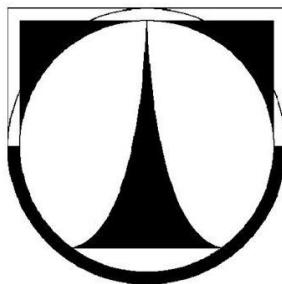


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta textilní



**VLIV OPOTŘEBENÍ NA MECHANICKÉ  
VLASTNOSTI ROVINGŮ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Liberec 2018**

**Bc. Lucie Frantová**



# Vliv opotřebení na mechanické vlastnosti rovingů

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 – Produktové inženýrství  
*Autor práce:* **Bc. Lucie Frantová**  
*Vedoucí práce:* Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering ■

# Influence of wear out on mechanical properties of roving

## Master thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 – Product Engineering  
*Author:* **Bc. Lucie Frantová**  
*Supervisor:* Ing. Miroslava Pechočáková, Ph.D.



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta textilní**

**Akademický rok: 2014/2015**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie Frantová**  
Osobní číslo: **T14000052**  
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**  
Studijní obor: **Produktové inženýrství**  
Název tématu: **Vliv opotřebení na mechanické vlastnosti rovingů**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Vypracujte literární rešerši na téma: anorganická vlákna pro výrobu kompozitních materiálů (zaměřte se na uhlíková a skleněná vlákna); využití kompozitů s anorganickou výztuží v různých odvětvích průmyslu; hodnocení mechanických vlastností rovingů. Uveďte zdravotní rizika při práci s anorganickými vlákny.
2. Navrhněte a realizujte experiment testování mechanických vlastností rovingů a proveďte simulované opotřebení rovingů. Porovnejte mechanické vlastnosti před a po opotřebení.
3. Zhodnoťte možnosti sledování úletu částic při simulovaném opotřebení z hlediska množství a distribuce délky úlomků vláken.
4. Naměřené mechanické vlastnosti rovingů vyhodnoťte a interpretujte.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**GOTTFRIED, W. Ehrenstein: Polymerní kompozitní materiály, SCIENTIA Praha 2009**

**RAPISARDA, Venerando a Carla LORETO: Cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by glass fibers on human alveolar epithelial cell line A549. Toxicology in Vitro. Italy: ELSEVIER, 2014, 22.1.2015, 29(3): 551557 ISSN 0887-2333.**

**COSTA, Roser: Man-Made Mineral Fibers and the Respiratory Tract. Archivos de Bronconeumología (English Edition). Spain: ELSEVIER, 2012, 1.12.2012, 48(12): 460468**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.**

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Martina Novotná**

Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**27. března 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2016**

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.

děkanka



doc. Ing. Vladimír Bajžlk, Ph.D.

vedoucí katedry

V Liberci dne 19. listopadu 2015

## Žádost o změnu termínu odevzdání závěrečné práce

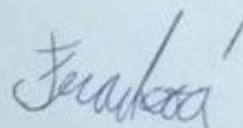
Jméno a příjmení: Bc. Lucie Frantová  
Osobní číslo: T14000052  
Studijní program: Průmyslové inženýrství  
Studijní obor: Produktové inženýrství (PIT)  
Zadávací katedra: KHT

Žádám o změnu termínu odevzdání diplomové práce z 13. 5. 2016 na 5. 1. 2018.

Odůvodnění žádosti: Z důvodu časové náročnosti závěrečné práce.

V Liberci dne: 15. 12. 2017

Podpis:



Vyjádření vedoucího práce:

Souhlasím Lucie Frantová

Vyjádření vedoucího katedry:

Souhlasím B. J.

## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

# Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D., tedy vedoucí mé diplomové práce za poskytnutí odborného vedení, cenné rady a především věnovaný čas. Dále bych chtěla poděkovat členům katedry KMI za možnost provedení experimentu.



# Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o vlivu mechanického opotřebení na výsledné mechanické vlastnosti rovingů. V rešeršní části jsou charakterizovány používané materiály, tedy uhlíkové a skleněné rovingy. Dále jsou popsány možnosti odírání rovingů a zdravotní rizika spojená s vdechováním těchto anorganických vláken.

Experimentální část je věnována nejprve nalezení optimálního postupu měření na Aparatuře pro oděr a poté vyhodnocení měření. Jsou zde zpracovány výsledky váhového úbytku, ztráty pevnosti, úletu částic a měření na přístroji Zweigle G552.

Výsledky měření jsou analyzovány, graficky zpracovány a okomentovány. V závěru práce jsou výsledky stručně shrnuty.

## **Klíčová slova:**

Odírání

Mechanické vlastnosti

Uhlíkové rovingy

Skleněné rovingy

# Abstract

This diploma thesis deals with the influence of mechanical wear on the resulting mechanical properties of rovings. In the literature search selection used materials, i.e. carbon and glass rovings are characterized. The possibilities of rovings abrasion and the health risks associated with inhalation of these inorganic fibers are described as well.

The experimental part is devoted to finding an optimal measurement process on the Apparatus for abrasion and to evaluating of the measurement values. The results of weight loss, loss of strength, particle removal and measuring on Zweigle G552 apparatus are processed.

The measurement results are analyzed, graphically evaluated and commented. At the end of the work, the results are briefly summarized.

## **Keywords:**

Abrasion

Mechanical properties

Carbon rovings

Glass rovings

# Obsah

Seznam použitých symbolů .....	10
Seznam použitých zkratek .....	10
Úvod.....	11
1 Rešeršní část .....	12
1.1 Uhlíkové a skleněné rovingy.....	12
1.1.1 Skleněná vlákna/rovingy.....	12
Skleněná vlákna obecně.....	12
Výroba .....	13
Vlastnosti .....	14
1.1.2 Uhlíková vlákna/rovingy .....	15
Uhlíková vlákna, rozdělení .....	15
Výroba .....	16
Souhrn vlastností uhlíkových vláken a kompozitů .....	17
Využití a aplikace uhlíkových vláken a kompozitů.....	18
Použití vláken v automobilovém průmyslu .....	19
Použití uhlíkových vláken pro výrobu Formule F1 .....	19
1.1.3 Kapilarita .....	20
1.2 Přístroje .....	21
1.2.1 Zweigle G552 .....	21
1.3 Studie zkoumající tření, otěr, opotřebení .....	22
Skleněné-epoxidové kompozity.....	22
Studie vlastností opotřebení Al-SiC kompozitů .....	23
1.4 Zdravotní rizika při práci s anorganickými vlákny .....	23
1.4.1 Umělá minerální vlákna a dýchací ústrojí .....	24
1.4.2 Toxikologie in vitro .....	27
1.4.3 Oxidativní stres .....	28
1.4.4 Buněčná smrt .....	29
1.5 Zdravotnické ochranné pomůcky .....	30
1.5.1 Roušky .....	30
1.5.2 Respirátory.....	30
2 Experimentální část.....	32
2.1 Použité materiály.....	32
2.2 Přístroje .....	33
2.2.1 Aparatura pro oděr .....	33
2.2.2 Zweigle .....	34
2.3 Měření .....	34
2.3.1 Doporučený postup měření na Aparatuře pro oděr.....	34
2.3.2 Průběh měření .....	35
2.4 Výsledky měření a diskuze výsledků .....	41
2.4.1 Skleněné rovingy .....	41

2.4.2	Uhlíkové rovingy .....	43
2.4.3	Výsledky sledování úletu částic.....	45
2.4.4	Výsledky trhací zkoušky.....	50
2.4.5	Zkouška na přístroji Zweigle G552 .....	57
3	Závěr .....	60
4	Citovaná literatura.....	62
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam tabulek.....	66

## Seznam použitých symbolů

Zkratka	Název	Jednotka
$A_{max}$	tažnost při maximální dosažené síle	[%]
$\Delta l$	protažení do přetrhu	[mm]
$E_p$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$F$	síla	[N]
$F_{max}$	maximální dosažená síla	[N]
$F_r$	relativní síla	[N/tex]
$h$	výška hladiny kapaliny v kapiláře	[m]
$l$	prodloužená délka	[m]
$l_0$	původní délka	[m]
$L_T$	tržná délka	[m]
$m$	hmotnost	[kg]
$P$	pevnost	[N]
$R$	vnitřní poloměr kapiláry	[ $\mu\text{m}$ ]
$S$	plocha příčného řezu vlákna	[ $\text{m}^2$ ]
$T$	jemnost	[tex]
$U$	elektrické napětí	[V]
$v$	rychlost	[m/s]
$\varepsilon$	poměrná deformace	[%]
$\rho$	hustota	[ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
$\sigma$	povrchové napětí	[N/m]
$\sigma$	napětí v tahu	[Pa]

## Seznam použitých zkratk

DNA	Deoxyribonukleová kyselina
AIDS	Syndrom získaného selhání imunity
PAN	Polyakrylonitril
MMMF	Machine made mineral fibers

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá odíráním rovingů z anorganických vláken. „Přásty“ z anorganických vláken, tedy rovingy, se používají především na výrobu kompozitů. Hlavní výhodou těchto materiálů je jejich pevnost. Do přípravy rovingů pro zpracování na kompozity patří jejich převinutí z dodávaných velkých cívek na cívky používané při výrobě. Při tomto převinutí, může dojít k mechanickému poškození rovingů, což by mohlo mít za následek především ztrátu pevnosti.

Výrobci kompozitů používají jako vstupní hodnoty pro rovingy hodnoty přímo od dodavatele. Cílem této práce je zjistit, zda se tyto hodnoty mechanických vlastností mění v závislosti na opotřebení vzniklém při převíjení.

Pro tento účel byla použita speciální Aparatura pro cyklický oděr, která simuluje odírání při převíjení. Rovingy jsou dále podrobeny odírací zkoušce na přístroji Zweigle. Pro tento experiment jsou použity skleněné a uhlíkové rovingy. V práci je popsán postup hledání optimálního spojení rovingů pro co nejuživější simulovaný oděr na Aparatuře. Je zde sledován úbytek hmotnosti a změny mechanických vlastností před oděrem a po oděru. Vzhledem ke zdravotnímu riziku zkoumanému v rešeršní části je dále sledován úlet částic, jejich četnost a délka.

## **1 Rešeršní část**

Rovingy jsou používané jako výztuž pro kompozitní materiály, které dále obsahují matrici a aditiva. Jejich hlavním úkolem je zajistit dostatečnou tuhost a pevnost materiálu. Nejvíce používaný typ výztuže jsou skleněná, uhlíková a kevlarová vlákna. Kompozity jsou často vystaveny zatížení a musí být schopné odolávat napětí a tahům. (1)

Rovingy se dodávají na velkých cívkách a pro jejich další zpracování je třeba je přesoukat na cívky menších rozměrů. Při přesoukávání může dojít k mechanickému poškození a snížení pevnosti.

V rešeršní části je popsána obecná problematika opotřebení a to hlavně kompozitů, ve kterých se nacházejí rovingy. Dále pojednává o různých druzích měření a zkoumání oděru. Je zde uvedeno několik studií, které se zaměřují na tuto problematiku.

### **1.1 Uhlíkové a skleněné rovingy**

#### **1.1.1 Skleněná vlákna/rovingy**

Skleněná vlákna se vyrábějí ve dvou formách a to buď jako stříž nebo v podobě nekonečných vláken. V porovnání s masivním sklem mají skleněná vlákna vyšší pevnost v tahu. Jejich využití se týká hlavně kompozitních materiálů, dále se využívají ve stavebním či chemickém průmyslu. (2)

#### **Skleněná vlákna obecně**

Skleněná vlákna jsou anorganického původu, jsou využívána hlavně díky své vysoké pevnosti, dobrým elektroizolačním vlastnostem, vysoké hodnotě Youngova modulu v tahu, dobré chemické odolnosti, výborným tepelně i zvukově izolačním vlastnostem a vysoké odolnosti vůči vysokým teplotám. (2)

Skleněná vlákna se využívají k výrobě kompozitních materiálů a to hlavně díky jejich mechanickým a tepelným vlastnostem. Pro kompozity se využívá skleněných vláken: E, S, C, ACR a křemenných vláken. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. Samotná technologie zpracování moderních kompozitních prvků zahrnuje kromě prosycování textilních vrstev a ručního kladení také navíjení vláken, využití autoklávové techniky, injekční vstřikování, tlakové prosycování pryskyřice, tažení profilů a další způsoby. Skleněná vlákna a jejich kompozity se používají především

v automobilovém průmyslu, dále v leteckém a elektrotechnickém průmyslu, ve stavebnictví a dalších. (2) (3)

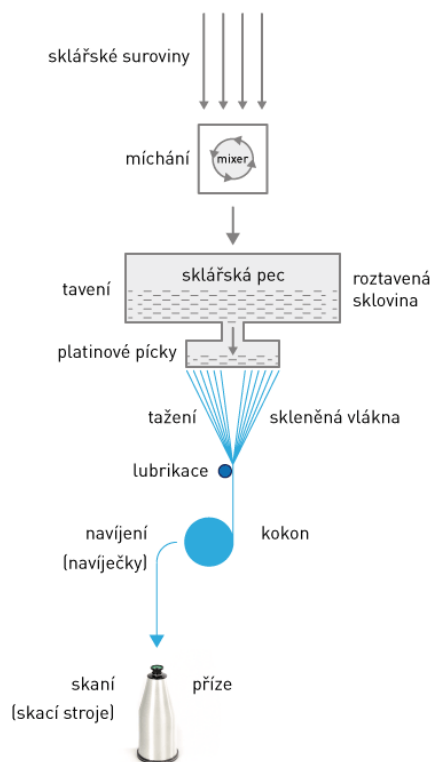
*Tabulka 1 Vlastnosti skleněných vláken (3)*

	<b>Sklo E Saint- Globain Vertex, a.s.</b>	<b>Sklo E Údaje z literatury</b>	<b>Sklo S</b>	<b>Sklo C</b>	<b>Sklo ACR</b>	<b>Křemen né sklo</b>
<b>Průměr [μm]</b>	5-15	9-13	9-13	9-13		8,9
<b>Hustota [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,54	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
<b>Modul pružnosti [GPa]</b>	73	72,4	85,5	69	75	69
<b>Pevnost v tahu [GPa]</b>	2-4	až 3,45	až 4,6	až 3	1,7	3,45
<b>Prodloužení [%]</b>	1,8-3,2	4,8	5,7	4,8		5
<b>Součinitel tepelné roztahivosti</b>	4,9	5	5,6	7,2		
<b>Součinitel tepelné vodivosti</b>	1	1	1	1		
<b>Teplota měknutí [°C]</b>	800	800	970	750		980
<b>Relativní permitivita při frekvenci 1 MHz</b>	5,9-6,4		5-5,4			3,78
<b>Ztrátový činitel při (tanδ) 10 GHz</b>		0,0039				0,002

## **Výroba**

Skleněná vlákna se vyrábí ze směsi sklářského písku, vápence, kaolinu, kolemanitu, kazivce a dalších minoritních přísad v předepsaném poměru. Vyrábějí se v podobě nekonečných vláken. Výroba je kontinuální proces, který probíhá ve sklářských vanách (tavicích agregátech). Tyto vany jsou uzavřené a jejich prostor je vytápěný na potřebnou teplotu, při které dochází k tavení a homogenizaci sklářského kmene. Principem je, že roztavené a homogenizované sklo pozvolna teče z vany a natéká do platinových pícek se dnem obsahujícím trysky (průměr trysek je 1 mm) a má poté tendenci skrz něj prostupovat ven. Roztavená sklovina, tedy její kapky, jsou poté vytaženy z pícky a navedeny na navíječku, která při konstantní rychlosti vydlouží roztavenou sklovinu na vlákna o předepsaném průměru. Konečného průměru vlákna se docílí dlužením proudu skla, které vytéká z trysek, tedy změnou rychlosti vytékání skloviny a rychlosti odtahování. Celý postup je vidět na obrázku 1.1. Mezi operací tažení vláken a navíjení se na vlákna ještě nanáší lubrikant z důvodu lepších vlastností při dalším zpracování a z důvodu zamezení poškození vláken při vzájemném kontaktu. (4) (3)





Obrázek 1.1: Postup výroby skleněných vláken (4)

Vlákna jsou po vydloužení a zchlazení pokryta ochranným povlakem, který se skládá buď z lubrikačních látek, nebo vazebných prostředků. Lubrikační látky se mohou skládat z vosků, želatiny, oleje, škrobu nebo polyvinylalkoholu. Pokud jsou vlákna použita pro kompozity, jsou tyto látky z povrchu odstraněny, z důvodu lepší přilnavosti s matricí. Oproti tomu vazebné prostředky mají dobrou afinitu k polymerní matrici. Výhodou těchto povlaků je snížení adsorpce vody a antistatické působení. (3)

## Vlastnosti

Skleněná vlákna jsou rozměrově stabilní, tzn. po vystavení vysokým či nízkým teplotám se vlákna neroztáhnou a ani nezmenší. Vlákna nejsou schopná absorbovat vodu, takže jsou odolná vůči vlhkosti. Další předností těchto vláken je vysoká pevnost. Nespornou výhodou je jejich nehořlavost, odolnost vůči většině chemikálií, plísním a hnilobě. Skleněné vlákno je skvělý elektrický izolant. (5)

Skleněným vláknům rapidně klesá tahová pevnost při povrchovém narušení, například při mechanickém poškrábání. Vlákna s menšími průměry jsou pevnější. Kompozity s větší pevností v tahu mají vlákna o průměru 3-4  $\mu\text{m}$ . Větší pevnost v tlaku,

který působí ve směru vláken, mají kompozity s vlákny o průměru 60 a více  $\mu\text{m}$ . Běžně používaná skleněná vlákna mají průměr 7-15  $\mu\text{m}$ . (3)

