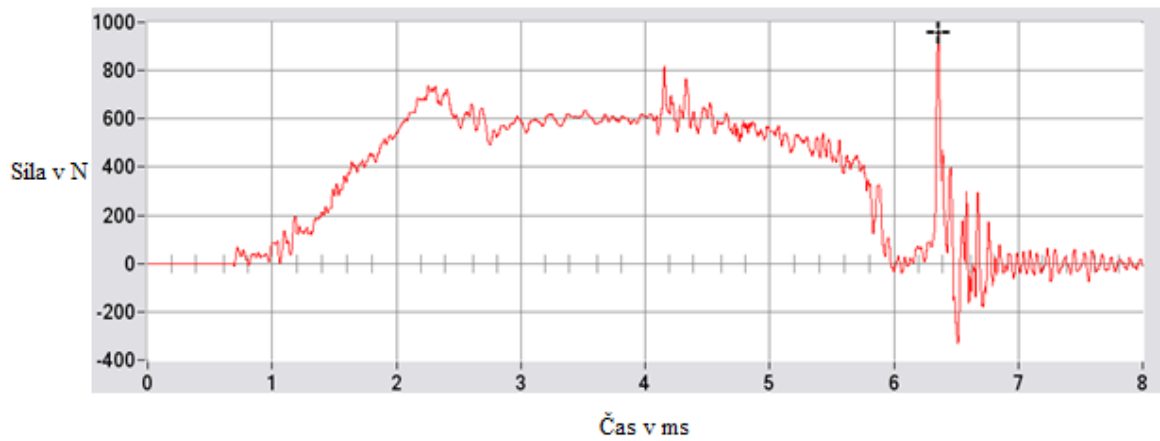


Graf 8 Grafické znázornění pro všechny uhlíkové vzorky

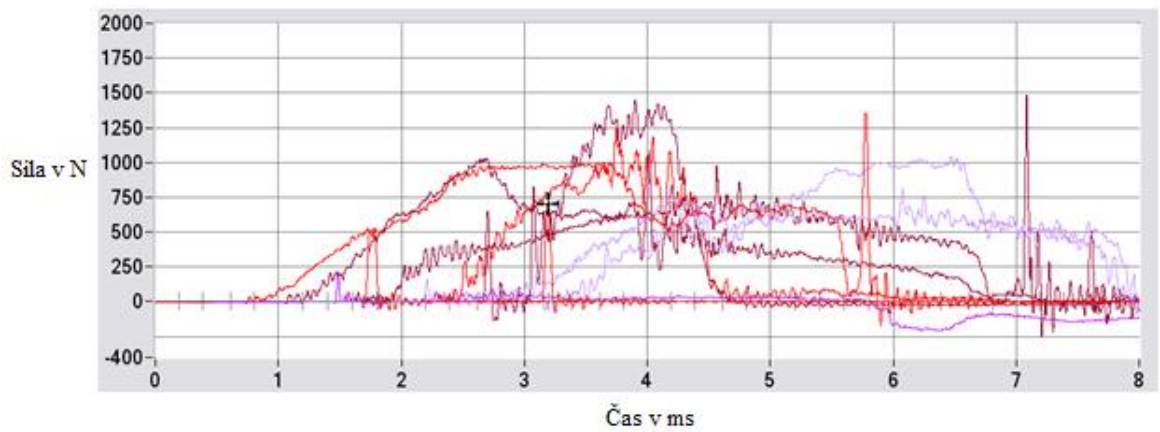
10.2.2 Skelná vlákna

Tabulka 16 Statistika pro sklo- Charpy

Sklo při testování Charpy			
n =12	Fm[N]	Am[Kj/m2]	Ab[Kj/m2]
$\bar{x}$	1088,39	324,205	409,06
s	67,81	67,81	945,83
v	0,06	0,2	1,43



