

# Zkoumání zvýšení odolnosti 2D kompozitu vůči rázovému namáhání

Bc. Klapil Lukáš

---

Diplomová práce  
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Klapil**  
Osobní číslo: **T21799**  
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: **Zkoumání zvýšení odolnosti 2D kompozitu vůči rázovému namáhání**

## Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku vlivu výztuže na mechanické vlastnosti.
2. Přehled způsobu zvyšování rázové odolnosti kompozitu.
3. Zrealizujte návrh kompozitních systému s použitím 2D tkaných výztuží, 3D výztuží a NCF.
4. Zrealizujte experimentální výrobu zkušebních desek dle zvolených výrobních technologií.
5. Experimentálně vyhodnotte mechanické vlastnosti dle zvolených metodik.
6. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

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

**Seznam doporučené literatury:**

BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.

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

ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.

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

LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.

SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

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

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 18. února 2022

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu výztuže kompozitu na odolnost proti rázovému namáhání. V teoretické části jsou popsány jednotlivé druhy výztuží a jejich možné uspořádání. V teoretické části jsou také popsány druhy matric a technologie výroby kompozitů. Dále jsou zde popsány základní druhy statických a dynamických zkoušek.

Praktická část popisuje výrobu laminátových vzorků ze tří druhů skelných výztuží a jejich následné zkoušení rázové houževnatosti na Charpyho kladivu. V praktické části se dále nachází výsledky měření.

Klíčová slova: výztuž, kompozit, rázové namáhání, Charpyho kladivo

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the study of the influence of composite reinforcement on impact resistance. The theoretical part describes the various types of reinforcement and their possible arrangement. The theoretical part also describes the types of matrices and technologies for the production of composites. The basic types of static and dynamic tests are also described here.

The practical part describes the production of laminate samples of three types of glass reinforcements and their subsequent impact testing on Charpy hammer. The practical part also contains the measurement results.

Keywords: reinforcement, composite, impact stress, Charpy's hammer

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce doc. Ing Soně Rusnákové, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi poskytla při vypracovávání mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D. za výpomoc při měření pro praktickou část diplomové práce. Na konec bych rád poděkoval přítelkyni a rodině za psychickou podporu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>11</b>
1.1 VÝZTUŽE.....	11
1.2 PRODUKTY Z VLÁKEN .....	13
1.2.1 Roving .....	13
1.2.2 Rohože.....	13
1.3 TKANINY .....	14
1.3.1 Plátnová vazba .....	14
1.3.2 Keprová vazba.....	15
1.3.3 Vazba panama .....	15
1.3.4 Atlasová vazba .....	16
1.3.5 Trojrozměrné tkaniny.....	16
1.4 MATERIÁLY VLÁKEN.....	17
1.4.1 Skelná vlákna .....	17
1.4.2 Uhlíková vlákna .....	18
1.4.3 Polymerní vlákna .....	19
1.4.4 Bórová vlákna .....	20
1.4.5 Keramická vlákna.....	20
1.4.7 Kovová vlákna .....	20
1.4.8 Čedičová vlákna .....	20
1.5 MATRICE .....	21
1.5.1 Polymerní .....	21
1.5.2 Kovová .....	22
1.5.3 Uhlíková.....	22
1.5.4 Keramická .....	22
1.5.5 Prepregy .....	23
1.6 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	24
1.6.1 Ruční kladení .....	24
1.6.2 Stříkání .....	25
1.6.3 Odstředivé lití.....	25
1.6.4 Vysokotlaké vstřikování.....	25
1.6.5 Lisování.....	26
1.6.6 Vakuové prosycování.....	26
1.6.7 Tažení.....	27
1.6.8 Navíjení .....	27
<b>2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....</b>	<b>28</b>
2.1 STATICKÉ ZKOUŠKY .....	28
2.1.1 Zkouška tahem .....	28
2.1.2 Zkouška tlakem .....	31
2.1.3 Zkouška ohybem .....	32

2.2	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY .....	33
2.2.1	Zkouška rázem v ohybu .....	33
2.2.2	Rázová zkouška pádem .....	37
2.2.3	Rázová odolnost .....	38
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>PŘÍPRAVA MATERIÁLU A VÝROBA VZORKŮ .....</b>	<b>44</b>
4.1	POPIS MATERIÁLU .....	44
4.2	VÝROBA KOMPOZITNÍCH DESEK .....	46
4.2.1	Forma .....	46
4.2.2	Výztuže .....	46
4.2.3	Matrice .....	47
4.2.4	Laminátování.....	47
4.2.5	Odformování .....	48
4.2.6	Vyřezání vzorků .....	48
<b>5</b>	<b>RÁZOVÁ ZKOUŠKA.....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO JEDNOTLIVÉ VÝZTUŽE .....</b>	<b>50</b>
6.1	VZORKY Z ROHOŽE.....	50
6.2	VZORKY Z TRIAXIÁLNÍ TKANINY .....	53
6.3	VZORKY Z TKANINY .....	56
6.4	POROVNÁNÍ SKUPIN VZORKŮ.....	59
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>60</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>62</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>65</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>66</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>68</b>



## ÚVOD

Kompozity jsou v dnešní době čím dál více používanější materiály. Díky svým dobrým mechanickým vlastnostem a zároveň nízké váze se využívají se v letectví, automobilismu, elektronice, stavařství a využívají se i pro výrobu sportovních potřeb. Kompozity používané kryty např. kabin na letadlech, lodích a aut mají velkou nevýhodu. Tou nevýhodou je malá odolnost kompozitu proti rázovému namáhání. Tento problém značný jelikož při rázovém namáhání může vzniknout vnitřní porušení, které nelze vidět, ale významně snižuje pevnost kompozitu. Výztuže mají významný vliv na rázovou odolnost kompozitu. Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání vlivu výztuže kompozitu na odolnost proti rázovému namáhání.

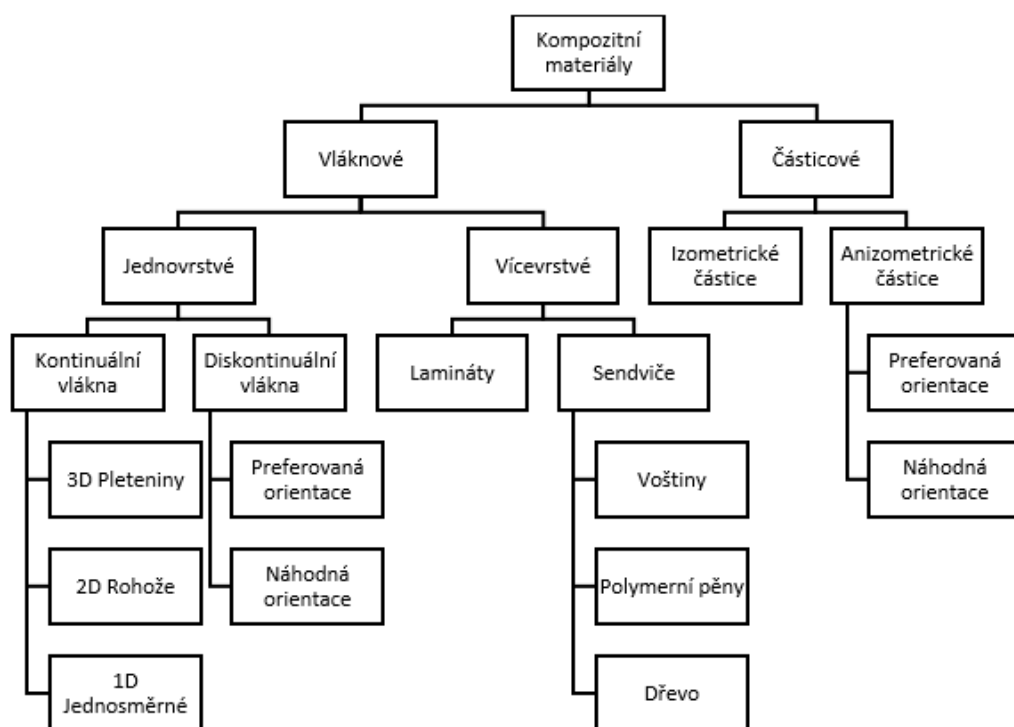
V teoretické části diplomové práce jsou popsány výztuže kompozitních materiálů. Jsou zde popsány produkty vyrobené z vláken a druhy tkanin. V další kapitole jsou popsány vlákna z různých materiálů, jako jsou sklo, uhlík, aramid atd. Dále jsou zde popsány matrice, jejich funkce a možné varianty materiálu, ze kterých jsou matrice vytvořeny. Další část teoretické části se zabývá technologiemi pro výrobu kompozitů a v poslední kapitole jsou popsány zkoušky statické i dynamické, které se používají pro plasty i kompozity.

V praktické části je popsán postup výroby třech laminátových desek. Jako materiál výztuží bylo zvoleno sklo, ale v každé desce byl použit jiný druh skelných vláken. Byla použita skelná rohož, triaxiální tkanina a obyčejná tkanina s plátňovou vazbou. Pro každou desku byla použita stejná matrice. Z vyrobených desek byly vyřezány vzorky 75x15 mm pomocí vodního paprsku a ty byly následně zkoušeny na rázovou houževnatost podle normy ČSN EN ISO 179-1. V praktické části se nachází i zpracované výsledky měření.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou materiály, které jsou složeny ze dvou a více odlišných materiálů (fází). Vzniklý kompozit musí mít velmi rozdílné vlastnosti než samostatné fáze. Fáze se dělí na dvě skupiny a to výztuže a matrice. Výztuže jsou zpravidla tužší, tvrdší a pevně nespojitá složka. Matrice funguje jako pojivo pro výztuže. Hlavní výhody kompozitů jsou nízká hmotnost, která je spojena s velkou pevností a tuhostí, odolnost proti korozi a chemikáliím. Kompozity se používají v letectví, automobilismu, kosmonautice, stavebnictví. [5,6]



Obr. 1 Rozdělení kompozitních materiálů [6]

### 1.1 Výztuže

Výztuže se používají pro zajištění mechanických vlastností, jako jsou pevnost a tuhost. Některé výztuže lze využít i pro jejich elektrické vlastnosti jako je vodivost. Výztuže lze rozdělit do dvou skupin a to časticové a vláknové. [4]

Časticové výztuže mají malé rozměry a jsou nevláknité. Jejich rozměr se uvádí v průměru. Podle tvaru lze časticové výztuže rozdělit na kulové, destičkové, tyčinkové a nepravidelné.

Směr částicových výztuží nemá vliv na vlastnosti výsledného výrobku. Nejčastěji se používají keramické, kovové a anorganické částice. Využívají se pro výrobu slinutých karbidů, brusiva a materiálů pro elektrické kontakty. [4,7]

Vláknové výztuže jsou charakteristické výrazně větším rozměrem v jednom směru než ve zbylých dvou. Materiál vláken, jejich množství a orientace rozhoduje o výsledných vlastnostech. Pevnost ve směru vláken je podstatně vyšší než ve zbylých směrech. Vláknové výztuže mohou být dlouhé nebo krátké a mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo mohou být neuspořádaná (chaoticky). Vlákná se podle délky rozdělují na:

- Krátkovláknové – poměr mezi délkou a průměrem je menší než 1000
- Dlouhovláknové – poměr mezi délkou a průměrem je větší než 1000

Vlákná mají většinou kruhový průřez a jejich průměr může být:

Do 100 nanometrů – nanovlákná

0,1 až 1 mikrometr – mikrovlákna

1 až 10 mikrometrů – střední vlákna

Nad 10 mikrometrů – hrubá vlákna

Vlákná mohou mít různé délky. Mikrokompozitní vlákna, která mají délku řádově  $10^0$ , až  $10^2$  mikrometrů se nejvíce používají ve strojírenství. Makrokompozity se využívají ve stavebnictví např. beton s ocelovými pruty. V praxi se využívají kombinace více vláken jako například uhlík – kevlar. Tímto způsobem lze využít vlastnosti obou vláken. [3,4,7]



Obr. 2 Druhy výztuží [10]

## 1.2 Produkty z vláken

### 1.2.1 Roving

Jedná se o druzené prameny skelných vláken, které jsou navinuté bez zákrutu. Využívá se pro výrobu profilů tažením nebo navíjením. Některé rovingy se používají na výrobu prepregů, desek, trub, rovingových tkanin a rohoží. Roving se nejčastěji dodává navinutý na cívce. [20]



*Obr. 3 Roving [20]*

### 1.2.2 Rohože

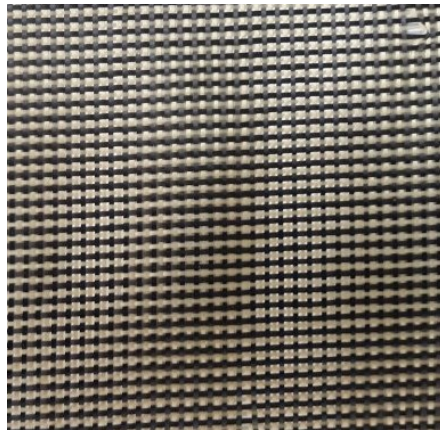
Jsou to netkané plošné výrobky ze sekaných vláken, které jsou uloženy do vrstev. Vrstvy spolu drží díky emulznímu pojivu a dále se dají navíjet do rolí. Používají se pro nepohledové díly. [20]



*Obr. 4 Skelná rohož [11]*

### 1.3 Tkaniny

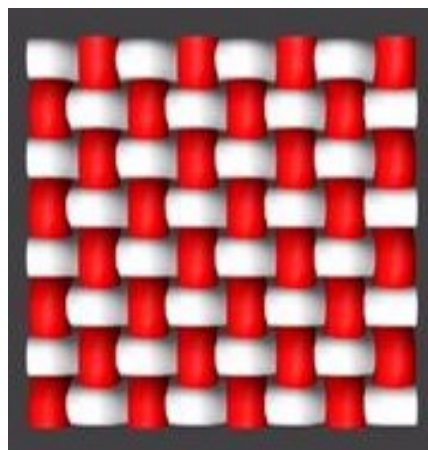
Tkaniny jsou nejčastěji využívané 2D výztuže pro kompozitní materiály. Tkaninu tvoří v jedné plošné rovině osnova a útek. Typy vazeb je možné ve více vrstvách kombinovat. Tkaniny se mohou skládat i z více druhů materiálů jako třeba aramidová a uhlíková vlákna. Tyto tkaniny se nazývají hybridní. [14]



*Obr. 5 Hybridní tkanina [20]*

#### 1.3.1 Plátňová vazba

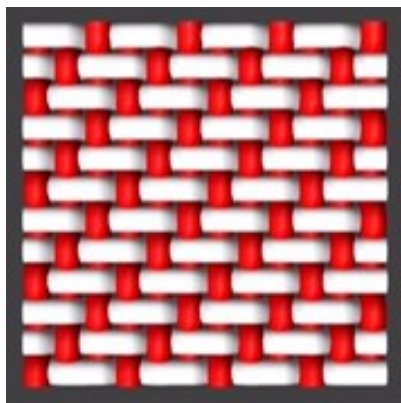
Plátňová vazba je základní jednoduchá vazba. Plátňová vazba má jednoduché zpracování, dobrou rozměrovou stálost a malý ořez při řezání. Výsledný vzhled tkaniny lze přirovnat k šachovnici. Jedná se o nejpevnější vazbu, ale zároveň o nejméně tvárnou vazbu. [14]



*Obr. 6 Plátňová vazba [14]*

### 1.3.2 Keprová vazba

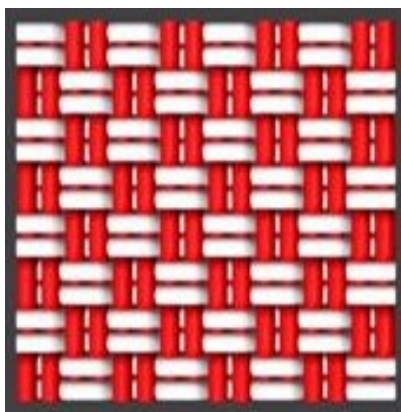
Útková nit leží nad dvěma osnovními nitěmi a pod jednou sousední osnovní nití. Další útkové nitě jsou vždy posunuty o jednu nit do prava nebo do leva. Z toho vznikly názvy pravý a levý kepr. Tato vazba vytváří vzhledový efekt šikmých řádků. Výhoda keprové vazby je vyšší pevnost a tuhost materiálu. Tato vazba je vhodná pro tvarové prvky, protože vzniklá tkanina je ohebnější než plátňová vazba. [14]



*Obr. 7 Keprová vazba [14]*

### 1.3.3 Vazba panama

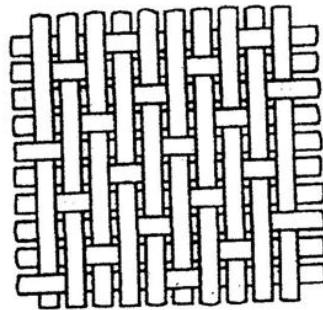
Tato vazba je odvozena z plátňové vazby. Výhodou této vazby je, že má menší počet přechodů než plátňová vazba a díky tomu je umožněn vzájemný posuv útkových a osnovních nití vůči sobě. Vazba je tvárnější a lépe se přizpůsobuje tvarovým formám. [14]



*Obr. 8 Panama vazba [14]*

### 1.3.4 Atlasová vazba

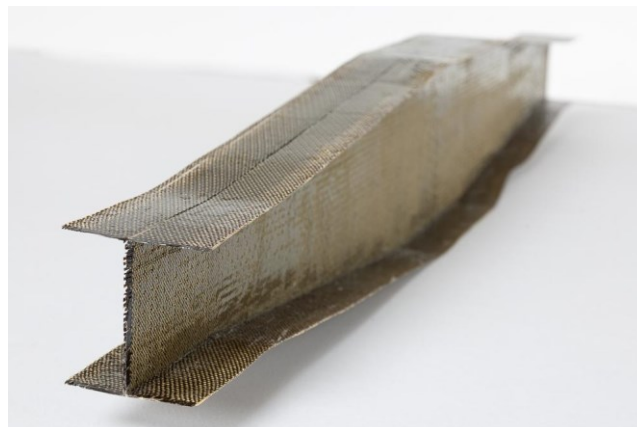
Tato vazba se také nazývá saténová. Tato vazba vytvoří hladký a lesklý povrch. Je volná pružná a poddajná. Zároveň je nejméně pevnou vazbou. [15]



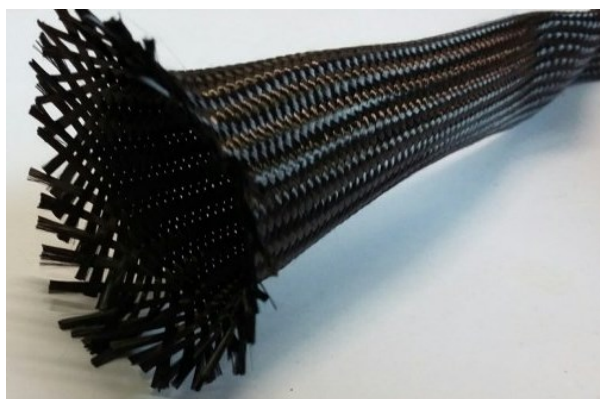
*Obr. 9 Atlasová vazba [15]*

### 1.3.5 Trojrozměrné tkaniny

Tkaniny se dají předem vyplést do určitých 3D tvarů. Nejjednodušší jsou punčochy. Tyto trojrozměrné tkaniny se používají v případech, kdy 2D tkaniny neudrží požadovaný tvar.



