



Tření speciálních materiálů při vysokých rychlostech

Diplomová práce

Studijní program:

N0723A270003 Průmyslové inženýrství

Autor práce:

Bc. Michaela Šulcová

Vedoucí práce:

doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková
Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce:

doc. Ing. Miroslav Svoboda





Zadání diplomové práce

Tření speciálních materiálů při vysokých rychlostech

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Šulcová**
Osobní číslo: T19000036
Studijní program: N0723A270003 Průmyslové inženýrství
Zadávací katedra: Katedra hodnocení textilií
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši zaměřenou na vybrané oblasti tribologie
2. Ověřte vhodnost nového experimentálního zařízení pro měření tření. Popište vliv rychlosti tření, úhlu opásání a typu materiálu. Sledujte též vznikající teplené efekty.
3. Navrhněte a ověřte metodiku vyhodnocení experimentálních dat.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Ed. Gupta, B., S.: Friction in Textile Materials. Woodhead Publishing Limited 2008.
[2] Rabinowicz, E., Suh, N., P., Carignan, F., J.: Friction and Wear at High sliding Speeds. A Study of High Speed Friction. Dept. Of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge 1978.
[3] Cross, R.: Increase in friction force with sliding speed. Am. J. Phys., Vol. 73, No. 9, September 2005.

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková
Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce: doc. Ing. Miroslav Svoboda

Datum zadání práce: 29. října 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 16. května 2022

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Roman Knížek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. dubna 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, 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 nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

10. května 2022

Bc. Michaela Šulcová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala docentce Daně Křemenákové za odborné vedení mé diplomové práce a docentu Svobodovi za přiblížení experimentálního zařízení. Dále bych ráda poděkovala pracovníkům katedry, kteří mi vždy ochotně pomohli a poradili. V neposlední řadě patří obrovské poděkování mým blízkým, kteří mi byli oporou nejen při psaní práce, ale po celou dobu studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá třením speciálních textilií při vysokých rychlostech. V teoretické části byl popsán současný stav problematiky tření textilií a charakter použitých materiálů. V experimentální části byla ověřena vhodnost nového experimentálního zařízení na padákové tkanině. Při experimentu byla pozorována různá nastavení zařízení a kombinace textilie s dalšími materiály. Na základě měření byl popsán vliv rychlosti tření, úhlu opásání a zvoleného materiálu. Práce dále navrhuje metodiku pro vyhodnocení výstupních dat, která bude popisovat průběh měření v závislosti na součiniteli tření a růstu teploty.

Klíčová slova

tření při vysokých otáčkách, součinitel tření, padáková tkanina, polyamid

Annotation

This thesis focuses on high-speed friction of special materials. In the theoretical part, the state of the art of friction in textile and materials used for the following experiment are described. In the empirical part, the new experimental measuring device was used to test the friction of parachute fabric. Testing parameters were evaluated in combination with multiple types of materials. The effect of friction speed, belt angle, and material selection was described based on the results. A methodology for friction evaluation with regards to the coefficient of friction and temperature was then introduced.

Key words

high-speed friction, coefficient of friction, parachute fabric, polyamide

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	10
Úvod.....	11
1 Přehled současného stavu.....	12
1.1 Tribologie.....	12
1.1.1 Historie.....	12
1.1.2 Možné následky tření a opotřebení.....	16
1.2 Tření.....	18
1.2.1 Druhy tření.....	19
1.2.2 Tření textilií.....	21
1.2.3 Význam styčné plochy a rychlosti tření.....	24
1.2.4 Tření při vysokých rychlostech.....	26
1.2.5 Zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání.....	32
1.3 Měřený materiál.....	37
1.3.1 Padáková tkanina.....	37
1.3.2 Polymerní materiál.....	38
1.3.3 Vazba.....	43
1.3.4 Úpravy.....	44
1.3.5 Použití.....	45
1.3.6 Životnost.....	49
2 Experimentální část.....	50
2.1 Materiál.....	50
2.1.1 Analýza materiálu.....	50
2.1.2 Infračervená spektroskopie s Fourierovnou transformací.....	52
2.1.3 Diferenční skenovací kalorimetrie.....	52
2.2 Postup měření.....	54
2.2.1 Volba materiálu a konstrukční omezení přístroje.....	54

2.2.2	Měření teploty.....	55
2.2.3	Nastavení zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání.....	58
2.2.4	Upnutí textilních vzorků.....	59
2.2.5	Nastavení úhlu opásání.....	59
2.3	Naměřená data.....	60
2.3.1	Nastavení experimentu.....	61
2.3.2	Výstupní parametry.....	62
2.3.3	Tření padákové tkaniny.....	64
2.3.4	Vizuální změny.....	72
2.3.5	Vliv úhlu opásání na tření padákové tkaniny.....	75
2.3.6	Orientační tření padákové tkaniny a folie.....	80
2.3.7	Orientační tření padákové tkaniny a polyamidových tkanin.....	84
2.3.8	Porovnání měřených materiálů.....	87
2.3.9	Měření na nakloněné rovině.....	90
2.4	Návrh metodiky.....	93
2.4.1	Optimální nastavení parametrů pro padákovou tkaninu.....	94
2.5	Diskuze.....	96
2.5.1	Padáková tkanina.....	97
2.5.2	Ostatní materiály.....	98
2.5.3	Další využití experimentálního zařízení a navrhované změny.....	99
3	Závěr.....	101
	Seznam použité literatury.....	102
	Seznam obrázků.....	107
	Seznam tabulek.....	110

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
f	součinitel tření [-]
F	síla [N]
F_t	třecí síla [N]
T_n	tažná síla [N]
N	normálová tlaková síla [N]
g	gravitační zrychlení [m/s^2]
M	hmotnost tělesa [kg]
A	plocha [m^2]
r	poloměr [m]
α	úhel tření/opásání [$^\circ$]
θ	úhel dopadu [$^\circ$]
T_g	teplota skelného přechodu [$^\circ\text{C}$]
T_m	teplota tání [$^\circ\text{C}$]
T_f	teplota viskózního toku [$^\circ\text{C}$]
T	teplota [$^\circ\text{C}$]
ε	emisivita [-]
h	šířka [m]
PA	polyamid
PES	polyester
%	procenta
[N]	newton
[kg]	kilogram
[m], [m^2]	metr, metr čtvereční
[$^\circ$]	stupeň
[$^\circ\text{C}$]	stupeň Celsia

Úvod

Tribologie je vědní obor zabývající se třením, jeho následky a možnými způsoby, jak mu předejít. Problematika tření a snahy o jeho eliminaci jsou starší než samotný pojem, první inovace soustředící se na usnadnění pohybu předmětů pochází již ze střední doby kamenné. Od té doby urazil vývoj v této oblasti dlouhou cestu jako lidstvo samotné. Také dnes je problematika tření stále aktuální a vznikají nové výzkumy.

Tato diplomová práce se zabývá třením speciálních materiálů při vysokých rychlostech, především padákové tkaniny. V teoretické části je nastíněn úvod do problematiky tření, přiblíženo tření při vysokých otáčkách a jsou popsány metody měření. Také je popsán charakter měřeného materiálu a jeho použití. Měření byla provedena na experimentálním zařízení pro měření odolnosti proti teplenému namáhání [1] a jeho vhodnost byla v průběhu této práce ověřena. Na měřená data mělo vliv nastavení parametrů zařízení, zvolený materiál, jeho umístění na pozici stacionárního vzorku či vzorku opásání a orientace. Padáková tkanina byla třena ve směru osnovy i ve směru útku, bylo také sledováno tření v kombinaci s folií či jinou polyamidovou tkaninou. Tření bylo měřeno při rychlostech od 6 do 18 m/s a byl zkoumán také vliv zvolené velikosti úhlu opásání od 65 do 105°. U naměřených dat byl vyhodnocen průběh teploty a součinitele tření, z něž byly vypočteny hodnoty pro statické a dynamické tření. Správnost odhadu statického součinitele tření byla ověřena měřením na nakloněné rovině. Poškození vzorků po měření bylo zachyceno na mikroskopických snímcích a porovnáno se vzorky před měřením.

Na základě poznatků z měření byla navržena a ověřena metodika pro práci s experimentálním zařízením a vyhodnocení naměřených dat.

1 Přehled současného stavu

1.1 Tribologie

Tribologie je vědní obor, jehož název pochází z řeckého slova τριβω, což v překladu znamená třít. Lze tedy mluvit o studii tření či klouzání. Novější a častější definice však označuje tribologii za vědní obor zabývající se kromě tření také opotřebením a mazáním.

Výzkumy v oblasti tribologie lze rozdělit do čtyř hlavních disciplín: mechanika těles, mechanika tekutin, nauka o materiálu a chemie. Mechanika těles klade důraz na analýzu chování v závislosti na klouzání, modely opisují tření a opotřebení, které vychází z fyzikálních mechanismů. Mechanika tekutin zkoumá vliv maziv a vytváří modely kluzného prostředí, které mohou zahrnovat také vliv teplot, drsnosti povrchu, viskózní odpor a podobně. Nauka o materiálech zkoumá změny povrchu pevné látky během klouzání. Chemická část se soustředí především na maziva a jejich možné úpravy. [2]

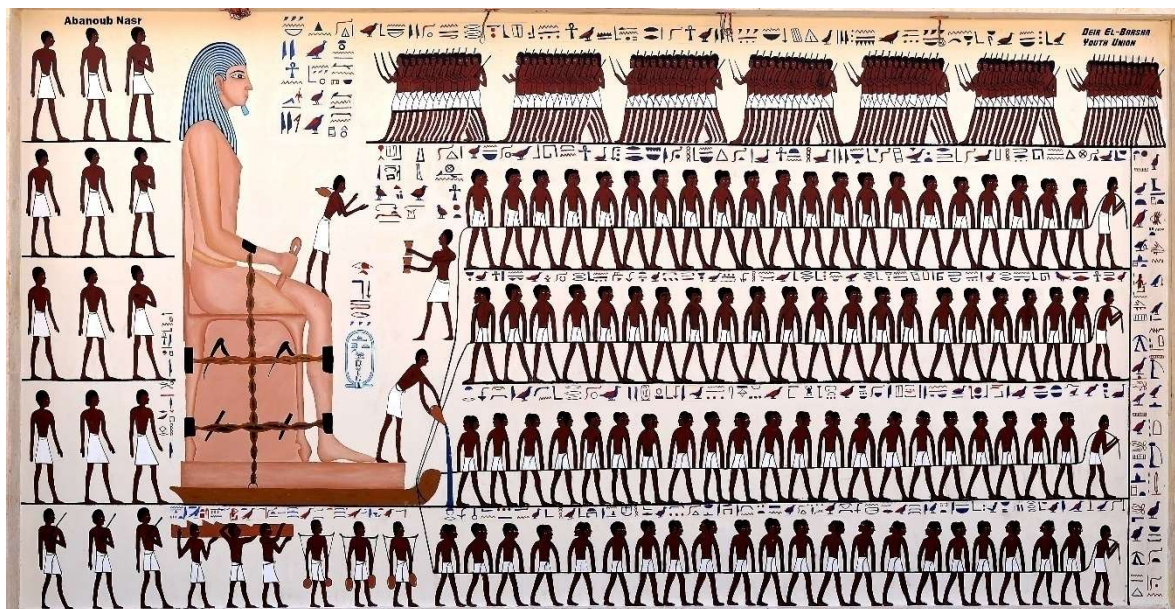
1.1.1 Historie

Označení tribologie je používáno teprve okolo šedesáti let. Příklady, studie a inovace v této oblasti lze ovšem pozorovat mnohem dříve. Mang & Bobzin, & Batels [3] ve své publikaci doslova píše: „Historie tribologie je stará jako historie lidstva.“

K inovacím motivovala lidi především snaha usnadnit si běžné činnosti. První příklady lze najít již ve střední době kamenné, tedy před 11 000 až 5 500 lety. Z té doby existují nálezy ložisek pro kamenné hrnčírské kruhy a jednoduchých ložisek pro další použití. Existuje i teorie, že již v této době mohlo docházet k úmyslné lubrikaci nástrojů. Ta by byla pravděpodobně prováděna vodou, bahnem či škvařeným tukem z dobytka. První doložené použití maziv pak pochází z Egypta, kde je zachyceno na obraze v jedné z hrobek v El Bersheh z období 1800 př. n. l. (Obrázek 1: Znázornění obrazu z hrobky El-Bersheh zachycující muže lijícího mazivo pod sáně, na kterých je tažena socha. [43]

Obrázek 2). Je zde vyobrazen muž, který na zem před prostředek, na němž je přepravována obrovská socha, lije mazivo. I v tomto případě se pravděpodobně jednalo o vodu. Během prvního tisíciletí před naším letopočtem se pro přepravu těžkých předmětů, jako jsou sochy

a stavební bloky, používaly sáně, pod které byly vloženy dřevěné válečky. Válečky bylo v průběhu pohybu potřeba přemísťovat ve směru jízdy.



Obrázek 1: Znárodnění obrazu z hrobky El-Bersheh zachycující muže lijícího mazivo pod sáně, na kterých je tažena socha. [43]

Obrázek 2: Znárodnění obrazu z hrobky El-Bersheh zachycující muže lijícího mazivo pod sáně, na kterých je tažena socha. [43]

Jako první pochopení a využití principu tření lze chápat schopnost rozdělat oheň pomocí tření dvou dřívěk o sebe. Za jednu z nejdůležitějších inovací v oboru tribologie lze považovat kolo. Tento objev se připisuje mezopotámské civilizaci a datuje se kolem roku 3500 př. n. l., kdy tažné sáně začala střídat kolová vozidla. Objevy pozůstatků kol pocházejí z třetího tisíciletí před naším letopočtem. Podobně staré nálezy byly objeveny ve více oblastech, pochází z Evropy i Asie a není jasné, zda zde došlo k objevu nezávisle na sobě, nebo jestli došlo k vzájemnému ovlivnění. Existují také prameny zmiňující se o vynálezu kola již 8000 př. n. l., ty však nebyly dále potvrzeny. Dalšími milníky z hlediska tribologie jsou objevy živice (vysoce viskózní organická kapalina) jako mazadla a použití železných ložisek asi 500 př. n. l. v řecké a římské kultuře. Jiný zdroj uvádí zmínku o živici – bitumenu již v Bibli, kdy sloužila k utěsnění Noemovy archy, a považuje ji za první

zmínku o tribologii. Zde lze však považovat použití materiálu spíše za stavební prvek pro utěsnění, nikoli za mazadlo. Nález bronzových valivých ložisek pochází z Číny asi z roku 200 př. n. l. Okolo roku nula vniká v říši římské seznam maziv, v té době byly používány rostlinné a živočišné oleje. Řecké a římské civilizace také využívaly Archimédova ozubená kola a válečková ložiska. Ve středověku dochází k úpadku a zapomnění některých technických znalostí pocházejících z řecké a římské civilizace, například materiály železo a bronz jsou znovu nahrazeny dřevem a kamenem. Rozvoj lze znovu identifikovat až mezi devátým a dvanáctým stoletím v islámském světě.

V období renesance (1450–1600 n. l.) nastává první vědecký rozvoj tribologie. Nejvýznamnějším představitelem je Leonardo da Vinci (1452–1519). Ten se řadí mezi hlavní představitele této doby, především v oblasti malby. Věnoval se také sochařství, architektuře a psaní, v oblasti vědy matematice, fyzice, přírodovědě, astronomii, chemii a dalším oblastem výzkumu. Jako vynálezce a konstruktér učinil objevy, které položily základy dalším studiím, či jsou stále aktuální. Pro tribologii byly významné hlavně jeho studie síly tření na vodorovné a na nakloněné rovině, vliv zdánlivé oblasti kontaktu. Ze svých studií vyvodil, že síla tření je nejen přímo úměrná aplikovanému zatížení, ale také nezávislá na zdánlivé oblasti kontaktu. Zkoumal materiály vhodné pro válečková ložiska a jejich možné slitiny. Zabýval se také myšlenkou, že tření je závislé na drsnosti materiálu, tedy že použití hladšího povrchu vede k menšímu tření, zatímco u hrubšího povrchu dochází k většímu tření. Popsal, že tření není závislé na kontaktní ploše. Tření rozdělil na více druhů, rozlišoval mezi posuvným a valivým. V patnáctém století vznikly také publikace zaměřené na cykloidy ozubených kol (Nikolaus von Kues (1401–1464)) nebo vztažené k těžební technologii (Georg Agricola (1494–1555)).

Za nejvýznamnější osobnosti pro rozvoj tribologie v sedmnáctém století lze označit Hooka, Newtona a Amontonsena. K největšímu pokroku docházelo na území Británie, která si svou převahu brzy uvědomila a zakázala export strojů, techniky i kvalifikovaných pracovníků. V tomto období byla poptávka po mechanizaci v těžebním průmyslu, ale i použití pro kola vodních a větrných mlýnů. K těmto účelům byla používána ložiska s nízkým třením, která byla velmi žádaná. Robert Hooke (1635–1703) se zabýval procesy valivého tření vztaženými k adhezi mezi koly a zemí, tvrdosti kol a deformaci povrchu. Na základě svých studií představil několik konceptů konstrukce ložisek, těsnění, možných použitých materiálů a mazání, dále vynalezl univerzální kloub. Guillaume Amontons (1663–1705)

formuloval první a druhý zákon tření. První zákon: Síla tření je přímo úměrná působícímu zatížení. Druhý zákon: Síla tření je nezávislá na zdánlivém plošném kontaktu. Leonard Euler (1707–1783) odlišil kinetické tření od statického tření, definoval sílu potřebnou k pohybu závaží po nakloněné rovině a stanovil koeficient tření. Valivé a kluzné tření jako první rozlišoval Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716). Isaac Newton (1642–1727) definoval v zákoně viskózního toku vnitřní tření kapalin. V první polovině 18. století došlo k pokroku ve vývoji válečkových ložisek a ozubení. Christian Huyges (1629–1695) vynalezl kyvadlové hodiny a nechal si patentovat kapesní hodinky. V této době již bylo poměrně známé použití mazadel. Stále se používaly se živočišné a rostlinné tuky, především sádlo, lůj a rostlinné oleje.

Průmyslová revoluce byla významná sociálním a ekonomickým rozvojem, v období 1750– 1850 docházelo také k zásadním změnám a rozvoji v oblastech průmyslu. To mělo vliv na rozvoj tribologie. Bylo zapotřebí používat účinná ložiska a vhodná maziva. Došlo k mechanizaci předení a tkaní v textilním průmyslu, k vývoji parních strojů pro zemědělství a dopravu. Zásadní vývoj parních strojů provedl James Watt (1736–1819). Charles Augustin Coulomb (1736–1806) prováděl experimenty, na jejichž základě definoval vzorce tření. Zabýval se valivým třením, třecím odporem při klouzání i pohybem po nakloněných rovinách a drsných površích. Byly položeny základy mechaniky tekutin, na nichž se podíleli například Euler, Bernoulli, Poiseuille, Navier a Stokes. Claude Navier (1785–1836) do mechaniky zahrnul Newtonovy zákony pro proudící tekutiny a viskózní termíny a George Gabriel Stokes (1819–1903) definoval základy viskózního proudění. Vycházející rovnice jsou známy jako Navier-Stokesovy. Jako mazadla se používaly rostlinné a živočišné oleje, například olivový, řepkový, palmový, kokosový olej, sádlo nebo lůj. V roce 1812 proběhla v Praze první destilace minerálního oleje, která vedla k dalšímu vývoji a rozšíření maziv na bázi minerálních olejů.

Ve druhé polovině 19. století a první polovině 20. století vzniká spousta studií k tribologii. Například Osborne Reynolds (1842–1912) se zabývá výzkumem valivého tření, přispívá k výzkumu mechaniky tekutin a publikuje práci „O teorii mazání a její aplikaci na experimenty p. Beauchampa Towera, včetně experimentálního stanovení viskozity olivového oleje“. Definoval Reynoldsovo číslem, které představuje bezrozměrnou veličinu a je stanoveno jako poměr setrvačných sil k viskózním silám v kapalině. Pomocí něj je možné zjistit, zda je proudění tekutiny laminární či turbulentní. Reynoldsovými

rovnícemi se dále zabývá například Arnold Sommerfeld (1868–1951). Richard Stribeck (1961–1950) se zabýval měřením tření na radiálních ložiscích a představil takzvanou Stribeckova křivku. Jeho výsledkům se dále věnoval Ludwig Gumbel (1874–1923), ten také definoval hlavní zdroje suchého tření. V letech 1884 až 1886 dochází k vývoji viskozimetrů (Engler, Saybolt a Redwood). Parní stroje na železnici střídá elektromotorová lokomotiva a místo rostlinných a živočišných maziv se začala používat destilovaná a rafinovaná maziva, po válce došlo také k rozšíření kompresorových a rafinovaných olejů. V této době byly vynalezeny také první přísady do maziv.