Graf 9 Grafické znázornění nejčastějšího průběhu zkoušky pro sklo



Graf 10 Grafické znázornění pro všechny karbonové vzorky

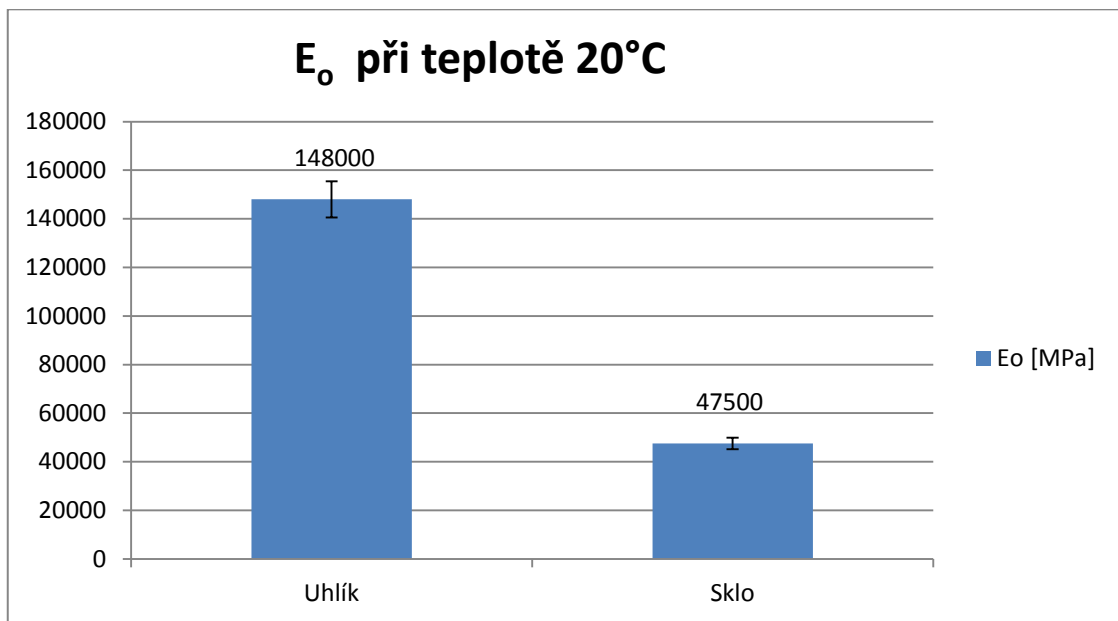


## 11 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ GRAFICKY

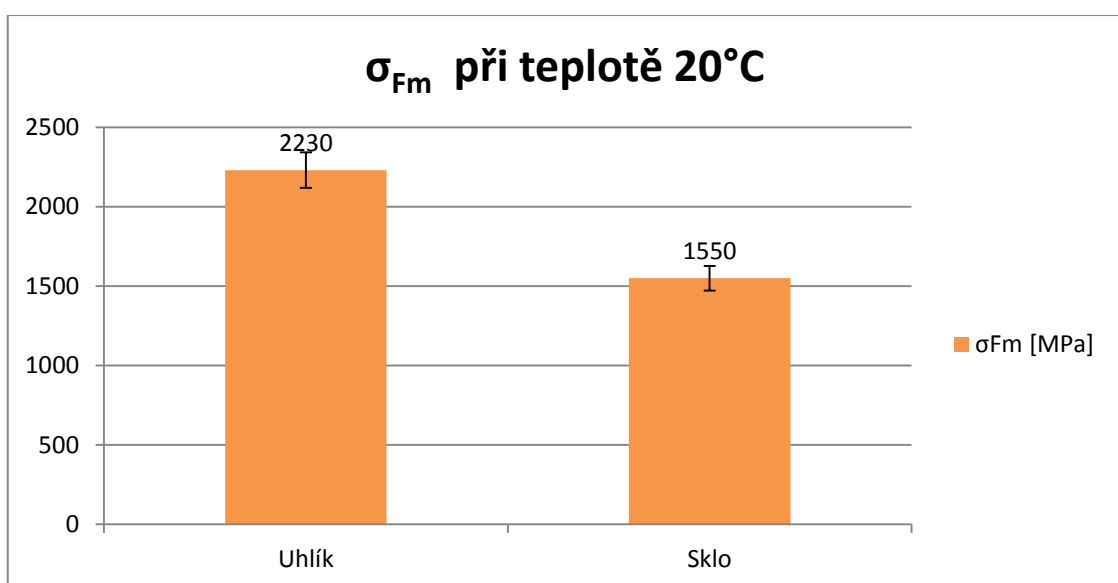
### 11.1 Ohybová zkouška

#### 11.1.1 Srovnání uhlíkové a skelné výztuže

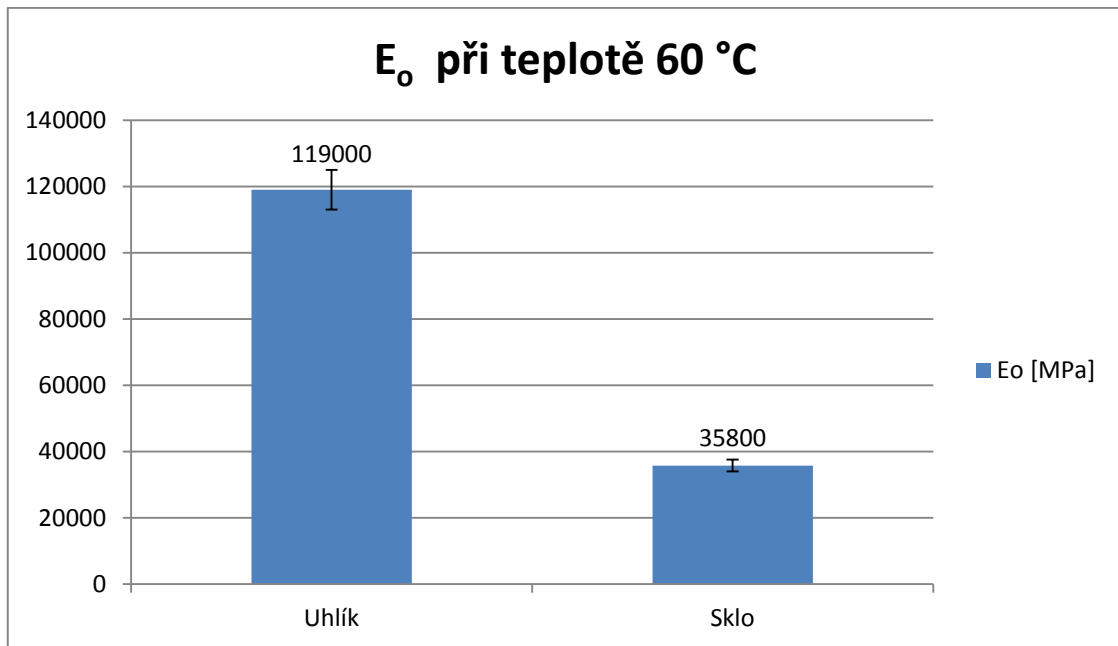
Na následujících grafech porovnáváme moduly pružnosti a meze pevnosti karbonových a skelných materiálů při teplotách 20°C, 60°C a 100°C.



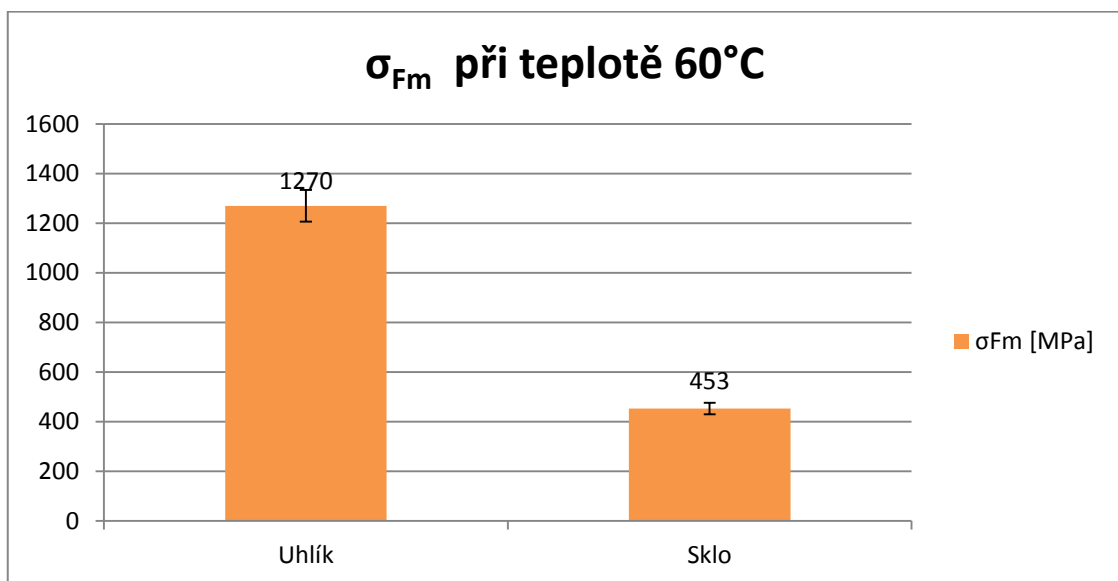
Graf 11 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 20°C



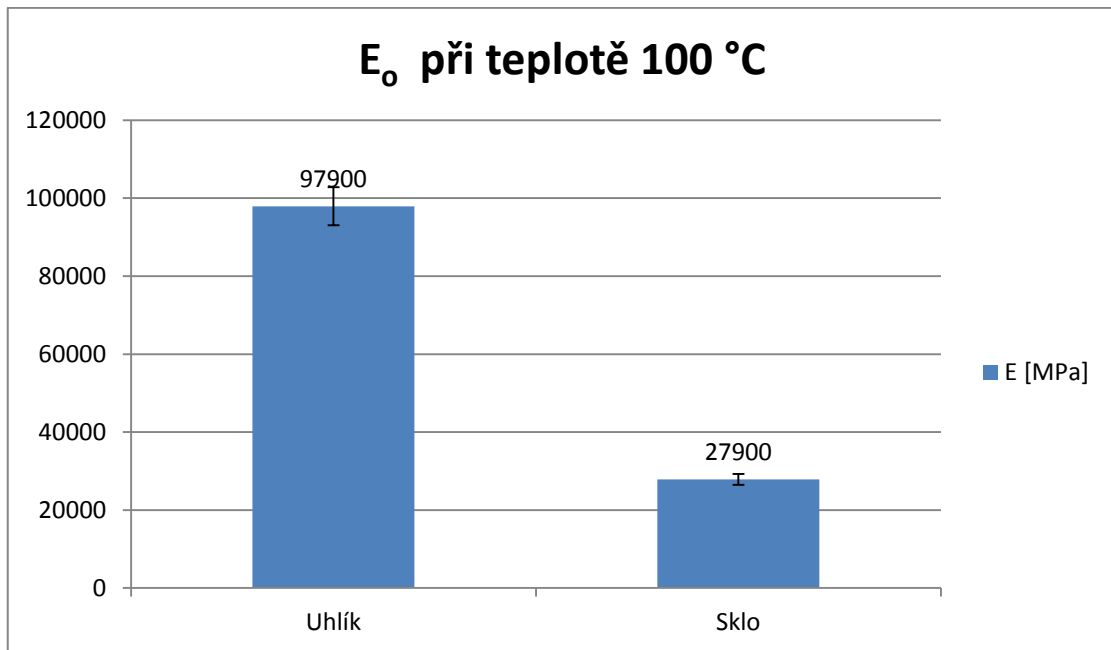
Graf 12 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 20°C