*Obr. 10 Příklad použití 3D tkaniny [21]*



*Obr. 11 punčocha z uhlíkových vláken [20]*



## 1.4 Materiály vláken

### 1.4.1 Skelná vlákna

Skleněná vlákna jsou nejpoužívanější a nejrozšířenější typ výztuže používaný v kompozitních materiálech. Výhody těchto vláken jsou nízká cena, dostupnost a to, že mají vyšší houževnatost než uhlíková vlákna. Jejich hustota je  $2490 - 2540 \text{ kg/m}^3$ . Průměr skleněných vláken je v rozmezí  $3,5 - 20 \mu\text{m}$ . Tohoto průměru se dosahuje dloužením proudu skla, který vytéká z platinových trysek. Tyto trysky mají průměr 1-2mm. Vytažená vlákna se sdružují do pramence, protože jsou vlákna velmi abrazivní a lámavá musí se vlákna za tepla potáhnout ochranným povlakem. [3,5]



*Obr. 12 Tkanina ze skelných vláken [11]*

### 1.4.2 Uhlíková vlákna

Hustota uhlíkových vláken je  $1800 - 2000 \text{ kg/m}^3$  a mezi jejich výhody patří vysoká pevnost, modul pružnosti, tepelná odolnost, vysoká únavová pevnost a elektrická vodivost. Mezi nevýhody lze zařadit vysokou cenu a nízkou odolnost proti nárazu, která je způsobena elektromechanickou korozí (vzniká při kontaktu s méně ušlechtilými kovy). Uhlíková vlákna se používají v lodním průmyslu, automobilovém průmyslu, letectví, kosmickém výzkumu a také se využívají pro výrobu sportovních potřeb. Vlastnosti daného výrobku jsou závislé na způsobu výroby. [3,4]



*Obr. 13 Tkanina z uhlíkových vláken [11]*

### 1.4.3 Polymerní vlákna

Největší výhodou polymerních vláken je nízká hustota. Dalšími výhodami jako je tuhost a pevnost je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna. Tyto vlákna nejsou křehká při zatížení v kolmém směru, dojde pouze k vratným deformacím. Mezi nejznámější polymerní vlákna patří vlákna z polyamidů – aramidů. [4]

#### 1.4.3.1 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou jednou z variant polymerních vláken. Aramid je také znám pod obchodním názvem Kevlar. Hustota kevlaru je  $1440 \text{ kg/m}^3$ . Teplotní odolnost je asi  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  a má výbornou odolnost proti rozpouštědlům, slané vodě nebo kapalným palivům. Mezi další výhody patří nízká hmotnost, schopnost absorbovat energii, odolnost proti plamenu, samozhášivost. Využívá se na neprůstřelné vesty, ochranné kalhoty, sportovní potřeby a ochranné rukavice. [4,5]



Obr. 14 Tkanina z aramidových vláken [11]

#### 1.4.4 Bórová vlákna

Průměr bórových vláken je oproti jiným vláknům větší (až 102  $\mu\text{m}$ ). Bórová vlákna mají větší pevnost v tlaku než v tahu a mají vyšší tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Nevýhodou je vyšší cena. Využívají se na zpevnění konců dílů, které jsou namáhány na tlak. [4]

#### 1.4.5 Keramická vlákna

Výhoda keramických vláken spočívá v dobré tepelné a chemické odolnosti. Keramické vlákna se kombinují s kovovými, keramickými nebo uhlíkovými matricemi. Používají se letecký průmysl nebo pro dílce, které pracují za vysokých teplot. Vlákna oxidu hlinitého se díky své elektrické nevodivosti používají pro kryty radarů. [4]

#### 1.4.6 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou levnější alternativou skleněných vláken. Získávají se z obnovitelných zdrojů, patří mezi ně např. sisán, konopí, juta, bavlna, len. Využívají se pro výrobu méně namáhaných dílů v interiérech dopravních prostředků. Výhodou je menší množství odpadu, který je zároveň možné recyklovat. [4]

#### 1.4.7 Kovová vlákna

Většinou se jedná korozivzdorné a žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Jejich využití spočívá ve využití vodivosti. Dále se dají využít jako filtrační média pro agresivní látky nebo pro tepelné štíty. [4]

#### 1.4.8 Čedičová vlákna

Mají podobné vlastnosti jako vlákna skleněná. Tyto vlákna disponují vysokou pevností a nízkou tažností. Mezi další výhody lze zařadit nehořlavost, nenasákavost, nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, tepelnou odolnost, cena. Avšak mezi jejich nevýhody patří křehkost. Způsob výroby čedičových vláken je podobný jako výroba skleněných vláken. Využití čedičových vláken je ve stavebnictví v podobě zvukově, tepelných izolačních deskách, příčkách, stropích, podlah. Dále se využívají jako brzdové destičky nebo brousící kotouče. [4]

## 1.5 Matrice

Matrice je materiál, který se prosycuje vlákny tak aby po zpracování vznikl stálý výrobek. Hlavní požadavek matrice je spojovat výztuže tak aby drželi tvarovou stálost výrobku. Další úkoly matrice jsou držet výztuže pohromadě, chránit výztuže před chemickými a mechanickými vlivy okolí. Dále matrice přenáší napětí vlákna na vlákno. Matrice se většinou používá v kápaném stavu a po použití ztuhne. [4,5]

### 1.5.1 Polymerní

Polymerní matrice patří mezi nejpoužívanější matrice. Tyto matrice jsou dost slabé a mají nízkou tepelnou a elektrickou vodivost. Polymerní matrice lze rozdělit na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Nejvíce používané polymerní matrice jsou reaktoplasty. Termoplasty jsou oproti reaktoplastům levnější na výrobu, mají nízký obsah vlhkosti, zdravotně méně závadné, dají se po zahřátí dodatečně tvarovat. Polymerní matrice jsou oproti ostatním matricím jednodušší na výrobu a to díky teplotě zpracování. U reaktoplastů a elastomerů se teplota pohybuje okolo 200°C. Termoplasty mají teplotu zpracování 300 - 400°C. [4,5]

Mezi reaktoplasty patří epoxidy, nenasycené polyestery nebo formaldehyd a jsou dodávány ve formě viskózních tekutin, které jsou vytvrzeny pomocí katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení může probíhat za pokojové nebo zvýšené teploty. Reaktoplasty při zahřátí zůstávají v tuhé fázi a toho lze využít u kompozitů, které jsou teplotně namáhány, ale tato vlastnost je nevýhodná třeba pro recyklaci. Právě díky špatné recyklovatelnosti jsou v současné době reaktoplasty nahrazovány termoplasty. [4,5]

#### 1.5.1.1 Epoxidové pryskyřice

Tyto pryskyřice jsou bezbarvé hmoty a mají konzistenci kapalin a dají se neomezeně skladovat. Pod pojmem epoxidové pryskyřice jsou myšleny pryskyřičné látky, jejichž řetězce obsahují zpravidla více než jednu epoxidovou skupinu. Epoxidové pryskyřice se také vyznačují tím, že zesilují s velkým počtem sloučenin, mají velkou adhezi k většině materiálů, mají chemickou odolnost a malé smrštění při zpracování. Díky těmto vlastnostem se epoxidové pryskyřice velmi rychle rozrostly. [4]

### 1.5.2 Kovová

Kovové matrice se používají pro snížení tepelné roztažnosti a zvyšují pevnost kompozitu. Kombinace uhlíková vlákna s kovovou maticí se využívá v případě, kdy je potřeba zvýšit tepelnou vodivost. Tato kombinace je vhodná pro chladiče. Dále má tato kombinace v porovnání s kovem samotným vyšší poměr pevnosti k hustotě, větší odolnost proti otěru a oděru a nižší roztažnost v závislosti na teplotě. Mezi nevýhody lze zařadit výrobní náklady a vyšší nároky na obsluhu výroby. Nejčastěji se používají matrice z mědi, hořčíku, niklu, hliníku nebo slitin olova. [4,5]

### 1.5.3 Uhlíková

Uhlíková matrice se používá s uhlíkovými vlákny. Vzniklý kompozit má nízkou hmotnost a velmi dobrou odolnost proti teplotám. Nevýhodou je křehkost, která je podobná jako u keramických maticí. Pokud je uhlíková matrice zahřívána nad 500°C je potřeba použít antioxidační vrstvu (např. karbid křemíku). Pokud antioxidační vrstva není použita tak se materiál začne odpařovat. S antioxidační vrstvou se kompozit dá použít pro izolaci vesmírných lodí nebo části brzd letadel. Mezi další výhody patří vysoká odolnost proti cyklickému namáhání, nízká hustota, dobrá odolnost proti teplotním šokům, chemická odolnost, nízký koeficient teplotní roztažnosti, odolnost proti ionizujícímu záření. [4,5]

### 1.5.4 Keramická

Způsoby využití keramické matrice jsou omezeny její křehkostí a malou lomovou houževnatostí. Výztuže jsou využity ke zvýšení tuhosti a pevnosti. V případě použití uhlíkových vláken je potřeba tyto vlákna opatřit vrstvou karbidu křemíku, protože proces výroby keramických matic probíhá za vysokých teplot. Mezi výhody patří nízká hustota, dobrá pevnost v tahu i při vyšších teplotách, dobrá tepelná a chemická odolnost. Velkou nevýhodou je špatné přenášení zatížení do vláken. [4,5]

### 1.5.5 Prepregy

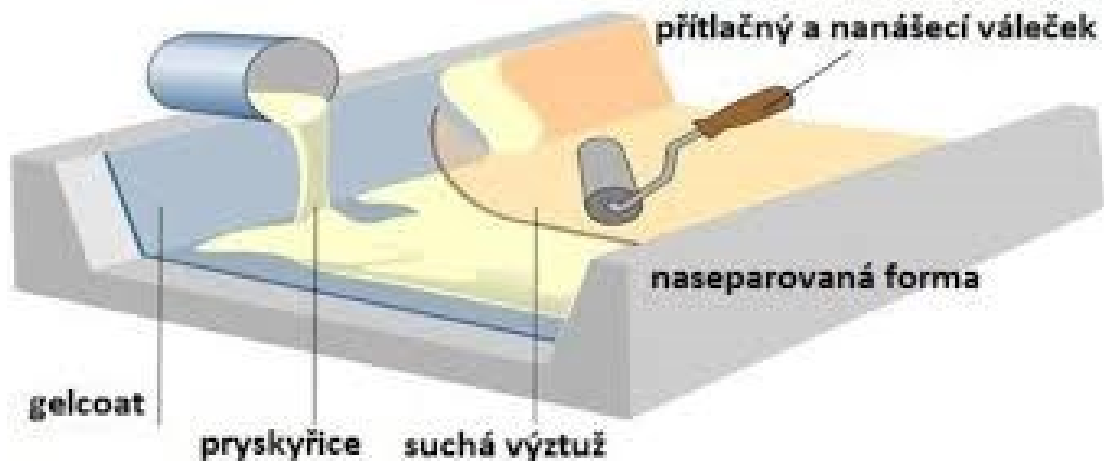
Prepreg je předpřipravená výztuž, která je impregnovaná matricí v gelovitém stavu. K vytvrzování dochází za zvýšené teploty. Zvýšenou teplotou vznikne chemická reakce jako např. zesíťování. Výrobní proces spočívá v naskládání prepregu do formy s vlastním vyhříváním. Pozice prepregu ve formě jsou předem definované a je potřeba tyto pozice striktně dodržovat. Nejlepších výsledků je dosahováno v autoklávovou technologií. Nevýhodou prepregu je nutnost specializované obsluhy. V případě pohledových dílů se malé nedokonalosti povrchu nedají opravit a vznikají zmetky s velkými náklady. [4]

## 1.6 Technologie výroby

Aby kompozit mohl mít správné vlastnosti je potřeba při výrobě vlákna rovnoměrně rozložit. Vlákná mohou být orientována jednostranně nebo se jednotlivé vrstvy mohou skládat jedna na druhou, ale každá vrstva je trochu pootočená. Směr natočení vláken a jejich spojení s matricí má vliv na kvalitu a výsledné vlastnosti kompozitu. [7]

### 1.6.1 Ruční kladení

Jedná se o nejrozšířenější, nejjednodušší a nejstarší technologii výroby kompozitů. Do formy se nejdřív nanese povrchová vrstva (gelcoat) a nanáší stříkáním nebo ručně. Gelcoat chrání povrch dílce před vnějšími vlivy. Jakmile gelcoat částečně vytvrdne tak se do formy postupně kladou vrstvy výztuží, které se prosycují matricí. Mezi hlavní vady této technologie patří nízké náklady a nízká celková náročnost výroby. S touto technologií lze vyrábět velkorozměrové dílce tvarově složité i jednoduché. [3]

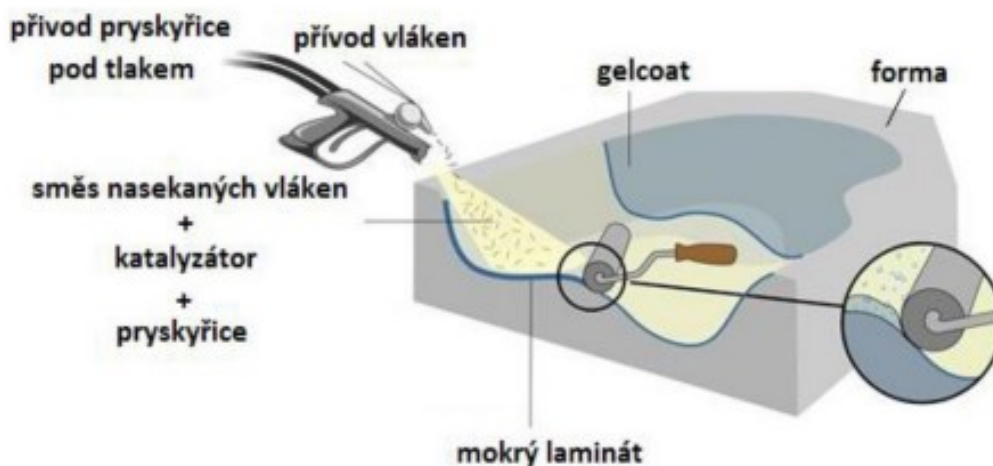


Obr. 15 Ruční kladení [8]



### 1.6.2 Stříkání

Stříkání je efektivní a rychlý způsob výroby, který je nejčastěji využíván pro sériovou výrobu. Při této metodě se pomocí pneumatické pistole nanáší sekané výztuže a iniciovaná pryskyřice. Mezi výhody se řadí rychlé nanášení velkého množství materiálu do formy. Mezi nevýhody patří zvýšené množství odpadu. [8]



Obr. 16 Stříkání [8]