Povrch skleněných vláken je hydrofilní, vlákna jsou schopná adsorbovat přibližně 0,1 hm % vody při 65% relativní vlhkosti vzduchu při 20 °C a to nejen na povrchu vláken, ale také v jeho mikroskopických trhlinkách. Například lze pozorovat rychlou adsorpci vlhkosti ihned po vyžhání skleněných vláken (zvážením). Tato vlhkost má za následek také snížení lomové energie skla. Vláknem s obsahem vlhkosti z okolní atmosféry má menší pevnost než čerstvě vyrobené vlákno. Vláknem s vysokým podílem adsorbované vody nemohou dobře vázat polymerní matici. Z tohoto důvodu musí být vlákna, která nebyla chráněna proti vzdušné vlhkosti, před použitím vysušena. To se provádí v horkovzdušných sušárnách. (3)

### **1.1.2 Uhlíková vlákna/rovingy**

Uhlík je prvek, který je všude kolem nás. Hojně se vyskytuje nejen v přírodě, ale můžeme ho nalézt i ve vesmíru v jeho elementární podobě. Je znám již od pradávna, například jako kreslicí prostředek. Ovšem jako prvek je brán až od druhé poloviny 18. století. Mezinárodní název uhlíku, tedy carbon, pochází z latiny. (6)

Z uhlíku můžeme vyrobit vlákna, nejpevnější a nejtvrďší materiál v podobě diamantu, dále aktivní uhlík (adsorbent plynů), héliovou bariéru v podobě skelného uhlíku, nebo nejnovější nanotrubic. (6)

Mezi nejnovější a zásadní objevy v oblasti uhlíku patří již zmíněné nanotrubic, uhlíkové anody pro lithiové dobíjecí články, použití diamantu na polovodičové součástky, uhlíková nanopěna, využití fullerenu v medicíně, vlákno v žárovce a další. (6)

### **Uhlíková vlákna, rozdělení**

V přírodě lze nalézt jakási uhlíková vlákna například v podobě vláknitých a tubulárních krystalů v některých ložiscích grafitu. Jako první zviditelnil uhlíková vlákna Edison v roce 1879, když předvedl svůj vynález v podobě žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem. Od té doby započal postupný vývoj uhlíkových vláken se speciálními vlastnostmi, až do podoby nanotrubic. Uhlíková vlákna jsou využívána již 50 let. (6)

U vláken se vyvinula hlavně vyšší pevnost, elektrická a tepelná vodivost, adsorpční vlastnosti a také modul pružnosti. Vlákna můžeme rozdělit do skupin:

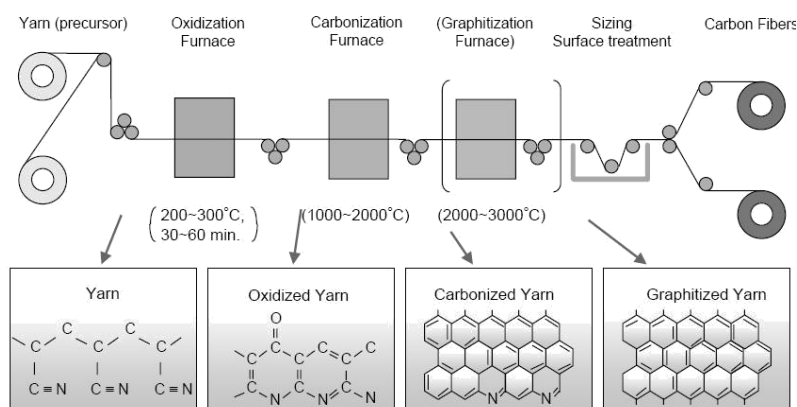
1. Vlákna nižších parametrů - tato vlákna mají pevnost v tahu nad 1000 MPa, modul pružnosti v tahu je nad 100 GPa. Využívají se hlavně jako tepelná izolace, dále proti elektromagnetickým nábojům a záření.
2. Vlákna s vysokými mechanickými parametry - pevnost v tahu se pohybuje mezi 3,5-7 GPa, modul pružnosti je 230-930 GPa. Do této skupiny zahrnujeme například standardní HT uhlíková vlákna, IM vlákna, HM a UMH vlákna,...
3. Aktivní vlákna - mají adsorpční schopnosti a měrný povrch bývá  $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Používají se na čištění plynů a kapalin.
4. Jedno- i vícevrstvé útvary nanotrubic - mají teoretické hodnoty mechanických vlastností. Využívají se díky schopnosti zachytit velký objem iontů, plynů, dále například, slouží jako základní materiál v nanotechnologiích. (6)

## Výroba

Uhlíková vlákna se liší nejen výrobou, ale i zpracováním a množstvím přidaného uhlíku. Surovina používaná k výrobě uhlíkových vláken se nazývá prekurzor. Velké procento vláken je vyrobeno z polyakrylonitrilu (PAN). Při výrobě se používají různé plyny a kapaliny, které reagují s vláknem k dosažení požadovaného efektu.

Na začátku procesu je prekurzor tažen do dlouhých pramenů nebo vláken, poté se zahřeje na velmi vysokou teplotu a přijde do kontaktu s kyslíkem. Vysoká teplota způsobí, že atomy ve vlákně začnou vibrovat, na konci procesu zůstane většina uhlíkových atomů, zbytek je vyloučen. Tento proces se nazývá karbonizace a díky

Obrázek 1.2. Postup výroby uhlíkového vlákna (3)



němu jsou vlákna složena z dlouhých, pevně vzájemně uzamčených řetězců atomů uhlíku a pouze několika atomů jiných než atomy uhlíku. (7)

Po karbonizaci mají vlákna povrch, který se špatně spojuje s epoxidy a ostatními materiály používanými pro kompozity. Z tohoto důvodu se jejich povrch lehce oxiduje. Oxidace je prováděna ponořením vláken do různých plynů, jako je například vzduch, ozón, oxid uhličitý, nebo do kapalin jako je například chlornan sodný nebo kyselina dusičná. Vlákna mohou být potažena elektrolyticky a to tak, že se kladně nabijí v lázni s různými elektricky vodivými materiály. Veškeré povrchové úpravy musí být důkladně kontrolovány, aby nedocházelo k poškození vláken. (7)

Dodatečná úprava uhlíkových vláken se provádí z důvodu omezení adsorpce plynů na povrch vláken, ochraně vláken před vzájemným třením a dále odstranění látek bránících lepší přilnavosti matrice. Při výrobě kompozitu, může vlhkost a plynné látky, které jsou fyzikálně vázány zapříčinit problém. Celý postup výroby uhlíkových vláken je vidět na obrázku 1.2. (3)

Po ošetření povrchu jsou vlákna potažena ochranou před poškozením, ke kterému by mohlo dojít během navíjení, pletení či tkání. Tento proces se nazývá sizing. Potahové materiály jsou volené tak, aby byly kompatibilní s lepidlem používaným při výrobě kompozitů. Mohou to být epoxidové, nylonové, uretanové, a další. Potažená vlákna jsou poté navinuta na cívky, které jsou umístěny do spřádacího stroje. Vlákna jsou poté stočena do přízí o různých velikostech návínů. (7)

### **Souhrn vlastností uhlíkových vláken a kompozitů**

- Tepelné - odolnost tepelným rázům, široké rozpětí a koeficient tepelné vodivosti, nízký koeficient tepelné roztažnosti...
- Mechanické - nízký koeficient tření, odolnost proti únavě, útlum vibrací, vysoká pevnost v tahu,...
- Elektrické a elektromagnetické - nepropustnost elektromagnetického záření, elektrická vodivost, vysoká propustnost rentgenového záření, ... (6)
- Jsou křehká, oproti skleněným vláknům mají prodloužení při přetržení menší. (3)

Jak již bylo zmíněno, uhlíková vlákna jsou nejčastěji vyráběna z prekurzoru PAN vláken. Dále jsou vyráběna například z novoloidových vláken (fenol-aldehydových vláken). Porovnání vlastností těchto vláken je uvedeno v tabulce 2. Průměrná hustota uhlíkových vláken se pohybuje mezi 1,8-2 g/m<sup>3</sup>. Výroba uhlíkového vlákna z viskózy je

značně nevýhodná, jelikož při karbonizaci viskózy se přemění pouze 25 % hmoty původního vlákna. (3)

Tabulka 2. Porovnání vlastností uhlíkových vláken ze dvou prekurzorů (3)

	Novoloid (Kynol®)		PAN	
	800	2000	1500	2000
<b>Teplota zpracování, °C</b>				
<b>Hustota [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,5	1,4	1,8- 1,9	1,9- 2,0
<b>Obsah uhlíku [hm%]</b>	95	99,8	93	99,5
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	500- 700	400- 600	1500-3000	
<b>Poměrné prodloužení při přetržení [%]</b>	2,0-3,0	1,5-2,5	1,0-1,5	
<b>Modul pružnosti [GPa]</b>	200- 300	150- 200	150-300	
<b>Teplota počátku ztráty hmotnosti na vzduchu [°C]</b>	476	573	560	
<b>Tepelná odolnost, ztráta hmotnosti [%], při teplotě vzduchu 350 [°C]</b>	0	0	0	
<b>Tepelná odolnost, ztráta hmotnosti [%], 450 [°C] vzduchu</b>	2,8	2,2	2,4	
<b>Chemická afinita k epoxidovým pryskyřicím</b>	dobrá		horší	

Vlákna obsahují mikroskopické póry, které jsou protažené ve směru podélné osy vlákna. Dále má vlákno i submikroskopické dutiny, které mají v příčném řezu rozměry okolo 3 nm a nacházejí se mezi jednotlivými mikrokristaly. (3)

### **Využití a aplikace uhlíkových vláken a kompozitů**

Uhlíková vlákna mají velkou škálu využití, například v letectví a kosmonautice, jako součást automobilového průmyslu a podobně. Dále se jedná o používání pro rentgenové přístroje, plošné topné elementy, elektromagnetické stínění, izolace či baterie a spoustu dalších. (6)

Uhlíková vlákna se používají i ve sportovním sortimentu a to například v podobě výztuže běžeckých bot, tenisových raket a hokejových holí. Dále se používají v ochranných helmách pro horolezce, jezdce na koních či motocyklisty. Vojenský průmysl nezůstává pozadu, zde se jedná o letadla, rakety a ochranné přílby. Uhlíková

vlákna se hojně používají v letectví a to hlavně proto, že mají vynikající pevnost v poměru své hmotnosti. Využívají se hlavně v komponentech, konstrukcích letadel, pro výrobu ultra lehkých letadel, vrtulníků a také v kosmickém průmyslu.

Velkým přínosem jsou uhlíková vlákna pro lékařství. Z produktů to jsou například protézy. (8)

### **Použití vláken v automobilovém průmyslu**

Uhlíkových vláken, respektive kompozitů se využívá v automobilovém průmyslu již dlouho. Hlavním důvodem je jejich pevnost a zároveň lehkost. Využití je převážně u sportovních a závodních aut, jelikož výroba je velice nákladná. Při tvorbě kompozitních materiálů musí být brán ohled na směr orientace vláken. Výroba je zatím převážně ruční záležitostí. Uhlíkové kompozity lze nalézt například v některých modelech Lamborgini. Samotná firma má svou vlastní technologii na výrobu jednotlivých částí. (9)

### **Použití uhlíkových vláken pro výrobu Formule F1**

Důvodem využití uhlíkových vláken je skutečnost, že jsou třikrát pevnější než ocel a váží přibližně pětinu hmotnosti. Přibližně 80 % pevných částí vozu je vyrobeno z uhlíkových vláken, přitom tvoří jen 20 % celkové hmotnosti vozu. Jedinou nevýhodou kompozitů je praskání pryskyřicové matrice, které je způsobeno vystavením teplotě. (10)

K výrobě Formule 1 se používají uhlíková vlákna, která jsou vyrobena z PAN. Po výrobě jsou vlákna vyčištěna procesem zvaným karbonizace. Po tomto procesu jsou vyrobena jemná vlákna o průměru pětiny lidského vlasu. Vlákna se poté impregnují pryskyřicí, čímž se k sobě spojují. Kompozity z vláken se mohou vrstvit, což je jejich velká výhoda. Tkanina z uhlíkových vláken se pro výrobu Formule F1 nakupuje již s naimpregnovanou pryskyřicí. Z této tkaniny se poté vyřízne potřebný tvar a je uložen do předem vytvořené formy. V autoklávu je po vložení tkaniny zvyšován tlak i teplota z důvodu vytvrzení pryskyřice. (10)

### 1.1.3 Kapilarita

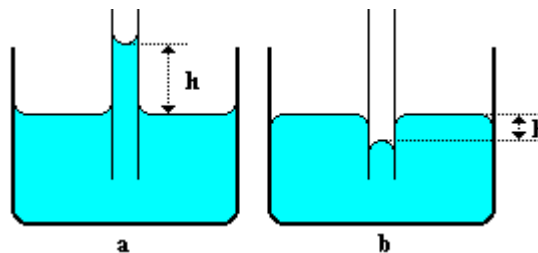
Velký problém při výrobě kompozitů představuje vzdušná vlhkost, kterou jsou vlákna schopná do určité míry pojmout. Matrice se poté špatně spojuje s vlákny. (3)

Dalším problémem u rovingů je kapilární vzlínání mezi jednotlivými vlákny, která jsou schopná pojmout vlhkost například z rukou.

Kapilarita je jev, kdy je pozorováno zakřivení povrchu kapaliny v kapiláře a její snížení či zvýšení vůči hladině kapaliny v nádobě. Kapilára může být například velmi úzká trubice o malém vnitřním průměru, která je ponořena svisle do kapaliny v nádobě. (11)

Rozdělení kapilárních jevů:

1. Kapilární elevace – nastává u kapalin, které smáčejí stěny trubice. Na hladině vytvoří vrchlík, který se nachází výše, než je hladina okolní kapaliny (obrázek 1.3).
2. Kapilární deprese – nastává u kapalin, které nesmáčejí stěny trubice. Na hladině vytvoří vypouklý vrchlík, který se nachází níže, než je hladina okolní kapaliny (obrázek 1.3). (11)



Obrázek 1.3: Kapilární elevace (a) a kapilární deprese (b). (11)

Kapilarita je způsobena kapilárním tlakem. Výšku kapaliny v kapiláře při kapilární elevaci lze vypočítat dle vzorce,

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \text{ [m]} \quad (1)$$

kde  $\sigma$  - povrchové napětí [N/m]

$\rho$  - hustota kapaliny [g/m<sup>3</sup>]

$R$  - vnitřní poloměr kapiláry [ $\mu\text{m}$ ]. (11)

## 1.2 Přístroje

### 1.2.1 Zweigle G552

Zweigle G552 je přístroj, který objektivně vyhodnocuje a porovnává povrchovou úpravu (sizing treatments) přízí. Umožňuje optimální nastavení strojů pro povrchovou úpravu (sizing machine). Díky jeho výsledkům lze následně snížit osnovní poškození. Detekuje poškození způsobené bělením nebo předchozím zpracováním. Je to „přístroj pro hodnocení oděru jednoduchých i skaných přízí, popř. multifilů“ (12). (13)

Pro testování šicích nití a vlákenných přízí ze syntetických materiálů může být použito odírání tyčí (bar) s karbidovou hranou namísto odírání válcem se smirkovým papírem. Vše je zaznamenáváno a analyzováno pomocí počítače (obrázek 1.4). Dále automaticky zaznamenává porušení příze. Každé přerušení příze je nahráváno do počítače s informacemi o poloze příze v testru (1-20) a počet tahů k jejímu přerušení.

Díky získaným výsledkům, lze aplikovat chemickou či mechanickou úpravu a tím zlepšit odolnost v oděru pro jednotlivé nebo skané příze. (13)



Obrázek 1.4: Přístroj Zweigle G552 (13)



### 1.3 Studie zkoumající tření, otěr, opotřebení

#### Skleněné-epoxidové kompozity

Tato studie se zabývá zkoumáním, jaký vliv má výplň kompozitů na tření a klouzavý otěr. Jedná se o tkané skleněné textilie, které obsahovaly E-skelná vlákna o průměru 5-10  $\mu\text{m}$ , matrici a plnidlo. Plnidlo bylo tvořené z částic karbidu křemíku (SiC) a grafitu. (14)

Zkušební vzorky byly vyříznuty na velikost  $5 \times 5 \times 3$  mm. Pro zjištění opotřebení vzorků kompozitů byl použit přístroj pin-on-disc. Test byl proveden na ploše 115 mm za předem určené doby, zatížení a rychlosti. Zatížení bylo 30-70 N, konstantní posuvná vzdálenost byla 5000 m v různých kluzných rychlostech (3, 4 a 5 m/s). Po zkoušce byl zvážen rozdíl mezi počáteční a konečnou hmotností. Pro zajištění opakovatelnosti zkoušek byly provedeny vždy minimálně tři zkoušky. Třecí efekt klouzavého rozhraní vzorku byl naměřený v intervalu 5 min za použití třecího siloměru. Vybrané opotřebované vzorky byly na povrchu potaženy tenkou vrstvou zlata a poté zkoumány za použití rastrovacího elektronového mikroskopu.

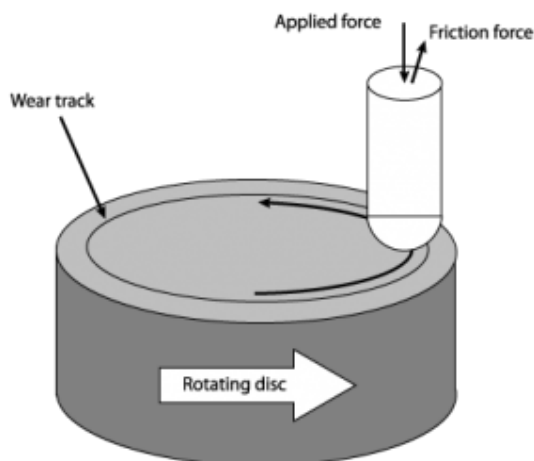
Výsledky naznačují, že existuje silná vzájemná závislost mezi koeficientem tření a opotřebováním bez ohledu na zatížení a posuvné rychlosti. Lze tedy říci, že ztráta opotřebováním se zvyšuje s nárůstem kluzné rychlosti bez ohledu na zatížení. (14)

#### Přístroj na měření opotřebení Pin-on-disc:

Tímto přístrojem se testuje tření. Je to metoda, která určuje koeficient tření, třecí síly a rychlost opotřebení mezi dvěma materiály.