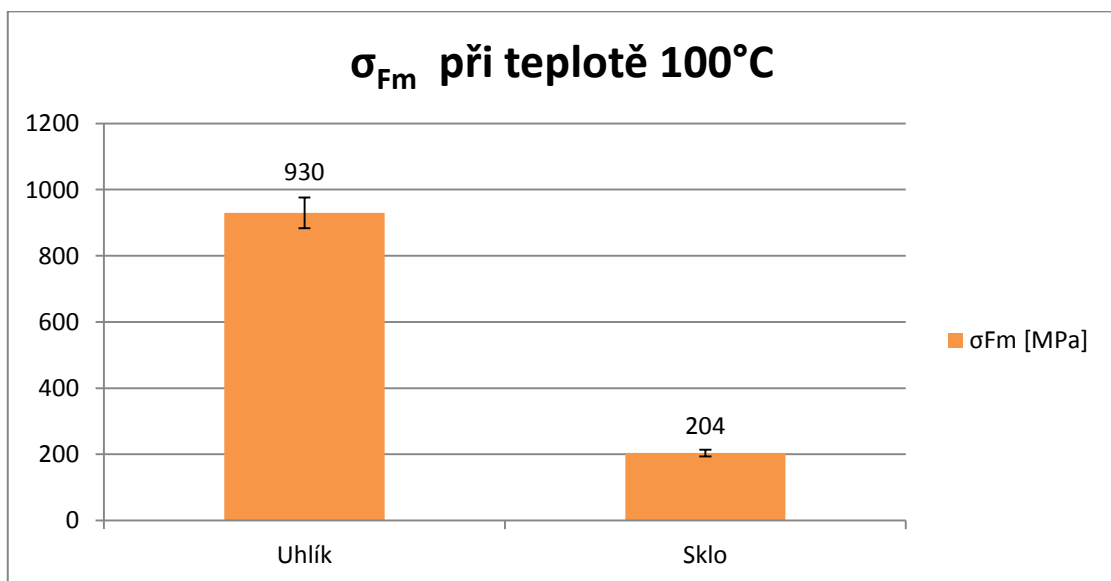
Graf 13 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 60°C



Graf 14 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 60°C



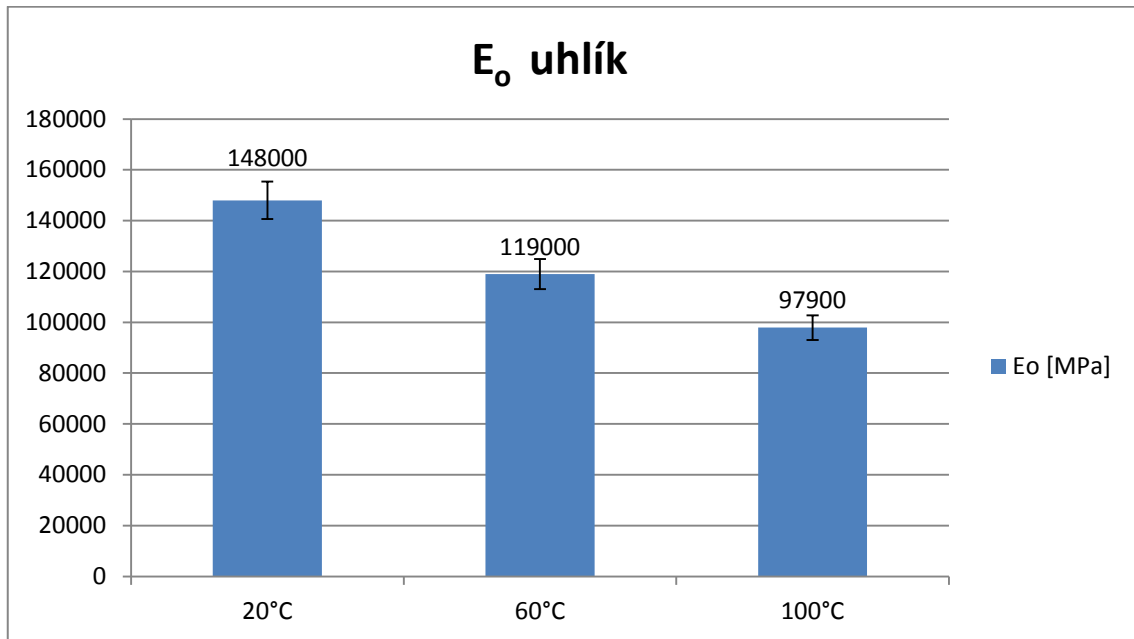
Graf 15 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 100°C



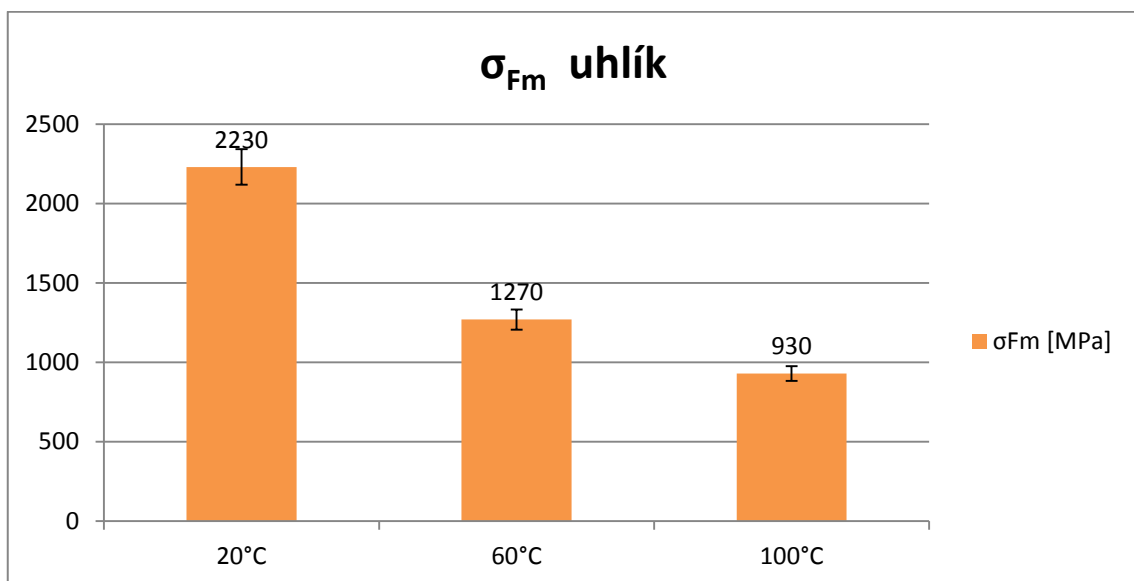
Graf 16 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 100°C

## 11.1.2 Srovnání uhlíkových vláken při různých teplotách

Porovnání modulu pružnosti uhlíkových těles při různých teplotách.



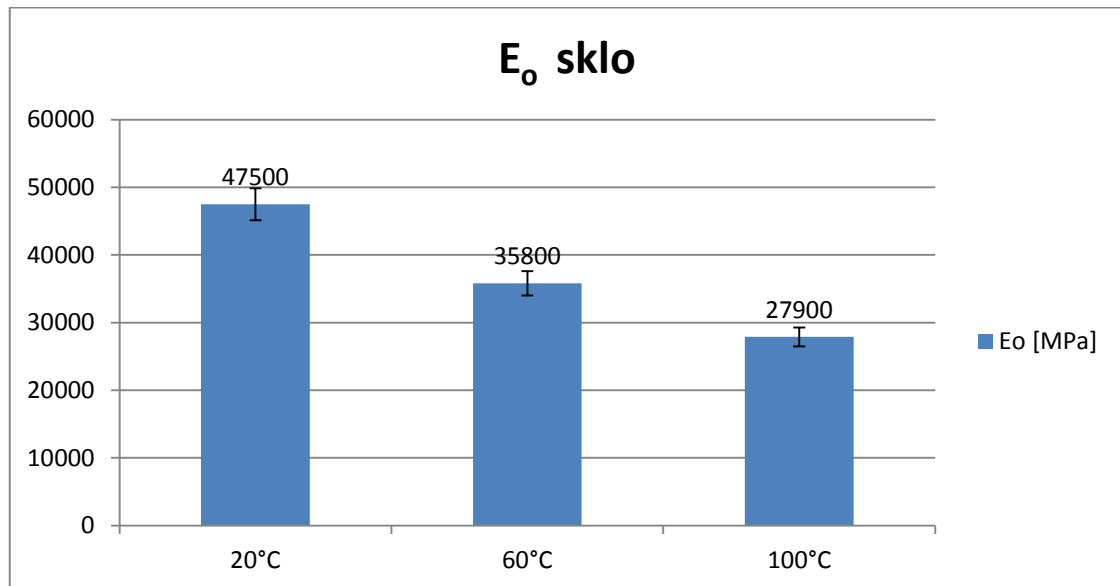
Graf 17 Porovnání modulu pružnosti uhlíkových těles při různých teplotách