### 1.6.3 Odstředivé lití

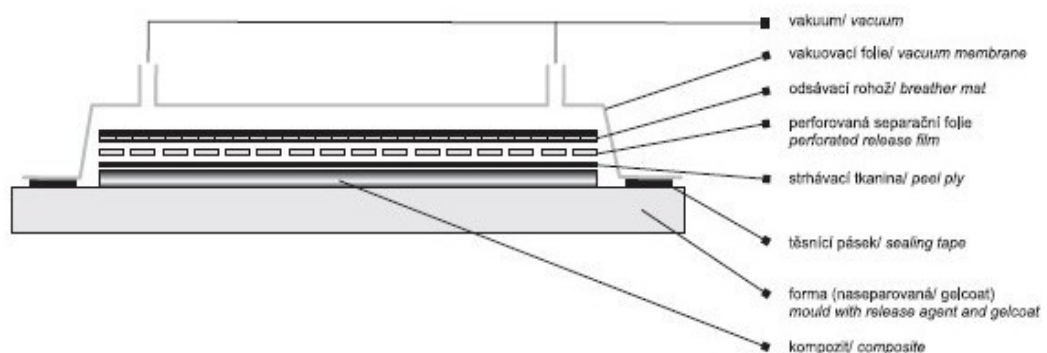
Touto technologií se vyrábí dutá tělesa rotačního tvaru např. silnostěnné potrubí pro zásyp. Stříkací pistole se pohybuje uvnitř duté formy a nanáší směs vláken a pryskyřice. [3]

### 1.6.4 Vysokotlaké vstřikování

Při této metodě vznikají vysoké vnitřní tlaky, proto jsou potřeba robustní kovové nebo polymerbetonové formy. Jakmile je výztuž vložena ve formě tak se forma uzavře. Pomocí injektážní pistole je přivedeno pojivo z vysokotlaké pumpy. Pomocí kontrolních otvorů lze zjistit, zda je výztuž zcela prosycena. Tato metoda je vhodná pro sériovou výrobu a to kvůli krátkým výrobním cyklům. Nevýhoda je vysoká pořizovací cena vstřikovacího zařízení. [3]

### 1.6.5 Lisování

Tuto technologii lze rozdělit na lisování pomocí vakua, za studena, za použití tepla a tlaku a lisování v autoklávu. Lisování za studena se používá za nízkého tlaku a normální teploty v nevyhříváných dvoudílných formách. Při lisování za studena vzniká výlisek, který je oboustranně hladký, má vysoký obsah výztuže a dobré mechanické vlastnosti. Při této technologii je nutné investovat do vakuové pumpy. Lisování v autoklávu je jedna z nejnáročnějších, nejsložitějších a nejnákladnějších technologií. Využívá se pro letecký, automobilový a kosmický průmysl. Při technologii lisování za tepla a tlaku se používají dvou a vícedílné formy s leštěnými povrchy. Jedná se o nejproduktivnější metodu pro sériovou výrobu malých a středně velkých dílců. [3]



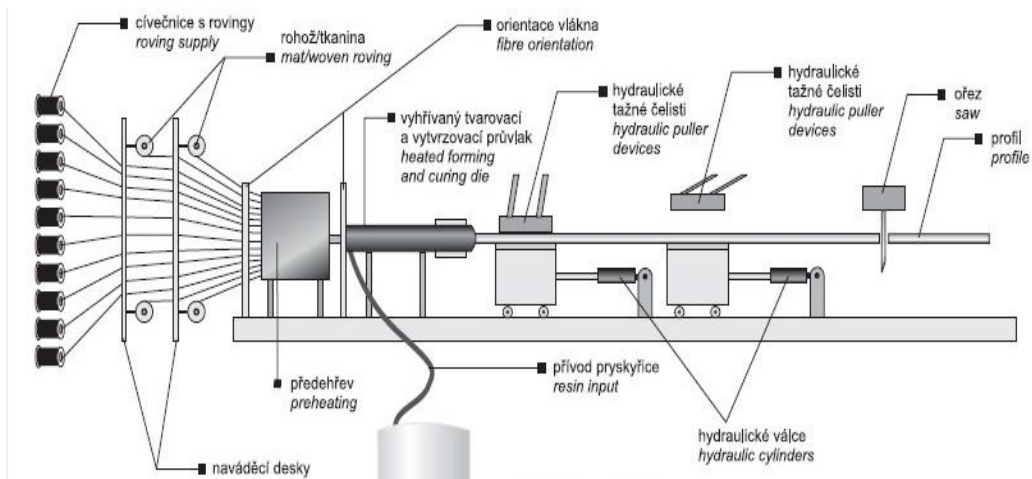
Obr. 17 Lisování [9]

### 1.6.6 Vakuové prosvycování

Tato technologie má dvě varianty. První variantou je prosvycování s pružnou vrchní částí formy a spodní část je tuhá. Pomocí vakua je docíleno prosvycování. Pomocí této metody se vyrábí oboustranně hladké dílce. Druhá varianta je prosvycování pod fólií. Na formu je pomocí těsnících pásek připevněna pružná fólie. Tato metoda se využívá pro výrobu velkorozměrových dílců např. lopatky větrných elektráren, kapotáže a trupy lodí. [8]

### 1.6.7 Tažení

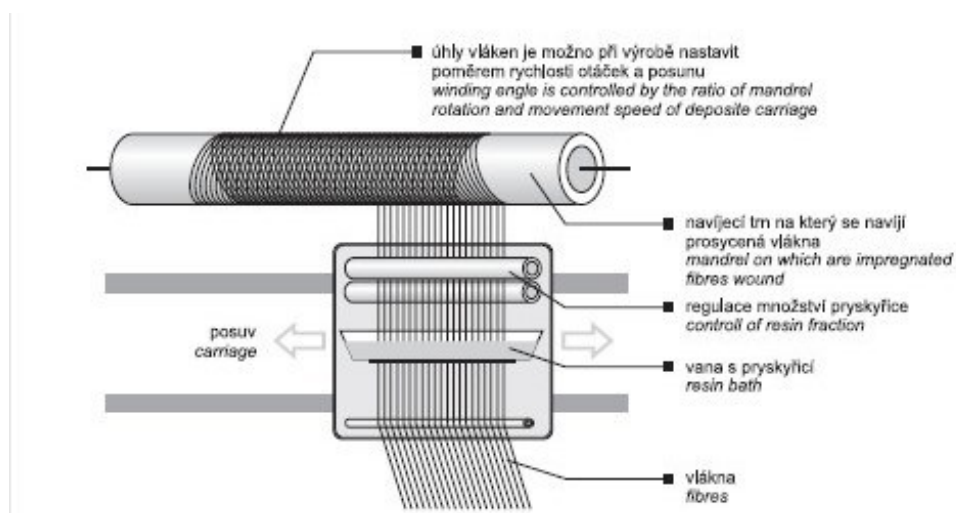
Tažením se vyrábí plné, duté i tvarové profily. Tyto profily mají vysoký podíl výztuže až 80 %. Nejpoužívanější výztuže jsou skleněné (roving) a uhlíkové pramence. Při tažení jsou vlákna pomalu protažena skrz nahřátou průtažnici. Díky průtažnici je dosaženo konstantního průměru. Mezi výhody patří nízká cena, ale tato technologie nelze použít pro složitější geometrie. [3]



Obr. 18 Tažení [12]

### 1.6.8 Navíjení

Podstatou této technologie je navíjení výztuží impregnovaných pojivem na jádro ve tvaru výrobku. Výztuže se používají skleněná, uhlíková nebo aramidová ve formě pramenců. Navíjením se vyrábí dutá tělesa jako trubky, kolena a nádrže. Nevýhodou navíjení je vysoká cena navíjecího zařízení a složité odformování vnitřních forem. [4,5]



Obr. 19 Navíjení [13]

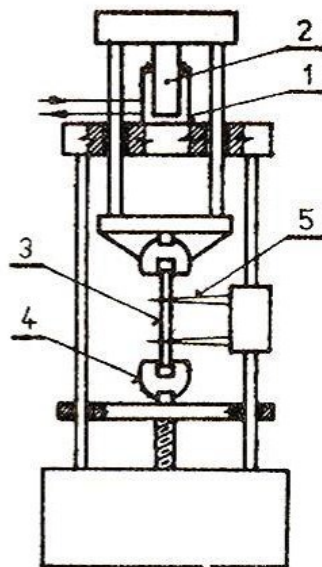
## 2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

### 2.1 Statické zkoušky

Statické zkoušky jsou nejpoužívanější zkoušky pro zjištění pevnostních hodnot materiálu. Základ těchto zkoušek je postupné zatěžování materiálu, bez rázu. Základní zkoušky jsou tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem. Stroje i zkušební tělesa jsou normalizovány.

#### 2.1.1 Zkouška tahem

Tato zkouška je nejrozšířenější zkouška, která se používá téměř u všech známých materiálů. Při zkoušce tahem zjišťujeme hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodných materiálů. Tahová zkouška je normalizována a proto zkušební tělesa mají přesně zadané rozměry. Pro zkoušení kompozitů je navrženo mnoho různých tvarů zkušebních těles, které jsou popsány v normách. [22]

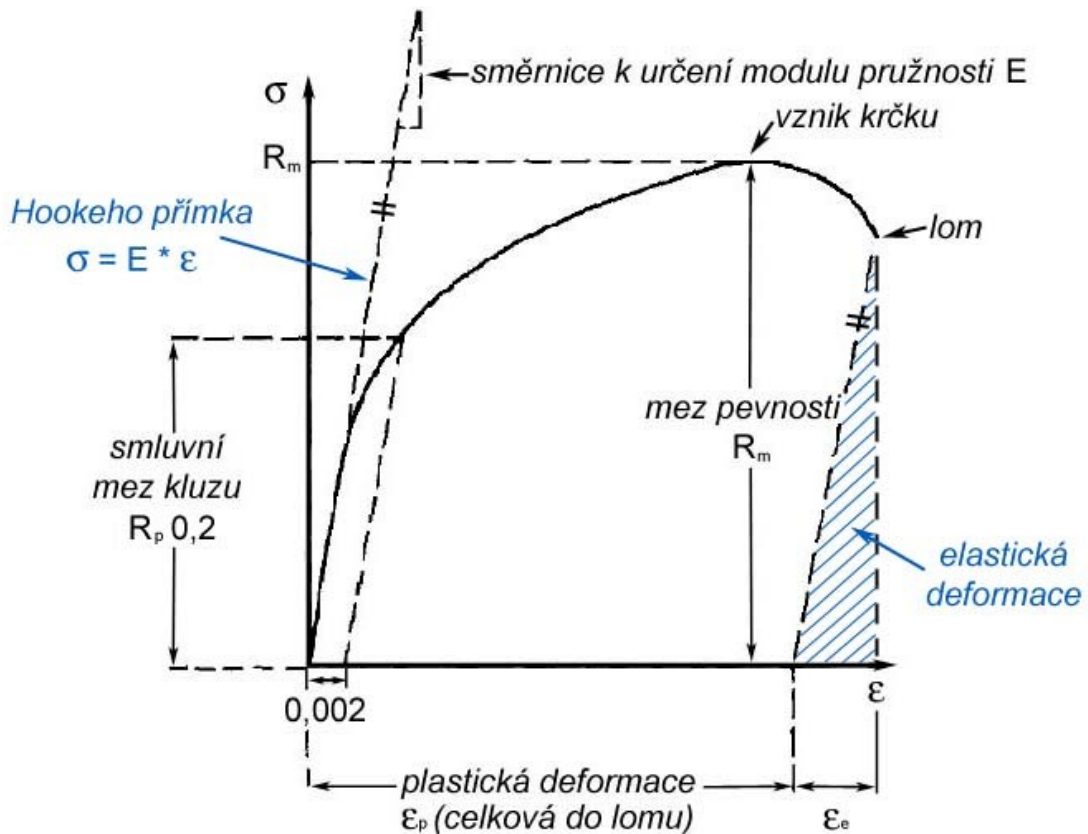


Hydraulický univerzální zkušební stroj

1 — hydraulický válec, 2 — píst,  
3 — zkušební těleso, 4 — upínací  
hlava, 5 — snímač prodloužení  
zkušebního tělesa

*Obr. 20 Hydraulický univerzální  
zkušební stroj [16]*

Stroj, na kterém probíhá zkouška tahem, se jmenuje trhací stroj. Většinou na těchto strojích lze provádět i zkoušky tlakem a ohybem. Trhací stroje v průběhu zkoušky vykreslují tzv. pracovní diagram.



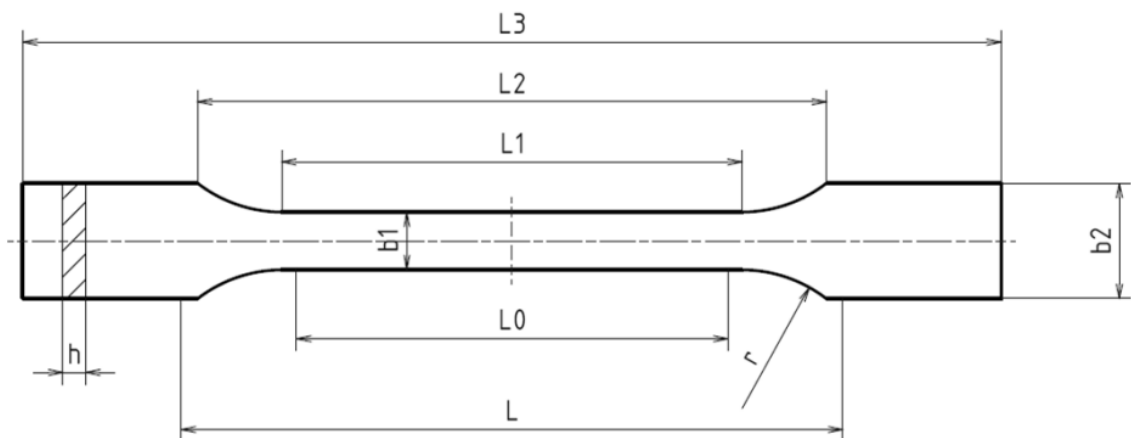
Obr. 21 Tahový diagram [18]

Zkouškou se zjišťují tyto hodnoty:

- Pevnost v tahu – je to největší napětí, které vzorek vydržel  $R_m = \frac{F_{max}}{S_0}$
- Pevnost v kluzu – je napětí při, kterém se začne vzorek prodlužovat a zatěžující síla neroste nebo klesá.  $R_e = \frac{F_k}{S_0}$
- Poměrné prodloužení – je to poměr změny délky vůči původní délce  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0}$
- Tažnost – je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech  $A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$
- Zúžení – je poměr průřezu tyče po přetržení a původního průřezu

V pracovním diagramu si lze všimnout několika bodů:

- U – mez úměrnosti – do tohoto bodu je napětí přímo úměrné deformaci. Jinými slovy do tohoto bodu platí Hookův zákon.  $\sigma = E \cdot \epsilon$
- E – mez pružnosti – je to smluvní dohoda napětí, které vyvolává trvalou deformaci. Tuto hodnotu je velmi složité zjistit.
- K – mez kluzu – v tomto bodě se zkušební vzorek začne výrazně prodlužovat, ale zatěžující síla zůstává stejná.
- P – mez pevnosti – je to největší napětí, které působilo na zkušební vzorek
- S – bod přetržení – dojde k přetržení vzorku



Obr. 22 Zkouška tahem – zkušební vzorek [17]

### 2.1.2 Zkouška tlakem

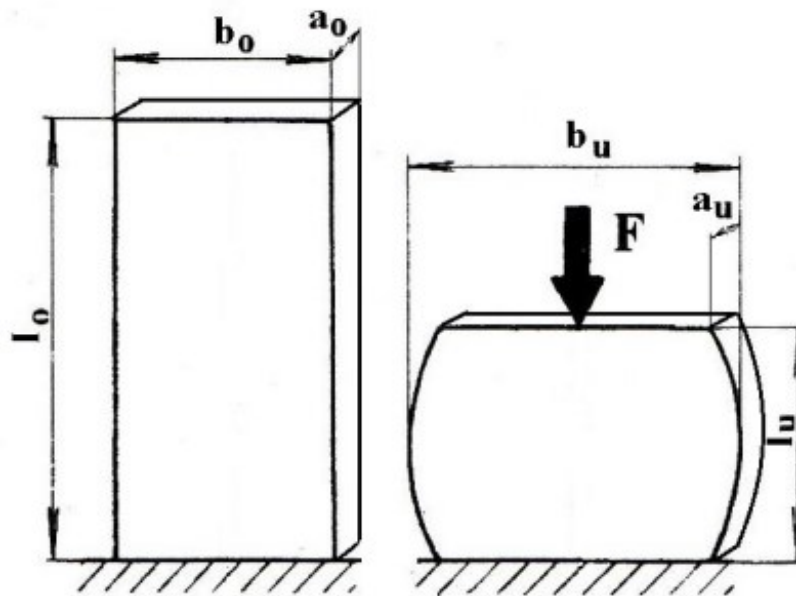
Při zkoušce tlakem je zkušební vzorek zatěžován rovnoměrně rostoucí silou. Konec zkoušky nastává, až zkušební vzorek praskne, rozdrťí se nebo je stlačen na určitou hodnotu. Při zkoušce tlakem se zjišťuje pevnost v tlaku křehkých materiálů např. šedá litina, keramika, ložiskové kovy, stavební materiály. U běžných ocelí je pevnost v tlaku přibližně stejná jako pevnost v tahu. Zkušební tělesa mají většinou tvar válečku nebo kvádru. [19]