Na obrázku 1.5 je znázorněný přístroj, kde je na kolík vyvíjena síla a disk pod ním rotuje v předem daném směru.

Přístroj může testovat opotřebení v několika simulovaných režimech jako je jednosměrný, obousměrný, rotační režim a ve všech směrech. (15)



Obrázek 1.5: Pin-on-disc přístroj na testování oděru (16)

### **Studie vlastností opotřebení Al-SiC kompozitů**

Ve studii byly zjišťovány vlastnosti opotřebení kompozitů sestávajících z hliníkové matrice s částicemi karbidu křemíku.

Tyto kompozity obsahovaly čtyři hmotnostní podíly karbidu křemíku a to 5 %, 10 %, 20 %, a 25 %. Zkouška opotřebení byla provedena pomocí přístroje pin-on-disk za rychlosti 5, 7, 9 a 11 kgf při konstantní rychlosti 1,0 m/s a srovnávána s hodnotami pozorovanými u čistého uhlíku. Výsledky ukazují, že míra opotřebení se mění lineárně s normálním zatížením, je však nižší v kompozitech, nežli v základním materiálu. Dále bylo v experimentu zjištěno, že se míra opotřebení lineárně snižuje se zvyšujícím se podílem karbidu křemíku a průměrný součinitel tření lineárně klesá s rostoucím normálním zatížením. Nejlépe obstál vzorek s 20 % podílu SiC částic v minimálním opotřebení. (17)

### **1.4 Zdravotní rizika při práci s anorganickými vlákny**

Vdechování úlomků například minerálních vláken patří k velkým zdravotním rizikům. Vlákna se šíří vzduchem a usazují se v plicích. Ukládají se ta vlákna, která nejsou větší než 3  $\mu\text{m}$ . Nejvíce se ukládají vlákna v rozmezí od 0,5-1 $\mu\text{m}$ . Organismus odstraňuje tyto cizí částice z plic pomocí makrofág, tedy žírných buněk. Délka potřebná k úplnému odstranění záleží na druhu vláken. Například až 700 dnů potřebují asbestová vlákna, až 300 dnů potřebují vlákna ze "staré" skelné vaty a až 60 dnů potřebují vlákna ze sklené vaty "nové".

Největší riziko je karcinogenní účinek vdechnutých dlouhých a tenkých vláken s vysokou biologickou odolností. Tyto karcinogenní účinky se potvrdily při pokusech na zvířatech. Jako zdraví škodlivá jsou označována hlavně vlákna vyrobená do roku 1997. Velkým problémem je také vznik štěpných produktů a jemného prachu. (18)

#### **1.4.1 Umělá minerální vlákna a dýchací ústrojí**

Pro to, aby vlákna způsobovala zdravotní rizika, musí mít určité rozměry, dávkování a dobu setrvačnosti v daných orgánech. Vlákna, která jsou schopná dosáhnout plicního parenchymu, musí mít průměr menší než 3  $\mu\text{m}$ , délku větší než 5  $\mu\text{m}$  a poměr délky/průměru musí být roven nebo větší než 3. Studie in vitro nejsou považovány za vhodné pro hodnocení toxicity vláken. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC) v roce 2006 považovala celkově tento typ studie za užitečný pro rozlišení mezi primární a sekundární genotoxicitou.

Azbestová vlákna mohou produkovat dva typy novotvarů u lidí a to maligní mezoteliom a rakovinu plic. Vzhledem k podobnosti formy různých MMMF a azbestových vláken, epidemiologické studie populace vystavené MMMF byly speciálně zakládány na studii o těchto dvou typech nádorů. V této studii se používá termín rakovina dýchacích cest.

Byly dokončeny dvě rozsáhlé kohortové studie, jedna studie se uskutečnila ve Spojených státech a druhá v Evropě, a dále kontrolní studie z těchto kohort. Všechny tyto studie zpočátku poskytují mnoho epidemiologických důkazů o potenciálním riziku pro rakovinu dýchacích cest a dalších nádorech spojených s neustálým pracovním vystavením skelným vláknům, laminátům a minerální vlně. V roce 1970 byla započata kohortní studie v USA, která byla z počátku prováděna na 16 661 pracovnících v 17 továrnách, které produkovaly sklolamináty a minerální vlnu. Výsledky byly hodnoceny až do roku 1985, později byla studie prodloužena a v konečné fázi provedena na 32 110 pracovnících a hodnocena až do roku 1992. Evropské kohortní studie se zúčastnilo 25 000 pracovníků ze 13 továren, které vyráběly sklolamináty a minerální vlnu. Studie byla prováděna až do roku 1982 a poté prodloužena až do roku 1990. (19)

Výsledky studií:

### **Laminátové skleněné kontinuální vlákno**

- Studie z USA - tento typ vlákna vyráběly pouze dvě továrny a analýza neprokázala důkaz o růstu úmrtí kvůli rakovině dýchacích cest ve srovnání s místním výskytem rakoviny.
- Studie z Evropy - nebyl nalezen žádný důkaz o růstu rakoviny plic u pracovníků, kteří byli neustále vystaveni laminátovému skleněnému vláknu, i když počet respondentů byl poměrně malý. (19)

### **Izolace ze skelných vláken/ skelné vaty**

- Studie z USA - byl zpozorován statisticky významný nárůst rakoviny plic o 6 % oproti místnímu výskytu rakoviny. Je zajímavé, že výskyt rakoviny byl větší u pracovníků, kteří byli vystaveni méně než 5 let. Pracovníci vystaveni po delší dobu, vykazovali menší výskyt a již nebyl tak statisticky významný. Bylo zjištěno, že úmrtnost nesouvisela s dobou trvalého vystavení nebo s nadměrným vdechováním vláken. Nicméně bylo zjištěno, že tabákový kouř z cigaret mohl být odpovědný za vyšší riziko rakoviny plic u pracovníků. Nebyl potvrzený nárůst výskytu mezoteliomu nebo jiných respiračních novotvarů.
- Kontrolní studie z USA - žádný faktor, jako je doba vystavení či průměrné vystavení vláknům, nesouvisel s růstem rizika rakoviny dýchacích cest. Jako statisticky významný ovlivňující rizikový faktor rakoviny dýchacích cest bylo v této studii uvedeno kouření.
- Studie z Evropy - u studovaných respondentů byl nalezen zvýšený výskyt rakoviny plic, která byla výrazně snížena regulováním úrovně národnostní úmrtnosti. Dále nebyl nalezen žádný vztah mezi časem vystavení či nástupu. Byl zaznamenán pouze jeden případ úmrtí následkem mezoteliomu. Nicméně ve dvou továrnách byl nalezen azbest a nejsou dostupné informace o možném ovlivnění pracovníků tímto faktorem, nebo zdali nebyli ovlivněni kouřením cigaret. Dále byl v této studii popřen jakýkoliv vztah mezi rakovinou plic a průměrem vlákna, délkou vystavení nebo počátečním časem vystavení. Nicméně je třeba zdůraznit, že vystavení bylo nízké a počet případů byl malý. (19)

## Studie dalších respiračních nemocí

- Jedna z nejdůležitějších studií byla provedena na 1089 pracovnících z pěti továren na výrobu vláken a dvou na výrobu minerální vlny v USA. Každý pracovník prošel respiračním dotazníkem, dýchacími testy a rentgenovým vyšetřením hrudníku. Ve studii nebyly nalezeny žádné respirační příznaky nebo funkční následky, ale byl nalezen nízký výskyt malých nespecifikovatelných plicních zákalů na rentgenu. Studie byla ještě prodloužena a zahrnovala 1400 pracovníků a bylo provedeno 300 kontrol. Výzkum byl ukončen s tím, že se nenašly žádné známky klinického, funkčního nebo radiologického dopadu na zdraví.
- Byly zveřejněny některé případy plicní fibrózy u lidí vystavených skelným vláknům.
- Například Takahashi popsal případ tesaře vystaveného skelné vatě v průmyslu více než 40 let, který měl na radiologii na hrudi nalezené modulární neprůhlednosti a to převážně bazilární s intersticiální fibrózou a nalezenými sklenými vlákny v transbronchiální biopsii. Dále Guber publikoval případ muže s plicní fibrózou, jehož transbronchiální biopsie a chrchel prokázaly skelná vlákna. Jednalo se o řidiče autobusu, jehož strop byl izolovaný skelnými vlákny (fibergrass). Tato vlákna se postupně dostávala do prostoru autobusu. Dospělo se k závěru, že v obou těchto případech mohla mít skelná vlákna podíl na onemocnění.
- Další studie uvádí 14 případů granulomatózního onemocnění plic u osob, které byly vystaveny nekonečným vláknům a minerální vlně. Klinické, radiační a bronchoalveolární charakteristické výplachy byly identické se sarkodiózními a v patologické studii byly pozorovány granulomy. Dále v šesti případech byla skelná vlákna detekována pomocí elektronového mikroskopu. Autoři naznačují, že u citlivých osob by vystavení skelným vláknům mohlo mít za následek spuštění granulomatózního nemoci podobné sardikóze. (19)

## 1.4.2 Toxikologie in vitro

### Přehled studií

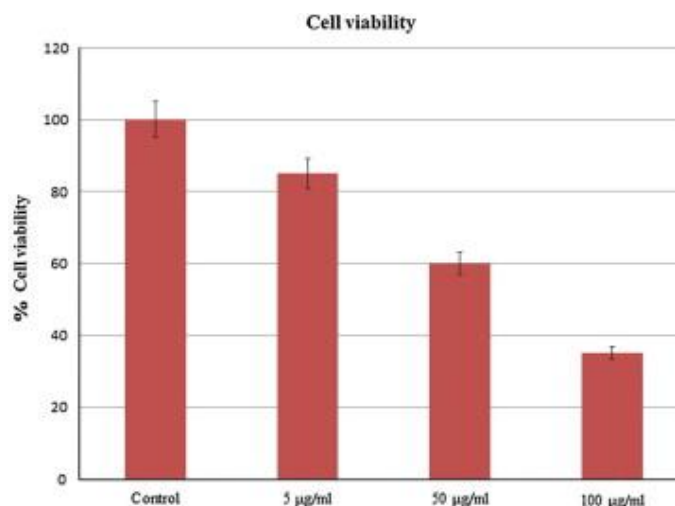
V roce 1988 byla skleněná vlákna klasifikována Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny jako skupina 2B, tedy pro člověka potencionálně karcinogenní. Poté byla přeřazena do skupiny 3, tedy nelze klasifikovat jako karcinogenní pro člověka.

Vlákna mohou vyvolat karcinogenní účinek výrobou reaktivních druhů kyslíku, což má za následek indukční oxidační poškození DNA a buněčnou proměnu. Dále se zjistilo, že velikost, tvar, chemické složení a biologická stálost vlákna jsou důležitými faktory souvisejícími s cytologickými a karcinogenními činnostmi vláknitých materiálů. Poznatky z inhalačních a in vitro studií naznačují, že delší a tenčí vlákna vyvolávají větší toxicitu. (20)

### Konkrétní studie

Tato studie ověřovala cytotoxické a genotoxické účinky a dále oxidační stres vyvolaný produkcí in vitro vystavením lidských alveolárních epitelových buněk A549 skelným vláknům s převažujícím průměrem menším než 3  $\mu\text{m}$  (97 %) a délkou větší než 5  $\mu\text{m}$  (93 %).

Zkoumáním se potvrdilo, že skleněná vlákna vyvolávají cytotoxicitu a poškození DNA v buňkách A549 (viz obrázek 1.6). Také bylo prokázáno, že skleněná vlákna s vysokou hustotou (v této studii se jednalo o 97 % hustotu) a s poměrem délkou/průměr větším než 3  $\mu\text{m}$  a vysokým procentem hmotnosti oxidu křemičitého vytvářejí genotoxické a oxidační účinky, které jsou rozhodující v zahájení karcinogeneze. To znamená, že riziko představované skleněnými vlákny a jejich široké využití vyžaduje větší opatrnost a přísnější předpisy, zejména tam, kde se skleněná vlákna uvolňují a následně jsou vdechována. (20)



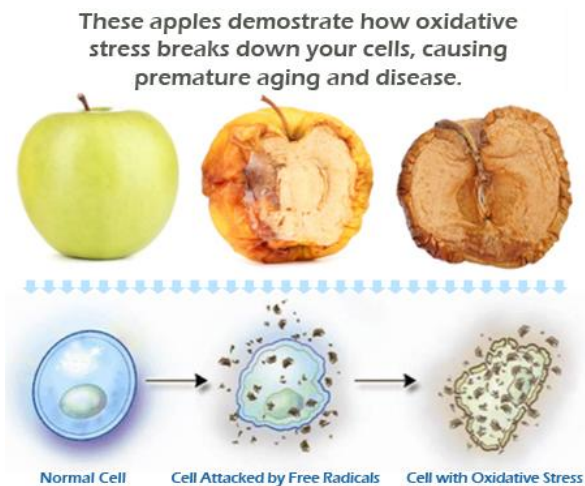
*Obrázek 1.6: Analýza životaschopnosti buněk A549 po 72 h vystavení skleněným vláknům o různé koncentraci (5, 50, nebo 100 µg/ml) ve srovnání s kontrolními buňkami.*

I když současné údaje poskytují vzhled do genotoxických a cytotoxických účinků vyvozených ze skleněných vláken, obecné omezení z in vitro studií je jejich reprodukovatelnost in vivo. Vystavení in vivo zůstává nejasné. (20)

### **1.4.3 Oxidativní stres**

Oxidace je smíšení kyslíku a paliva, které tělo používá pro vytvoření energie. To se děje při každém dýchání, kdy tělo spaluje palivo uvnitř buněk a přeměňuje ho na energii. Tento proces dále tvoří nebezpečné volné radikály. Tyto volné radikály se poté podílejí na poškozování okolních buněk. Antioxidanty se naopak podílejí na opravě poškozených buněk. Pokud jsou buňky příliš poškozené, nastává u nich buněčná smrt.

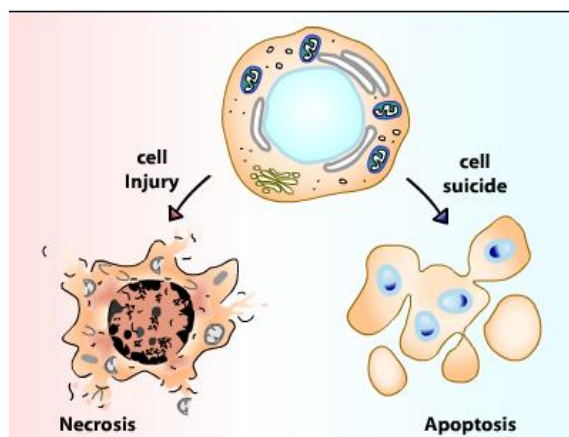
Oxidativní stres vzniká v těle ve chvíli, kdy je zamořeno volnými radikály a není schopno se jim bránit. Nejvíce ohrožený je mozek a orgány, které využívají velké množství kyslíku. Na obrázku 1.7 je na jablku vidět, jak oxidativní stres postupně ničí buňky, což má za následek viditelné stárnutí a nemoci. (21)



Obrázek 1.7: Ukázka vlivu oxidativního stresu (21)

#### 1.4.4 Buněčná smrt

Buněčná smrt má největší dopad při tkáňové přestavbě během embryonálního vývoje a hlavně při odstranění poškozených buněk za účelem zajištění homeostázy celého organismu. Rozlišujeme dva typy buněčné smrti, které mají odlišné morfologické a molekulárně biologické vlastnosti, a to nekrózu a apoptózu, (viz obrázek 1.8). Nekróza je převážně neregulovaná buněčná smrt a je nejčastěji indukovaná traumatem, infekcí či toxiny. Charakteristický je nejprve otok buněk před degradací DNA a případné rozrušení buněk vedoucí k zánětu okolní tkáně. Apoptóza je odvozena z řeckého slova „odpadávat, spadnout“. Bylo zjištěno, že deregulace apoptózy je hlavním faktorem přispívajícím řadě patologických jevů, jako jsou autoimunitní poruchy (AIDS, revmatoidní artritida) a neurodegenerativní poruchy jako je Alzheimerova choroba a rakovina. (22) (23)



Obrázek 1.8: Buněčná smrt nekróza a apoptóza (23)



## 1.5 Zdravotnické ochranné pomůcky

### 1.5.1 Roušky

Lékařské roušky se používají například k zabránění průniku mikroorganismů jak při průchodu do nositele roušky, tak i k ochraně okolí nositele roušky, viz obrázek 1.9. Zkoušky prováděné na jednotlivých osobách, které přes roušku vydechují vzduch na misky s agarem (a také bez roušky), na němž se poté zkoumá počet bakterií, nejsou normalizované a ani povinné. (24)

### 1.5.2 Respirátory

Filtrační polomasky (respirátory) se používají jako ochrana před mikroorganismy, jemným prachem a kapalnými nebo tuhými částicemi z okolí do nositele respirátoru. Oproti rouškám musí respirátory projít povinnými zkouškami a musí splňovat určité podmínky normy (ČSN EN 149). Například jedna ze zkoušek se provádí na deseti lidech v podobě měření koncentrace aerosolu chloridu sodného, přičemž velikost částic je cca 0,035-20  $\mu\text{m}$  v podmaskovém prostoru respirátoru. Zkoušející osoby konají pohyby podléhající normě. (24)



*Obrázek 1.9: Jednorázová ústenka a jednorázová hygienická rouška (25)*

Výběr masek a respirátorů je velice rozmanitý. Na výběr jsou například klasické jednorázové ústenky, které se používají ve zdravotnictví, dále jednorázové hygienické roušky používané na ochranu před kontaminací výrobků nebo jako ochrana před prachem. Dále to jsou třeba filtrační polomasky bez ventilku, které se používají proti netoxickým pevným částicím a aerosolům, nebo filtrační polomasky s ventilkem. Filtrační polomasky mohou ještě obsahovat aktivní uhlí, které je známé pro svůj velký vnitřní povrch který na sebe dokáže vázat některé látky. Masky jsou znázorněny

na obrázku 1.10. Dalším druhem jsou polomasky s přídavnými filtry. Polomasky se například mohou lišit pouze přístupným expozičním limitem. (25)



*Obrázek 1.10: Filtrační polomaska s ventilkem a filtrační polomaska s aktivním uhlím a ventilkem (25)*

## 2 Experimentální část

Experimentální část této práce se zabývá vlivem opotřebení na mechanické vlastnosti rovingů. V této části jsou popsány zkoušky opotřebení pomocí Aparatury v různých rychlostech po 50 cyklech, poté trhací zkoušky a zkoušky “chlupatosti“ na přístroji Zweigle G522. Dále byl sledován úlet částic na třech stěžejních místech pod Aparaturou a poté spočítány úlomky a hodnoty statisticky zpracovány. Data jsou zpracována pomocí programu MS Excel.