Přibližně od roku 1950 roste povědomí o důležitosti tření, opotřebení a mazání jako o součásti technického inženýrství. Tento obor je nejčastěji vztažen k provozu strojů a jejich součástí. Nese s sebou však také ekonomické a ekologické aspekty. Na ekonomické upozornovala Jostova zpráva, o ekologických se hovoří zhruba od 80. let 20. století. Mezi ekologické posuny patří například vývoj biologicky odbouratelných maziv (tzv. biomaziva), která jsou vyráběna z rostlinných olejů, především řepkového, slunečnicového nebo sójového. Ekologický aspekt nejen v oblasti tribologie je stále aktuálnější a roste na významu. V posledních letech se ve spojitosti s tímto trendem začal objevovat také pojem tzv. zelená tribologie.

Z tribologie vychází i další dva obory – nanotribologie a biotribologie. Nanotribologie se zabývá jevy tření, opotřebení, adheze a lubrikace v nanorozhraní a biotribologie jevy, které lze pozorovat v lidském či zvířecím těle. [3] [4]

1.1.2 Možné následky tření a opotřebení

Tribologii lze považovat za poměrně nový obor, který se rozšířil po roce 1966, kdy byla v Británii představena tzv. Jostova zpráva. Ta poukazovala na ekonomické ztráty způsobené opotřebením. Podle Josta bylo možné opatřeními ušetřit v průmyslu 1,3–1,6 % HDP, podobné studie vznikaly i v dalších zemích. Mang uvádí ve své rešerši novodobější studii z roku 2008, která uvažuje úsporu 1,6 % HDP, což je považováno za konzervativní odhad zohledňující aktuální ceny. V této novodobé studii není jediným cílem snížení tření ve stroji, ale zaměřuje se také na prodloužení životnosti stroje. Podle studie by Evropská unie mohla správným využitím znalostí tribologie ušetřit za rok 2008 přibližně 303 miliard USD. Dalšími v pořadí jsou uvedeny Spojené státy americké 186 miliard USD, Čína

68 miliard USD, Japonsko 63 miliard USD, Německo 50 miliard USD, Francie 48 miliard USD a Velká Británie 36 miliard USD. [3]

Následky tření a opotřebení s sebou však nenesou pouze finanční ztráty. Způsobené komplikace mohou ohrozit kvalitu života i život samotný. Ludema a Ajayi [2] ve své publikaci uvádí pět bodů a blíže popisují i možné komplikace:

- Tření a opotřebení jsou finančně nákladné, neboť dochází k energetickým i materiálovým ztrátám.

Opotřebení je definováno jako částka na každého člověka na rok. Jako příklady, na kterých lze sledovat přímé opotřebení, uvádí oděv, pneumatiky, hodinky atd. U těch lze snadno vypočítat jejich opotřebení na jedince. Opotřebení se obtížněji sleduje například u věcí souvisejících s transportem věcí, jako jsou dálnice, dopravní prostředky či letadla. Častým úkazem je také to, že lidé shromažďují zboží rychleji, než je stíhají opotřebovat.

- Tření a opotřebení může snížit národní produktivitu.

Tento bod autoři dále dělí do dvou kategorií. Do první patří situace, kdy bude rychle docházet k opotřebení výrobku, a více lidí se tak bude specializovat na možnou opravu. Na výrobu takového produktu pak bude zaměstnáno méně lidí a sníží se export, naopak se bude dařit importu.

V druhém případě mohou mít vliv opotřebované stroje a vybavení, které nejsou tak produktivní a zaměstnávají více lidských zdrojů. Funkce stroje a schopnost provádět úkon je nižší než v případě novějšího zařízení.

- Tření a opotřebení mohou ovlivnit národní bezpečnost.

V tomto bodě uvádí autoři jako příklad vojenské vybavení, které může při opotřebení snížit schopnost provádět potřebné úkony sloužící k výcviku či ochraně státu. Jako příklady, kde je opotřebení dobře rozpoznatelné, uvádí letecké motory a velké zbraně, hůře sledovatelné je pak u ložisek a ozubených kol v lodích, to se nejčastěji projevuje vyšší hlučností.

- Tření a opotřebení může ovlivnit kvalitu života.

Opotřebení vlivem tření se týká také věcí, se kterými se člověk setkává denně. Opotřebení se projevuje změnou vzhledu, zvýšením hlučnosti či jinými nežádoucími následky. U oblečení se může jednat o opotřebované zipy, u holicího strojku o zasekávání a nesouměrné holení. Nemusí se však jednat pouze o opotřebení spotřebního zboží. Dále lze uvést předměty, které napomáhají k udržení kvality života jednotlivce, jako jsou umělé zuby, klouby či srdeční chlopně.

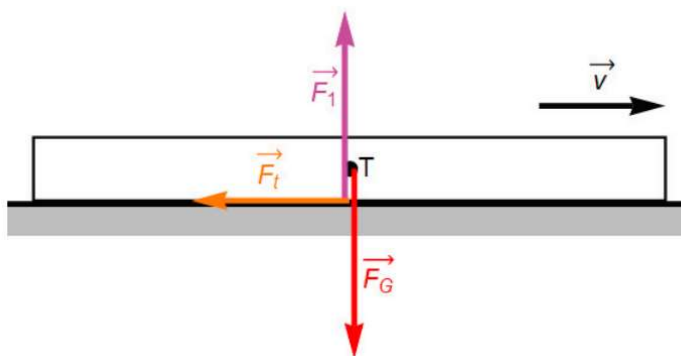
U automobilu se opotřebení projevuje například nežádoucími zvuky, v některých případech však může zvýšit riziko nehody.

- Opotřebení způsobuje nehody.

Konkrétně u automobilu je nejčastější opotřebování pneumatik. Sjeté pneumatiky zhoršují ovladatelnost vozidla na mokré silnici a prodlužují brzdovou dráhu. Nehoda nemusí být spojena pouze s dopravním prostředkem, dalšími příklady jsou elektrická vedení, kdy hrozí úraz elektrickým proudem, či opotřebované nářadí. [2]

1.2 Tření

Jedná se o mechanický proces, k němuž dochází při vzájemném pohybu dvou těles. Při tření mezi dvěma tělesy vznikají tečné síly ve styčné ploše. Tečná třecí síla působí v protisměru pohybu, nebo proti změně klidového stavu. Při překonávání této síly dochází k přírůstku vnitřní energie, což se projevuje zvýšením teploty. Zjednodušeně lze říct, že potřebná práce k překonání se mění na teplo. Tření může probíhat mezi pevným, kapalným i plynným skupenstvím.



Obrázek 3: Schéma tření [5]

Na obrázku 2 je vyznačeno tření dvou těles a síly na ně působící. Ve středu tělesa je vyznačeno těžiště T , v němž uvažujeme působení sil. Gravitační síla \vec{F}_g je na obrázku vyznačena červeně a působí normálově vůči třené ploše. V opačném směru vniká reakce, která je ve schématu označena jako \vec{F}_1 (fialová šipka). Třecí síla \vec{F}_t (oranžová šipka) působí proti směru pohybu, který je naznačen vektorem rychlosti \vec{v} . Platí:

$$N = M * g \quad (1)$$

V rovnici 1 vyjadřuje N normálovou sílu, která je v obrázku vyznačena červenou šipkou. M představuje hmotnost třecího tělesa a g gravitační zrychlení. Třecí sílu lze popsat jako součin normálové síly a koeficientu tření f . To lze vyjádřit vztahem:

$$F_t = f * N = f * M * g \quad (2)$$

Koeficient tření f musí být větší než 0. Původní předpoklad byl, že f nezávisí na ploše kontaktu a rychlosti těles, to však bylo několikrát empiricky vyvráceno. Coulomb vyzoroval, že statické tření je větší než dynamické, které při jisté idealizaci nezávisí na rychlosti pohybu. Da Vinci zjistil, že statické tření roste s dobou kontaktu těles. Amontsen a později Coulomb formulovali, že menší tělesa mají nižší tření, a tedy že koeficient tření závisí na reálné ploše kontaktů a klesá s růstem normálové síly, neplatí tak mezi nimi přímá úměra. [6]

Klasická mechanická teorie udává, že odpor je způsoben tím, že při pohybu dvou těles je potřeba překonat jedním tělesem strukturu druhého. K tomu dochází pozvedáváním tělesa do úrovně nejvyšších výčnělků, jež se nachází na povrchu drsné podložky. Tělesa jsou do sebe za klidu zaklíněna právě povrchovými nerovnostmi. Mezi tělesa se vlivem prostředí dostává také plynné či kapalně médium, které s sebou může nést i znečištění ve formě tuhých částic. To může mít vliv na hodnoty koeficientu tření, toto znečištění však nebývá matematicky definováno. V praxi je těžké mu zcela předejít, docílit styku zcela čistých povrchů je možné pouze ve vakuu.

1.2.1 Druhy tření

Jak bylo uvedeno výše, ke tření může docházet mezi všemi třemi skupenstvími. Je možné ho rozdělit na suché tření a vnitřní tření kapalin (viskozita). U suchého tření dochází

k dalšímu dělení na statické a dynamické. Dynamické tření lze dále dělit podle původu pohybu na smykové a valivé.

Tření statické

Statické tření je někdy také označováno jako klidové tření. Ke klidovému tření dochází mezi dvěma stýkajícími se tělesy, setrávajícími v relativním klidu, které se do pohybu snaží uvést vnější síly. Na tělesa působí normálový tlak, který je kolmý na obě styčné plochy těles. Na tělesa také působí F_{t0} (tření v klidu), síla rovnoběžná se styčnou plochou. Pro klidové tření je hodnota této síly od 0 až do mezní hodnoty. Síla klidového tření je dána právě touto mezní hodnotou, dokud jí není dosaženo, nedojde k pohybu tělesa. [7]

Tření smykové

Smykové tření vzniká posuvem jednoho tělesa po povrchu druhého tělesa, dochází mezi nimi ke smýkání. Síla smykového tření F_{ts} vzniká nerovností povrchů obou styčných ploch, ty se při smýkání vzájemně obrušují a deformují. Směr třecí síly je vždy opačný než směr pohybu. Třecí síla závisí na normálové tlakové síle N , ovlivňuje ji také součinitel smykového tření f , který závisí na materiálu, hladkosti, či drsnosti dotýkajících se povrchů. Třecí síla naopak nezávisí na velikosti styčné plochy a při rychlostech zhruba do 5 m/s ani na rychlosti. Velikost tření při uvedení tělesa do pohybu je větší než velikost tření za pohybu.

$$F_{ts} = f * N \quad (3)$$

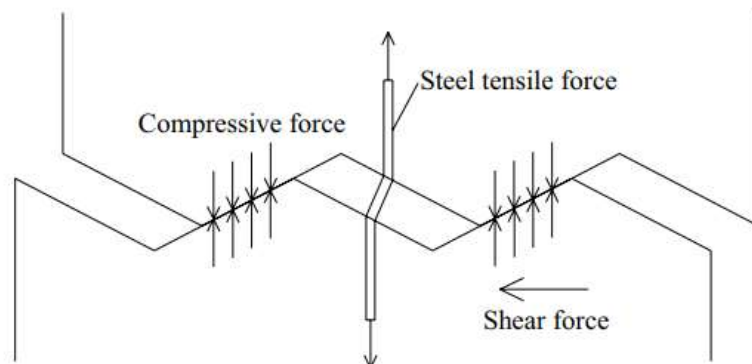
Součinitel smykového tření je při malých rychlostech menší než součinitel klidového tření f_0 . Určuje se pokusně například nakláněním plochy do té míry, než dojde k rovnoměrnému smýkání tělesa. Součinitel smykového tření lze vyjádřit vzorcem:

$$f = \frac{F_{ts}}{N} = tg \alpha \quad (4)$$

Smykové tření lze vyjádřit poměrem smykového tření F_{ts} a normálové síly N , nebo také tangens α úhlu tření. Úhel α představuje velikost odklonění reakce za pohybu od normály.

Součinitel smykového tření lze v jistém rozmezí rychlostí a při normálové tlakové síle považovat za konstantní. Tato závislost se při velkých rychlostech zmenšuje. Při použití maziva závisí součinitel tření na teplotě. [8]

Na obrázku 3 je znázorněn kontakt dvou těles při smykovém tření. Tělesa se pohybují ve směru proti směru třecí síly (shearforce). Ve styčných plochách, tedy oblastech, kde se tělesa dotýkají, působí tlakové síly (compressive force). Konkrétní obrázek znázorňuje dvě části železobetonového kompozitu, proto je zde také znázorněna ocelová výztuha, která prochází oběma částmi. Smýkáním dvou částí betonové matrice je vyvolána síla, která má za následek napětí v podélném směru ocelové výztuže. [9]



Obrázek 4: Schéma smykového tření [9]

Tření valivé

Valivé tření vzniká při pohybu válce o poloměru r po rovinné podložce. Součinitel valivého tření je koeficient úměrnosti mezi velikostí momentu síly tření a normálové síly.

$$f_v = \frac{r * F_t}{N} \quad (5)$$

f_v představuje součinitel tření, r poloměr válce, F_t sílu valivého tření a N normálovou tlakovou sílu.

Velikost třecí síly závisí na rychlosti vzájemného pohybu, pokud zůstane těleso v čase $t = 0$ v klidu, pak se také $F_t = 0$. Při působení vnější síly F_v roste rychlost tělesa a zvyšuje se také F_t , až do času, kdy se obě síly vyrovnají (nastává rovnoměrný přímočarý pohyb). [8]

1.2.2 Tření textilií

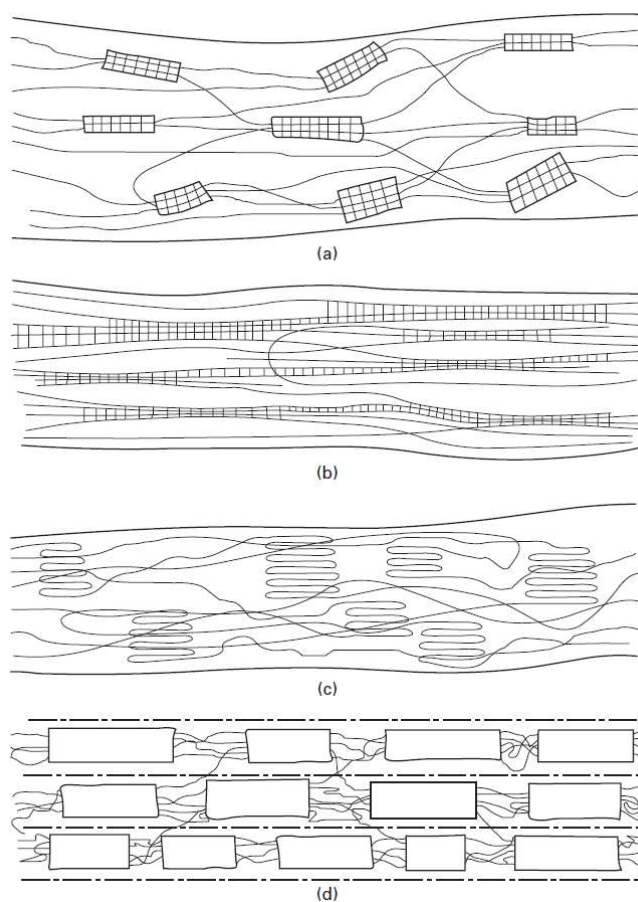
Tření je povrchový jev, který je však ovlivněn nejen povrchovými vlastnostmi, ale i těmi uvnitř materiálu. Morfologie povrchu těles ovlivňuje tření při kontaktu dvou ploch. Na tření má vliv chemické složení a fyzikální vlastnosti materiálu. Chemická struktura má vliv

na vazbu mezi řetězci molekul uvnitř tělesa, ale také na síly na povrchu a jejich interakci při kontaktu s jinými tělesy. Výsledné tření materiálu je ovlivněno jak chemickými, tak fyzikálními vlastnostmi, jako je například materiálový modul. Vlákná textilních materiálů mají různé průřezy a lze očekávat, že tvar průřezu bude mít významný vliv na třecí vlastnosti.

Vliv na tření má také způsob, jakým textilie, potažmo vlákna interagují s vodou. Je potřeba věnovat pozornost tomu, zda jsou vlákna hydrofilní, či hydrofobní, neboť textilie přichází do kontaktu s vodou během výroby i při běžném používání. Polymery, které obsahují polární funkční skupiny (např. alkoholy – OH a amidy – NH), mají tendenci vázat vodu. Hydrofilní vlákna při absorpci bobtnají a dochází mimo jiné ke změně třecího chování. Obecně platí, že čím větší je absorpce, tím větší je i změna chování při tření. Hydrofobní materiály lépe přijímají povrchové úpravy na bázi oleje. Při tření může za určitých podmínek nastat mazání povrchu taveninou. U textilií dochází k přeměně třecí energie na teplo. Ke zvýšení teploty dochází především lokálně, neboť většina vláken je poměrně dobrými tepelnými izolanty.

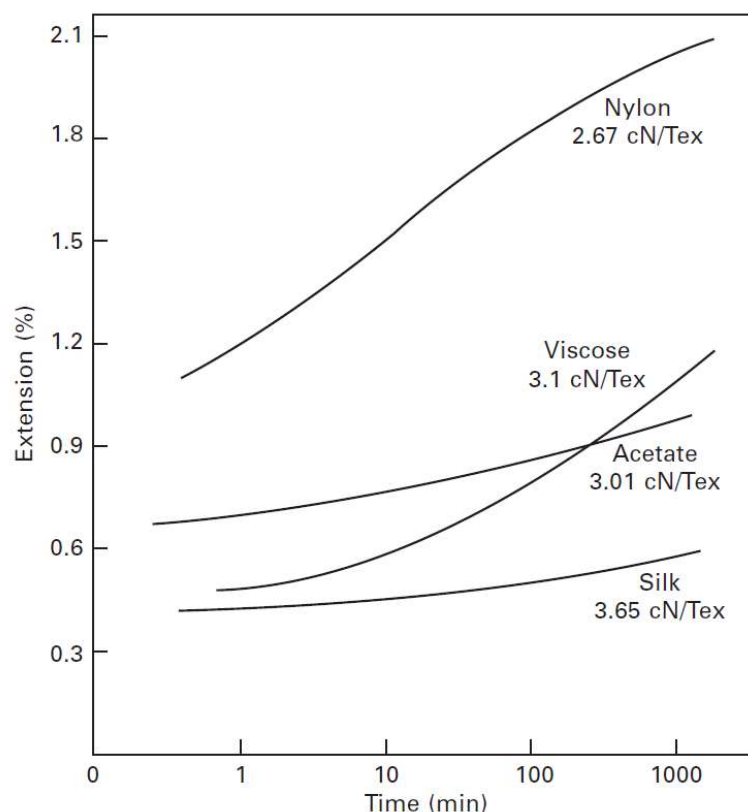
Struktura polymerních vláken je tvořena dvěma oblastmi lišícími se uspořádáním řetězci molekul. Ty se dělí na amorfni a krystalické. V krystalických oblastech jsou molekuly těsně svázány, zatímco v amorfních oblastech jsou molekuly uspořádány nepravidelně a jsou mezi nimi poměrně velké vzdálenosti. Vazby v amorfních oblastech jsou tak slabší a síla v různých místech se liší. Krystalické části vlákna jsou rozměrově a teplotně stabilní, amorfní části jsou naopak elastické a tažné, což je vhodné pro mnohé textilní aplikace. Přírodní vlákna mají jedinečnou morfologii, zatímco uměle vytvořená vlákna mohou mít podobnou formu i přes rozdílné chemické složení. Oblasti ve vláknech mohou být uspořádány různě, jak je znázorněno na obrázku 4. Jako první je zde vyobrazena tzv. třásnitá micela, která je zároveň nejrozšířenější. V amorfní matici jsou rozptýleny drobné krystalické oblasti. U druhé struktury, třásnité fibrily, je krystalická oblast tvořena dlouhými tenkými oblastmi orientovanými rovnoběžně s osou vlákna a neuspořádanými oblastmi mezi nimi. Tuto strukturu má většina přírodních vláken. Fibrily nemusí být vždy rovnoměrné s osou, mohou k ní být nakloněny pod určitým úhlem, nebo ji spirálově obtáčet. Třetí vyobrazená struktura je typická pro syntetické polymery, jedná se o lamelu s lemovaným skládaným řetězcem. V této struktuře vznikají nežádoucí záhyby,

které se rovnají při procesu tažení. Poslední struktura je tvořena sestavou vzájemně propojených fibril, kde se střídají nekrytalické a krytalické oblasti.



Obrázek 5: Krytalické a amorfní části ve vláknech (a: třásnitá micela, b: třásnitá fibrila, c: třásnitá lamela, d: modifikovaná třásnitá fibrila s micelami seřazenými do sloupců) [10]

Polymery při namáhání vykazují viskoelasticitu, a to se také projeví při velikosti třecí síly. Efektem viskoelasticity je také to, že při dlouhodobém konstantním zatížení aplikovaném po delší dobu dochází k relaxaci na makromolekulární úrovni (pohybu řetězců), což má za následek pozvolné snížení napětí. U dlouhodobých experimentů je také potřeba předpokládat creepové chování polymerních materiálů, chování některých textilních vláken je znázorněno na obrázku 5. V grafu je na ose y vyneseno prodloužení [%] a na ose x čas [min] po 1, 10, 100 a 1000 minutách pro creepový experiment na hedvábí, viskoze, acetátu a nylonu. K největšímu prodloužení v daném experimentu došlo u nylonového vlákna, jehož chování popisuje křivka, která je mírně esovitě prohnutá a v určitých částech lineární, což lze říct také o viskoze. Oproti tomu průběh deformace u hedvábí a acetátu se jeví do určité časové hodnoty konstantní a až po delší době se blížit lineárnímu růstu.