Zkouškou se zjišťují tyto hodnoty:

- Pevnost v tlaku – je poměr největší síly a původního průřezu  $R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_0}$
- Poměrné zkrácení – je poměr zkrácení zkušební vzorku a původní délky  

$$A_t = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l_0 - l_u}{l_0} \cdot 100$$
- Poměrné příčné rozšíření – je poměr změny průřezu a původního průřezu  

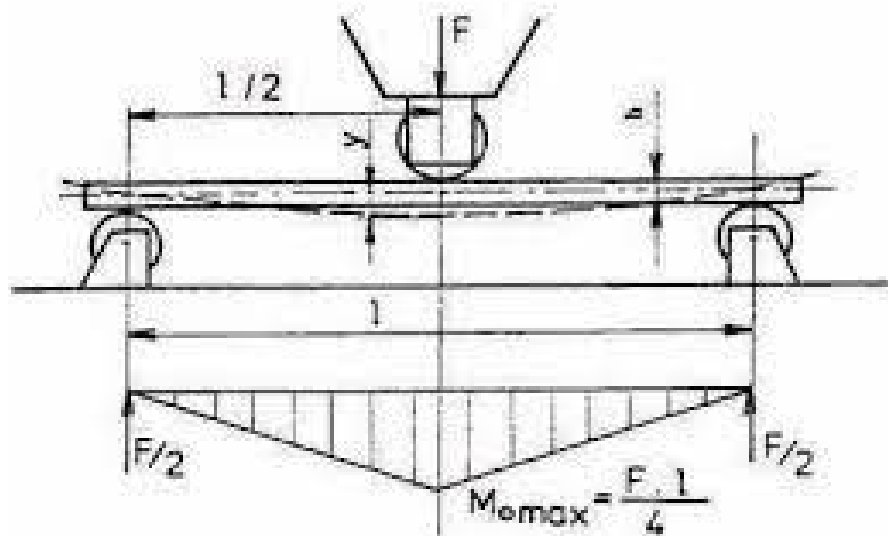
$$Z_t = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100$$



Obr. 23 Zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem [19]

### 2.1.3 Zkouška ohybem

Jako zkušební vzorek je používána obdélníková nebo kruhová tyč. Ta je položena na dvě opory, které jsou ve formě válečků. Horní část stroje tvoří trn, který postupně zatěžuje zkušební tyč. Zkouška může probíhat třibodovým ohybem nebo čtyřbodovým ohybem. [1,19]



Obr. 24 Zkouška ohybem [18]



## 2.2 Dynamické zkoušky

Tyto zkoušky mají za úkol zjistit, jak se materiál bude chovat při dynamickém namáhání. Při dynamickém namáhání vzniká porušení materiálu, přestože zatěžující síla nedosahuje velikosti jako při statickém namáhání. Působící síla je koncentrována do malého časového úseku.

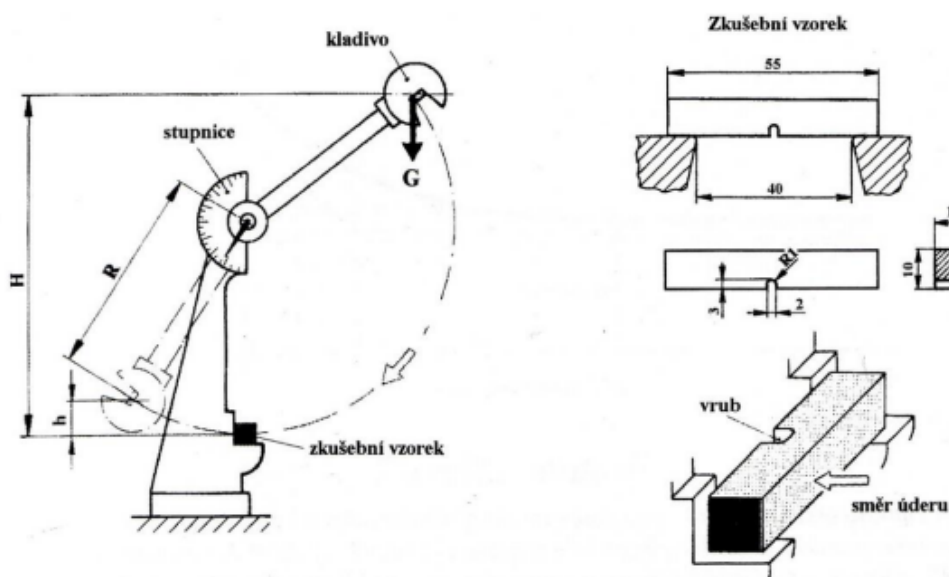
### 2.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Tato zkouška slouží ke zjištění houževnatosti materiálu. Houževnatost lze vyjádřit pomocí energie spotřebované na přeražení zkušebního tělesa. Zkouška rázem v ohybu je nejnámější rázová zkouška. Většinou mají vzorky vruby. Vruby se používají v případě velké houževnatosti materiálu. Vrub se umísťuje do středu vzorku.

Stroj pro měření vrubové houževnatosti se jmenuje Charpyho kladivo. Průběh zkoušky začíná upevněním kladiva o hmotnosti  $G$  ve výšce  $H$ . Vzorek je umístěn v nejnižším bodě dráhy. Kladivo se uvolní a přerazí vzorek a vyhoupne se do určité výšky  $h$ .

- Nárazová práce – je práce po přeražení tyče  $KU = G \cdot (H - h)$
- Vrubová houževnatost – je podíl nárazové práce a původního průřezu  $KCU = \frac{KU}{S_0}$

[19]



Obr. 25 Charpyho kladivo a zkušební vzorek [19]

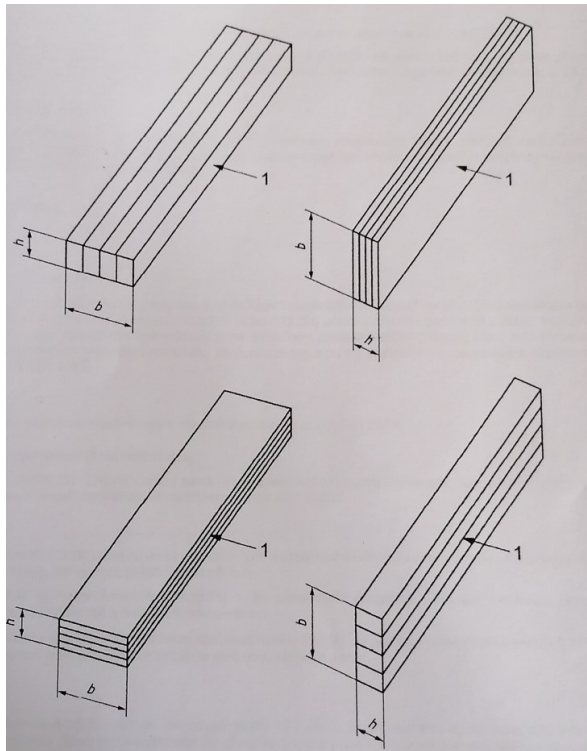
### 2.2.1.1 Norma ČSN EN ISO 179-1

Tato norma popisuje metodu zkoumání rázových vlastností Charpy u plastů za stanovených podmínek. V této normě jsou popsány možné druhy namáhání vzorků, rozměry vzorků, jejich možné deformace a materiály. Jsou zde popsány možné vruby zkušebních těles, postup zkoušky a výpočty rázové houževnatosti.

Tato metoda je určena pro:

- Tuhé termoplasty pro tvářeni
- Tuhé reaktoplasty pro tvářeni
- Kompozity

Dle normy vzorky mohou být namáhány normálovým rázem nebo rovnoběžným rázem vzhledem k vrstvám vzorků. Další možnost je namáhat vzorek je přes širší nebo kratší stranu viz (Obr. 26) [28]



Obr. 26 Možné směry rázu [22]

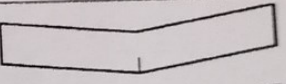
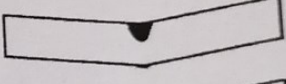
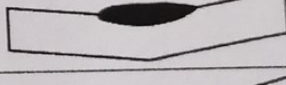
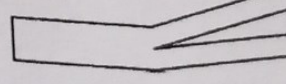
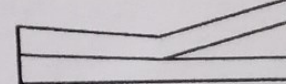
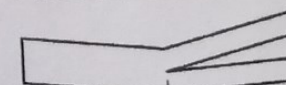
Tab. 1 Typy a rozměry zkušebních těles a rozpětí podpěr [28]

Typ zkušebního tělesa	Délka l	Šířka b	Tloušťka h	Rozpětí L
1	80±2	10,0±0,2	4,0±0,2	62 <sup>+0,5</sup> <sub>0,0</sub>
2 3	25h 11h nebo 13h	10 nebo 15 <sup>c</sup>	3d	20h 6h nebo 8h

Dle tabulky 1 lze zvolit předepsaný rozměr zkušebního tělesa. Tělesa typu 1 jsou opatřeny vrubem. Tělesa typu 2 a 3 jsou tělesa vykazující mezivrstvý smykový lom. Tělesa typu 2 jsou bez vrubu a tělesa typu 3 jsou s vrubem. [28]

Norma uvádí, že minimální počet vzorků je 10 kusů a pokud jsou lamináty zkoušeny v normálovém i v rovnoběžném směru je nutné mít pro každý směr 10 kusů vzorků.

Dále jsou v normě uvedeny možné druhy porušení zkušební těles a to tahem, tlakem vybočením nebo smykem a jeho jinými verzemi viz (Obr. 27). [28]

Označení metody	Typ zkušebního tělesa	L/h	Druh porušení	Schematické znázornění	
ISO 179-1/2 n nebo p <sup>a</sup>	2	20	Tahem	t	
			Tlakem	c	
			Vybočením	b	
ISO 179-1/3 n nebo p <sup>a</sup>	3	6 nebo 8	Smykem	s	
			Násobným smykem	ms	
			Smykem s následným tahem	st	

Obr. 27 Označení metody a typy zkušebních těles pro materiály vykazující mezivrstvý smykový porušení [28]

Postup zkoušky začíná pečlivým změřením všech daných vzorků. Všechny vzorky se nemusí měřit pouze v případě, když byly vzorky vyráběny sériově např. vstřikováním. Nastaví se rozpětí podpěr pro zkušební těleso a zkontroluje se schopnost stroje provádět zkoušku předepsanou rázovou rychlostí. Dále se kontroluje rozsah absorbované energie. Tento rozsah by měl být v rozmezí 10-80% energie, která je vyvinuta při nárazu. Po kontrole se rázové

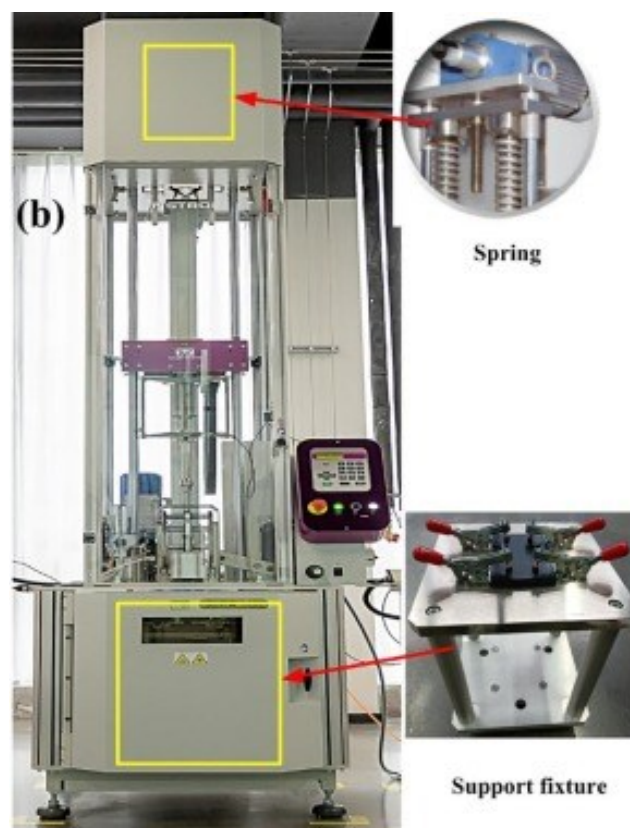
kyvadlo zdvihne do předepsané výšky, ve které se zajistí. Zkušební těleso je umístěno na podpěry stroje tak aby břit kyvadla narazil do středu vzorku. U zkoušených vzorků se mohou objevit čtyři typy přeražení a to:

- Úplné přeražení, při kterém je těleso rozděleno na dva a více kusů
- Hlubkové přeražení je neúplné přeražení a obě poloviny drží pohromadě pouze tenkou vrstvou
- Částečné přeražení je neúplné přeražení, které nesplňuje definici kloubového přeražení
- Nepřeraženo dojde pouze k ohnutí nebo protlačení mezi podpěrami, ale nedojde k přeražení

[28]

### 2.2.2 Rázová zkouška pádem

Tato zkouška je prováděna na padostroji. Tento stroj funguje na principu rovnoměrně zrychleného pohybu v tomto případě volný pád. Těleso padající z vrhu stroje se nazývá impaktor. Impaktor má nejčastěji tvar koule nebo polokoule. Nárazová plocha impaktoru je leštěná. Padostroj je opatřen vodícími tyčemi, díky kterým impaktor dopadne vždy na stejné místo. Když impaktor dopadne na zkušební vzorek, použije svou energii k poškození vzorku. Dopadová energie je závislá na hmotnosti impaktoru a počáteční výšce. [22]



Obr. 28 Padostroj [22]

### 2.2.3 Rázová odolnost

Rázovou odolnost lze popsat jako odolnost materiálu proti vzniku křehkého lomu. Chování materiálu při poškození a rázová houževnatost kompozitních konstrukcí jsou velmi diskutované témata. Mnoho výzkumníků se se zaměřuje na vývoj numerických modelů, které by byly schopné předpovídat chování kompozitů vystavených rázovému zatížení. [24]

Kompozity nacházejí uplatnění v leteckém, automobilovém a dalších průmyslech díky své vysoké pevnosti a zároveň nízké váze, ale jejich nevýhoda je velká citlivost na nárazy. Nárazy způsobují velké vnitřní poškození, jako jsou delaminace, praskání matrice a praskání vláken. Tyto vady nemusí být patrná na první pohled a výrazně snižují únosnost materiálu až o 50%. Kvůli těmto problémům se do kompozitních výrobků přidává velká bezpečnostní rezerva a to snižuje konkurenceschopnost kompozitů vůči kovům. [23]

Rázová odolnost je ovlivněna mnoha faktory:

- Materiál vláken i matrice
- Tloušťka kompozitu i samostatné vrstvy
- Zakřivení kompozitu
- Počet vrstev
- Houževnatost pryskyřice
- Architektura tkaniny
- Extrémní vlivy prostředí
- Geometrie vzorku i testovacího nástroje

[24,25,26,27]

Pořadí stupně vlivu těchto faktorů je vyjádřeno pomocí citlivostního koeficientu, který vyjadřuje vliv každého faktoru. Nejdůležitější vlastností vláken je pevnost v tahu v podélném směru. Tloušťka vrstvy má nejvýraznější vliv na rázovou odolnost. Čím větší tloušťka tím vyšší je rázová odolnost. Počet vrstev je důležitý faktor pro pohlcování energie. [25]

Odolnost proti rázovému namáhání lze zlepšit pomocí matric z termoplastů. Tyto matrice mají vynikající odolnost proti rázovému namáhání, odolnost proti poškození a lépe zvládají rázové namáhání při extrémních podmínkách. Použití těchto matric také zvyšuje pravděpodobnost odhalení poškození povrchu. [23]