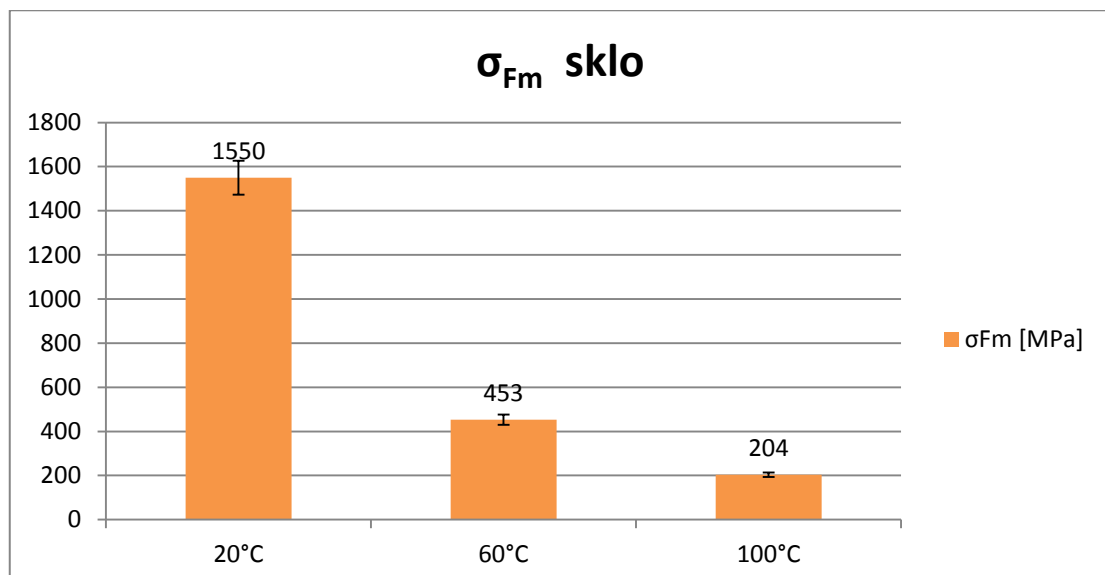
Graf 18 Porovnání meze pevnosti uhlíkových těles při různých teplotách