Obrázek 6: Creepové chování u textilních vláken [10]

1.2.3 Význam styčné plochy a rychlosti tření

Z empirických měření se zdá být rozpor mezi klasickou teorií a zjištěními. Da Vinciho a Coulumbova, resp. Amontonsova teorie předpokládá lineární závislost mezi třecí a normálovou silou s koeficientem tření jako konstantou úměrnosti (rovnice 2). Není zde tedy předpoklad, že by byla závislost mezi třecí silou a rychlostí pohybu, či velikostí plochy. Oproti tomu je ve zprávě [6] uvedena závislost zmíněných faktorů a třecí síly. Ve zprávě jsou také navrženy matematické vztahy, které tuto závislost popisují.

$$F_T = f * F_N + aA \quad (6)$$

$$F_T = a * F_N + b * F_N * \ln(F_N) \quad (7)$$

$$F_T = f * F_N + b * F_N^n \quad (8)$$

$$F_T = a * F_N^n \quad (9)$$

Rovnice (6) vyjadřuje klasickou teorii tření s přihlédnutím k poměrné změně plochy A . V rovnici (7) je od standardního koeficientu tření upuštěno a uvažuje se změna normálové síly přes koeficienty a a b . Rovnice 8 opět předpokládá klasickou teorii tření s přihlédnutím ke změně normálové síly pomocí koeficientu b a c . Poslední ze skupiny rovnic (9) je nejvíce používána, tato rovnice opět nahrazuje koeficient tření f , koeficientem a a zařazuje koeficient n .

Parametr a je odvozen od plochy a normálové síly, parametr n od geometrie vlákna. Vztah mezi parametry a a n lze vyjádřit pomocí empirických koeficientů α a β .

$$a = \alpha - \beta n \quad (10)$$

Zpráva se dále věnuje vlivu rychlosti a plochy na výsledné tření. Pro pomalé rychlosti je předpokládán růst třecího koeficientu vlivem deformace kluzných ploch, naopak pro vysoké rychlosti je uvažováno mazání taveninou – vznik filmu a tím snížení koeficientu tření.

Dále je popsán vliv změny plochy na třecí sílu empirickým vztahem:

$$F_T = bA^{1-n} \quad (11)$$

Dalším diskutovaným faktorem je adhezní model tření (původně představen Bowdenem, Taborem a spol.), který vyzdvihuje rozdíl mezi makroskopickou a mikroskopickou plochou kontaktu. Makroskopická (zdánlivá) plocha dotyku je větší než mikroskopická (reálná), což je zapříčiněno vlivem nerovností povrchu. Tato teorie je dále diskutována v souvislosti s prací Greenwooda a Willimsona, kde je popsán vliv elastických a plastických vlastností deformace na výslednou kontaktní plochu A_R . Dle této teorie je výsledná kontaktní plocha A_R naopak větší než zdánlivá makroskopická plocha.

K výslednému tření také přispívá možný vznik adhezních sil (buď vlivem chemických, nebo fyzikálních vazeb), který při vhodném povrchovém napětí může být významný. Dále je nutné uvažovat také tepelnou vodivost těles a že při adhezi dochází k přeměně energie v teplo a může dojít k natavení materiálu. [6] [11]

1.2.4 Tření při vysokých rychlostech

Predikce třecích sil u vysokých rychlostí je složitá. Kromě zkoumaných hledisek, jako jsou kompatibilita povrchu, stav znečištění, mazání rozhraní, zatížení, rychlost, geometrie, drsnost povrchů a další, na proces mají vliv také vysoké povrchové teploty a jejich gradient na povrchu. Tyto jevy působí v procesu komplikace při predikci a jsou důkazem toho, že u materiálů dochází k zahřátí vlivem tření.

Následkem zahřátí povrchu je jev anglicky nazývaný *melt lubrication*, což lze přeložit jako mazání taveniny. Jedná se o ponechání materiálu změkklého vlivem tření na tvrdém povrchu a vede k výraznému snížení koeficientu tření. Názory na to, zda tento jev nastává v každé situaci, se různí. Často se jeho vliv pouze odhaduje či zanedbává, neboť analýza je příliš složitá, třecí síly jsou jen malou částí zúčastněných sil a měření opotřebení také není příliš přesné.

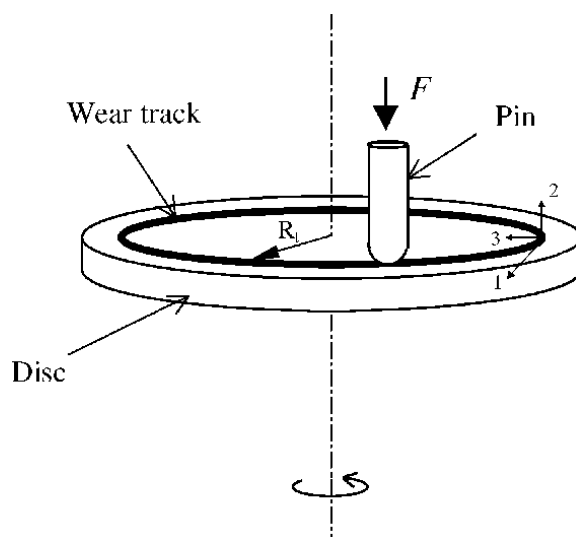
Jednou z prvních prací zabývajících se třením při vysokých otáčkách byla práce Johnsona, Swikerta a Bissona z roku 1947. Autoři dokázali, že pro jejich experiment koeficient tření klesá, když se rychlost skluzu zvýší na 100 stop za sekundu (přibližně 30,5 metrů za sekundu). Použili k tomu zařízení, „pin-on-disk“. Podobné zařízení pro měření tření a opotřebení použili také Sternlicht a Apkarian, publikováno 1959. Ti měřili opotřebení jezdců vyhotovených z různých kovů (molybden, wolfram, chrom, měď, stříbro, zlato) proti poměděným a pochromovaným kotoučům. Dalším způsobem měření byla zavěšená ocelová kulička, která přicházela do kontaktu s různými materiály. Na nich bylo sledováno tření a poškození povrchů. Tuto techniku představuje Bowden v publikacích z roku 1958 spolu s Freitagem a z roku 1961 s Perssonem. Allen a McKillop v roce 1968 představili geometrii kontaktního prstence, kdy sledovali tření při vysokých kluzných rychlostech. [12]

Tribologické analýzy se zaměřují především na součinitel tření a jeho změny v průběhu zkoušky. Změny lze sledovat v závislosti zvolených materiálů, prostředí, tlaku na materiál nebo při růstu teplot, který je s třením úzce spjatý. Na materiálech lze také sledovat opotřebení třených materiálů. [13]

Metoda Pin on Disc

Název experimentu vyplývá z podoby třených těles, kdy dochází ke tření mezi vzorkem v podobě disku (*disc*) a přitlačením tělíška ve formě válečku, či kuličky (*pin*), podoba

zařízení je znázorněna na obrázku 6. Jako tělíčko je nejčastěji používána ocelová kulička, mohou být použity i tvrdší materiály odolnější v otěru, s přihlédnutím na druhý materiál. Touto metodou jsou testovány především kovy, lze ji však upravit i pro jiné materiály, případně z ní vycházet. [13]



Obrázek 7: Schéma zařízení Pin on Disc [14]

Před měřením je přitlačné tělíčko zatíženo a disk se začne otáčet. Výsledné hodnoty ovlivňuje především síla působící na tělíčko, velikost styčné plochy tělíška, rychlost pohybu mezi vzorky, počet cyklů, teplota povrchu, kvalita povrchu vzorku, vlastnosti obou materiálů a případné použití maziva. Růst teploty souvisí také se zvoleným poloměrem stopy (vzdálenosti kontaktu tělíška od středu disku), při volbě většího poloměru je dráha delší a materiál má více času k uvolnění teplot. Vlivem delší dráhy také dochází k většímu opotřebení tělíška při stejném cyklu opakování. Studie uvádí, že při růstu teploty dochází také k růstu koeficientu tření. Stejná měření při rozdílných teplotách tedy budou vykazovat rozdílné hodnoty koeficientu tření. Rozsah opotřebení a velikost součinitele tření má spojitost s drsností styčných ploch. [13]

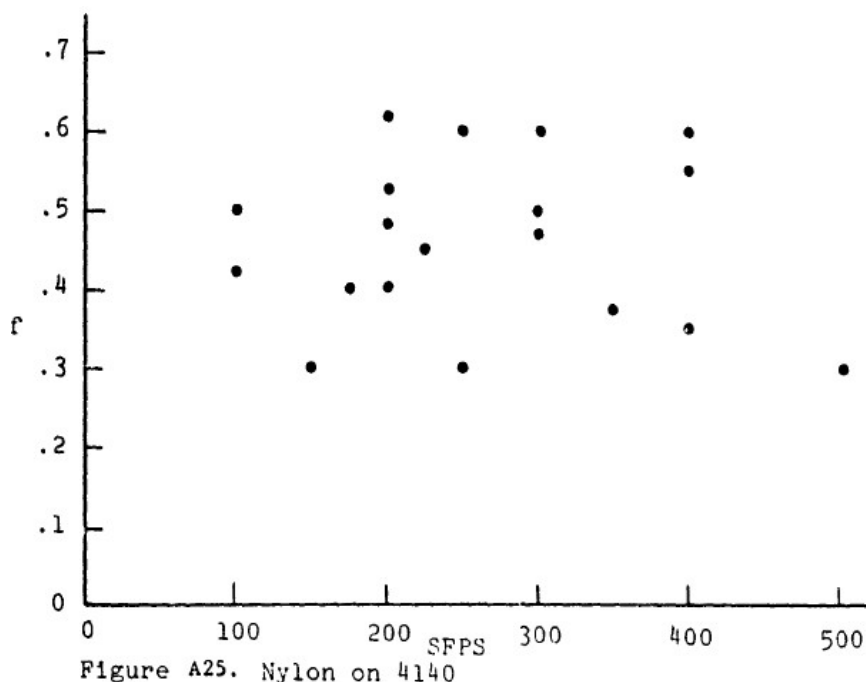
Studie Rabinowicz, Suh a Carignan

Rabinowicz, Suh a Carignan ve svém výzkumu měřili na zařízení pin-on-disk při vysokých otáčkách. Měření bylo provedeno při následujících rychlostech: 100, 200, 300, 400, 500 stop/s (což odpovídá rychlostem od 30,480 do 152,400 m/s). Kotouče byly vyrobeny z vysokopevnostní ocele (označení pro USA – 4140) a o ně byly třeny hřeby z různých

materiálů, především kovů (jako jsou například mosaz, měď, zinek, bizmut, konstantan a další).

Materiály byly zvoleny dle zaměření práce, tedy tření při vysokých otáčkách na materiálech souvisejících s oborem balistiky, oborem, který zkoumá pohyb a účinek střely. Pozorovaným jevem byl vznik taveniny na projektilu při rotaci střely a při kontaktu s cílem. Projektily jsou tvořeny především kovovými materiály, stejně jako většina částí zbraně, ve kterých dochází ke tření. V naměřených datech byla značná nestabilita, což si autoři do jisté míry vysvětlují lubrikací kapalnou fází, která vzniká lokálním tavením. Tím, že byl naměřen alespoň nějaký koeficient tření (>0.1), je pravděpodobné, že k jevu docházelo jen v omezeném množství. Závěr tohoto výzkumu je, že se rychlost opotřebení na jednotku kluzné vzdálenosti zvyšuje se zvyšující se rychlostí skluzu. To by mohlo být vysvětleno větší náchylností polymerních materiálů na teplotu v porovnání s kovy.

Pro účely této diplomové práce je zajímavá zmínka o chování polyamidu; ve zbrani tvoří tzv. hnací pásky. U polyamidu docházelo k významnému opotřebení materiálu se změnou smykové rychlosti (až o několik řádů). [12]



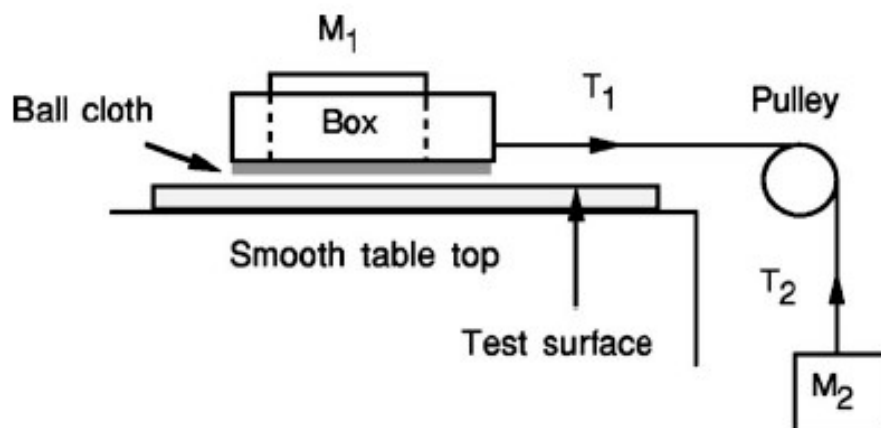
Obrázek 8: Vztah koeficientu tření a rychlosti, na ose x smyková rychlost [stop/s] a na ose y koeficient tření f [12]

Graf na obrázku 7 popisuje závislost tření na rychlosti pro nylon-polyamid 6.6. V tomto grafu je demonstrována zmíněná nestabilita dat, ovšem i přes to (s přihlédnutím k ostatním materiálům ve zbytku experimentu) autoři vyslovují závěr, že koeficient tření roste s kluznou rychlostí.

Crossova studie

Tento experiment je zajímavý i z textilního hlediska. Rod Cross při svém experimentu pracuje s povrchem tenisového míčku, který tvoří nylonová vlákna. Tento materiál si vybral proto, že je látka dostatečně abrazivní a Cross považuje tenisový míček za měkké elastické těleso. V experimentu se zabývá třením při nízkých i vysokých rychlostech a hledá vztah mezi změnou koeficientu tření a parametry experimentu (smyková rychlost a hrubost styčného povrchu).

Pro nízké rychlosti používá přístroj, který je znázorněn na obrázku 8. Skládá se ze dvou závaží, která jsou přes kladku spojena provázkem. Závaží M_1 je v horizontální poloze a M_2 ve vertikální. M_1 je umístěno do hliníkové krabice, k jejímuž spodnímu vnějšímu okraji je přilepena textilie používaná na povrch tenisového míčku. Provázek, který závaží spojuje, vede přes kladku. Koeficient smykového tření závaží M_1 a povrchu, po kterém klouže, se určuje z naměřené rychlosti závaží M_1 . Pro každé opakování bylo závaží taženo vodorovně 40 cm po hladkém povrchu stolu a k zastavení došlo zaražením jednoho ze závaží o zábranu.



Obrázek 9: Měření tření při nízkých rychlostech [15]

Měření při pomalých rychlostech lze dále rozdělit podle velikosti vzorku (textilie pro tenisový míček), který je umístěn naspođu krabice. Jsou použity dvě velikosti 34 cm² a 64 cm². Další dělení je podle materiálu plochy, po němž se závaží smýká. Byl zde popsán experiment na hladké desce stolu a jemném smirkovém papíru P800, který simuloval povrch antuky na tenisových kurtech. Pro nízké hmotnosti závaží M₂ (pomalý pohyb M) byly rychlosti měřeny pomocí pravítka a stopek. Hodnoty byly dosazeny do pohybových rovnic, které vyplývají z Newtonových pohybových zákonů.

$$T_1 - fM_1g = M_1\alpha \quad (12)$$

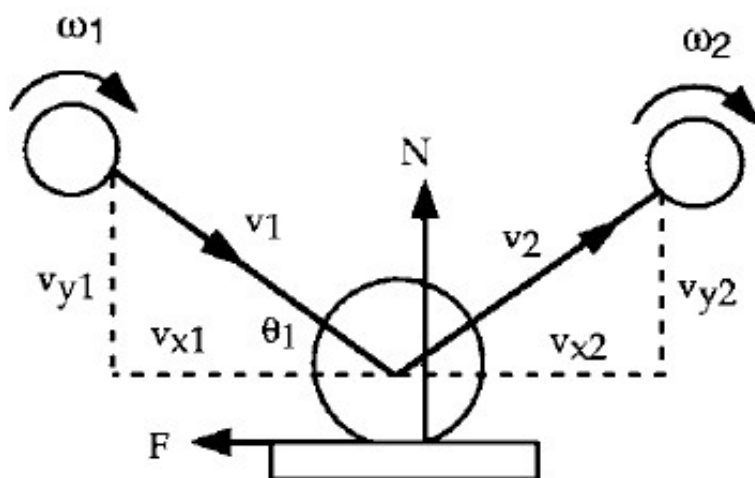
$$M_2g - T_2 = M_2\alpha \quad (13)$$

$$T_1 - fM_1g = M_1\alpha \quad (14)$$

T_1 a T_2 představují sílu působící v provázku, α zrychlení závaží M_1, M_2 , f koeficient smykového tření a g gravitační koeficient.

$$\left(M_1 + M_2 + \frac{M_2}{2}\right)\alpha = (M_2 - fM_1)g \quad (15)$$

Pro tento experiment (pomalé rychlosti) je možné uvažovat konstantní rychlost. Maximální možná rychlost byla stanovena na 0,1 m/s. Experiment tření při vyšších rychlostech bylo možné provést až do rychlosti 6 m/s, měření bylo prováděné za pomoci tenisového míčku, který byl odražen od povrchu. Tato metoda je zobrazena na obrázku 9.



Obrázek 10: Měření tření při vyšších rychlostech [15]

Pro spolehlivé měření je potřebný relativně malý úhel, ten závisí také na velikosti úhlové rychlosti a jejím vztahu k poloměru míčku a vodorovné souřadnici vektoru rychlosti míčku po odrazu (je nutné, aby byla splněna podmínka, kdy součin $R\omega_2 < v_{x2}$). Pro tento experiment byl úhel určen na 16° s možnou odchylkou $\mp 1^\circ$. Při této metodě byly na třecí plochu také použity deska a smirkový papír, ten byl však následně z experimentu vyloučen právě z důvodu nesplnění podmínky $R\omega_2 < v_{x2}$ a pro jeho měření byl potřebný příliš nízký úhel dopadu. Pokusy o naměření zaznamenaly příliš vysoké tření.

Měření rychlosti bylo provedeno za pomoci kamery snímající pohyb závaží M_1 rychlostí 25 snímků za sekundu a následné analýzy v počítači. Hodnoty byly dosazeny do rovnice, ze které byl vypočten koeficient tření.

$$\tan\theta_1 = \frac{1}{f(1+e)(1+1/a)} \quad (16)$$

θ_1 představuje úhel dopadu a a konstantu hmoty tělesa pro výpočet momentu setrvačnosti.

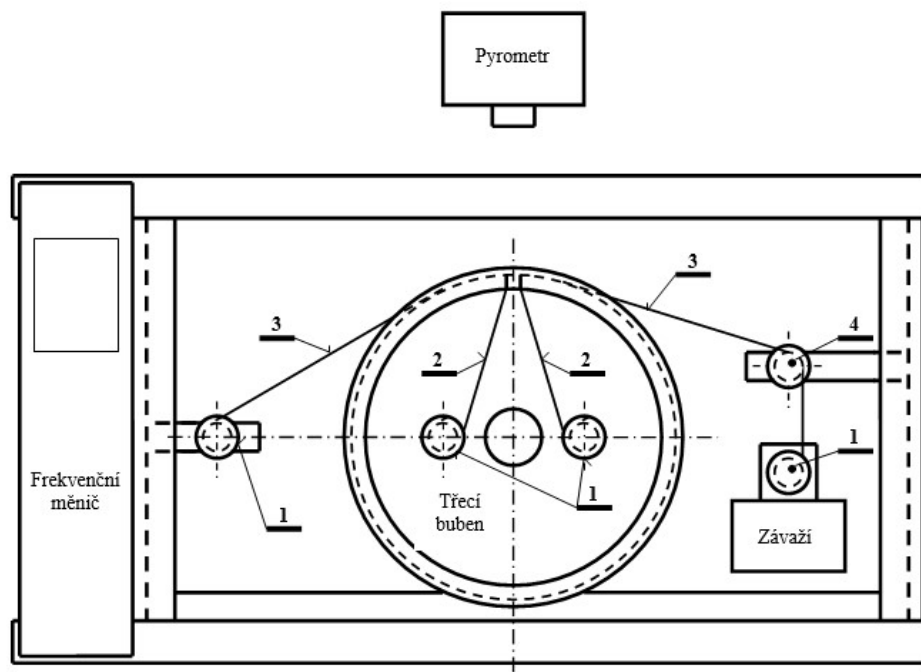
Pro tenisový míček je dosazena hodnota $a = 0,55$, pro plnou kouli by byla $a = \frac{2}{5}$ a pro skořepinu $a = \frac{2}{3}$.