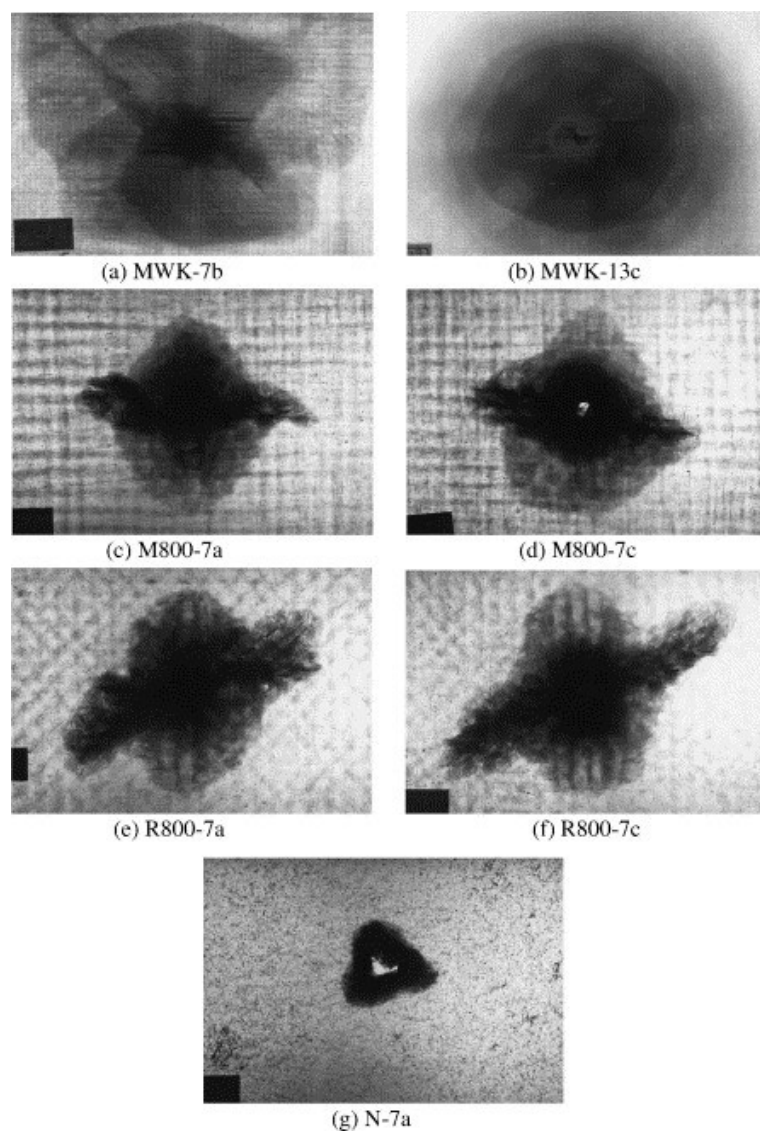
Dalším problémem jsou opakované dopady, které jsou v praxi velmi běžné u lodí nebo v leteckém průmyslu. Kromě vln mohou do kompozitu narazit i jiná tvrdá tělesa. Každý náraz zvyšuje pravděpodobnost poškození ve struktuře kompozitu jako je poškození matrice nebo vláken. Opět se může využít termoplastická matrice, která zlepšuje vlastnosti kompozitů díky její nižší ohybové tuhosti a schopnosti snést větší deformaci než reaktoplastické matrice. Vnitřní poškození laminátu lze kontrolovat pomocí digitálního mikroskopu nebo pomocí ultrazvuku.[26]

Při experimentu [22] byly zkoumány charakteristiky poškození a pevnosti při porušení kompozitních laminátů při zkouškách nárazem při nízké rychlosti. Jako výztuhy pro kompozitní materiály byly použity tři tkaniny ze skla, nemačková tkanina, tkaná tkanina a netkaná rohož. Rázové testy byly provedeny za použití řízeného zkušebního stroje s pádovým závažím při vzestupné energii na 24J. K pozorování charakteristik poškození kolmého průřezu impaktivních laminátů po úpravě mikropráškovým leštěním byla použita metalografická mikroskopie. Když byly průběhy zatížení-doba a energie-čas porovnány s fraktografií, bylo zjištěno, že k přetrhání vlákna došlo před velkým poškozením. Když se energie nárazu zvýšila nad prahovou energii velkého poškození, bylo na zadním povrchu pod téměř nepoškozenou zónou pozorováno praskání matrice, delaminace a lámání vláken, což bylo přičítáno namáhání v ohybu. [22]

Kompozitní materiály mají několik režimů porušení a citlivost na rychlost deformace může vést ke změně z jednoho režimu porušení na druhý. Používají se nedestruktivní techniky jako je ultra zvuková metoda V-scan poskytující informace o celém poli oblasti poškození, bohužel se mnoho vlastností oblasti poškození ztrácí. Tyto přehledy stejně jako řada nedávno publikovaných prací naznačují, že chování při nárazu a vlastnosti poškozování kompozitních laminátů jsou stále otevřenými problémy. [22]

Pro studii byly vybrány tři tkaniny ze skleněných vláken. Tkanina MWK, DBLT 1150-E11-1, vyrobila společnost DEVOLD AMTAS. Jedna vrstva tkaniny se skládala ze čtyř jednotlivých vrstev tkaniny s různými úhly. Základní gramáž byla 1141 g/m<sup>2</sup>. Tkaná látka, TGFW-800, byla hladké konstrukce, která byla vyrobena ze svazků skelných vláken 800g/m<sup>2</sup>. Netkaná rohož TGFM-300 P/E byla vyrobena z nasekaných vláken s vrstvou 300g/m<sup>2</sup>. Každý laminátový kompozit byl vyroben z jedné výztuže. Byly laminovány dvě různé tloušťky kompozitů a to sedm vrstev a třináct vrstev. Kompozitní materiály byly vyrobeny metodou ručního laminování. [22]

Nárazové testy byly provedeny pomocí řízeného zkušebního zařízení s pádovým závažím s párem nastavitelných zachycovačů odrazu, aby se zabránilo více násobným nárazům na zkušební vzorky. Pro testování byl použit nárazový stroj Dynatup Model 8250. Vzorek o velikostech 10,16 cm x 15x24 cm byl upnut v obdélníkovém držáku s otevřeným oknem o rozměrech 7,62 cm x 12,70 cm. Pro testy byly použity tři nominální rázové energie 8, 16, 24 J. Naražené vzorky byly rozřezány přes místo dopadu pomocí paprsku. Rozřezaný povrch byl postupně broušen na nejjemnějším brusném papíru. Nakonec byly broušené povrchy vyleštěny.



*Obr. 29 Fotografie oblasti celkového poškození po nárazové zkoušce[22]*



Mechanismus poškození nárazem v laminátu představuje velmi složitý proces. Jde o kombinaci praskání matrice, vybočení povrchu, delaminace, stříhu vlákna a lomu vlákna, které se obvykle všechny vzájemně ovlivňují. Vzor delaminace závisí na struktuře tkaniny. V laminátu MKW byl pozorován motýlovitý tvar s hlavní osou rovnoběžnou se směrem vláken viz (Obr. 30 1a). Delaminace, která se zvětšovala s rostoucím zatížením, rotovala z promáčknutého místa dolů ke spodní vrstvě viz (Obr. 30 1a-b). Na laminátu tkaní látky byla pozorována delaminace kosočtvercového tvaru, zarovnaná se směrem osnovy a útku. Lze pozorovat poškozenou oblast zasažených vzorů M800 viz (Obr. 30 1c-d). Plocha delaminace laminátu M nebo R byla menší než plocha laminátu MWK. Ve srovnání s delaminačním vzorem M800 měl vzorek R800 jiný úhel kosočtverce kvůli orientaci vláken viz (Obr. 30 1e-f). Ukazuje se, že náhodné a nespojitě vlákno nemůže účinně přenášet energii rázu do rovinného směru. Je zřejmé, že struktura vyztuženého materiálu silně ovlivňuje vzor delaminace a plochu. [22]

Z pohledu mechanismu pohlcování energie výsledky ukazují, že lom vláken dominoval modelu rázového porušení u třináctivrstvého laminátu, zatímco delaminace se stala důležitější u sedmivrstvého laminátu. Proto se dospělo k závěru, že počet vrstev je jedním z důležitých parametrů pro mechanismus pohlcování energie v kompozitních laminátech. [22]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zkoumání odolnosti 2D kompozitu vůči rázovému namáhání. Pro toto zkoumání bylo potřeba vytvořit laminátové vzorky s výztužemi ze skelných vláken. Byly použity tři druhy skelných vláken a to nepletená rohož, triaxiální tkanina a pletená tkanina s plátňovou vazbou. Pro všechny tři druhy vzorků byla použita stejná matrice a to epoxidová pryskyřice LH 385 a tužidlo 285 (MGS). Tloušťka vyrobených desek měla být cca 3 mm. Tloušťka byla samozřejmě ovlivněna počtem vrstev daných výztuží. Vzorky byly vyřezány pomocí vodního paprsku a následně byly zkoušeny na Charpyho kladivě.

V této diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- Literární rešerše na problematiku vlivu výztuže na mechanické vlastnosti
- Přehled způsobů zvyšování rázové odolnosti kompozitu
- Zrealizujte návrh kompozitních systémů s použitím 2D výztuží, 3D výztuží a NFC
- Zrealizujte experimentální výrobu zkušebních desek dle zvolených výrobních technologií
- Experimentální vyhodnoťte mechanické vlastnosti dle zvolených metodik
- Závěr a diskuze dosažených výsledků

## 4 PŘÍPRAVA MATERIÁLU A VÝROBA VZORKŮ

Pro zkoumání rázové odolnosti bylo potřeba vyrobit vzorky podle normy ČSN EN ISO 179-1. Dle této normy mají mít vzorky rozměry obdélníku 15x75 mm a tloušťku 3 mm. Nejprve bylo potřeba vyrobit desky o tloušťce 3 mm a následně z nich nařezat vzorky o zadaných rozměrech. Byly použity tři druhy skelných vláken, které byly nastříhány na rozměr cca 40x20 cm, epoxidová pryskyřice LH 385 a tužidlo 285 (MGS) v předepsaném poměru. Po vytvrdnutí pryskyřice byly desky odformovány a očištěny. Následně byly z desek vyřezány vzorky pomocí vodního paprsku.

### 4.1 Popis materiálu

Pro výrobu desek byly použity 3 druhy skelných vláken. Tkanina s plátňovou vazbou o hustotě 280 g/m<sup>2</sup> navinuté na roli o šířce 100cm, skelná netkaná rohož o hustotě 300 g/m<sup>2</sup> navinuté na roli o šířce 125 cm a poslední byla použita triaxiální tkanina o hustotě 900 g/m<sup>2</sup>. Pro dosažení tloušťky 3 mm bylo odhadováno počet vrstev jednotlivých desek. Triaxiální tkaniny byly použity tři vrstvy, které vážily 250 g. Z plátna bylo použito 10 vrstev o váze 250 g a z rohože bylo použito 5 vrstev o váze 140 g.

Jako matrice byla použita pryskyřice LH 385 a tužidlo 285 (MGS) v předepsaném poměru 100:40. Podle váhy výztuží bylo namícháno požadované množství pryskyřice a tužidla.



Obr. 30 Skelná tkanina (vlastní zpracování)



*Obr. 31 Skelná rohož (vlastní zpracování)*



*Obr. 32 Triaxiální tkanina (vlastní zpracování)*

## 4.2 Výroba kompozitních desek

### 4.2.1 Forma

Jako forma byla zvolena skelněná tabule. Forma se nejdříve očistila od zatuhlé pryskyřice a jiných nečistot pomocí špachtle a ředidla. Následně byla forma rozdělena na tři části pomocí papírové izolepy. Z izolepy byly vytvořeny hranice každé desky, tak aby se desky nespojily mezi sebou. Kvůli snadnému odformování byla do formy nanesena vrstva separačního vosku TR 104.



*Obr. 33 Nachystaná forma (vlastní zpracování)*

### 4.2.2 Výztuže

Dalším krokem bylo nastříhání jednotlivých skelných výztuží na rozměr cca 40x20 cm. Pro každou desku byl použit pouze jeden druh skelných výztuží. Na obrázku (Obr. 31) jsou vidět použité skelné vlákna. Zleva to jsou triaxiální skelná tkanina (tři vrstvy), skelná tkanina s plátňovou vazbou (deset vrstev) a skelná nepletená rohož (pět vrstev).



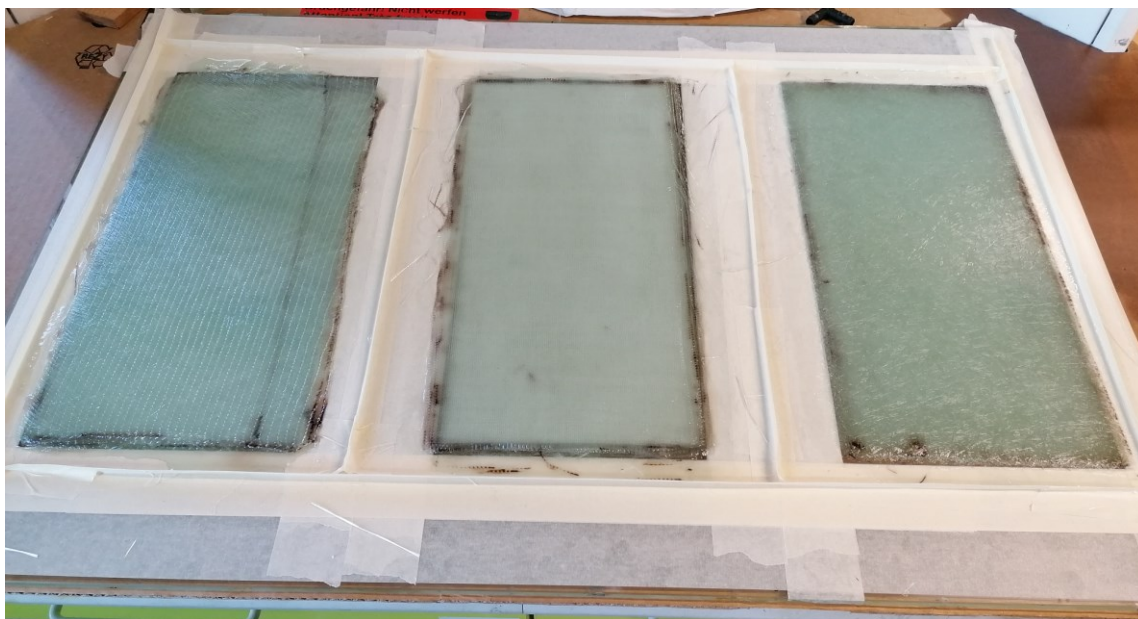
*Obr. 34 Nastříhané výztuže (vlastní zpracování)*

### 4.2.3 Matrice

Matrice byla namíchána z epoxidové pryskyřice LH 385 a tužidla 285 (MGS) v poměru 100:40. Pryskyřice LH 385 má nízkou viskozitu a velmi dobré aplikační vlastnosti a výbornou chemickou odolnost. Množství matrice bylo odvozeno z váhy jednotlivých výztuží.

### 4.2.4 Laminátování

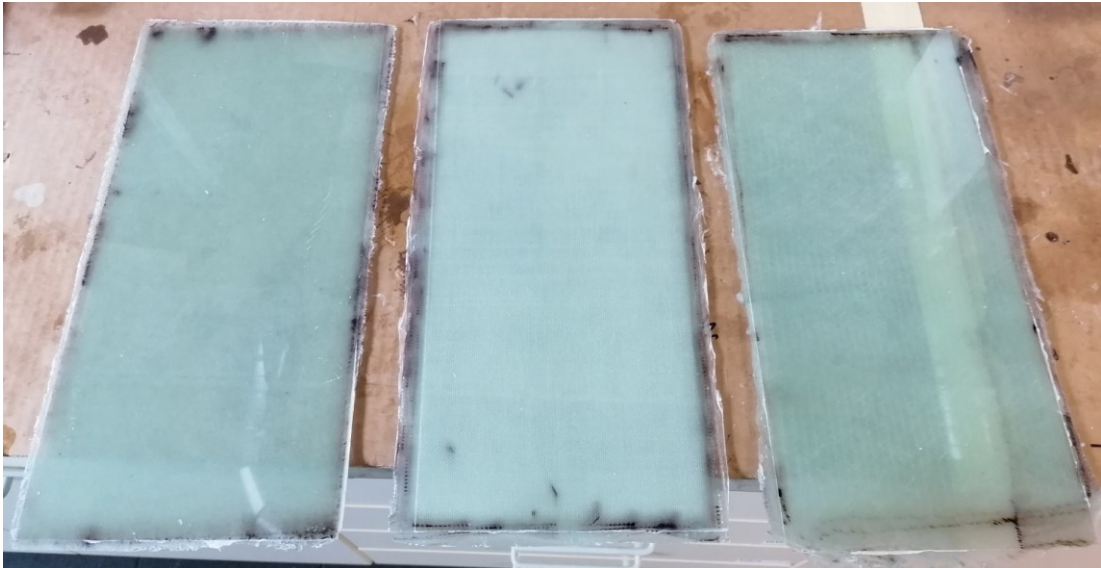
Do formy byla nejprve nanесena vrstva matrice a na ni pak následně položena první vrstva skelných vláken. Matrice byla roztírána pomocí válečku. Na první vrstvu výztuží byla nanесena další vrstva matrice a na tu zase další vrstva výztuží až byly použity všechny nachystané výztuže. Zbytek matrice byl nanесen na vrchní vlákna a rozetřen. Přebytky matrice byly vytlačeny z vláken pomocí plastových, nenasákavých válečků. Díky tomu mají desky rovnoměrnou tloušťku. Každá deska má pouze jeden typ výztuží a každá má jiný počet vrstev, ale mají cca stejnou tloušťku.