Hodnocené parametry:

- Vliv opotřebení na váhový úbytek
- Vliv opotřebení na pevnost rovingů
- Délky a množství ulétlých částic

### 2.1 Použité materiály

Při tomto experimentu byly použity dva druhy skleněných rovingů a dva druhy uhlíkových rovingů, viz tabulka 3.

*Tabulka 3 : Druhy použitých rovingů.*

<b>Materiál</b>	<b>Výrobce</b>	<b>ruh</b>	<b>Počet fibril</b>	<b>Jemnost [tex]</b>
Sklo 907	Johns Manville	Sklo-E PR 440	16K	2400
Sklo 908	Johns Manville	Sklo-E PR 440	16K	1200
Uhlík E	Tenax	E HTS40 F13	24K	1600
Uhlík J	Tenax	J STS40 F13	24K	1600

## 2.2 Přístroje

### 2.2.1 Aparatura pro oděr

Pro měření opotřebení rovingů byla použita Aparatura pro oděr, viz obrázek 2.1, která byla speciálně postavená v rámci disertační práce a je zahrnuta v patentu.



*Obrázek 2.1: Aparatura pro oděr rovingů*

Skládá se z kladky a velkého kola, které je poháněno motorkem. Ten lze nastavit na různá elektrická napětí, v tomto případě se jednalo o 5, 10 a 15 V. Přepočtení na rychlost je uvedeno v tabulce 4. Dále má dvě kladky, které jsou upevněny na pevno. Vlákna jsou vedena přes kolo a mezi kladkami. Úhel opásání je  $38^\circ$  a  $177^\circ$ , viz obrázek 2.2.

*Tabulka 4: Přepočtení elektrického napětí na rychlost*

El. napětí [V]	5	10	15
Rychlost [m/s]	0,7	1,4	2,1

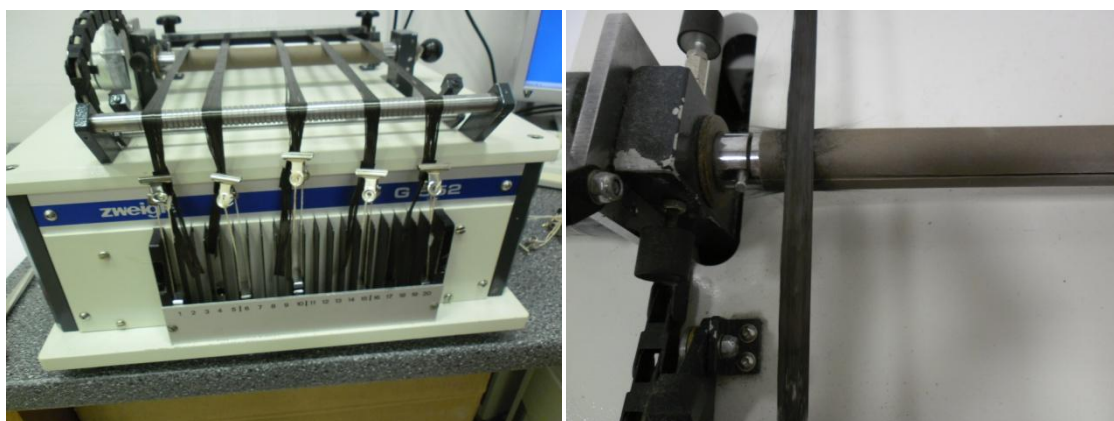


*Obrázek 2.2.: Detail kladek, úhel opásání  $38^\circ$  a  $177^\circ$*

## 2.2.2 Zweigle

Na přístroji Zweigle pro měření “chlupatosti“ přízí bylo pro určitý počet cyklů měřeno od každého druhu vždy pět rovingů. Rovingy byly odírány válcem obaleným smirkovým papírem, který se při pohybu otáčel, viz obrázek 2.3. Válec přejížděl v určitém úseku pod rovingem tam a zpět, tedy v cyklech. Každý druh byl odírán v počtu pět rovingů po 50 cyklech a pět rovingů po 100 cyklech. Vzhledem k namotávání oddělených přetržených vláken na válec nebyl možný oděr do přetrhu celého rovingu a zvolilo se pouze odírání pro 50 a 100 cyklů.

Vzhledem k tomu, že je přístroj uzpůsoben pro odírání přízí, musel být upraven v podobě obalení koncových tyčí lepenkou, aby se roving nedostal mezi zářezy a tím nebyl způsoben nesouměrný oděr. Rovingy se v určité délce oblepily elektrikařskou lepenkou, aby je bylo možné chytit do klipsů se závažím.



Obrázek 2.3: Natažení rovingů na přístroji Zweigle

## 2.3 Měření

### 2.3.1 Doporučený postup měření na Aparatuře pro oděr

Pro měření oděru byl na základě předchozích experimentů doporučen následující postup: Nejprve rovingy nastříhat na požadovanou jednotnou délku a poté zvážit. Zvážený roving natáhnout na velké kolo a mezi kladkami. Dále zvážit předem určenou délku lepenky a poté vždy pouze odměřit stejnou délku vzhledem k předpokladu, že lepenka je homogenní materiál. Lepenkou oblepit překřížené konce rovingů v půlce, viz obr. 2.4. Nastavit přístroj na požadovanou rychlost. Odpočítat 50 cyklů u každého rovingu a poté přestříhnout roving u místa zalepení a zvážit.



*Obrázek 2.4: Detail spojení rovingu na Aparatuře v jednom místě*

### **2.3.2 Průběh měření**

Každý roving byl nastříhán a zvážen. Poté se vedl přes velké kolo a mezi kladkami. Konce rovingů se poté překřížily a zalepily izolační páskou konstantní délky. První použitá izolační páska s lesklým povrchem se ukázala jako zcela nevhodná, jelikož se díky svému povrchu zasekávala na kladkách. Pro řešení tohoto problému byly rovingy povoleny, což vedlo při vyšších otáčkách ke spadnutí rovingu a namotání do přístroje. Proto byla pro další měření použita matná páska, která lépe klouzala po kladkách.

Ukázalo se, že slepování rovingů páskou pouze na středu je pro tento experiment nevhodné. Konce vláken se ze spoje povolovaly a roving se „zašmodrchával“ viz. obrázek 2.4. Dále byl problém v úletu částic z konců vláken, který měl za následek zkreslení sledování úletů částic. Konce rovingů tedy byly slepovány izolační páskou na třech místech a to ve středu a na koncích viz obr. 2.5.



*Obrázek 2.5: Detail spojení rovingu na Aparatuře*

Během vážení se ukázalo, že lepenka se vzhledem k nízkým hodnotám váhového úbytku nedá považovat za homogenní materiál a musela být před každým měřením zvážena.

Vzhledem k tomu, že měření má simulovat průběh odírání rovingů v běžném průmyslu, čemuž by měl odpovídat i úlet částic, bylo třeba obalit vyčnívající konce rovingů, aby se neulamovaly a nezkreslovaly výsledky. Pro tento účel posloužil nastříhaný igelitový sáček, viz obrázek 2.6. Nejprve se rovingy překřížily a oblepily páskou na středu a poté se obmotaly igelitovým sáčkem o dané délce a šířce a jeho konce se opět oblepily páskou tak, aby celé spojení hladce procházelo přes kladky.



*Obrázek 2.6: Obalené konce rovingů*

Váhový úbytek byl velmi malý, proto byly pro měření zvoleny čtyřmístné váhy, viz obrázek 2.7.



*Obrázek 2.7.: Čtyřmístné váhy*

Během měření a vážení se zjistilo, že vlhkost rukou velice ovlivňuje výsledek vážení, a proto musely být pro manipulaci s vlákny používány rukavice. Tento problém vznikl z důvodu kapilárního vztlínání mezi jednotlivými vlákny v rovingu. Pro tento účel byla provedena zkouška, při které byl roving (který byl předtím zvážen) mačkaný v rukou po určitou dobu a poté znovu zvážen. Roving před držení v ruce vážil 1,8399 g a po zkoušce vážil 1,8425 g. Nárůst hmotnosti byl 0,0026 g, tedy o 0,14 %. Vlhkost vzduchu během měření byla okolo 52 %.

Během odmotávání rovingů z cívek bylo zjištěno, že na některých úsecích jsou vlákna přerušena, viz obrázek 2.8. Tento defekt může vzniknout při výrobě, namotávání či manipulaci s cívkou.



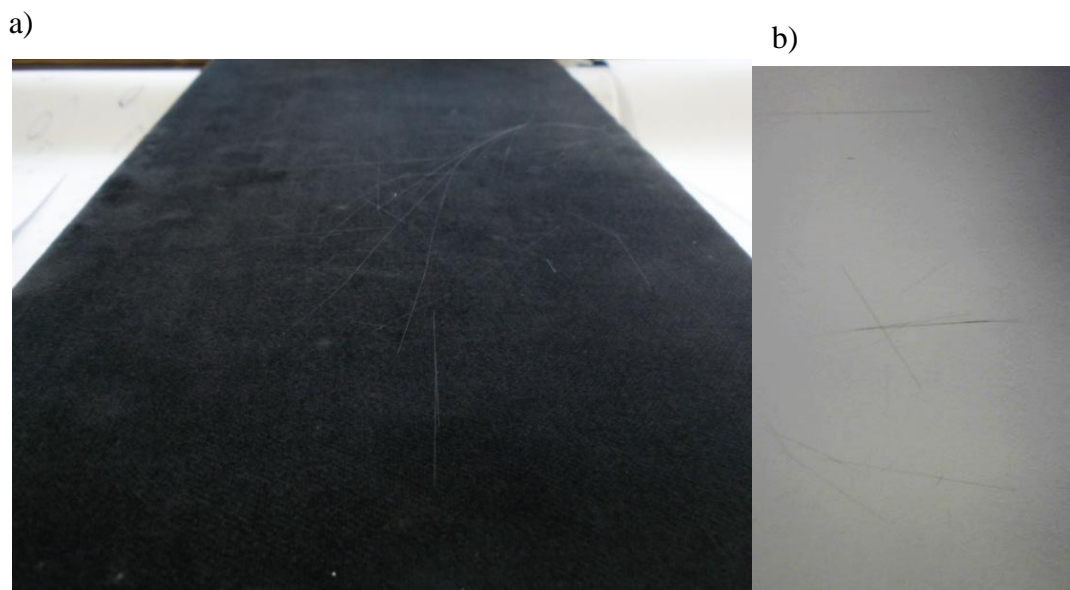
*Obrázek 2.8: Přerušená vlákna v rovingu*

Z důvodu zdravotního rizika a nepříjemné manipulace s danými materiály byly během celé práce používány ochranné pomůcky, jako jsou rukavice, rouška a plášť.

### **2.3.2.1 Sledování úletu částic**

Pro sledování úletu částic byl po dlouhém zkoušení vybrán způsob sběru úlomků na třech stěžejních místech pod Aparaturou. První místo bylo pod velkým kolem, druhé pod kladkami, nejvíce zatěžujícím místem. Třetí místo bylo vybráno ve středu Aparatury, tedy v nejméně zatěžujícím místě. Jako podklad byla pro skleněné rovingy použita sametová destička nebo černá čtvrtka velikosti A4. Pro uhlíkové rovingy byly pro sběr úlomků použity bílé papíry velikosti A4, viz obrázek 2.9. Úlomky byly poté změřeny pravítkem.





*Obrázek 2.9: Zachycení úlomků částic: a) sametová destička s úlomky skleněných částic, b) papír s úlomky uhlíkových částic*

### **2.3.2.2 Příprava vzorků na trhací zkoušku**

Roviny se před zkouškou tahem musely zalepit do rámečků a to z důvodu, že čelisti trhacího stroje nejsou schopny chytit všechna vlákna a navíc se vlákna poté ulamují a zkreslují tak zkoušku. Ze čtvrtek s vyšší gramáží se vyřezaly rámečky o rozměrech 20×7 cm, vnitřní rozměr měl 10×5 cm. Každý odřený roving byl nastříhán na pět částí o stejné délce. Následně se lehce napnul a zalepil mezi dva rámečky pomocí vteřinového lepidla. Poté byl na vzorky vyvíjen tlak do zaschnutí lepidla.

Během příprav byly vyzkoušeny různé druhy vteřinových lepidel a poté použito lepidlo s nejlepší konzistencí. Tekutější lepidla se ukázala jako naprosto nevhodná. Na obrázku 2.10 jsou vidět zalepené roviny a naznačená místa, kde se čtvrtka po umístění do čelistí trhacího stroje nastříhla.



Obrázek 2.10: Zalepené rovingy v rámečcích

### 2.3.2.3 Zkouška tahem

Deformace textilie, ke které dochází díky mechanickému namáhání, je závislá na rychlosti namáhání, velikosti zatížení a celkové době trvání. Zkoušky pevnosti v tahu jsou prováděny dle příslušných norem. Průběh tahové zkoušky je vidět na obrázek 2.11. Zkoumané veličiny jsou: pevnost  $P$  [N], tedy síla do přetrhu  $F$  [N], napětí do přetrhu  $\sigma$  [Pa], protažení do přetrhu  $\Delta l$  [mm], tažnost (deformace do přetrhu)  $\varepsilon$  [%], relativní pevnost  $F(f)$  [N/tex] nebo [cN/dtex] a tržná délka  $L_T$  [m]. (26)

Absolutní síla, v tomto případě relativní síla  $F_r$ , je vyjádřena jako síla na jednotku jemnosti,

$$F_r = \frac{F}{T} = \frac{F}{S \cdot \rho} \text{ [N/tex]} \quad (2)$$

která se odvodí z napětí v tahu,

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [Pa]} \quad (3)$$

kde  $F$  – absolutní síla [N]

$F_r$  – relativní síla [N/tex]

$T$  – jemnost [tex]

$S$  – plocha příčného řezu vlákna [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  – hustota vlákna [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$\sigma$  – napětí v tahu [ $\text{Pa}$ ]. (27)

Deformace je definovaná jako,

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} * 10^2 [\%] \quad (4)$$

kde  $\varepsilon$  – poměrná deformace [%]

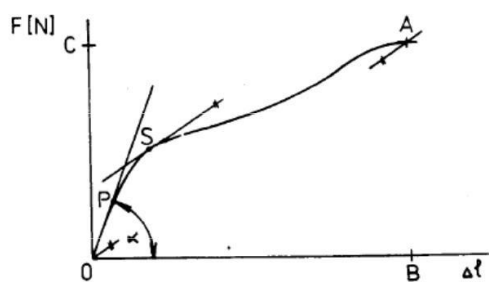
$l$  – prodloužená délka [m]

$l_0$  – původní délka [m]. (27)

Modul pružnosti v tahu (Youngův modul),

$$E_p = \frac{\sigma}{\varepsilon} [\text{MPa}] \quad (5)$$

kde  $E_p$  – modul pružnosti v tahu [MPa]. (26)



Z křivky jsou patrné některé charakteristické části:

0 : počátek

0 - P : oblast pružných (elastických) deformací. Deformace se po uvolnění napětí vrátí.

P: mez pružnosti. Nad tímto bodem se začínají projevovat plastické (nevratné) deformace

S: počátek kluzu

A: maximální síla

B: maximální protažení při přetrhu (destrukci)

Obrázek 2.11 : Tahová křivka (27)

## 2.4 Výsledky měření a diskuze výsledků

### 2.4.1 Skleněné rovingy

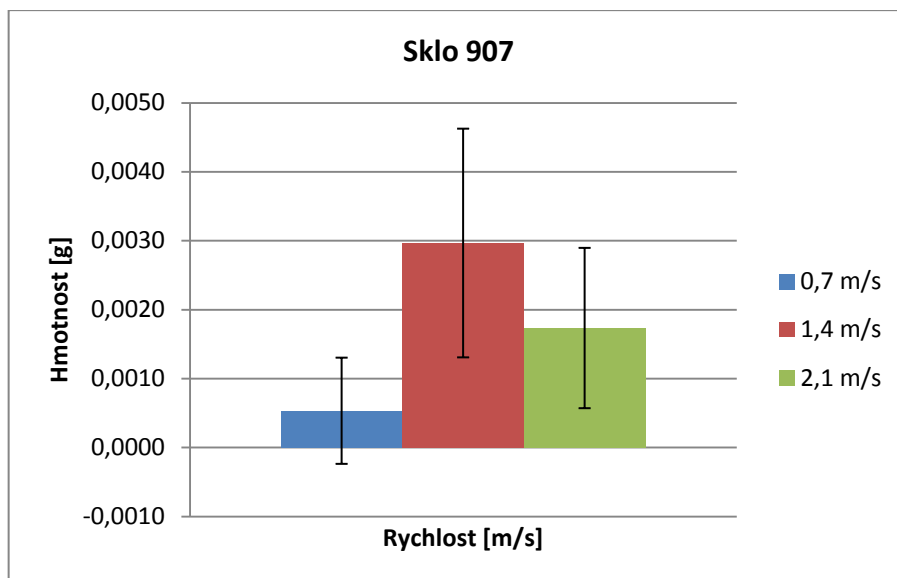
Odirány byly vždy tři vzorky o konstantní délce pro určitou rychlost. Data jsou zaznamenána v tabulkách a graficky zpracována s 95% intervalem spolehlivost.