Z naměřených dat Cross vyvozuje, že tření roste s rychlostí a nezávisí na síle, kterou je těleso uvedeno do pohybu, to je možné pozorovat pro oba experimenty. Při prvním experimentu byl zkoumán jak hladký (stůl), tak hrubý povrch (P800). Pro druhý případ byl růst pouze velmi mírný a při určitém zjednodušení je vztah možné považovat za konstantní. Charakter vztahu pro hladký povrch se pro oba experimenty jeví být lineární (s rostoucí smykovou rychlostí roste koeficient tření).

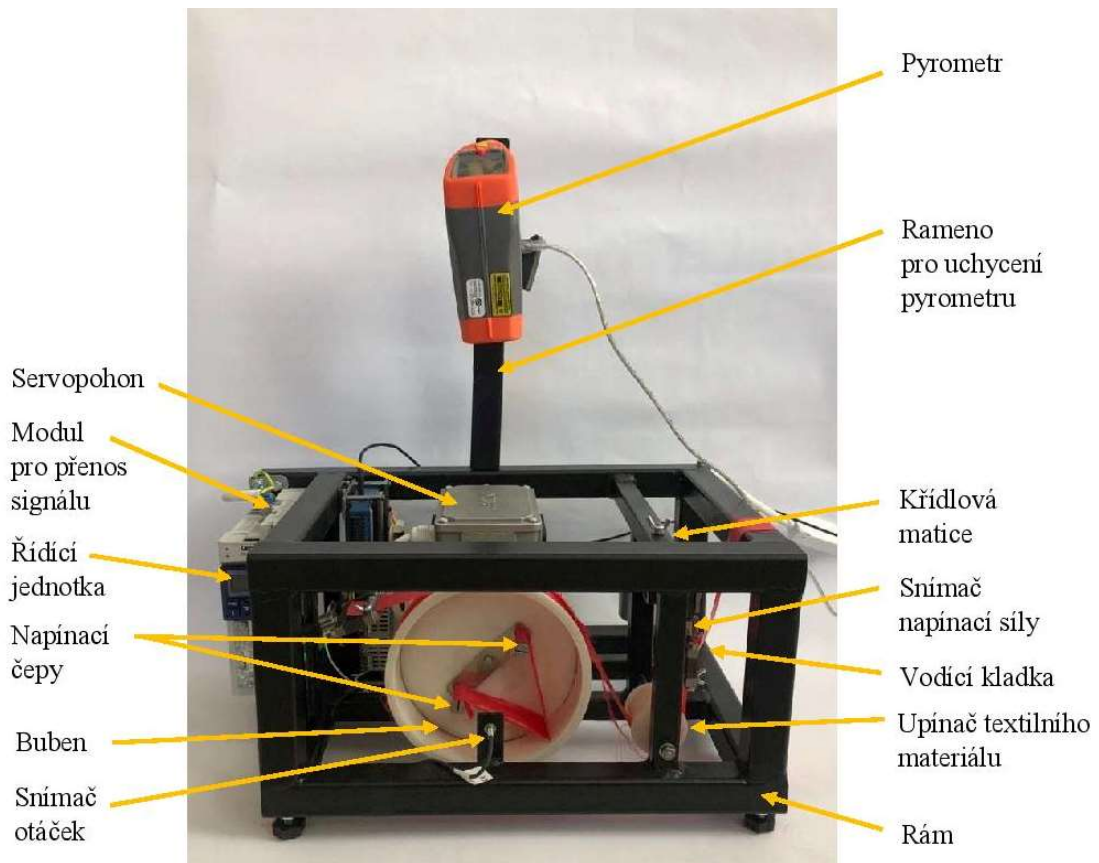
Během experimentu nastaly i viditelné změny. Při opakování s velkým zatížením byla třecí síla tak velká, že na smirkovém papíru zůstala vlákna z míčku. Na vzorku textilie docházelo k vyrovnání a zkroucení jednotlivých vláken ve směru posuvu. Tkanina se opakovaným klouzáním při zatížení zhutnila a vznikla na ní mírně vyvýšená místa zkroucením vláken, ležících vedle sebe. Povrch třené strany se zmatnil, ale celková tloušťka se nezměnila. Tato změna neměla žádný vliv na koeficient smykového tření. Byla snaha sledovat tyto změny i při probíhajícím experimentu pomocí zvětšovací čočky přes skleněné závaží. Za podmínek ustáleného tření nedošlo k výraznějším změnám povrchu a kontaktu sousedních vláken. [15]

1.2.5 Zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání

Zařízení bylo zkonstruováno docentem Svobodou a 13. října 2021 byla podána přihláška k udělení evropského patentu, která je evidována pod číslem EP21202368.3 [16]. Zařízení slouží k stanovení součinitele tření u textilních materiálů na základě silových účinků a nastavené hodnoty úhlu opásání. Při měření dochází ke tření mezi dvěma vzorky, z nichž jeden je upnut v pevné části zařízení a druhý na rotující části. Vzájemným pohybem vzorků dochází ke tření. Vedení textilních vzorků je znázorněno na obrázku 10. Vzorek opásání (třecí textilie) je označen číslem 2 a stacionární vzorek (třená textilie) je označen číslem 3. Číslo 1 značí čep pro uchycení textilie a 4 vodící váleček. Popis zařízení je uveden na obrázcích 11, 12 a 13. [1]



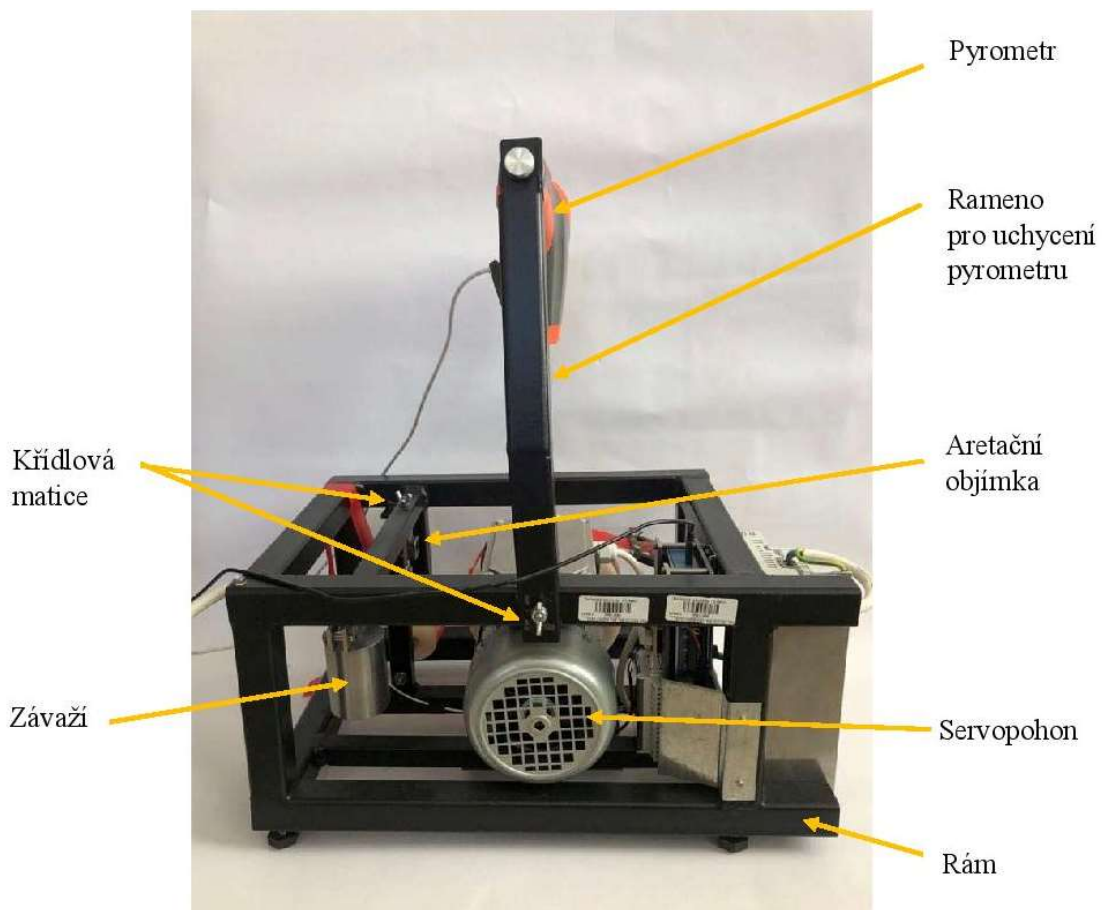
Obrázek 11: Schéma zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání [1]



Obrázek 12: Experimentální zařízení, pohled zepředu

Na obrázku 11 je zobrazeno experimentální zařízení zepředu. Je zde patrné vedení obou vzorků (popsané na obrázku 10). V rámu zařízení je umístěn buben, přes který vede vzorek opásání (třecí). Tento vzorek je uchycen vně bubnu pomocí napínacích čepů, do nichž jsou upnuty konce vzorku. Před bubnem je umístěn snímač otáček, který snímá kolík vně bubnu a dobu, za kterou se buben otočí o 360 stupňů. Stacionární vzorek (třený) vede z upínací čelisti, přes buben, kde je třen vzorkem opásání, přes upínač textilního materiálu do vodící kladky, jejíž součástí je také čelist pro upnutí vzorku.

K rámu zařízení je připevněno rameno pro uchycení pyrometru. Toto rameno je mírně prohnuté, tak aby pyrometr při měření tření snímal teplotu na povrchu stacionárního vzorku v ploše, kde dochází ke tření. Pro měření emisivity lze toto rameno uvolnit a otočit tak, aby pyrometr měřil teplotu vzorku na ohřívачi vedle zařízení. Křídlová matice sloužící k upevnění ramene je znázorněna na obrázku 12.

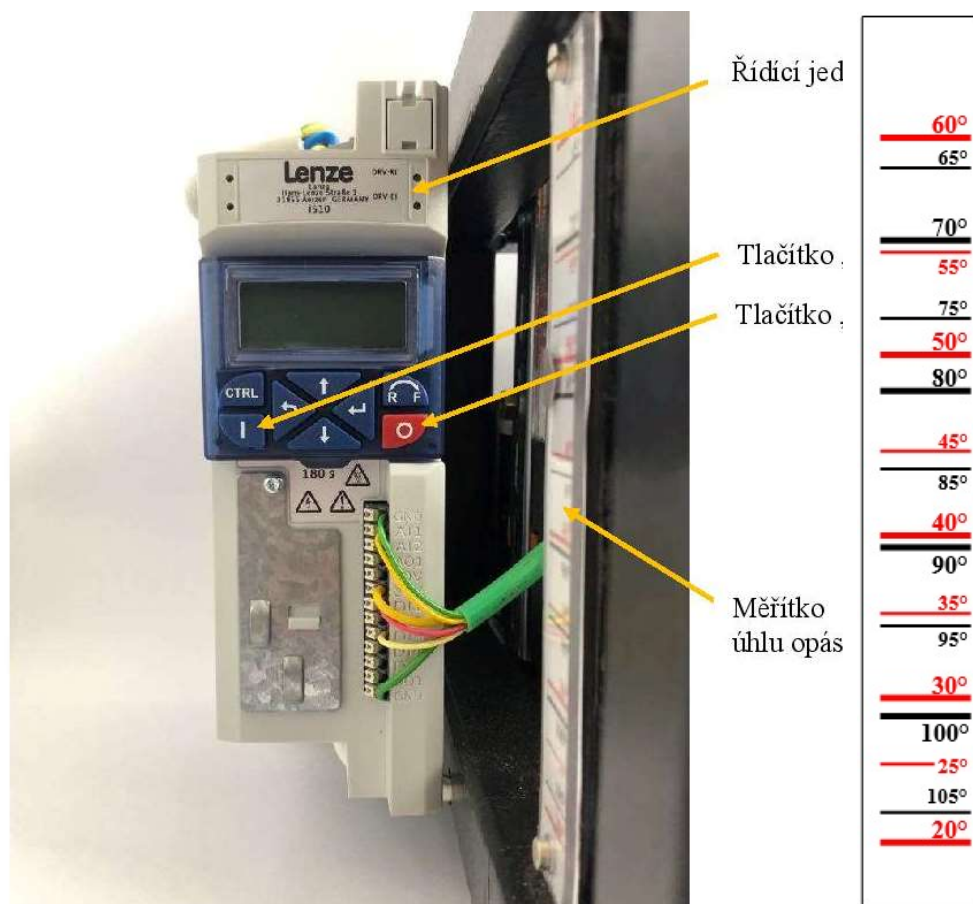


Obrázek 13: Experimentální zařízení, pohled zezadu

Na obrázku 12 je vyfoceno zařízení zezadu, zde je vidět především servopohon, který uvádí do pohybu bubnu. Ten je řízen řídicí jednotkou, hodnota otáček, se zadává do programu v připojeném počítači.

Řídicí jednotka je znázorněna na obrázku 13, jsou zde také vyznačena tlačítka „START“ a „STOP“. První tlačítko slouží k uvedení bubnu do pohybu po spuštění programu, druhé tlačítko slouží k rychlému zastavení zařízení, pokud dojde k poškození či uvolnění vzorku. Pokud k poškození nedojde, je bubnu zastaven spolu s měřením v programu zaznamenajícím průběh tření.

Na obrázku 13 je také vidět část měřítka úhlu opásání, na té se nastavuje velikost úhlu pomocí posuvného ukazatele. Celé měřítko je znázorněno na obrázku 13 vpravo.

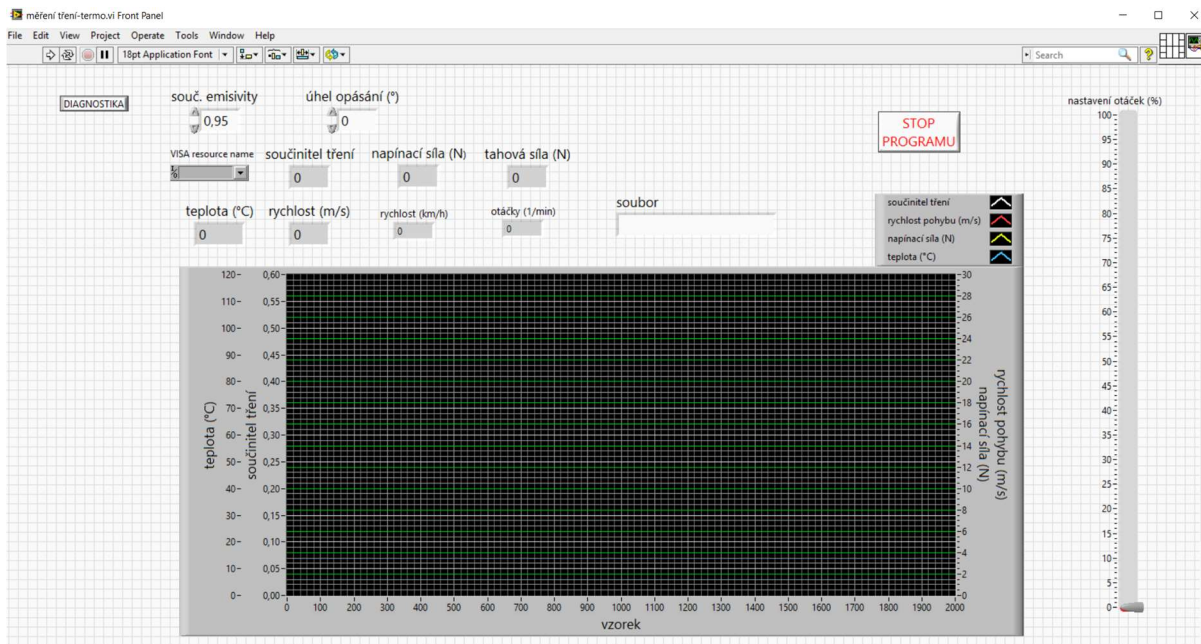


Obrázek 14: Experimentální zařízení, řídicí jednotka

Součinitel tření je zaznamenáván programem v připojeném počítači, vztah pro výpočet je následující:

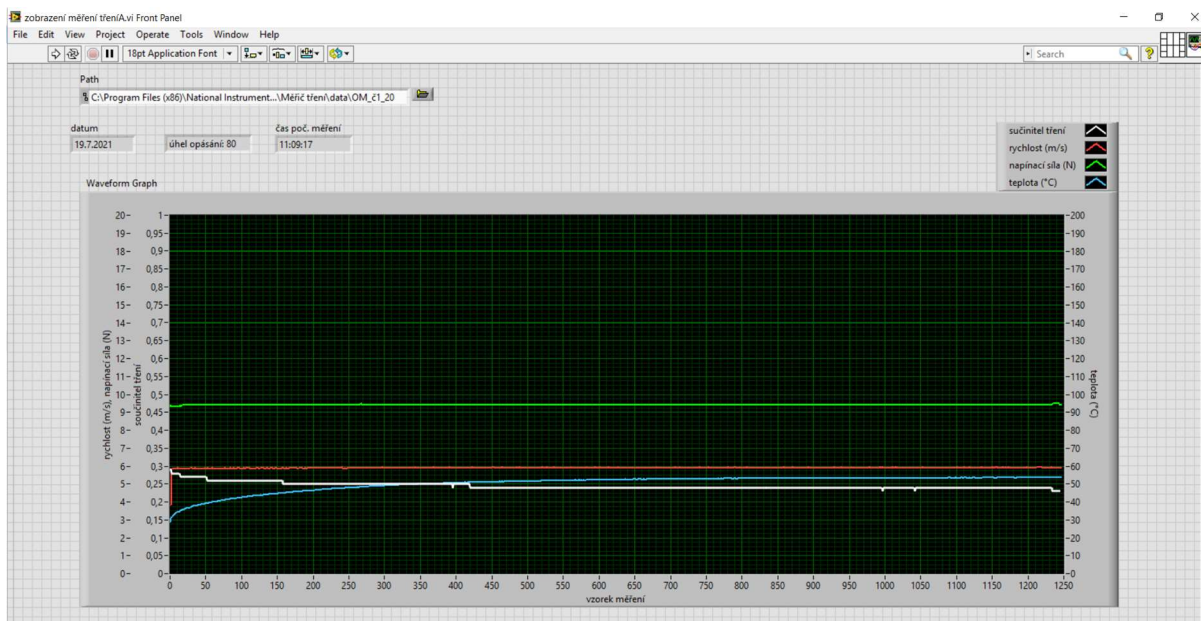
$$f = \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{\alpha} \quad (17)$$

Tato rovnice je odvozena z Eulerova vztahu pro opásání k určení síly: $T_2 = T_1 e^{\alpha f}$, kde T_2 je tahová síla, T_1 je napínací síla, α je úhel opásání a f je součinitel tření. Síly T_1 a T_2 jsou zaznamenávány snímači pro tahovou a napínací sílu, umístěnými na přístroji, hodnota úhlu opásání α je nastavena na měřítku opásání (obrázek 13) a zadána do programu (obrázek 14).



Obrázek 15: Náhled programu Měření tření – termo

Na obrázku 14 je znázorněna obrazovka „Měření tření - termo“ před spuštěním měření. Před spuštěním je nutné do programu zadat součinitel emisivity pro měřený materiál, úhel opásání a název souboru. V rolboxu je zvolen USB port přes který je připojen pyrometr. Napravo je umístěna lišta pro volbu rychlosti tření. Program je možné spustit ikonou bílé šipky na horní liště a zastavit kliknutím na „stop programu“. Během měření se zaznamenávají hodnoty výstupních parametrů součinitel tření (bíle), rychlost [m/s] (červeně), napínací síla [N] (žlutě) a teplota [°C] (modře). Po ukončení programu zůstanou křivky vykresleny do spuštění nového měření, případně je možné je znovu otevřít v programu (obrázek 15).



Obrázek 16: Náhled programu Zobrazení měření tření

Na obrázku 15 je zobrazen náhled programu, kdy bylo zpětně otevřeno jedno z měření padákové tkaniny, orientace po útku, rychlost 6 m/s. Příprava zařízení a nastavení jsou popsány v experimentální části v kapitole 2.2 Postup měření.

1.3 Měřený materiál

Nejvhodnějším materiálem pro měření na experimentálním zařízení se jeví padáková tkanina, pro jejíž měření byl přístroj zamýšlen. Zdůvodnění této volby a technická omezení, kvůli kterým není možné použití některých jiných materiálů, jsou popsány v kapitole 2.2.1 Volba materiálu a konstrukční omezení přístroje. V závěru práce jsou navrženy možné úpravy zařízení, po jejichž provedení by mohl být měřen i jiný materiál.

1.3.1 Padáková tkanina

Pro výrobu padákových textilií se v historii používaly přírodní materiály, nejprve bavlna a později přírodní hedvábí, a to až do druhé světové války. Během ní nastal problém s dovozem hedvábí z Japonska, a tak se padáky začaly vyrábět z chemických vláken, především z polyamidu 6.6, někdy také z polyesteru. Polyamid 6.6 se však ukázal jako lepší materiál, a proto je stále nejpoužívanějším materiálem pro výrobu padáků.