Obr. 35 Výztuže zalité v matrici (vlastní zpracování)

#### 4.2.5 Odformování

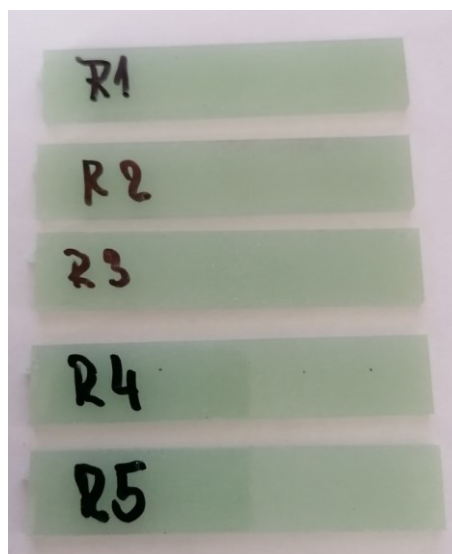
Pomocí špachtle byly desky odformovány. Přetoky byly odstříhány a forma očištěna pro další použití.



Obr. 36 Odformované laminátové desky (vlastní zpracování)

#### 4.2.6 Vyřezání vzorků

Vzorky byly nařezány pomocí vodního paprsku. Z každé desky bylo nařezáno minimálně 20 ks vzorků o rozměrech 15x75 mm, které jsou dány normou ČSN EN ISO 179-1 viz (Tab.1). Vzorky jsou bezvrubové. Všechny vzorky byly označeny podle druhu výztuží a dále byly označeny pořadovým číslem. Pořadové číslo vzorků bylo zvoleno náhodně.

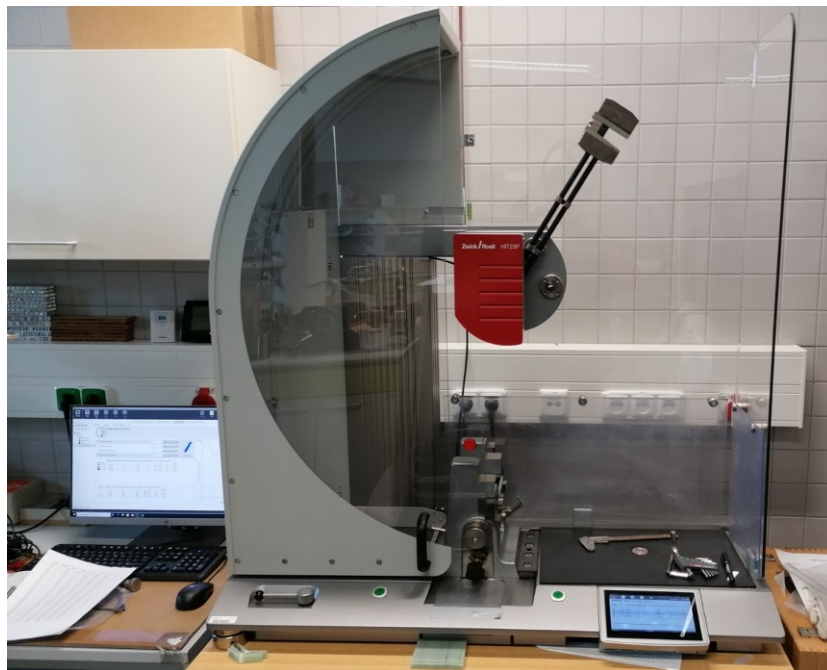


Obr. 37 Vyřezané vzorky (vlastní zpracování)

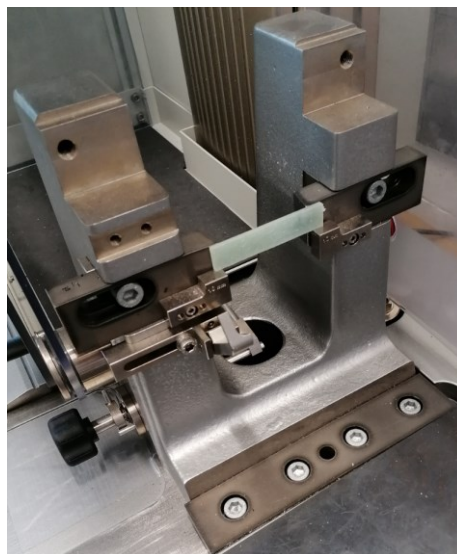


## 5 RÁZOVÁ ZKOUŠKA

Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 179-1. Zkouška byla provedena na zkušebním stroji Zwick/Roell HIT 25P, který je umístěn v laboratoři Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na fakultě Technologické. Stroj je zároveň propojen s počítačem, který zapsal a graficky vyhodnotil naměřené hodnoty. Pro měření bylo použito 7,5 joulové kladivo. Podle normy bylo nastaveno rozpětí rozpěr, o které se opírala zkušební tělesa na 60mm  $\approx$  20h (Obr. 35). U každého zkoušeného vzorku byla v použitém softwaru zapsána reálná tloušťka daného vzorku.



Obr. 38 Charpyho kladivo (vlastní zpracování)



Obr. 39 Uložení vzorku ve zkušebním stroji

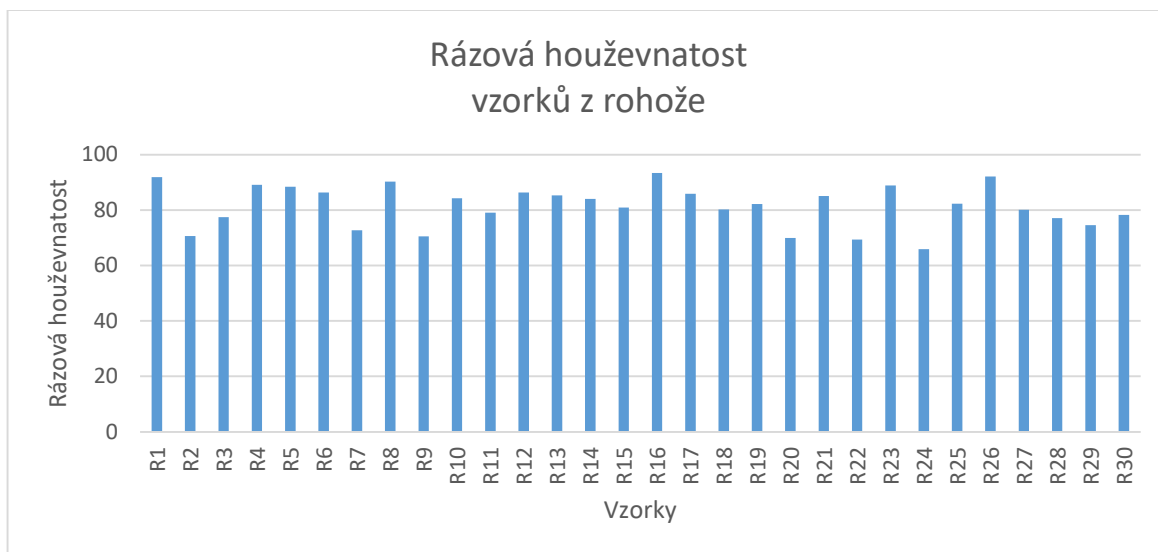
## 6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO JEDNOTLIVÉ VÝZTUŽE

### 6.1 Vzorky z rohože

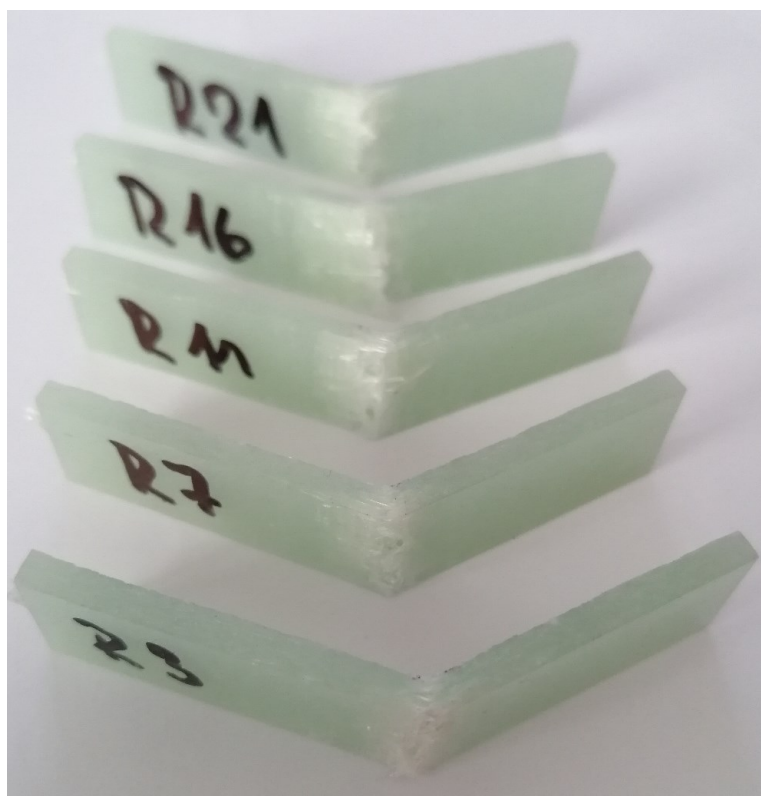
Vzorky vyrobené ze skelné rohože měli celkem 5 vrstev rohože. Tyto vzorky byly označeny písmenem R a bylo jich 30 ks. Průměrná tloušťka vzorků byla 3,4 mm s odchylkou 0,14 mm. Vzorky byly kompletně přeraženy a deformace vláken ve vzorcích byla na tahové straně (Obr. 41), (Obr. 42). Dle tabulky 4. (Tab. 5) byla průměrná rázová houževnatost ze vzorků vyrobených z rohože 81,42 kJ/m<sup>2</sup> s odchylkou 7,55 kJ/m<sup>2</sup>. Pro větší přehlednost byl vytvořen graf s výsledky jednotlivých rázových houževnatostí vzorků z rohože (Obr. 40).

Tab. 2 Rázová houževnatost vzorků z rohože (vlastní zpracování)

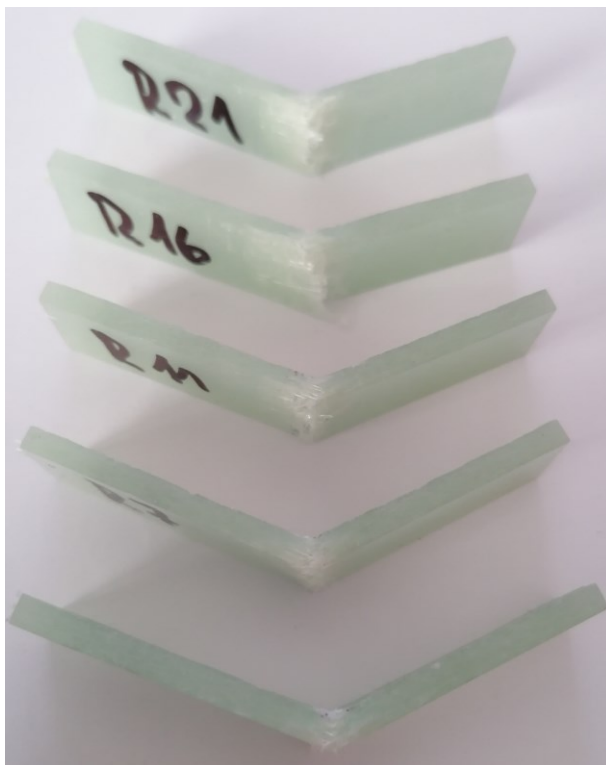
Vzorky	Tloušťka	Práce	Rázová houževnatost
ks	mm	J	kJ/m <sup>2</sup>
R1	3,6	4,96	91,87
R2	3,5	3,71	70,58
R3	3,5	4,07	77,49
R4	3,5	4,68	89,06
R5	3,4	4,51	88,42
R6	3,4	4,4	86,34
R7	3,5	3,82	72,69
R8	3,4	4,61	90,29
R9	3,1	3,28	70,5
R10	3,5	4,43	84,3
R11	3,4	4,03	79,1
R12	3,5	4,53	86,36
R13	3,2	4,09	85,3
R14	3,5	4,41	84,01
R15	3,3	4,01	80,96
R16	3,5	4,9	93,41
R17	3,7	4,51	85,87
R18	3,3	3,97	80,25
R19	3,3	4,07	82,24
R20	3,4	3,57	69,99
R21	3,5	4,47	85,07
R22	3,5	3,64	69,32
R23	3,5	4,66	88,83
R24	3,2	3,17	65,94
R25	3,5	4,32	82,33
R26	3,2	4,42	92,15
R27	3,4	4,08	80,06
R28	3,4	3,93	77,07
R29	3,3	3,69	74,53
R30	3,1	3,64	78,21



Obr. 40 Rázová houževnatost vzorků z rohože (vlastní zpracování)



Obr. 41 Vzorky z rohože po testu (vlastní zpracování)



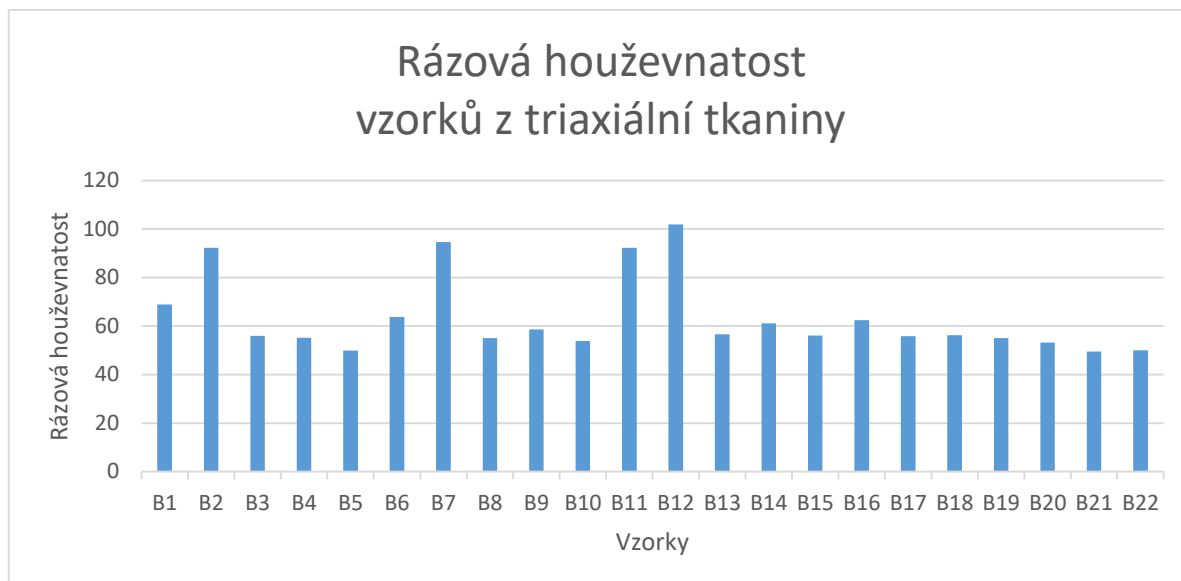
*Obr. 42 Vzorky z rohože po testu (vlastní zpracování)*

## 6.2 Vzorčky z triaxiální tkaniny

Vzorčky vyrobené ze skelné triaxiální tkaniny měly celkem 3 vrstvy této tkaniny. Tyto vzorky byly označeny písmenem B a bylo jich 22 ks. Průměrná tloušťka vzorků byla 3,41 mm s odchylkou 0,28 mm. Vzorčky nebyly kompletně přeráženy a deformace vláken ve vzorcích byla na tahové straně (*Obr. 44*), (*Obr. 45*). Každý vzorek měl neporušená vlákna v jedné vrstvě. Dle tabulky 5. (*Tab. 5*) byla průměrná rázová houževnatost ze vzorků vyrobených z triaxiální tkaniny  $63,57 \text{ kJ/m}^2$  s odchylkou  $16,04 \text{ kJ/m}^2$ . Pro větší přehlednost byl vytvořen graf (*Obr. 43*). Z grafu je patrné, že 4 vzorky mají výrazně vyšší rázovou houževnatost oproti ostatním vzorkům se stejnou výztuží. Je to nejspíš způsobeno orientací vláken daných vzorků. Tyto vzorky byly vyřezány v jiném směru než ostatní vzorky (*Obr. 46*). Průměr rázové houževnatosti těchto čtyř samostatných vzorků je  $95,26 \text{ kJ/m}^2$  a odchylka  $4,59 \text{ kJ/m}^2$ .