U skla 907 mělo odírání značný vliv na soudržnost rovingu, který se po odírání výrazně rozpadal, a tím byla ztížena další práce s ním. Celkový váhový úbytek skla 907 a 908 je uveden v tabulce 5 a 6. Skleněné rovingy 907 se po měření při vyšších rychlostech značně rozpadaly, jinými slovy jednotlivá vlákna již neměla soudržnost v rovingu.

U některých rovingů (907, 908) se vlákna namotávala na kladky (úhel opásání 177°) a tím způsobovala větší váhový úbytek. Namotávání vzniká díky oddělování vláken od rovingu, což je způsobeno ztrátou sizingu (lubrikantu), který zajišťuje jeho soudržnost. Dalším faktorem je tření vláken o kladky. Namotávání může mít za následek další poškození nově procházejícího rovingu třením o sebe a dále poškození samotných strojů, do kterých se rovingy “zašmodrchávají”.

Tabulka 5: Výsledky odírání skla 907

Sklo 907									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Váha před oděrem [g]	7,6542	7,5347	7,5627	7,7079	7,7371	7,6211	7,5425	7,6161	7,7803
Váha fólie [g]	0,0529	0,0493	0,0604	0,0617	0,0572	0,0589	0,0486	0,0612	0,0607
Váha lepenky [g]	0,2239	0,2238	0,2265	0,2240	0,2118	0,2167	0,2193	0,2208	0,2181
Váha po oděru [g]	7,9310	7,8075	7,8483	7,9886	8,0038	7,8951	7,8100	7,8962	8,0562
<b>Celkový rozdíl [g]</b>	0,0000	0,0003	0,0013	0,0050	0,0023	0,0016	0,0004	0,0019	0,0029
<b>Celkový rozdíl [%]</b>	0,0000	0,0038	0,0166	0,0626	0,0287	0,0203	0,0051	0,0241	0,0360
<b>Průměrný rozdíl [%]</b>	0,0068			0,0372			0,0217		

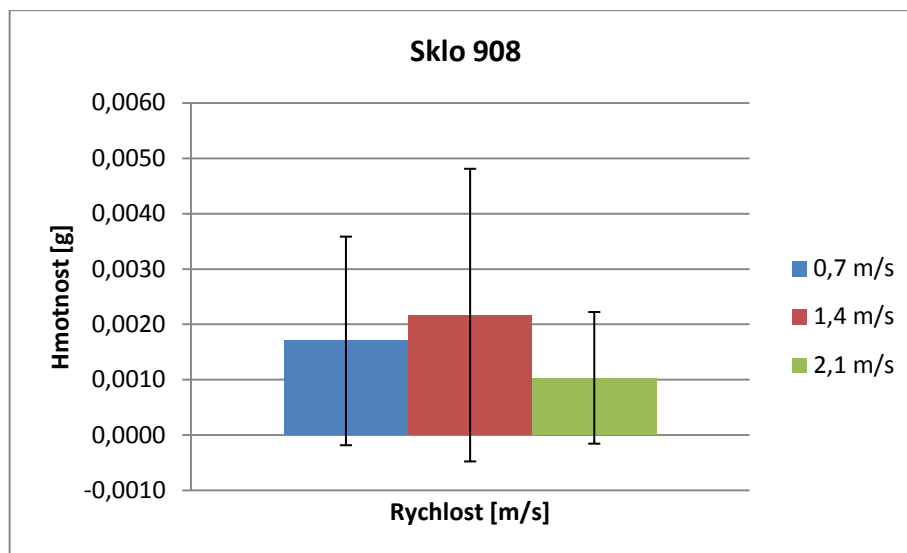


Obrázek 2.12: Průměrný váhový úbytek skla 907

Nejmenší průměrný váhový úbytek u skla 907 byl při rychlosti 0,7 m/s a největší při rychlosti 1,4 m/s, což je dobře čitelné z obrázku 2.12. Chybové úsečky jsou poměrně dost velké, což může být způsobeno již zmíněným namotáváním ulomených vláken na kladky, čímž byl způsoben větší váhový úbytek.

Tabulka 6: Výsledky odírání skla 908

Sklo 908									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Váha před oděrem [g]	3,8645	3,8310	3,8079	3,8007	3,8885	3,9267	3,7970	3,8609	3,7734
Váha fólie [g]	0,0562	0,0526	0,0572	0,0568	0,0540	0,0489	0,0502	0,0474	0,0589
Váha lepenky [g]	0,2142	0,2152	0,2087	0,2046	0,2180	0,2232	0,2234	0,2250	0,2165
Váha po oděru [g]	4,1344	4,0978	4,0702	4,0604	4,1604	4,1941	4,0696	4,1308	4,0488
<b>Celkový rozdíl [g]</b>	0,0005	0,0010	0,0036	0,0017	0,0001	0,0047	0,0001	0,0025	0,0000
<b>Celkový rozdíl [%]</b>	0,0121	0,0244	0,0884	0,0419	0,0024	0,1119	0,0025	0,0605	0,0000
<b>Průměrný rozdíl [%]</b>	0,0416			0,0521			0,0210		



Obrázek 2.13: Průměrný váhový úbytek skla 908

Na obrázku 2.13 je vidět, že nejmenší průměrný váhový úbytek skla 908 byl při rychlosti 2,1 m/s a největší při rychlosti 1,4 m/s.

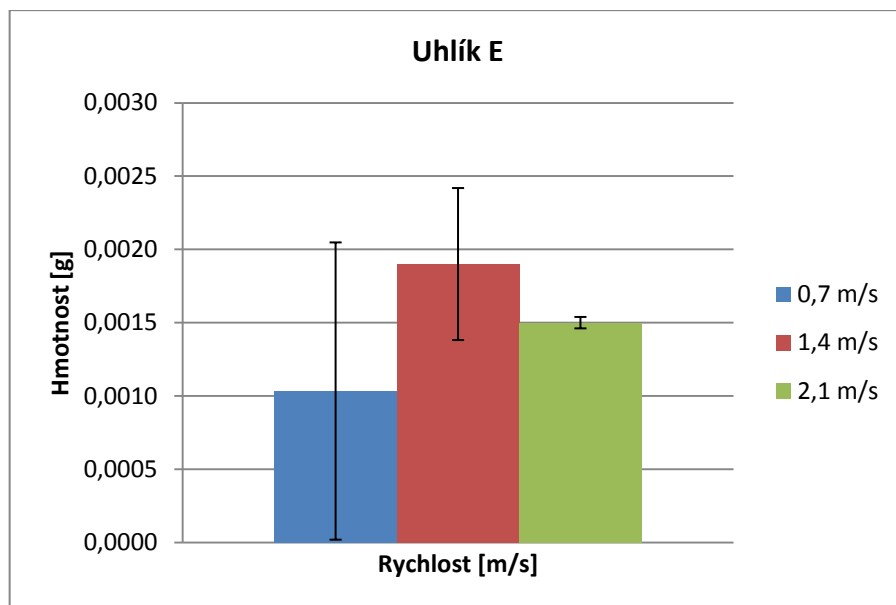
Rozdíl váhového úbytku pro jednotlivé rychlosti pro sklo 907 a 908 je v tomto případě statisticky nevýznamný.

## 2.4.2 Uhlíkové rovingy

Uhlíková vlákna jsou oproti skleněným vláknům velice křehká a jemná. Uhlíkové rovingy měly po odírání oproti skleněným rovingům dobrou soudržnost. Stejně jako u skleněných rovingů se u některých objevilo namotávání na kladku s úhlem opásání 177° a tím byl způsoben větší váhový úbytek.

Tabulka 7: Výsledky odírání uhlíku E HTS40 F13

Uhlík E HTS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Váha před oděrem [g]	5,3598	5,0970	5,2103	5,2068	5,0793	5,2207	5,1058	5,0740	5,1535
Váha fólie [g]	0,0585	0,0599	0,0573	0,0468	0,0588	0,0593	0,0483	0,0581	0,0587
Váha lepenky [g]	0,2103	0,2220	0,2188	0,2229	0,2196	0,2311	0,224	0,2203	0,2303
Váha po oděru [g]	5,6271	5,3773	5,4866	5,4741	5,3559	5,5096	5,3765	5,3509	5,4411
Celkový rozdíl [g]	0,0015	0,0016	0,0000	0,0024	0,0018	0,0015	0,0016	0,0015	0,0014
Celkový rozdíl [%]	0,0266	0,0297	0,0000	0,0438	0,0336	0,0272	0,0298	0,0280	0,0257
Průměrný rozdíl [%]	0,0188			0,0349			0,0278		

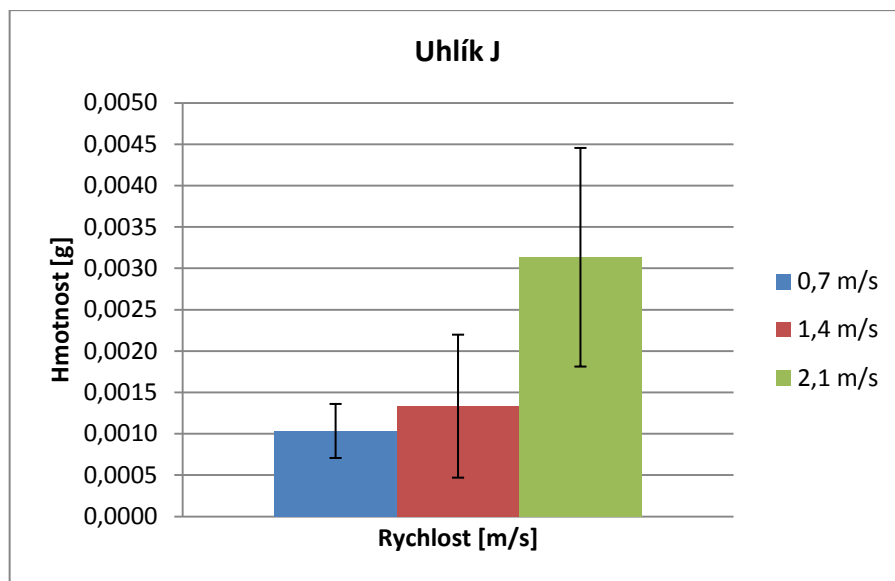


Obrázek 2.14: Průměrný váhový úbytek uhlíku E

Uhlík E měl nejmenší váhový úbytek při rychlosti 0,7 m/s, tedy 0,0010 g a největší váhový úbytek při rychlosti 1,4 m/s, tedy 0,0019 g. Váhový úbytek porovnávaných rychlostí viz obrázek 2.14, není statisticky významný.

Tabulka 8: Výsledky odírání uhlíku J STS40 F13

Uhlík J STS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Váha před oděrem [g]	5,1059	5,1128	5,1126	5,0909	5,1329	5,0264	5,0575	5,1224	5,2472
Váha fólie [g]	0,0610	0,0615	0,0552	0,0599	0,0575	0,0585	0,0566	0,0514	0,0602
Váha lepenky [g]	0,2165	0,2132	0,2225	0,2103	0,2104	0,2041	0,2138	0,2195	0,2173
Váha po oděru [g]	5,3822	5,3863	5,3896	5,3606	5,3993	5,2870	5,3258	5,3889	5,5218
<b>Celkový rozdíl [g]</b>	0,0012	0,0012	0,0007	0,0005	0,0015	0,0020	0,0021	0,0044	0,0029
<b>Celkový rozdíl [%]</b>	0,0223	0,0223	0,0130	0,0093	0,0278	0,0378	0,0394	0,0816	0,0525
<b>Průměrný rozdíl [%]</b>	0,0192			0,0250			0,0578		



Obrázek 2.15: Průměrný váhový úbytek uhlíku J

U uhlíku J byl zvážen nejmenší váhový úbytek při rychlosti 0,7 m/s, tedy 0,0010 g. Tento úbytek je stejný jako u uhlíku E. Největší váhový úbytek měl uhlík J při rychlosti 2,1 m/s, tedy 0,0031 g. Váhový úbytek porovnávaných rychlostí viz obrázek 2.15, není statisticky významný, stejně jako u uhlíku E.

Když porovnáme váhové úbytky použitých uhlíků, můžeme konstatovat, že uhlík J měl mnohem větší váhový úbytek, který dosahoval v průměru 0,0031 g při rychlosti 2,1 m/s. Oproti tomu uhlík E měl největší průměrný váhový úbytek pouze 0,0019 g při rychlosti 1,4 m/s.

### 2.4.3 Výsledky sledování úletu částic

Částice byly sbírány na třech místech pod Aparaturou na podložky o velikosti A4. Byla spočítána jejich průměrná délka, která je zapsána v tabulce 9 pro sklo 907 a v tabulce 11 pro sklo 908. Dále je v tabulce 10 uveden počet ulétlých částic pro sklo 907 a v tabulce 12 pro sklo 908. Chybové úsečky, tedy 95% intervaly spolehlivosti, jsou poměrně velké a to z důvodu velmi odlišných délek ulomených částic.



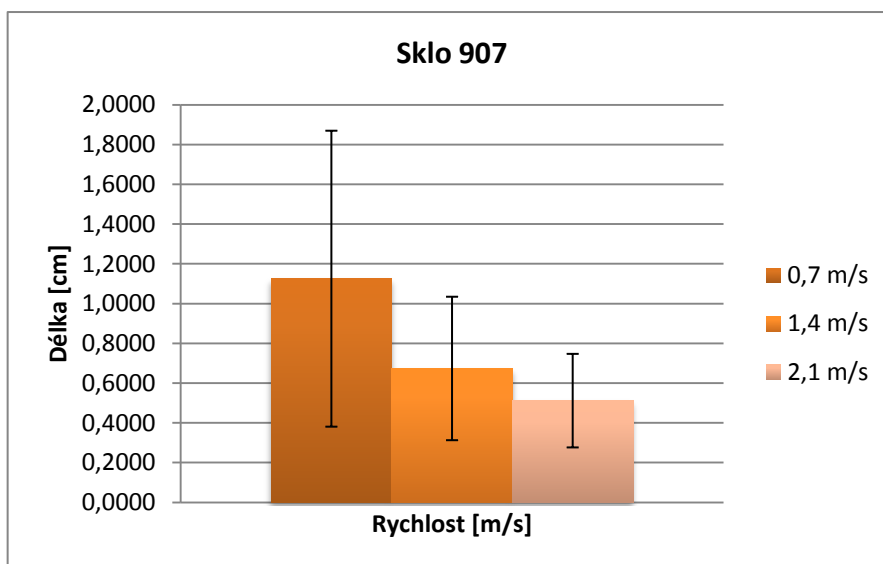
Tabulka 9: Výsledky úletu částic skla 907

Sklo 907									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Průměrný úlet částic kladky [cm]	1,600	0	1,964	0,617	1,115	0,25	0,167	0,386	0,6
Průměrný úlet částic střed [cm]	0,4	0,1	0,767	1	0,443	0,3	0,55	0,2	0,2
Průměrný úlet částic kolo [cm]	2,5	0	0,26	0,167	0,633	0,4	1,85	0	0,233
Průměrný souhrn částic [cm]	<b>0,843</b>			<b>0,547</b>			<b>0,465</b>		
Nejmenší částice [cm]	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

V tabulce 9 jsou zapsané nejmenší naměřené částice, kde převažují částice o délce 0,1 cm, tedy nejmenší možné naměřené částice pomocí pravítka.

Tabulka 10: Počet ulétlých částic skla 907

Sklo 907									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Kladky	1	0	11	12	13	4	3	7	7
Střed	5	2	3	2	7	1	2	1	1
Kolo	1	0	5	3	6	1	2	0	3



Obrázek 2.16: Průměrný úlet částic rovingu skla 907

Pod rovingy odíranými rychlostí 0,7 m/s se nacházely částice s nejdelší průměrnou délkou. Nejkratší průměrnou délku měly částice odlomené z rovingů odíraných při rychlosti 2,1 m/s, viz obrázek 2.16

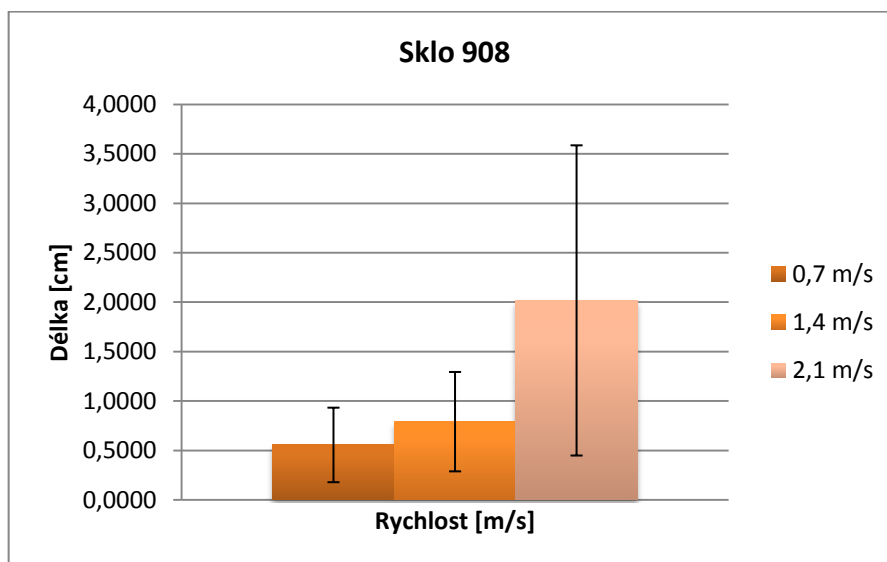
Tabulka 11: Výsledky úletu částic skla 908

Sklo 908									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Průměrný úlet částic kladky [cm]	0,2	0,45	0	0,467	0,1	0,45	0	2,9	0
Průměrný úlet částic střed [cm]	0	0,9	0,2	0,95	0	3	0,3	0	1,6
Průměrný úlet částic kolo [cm]	0	0,9	0,1	0	0,7	0	0	0	5,4
Průměrný souhrn částic [cm]	<b>0,306</b>			<b>0,630</b>			<b>1,133</b>		
Nejmenší částice [cm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>2,9</b>	<b>1</b>

U skla 908 se nejmenší změřené částice pohybují v rozmezí 0,1–2,9 cm, což je poměrně velký rozestup.