## 11.1.3 Srovnání sklených vláken při různých teplotách

Porovnání skla při teplotách 20°C, 60°C a 100°C



Graf 19 Porovnání modulu pružnosti skleněných těles při různých teplotách

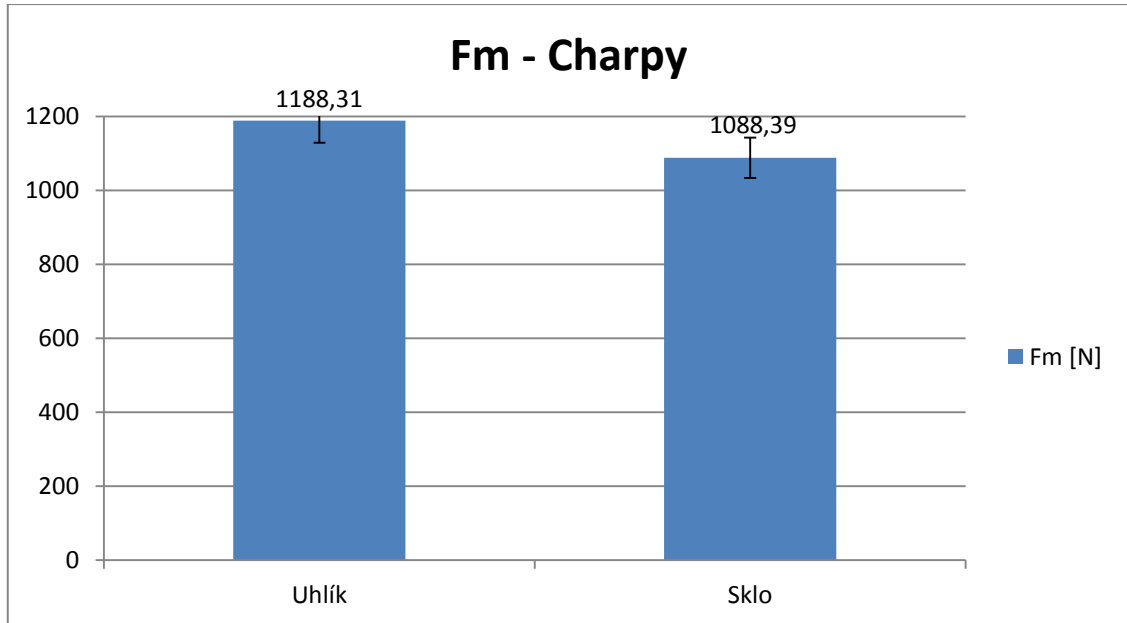


Graf 20 Porovnání meze pevnosti skelných těles při různých teplotách

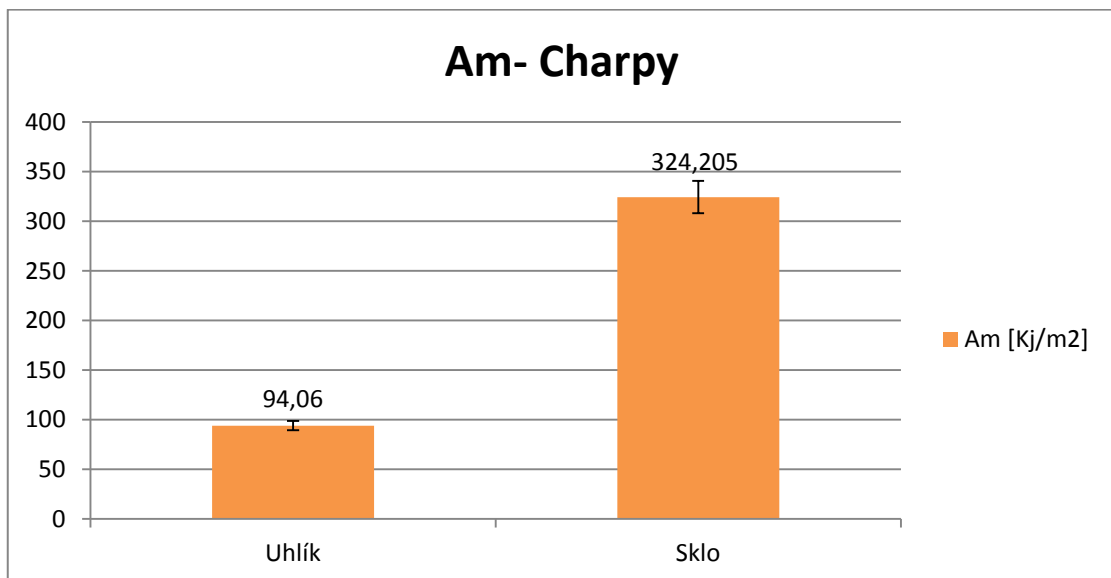
## 11.2 Zkouška Charpyho kladivem

### 11.2.1 Srovnání karbonové a sklené výztuže

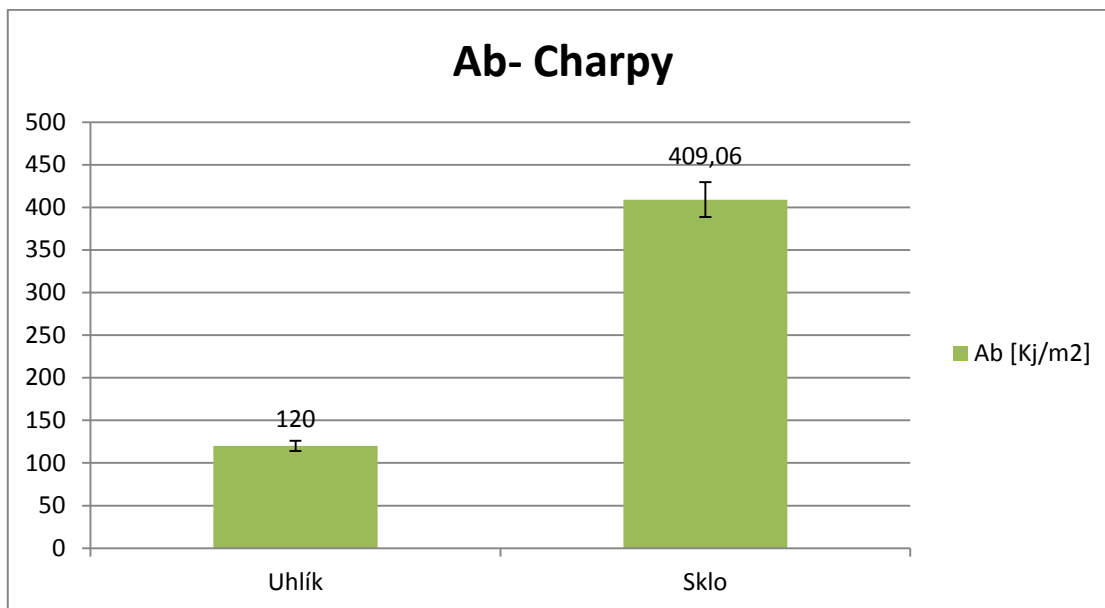
Na následujících grafech porovnááme maximální sílu působící na tělesa při zkoušce Charpyho kladivem, dále rázovou houževnatost a celkovou práci potřebnou k přeražení tělesa.



Graf 21 Porovnání max. síly  $F_m$  působící na vzorek



Graf 22 Porovnání rázové houževnatosti  $A_m$

Graf 23 Porovnání celkové práce  $A_b$  potřebné k přeražení tělesa

## 12 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Při vyhodnocování výsledků jsme se zaměřili na srovnání a vyhodnocení modulů pružnosti a mezí pevnosti jednotlivých těles. Dále se tyto parametry porovnávali při zvýšených teplotách a to při 60°C a 100°C. Jako další byla vyhodnocena zkouška Charpyho kladivem a porovnáme maximální síly potřebné pro přeražení tělesa, rázovou houževnatost a celkovou práci potřebnou k přeražení tělesa.

### 12.1.1 Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 20°C

#### - Modul pružnosti

Zde vyhodnocujeme vzorek složený z jednosměrně uložených karbonových vláken v porovnání s vlákny skelnými. Průměrná hodnota modulu pružnosti při teplotě 20°C byla u karbonu 148 000 MPa, u vzorku se skelnými vlákny pak 47 500MPa.

- Uhlík – 148000 MPa
- Sklo – 47500 MPa

**Uhlíková výztuž má při teplotě 20°C 3,11x větší modul pružnosti v ohybu než výztuž sklená.**

#### - Mez pevnosti

Mez pevnosti karbonových těles má hodnotu 2230MPa. Tělesa vyrobená z vláken skelných pak 1550MPa.

- Uhlík – 2230 MPa
- Sklo – 1550 MPa

**Mez pevnosti v ohybu je u uhlíkových těles 1,41x větší než u skelných.**



### 12.1.2 Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 60°C

- Modul pružnosti

Hodnota Uhlíku je pro tuto aplikaci 119000MPa, pro sklo 35800MPa. Rozdíl hodnot mezi tělesy činí 83200 MPa. Při zvýšení teploty na 60°C vidíme pokles hodnot u obou těles. Hodnota sledovaných parametrů klesne o 29000MPa u karbonu a 11700 u skla.

- Uhlík – 119000 MPa
- Sklo – 35800 MPa

**Modul pružnosti v ohybu uhlíkových vláken při 60°C je 3,32x větší než u skelných.**

- Mez pevnosti

Mez pevnosti je pro vzorky z uhlíku 1270MPa. Pro sklo 453MPa. Rozdíl obou těles je 817MPa. Zvýšení teploty na 60°C sníží tyto hodnoty o 960 MPa a 1097 MPa oproti hodnotám při 20 °C

- Uhlík – 1270 MPa
- Sklo – 453 MPa

**Mez pevnosti v ohybu vzorků z uhlíku je při 60°C 2,80x vyšší.**

### 12.1.3 Uhlíková a sklená výztuž při teplotě 100°C

- Modul pružnosti

Hodnota uhlíku je pro teplotu 100°C 97900 MPa, pro sklo 27900 MPa. Rozdíl hodnot mezi tělesy činí 21100 MPa. Při zvýšení teploty na 100°C vidíme rovněž pokles hodnot u obou těles. Hodnota sledovaných parametrů klesne oproti vzorkům testovaných při 60°C o 21100 MPa u uhlíku a 7900 MPa u skla.

- Uhlík – 97900 MPa
- Sklo – 27900 MPa

**Modul pružnosti v ohybu při 100°C je u uhlíkových těles 3,50 x vyšší než u těles vyrobených pomocí skelných vláken.**

- Mez pevnosti

Mez pevnosti je pro vzorky z karbonu 930 MPa. Pro sklo 204 MPa. Rozdíl obou těles je 113 MPa. Zvýšení teploty na 100°C snižuje tyto hodnoty o 340 MPa a 249 MPa oproti hodnotám při 60 °C

- Uhlík – 930 MPa
- Sklo – 204 MPa

**Mez pevnosti v ohybu uhlíku je u nejvyšší testované teploty 100°C 4,55x větší než u vzorků skelných.**

#### 12.1.4 Srovnání uhlíkové výztuže při různých teplotách

- Modul pružnosti

Zde sledujeme parametry modulu pružnosti. Z grafů, které jsou výše uvedené, vyplývá, že se modul pružnosti se zvyšující teplotou snižuje z hodnoty 148000 MPa na hodnotu 97900MPa. Budeme porovnávat moduly pružnosti uhlíkových vzorků. Nejvyšší modul má vzorek testován při 20°C. Modul má vyšší 1,24x než vzorek testován při 60°C. Nejnižší modul pak má vzorek testován při 100°C. V porovnání s teplotou 60°C je 1,21x nižší. Při porovnání 20°C a 100°C klesne modul 1,51x.

- Mez pevnosti

Mez pevnosti se také bude snižovat s rostoucí teplotou. Z hodnoty 2230MPa při 100°C klesá na hodnotu 930MPa. Mez pevnosti v ohybu s rostoucí teplotou klesá. Při 60°C je 1,75x nižší než u 20°C. Při 100°C pak klesne 1,36x oproti 60°C. Rozdíl mezi 20°C a 100°C je 2,39x nižší.

### 12.1.5 Srovnání sklené výztuže při různých teplotách

#### - Modul pružnosti

Z výsledků vyplývá, že s rostoucí teplotou se mechanické vlastnosti, konkrétně mez pevnosti v ohybu u výztuže v podobě sklených vláken snižují. Hodnota při teplotě okolí je 47500MPa, při 100°C pak 27900MPa. Nejvyšší modul má podle předpokladů vzorek testovaný při 20°C. V porovnání s testem při teplotě 60°C je 1,32x vyšší. Při 100°C pak tento modul klesne 1,28x oproti testu při 60°C. Modul pružnosti v ohybu sklených vzorků u teploty 20°C je 1,70x vyšší než při 100°C

#### - Mez pevnosti

Mez pevnosti v ohybu sklených vzorků při rostoucí teplotě značně klesá. Nejvyšší hodnotu má vzorek při 20°C. Při zvýšení teploty na 60°C klesne mez pevnosti 3,42x. Při dalším zvýšení teploty na 100°C dále klesne 2,22x proti 60°C. Nejvyšší rozdíl je v porovnání meze pevnosti v ohybu mezi 20°C a 100°C. Mez pevnosti je 7,59x nižší.

### 12.1.6 Vyhodnocení zkoušky Charpyho kladivem

U této zkoušky vyhodnocujeme maximální sílu působící na zkušební těleso, dále rázovou houževnatost a celkovou práci.