*Tab. 3 Rázová houževnatost vzorků z triaxiální tkaniny (vlastní zpracování)*

Vzorčky	Tloušťka	Práce	Rázová houževnatost
ks	mm	J	$\text{kJ/m}^2$
B1	3,1	3,21	68,94
B2	3,5	4,84	92,23
B3	3,2	2,69	56,03
B4	3,8	3,15	55,22
B5	3,7	2,77	49,86
B6	3,2	3,06	63,74
B7	3,4	4,83	94,68
B8	3,2	2,65	55,11
B9	3,6	3,16	58,57
B10	3,6	2,91	53,91
B11	3,6	4,98	92,22
B12	3,6	5,5	101,92
B13	3,2	2,72	56,66
B14	3,2	2,94	61,15
B15	2,7	2,27	56,15
B16	3,2	3	62,42
B17	3,1	2,6	55,84
B18	3,7	3,12	56,18
B19	3,7	3,05	54,99
B20	3,6	2,87	53,16
B21	3,6	2,67	49,45
B22	3,6	2,7	50,08



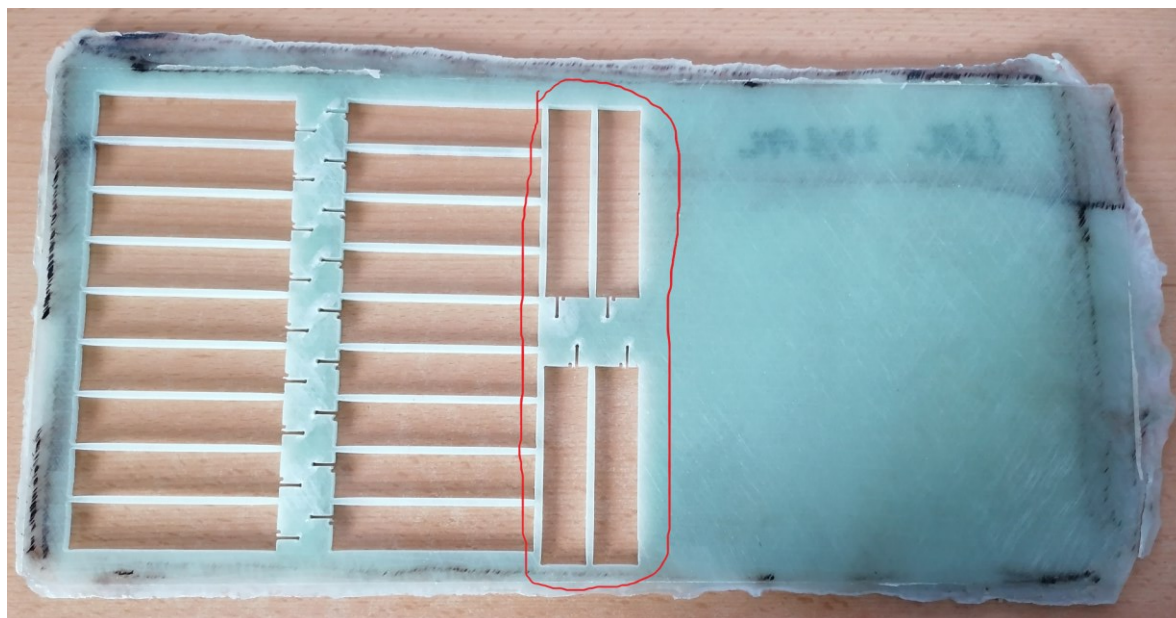
*Obr. 43 Rázová houževnatost vzorků z triaxiální tkaniny (vlastní zpracování)*



*Obr. 44 Vzorky z triaxiální tkaniny po testu (vlastní zpracování)*



*Obr. 45 Vzorke z triaxiální tkaniny po testu (vlastní zpracování)*



*Obr. 46 Deska z triaxiální tkaniny po řezání na vodním paprsku (vlastní zpracování)*

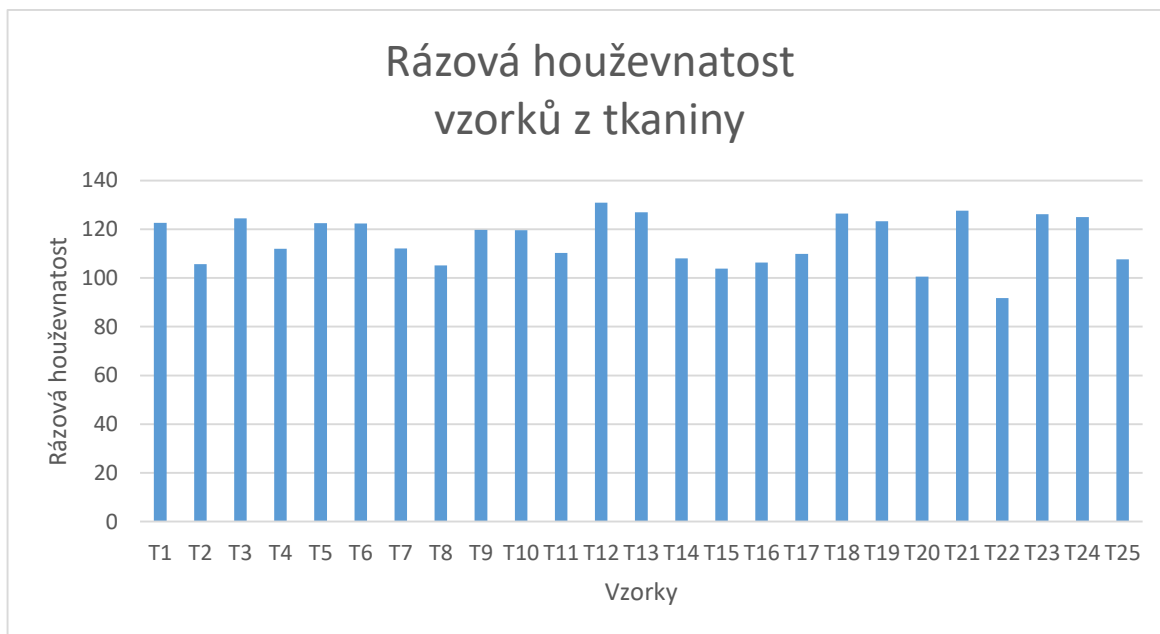
### 6.3 Vzorčky z tkaniny

Vzorčky vyrobené ze skelné tkaniny měli celkem 10 vrstev použité tkaniny. Tyto vzorky byly označeny písmenem T a bylo jich 25 ks. Průměrná tloušťka vzorků byla 2,8 mm s odchylkou 0,05 mm. Vzorčky nebyly kompletně přeráženy a deformace vláken ve vzorcích byla hlavně na tlakové straně a minimálně na tahové straně (*Obr. 48*), (*Obr. 49*). Dle tabulky 4. (Tab. 4) byla průměrná rázová houževnatost ze vzorků vyrobených ze skelné tkaniny s plátňovou vazbou 115,63 kJ/m<sup>2</sup> s odchylkou 10,35 kJ/m<sup>2</sup>. Pro větší přehlednost byl vytvořen graf s výsledky jednotlivých rázových houževnatostí vzorků z tkaniny (*Obr. 44*).

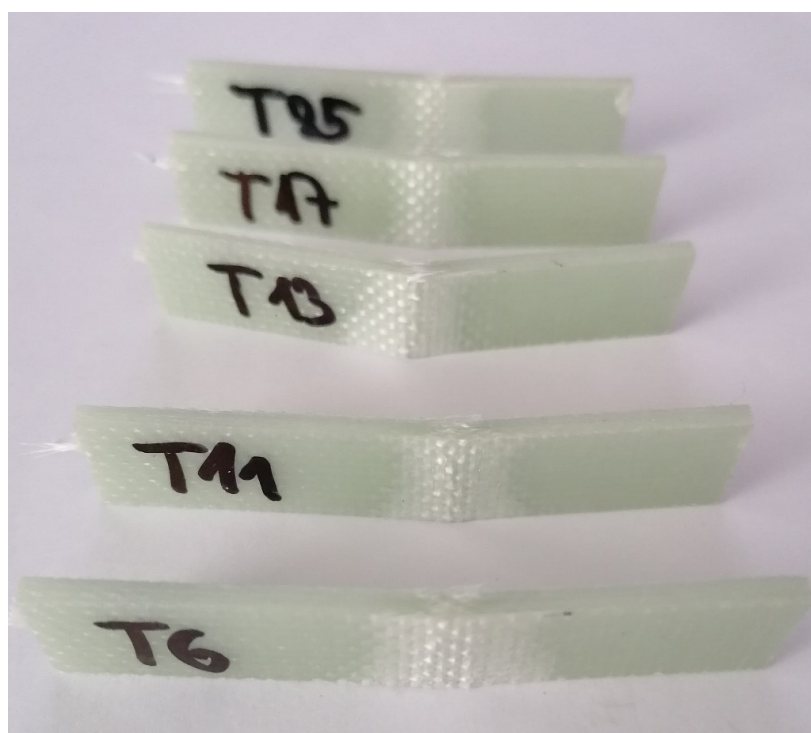
*Tab. 4 Rázová houževnatost vzorků z tkaniny (vlastní zpracování)*

<b>Vzorčky</b>	<b>Tloušťka</b>	<b>Práce</b>	<b>Rázová houževnatost</b>
<b>ks</b>	<b>mm</b>	<b>J</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup></b>
T1	2,8	5,15	122,6
T2	2,9	4,6	105,67
T3	2,8	5,23	124,49
T4	2,8	4,7	112,02
T5	2,9	5,33	122,45
T6	2,8	5,14	122,33
T7	2,8	4,71	112,16
T8	2,8	4,42	105,16
T9	2,8	5,03	119,72
T10	2,8	5,02	119,58
T11	2,8	4,63	110,22
T12	2,8	5,5	130,9
T13	2,8	5,33	127,01
T14	2,8	4,54	108,07
T15	2,8	4,36	103,8
T16	2,9	4,62	106,31
T17	2,8	4,61	109,88
T18	2,8	5,31	126,47
T19	2,8	5,18	123,23
T20	2,7	4,07	100,6
T21	2,8	5,36	127,62
T22	2,7	3,72	91,78
T23	2,8	5,3	126,17
T24	2,7	5,06	124,96
T25	2,7	4,36	107,62





Obr. 47 Rázová houževnatost vzorků z tkaniny (vlastní zpracování)



Obr. 48 Vzorky z tkaniny po testu (vlastní zpracování)



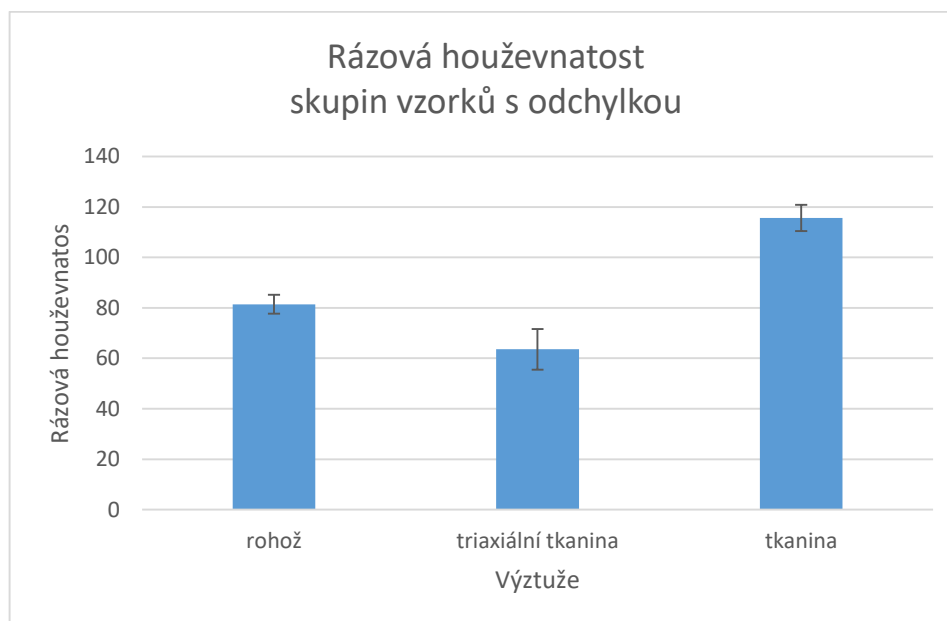
*Obr. 49 Vzorčky tkaniny po testu (vlastní zpracování)*

## 6.4 Porovnání skupin vzorků

Pro porovnání výsledků daných výztuží byla vytvořena tabulka, ve které lze vidět průměrné rázové houževnatosti podle druhu výztuží a jejich odchylek. Pro větší přehlednost byl vytvořen také graf (Obr. 50). V grafu je zaznamenána i odchylka pomocí značky umístěné na vrcholu každého sloupce.

Tab. 5 Tabulka průměrné rázové houževnatosti u jednotlivých materiálů včetně odchylek (vlastní zpracování)

	Rohož	Triaxiální	Tkanina
Průměrná ráz. Houževnatost	81,42	63,57	115,63
Odchylka	7,55	16,04	10,35



Obr. 50 Rázová houževnatost skupin vzorků s odchylkou (vlastní zpracování)

Z obrázku (Obr. 50) a tabulky (Tab. 5) lze vidět průměrné hodnoty rázových houževnatostí jednotlivých skupin měření a jejich odchylky. Vzorky, které byly vyrobeny z netkané rohože, mají průměrnou rázovou houževnatost  $81,42 \text{ kJ/m}^2$  s odchylkou  $7,55 \text{ kJ/m}^2$ . Vzorky vyrobeny z triaxiální tkaniny mají průměrnou rázovou houževnatost  $63,57 \text{ kJ/m}^2$  s odchylkou  $16,04 \text{ kJ/m}^2$ , ale je třeba zdůraznit, že v tomto případě záleží na orientaci vláken této výztuže. Vzorky s tkaninou mají průměrnou rázovou houževnatost  $115,63 \text{ kJ/m}^2$  s odchylkou  $10,35 \text{ kJ/m}^2$ .

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zkoumat vliv výztuží kompozitu na rázovou odolnost daného kompozitu. Tato práce neřešila materiál vláken, ale pouze jejich uspořádání. Teoretická část byla zaměřena na popis kompozitních materiálů, jejich popis a základní rozdělení. Byly zde popsány výztuže, jejich možné tvary, materiály a způsoby uspořádání vláken v kompozitním materiálu. Další kapitola se zabývala popisem matric. Dále jsou v teoretické části popsány základní technologie výroby kompozitů a také jsou zde popsány základní druhy statických i dynamických zkoušek materiálů a na konec je zde popsána rázová odolnost.

V teoretické části je nejdříve popsán postup výroby laminátových desek. Byly vyrobeny celkem tři desky. Pro každou desku byly použity jiné druhy skelných výztuží. Byla použita netkaná skelná rohož, triaxiální tkanina a tkanina s plátňovou vazbou. Dle normy ČSN EN ISO 179-1 měla být tloušťka jednoho vzorku 3 mm, proto měla každá deska jiný počet vrstev výztuží. Rohože bylo použito 5 vrstev, triaxiální tkaniny 3 vrstvy a tkanina s plátňovou vazbou měla 10 vrstev. Pro všechny tři desky byla použita stejná matrice pryskyřice LH 385 a tužidla 285 (MGS) v poměru 100:40. Dle normy ČSN EN ISO 179-1 byly z vyrobených laminátových desek vyřezány vzorky o velikosti 75x15 mm. Vzorky byly vyřezány pomocí vodního paprsku. Následně byla všem vzorkům změřena jejich tloušťka. Tyto rozměry jsou zaneseny v tabulkách (Tab. 1), (Tab. 2) a (Tab. 3) a byly také jednotlivě zapsány do softwaru pro výpočet rázové houževnatosti. Každý vzorek byl označen podle druhu výztuže a pořadového čísla.

Změřené a označené vzorky byly postupně přeráženy na Charpyho kladivě. Bylo použito kladivo 7,5 J a podle normy bylo nastaveno rozpětí rozpěr, o které se opírala zkušební tělesa na 60 mm  $\approx$  20 h. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru, který byl propojen s Charpyho kladivem. Tabulky a grafy byly zpracovány v programu excel.

Výsledky měření jsou znázorněny v tabulkách (Tab. 1), (Tab. 2), (Tab. 3) a (Tab. 4) a ke každé tabulce byl vytvořen sloupcový graf pro větší přehlednost. Vzorky s netkanou rohoží byly označeny písmenem R, bylo přeráženo 30 kusů, jejich průměrná tloušťka byla 3,4 mm s odchylkou 0,14 mm a mají průměrnou rázovou houževnatost 81,42 kJ/m<sup>2</sup> s odchylkou 7,55 kJ/m<sup>2</sup>. Vzorky byly kompletně přeráženy a deformace vláken ve vzorcích byla na tahové straně. Vzorky s triaxiální tkaninou byly označeny písmenem B, bylo přeráženo 22 kusů, jejich průměrná tloušťka byla 3,41 mm s odchylkou 0,28 mm. Vzorky nebyly kompletně

přeraženy a deformace vláken ve vzorcích byla na tahové straně. Každý vzorek měl neporušená vlákna v jedné vrstvě.

Čtyři vzorky z této skupiny mají výrazně vyšší rázovou houževnatost než ostatní vzorky se stejnou výztuží. Tento jev byl způsoben orientací vláken. Průměr rázové houževnatosti těchto čtyř samostatných vzorků je  $95,26 \text{ kJ/m}^2$  a odchylka  $4,59 \text{ kJ/m}^2$ . Vzorky s výztuží z tkaniny s plátňovou vazbou byly označeny písmenem T a bylo jich 25 kusů, jejich průměrná tloušťka byla  $2,8 \text{ mm}$  s odchylkou  $0,05 \text{ mm}$ , jejich průměrná rázová houževnatost je  $115,63 \text{ kJ/m}^2$  s odchylkou  $10,35 \text{ kJ/m}^2$ . Vzorky nebyly kompletně přeraženy a deformace vláken ve vzorcích byla hlavně na tlakové straně a minimálně na tahové straně.