Na padákové tkaniny jsou kladeny vysoké nároky z hlediska skladnosti i bezpečnosti. Nejdůležitějšími vlastnostmi tkaniny jsou nízká plošná hmotnost, pevnost, odolnost a nízká

prodyšnost. Nejrozšířenějším materiálem, z něhož se v dnešní době vyrábí, je „Skytex“, ten vyrábí francouzská firma Porecher Marine. [17]

1.3.2 Polymerní materiál

Padáková tkanina měřena v experimentální části je vyrobena z polyamidu, který patří mezi chemická vlákna ze syntetických polymerů. Také další měřené materiály (polyamidová folie, polyamidové tkaniny a polyesterová padáková tkanina) mají polymerní charakter.

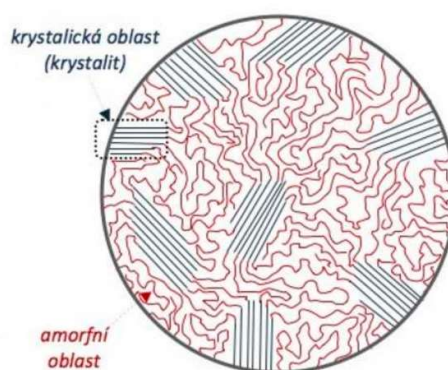
Jedná se o organické látky, které mají přírodní či syntetický původ. Jsou tvořeny velkými molekulami, tzv. makromolekulami. Polymery jsou nejvýznamnějším výrobním materiálem v několika odvětvích, díky poměru užitečných vlastností a ceně jsou schopny konkurovat klasickým materiálům. Mezi hlavní výhody patří nízká hustota materiálu, to že jsou dobrými tepelnými i elektrickými izolanty, chemická odolnost, snadná zpracovatelnost s využitím nižší vynaložené energie, než je potřebná u jiných materiálů (například u kovů). Mezi nevýhody patří hořlavost a teplotní odolnost, vznik elektrostatického náboje či nízká odolnost vůči UV záření.

Syntetické polymery lze připravit třemi způsoby – polymerací, polykondenzací nebo polyadicí. Jedná se o chemické reakce, při nichž dochází k přeměně monomerů na polymer (tzv. řetězením). Polymer může být utvořen z jednoho druhu monomerů (vzniká homopolymer), nebo ze dvou a více (vzniká kopolymer).

Vlastnosti polymeru (mechanické, tepelné, chemické, elektrické) vychází z chemické struktury makromolekul, molekulové struktury a nadmolekulární struktury. Délka makromolekul ovlivňuje teplotu tání a tuhost taveniny, u polymerů s vyšší molární hmotností je vyšší pevnost a nižší tažnost než u polymerů s nižší molární hmotností. Atomy v makromolekulách jsou vázány primárními chemickými vazbami, zatímco mezi jednotlivými makromolekulami nastávají sekundární síly, o jejichž síle rozhoduje polarita makromolekul. Pro silně polární polymery, kterými jsou například polyamidy, jsou typické tzv. vodíkové můstky. Jedná se o nejpevnější mezimolekulární vazbu.

Polymery se dělí podle druhu uspořádání na amorfní a (semi)krystalické (obrázek 16). Amorfní uspořádání je náhodné a nepravidelné, makromolekuly tvoří klubka, toto uspořádání mají také taveniny. Během chlazení taveniny může nastat krystalizace

a tím dojde k většímu či menšímu uspořádání molekul. Semikrystalické polymery jsou tvořeny krystality (oblastmi uspořádaných molekul) a makromolekulami v amorfním stavu. Polymery mohou mít různý stupeň krystalinity, úplné krystalinity však při běžných podmínkách nelze dosáhnout. Krystalické oblasti mají větší hustotu než amorfní, také se snižuje tažnost a zvyšuje pevnost a modul pružnosti a tvrdosti. Semikrystalická makromolekulární struktura polymeru také brání přímému průchodu světla, čímž výsledný výrobek ztrácí průhlednost. [18]

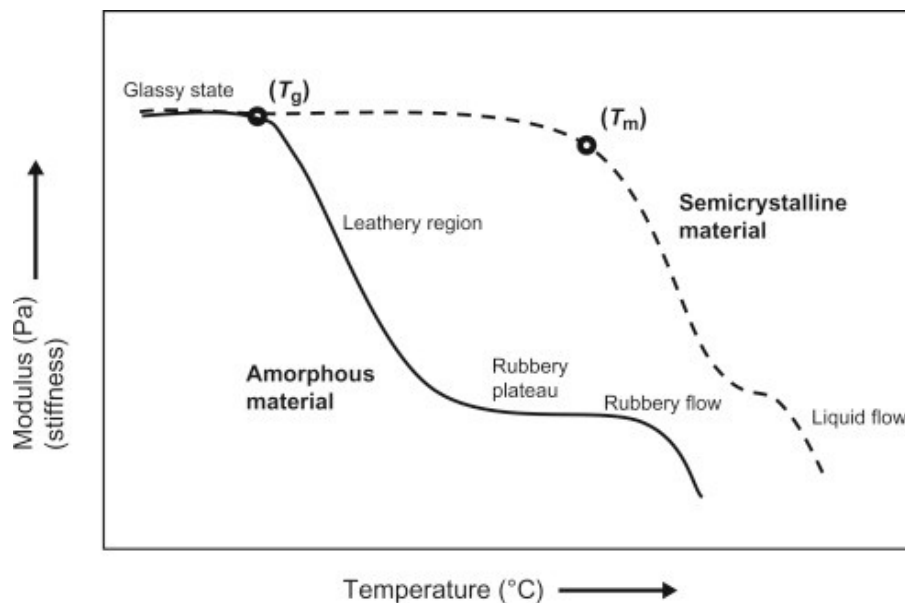


Obrázek 17: Semikrystalický polymer (vyznačení krystalické a amorfní části) [19]

Většina polymerů je více či méně navlhavá, mezi více navlhavé patří například polyamidy. Navlhavost je dána chemickou strukturou a složením daného polymeru a jejími důsledky jsou pokles meze pevnosti, modulu pružnosti, zvýšení houževnatosti a tažnosti, zhoršení izolačních vlastností a odolnosti vyšším teplotám. Dochází také k zvětšení výrobku vlivem bobtnání.

Mechanické vlastnosti polymerů závisí především na fázovém stavu, teplotě, čase, velikosti a směru působení vnějších sil. U polymerů dochází ke creepu (tečení za studena), pokud je těleso vystaveno stálému zatížení za standardní teploty, dochází k jeho deformaci. Celková deformace je časově závislá, míra deformace při konstantním napětí v čase klesá.

Polymery mají nižší koeficient tření než některé jiné materiály (např. keramika a kovy), třecí vlastnosti lze ještě zlepšit úpravou (přidáním přísad snižujících tření – grafit, syntetická maziva apod). Je také potřeba vzít v potaz vnější vlivy, jako jsou použitý materiál třených těles, drsnost povrchů, působící měrný tlak, či odvod tepla při tření. Polyamid patří mezi polymery s dobrými kluznými vlastnostmi. [18]



Obrázek 18: Schéma přechodových teplot pro amorfni a semikrystalické polymery [20]

Vlastnosti polymerů jsou závislé na teplotě, ke skokovým změnám dochází v oblasti přechodových teplot (obrázek 17). Teplotní chování amorfniho polymeru lze charakterizovat teplotou skleného přechodu – T_g , u semikrystalického polymeru teplotou tání – T_m . Amorfni polymer se pod teplotou T_g nachází ve sklovitém stavu, mezi T_g a T_f (teplota viskózního toku) v kaučukovitém, kdy dochází k vratným deformacím. Při působení teploty nad T_f dochází k přeměně na taveninu a nevratným změnám. Amorfni části se chovají stejně i v semikrystalickém polymeru. Nad T_m přechází i krystalické části do kaučukovitého stavu.

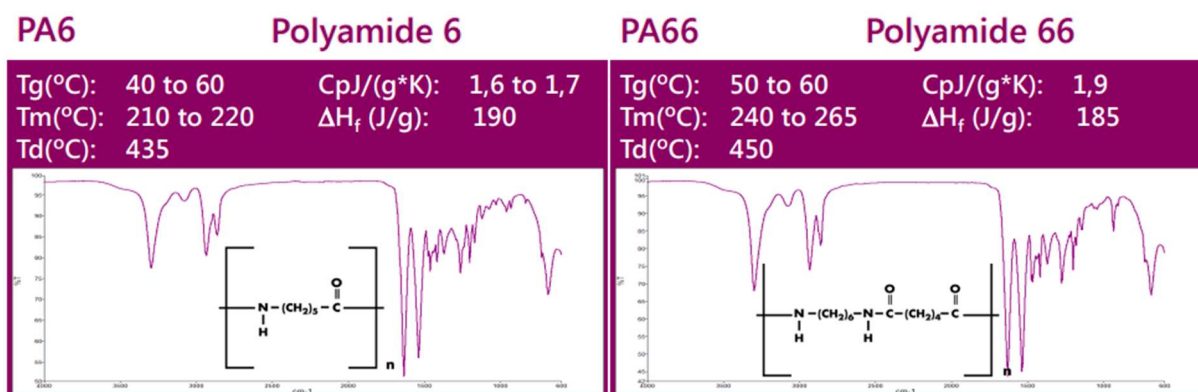
Zvyšováním teploty dochází u polymerů k měknutí nebo tání, při dalším zvyšování teploty dochází k degradaci materiálu. Zesíťované polymery degradují v tuhém stavu, zatímco termoplasty se mění na taveninu. Degradace je nevratná, podle druhu polymeru se dělí na depolymeraci, destrukci a degradační síťování. Polymery mohou měnit své vlastnosti také vlivem stárnutí, to je způsobeno vlivem povětrnostních podmínek, atmosférických nečistot a mikroorganismů. U materiálu dochází k barevným změnám, ztrátě lesku a povrchovému praskání, zhoršují se také mechanické vlastnosti polymerů. [18] [20]

Polyamid

Polyamidy jsou skupina termoplastických polymerů vyznačující se opakující amidovou skupinou (CO-NH) v polymerním řetězci. Syntetické polyamidy se vyrábějí

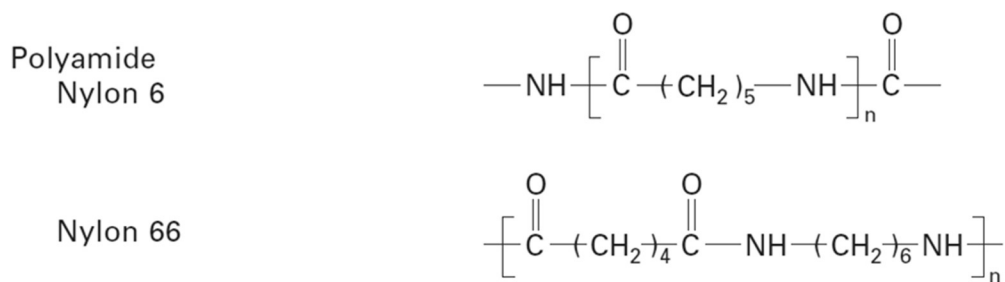
polykondenzací, ve které figurují například diamid $(\text{NH}_2)_2$ a dikarboxylová kyselina (COOH) . Také mohou být formovány samokondenzací kyseliny aminové nebo jejími deriváty. Polyamidy mohou být alifatické (např. nylony), nebo aromatické obsahující benzenové skupiny (aramidy – např. kevlar).

Nejpoužívanější skupinou polyamidů jsou nylony. Stupeň krystalinity je značně ovlivněn procesem zpracování, například při vstřikování se jedná spíše o amorfni strukturu, zatímco u vláknenné výroby nastane dodatečná krystalizace vlivem mechanického namáhání. Vzhledem k nízkému koeficientu tření mají také dobrou odolnost proti oděru. Teplota tání (T_m převyšuje běžné polyesteru) je poměrně vysoká, a díky tomu si polyamidy zachovávají své mechanické vlastnosti i při zvýšených teplotách. Polyamidy také dobře odolávají chemikáliím. Polyamidy jsou značně rozšířeným materiálem, v některých oblastech aplikace však byly nahrazeny polyesterem (konkrétně PET) z důvodu některých lepších vlastností, a především nižší ceny. Polyamid je oproti polyesteru více navlhavý, což může změnit některé jeho mechanické vlastnosti (například se snižuje tuhost, zlepšuje elasticita).



Obrázek 19: Přechodové teploty polyamidu 6 a 6.6 [22]

Asi 60 % produkce alifatických polyamidů se používá v textilním průmyslu, využití je podobné jako u polyesteru. Jako první plně syntetické vlákno byl představen polyamid 6.6 (vyvinut firmou DuPont v roce 1938, pod obchodním názvem nylon) a později polyamid 6 (silon), ty stále patří mezi nejpoužívanější polyamidy. Typické vlastnosti obou materiálů jsou velmi podobné, vynikají vysokou pevností, odolností v oděru, tvarovou stálostí a dobrou barvitelností. [23][24]



Obrázek 20: Chemické vzorce polyamidu 6 a 6.6 [10]

Použití materiálů v textilním odvětví je podobné, některé vlastnosti se však liší. E modul je lepší u polyesterových vláken a zároveň tažnost obou materiálů je podobná. U polyamidů dochází k navlhání, a tím také ke změně mechanických vlastností. Tepelná vodivost je nižší u polyesteru. Koeficient tření je nižší u polyamidů. Vlastnosti vláken jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti polyesterových a polyamidových vláken [25]

Vlastnost	PES	PA 6	PA 6.6
měrná hmotnost [kg/m ³]	1380	1140	1140
modul pružnosti [cN/dtex]	90–100	10–50	10–50
pevnost suchá [cN/dtex]	3,7–4,5	4–5	4–5
pevnost mokrá [%]	100	85–90	80–90
tažnost suchá [%]	45–73	24–32	25–40
tažnost za mokra [%]	50–70	28–37	30–50
koeficient tření [-]	0,58	0,16	0,16
tepelná vodivost [mWm ⁻¹ K ⁻¹]	140	240	250

Velmi podobné využití v textilním průmyslu mají polyester, ten se také používá na výrobu padákových tkanin, porovnání vlastností polyamidových a polyesterových vláken je uvedeno v tabulce 1. Polyester jsou semikrystalické termoplastické polymery, ve kterých jsou opakující se jednotky spojeny esterovou skupinou (CO-O). Většina běžně používaných polyesterů obsahuje aromatické skupiny, čím více aromatických skupin

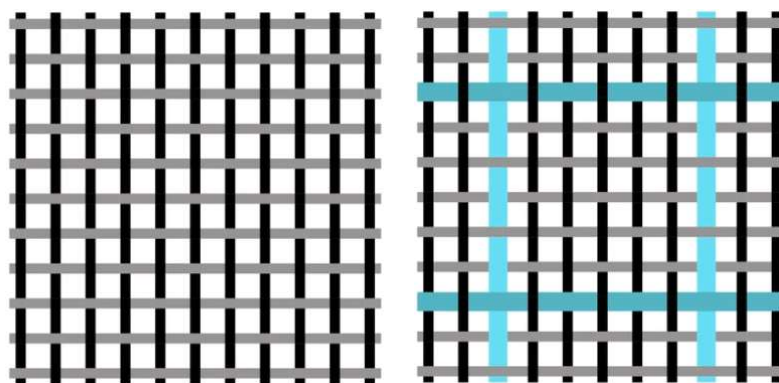
je v řetězci obsaženo, tím vyšší je tuhost a teplota tání (T_m). Polyestery mají i za zvýšených teplot malou tendenci ke creepové deformaci.

Nejběžnější polyester je PET, semikrystalická vlákna z něj jsou poměrně tuhá, mají vyšší elasticitu a látky z nich vyrobené mají vysokou ohebnost, odolnost proti muchlání a oděru. Jemná vlákna z PET se používají jako umělé hedvábí, vlákna s větším průměrem jako vlákna do koberců. V automobilovém průmyslu se používá pro tkaní bezpečnostních pásů (kde z velké části nahradil polyamid 6) nebo jako vlákna kordů v pneumatikách. Netkané textilie z PET se používají na jednorázové zdravotní obleky či jako vrchní vrstva plen. [26] [27]

1.3.3 Vazba

Na výrobu padáků se používají především materiál ripstop, název je odvozen od charakteristických vlastností *rip* – protržení, *stop* – zastavit. Materiál nezabraňuje vzniku trhlin, ale brání jejich šíření přes zesílené úseky. Tento materiál byl vyvinut přímo pro použití na padáky během druhé světové války, kdy docházelo k jejich protržení vlivem častého používání. Vývoj probíhal ve společnosti DuPont, která se již dříve zabývala materiálem pro vrchlíky padáků a vyvinula nylon. Výhradním materiálem pro výrobu padáků se stal kolem roku 1980. S vazbou ripstop se lze setkat také na outdoorovém oblečení a vybavení.

Ripstop vychází z plátňové plátňové vazby, u které dochází k pravidelnému střídání osnovních a útkových bodů po jedné niti. Ripstop je tvořen stejnými úseky ohraničenými zesílenou nebo vícenásobnou přízí. Zesílení jsou v tkanině rozmístěny v pravidelných intervalech, obvykle v rozmezí od 5 do 8 mm. Toto rozmístění tvoří na tkanině mřížku, zatímco tkanina v základní plátňové vazbě je hladká. Na obrázku 20 jsou zobrazeny detailní provázání u plátna a ripstopu. [28]



Obrázek 21: Základní plátnová vazba a ripstop [28]

1.3.4 Úpravy

Pro zlepšení vlastností padákových tkanin je možná aplikace finálních úprav. Ty mají za cíl zlepšit výsledný produkt a eliminovat nežádoucí vlastnosti. U padákových tkanin je nejžádanější snížit tření a odstranit nežádoucí povrchovou přitažlivost způsobenou statickým elektrickým nábojem.

Kalandrování

Kalandrování je zušlechťovací proces pro úpravu plošné textilie, při kterém dochází ke zvýšení hladkosti, lesku a snížení prodyšnosti textilie vlivem zploštění vláken a zaplnění prostoru mezi vaznými body. Během kalandrování dojde k odstranění vlhkosti z textilie. Existují také speciální kalandry určené pro vzorování textilie.

Během kalandrování prochází plošná textilie v jedné vrstvě a plně šíří skrz válce, které jsou nejdůležitější částí stroje. Válce kalandru se dělí na tvrdé a měkké. Tvrdé válce jsou duté a zevnitř vyhřívané, nejpoužívanějším materiálem je ocel. Maximální teplota vyhřívání je 270 °C. U měkkých válců se kov používá pouze na jádro, povrch je vyroben z měkkého materiálu, jako je například pryž či lisovaná bavlna. Měkké válce mají větší průměr (od 40 do 70 cm) než tvrdé (15 až 25 cm). Součástí kalandru bývá tři až pět válců, zboží skrz ně prochází rychlostí od deseti do sedmdesáti metrů za minutu. [29]

Antistatická úprava

Antistatická úprava se aplikuje za účelem snížení nebo úplného odstranění elektrického náboje na vláknech nebo textiliích. Ten vzniká při výrobě nebo nošení textilií a způsobuje

přilnavost a špinavost, které jsou nežádoucí. Úprava může být trvalá, či dočasná na základě použitého prostředku.

Antistatické přípravky jsou tvořeny dvou a více složkovými disperzemi oligomerních nebo polymerních látek ve vodní lázni. Hlavními složkami jsou soli organických a anorganických kyselin, kovové prášky, oxidy, uhličitany, polyethylenglykoly, propylalkoholy, silikonové sloučeniny, polyelektrolyty a blokové kopolymery. Dočasná (nepermanentní) úprava se využívá při zpracování textilních surovin a po výrobě dojde k jejímu odstranění například praním. Na hotové výrobky mohou být aplikovány při apretační koupeli nebo sprejováním. Nejčastěji se využívají tenzidy. Trvalá (permanentní) úprava je aplikována nanesením polymerního filmu na vlákna a jeho fixací nebo zesílením zbobtnalých substancí za vzniku vodivých filmů. Obě úpravy mají dobrou odolnost v praní, druhá zmíněná úprava dobře odolává i chemickému čištění. [30]

1.3.5 Použití

Padáková tkanina se používá především na výrobu padáků. S jinými předměty vyrobenými z tohoto materiálu se lze setkat zřídka a jedná se spíše o různé projekty. V České republice v posledních letech vznikly například projekty, kdy byly z vyřazené padákové tkaniny vyrobeny znovupoužitelné sáčky na ovoce či kolekce bund.

Padáky slouží ke zpomalení pádu či zkrácení brzdné dráhy osoby nebo objektu, můžeme se s nimi setkat v letectví, parašutismu či kosmonautice. Ke zpomalení dojde díky odporu vzduchu, který do sebe zachytí textilní část padáku. Ta je vyrobena z pevné látky, která však musí být také lehká a skladná, aby bylo možné složit padák do příslušného obalu. Osobní padáky se dají rozdělit dle typu konstrukce na kruhové padáky, typ křídlo a padákové kluzáky. Ty jsou doplněny o záložní padák a výtažný padák. Dalším využitím podobného principu a materiálu jsou horkovzdušné a vědecké balóny.