Tabulka 12: Počet ulétlých částic skla 908

Sklo 908									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Kladky	1	2	0	3	1	2	0	1	0
Střed	0	2	1	2	0	1	2	0	2
Kolo	0	2	1	0	2	0	0	0	1



Obrázek 2.17: Průměrný úlet částic rovingu skla 908

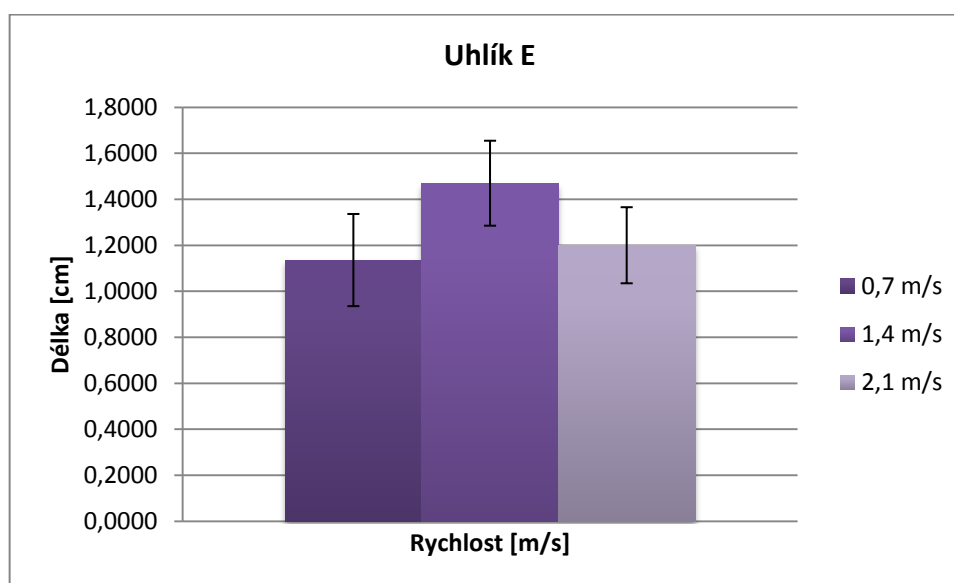
U skla 908 měly nejdelší průměrnou délku částice ulétlé při rychlosti 2,1 m/s, jak je vidět na obrázku 2.17. Nejkratší délku měly části ulétlé při nejmenší rychlosti, tedy 0,7 m/s. Jak lze vidět z tabulky 12, počet ulétlých částic nebyl až tak velký.

Tabulka 12: Výsledky úletu částic uhlíku E HTS40 F13

Uhlík E HTS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Průměrný úlet částic kladky [cm]	0,974	1,084	0,819	1,545	1,326	1,686	1,476	1,151	0,977
Průměrný úlet částic střed [cm]	2,9	1,684	2,138	1,754	1,881	1,278	1,564	1,925	0,759
Průměrný úlet částic kolo [cm]	0,65	2,56	0,286	1,61	1,037	0,845	0,589	1	0,911
Průměrný souhrn částic [cm]	<b>1,455</b>			<b>1,440</b>			<b>1,150</b>		
Nejmenší částice [cm]	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabulka 13: Celkový počet ulétlých částic uhlíku E HTS40 F13

Uhlík E HTS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Kladky	117	122	91	51	96	49	58	114	61
Střed	8	19	16	13	27	9	22	20	17
Kolo	4	15	7	10	19	11	9	4	19



Obrázek 2.18: Průměrný úlet částic rovingu uhlíku E

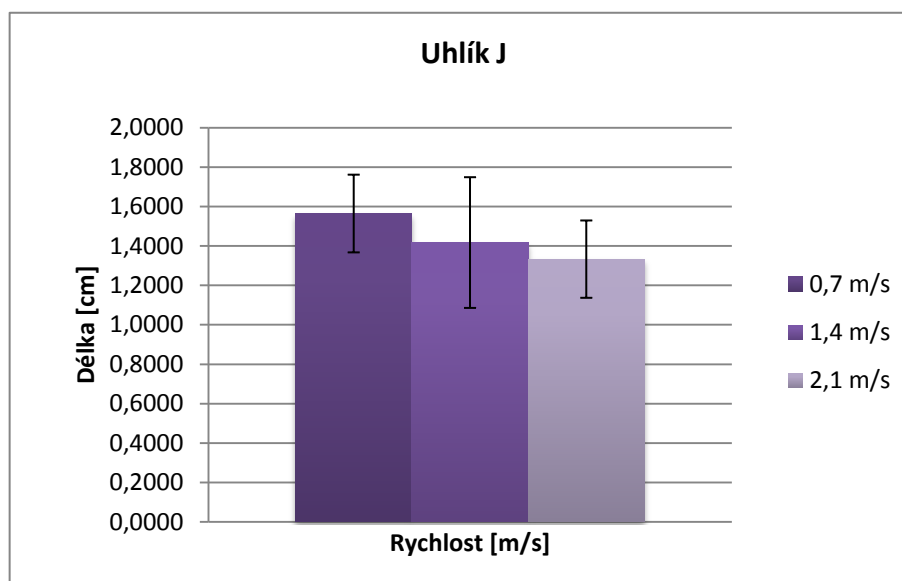
Vzhledem k tomu, že je uhlík oproti sklu velmi křehký, je pochopitelný velký počet ulétlých částic, který je zapsán v tabulce 13. Největší počet se nacházel pod kladkami, kde je místo s největší ohybovou zátěží. Díky malé hmotnosti se některá ulétlá vlákna dostala do větších vzdáleností v místnosti. Průměrné hodnoty délek jsou zaznamenány graficky na obrázku 2.18.

Tabulka 14: Výsledky úletu částic uhlíku J STS40 F13

Uhlík J STS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Průměrný úlet částic kladky [cm]	1,526	1,583	1,476	1,616	1,288	1,980	1,35	1,544	1,182
Průměrný úlet částic střed [cm]	1,753	2,092	1,294	0,496	1	1,723	2,456	1,355	0,713
Průměrný úlet částic kolo [cm]	1,58	3,867	0,86	0,233	1,283	0,857	0,783	2,454	1,39
Průměrný souhrn částic [cm]	<b>1,781</b>			<b>1,164</b>			<b>1,470</b>		
Nejmenší částice [cm]	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabulka 15: Celkový počet ulétlých částic uhlíku J STS40 F13

Uhlík J STS40 F13									
Rychlost [m/s]	0,7			1,4			2,1		
Vzorek	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
Kladky	66	72	85	58	24	41	56	41	91
Střed	15	13	17	24	3	13	9	11	24
Kolo	5	3	5	3	6	14	12	13	10



Obrázek 2.19: Průměrný úlet částic rovingu uhlíku J

U uhlíku J měly ulétlé částice nejdelší průměrnou délku po odírání při rychlosti 0,7 m/s, což je vidět na obrázku 2.19. U obou uhlíků byly naměřeny nejmenší částice 0,1 cm u všech rychlostí odírání, jak je patrné z tabulky 12 a 14. Na podložce však byl znatelný i „prach“ menších částic.

## 2.4.4 Výsledky trhací zkoušky

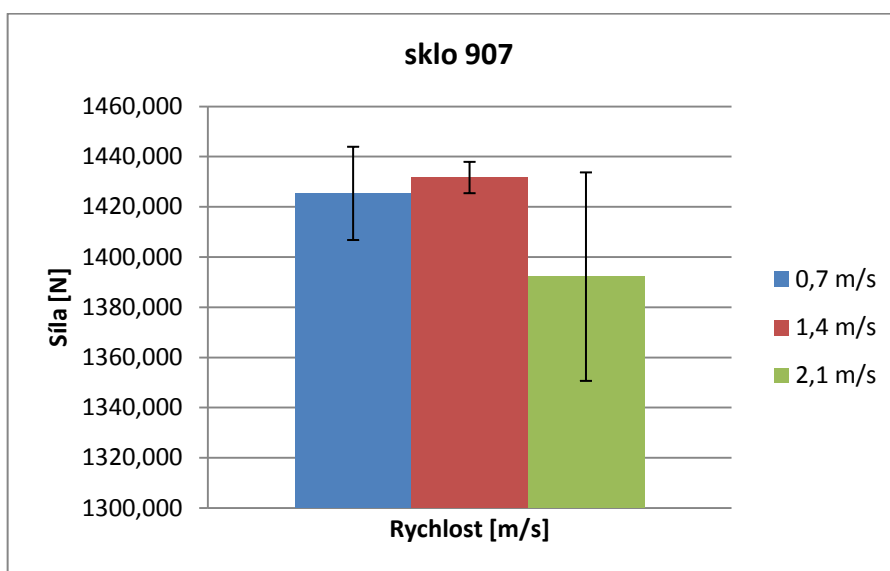
Trhací zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 527. Vzorky byly trhány na přístroji TIRA TEST 2300. Celkem bylo otestováno 120 vzorků.

Zkouška měřila maximální dosaženou sílu  $F_{max}$  a maximální tažnost  $A_{max}$ . Dále se počítal youngův modul pružnosti v tahu  $E_p$ . Výsledky jsou uvedeny v tabulce 16 pro sklo 907 a v tabulce 17 pro sklo 908. Uhlíky jsou vyhodnoceny v tabulce 18 pro uhlík E a v tabulce 19 pro uhlík J.

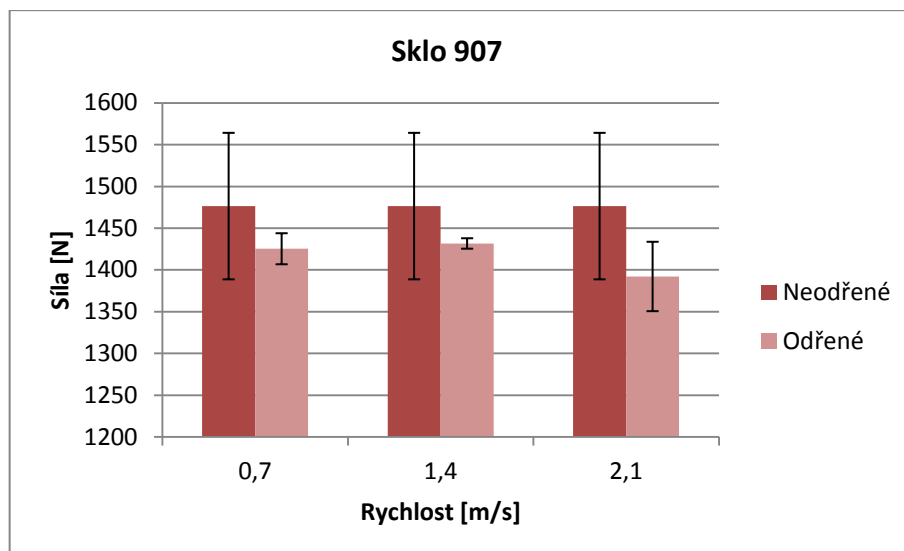
### Výsledky trhací zkoušky skla

Tabulka 16: Sklo 907 - průměrné hodnoty veličin

Rychlost [m/s]	Síla $F_{max}$ [N]	Tažnost $A_{max}$ [%]	E-modul $E_p$ [GPa]
Neodřžený roving	1476,378	3,028	50,992
0,7	1425,317	3,253	45,825
1,4	1431,639	3,281	45,639
2,1	1392,145	3,331	43,705



Obrázek 2.20: Průměrná maximální dosažená síla skla 907



Obrázek 2.21: Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů skla 907

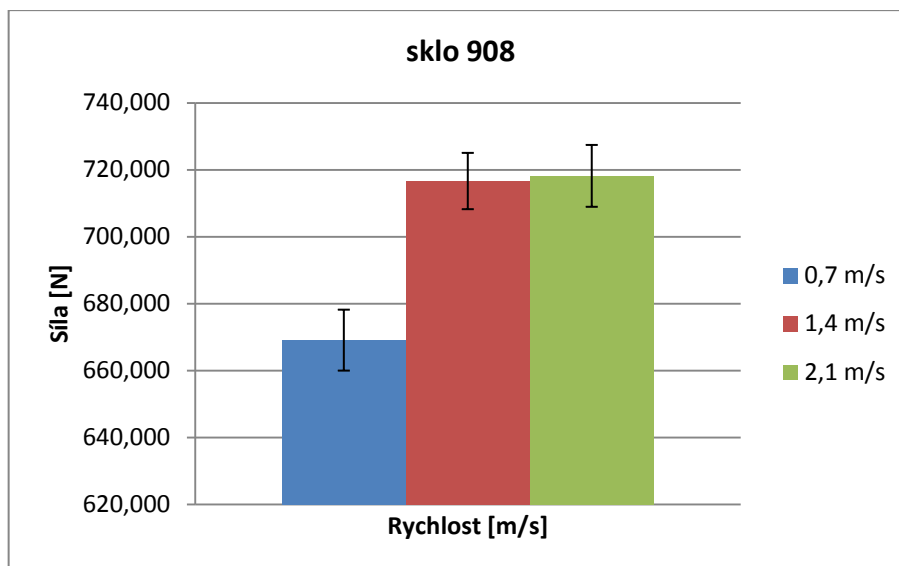
Na obrázku 2.20 lze pozorovat závislost maximální dosažené síly na rychlosti odírání rovingů. Tato závislost je také vidět na obrázku 2.21, kde jsou z důvodu porovnání přidána i neodřená vlákna. Pro sklo 907 byla vyhodnocena jako nejlepší rychlost 1,4 m/s, po které vlákna při trhací zkoušce dosahovala nejvyšší maximální síly při přetruhu. Nejhorší dosaženou sílu měly rovingy odírané při rychlosti 2,1 m/s.

V tabulce 1 je uvedeno, že dle literatury (3) dosahuje sklo E hodnot modulu pružnosti hodnot 72,4 GPa. V našem případě dosahovalo neodřené sklo 907 poměrně menšího modulu pružnosti a to konkrétně 50,99 GPa (viz. tabulka 16).

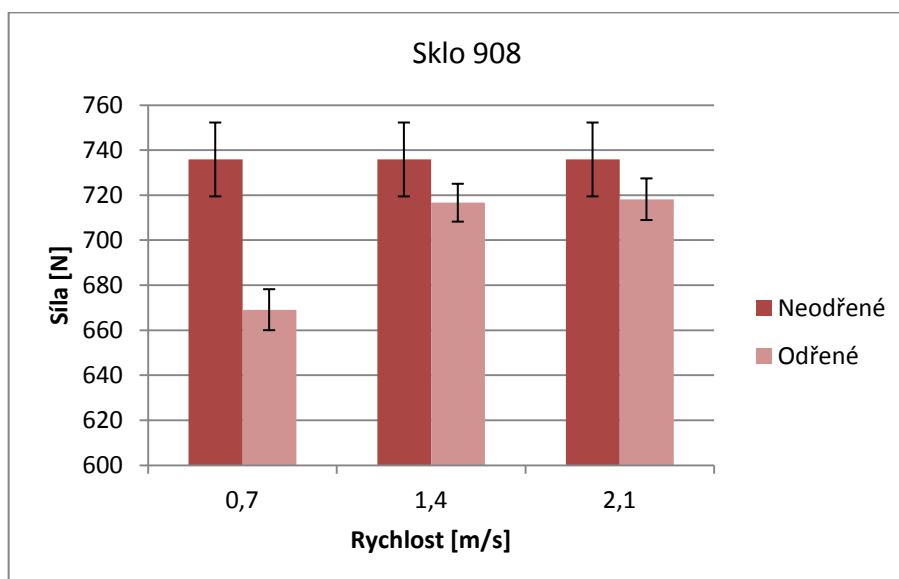
Z obrázku 2.21 můžeme vyhodnotit, že rozdíl mezi odřenými a neodřenými vlákny není statisticky významný.

Tabulka 17: Sklo 908 – průměrné hodnoty veličin

Rychlost [m/s]	Síla $F_{\max}$ [N]	Tažnost $A_{\max}$ [%]	E-modul $E_p$ [Gpa]
Neodřený roving	735,848	2,774	55,485
0,7	669,099	2,891	48,404
1,4	716,639	3,006	49,866
2,1	718	3,098	48,489



Obrázek 2.22: Průměrná maximální dosažená síla skla 908



Obrázek 2.23: Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů skla 908

Na obrázcích 2.22 a 2.23, na kterých je vidět závislost maximální dosažené síly na rychlosti je u skla 908 při nejnižší rychlosti 0,7 m/s pozorován statistický významný rozdíl oproti ostatním rychlostem a neodřeným rovingům. Tato rychlost měla nejhorší výsledek v trhacím testu, tedy nejmenší dosaženou maximální sílu. Rychlosti 1,4 a 2,1 m/s nejsou až tak rozdílné, nicméně nejlepší rychlostí byla vyhodnocena 2,1 m/s.

I v tomto případě modul pružnosti u neodřených vláken dosahoval menších hodnot, konkrétně 55,48 GPa, oproti hodnotám uváděným v literatuře, viz tabulka 1.



Obrázek 2.24 : Skleněný roving před přetrhem a dva rovingy po přetrhu

Na obrázku 2.24 je jako první vyfocen roving před přetrhnutím. Před každým přetrhem byl papírový rámeček z obou stran přestříhnut. Na druhé a třetí fotografii jsou rovingy po přetrhu. Některé rovingy měly i po přetrhu určitou soudržnost, což lze vidět na střední fotografii. Na třetí fotografii je zachycen zcela oddělený roving, kdy se vlákna rovingu rozlétla do prostoru.