Toto měření bylo zaměřeno na vliv výztuží v kompozitním systému. Z naměřených dat vyplývá, že vhodně zvolený počet vrstev a struktura uspořádání zvolených výztuží má zásadní vliv na rázovou houževnatost kompozitního systému a na vzniklé deformace.

Dále lze pozorovat, že tloušťka jednotlivých vzorků neměla na výslednou rázovou houževnatost žádný vliv.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PTÁČEK, Luděk, c2001. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [2] ZBRANEK, Ondřej, 2009. *Rekonstrukce zařízení pro víceosé rázové namáhání tuhých plastů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 48 s., 19 s. obr. příloh. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/9168>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Žaludek, Milan.
- [3] MIKULA, Martin, 2012. *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN* [online]. Brno: Vysoké učení technické [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54627](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54627).
- [4] POLÁŠEK, Zdeněk, 2013. *Polymerní kompozitní materiály v elektrotechnické praxi*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 98 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/24537>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.
- [5] SKUCIUS, Marian, 2019. *Balistická odolnost kompozitních materiálů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 56 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45351>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bílek, Ondřej.
- [6] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN, 1987. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 294 s.
- [7] PTÁČEK, Luděk, c1999. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [8] BĚHÁLEK, Luboš, 2019. Zpracování reaktoplastů a ostatní vybrané technologie zpracování plastů. In: *Technická univerzita v Liberci* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=200198>
- [9] Lisování pomocí vakua, ©2022. In: *SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ* [online]. Krnov: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [10] BOUCHAL, Petr, 2014. Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže. In: *TECHNOLOGIE VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ UHLÍKOVÝCH*

- KOMPOZITŮ [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=84979](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84979)
- [11] Skelné tkaniny, c2022. In: *Element-shop* [online]. Velký Újezd: ELEMENT-SHOP.CZ, [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/skelne-tkaniny/>
- [12] Pultruze (tažení), © 2022. In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. Krnov: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [13] Navíjení, © 2022. In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. Krnov: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů, [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [14] 2D tkaniny, 2022. *Veba* [online]. Broumov: VEBA [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/2d-tkaniny>
- [15] ONDROUŠKOVÁ, Marie, © 2022. Druhy textilních materiálů. In: *SlidePlayer* [online]. SlidePlayer.cz [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3409618/>
- [16] Zkouška tahem. In: *Elektronická učebnice-ELUC* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1566>
- [17] ZAVADIL, Tomáš. Zkoušky vlastností vzorků z plastu vyrobených 3D tiskem, 2019. In: Fakulta strojní ČVUT v Praze [online]. Praha: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84956/F2-BP-2019-Zavadil-Tomas-Mechanicke%20vlastnosti%20vzorku%20z%20plastu%20vyrobenych%203D%20tiskem.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [18] OŠŤÁDAL, Josef, 2011. *ZKOUŠKY TVARĚTELNOSTI A JEJICH UPLATNĚNÍ V PRAXI* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 34 s. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5106/final-thesis.pdf?sequence=6>.  
Bakalářská.
- [19] LECIÁN, Václav, 2014. *Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 112 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/28574>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Žaludek, Milan.

- [20] Produktový katalog, © 2018-2022. In: *Havel Composites* [online]. Práslavice: Havel Composites. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/HAVEL%20katalog%202021%281%29.pdf>
- [21] 3D tkaniny, 2022. *Veba* [online]. Broumov: VEBA [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/3d-tkaniny>
- [22] SHYR, Tien-Wei a Yu-Hao PAN. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures* [online]. 2003, 2003, **62**(2), 193-203 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/S0263-8223(03)00114-4
- [23] SHAH, S.Z.H., S. KARUPPANAN, P.S.M. MEGAT-YUSOFF a Z. SAJID. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review. *Composite Structures* [online]. 2019, **217**, 100-121 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2019.03.021
- [24] YOKOYAMA, N.O., M.V. DONADON a S.F.M. DE ALMEIDA. A numerical study on the impact resistance of composite shells using an energy based failure model. *Composite Structures* [online]. 2010, **93**(1), 142-152 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2010.06.006
- [25] MALIK, M.H., A.F.M. ARIF, F.A. AL-SULAIMAN a Z. KHAN. Impact resistance of composite laminate flat plates – A parametric sensitivity analysis approach. *Composite Structures* [online]. 2013, **102**, 138-147 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2013.02.030
- [26] GE, Xinxin, Pan ZHANG, Fei ZHAO, Ming LIU, Jun LIU a Yuansheng CHENG. Experimental and numerical investigations on the dynamic response of woven carbon fiber reinforced thick composite laminates under low-velocity impact. *Composite Structures* [online]. 2022, **279** [cit. 2022-05-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2021.114792
- [27] JANG, B.Z., L.C. CHEN, C.Z. WANG, H.T. LIN a R.H. ZEE. Impact resistance and energy absorption mechanisms in hybrid composites. *Composites Science and Technology* [online]. 1989, **34**(4), 305-335 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/0266-3538(89)90002-X
- [28] ČSN EN ISO 179, *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*, Český normalizační institut, 1998



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ks kus

mm milimetr

cm centimetr

m<sup>2</sup> metr čtvereční

g gram

J joul

kJ kilo joul

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Rozdělení kompozitních materiálů [6]</i> .....	11
<i>Obr. 2 Druhy výztuží [10]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Rovíng [20]</i> .....	13
<i>Obr. 4 Skelná rohož [11]</i> .....	13
<i>Obr. 5 Hybridní tkanina [20]</i> .....	14
<i>Obr. 6 Plátňová vazba [14]</i> .....	14
<i>Obr. 7 Keprová vazba [14]</i> .....	15
<i>Obr. 8 Panama vazba [14]</i> .....	15
<i>Obr. 9 Atlasová vazba [15]</i> .....	16
<i>Obr. 10 Příklad použití 3D tkaniny [21]</i> .....	16
<i>Obr. 11 punčocha z uhlíkových vláken [20]</i> .....	16
<i>Obr. 12 Tkanina ze skelných vláken [11]</i> .....	17
<i>Obr. 13 Tkanina z uhlíkových vláken [11]</i> .....	18
<i>Obr. 14 Tkanina z aramidových vláken [11]</i> .....	19
<i>Obr. 15 Ruční kladení [8]</i> .....	24
<i>Obr. 16 Stříkání [8]</i> .....	25
<i>Obr. 17 Lisování [9]</i> .....	26
<i>Obr. 18 Tažení [12]</i> .....	27
<i>Obr. 19 Navíjení [13]</i> .....	27
<i>Obr. 20 Hydraulický univerzální zkušební stroj [16]</i> .....	28
<i>Obr. 21 Tahový diagram [18]</i> .....	29
<i>Obr. 22 Zkouška tahem – zkušební vzorek [17]</i> .....	30
<i>Obr. 23 Zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem [19]</i> .....	31
<i>Obr. 24 Zkouška ohybem [18]</i> .....	32
<i>Obr. 25 Charpyho kladivo a zkušební vzorek [19]</i> .....	33
<i>Obr. 26 Možné směry rázu [22]</i> .....	34
<i>Obr. 27 Označení metody a typy zkušebních těles pro materiály vykazující mezivrstvé smykové porušení [28]</i> .....	35
<i>Obr. 28 Padostroj [22]</i> .....	37
<i>Obr. 29 Fotografie oblasti celkového poškození po nárazové zkoušce [22]</i> .....	40
<i>Obr. 30 Skelná tkanina (vlastní zpracování)</i> .....	44
<i>Obr. 31 Skelná rohož (vlastní zpracování)</i> .....	45
<i>Obr. 32 Triaxiální tkanina (vlastní zpracování)</i> .....	45
<i>Obr. 33 Nachystaná forma (vlastní zpracování)</i> .....	46

<i>Obr. 34</i> Nastříhané výztuže (vlastní zpracování).....	46
<i>Obr. 35</i> Výztuže zalité v matrici (vlastní zpracování).....	47
<i>Obr. 36</i> Odformované laminátové desky (vlastní zpracování) .....	48
<i>Obr. 37</i> Vyřezané vzorky (vlastní zpracování).....	48
<i>Obr. 38</i> Charpyho kladivo (vlastní zpracování) .....	49
<i>Obr. 39</i> Uložení vzorku ve zkušebním stroji .....	49
<i>Obr. 40</i> Rázová houževnatost vzorků z rohože (vlastní zpracování) .....	51
<i>Obr. 41</i> Vzorky z rohože po testu (vlastní zpracování) .....	51
<i>Obr. 42</i> Vzorky z rohože po testu (vlastní zpracování) .....	52
<i>Obr. 43</i> Rázová houževnatost vzorků z triaxiální tkaniny (vlastní zpracování) .....	54
<i>Obr. 44</i> Vzorky z triaxiální tkaniny po testu (vlastní zpracování) .....	54
<i>Obr. 45</i> Vzorky z triaxiální tkaniny po testu (vlastní zpracování) .....	55
<i>Obr. 46</i> Deska z triaxiální tkaniny po řezání na vodním paprsku (vlastní zpracování) .....	55
<i>Obr. 47</i> Rázová houževnatost vzorků z tkaniny (vlastní zpracování) .....	57
<i>Obr. 48</i> Vzorky z tkaniny po testu (vlastní zpracování) .....	57
<i>Obr. 49</i> Vzorky tkaniny po testu (vlastní zpracování) .....	58
<i>Obr. 50</i> Rázová houževnatost skupin vzorků s odchylkou (vlastní zpracování) .....	59

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Typy a rozměry zkušebních těles a rozpětí podpěr [28] .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2 Rázová houževnatost vzorků z rohože (vlastní zpracování) .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 3 Rázová houževnatost vzorků z triaxální tkaniny (vlastní zpracování).....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4 Rázová houževnatost vzorků z tkaniny (vlastní zpracování) .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5 Tabulka průměrné rázové houževnanosti u jednotlivých materiálů včetně odchylek (vlastní zpracování) .....</i>	<i>59</i>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA P I : TECHNICKÝ LIST SKELNÉ PRÁŠKOVÉ ROHOŽE

PŘÍLOHA P II : TECHNICKÝ LIST AEROGLOSS GLASS FABRICS

PŘÍLOHA P III : TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

# PŘÍLOHA P I : TECHNICKÝ LIST SKELNÉ PRÁŠKOVÉ ROHOŽE



# E6

# P20 Powder Chopped Stand Mats

For Hand Lay-up

P20 Powder Chopped Strand Mat is made of randomly distributed chopped E6 glass strands held together by a powder binder. P20 is compatible with unsaturated polyester, vinyl ester, epoxy and phenolic resins. P20 is designed mainly for use in the hand lay-up process and also suitable for use in filament winding, compression molding and continuous laminating processes. Its end-use applications include boats, bath equipment, automotive parts, chemical corrosion resistant pipes, tanks, cooling towers and building components.



### Product Features

- Soft mat, ease of manual tearing apart, good conformability
- Good wet-through and fast wet-out in resins, rapid air release reducing rolling out time and increasing productivity
- Low resin consumption
- High mechanical strength of the composite products
- Superior acid corrosion resistance

### Packaging

Each Powder Chopped Strand Mat is wound onto a paper tube which has an inside diameter of 90mm. The roll outside diameter is approximately 265mm. Each roll is wrapped up in plastic film and then packed in a cardboard box. The rolls are stacked horizontally or vertically onto pallets. All pallets are stretch wrapped and strapped to maintain stability during transport.

### Product Specifications

Property	Area Weight (%)	Moisture Content (%)	Size Content (%)	Breakage Strength (N)
Methods	ISO 3374	ISO 3344	ISO 1887	ISO 3342
EMC225	±7.5	±0.20	4.5±1.5	≥60
EMC300	±7.5	±0.20	3.5±1.1	≥90
EMC375	±7.5	±0.20	2.8±0.9	≥100
EMC450	±7.5	±0.20	2.5±0.8	≥120
EMC600	±7.5	±0.20	2.4±0.8	≥150
EMC900	±7.5	±0.20	2.1±0.6	≥200

Size	1040		1270		1524	
	Length, m	Weight, kg	Length, m	Weight, kg	Length, m	Weight, kg
EMC225	119.7	28	119.7	34	119.7	41
EMC300	96.2	30	96.2	37	96.2	44
EMC375	76.9	30	76.9	37	76.9	44
EMC450	79.1	37	79.1	45	79.1	54
EMC600	59.3	37	59.3	45	59.3	54
EMC900	39.5	37	39.5	45	39.5	54

### Storage

Unless otherwise specified, powder chopped strand mats should be stored in a cool, dry, water-proof area. It is recommended that the room temperature and humidity be always maintained at 15°C to 35°C and 35% to 65% respectively.



## JUSHI GROUP CO., LTD.

J1023-06 09.07 版权所有: © 巨石集团有限公司 巨石集团有限公司 巨石集团有限公司

Add: Tongxiang Economic Development Zone, Zhejiang 314500, PRC International Sales: +86-573-88181026 Fax: +86-573-88181058  
 Domestic Sales: +86-573-88181016 Fax: +86-573-88136222 Customer Service: +86-573-88181017 Fax: +86-573-88181388  
 Http://www.jushi.com E-mail: info@jushi.com

## PŘÍLOHA P II : TECHNICKÝ LIST AEROGLOSS GLASS FABRIC



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.  
 Svědlice 67  
 783 54 Přáslavice  
 tel.: +420 585 129 011  
 fax: +420 585 129 040  
 info@havel-composites.com  
 www.havel-composites.com  
 IČ: 25907379  
 DIČ: CZ25907379

## AEROGLOSS GLASS FABRICS

Weave	Density (ends/cm)		Yarn (Tex)		Fabric Width(mm)	Fabric Weight (GSM)	Standard Weight (GSM)	Tensile Strength (N/25mm)		Moisture Content (%)	Loss on Ignition (%)
	0°(Warp)	90°(Weft)	0°(Warp)	90°(Weft)				0°(Warp)	90°(Weft)		
Plain	16	15	33	33	1000	110	110 ± 10	400	400	0-0.2	0.3-0.8
Twill	16	15	33	33	1000	110	110 ± 10	400	400	0-0.2	0.3-0.8
Twill	16	13	66	66	1000	200	200 ± 20	900	700	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	99	99	1000	140	140 ± 11	600	600	0-0.2	0.3-0.8
Plain	12	12	66	66	1000	160	160 ± 12	700	650	0-0.2	0.3-0.8
Twill	12	12	66	66	1000	160	160 ± 12	700	650	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	132	132	1000	200	200 ± 16	650	550	0-0.2	0.3-0.8
Plain	6	5	200	200	1000	220	220 ± 18	650	550	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	200	200	1000	280	280 ± 24	1000	800	0-0.2	0.3-0.8
Twill	8	7	200	200	1000	280	280 ± 24	1000	800	0-0.2	0.3-0.8
Plain	8	7	264	264	1000	390	390 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Twill	8	7	264	264	1000	390	390 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Twill	6	6	330	330	1000	390	390 ± 32	1200	1100	0-0.2	0.3-0.8
Plain	2.9	2.9	600	600	1000	350	350 ± 28	2200	2000	0-0.2	0.3-0.8
Plain	3.2	4	600	600	1000	450	450 ± 36	2700	2400	0-0.2	0.3-0.8

### Note for the reader

Havel Composites CZ s.r.o. (Havel) was convinced of the accuracy of the information provided at the time this material was prepared, or the information was taken from sources that the company believed to be reliable; however, the user is responsible for studying and understanding other relevant sources of information in such a way as to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and handling of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. For all products supplied by Havel, Havel's sales terms and conditions apply. THE COMPANY MAKES NO WARRANTY, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, TO ANY PRODUCT OR ITS MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. HAVEL MAKES NO WARRANTY CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION CONTAINED BY HAVEL, except that its products will be in conformity with Havel's technical specifications. The information provided here does not constitute an offer for the sale of any product.

Zpracoval: Ing. Richard Moravec

Dne: 1.3.2019

## PŘÍLOHA P III : TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE



[HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.](http://www.havel-composites.cz)  
[Svéšedice 67](mailto:svsedice@havel-composites.cz)  
[783 84 Prácheň](mailto:783 84 Prácheň)  
tel.: +420 585 129 011  
[www.havel-composites.com](http://www.havel-composites.com)  
IČ: 25907379  
DIČ: CZ25907379

### TECHNICKÝ LIST

#### EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE LH385

**Všeobecně:**

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

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

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

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

Teplotní odolnost výrobku bez výrazných změn jejich parametrů:

> + 50-150 °C

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

Schválení: není

Použití: lodě, pádla, kapoty

Systémy laminačních pryskyřic pro vytvrzování při pokojové teplotě



## PŘÍLOHA P III : TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

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

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

Použitá tužidla

Tužidlo	teplotní odolnost (°C)	zpracovatelnost (v min)	poměr LH 385 k tužidlu v gramech
H 533	80	15	100 : 35
H 534	80	20	100 : 35
H 535	80	30	100 : 35
H 536	80	50-70	100 : 35
H 538	120	60-80	100 : 35
H 285	80	50	100 : 40
H 286	100	90	100 : 40
H 287	150	240	100 : 40

Lze také dobarvovat pigmentem.

Vlastnosti pryskyřice

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

Skladování

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

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

Datum 13.1.2014  
 Revize: Ing. Richard Moravec dne 5.5.2021