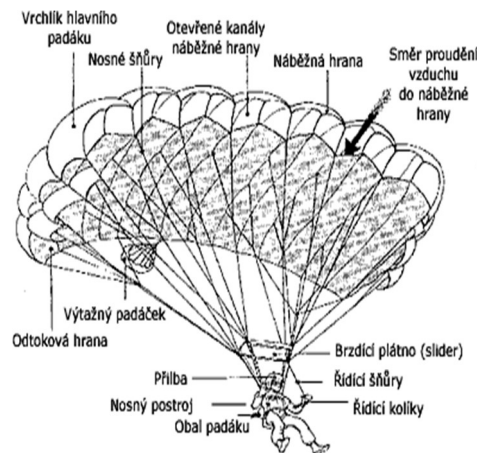
Kruhový padák

Kruhové padáky jsou významné především historicky, kdy sloužily k armádním a výzkumným účelům. Hojně používaný byl československý osobní výsadkový padák OVP- 68/76A. Pád s kruhovým padákem je rychlejší a méně ovladatelný než s padákem typu křídlo, také přistání je náročnější a vyžaduje takzvaný parakotoul, při odhození není možné automatické otevření záložního padáku. Díky eliminaci těchto faktorů je padák typu křídlo používán častěji. [31]

Padák typu křídlo

Padák tohoto typu naopak od kulatého nepadá, ale klouže. Tento padák vznikl v roce 1975, v dnešní době se jedná o nejrozšířenější typ v oblasti parašutismu (leteckého sportu, který se skládá z výskoku z letadla, volného pádu, letu s padákem a přistání), neboť je ovladatelnější, lze s ním létat i proti větru a upravovat rychlost dle potřeby. Existují padáky určené pro začínající i zkušené letce, ty se liší průřezem a poměrem délky, šířky, hloubky. [32]

Padák se skládá z vrchlíku, který je tvořen 7 až 9 dvoukomorovými kanály. Zespoda je přišito 16 nosných šňůr, které jsou nahoře rozdvojeny a dole upevněny do nosných popruhů postroje, v němž je upnut parašutista. I po otevření vrchlíku zůstává parašutistovi na zádech obal padáku. Mezi vrchlíkem a parašutistou je na nosných šňůrách uchycen slider nebo také brzdicí plátno. Další dvě šňůry jsou řídicí, ty jsou na konci opatřeny řídicími kolíky. Schéma zařízení je vidět na obrázku 21.



Obrázek 22: Části padáku – typ křídlo [32]

Padákový kluzák

Padákové kluzáky se používají pro sportovní disciplínu paragliding, při které se osoba dostává do vzduchu samostatně, bez seskoku z letadla. Existují dva druhy paraglidingu. Bezmotorový, ke kterému jsou potřeba vhodné meteorologické podmínky, a motorový, kdy je kluzák poháněn speciálním motorem za zády letce. [33]

Záložní padák

Je bezpečnostní zařízení, které je vysoce funkční a slouží k dopravení parašutisty na zem v případě, že selže hlavní padák. Je součástí padákového kompletu a musí být v pravidelných intervalech kontrolován. K jeho balení jsou oprávněny pouze příslušné osoby. Nejčastěji bývá typu křídlo, ale může být i kruhový. Materiály použité na tento padák se mírně liší od běžně používaných. Tkanina se používá především bez zátěru a šňůry jsou mírně elastické. Záložní padák pro parašutisty a paraglidisty se mírně liší konstrukcí i způsobem otevření. [33]

Existuje také obdoba tohoto padáku pro lehká sportovní letadla, ta se nazývá padákový záchranný systém. Tyto padáky jsou vhodné pro použití při krizových situacích, jako je ztráta kontroly nad letadlem nebo selhání motoru. Tento záchranný padák je umístěn v kontejneru a pro jeho aktivaci je potřeba vytažení raketou. Raketa se pak od vrchlíku odtrhne a snese se na zem na svém vlastním padáčku. [34]

Výtažný padáček

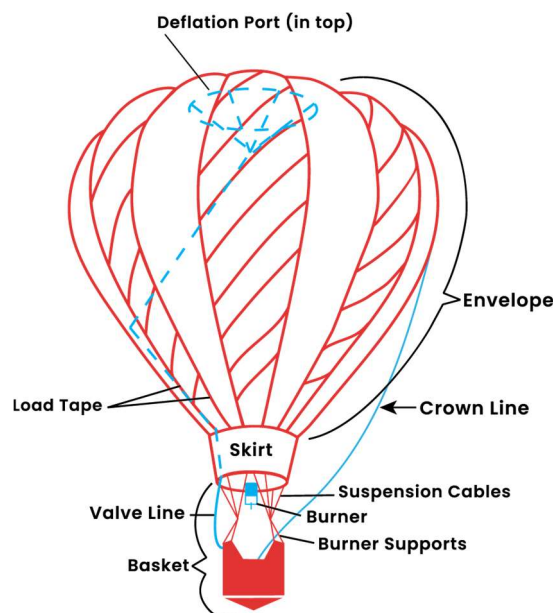
Jedná se o padák menších rozměrů, který se po zatažení za lano uvolní jako první. Toto zařízení se vlivem odporu vzduchu otevře a vytáhne z vaku vrchlík ve složeném stavu a otevře ho. Hlavní padák může být dootevřen ručně, nebo pomocí přístroje. [32]

Kite

Dalším sportovním vybavením, které je vyrobeno z padákové tkaniny, je kite. Může se jednat o disciplíny pouštění draka hodnocené různými kritérii, jako je přesnost, navigace a podobně, nebo o využití draka jako tažného zařízení. V druhém případě je zařízení podobné padákovému kluzáku, liší se rozměry, konstrukcí a může mít další komponenty jako například nafukovací hranu u vodních sportů, aby se kite při dotyku s hladinou nepotopil, ale odrazil a šlo pokračovat v jízdě. Také způsob upoutáním uživatele se liší a je jednoduché se z něj v případě potřeby odepnout. Kite jako tažné zařízení lze používat na zemi, na sněhu i na vodě. Na zemi lze kitovat s mountainboardem, obdobou skateboardu s poutky na nohy a většími kolečky, tento sport se nazývá landkiting. Na sněhu lze provádět snowkiting na lyžích nebo snowboardu. Asi nejpopulárnější ze všech je kitesurfing, který se provádí na vodě a používá se k němu surf. Někdy se pro tyto sporty používá hromadné označení kiteboarding. [35]

Horkovzdušný balón

Také obal horkovzdušného balónu (obrázek 22) je vyroben z podobného materiálu. I zde se používá polyesterová či polyamidová tkanina. Na rozdíl od padáků však převažuje polyester, který lépe odolává vysokým teplotám, jež jsou pro letuschopnost balonu nezbytné. Ohřátý vzduch má menší hustotu než okolní, díky čemuž může balón stoupat. Ohřátí vzduchu zajišťuje hořák a palivové lahve naplněné propanem či LPG. Teplota vzduchu v obalu se pohybuje okolo 100 °C, existují však i případy, kdy byla teplota výrazně překročena. Například při překonání světového rekordu v roce 1998, kdy Joschi Starkbaum vystoupal s balónem do výšky 15.360 m, přesáhla teplota v obalu 200 °C. Použitá tkanina se obešla bez poškození. Pro případ potřeby je horkovzdušný balon vybaven padákem, který je umístěn uvnitř obalu. [36] [37]



Obrázek 23: Části horkovzdušného balónu [37]

Vědecké balóny

Konstruktivně podobné jsou také vědecké balóny, které se používají k výzkumu vesmíru a Země. Jsou vyrobeny z polyetylenu, který je ošetřen tenkým filmem. NASA používá pro své účely dva typy balónů: zero-pressure (s nulovým tlakem) a super-pressure (s přetlakem). Balóny s nulovým tlakem umožňují únik plynu, aby nedocházelo k tlaku uvnitř. Jsou určeny pro krátké lety kvůli ztrátě plynu vlivem rozdílných denních a nočních podmínek. Pro dlouhé lety jsou určeny přetlakové balóny, které jsou utěsněny a udržují

konstantní objem plynu pomocí řízené změny tlaku. Díky tomu jsou balóny schopny dlouhodobě udržovat konstantní letovou výšku bez dalších prostředků. [38]

Stratosférické balónové létání se využívá k vědeckým výzkumům. Například v roce 2016 vyslala NASA balón pro získání astrofyzikálních dat. Ten zaznamenával gama záření, které vydávají radioaktivní prvky vytvořené výbuchem některých supernov. Balón se pohyboval nejčastěji ve výšce 33 kilometrů nad zemí a přistál po 47 dnech letu. V roce 2019 vyslala NASA nad Arktidu balón SPB TRAVALB-2, který zůstal ve vzduchu přes 149 dní a tím překonal dosavadní rekord. [39]

1.3.6 Životnost

Padák je zařízení, na jehož správné funkci závisí lidský život, proto je důležité správné zacházení a také to, aby nebyl používán déle, než je to bezpečné. Záchrané padáky nemusí být za celou dobu své životnosti použity v krizové situaci, i tak je potřeba se o ně správně starat, v pravidelných intervalech je větrat a přebalovat, kontrolovat technický stav a v případě potřeby nahradit poškozené součásti. Obecně uváděná životnost padáku je 12 let, pokud je jeho stav po této době velmi dobrý, jeho historie dobře zaznamenána a projde testováním na prodyšnost i pevnost, může se používat další 3–4 roky. Při opakovaném prodloužení životnosti může dosáhnout doba, kdy je záchraný padák používán, i dvaceti let. To se týká hlavně vrchlíku a závěsných šňůr, ostatní komponenty jsou za tu dobu obvykle vyměněny. [40]

Ericksen a Whinery se ve své studii zaměřili přímo na padákové tkaniny u nylonových padáků starých 29 let. Vzorky zkoumali pod rentgenovou fotoelektronovou spektroskopickou analýzou. Porovnávali je se vzorky degradovanými zvýšením teploty, údaji o stárnutí materiálu a predikcemi. Na padákovině sledovali změny pevnosti, mechanické poškození v záhybech, srážlivost materiálu, použitelnost značkovacího inkoustu a degradaci švů. Ve své studii došli k závěru, že ani 30 let není doba, po jejímž uplynutí by padáková tkanina výrazně ztratila pevnost. [41]

2 Experimentální část

Cílem práce je ověřit vhodnost experimentálního zařízení popsaného v kapitole 1.2.5 Zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání, analyzovat vliv rychlosti tření, úhlu opásání a použitého materiálu.

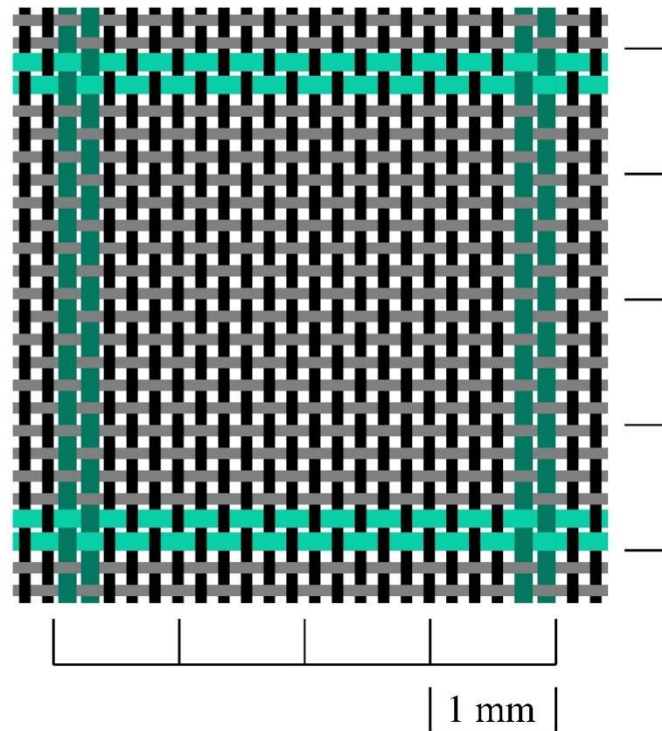
Nejprve bylo potřeba vybrat materiál pro měření, tento materiál byl analyzován, a bylo tak ověřeno složení a další parametry. Složení materiálu a případné povrchové úpravy byly ověřeny FTIR a DSC analýzou. Dále byl naplánován experiment, při němž byl sledován vliv nastavených parametrů na výstupní. Pro naměřená data byla navržena metodika, na základě které byla data zpracována.

2.1 Materiál

Pro komplexní měření byla vybrána padáková tkanina, která dobře odolávala i tření při vysokých otáčkách po delší časový úsek. Na základě porovnání polyesterových a polyamidových padákových tkanin s různou úpravou byla zvolena polyamidová tkanina, jež byla kalandrovaná.

2.1.1 Analýza materiálu

Jedná se materiál ripstop O: 18x1 + 2x2, Ú: 18x1 + 2x2, který je utkán v plátňové vazbě se zesílenými úseky. Po osnově i po útku je příze v zesílených místech zdvojená. Zesílené úseky se opakují po osmnácti nitích, což odpovídá 4 mm (obrázek 23). Dostava osnovy a útku je stejná, obě obsahují 55 nití na 1 centimetr. Parametry padákové tkaniny jsou uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 24: Padáková tkanina, ripstop: 18x1 + 2x2, Ú: 18x1 + 2x2

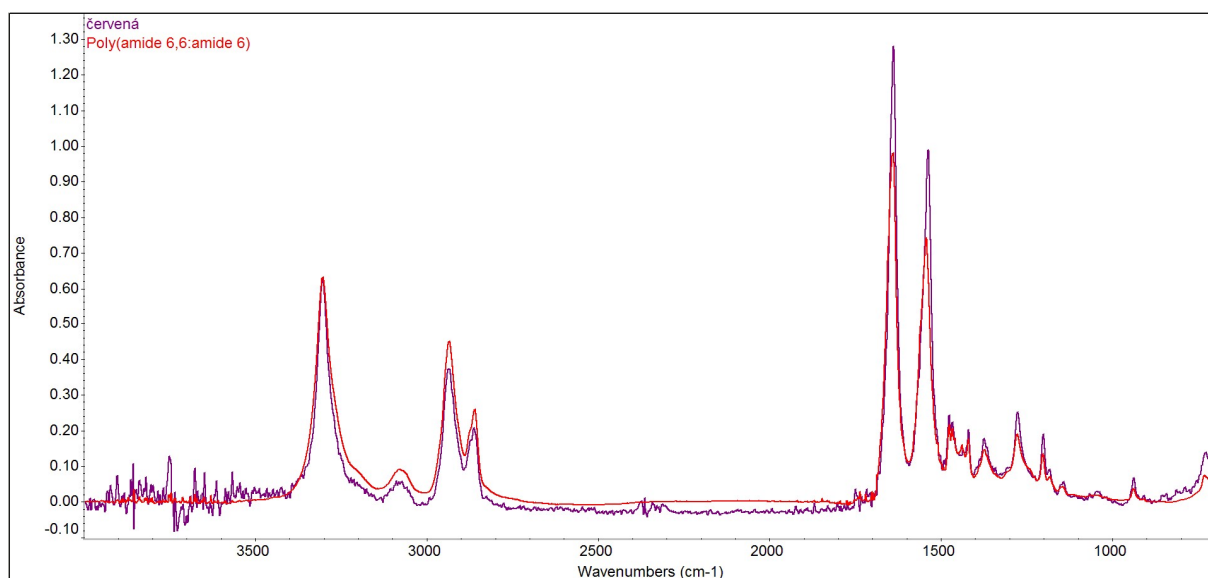
Tabulka 2: Parametry padákové tkaniny

Parametr	Padáková tkanina
Plošná hmotnost [g/m ²]	30
Tloušťka [mm]	0,04
Hustota textilie [kg/m ³]	750
Hustota vláken [kg/m ³]	1140
Objemový podíl vláken [-]	0,66
Objemová poróznost [-]	0,34
Jemnost vláken [dtex]	1,57
Počet fibril multifilu[-]	14
Jemnost multifilu [dtex]	22

2.1.2 Infračervená spektroskopie s Fourierovnou transformací

Pro ověření materiálu a povrchových úprav byla provedena FTIR analýza. Použití povrchové úpravy na měřené tkanině by mohlo mít vliv na koeficient tření.

Z padákové tkaniny byly připraveny vzorky o velikosti 10 x 10 cm. Jejich chemické složení a případná úprava byly ověřeny FTIR analýzou s ATR technikou zeslabeného úplného odrazu na krystalu z diamantu, dále pak byla provedena korekce na atmosféru. Naměřené hodnoty při multikomponentní analýze byly porovnány s daty dostupnými v knihovně spekter. K měření byl použit přístroj Nicolet iZ10 (ThermoFisherScientific, USA). Spektra pro padákovou tkaninu jsou znázorněna na obrázku 24.



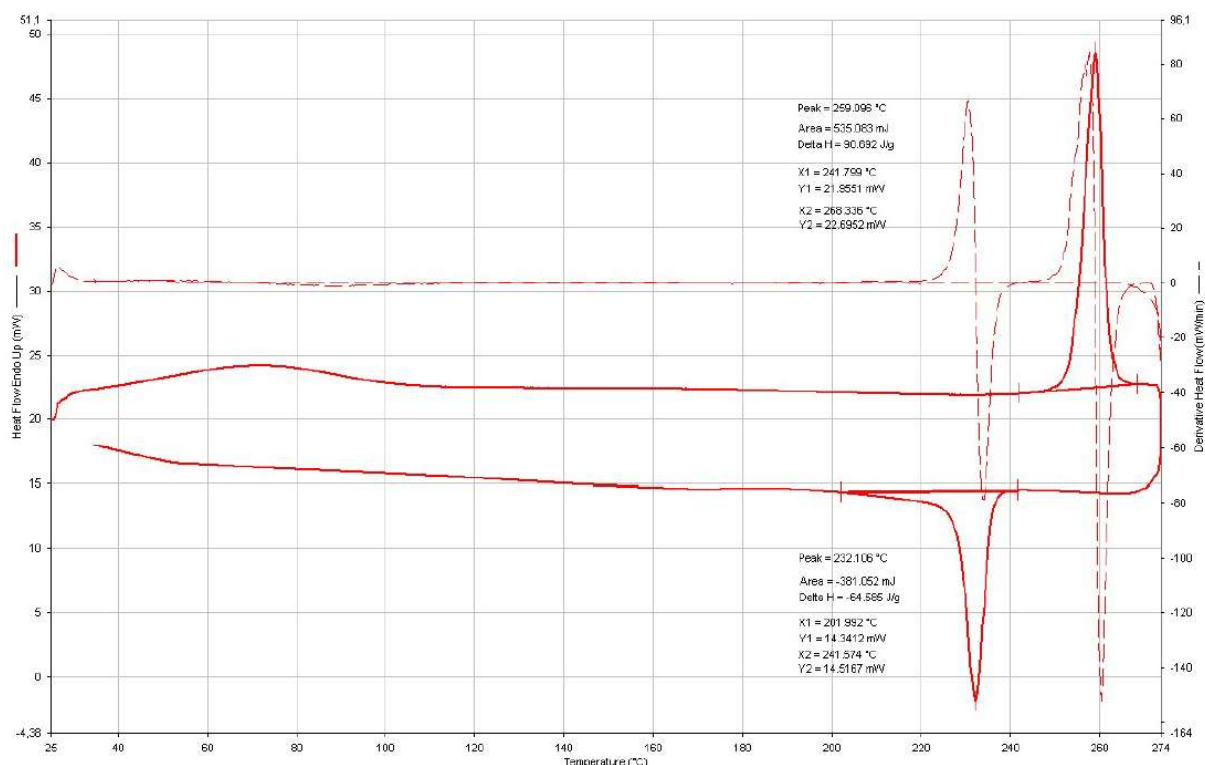
Obrázek 25: Absorbanční FTIR spektra pro zvolený materiál

U vzorku padákové tkaniny bylo potvrzeno, že je tvořen polyamidem 6.6 a neobsahuje polyester ani v malém množství. U vzorku nebyla zjištěna žádná chemická úprava například v podobě zátěru.

2.1.3 Diferenční skenovací kalorimetrie

Vzorek byl testován při standardním programu ohřevu a chlazení, který se skládá ze tří fází. V první fázi byl vzorek temperován při teplotě 25 °C dvě minuty a následně byla teplota postupně zvyšována (15 °C za minutu) na teplotu 275 °C. Tato fáze je zařazena pro odstranění tepelné historie vzorku. Po tomto zahřátí byl vzorek nechán přirozeně

vychladnout. V druhé fázi byl vzorek zahřátý stejným způsobem a následně zchlazen na 30 °C při stejné rychlosti.