#### - Maximální síla působící na těleso

Vzorek složený z uhlíkových vláken má průměrnou hodnotu 1188,31 N. Skelná vlákna 1088,39N. Rozdíl mezi těmito materiály je 99,92N. Jak je patrné z grafu, který se nachází mezi porovnáním jednotlivých materiálů, není mezi výztužemi tak obrovský rozdíl jako u předchozích testů. Uhlík má hodnotu vyšší 1,1x.

#### - Rázová houževnatost

Při porovnání rázové houževnatosti dojdeme k zajímavějším číslům. Vzorek tvořený skelnými vlákny má hodnotu rázové houževnatosti 3,45x vyšší než je tomu u vzorku tvořeným uhlíkem.

#### - Celková práce

Při porovnání celkové práce potřebné k přeražení tělesa má vyšší hodnotu vzorek skelný a to 3,41x.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá experimentálním testováním a modifikacemi kompozitních materiálů vyráběných technologií pultruze. Touto progresivní technologií se nejčastěji vyrábí profily různých tvarů a rozměrů. Jedna z nesporných výhod této technologie spočívá v získání velkého počtu hmotnostních procent vláknité výztuže. Pro firmu Willer byly testovány mechanické vlastnosti vzorkovaných materiálů a poté byly vzájemně porovnány. Konkrétně se testoval modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu. Celkem byly testovány dva typy vzorků, 12 kusů zkušebních těles typu 1, které byly testovány pro 3 odlišné teploty a 12 kusů zkušebních těles pro zkoušku vrubové houževnatosti. Tyto dva testované materiály měly rozdílné složení. První z nich byl vyroben pomocí jednosměrně uložených skelných vláken, jako matrice byl použit epoxid 1787. Druhý vzorek byl připraven z jednosměrně uložených uhlíkových vláken s matricí epoxid LH270. Testování proběhlo třibodovým ohybem za pokojové i zvýšené teploty na zkušebním stroji ZWICK 1456. Další druh testování byl zvolen dynamický test Charpyho kladivem na stroji CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR. Oba testované vzorky obsahovaly 83% výztuže, tloušťka materiálu byla 1mm při odtahu 14 m/hod v obou případech. Odlišujícím znakem firmy Willer od konkurence v odvětví je její schopnost díky technologii pultruze vyrobit dokonce materiál až s 90% vláknité výztuže, což je obsah vláknité výztuže, kterého nelze dosáhnout žádnou jinou technologií.

U testování třibodovým ohybem se práce zaměřovala na porovnání modulu pružnosti a meze pevnosti zkušebních těles při teplotách 20°C, 60°C a 100°C. Výsledky, které nám poskytl software zkušebního stroje, se poté vyhodnocovaly. Nejprve byla porovnána tělesa s různou formou výztuže, tedy uhlíku a skla při zadaných teplotách. Poté se porovnávaly moduly pružnosti a meze pevnosti pouze u jedné z druhů výztuží opět při shodných testovacích teplotách. Z výsledků měření bylo zjištěno, že při testovací teplotě 20°C má uhlíková výztuž 3,11x větší modul pružnosti a 1,41x větší mez pevnosti v ohybu než vzorek, který je složen z vláken skelných. Testováním těles při teplotě 60°C bylo zjištěno, že modul pružnosti vzorků s uhlíkovou výztuží je 3,32x vyšší a mez pevnosti v ohybu 2,80x vyšší než u skelné výztuže. Poslední testovací teplota byla 100°C. U této teploty vyšel také lépe vzorek uhlíkový. Modul pružnosti byl 3,50x vyšší, mez pevnosti v ohybu pak 4,55x.

Další vyhodnocení bylo zaměřeno na vzorek, který tvořila pouze uhlíková výztuž. Z grafů, které jsou uvedeny v této práci, vyplývá, že se modul pružnosti a mez pevnosti s rostoucí teplotou snižují. Nejvyšší modul pružnosti byl naměřen při 20°C. Jeho hodnota byla 1,24x vyšší než u vzorku testovaného při teplotě 60°C. Nejnižší modul pak měl vzorek s testovací teplotou 100°C. V porovnání s teplotou 60°C je 1,21x nižší. Při porovnání modulu pružnosti při 20°C a 100°C zjistíme, že se hodnota snižuje 1,51x. Nejvyšší mez pevnosti v ohybu byla naměřena při 20°C. Při zvýšení teploty na 60°C klesne 1,75x, dalším zvýšením teploty na 100°C pak klesne 1,36x. Rozdíl meze pevnosti v ohybu při 20°C a 100°C je poté 2,39x menší.

Stejné vyhodnocení bylo provedeno i u vzorku se skelnou výztuží. Nejvyšší modul pružnosti měl podle předpokladů vzorek při 20°C. V porovnání s testem při 60°C je 1,32x vyšší. Při 100°C pak tento modul klesne 1,28x oproti testu při 60°C. Modul pružnosti v ohybu skelných vzorků u teploty 20°C je 1,70x vyšší než při 100°C. Mez pevnosti v ohybu skelných vzorků při rostoucí teplotě značně klesá. Nejvyšší hodnotu má vzorek při 20°C. Při zvýšení teploty na 60°C klesne mez pevnosti 3,42x. Při dalším zvýšení teploty na 100°C dále klesne 2,22x proti 60°C. Nejvyšší rozdíl je v porovnání meze pevnosti v ohybu mezi 20°C a 100°C. Mez pevnosti je u 100°C 7,59x nižší.

Jako poslední byla vyhodnocena Charpyho zkouška pro stejné vzorky. Zde se porovnávala maximální síla působící na zkušební těleso, rázová houževnatost a celková práce potřebná k přeražení tělesa. Rozdíl mezi uhlíkovou a skelnou výztuží nebyl u tohoto testu tak zjevný jako u předchozích případů. Při porovnání výsledků rázové houževnatosti vyšlo podle předpokladů lépe sklo, jeho rázová houževnatost je 3,45x vyšší než je tomu u karbonu. S ohledem na tvrdost a křehkost uhlíku se daly tyto výsledky předpokládat. Stejně je tomu tak u porovnání celkové práce, ta byla 3,41x vyšší pro přeražení skelného vzorku.

Testováním jsme získali důležité informace, které firmě Willer dále pomohou při výrobě a vývoji materiálů použitých u technologií pultruze. Podklady budou využity při výrobě sportovních produktů ať už pro sporty zimní či letní. Největší přínosem však zjištěné výsledky budou pro výrobu sportovních luků, které se působením slunce a dalších faktorů zahřívají na vysoké teploty a tím značně mění své mechanické vlastnosti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [2] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. [cit. 2015-1-11]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [4] DAĐOUREK, K. *Kompozity a definice* [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf)
- [5] ČVUT, *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2015-1-15]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [6] TICHÁ, P. *Vliv typu výztuže na FST vlastnosti vláknitého kompozitu*. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková PhD., 2013. Zlín: FT UTB 111s.
- [7] GDP KORAL COMPOSITES [online]. [cit. 2015-02-04]. Sport a volný čas. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/sport-a-volny-cas/p134>
- [8] STOKLASA, K.: *Makromolekulární chemie*, Skripta FT UTB, Zlín
- [9] PREFA KOMPOZITY, *Kompozitní profily* [online]. [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/kompozitni-profily-prefen>
- [10] HROMADA, P. *Mechanické vlastnosti pultruzních profilů*. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková PhD., 2013. Zlín: FT UTB 98s.
- [11] CASEMODDING, *Laminát* [online]. [cit. 2015-2-27]. Dostupné z: [http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni\\_zazrak-laminat](http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni_zazrak-laminat)
- [12] HÁBA, D. *Studium ohybové tuhosti a únosnosti HP kompozitu*. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Oldřich Šuba CSc., 2010. Zlín FT UTB 66s.
- [13] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. TU v Liberci, 2004
- [14] JIRÁSEK, J. *Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů*. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Dušan Fojtů, Ph.D., 2010. Zlín: FT UTB. 73 s.
- [15] VOJTĚCH, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.