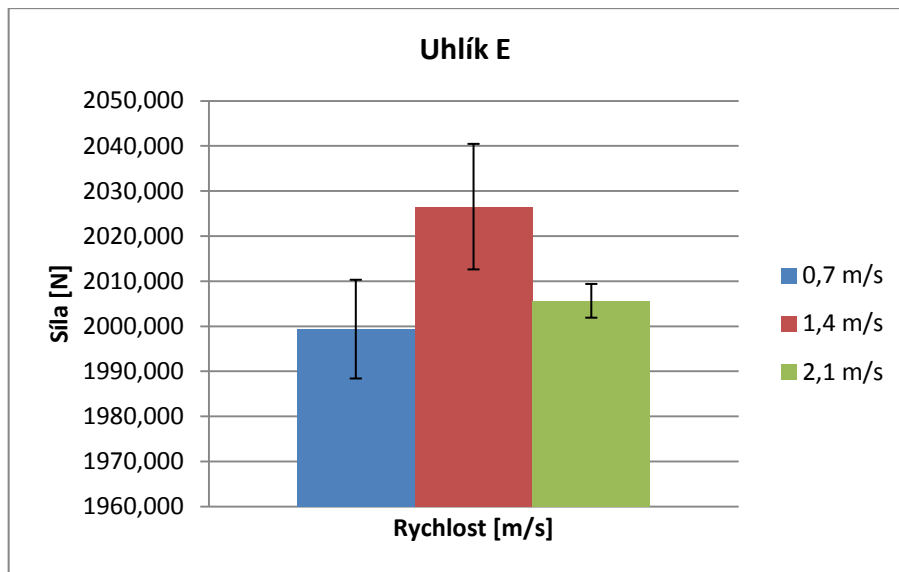
### Výsledky trhací zkoušky uhlíku

Výsledky trhacích zkoušek uhlíkových vláken jsou překvapivé. Odřená vlákna mají vyšší pevnost než vlákna neodřená, jak je vidět na obrázku 2.26 pro uhlík E a 2.28 pro uhlík J. Tento jev je zřejmě způsobený “zaplstěním“ uvolněných vláken rovingu. Lze tedy říci, že odírání je pro uhlíková vlákna a jejich pevnost prospěšné.

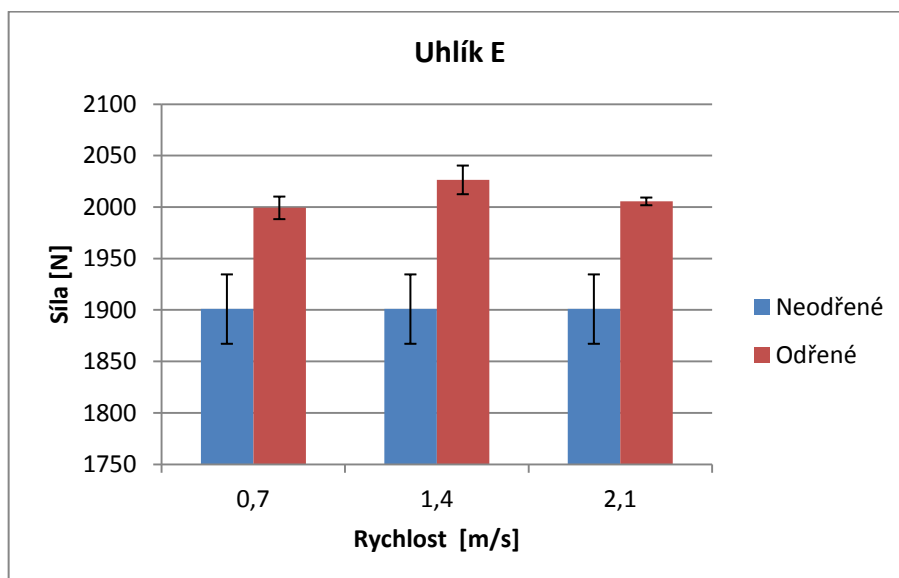
Tabulka 18: Uhlík E - průměrné hodnoty veličin

Rychlost [m/s]	Síla $F_{\max}$ [N]	Tažnost $A_{\max}$ [%]	E-modul $E_p$ [GPa]
Neodřený roving	1900,940	1,778	117,606
0,7	1999,347	2,082	105,633
1,4	2026,525	2,001	111,422
2,1	2005,625	1,996	110,530





Obrázek 2.25: Průměrná maximální dosažená síla uhlíku E



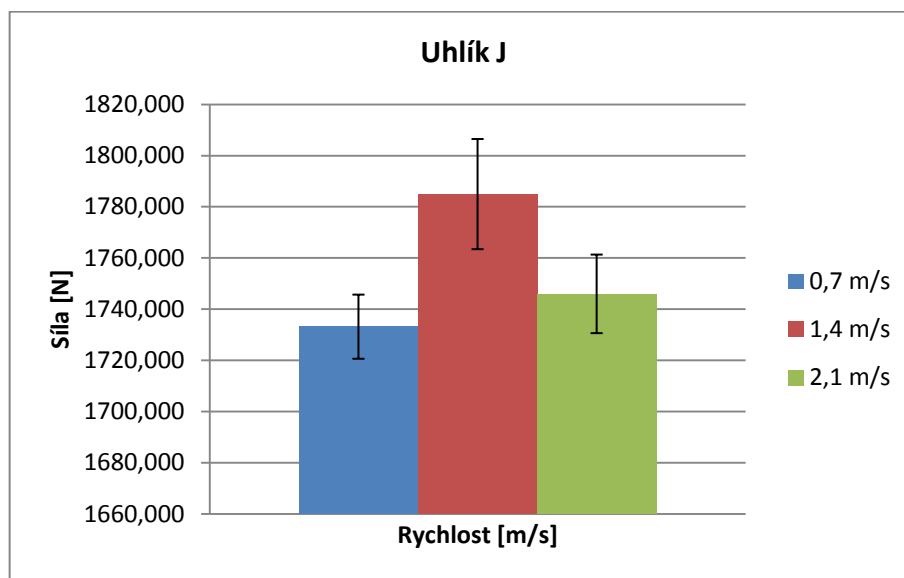
Obrázek 2.26: Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů uhlíku E

Uhlík E dosáhl nejvyšší pevnosti po oděru při rychlosti 1,4 m/s a nejnižší pevnosti při rychlosti 0,7 m/s. Rozdíl mezi rychlostmi pro odírání není nijak významný. Jak můžeme pozorovat na obrázku 2.25 rozdíl mezi odřenými a neodřenými vlákny je statisticky významný.

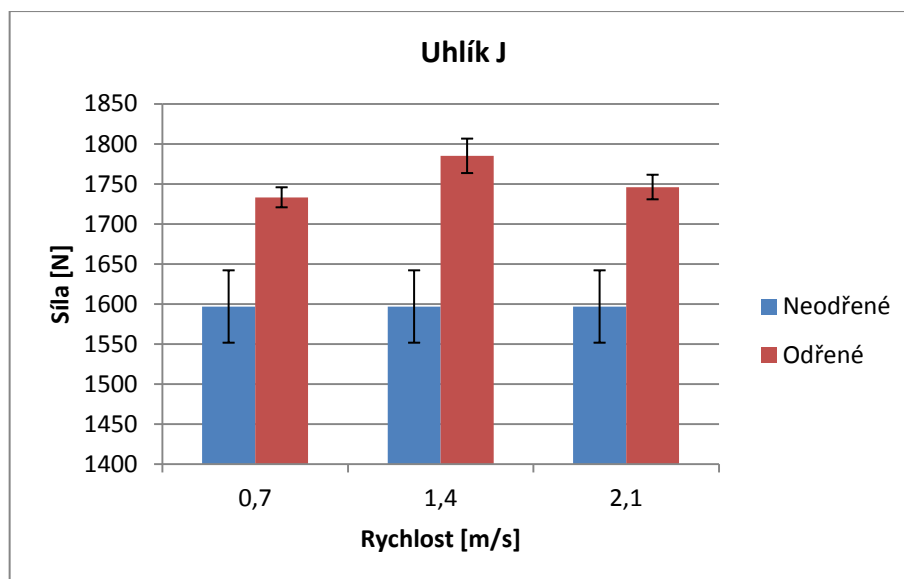
Modul pružnosti  $E_p$  u neodřených rovingů dosáhl 117,605 GPa a tedy nespadá do literaturou uváděného rozmezí 150-300 GPa (3), jak je uvedeno v tabulce 2. Nevyššího modulu pružnosti pro uhlíky E z odřených rovingů dosáhly roviny odírané při rychlosti 1,4 m/s.

Tabulka 19: Uhlík J - průměrné hodnoty veličin

Rychlost [m/s]	Síla $F_{\max}$ [N]	Tažnost $A_{\max}$ [%]	E-modul $E_p$ [GPa]
Neodřené roving	1596,674	1,75	100,362
0,7	1733,147	1,874	101,732
1,4	1784,940	1,921	102,227
2,1	1745,970	1,863	103,108



Obrázek 2.27: Průměrná maximální dosažená síla uhlíku J



Obrázek 2.28: Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů uhlíku J

U uhlíku J lze pozorovat podobné výsledky jako u předchozího uhlíku E. Největší dosaženou sílu měl uhlík odíraný při rychlosti 1,4 m/s a nejmenší dosaženou pevnost měl uhlík po odírání při rychlosti 0,7 m/s, viz obrázek 2.27. Statisticky významný je rozdíl mezi odřenými a neodřenými vlákny.

Modul pružnosti  $E_p$  u neodřených rovingů uhlíku J dosáhl 100,362 GPa a tedy stejně jako u uhlíku E nespadá tedy do literaturou uváděného rozmezí 150-300 GPa .(3) Nevyššího modulu pružnosti z odřených rovingů dosáhly rovingy odírané při rychlosti 2,1 m/s.

Uhlík E a uhlík J mají stejnou jemnost, a proto lze jejich výsledky porovnávat mezi sebou. Uhlík E dosáhl po odření maximální síly 2026,525 N při rychlosti 1,4 m/s, oproti tomu uhlík J dosáhl po odření maximální síly 1784,940 N při rychlosti 1,4 m/s. Dále měl uhlík E v průměru vyšší tažnost a modul pružnosti. Proto je uhlík E vyhodnocen jako lepší než uhlík J



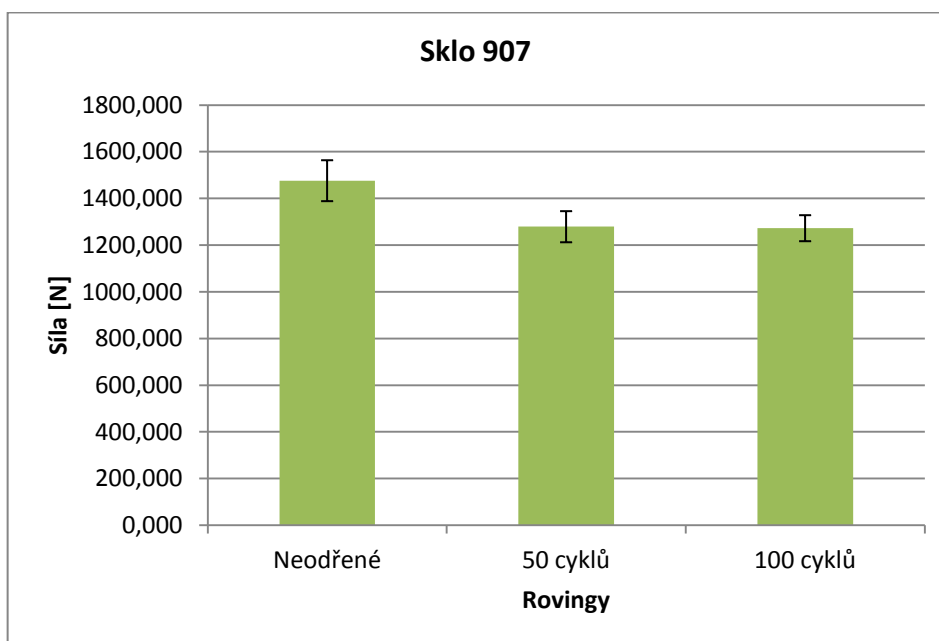
*Obrázek 2.29: Uhlíkový roving před přetrhem a po přetrhu*

Po trhací zkoušce je na obrázku 2.29 patrné “zaplstění“ rovingu po přetržení. Toto chování měly všechny uhlíkové rovingy.

## 2.4.5 Zkouška na přístroji Zweigle G552

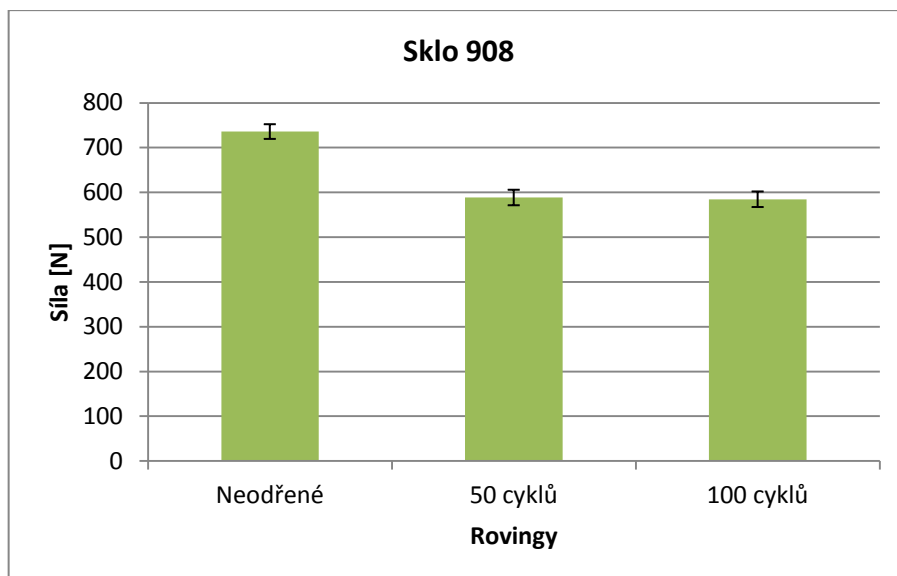
Přístroj Zweigle G552 je „přístroj pro hodnocení oděru jednoduchých i skaných přízí, popř. multifilů“ (12). Zkouška byla provedena dle vnitřní normy IN 32-203-01/01- Hodnocení změn geometrie příčného rozměru příze po oděru. (12)

Přístroj je primárně určen k odírání přízí do přetrhu. Vzhledem k namotávání odlomených vláken, a tím ztížení tohoto přetrhu, byly rovingy odírány po 50 cyklech a po 100 cyklech.



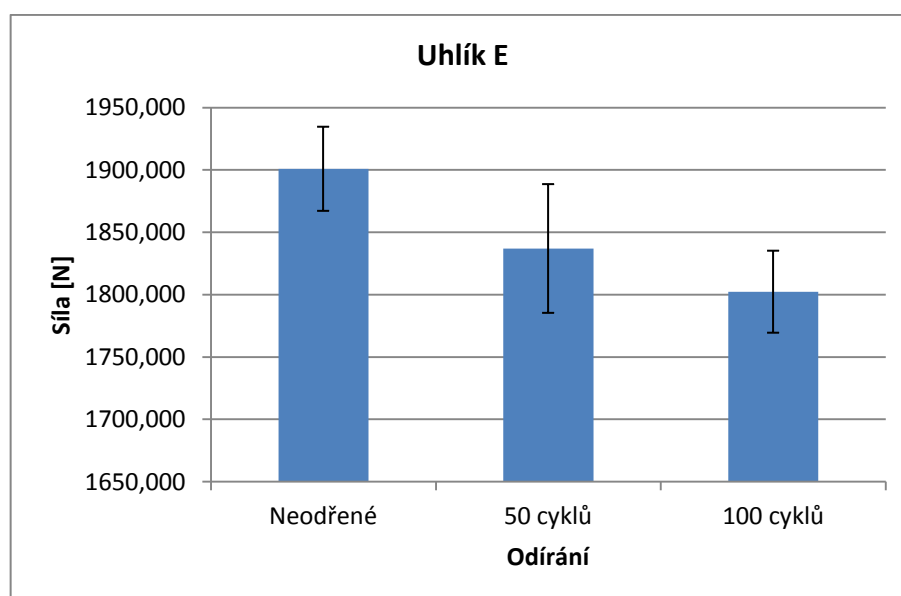
Obrázek 2.30: Sklo 907- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle

Skleněné rovingy 907 odírané na přístroji Zweigle měly po 50 cyklech o 13 % menší dosaženou maximální sílu (197,196 N) oproti neodřeným rovingům. Po 100 cyklech se maximální síla zmenšila o 14 % (o 203,51 N). Rozdíl mezi neodřenými rovingy a rovingy odíranými při 50 a 100 cyklech je statisticky významný, což lze vidět na obrázku 2.30.