Obrázek 26: DSC křivka pro zvolený materiál (polyamid 6.6)

Na obrázku 25 je termogram pro padákovou tkaninu. Na ose x je vynesena teplota ve stupních Celsia a na ose y tepelný tok v miliwattech. Přerušovanou křivkou je znázorněna první fáze. První křivka vyznačena plnou čárou představuje fázi druhého ohřevu po odstranění teplené historie. V této fázi dochází k endotermické reakci a fázovému přechodu prvního řádu, kdy se tuhá látka mění na kapalinu. Teplota tání T_m se pro tento vzorek nachází mezi body (241,799 °C; 21,9551 mW) a (268,336 °C; 22,6952 mW), dle peaku je určena teplota 259,096 °C. Z křivky pro fázi chlazení je možné odečíst exotermickou reakci mezi body (201,992 °C; 14,3412 mW) a (241,574 °C, 14,5167 mW) s peakem určujícím teplotu krystalizace 232,106 °C. Z termografu je také možné určit přibližnou hodnotu teplotu skelného přechodu T_g , která leží mezi 40 a 60 °C.

Tyto přechodové teploty odpovídají materiálu PA 6.6, pro který jsou udávány hodnoty T_g 50 – 60 °C, T_m 240 – 265 °C.

2.2 Postup měření

2.2.1 Volba materiálu a konstrukční omezení přístroje

Jak již bylo uvedeno, pro měření na zařízení zkonstruovaném docentem Svobodou byla vybrána padáková tkanina. Ta byla vybrána jako materiál, který je možné použít jako vzorek stacionární i pro upnutí na bubnu. Během experimentu byly měřeny další plošné textilie, které však pro měření na tomto zařízení při vysokých rychlostech nebyly vhodné z následujících důvodů:

Šířka materiálu: Na povrchu točícího se bubnu je vyfrézována drážka, která zabraňuje pohybu a případnému sklouznutí textilního vzorku, šířka drážky a zároveň maximální možná šířka vzorku opásání je 30 mm. Měřené vzorky byly voleny mezi 27 a 30 mm, aby nepřesahovaly drážku, ale zároveň aby ji vyplnily a při napnutí či povolení vzorku vlivem tření nedocházelo k nadměrnému pohybu do stran. Šířka stacionárního vzorku je omezena rozměry upínacích čelistí. V průběhu experimentu byla volena stejná šířka jako pro vzorek opásání, při volbě širšího vzorku by u přesahujících částí docházelo ke tření vzorku s okrajem bubnu.

Párání okrajů: Pokud je šířka vzorku větší, je potřeba ji přizpůsobit danému zařízení. Pro tyto účely byl vzorek ustřižen na požadované rozměry. Tento způsob se osvědčil pouze u vzorků, které se nepárou. Vzorky, jejichž okraje se párou, například řídce dostavené tkaniny, se pro měření tření na tomto zařízení nehodí, neboť i při nižších rychlostech dojde k rychlému poničení vlivem uvolnění nití.

U bezpečnostních pásů a polyesterových popruhů, které byly zvažovány jako materiál pro měření, byla také snaha upravit šířku pomocí řezání laserem. Laser okraj vzorku v místě řezu zataví, a zamezí tak párání okrajů, tím však dojde také k zesílení okraje, které může ovlivnit tření. Při řezání bylo vyzkoušeno více možností nastavení, kdy byla volena různá síla paprsku, nebylo však dosaženo výsledku, který by neovlivňoval měření tření. Tloušťka v místě úpravy je ovlivněna také při založení, či zapožití. Způsob úpravy, který se zdá vhodný, avšak bylo by potřeba provést obsáhlejší měření pro ověření, je sešití dvojnásobné šířky vzorku a obrácení naruby, čímž vznikne tunýlek. Takto připravený vzorek má ovšem dvojitou tloušťku oproti samotnému materiálu, a může proto docházet k ovlivnění naměřených hodnot, především teploty měřené na povrchu vzorku pyrometrem.

Hrubý povrch: U materiálů s hrubším povrchem docházelo k rychlému opotřebení (prodření) a zahřátí textile, nebylo tak možné měřit tření při vysokých rychlostech po delší dobu. Při experimentu, kdy byl použit polyesterový popruh, došlo vlivem tření k roztavení materiálu na povrchu, které ovlivnilo tření. Vzorek byl z experimentu vyloučen, neboť by při opakování tohoto jevu mohlo dojít k poškození zařízení. Je to však příklad mazání taveninou, jež může být součástí procesu tření.

Roztažnost: Pro měření jsou nevhodné také materiály, které mají vyšší roztažnost, neboť jejím vlivem dojde k přerušení měření. U vysoce deformabilních materiálů není spuštění vůbec možné, neboť po uvolnění aretace dojde k takovému protažení stacionárního vzorku, že se upínací část dotkne bezpečnostního čidla sloužícího pro upozornění na přetržení vzorku a zastavení měření.

Tloušťka: Pro upnutí vzorku na bubnu je potřeba provléknout dva konce vzorku úzkou drážkou dovnitř bubnu. Pokud se tkanina ve dvou vrstvách do drážky nevejde, není možné ji upevnit, tudíž nelze provést měření. Omezena je také tloušťka stacionárního vzorku, který se upevňuje do upínacích čelistí. Tloušťka stacionárního vzorku je několikanásobně větší než tloušťka vzorku opásání.

Tuhost: Ze stejného důvodu lze za nevhodné označit také materiály s vysokou tuhostí v ohybu, ty není možné upnout do upínacích šroubů vně bubnu. Pro správné upevnění je potřeba konec šroubem provléknout a několikrát otočit dokola.

2.2.2 Měření teploty

Před vlastním měřením teploty byla ověřena hodnota emisivity zvoleného materiálu. Skutečná emisivita lze vypočítat dosazením do vzorce odvozeného ze Stefan-Boltzmannova zákona:

$$\varepsilon_{skutečná} = \varepsilon_{nastavená} * \left(\frac{T_{měřená}}{T_{skutečná}}\right)^4 \quad (18)$$

Pro výpočet skutečné emisivity je potřeba znát nastavenou emisivitu, měřenou teplotu a skutečnou teplotu. Obě teploty jsou do vzorce dosazovány v Kelvinech. Nastavená emisivita je hodnota, pro kterou byl pyrometr kalibrován. Pro textilní materiály je nejběžnější uváděná hodnota 0,95. Tato hodnota se zadává do měřicího přístroje, kterým je teplota měřena (pro tento experiment byl použit pyrometr). Měřená teplota

je hodnota získaná z daného zařízení. Skutečná teplota je teplota zjištěná jiným přesnějším způsobem, například z teplotních čidel, nebo displeje ohřívače. Platí, že skutečná teplota musí být vyšší než měřená teplota.

Pro tuto práci byla skutečná teplota získána pomocí čtyř teplotních čidel, která byla připojena k počítači. Čidla byla umístěna mezi dvě vrstvy textilie tak, že vrstva textilie byla položena na výhřevné desce, tak aby ji celou zakryla, a přes každý teplotní senzor pak byl položen zvláště malý kousek měřené textilie, tak aby nezasahoval do oblasti snímané pyrometrem. Čidla byla zatížena konstrukcí, aby se zabránilo jejich uvolnění. Konstrukce byla izolována vrstvou polystyrenu, který zabraňoval nežádoucímu ovlivnění měření tepelnou vodivostí materiálu konstrukce. Výsledná hodnota byla vypočtena jako průměr hodnot získaných ze čtyř čidel.

Hodnotu skutečné emisivity zobrazuje a zaznamenává také program připojený k zařízení. Pro měření tření lze použít konstantní hodnotu, která se zadá do programu před samotným měřením, či teplotní průběh. Průběh měření se zadává pro materiály, u kterých se emisivita výrazně mění se změnou teploty. Průběh měření se nahrává do programu „Měření tření – termo s korekcí“.

Pro materiály měřené v této diplomové práci byla hodnota emisivity po celou dobu měření blízká doporučené hodnotě 0,95 pro textilní vzorky, a proto byla tato hodnota pro měření použita.

Porovnání hodnot teplot z čidel a z ohřívače

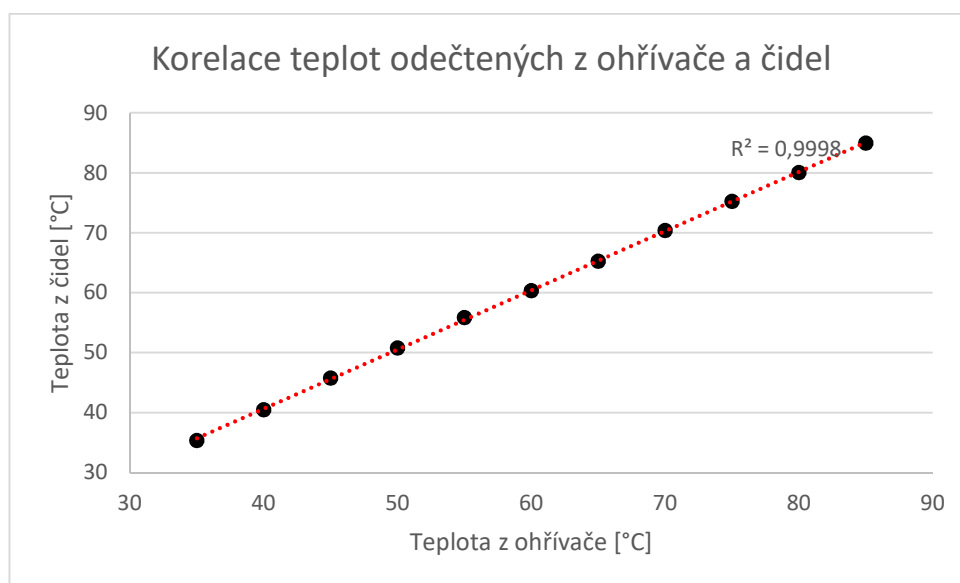
Skutečná teplota byla zaznamenávána teplotními čidly, která byla zatížena kovovou konstrukcí. Tuto teplotu bylo možné odečítat také z ohřívače, který byl umístěn pod vrstvou textilie. Ohřívač (Precision Hot Plate) od firmy Harry Gestigkeit GmbH vyhříval desku rovnoměrně po celé své ploše. Na přístroji bylo možné redukovat množství přiváděné energie, a tím ovlivnit rychlost zahřívání vzorku s nejvyšší možnou teplotou 110 °C.

Pro zjištění, zda byl odečet skutečné hodnoty z čidel vhodný a zda nedocházelo k ovlivnění teploty vlivem tepelné vodivosti materiálu konstrukce, bylo provedeno porovnání dat z čidel a z ohřívače. Tato data byla zaznamenána ve stejnou chvíli a byl mezi nimi vypočten rozdíl. Hodnoty naměřené na ohřívači a teplotních čidlech spolu s rozdíly jsou pro teploty

po pěti stupních Celsia uvedeny v tabulce 3 a graficky znázorněny na obrázku 26, kde jsou proloženy lineární funkcí; koeficient determinace (R^2) pro tato data je roven 0,9998.

Tabulka 3: Porovnání teplot odečtených z ohřivače a čidel

Ohřivač [°C]	Čidla [°C]	Rozdíl [°C]	Rozdíl [%]
35,00	35,38	0,38	1,08
40,00	40,49	0,49	1,23
45,00	45,80	0,80	1,77
50,00	50,80	0,80	1,60
55,00	55,90	0,90	1,64
60,00	60,40	0,40	0,66
65,00	65,30	0,30	0,46
70,00	70,40	0,40	0,57
75,00	75,30	0,30	0,40
80,00	80,10	0,10	0,13
85,00	85,00	0,00	0,00



Obrázek 27: Porovnání teplot odečtených z ohřivače a čidel

Z naměřených dat bylo zjištěno, že hodnoty naměřené z teplotních čidel a z ohřivače mají zanedbatelné rozdíly, průměrná hodnota rozdílu teplot je 0,48 °C, což odpovídá 0,93 %. Procentuální rozdíl rostl do dosažení teploty 55 °C, po dosažení této hodnoty se rozdíl zmenšoval a u nejvyšších naměřených teplot (od 82 °C) byly hodnoty odečtené z ohřivače

a čidel totožné. Ve všech případech, kdy byl zjištěn rozdíl mezi hodnotami, byla vyšší hodnota odečtena z ohříváče. To bylo pravděpodobně způsobeno tepelným odporem textilie. Bylo prokázáno, že lze použít teploty odečtené z čidel.

2.2.3 Nastavení zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání

K zařízení je připojen počítač s programy potřebnými pro zaznamenávání naměřených dat. Po spuštění počítače a připojení potřebných přístrojů přes USB kabel je nutné spustit zařízení a pyrometr. Připojený pyrometr se zapíná jedním stisknutím spouštěče (největší tlačítko), třemi stisknutími žlutého tlačítka „mode“, stisknutím šedé boční šipky a opětovným stisknutím spouštěče. Tímto postupem se pyrometr zapne a měří teplotu, dokud není vypnut. Na displeji pyrometru je potřeba zkontrolovat připojení k počítači (svítí USB), jednotky, ve kterých zaznamenává teplotu (pro programy měření tření je potřeba nastavit °C) a nastavenou emisivitu (0,95, hodnota, při které bylo zařízení kalibrováno). Měření tření zaznamenává program „Měření tření“ (pro přesnější měření „Měření tření – termo“, „Měření tření – termo s korekcí“, pokud známe emisivitu měřeného materiálu či její průběh).

V programu je potřeba ručně zadat název souboru a velikost úhlu, kterou lze odečíst ze stupnice na zařízení. V programu se volí rychlost otáček na procentuální škále vpravo, otáčky lze nastavit na začátku měření, nebo měnit v průběhu. Na škále 100 % odpovídá rychlosti 3600 otáček za minutu. K záznamu rychlosti dochází digitálně, měřením času, za který se buben otočí o 360 stupňů (znovu se setkají senzor a kolík). Při pomalých rychlostech dochází k přehřívání přístroje a předčasnému zastavení. Při spuštění měření se automaticky nastaví dvacetiprocentní otáčky, což odpovídá 720 otáčkám za minutu, při této rychlosti se přístroj sám chladí natolik, že měření může probíhat až do zastavení, nebo přerušení vzorku.

Před zahájením měření je potřeba uvolnit křídlovou matici a vysunout aretační objímku zařízení v místech ramene, kde je upnut konec stacionárního vzorku. Poté je možné spustit program a zařízení. Otáčení bubnu se spustí tlačítkem na zařízení. Po naměření požadovaného časového úseku se měření ukončí v programu příkazem „stop programu“, tím se zastaví i buben. Buben je v případě potřeby (např. při přerušení vzorku) možné zastavit také červeným tlačítkem na zařízení. Po doměření je důležité znovu upevnit rameno.

2.2.4 Upnutí textilních vzorků

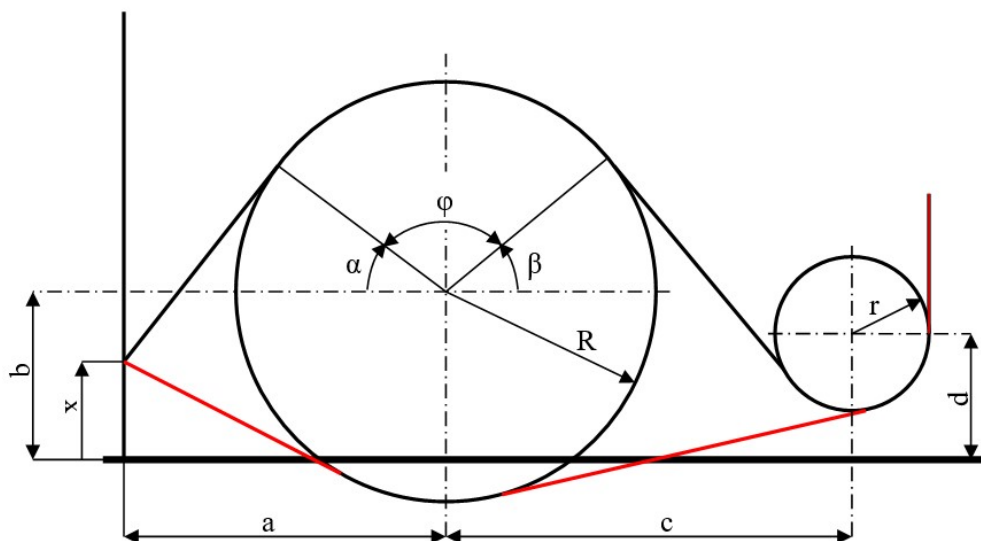
Při měření se o sebe třou vzorek opásání upnutý na bubnu a stacionární vzorek; upnutí vzorku je nutné v tomto pořadí, neboť stacionární vzorek by bránil manipulaci s druhým vzorkem. Především při upínání stacionárního vzorku je nutné postupovat opatrně, aby nedošlo k poškození snímače.

Vzorek opásání: Vzorek představuje třecí materiál, který je umístěn na rotujícím kotouči zařízení a tře druhý vzorek umístěný na pozici stacionárního vzorku. Jeden konec vzorku se provleče škvírou do bubnu a zasune do upínacího šroubu, kus vzorku se nechá volný, při utahování se několikrát obtočí kolem upínacího šroubu a tím se vzorek upevní. Upínací šroub je potřeba z vnitřní strany přidržet a z druhé utáhnout maticku, k tomu jsou u přístroje přiloženy stranové klíče. Při volbě prvního upínacího šroubu je potřeba dbát na směr vedení vzorku na bubnu a na to, aby zůstala navrchu lící strana vzorku (není-li požadováno jinak). Po utahování šroubu se volný konec vzorku vede po bubnu skrz drážku, po natažení po celém obvodu se prostrčí skrz drážku stejně jako upevněný konec a upevní se do volného upínacího šroubu. Šroub se utahuje do té míry, dokud není vzorek napnutý, poté se zafixuje matickou na vnější straně bubnu. Před vyndáním vzorku se povolí maticky na vnější straně bubnu a pootočí se postupně upínacími šrouby tak, aby se konce vzorku uvolnily.

Stacionární vzorek (třený materiál): Stacionární vzorek je upevněn mezi dvěma čelistmi. Nejprve se upíná do čelisti umístěné v blízkosti motoru, poté se vede přes buben, spodem, nebo vrchem v závislosti na požadovaném úhlu opásání. Dále se vede přes vodící a upínací prvek do druhé čelisti. Ta je umístěna na rameni, které musí být při navádění vzorku zafixováno aretační objímkou. Před sundáním stacionárního vzorku je potřeba upevnit rameno aretační objímkou, aby nedošlo k poškození bezpečnostního čidla, a poté vyndat vzorek v opačném pořadí, než byl do přístroje upnut.

2.2.5 Nastavení úhlu opásání

Úhel, ve kterém se stýká stacionární vzorek se vzorkem na bubnu, je pro dané zařízení možné nastavit od 20 do 105 stupňů. Pro hodnoty do 60° je potřebné vést stacionární vzorek pod bubnem, toto vedení je na obrázku 27 vyznačeno červeně. Černě je vyznačeno vedení vzorku horem pro vyšší hodnoty úhlu. Červená a černá barva je pro dané úhly použita také na stupnici úhlů, na které je možné požadovaný úhel přesně nastavit.



Obrázek 28: Schéma umístění vzorků pro nastavení úhlu opásání

2.3 Naměřená data

Pro základní soubor dat byla použita stejná tkanina jako třený i třecí materiál. Byly připraveny vzorky orientované po osnově i po útku, při každém měření o sebe byly třeny stejně orientované vzorky. Velikost úhlu opásání byla nastavena na 80 stupňů, měření probíhala 10 minut a otáčky byly nastaveny na 20, 40 a 60 % výkonu zařízení. Tyto hodnoty odpovídají rychlostem blízcím se 6, 12 a 18 m/s.

Experiment byl dále doplněn o měření, kdy byl úhel opásání nastaven na 65 a 105 stupňů, tedy o nejnižší a nejvyšší nastavitelnou hodnotu při vrchním vedení vzorku. Vedení vzorku spodem nebylo zařazeno z toho důvodu, že při něm nelze měřit teplota. Také byla provedena měření, kdy byla padáková tkanina třena s polyamidovou folií. Měření s folií proběhla při všech možných kombinacích materiálů, padáková tkanina byla umístěna jako stacionární vzorek, ale také jako vzorek opásání. Dále proběhlo měření, kdy byla třena folie s folií, a soubor byl doplněn také o tření padákové tkaniny o padákovou tkaninu. Proběhlo také měření, kdy byla padáková tkanina kombinována s dostupnými polyamidovými tkaninami, z dostupných vzorků byly vybrány tři tkaniny, které bylo možno upnout do zařízení. Pro měření tření s různými materiály proběhlo pouze jedno opakování z důvodu časové náročnosti a omezeného množství materiálu.