- [16] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s.
- [17] ZCU.CZ, *Zkoušení materiálů* [online]. [cit. 2015-1-24. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf>
- [18] KRATOCHVÍL, B., Švorčík, V., Vojtěch, D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [19] ŠTĚPEK, J. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*, SNTL Praha, 1988
- [20] ČSN EN ISO 604 *Plasty - stanovení tlakových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004
- [21] ČSN EN ISO 527-5 *Plasty- Stanovení tahových vlastností- Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny*. Praha: Český normalizační institut, 2010
- [22] ČSN EN 13706-2 *Plasty – Specifikace pro tažené profily*. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [23] ISS, *Technická měření* [online]. [cit. 2015-4-24]. Dostupné z: [http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky\\_mech.html](http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_mech.html)
- [24] RYBNIKÁŘ, F.: *Makromolekulární chemie II.*, [skripta], VUT Brno, 1987
- [25] LECIÁN, V. *Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny*. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing Milan Žaludek, Pd.D. 2014 Zlín FT UTB 97s
- [26] RYBNIKÁŘ, F. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [27] HAMERNÍK, J. *Vlastnosti materiálů* [online]. [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [28] JANČÁŘ, J.: *8. mezinárodní konference strojů a zpracování plastů*. Brno 1996
- [29] PAVLICA, R.: *Vytvrzování polymerní matrice kompozitů*. Doktorská disertační práce. Zlín, UTB FT, 2003
- [30] FIBROLUX, *Pultruze* [online]. [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: <http://fibrolux.com/cs/main/knowledge/pultruze/>

- [31] VAŇKOVÁ, M. *Měření kríkových vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze*. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Slobodian Ph.D., 2011. Zlín: FT UTB 84 s.
- [32] ČSN EN ISO 178 *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1998
- [33] ČSN EN ISO 179: *Stanovení rázové houževnatosti Charpy - Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [34] GDP KORAL COMPOSITES, *Sport a volný čas* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/sport-a-volny-cas/p134>
- [35] TECHNOFIBER, *Sportovní potřeby* [online]. [cit. 2015-1-7]. Dostupné z: [http://www.technofiber.cz/sport\\_potreby.cz.html](http://www.technofiber.cz/sport_potreby.cz.html)
- [36] MPLAST, *Fiberglas* [online]. [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://www.mplast.cz/fiberglass.htm>
- [37] PŘIKRYL, *Praktikum ze struktury a vlastností polymerů* [online]. [cit. 2015-05-3]. Dostupné z: [www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc](http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc)



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$A_k$	Vrubová houževnatost
$A_n$	Rázová houževnatost
$A_0$	Původní průřez zkušebního tělesa
BMC	Bulk Molding Compaund
CF	Carbon Fiber
EP	Epoxidové pryskyřice
EP-R	Nenasycené epoxidové pryskyřice
$E_0$	Modul pružnosti v ohybu
F	Zatěžovací síla
$F_{max}$	Maximální síla na průřez
GF	Glass Fiber
H	Horní poloha kyvadla
h	Spodní poloha kyvadla
KCU	Vrubová houževnatost
KU	Nárazová práce
l	Délka
$l_0$	Původní měrná délka
$\Delta L$	Prodloužení v mm
$M_0$	Ohybový moment
P	Tlak
PA	Polyamid
PAN	Polyakrylonitrid
PDM	Post Die Manipulation Pultrusion
PP	Polypropylen
S	Směrodatná odchylka

---

Sc	Rychlost vzniku tepla v objemové jednotce
S <sub>0</sub>	Původního průřezu tělesa
Td	Teplota pultruzní hlavy
UP	Polyesterové pryskyřice
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VE	Vinilester
W	Modulu průřezu zkušební tělesa
W <sub>FM</sub>	Práce spotřebovaná při mezi pevnosti
$\alpha$	Stupně konverze
$\varepsilon_{x,y}$	Deformace ve směru x,y
$\varepsilon_{OFM}$	Poměrná deformace na mezi pevnosti
$\sigma_{Fm}$	Mez pevnosti v ohybu
$\sigma_{pd}$	Pevnost v tlaku
$\sigma_{pt}$	Pevnost v tahu
$\sigma_{x,y}$	Napětí
$\nu$	Poissonův součinitel
$\nu_d$	Poissonův součinitel v tlaku

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [2] .....	15
Obrázek 2 Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech a) jednosměrné uspořádání b) tkanina c) rohož d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna orientovaná jednosměrně f) krátká vlákna s nahodilou orientací [2] .....	16
Obrázek 3 Skelná vlákna v pultruzním profilu [9] .....	19
Obrázek 4 Výroba textilních skleněných vláken tažených z trysek [1].....	21
Obrázek 5 Uhlíková vlákna [11].....	22
Obrázek 6 Výroba uhlíkových PAN-vláken a změna struktury PAN [2].....	23
Obrázek 7 Vazby tkanin [2].....	26
Obrázek 8 Schéma znázornění rozdílů v křivkách napětí – poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna [2] .....	27
Obrázek 9 Epoxidová pryskyřice.....	29
Obrázek 10 Vinylesterová pryskyřice.....	30
Obrázek 11 Vznik trhlin v matrici v mikrostruktuře jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu [1] .....	32
Obrázek 12 T-T-T diagram [18] .....	34
Obrázek 13 Zkoušky mechanických vlastností [23].....	36
Obrázek 14 Zkušební tělesa pro zkoušku tahem [2].....	37
Obrázek 15 Zkouška ohybem – a) tříbodový ohyb b) čtyřbodový ohyb [1] .....	40
Obrázek 16 Porovnání ohybových momentů u tří a čtyř bodového ohybu [1].....	40
Obrázek 17 Charpyho kladivo [25] [26].....	42
Obrázek 18 Náskres pultruzních linek a) s otevřenou lázní b) s přímým přívodem pryskyřice [28] .....	45
Obrázek 19 Pultruzní linka [30].....	46
Obrázek 20 Rozdělení teplot hlavy $T_d$ , vytvrzované směsi $T_m$ , tlaku $p$ , viskozity $V$ po délce pultruzní hlavy [29].....	48
Obrázek 21 Schéma výrobní linky [36] .....	55
Obrázek 22 Výrobní linka (vlastní zpracování).....	56
Obrázek 23 Umístění a navádění rovingů (vlastní zpracování).....	57
Obrázek 24 Navádění rovingů do srovnávacích hřebenů (vlastní zpracování) .....	58
Obrázek 25 Vytvrzovací forma s odtahem materiálu (vlastní zpracování) .....	59

---

Obrázek 26 A) Odtahové válce linky	B) Výsledný materiál připraven k	
řezání .....		59
Obrázek 27 Tříbodový ohyb [37] .....		62
Obrázek 28 Zkušební materiál ve formě pultruzních pásů (vlastní zpracování) .....		64
Obrázek 29 Zkušební stroj ZWICK 1456 (vlastní zpracování) .....		65
Obrázek 30 Zkušební stroj CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR (vlastní zpracování) .....		66
Obrázek 31 Popis upnutí tělesa (vlastní zpracování) .....		67
Obrázek 32 Testování ohyb (vlastní zpracování) .....		68

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Složení a důležité vlastnosti neupravených vláken 1 [1].....	20
Tabulka 2 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních mat. [2] .....	25
Tabulka 3 Vlastnosti závisující na výběru pryskyřice .....	28
Tabulka 4 Rozměry testovacích vzorků.....	38
Tabulka 5 Přehled složení vzorků.....	63
Tabulka 6 Rozměry zkušebních těles .....	64
Tabulka 7 Charakteristika stroje ZWICK.....	65
Tabulka 8 Charakteristika stroje Ceast resil .....	66
Tabulka 9 Statistika pro uhlík 20 °C.....	69
Tabulka 10 Statistika pro sklo 20 °C .....	70
Tabulka 11 Statistika pro uhlík 60 °C.....	71
Tabulka 12 Statistika pro sklo 60 °C .....	72
Tabulka 13 Statistika pro uhlík 100 °C.....	73
Tabulka 14 Statistika pro sklo 100 °C .....	74
Tabulka 15 Statistika pro uhlík- Charpy.....	75
Tabulka 16 Statistika pro sklo- Charpy .....	76
Tabulka 17 Hodnoty pro uhlík při teplotě 20 °C .....	99
Tabulka 18 Hodnoty pro sklo při teplotě 20 °C.....	99
Tabulka 19 Hodnoty pro uhlík při teplotě 60 °C .....	100
Tabulka 20 Hodnoty pro sklo při teplotě 60 °C.....	100
Tabulka 21 Hodnoty pro uhlík při teplotě 100 °C .....	101
Tabulka 22 Hodnoty pro sklo při teplotě 100 °C.....	101
Tabulka 23 Hodnoty pro uhlík při teplotě 20 °C .....	102
Tabulka 24 Hodnoty pro sklo při teplotě 20 °C.....	102