Obrázek 2.31: Sklo 908- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle

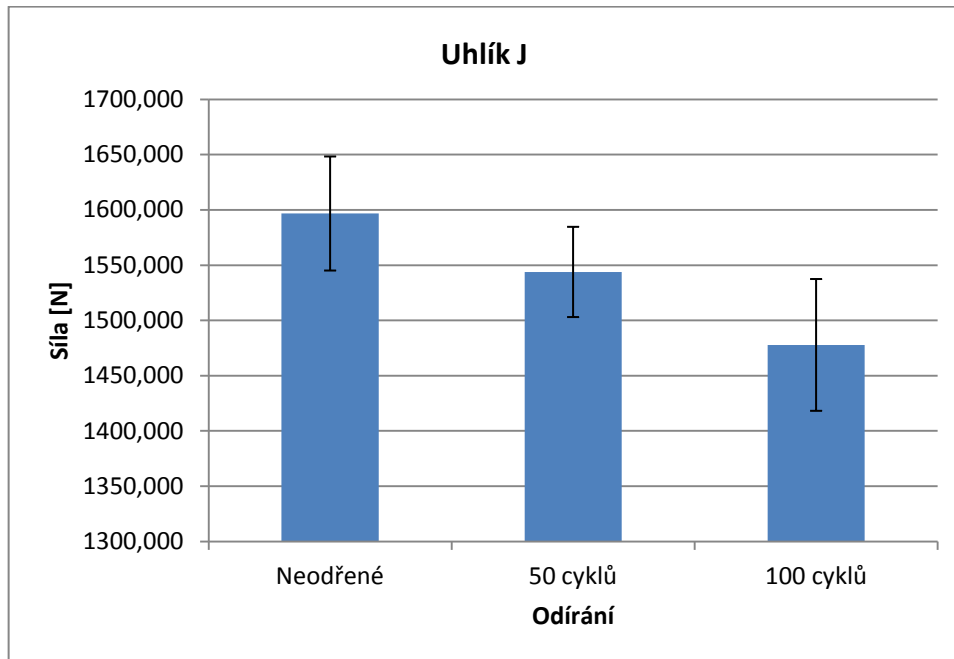
Na obrázku 2.31 jsou znázorněny skleněné rovingy 908 odírané na přístroji Zweigle, které měly po 50 cyklech o 20 % menší dosaženou maximální sílu (147,326 N) oproti neodřeným rovingům. Po 100 cyklech se maximální síla zmenšila o 21 % (tedy o 151,196 N). Rozdíl mezi neodřenými rovingy a rovingy odíranými při 50 a 100 cyklech je statisticky významný.



Obrázek 2.32: Uhlík E- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle

U uhlíku E byl pokles maximální dosažené síly při odírání po 50 cyklech o 3 % (o 63,910 N) a při 100 cyklech o 5 % (o 98,557 N) oproti neodřeným rovingům, viz obrázek 2.32. Rozdíl mezi neodřenými rovingy a rovingy 50 cyklech je statisticky

nevýznamný. Avšak rozdíl mezi neodřeny rovingy a odřeny po 100 cyklech je významný.



Obrázek 2.33: Uhlík J- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle

U uhlíku J stejně jako u předchozího uhlíku není rozdíl mezi neodřeny rovingy statisticky významný, což lze pozorovat na obrázku 2.33. Po 50 cyklech byl pokles maximální dosažené síly o 3 % (o 52,874 N) a po 100 cyklech o 7 % (o 117,892 N).

V porovnání měly uhlíky po 50 cyklech stejný úbytek 3 %, avšak po 100 cyklech měly větší úbytek síly uhlíky J a to 7 %, kdež to uhlíky E pouze 5 %. Uhlík E vyšel opět nejlépe, co se týče průměrné dosažené síly při trhací zkoušce.

### 3 Závěr

V této diplomové práci byl zjišťován vliv opotřebených rovingů na jeho výsledné mechanické vlastnosti. Rovingy byly odírány na Aparatuře pro oděr. Pro tento účel byly použity skleněné a uhlíkové rovingy. V teoretické části byl popsán postup výroby těchto vláken (rovingů), mechanické vlastnosti a využití, které je především v kompozitech. Dále byla provedena rešerše možností simulovaného opotřebených rovingů a studií zabývajících se zdravotním rizikem při vdechnutí částic (úlomků) vláken. V neposlední řadě jsou popsány ochranné pomůcky, které lze využít při práci s rovingy.

Experimentální část byla v první fázi zaměřena na nalezení optimálního spojení konců rovingů pro hladký průběh mezi kladkami na Aparatuře pro oděr, jelikož doporučený způsob byl nevhodný. Rovingy byly odřeny na Aparatuře a na přístroji Zweigl G552. Po oděru byly zalepeny do rámečků a podrobeny trhací zkoušce. Nejprve byl posuzován váhový úbytek rovingů před oděrem a po oděru. Můžeme konstatovat, že v důsledku namotávání jednotlivých ulomených vláken na kladky došlo k většímu váhovému úbytku v případě některých rovingů. Váhový úbytek nebyl statisticky významný pro skleněné rovingy ani pro uhlíkové rovingy. Váhový úbytek uhlíku E byl menší než u uhlíku J.

Další částí měření bylo zjištění délek ulétlých částic během měření na aparatuře. Sběr částic byl proveden na třech nejnamáhanějších místech pod Aparaturou. U skla 907 se nejmenší délka vláken pohybovala pro jednotlivé rychlosti mezi 0,1–0,2 cm. Pro sklo 908 byly naměřeny nejmenší délky v rozmezí 0,1–2,9 cm. Vzhledem k tomu, že je uhlík oproti sklu velmi křehký, měl mnohem větší počet ulétlých částic oproti sklu. Oba uhlíky, tedy E a J, měly nejmenší ulétlé částice pro všechny rychlosti v délce 0,1 cm. Vzhledem k tomu, že převažuje nejmenší délka 0,1 cm a na podložce byl zcela patrný i “prach“ částic, lze usoudit, že nejmenší částice se nacházely právě v tomto “prachu“. Proto pro příští výzkum doporučuji sbírat tyto částice a změřit je pod mikroskopem. Pro posouzení zdravotního rizika práce s těmito anorganickými materiály doporučuji provést podrobnější vyhodnocení velikosti částic v  $\mu\text{m}$ .

Pomocí trhací zkoušky bylo zjištěno, že mezi odřenými rovingy dosahovaly v průměru nejvyšší maximální síly rovingy odřené při rychlosti 1,4 m/s. Avšak rozdíly mezi jednotlivými rychlostmi nebyly statisticky významné. U skla 908 dosahovaly největší síly rovingy odírané při rychlosti 2,1 m/s. Nejmenší síly dosáhly pro toto sklo

rovingy odírané při rychlosti 0,7 m/s, což byl v porovnání s ostatními rychlostmi statisticky významný pokles síly. V tahové zkoušce vyšly pro oba uhlíky nejlépe rovingy odřené při rychlosti 1,4 m/s. Zde je nutné zmínit, že rozdíl mezi odřenými a neodřenými rovingy pro oba uhlíky je statisticky významný. V testu vykazovaly rovingy po opotřebení překvapivě vyšší pevnost v tahu, což bylo pravděpodobně způsobeno “zaplštěním“ rovingů během opotřebení a zřejmě i ztrátou sizingu (lubrikantu).

Testování rovingů na přístroji Zweigle pro “chlupatost příze“ se ukázalo jako nevhodný způsob testování požadovaného opotřebení. Jednotlivá ulomená vlákna se nabalovala na válec obalený smirkovým papírem a nebyl tudíž možný oděr do přetruhu.

Pro cyklické (simulované) opotřebení rovingu se Aparatura pro oděr ukázala jako nejvhodnější způsob odírání. V experimentu vyšel jako nejodolnější uhlík E. Pro posouzení zdravotního rizika použitých anorganických vláken, je potřeba provést podrobné měření úlomků vláken v  $\mu\text{m}$ . Uhlíkové rovingy vlivem zpracování pevnost neztrácí, skleněné rovingy vykazují pokles pevnosti.



## 4 Citovaná literatura

1. GDP KORAL COMPOSITES. *Kompozity- vyztužené plasty*. [Online] [Citace: 8. září 2015.] <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>. ISO 9001.
2. CZECHDESIGN. *Skleněná vlákna - historie a současnost*. [Online] 21. červenec 2003. [Citace: 16. květen 2015.] <http://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost49-582>.
3. **Kořínek, Zdeněk**. *volný.cz*. [Online] 2009. [Citace: 14. duben 2017.] <http://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
4. BTTO. *Základní princip výroby skleněných vláken*. [Online] [Citace: 5. květen 2015.] <http://www.btto.cz/cs/zakladni-princip-vyroby-sklenenych-vlaken>.
5. HEXCEL. *Glass Fiber Reinforcements*. [Online] [Citace: 24. květen 2015.] <http://www.hexcel.com/Site/Products/Fabrics-Reinforcements/Glass-Fiber-Reinforcements.aspx>.
6. **Grégl, Jan**. Výzkumné centrum TEXTIL II. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. [Online] říjen 2014. [Citace: 2. květen 2015.] [http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1\\_zaverecne\\_zpravy/\[3.1.09\].pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3.1.09].pdf).
7. ZOLTEK. *How is it made?* [Online] [Citace: 24. květen 2015.] <http://zoltek.com/carbonfiber/how-is-it-made/>.
8. **Johnson, Todd**. ThoughtCo. *Applications of Carbon Fiber*. [Online] 24. listopad 2014. [Citace: 26. květen 2015.] <http://composite.about.com/od/aboutcarbon/a/Applications-Of-Carbon-Fiber.htm>.
9. **Dvořák, František**. auto.iDNES. *Superlambo z hadrů: na karbon potřebujete nůžky, pec a trpělivost*. [Online] 18. duben 2011. [Citace: 24. květen 2015.] [http://auto.idnes.cz/lamborghini-se-vyraibi-z-karbonu-maji-na-to-nove-technologie-pll-/automoto.aspx?c=A110415\\_152311\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/lamborghini-se-vyraibi-z-karbonu-maji-na-to-nove-technologie-pll-/automoto.aspx?c=A110415_152311_automoto_fdv).
10. Symonds o využití uhlíkových vláken v F1: Jaké výhody a potenciál nabízejí? *F1News.autoroad*. [Online] [Citace: 26. květen 2015.] <http://f1news.autoroad.cz/technika/42182-symonds-o-vyuziti-uhlikovych-vlaken-v-f1-jake-vyhody-a-potencial-nabizeji/>.
11. **Reichl, Jaroslav a Martin, Všeticka**. Encyklopedie fyziky. *Fyzika.Reichl*. [Online] [Citace: 3. březen 2017.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/643-kapilarita>.
12. Katedra textilních technologií. *Zweigl G552*. [Online] [Citace: 15. duben 2017.] [http://www.ktt.tul.cz/?page=pristroje&action=detail&nextaction=view&id\\_pristroje=10](http://www.ktt.tul.cz/?page=pristroje&action=detail&nextaction=view&id_pristroje=10).
13. Cite Seer X. *Zweigle*. [Online] [Citace: 16. duben 2017.] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=9D6EE9FE39FA026083B648EFB29BA8C4?doi=10.1.1.113.2764&rep=rep1&type=pdf>.
14. **Suresha, B**. An Academic Publisher. *Scientific Research*. [Online] červen 2006. [Citace: 8. září 2015.]

- <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=20370>. DOI: 10.4236/jmmce.2006.51006.
15. Element. [Online] [Citace: 8. září 2015.] <https://www.element.com/more-sectors/medical-device/pin-on-disk-wear-testing>.
16. TRIBOMÉTRE. [Online] 2014. [Citace: 8. září 2015.] <http://hosting.umons.ac.be/php/lpsi/fr/tribometre/>.
17. **Singla, Manoh**. Scientific Research. *An Academic Publisher*. [Online] říjen 2009. [Citace: 10. září 2015.] <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=20698>. DOI: 10.4236 / jmmce.2009.810070 .
18. **K. E. von Mühlendahl, M. Otto**. Allum. *alergie, životní prostředí a zdraví*. [Online] 22. duben 2013. [Citace: 9. září 2015.] <http://www.allum.cz/toxickelatky/asbest-a-umela-mineralni-vlakna>.
19. **Costa, Roser a Orriolsm, Ramon**. ScienceDirect. *Man-Made Mineral Fibers and the Respiratory Tract*. [Online] prosinec 2012. [Citace: 10. září 2015.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157921291200198X>.
20. **Rapisarda, Venerando**. ScienceDirect. *Cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by glass fibers on human alveolar epithelial cell line A549*. [Online] duben 2015. [Citace: 15. září 2015.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0887233314002501>. SSN: 0887-2333.
21. What is oxidative stress? *SOD Marine Phytoplankton*. [Online] [Citace: 29. březen 2017.] <http://www.marinephytoplankton5000.com/what-is-oxidative-stress>.
22. Death Mini Rewiew. *Melecutools*. [Online] 2016. [Citace: 15. duben 2016.] <https://www.molecutools.com/2016/03/cell-death-mini-review/>.
23. Cell Death:Necrosis. *THE ART OF MEDICINE*. [Online] 29. květen 2015. [Citace: 15. duben 2016.] <https://theartofmed.wordpress.com/2015/05/29/pathologic-cell-injury-and-cell-death-ii-necrosis/>.
24. Zapomeňte na roušky. *dtest*. [Online] 13. květen 2009. [Citace: 15. duben 2016.] <https://www.dtest.cz/clanek-673/zapomente-na-rouscky>.
25. Katalog ochrana dýchacích orgánů. *MSM Group*. [Online] [Citace: 17. duben 2016.]
26. **Militký, Jiří**. Katedra materiálového inženýrství. *Studijní materiály*. [Online] [Citace: 17. duben 2017.] [http://www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2015-04-09/08-59-02.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2015-04-09/08-59-02.pdf).
27. **Militký, Jiří a Vaniček, Jiří**. Katedra textilních materiálů. *Studijní materiály*. [Online] [Citace: 17. duben 2017.] [http://www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2013-04-17/08-30-15.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-04-17/08-30-15.pdf).

## Seznam obrázků

- Obrázek 1.1 – Postup výroby skleněných vláken
- Obrázek 1.2 – Postup výroby uhlíkových vláken
- Obrázek 1.3 – Kapilární elevace (a) a kapilární deprese (b)
- Obrázek 1.4 – Přístroj Zweigle G552
- Obrázek 1.5 – Pin-on-disc přístroj na testování oděru
- Obrázek 1.6 – Analýza životaschopnosti buněk A549 po 72 h vystavení skleněným vláknům o různé koncentraci (5, 50 nebo 100  $\mu\text{g/ml}$ ) ve srovnání s kontrolními buňkami.
- Obrázek 1.7 – Ukázka vlivu oxidativního stresu
- Obrázek 1.8 – Buněčná smrt nekróza a apoptóza
- Obrázek 1.9 - Jednorázová ústenka a jednorázová hygienická rouška
- Obrázek 1.10 - Filtrační polomaska s ventilkem a filtrační polomaska s aktivním uhlím a ventilkem
- Obrázek 2.1 - Aparatura pro oděr rovingů
- Obrázek 2.2 - Detail kladek, úhel opásání
- Obrázek 2.3 - Natažení rovingů na přístroji Zweigle
- Obrázek 2.4 - Detail spojení rovingu na Aparatuře v jednom místě
- Obrázek 2.5 - Detail spojení rovingu na Aparatuře
- Obrázek 2.6 - Obalené konce rovingů
- Obrázek 2.7 – Čtyřmístné váhy
- Obrázek 2.8 - Přerušená vlákna v rovingu
- Obrázek 2.9 - Zachycení úlomků částic: a) sametová destička s úlomky skleněných částic, b) papír s úlomky uhlíkových částic
- Obrázek 2.10: Zalepené rovingy v rámečcích
- Obrázek 2.11 - Tahová křivka
- Obrázek 2.12 - Průměrný váhový úbytek skla 907
- Obrázek 2.13 - Průměrný váhový úbytek skla 908
- Obrázek 2.14 - Průměrný váhový úbytek uhlíku E
- Obrázek 2.15 - Průměrný váhový úbytek uhlíku J
- Obrázek 2.16 - Průměrný úlet částic rovingu skla 907
- Obrázek 2.17 - Průměrný úlet částic rovingu skla 908
- Obrázek 2.18 - Průměrný úlet částic rovingu uhlíku E
- Obrázek 2.19 - Průměrný úlet částic rovingu uhlíku J

- Obrázek 2.20 - Průměrná maximální dosažená síla skla 907
- Obrázek 2.21 - Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů skla 907
- Obrázek 2.22 - Průměrná maximální dosažená síla skla 908
- Obrázek 2.23 - Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů skla 908
- Obrázek 2.24 - Skleněný roving před přetrhem a dva rovingy po přetrhu
- Obrázek 2.25 - Průměrná maximální dosažená síla uhlíku E
- Obrázek 2.26 - Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů uhlíku E
- Obrázek 2.27 - Průměrná maximální dosažená síla uhlíku J
- Obrázek 2.28 - Porovnání průměrné maximální dosažené síly odřených a neodřených rovingů uhlíku J
- Obrázek 2.29 - Uhlíkový roving před přetrhem a po přetrhu
- Obrázek 2.30 - Sklo 907- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle
- Obrázek 2.31 - Sklo 908- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle
- Obrázek 2.32 - Uhlík E- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle
- Obrázek 2.33 - Uhlík J- porovnání maximální dosažené síly neodřených a odřených rovingů po cyklech na přístroji Zweigle

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Vlastnosti skleněných vláken

Tabulka 2 - Porovnání vlastností uhlíkových vláken ze dvou prekurzorů

Tabulka 3 - Druhy použitých rovingů

Tabulka 4 - Přepočet napětí na rychlost

Tabulka 5 - Výsledky odírání skla 907

Tabulka 6 - Výsledky odírání skla 908

Tabulka 7 - Výsledky odírání uhlíku E HTS40 F13

Tabulka 8 - Výsledky odírání uhlíku J STS40 F13

Tabulka 9 - Výsledky úletu částic skla 907

Tabulka 10 - Počet ulétlých částic skla 907

Tabulka 11 - Výsledky úletu částic skla 908

Tabulka 12 - Počet ulétlých částic skla 908

Tabulka 12 - Výsledky úletu částic uhlíku E HTS40 F13

Tabulka 13 - Celkový počet ulétlých částic uhlíku E HTS40 F13

Tabulka 14 - Výsledky úletu částic uhlíku J STS40 F13

Tabulka 15 - Celkový počet ulétlých částic uhlíku J STS40 F13

Tabulka 16 - Sklo 907 – průměrné hodnoty veličin

Tabulka 17 - Sklo 908 – průměrné hodnoty veličin

Tabulka 18 - Uhlík E – průměrné hodnoty veličin

Tabulka 19 - Uhlík J – průměrné hodnoty veličin