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 20 °C.....	69
Graf 2 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 20 °C .....	70
Graf 3 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 60 °C.....	71
Graf 4 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 60 °C .....	72
Graf 5 Grafické znázornění průběhu zkoušky uhlík 100 °C.....	73
Graf 6 Grafické znázornění průběhu zkoušky sklo 100 °C .....	74
Graf 7 Grafické znázornění nejčastějšího průběhu zkoušky pro uhlík.....	75
Graf 8 Grafické znázornění pro všechny uhlíkové vzorky .....	75
Graf 9 Grafické znázornění nejčastějšího průběhu zkoušky pro sklo .....	76
Graf 10 Grafické znázornění pro všechny karbonové vzorky .....	76
Graf 11 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 20°C.....	77
Graf 12 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 20°C.....	77
Graf 13 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 60°C.....	78
Graf 14 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 60°C.....	78
Graf 15 Porovnání modulu pružnosti uhlíku a skla při teplotě 100°C.....	79
Graf 16 Porovnání meze pevnosti uhlíku a skla při teplotě 100°C.....	79
Graf 17 Porovnání modulu pružnosti uhlíkových těles při různých teplotách .....	80
Graf 18 Porovnání meze pevnosti uhlíkových těles při různých teplotách .....	80
Graf 19 Porovnání modulu pružnosti skleněných těles při různých teplotách .....	81
Graf 20 Porovnání meze pevnosti skleněných těles při různých teplotách .....	81
Graf 21 Porovnání max. síly působící na vzorek .....	82
Graf 22 Porovnání rázové houževnatosti.....	82
Graf 23 Porovnání celkové práce potřebné k přeražení tělesa.....	83

## PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY VZORKŮ

Tabulka 17 Hodnoty pro uhlík při teplotě 20 °C

Uhlík 20°C	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\epsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
1	148000	2250	1,5	1500,1
2	152000	2230	1,5	1497,1
3	148000	2200	1,5	1477,45
4	151000	2370	1,6	1704,24
5	146000	2130	1,5	1323,05
6	146000	2280	1,6	1536,17
7	148000	2260	1,5	1585,59
8	146000	2290	1,6	1525,42
9	153000	2210	1,4	1358,91
10	147000	2080	1,4	1274,63
11	147000	2070	1,4	1333,42
12	151000	2380	1,6	1723,87

Tabulka 18 Hodnoty pro sklo při teplotě 20 °C

Sklo 20°C	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\epsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
1	50500	1590	3,9	3486,26
2	49100	1600	4	3499,16
3	48100	1600	4	3618,61
4	45500	1540	4,1	3541,72
5	46400	1520	4	3283,97
6	44800	1510	4,1	3604,89
7	49000	1570	3,9	3778,83
8	47400	1520	3,9	3420,59
9	47200	1510	3,9	3577,1
10	48800	1550	3,9	3459,8
11	46600	1530	3,9	3631,16
12	46300	1510	4,1	3508,33

Tabulka 19 Hodnoty pro uhlík při teplotě 60 °C

<b>Uhlík 60°C</b>	<b><math>E_o</math>[MPa]</b>	<b><math>\sigma_{Fm}</math>[MPa]</b>	<b><math>\varepsilon_{OFM}</math>[%]</b>	<b><math>W_{FM}</math>[Nmm]</b>
1	118000	1310	1,1	676,1
2	121000	1370	1,1	742,42
3	115000	1380	1,1	715,98
4	117000	1220	1,2	567,72
5	117000	1280	1	687,86
6	121000	1270	1,1	619,79
7	120000	1330	1,1	694,28
8	119000	1230	1,1	645,9
9	118000	1130	1	519,83
10	119000	1230	1	613,04
11	120000	1180	1	592,75
12	120000	1180	1	592,75

Tabulka 20 Hodnoty pro sklo při teplotě 60 °C

<b>Sklo 60°C</b>	<b><math>E_o</math>[MPa]</b>	<b><math>\sigma_{Fm}</math>[MPa]</b>	<b><math>\varepsilon_{OFM}</math>[%]</b>	<b><math>W_{FM}</math>[Nmm]</b>
1	30400	217	0,7	76,26
2	32200	385	1	196,77
3	32600	457	1,2	264,11
4	31200	320	0,9	140,09
5	28800	177	0,5	41,32
6	38500	424	1,1	250,26
7	42000	707	1,8	673,29
8	37200	424	1,3	298,73
9	40700	686	1,7	578,78
10	40200	484	1,3	336,91
11	40500	700	1,8	645,13
12	40500	700	1,8	645,13



Tabulka 21 Hodnoty pro uhlík při teplotě 100 °C

Uhlík 100°C	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
1	102000	1000	1	442,22
2	96900	985	1,1	487,1
3	101000	984	1	484,47
4	103000	1020	1	534,2
5	101000	931	1	416,04
6	98800	905	0,9	404,79
7	101000	947	1	433,69
8	86700	814	1	382,36
9	95900	928	1	455,85
10	92500	790	0,9	361,76
11	98100	970	1	516,36
12	98000	882	0,9	423,99

Tabulka 22 Hodnoty pro sklo při teplotě 100 °C

Sklo 100°C	$E_o$ [MPa]	$\sigma_{Fm}$ [MPa]	$\varepsilon_{OFM}$ [%]	$W_{FM}$ [Nmm]
1	25600	175	0,6	53,39
2	25100	176	0,6	57,86
3	30000	232	0,7	77,03
4	26800	227	0,8	85,9
5	28700	200	0,7	61,83
6	27300	187	0,6	58,97
7	28000	197	0,7	67,66
8	26800	188	0,6	62,9
9	30000	211	0,6	66,64
10	30200	252	0,8	98,31
11	29500	215	0,7	77,41
12	27300	188	0,6	61,27

Tabulka 23 Hodnoty pro uhlík při teplotě 20 °C

<b>Uhlík Charpy 20°C</b>	<b>F<sub>M</sub> [N]</b>	<b>A<sub>M</sub> [Kj/m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>B</sub> [Kj/m<sup>2</sup>]</b>
1	1483,11	118,34	120,58
2	1071,73	82,07	89,07
3	1265,24	89,39	106,58
4	1060,91	62,93	105,31
5	1125,86	78,26	95,61
6	1276,07	110,18	113,94
7	1285,54	96,64	110,15
8	994,6	90,95	92,53
9	1060,91	90,85	93,41
10	1014,96	77,81	81,55
11	1351,85	124,71	127,64
12	1268,84	106,64	112,14

Tabulka 24 Hodnoty pro sklo při teplotě 20 °C

<b>Sklo Charpy 20°C</b>	<b>F<sub>M</sub> [N]</b>	<b>A<sub>M</sub> [Kj/m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>B</sub> [Kj/m<sup>2</sup>]</b>
1	1243,59	322,18	409,06
2	1085,27	289,07	410,53
3	1325,21	376,45	401,43
4	1041,96	333,45	406,9
5	1353,55	340,55	345,31
6	1449,28	150,31	249,72
7	958,07	405,25	410,89
8	699,6	306,11	378,94
9	751,03	296,87	324,23
10	997,92	312,12	3655,48
11	1031,67	345,76	412,17
12	1123,54	412,34	489,19