Časová náročnost měření spočívá v několika bodech, počínaje přípravou vzorků, které musí být střiženy velmi přesně na přesnou šířku. Strih musí být proveden přesně po niti a nesmí docházet ke střižení pod úhlem, to totiž způsobuje nežádané vytažení okrajových nití. Sundání předchozích a navedení nových vzorků obnáší upevnění části napojené na snímač a vypnutí pyrometru. Nejprve je potřeba sundat stacionární vzorek, poté vzorek opásání. Po vzorku opásání zůstávají v napínacích čepech zachycené nitě, které je potřeba odstranit, a až poté je možné upnout nový vzorek. Po upnutí vzorků je možné uvolnit aretační objímku a spustit pyrometr. Před zahájením měření je vhodné zkontrolovat přenos pyrometru v programu pro měření teploty, až poté spustit program pro měření tření. Tření probíhá po dobu 10 minut a poté je potřeba znovu upevnit aretační objímku a vypnout pyrometr. Třecí buben je po tření nutné nechat vychladnout na teplotu blízkou se teplotě před zahájením prvního měření. Po částečném vychladnutí lze vyměnit vzorky, i tak je další měření možné nejdříve po 30 minutách (dle nejvyšší dosažené teploty). Teplotu bubnu lze průběžně kontrolovat pyrometrem.

2.3.1 Nastavení experimentu

Ověření vlivu rychlosti

Cílem tohoto experimentu bylo ověřit vliv zvolené rychlosti na výstupní parametry. Rychlost je možné nastavit v připojeném programu na procentuální škále. Pro měření byly zvoleny rychlosti 6, 12 a 18 m/s, které odpovídají 20, 40 a 60 % maximálních možných otáček. Úhel opásání pro všechna měření byl zvolen 80°. Doba měření byla stanovena na 10 minut.

Měření byla provedena na padákové tkanině, která byla rozdělena na vzorky orientované po osnově a po útku. Vzorky stejné orientace byly použity jako stacionární vzorek i vzorek opásání. Z naměřených dat lze vyhodnotit také vliv orientace.

Ověření vlivu úhlu opásání

Tento experiment byl proveden za účelem ověření vlivu úhlu opásání na časový průběh součinitele tření a růst teploty. Velikost úhlů byla zvolena na 65, 80 a 105°. Pro jednotlivé úhly byla také vypočítána příslušná třecí plocha. Byla zvolena rychlost tření 6 m/s a doba měření 10 minut. Měření byla provedena na vzorcích padákové tkaniny orientovaných pouze po útku (z důvodu omezeného množství materiálu).

Ověření vlivu materiálu

Během tohoto experimentu bylo cílem nastínit vliv zvoleného materiálu a jeho umístění na výstupní data. Bylo provedeno měření na padákové tkanině (PAD 6.6), třech vzorcích vybrané tkaniny (PAD 6.6) a folie (PAD 6). Padáková tkanina byla kombinována s folií a bylo provedeno také měření tření folie o folii. Vybrané tkaniny byly s padákovou tkaninou třeny na pozici stacionárního vzorku i vzorku opásání. Tato měření byla provedena při rychlosti 6 m/s a úhlu opásání 80°. Z časových důvodů nebylo provedeno opakování, proto se jedná pouze o orientační měření.

2.3.2 Výstupní parametry

Výstupem z programu pro měření tření je záznam napínaví síly, rychlosti, koeficientu tření a teploty. Při sledování vlivu rychlosti tření, orientace tkaniny a úhlu opásání na koeficient tření u tkaniny určené pro padáky byla provedena opakovaná měření. U dat byla vypočtena průměrná hodnota a 95% intervaly spolehlivosti příslušných středních hodnot. Hodnoty pro součinitel tření a teplotu byly vyneseny v závislosti na čase.

Reálné křivky časového průběhu součinitele tření byly vyhlazeny pomocí lineárního regresního modelu LLF2. Jedná o lineární funkci, která byla rozdělena na dva úseky za předpokladu, že v prvním úseku dochází k prudkému poklesu součinitele tření (doba, po kterou součinitel tření klesá, je ovlivněna rychlostí tření, orientací tkaniny a úhlu opásání). Tento průběh může být ovlivněn vyrovnáváním nerovnosti pohybu. Ve druhém úseku je průběh koeficientu rovnoměrný, ve většině měření mírně klesá. Průběh druhé fáze může narušit poškození vzorku, ke kterému docházelo především u nejvyšších rychlostí tření.

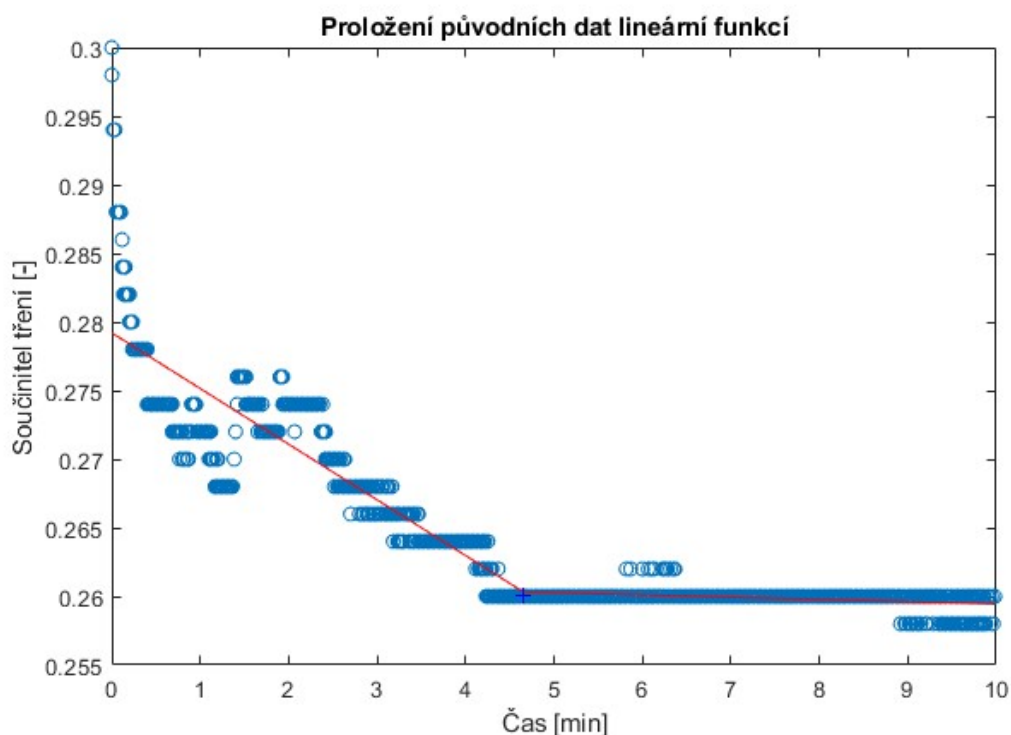
Lokální směrnice modelu LLF2 obsahuje parametry A_1 a A_2 , které vyjadřují citlivost koeficientu tření na čase t a platí $A_1 = a_1$, $A_2 = a_2 - a_1$. Úsek q_1 odpovídá počátečnímu koeficientu tření $q_1 = f_p$ a úsek q_2 odpovídá ustálenému koeficientu tření $q_2 = f_u$. Časový okamžik, kdy dojde k průsečíku obou úseků, je t_c a tomu odpovídá koeficient tření f_c . Model LLF2 lze popsat následující rovnicí (jedná se o regresní spline s jedním uzlovým bodem),

$$LLF2 = f_p + A_1 t + A_2 (t - t_c)_+ = f_p + a_1 t + (a_2 - a_1)(t - t_c)_+ \quad (19)$$

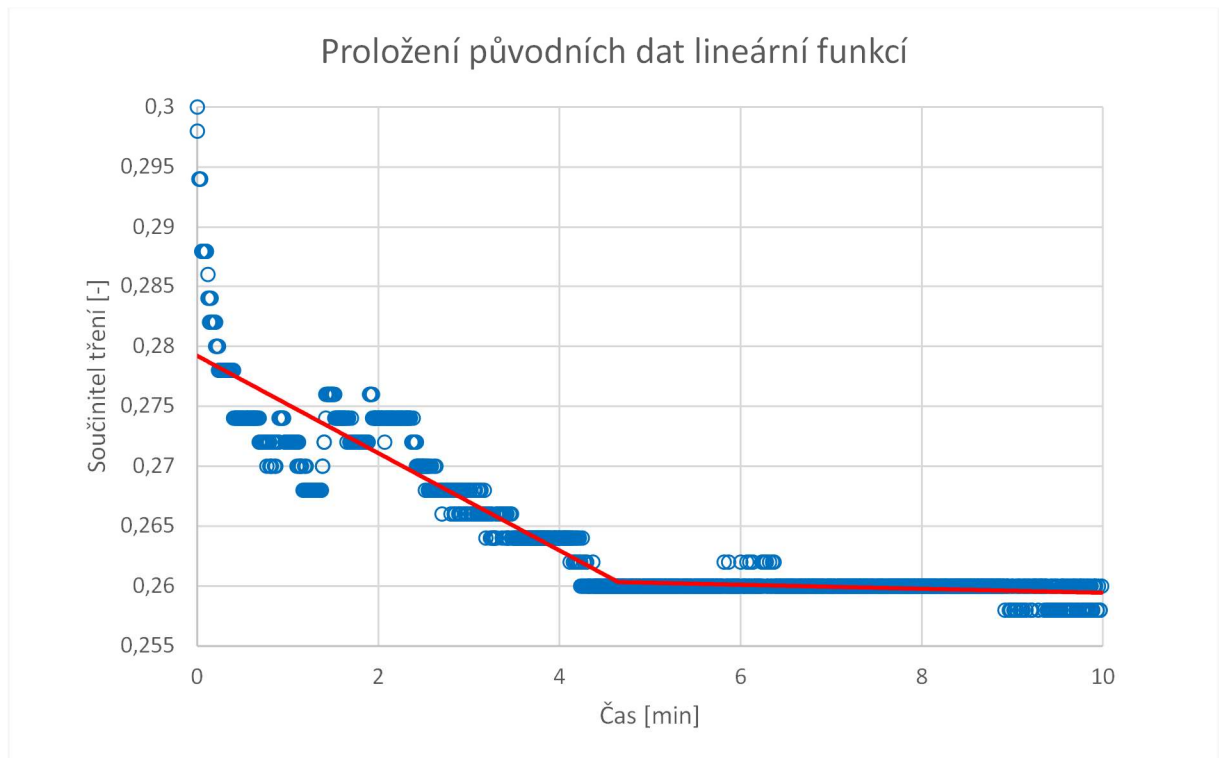
kde funkce $(x)_+ = 0$, pro x v záporných hodnotách a $(x)_+ = x$, pro x kladné. [42]

Vyhlazení bylo provedeno v programu Matlab, v němž byl vytvořen skript pro zmíněnou funkci LLF2. Jako vstupní soubor pro tento skript slouží textový soubor obsahujícího dva sloupce, v prvním sloupci je uveden čas v minutách a ve druhém hodnoty součinitele tření. Pro průměr, horní a dolní mez, se vytváří samostatné soubory. V programu jsou vypočteny souřadnice bodů, ve kterých se mění směrnice křivky. Následně byl v Excelu vyhlazen koeficient tření dosazením parametrů křivky vypočtených v Matlabu do lineární rovnice přímky. Data jsou dále zpracována v programu Excel.

Výstupem z programu Matlab je také graf (obrázek 28), ve kterém jsou vynesena původní data proložená lineární funkcí, na základě toho je možné provést kontrolu. Na obrázku 29 jsou vynesena původní data a proložení vypočtené v Excelu.



Obrázek 29: Proložení dat v programu Matlab (pro průměrné hodnoty vzorků orientovaných po osnově, rychlost 6 m/s), na ose x je vynesen čas [min] a na ose y součinitel tření f [-]



Obrázek 30: Proložení dat v programu Excel (pro průměrné hodnoty vzorků orientovaných po osnově, rychlost 6 m/s), na ose x je vynesena čas [min] a na ose y součinitel tření f [-]

2.3.3 Tření padákové tkaniny

Tření padákové tkaniny v základním souboru bylo rozděleno do šesti skupin, dle vlivu orientace vzorků (po osnově, po útku) a rychlosti tření nastavené na 6, 12 a 18 m/s. Pro každou skupinu bylo provedeno pět opakování, jednotlivá měření probíhala 10 minut. Úhel opásání pro všechna měření byl nastaven na 80 stupňů. U naměřených hodnot byla sledována hmotnost, časový průběh součinitele tření a teploty.

Tabulka 4: Hmotnostní změna padákové tkaniny po měření

Opakování	v6/osnova [%]	v6/útek [%]	v12/osnova [%]	v12/útek [%]	v18/osnova [%]	v18/útek [%]
1.	0	1,4E-05	0	10,8E-05	0,8E-05	12,2E-05
2.	0,8E-05	0	0	4,4E-05	2,9E-05	11,0E-05
3.	0	2,2E-05	0,7E-05	10,4E-05	2,2E-05	4,6E-05
4.	3,8E-05	0,8E-05	4,6E-05	6,0E-05	0,74E-05	3,9E-05
5.	2,9E-05	1,5E-05	8,4E-05	2,3E-05	2,3E-05	3,5E-05
Průměr	1,2 E-05	1,5 E-05	6,8 E-05	2,7 E-05	7,0E-05	1,8 E-05

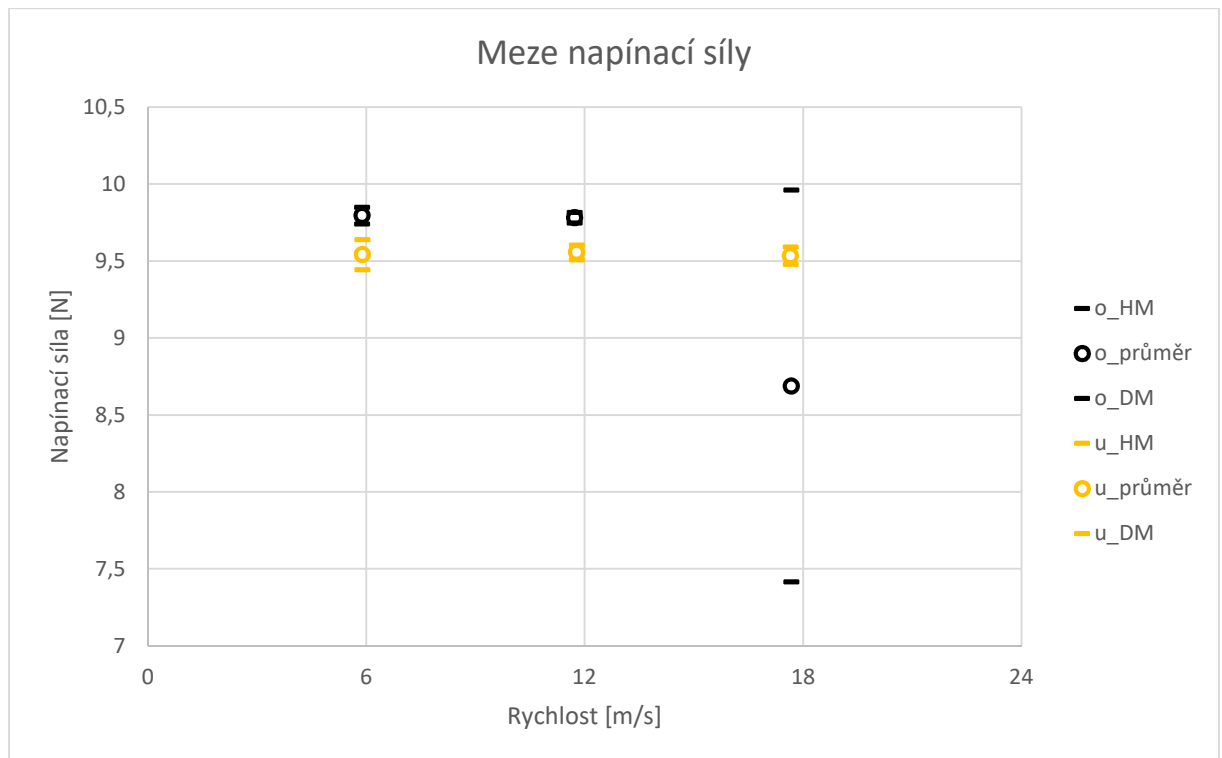
Vzorky byly zváženy před provedením experimentu a po něm, tyto hodnoty byly zaznamenány a vyhodnoceny. U všech vzorků došlo k zanedbatelnému hmotnostnímu úbytku, pouze u šesti vzorků byl tento úbytek větší než 0,005 %. Procentuální hmotnostní úbytky jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 4. V prvním a druhém sloupci jsou uvedeny úbytky po měření při rychlosti 6 m/s, první vzorek je orientován ve směru osnovy a druhý ve směru útku. Další dva sloupce jsou hodnoty po tření při rychlosti 12 m/s a poslední dva po tření při 18 m/s.

Naměřená data byla zpracována pomocí programu Excel. Čas zaznamenaný programem byl upraven na časový úsek měření a byla zkontrolována rychlost měření v porovnání s nastavenou rychlostí.

Rychlost se na zařízení nastavuje pomocí ukazatele na procentuální škále (poměrná rychlost z maximální možné rychlosti zařízení), přesnější nastavení není možné, proto se reálná rychlost může od požadované mírně lišit. Napínací síla je ovlivněna upnutím vzorku a nelze ji kontrolovat před zahájením měření, hodnoty se proto mohou mírně lišit. Ke kolísání může dojít také v průběhu měření, při poškození či uvolnění vzorku. V tabulce 5 jsou vyneseny hodnoty pro skutečnou rychlost a napínací síly, ty jsou vyneseny také na obrázku 30. Z dat byl spočítán 95% interval spolehlivosti střední hodnoty, v jednotlivých sloupcích jsou vyneseny DM – dolní mez, průměr a HM – horní mez.

Tabulka 5: Skutečná rychlost a napínací síla pro padákovou tkaninu

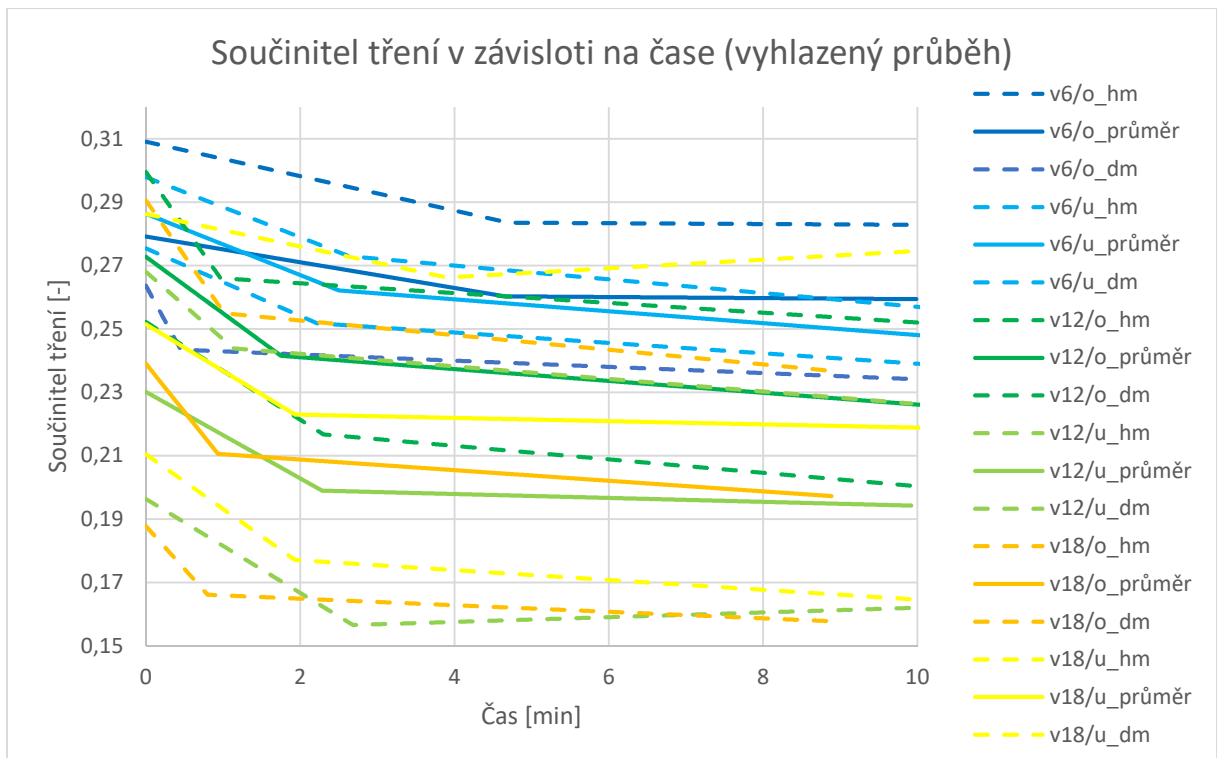
Měření	Skutečná rychlost [m/s]			Napínací síla [N]		
	DM	průměr	HM	DM	průměr	HM
v6/o	5,872	5,881	5,890	9,742	9,796	9,850
v6/u	5,886	5,889	5,891	9,444	9,541	9,638
v12/o	11,657	11,720	11,782	9,746	9,780	9,815
v12/u	11,736	11,775	11,814	9,508	9,556	9,603
v18/o	17,581	17,649	17,717	7,415	8,688	9,962
v18/u	17,653	17,673	17,693	9,479	9,535	9,591



Obrázek 31: Meze napínací síly při různých rychlostech pro padákovou tkaninu

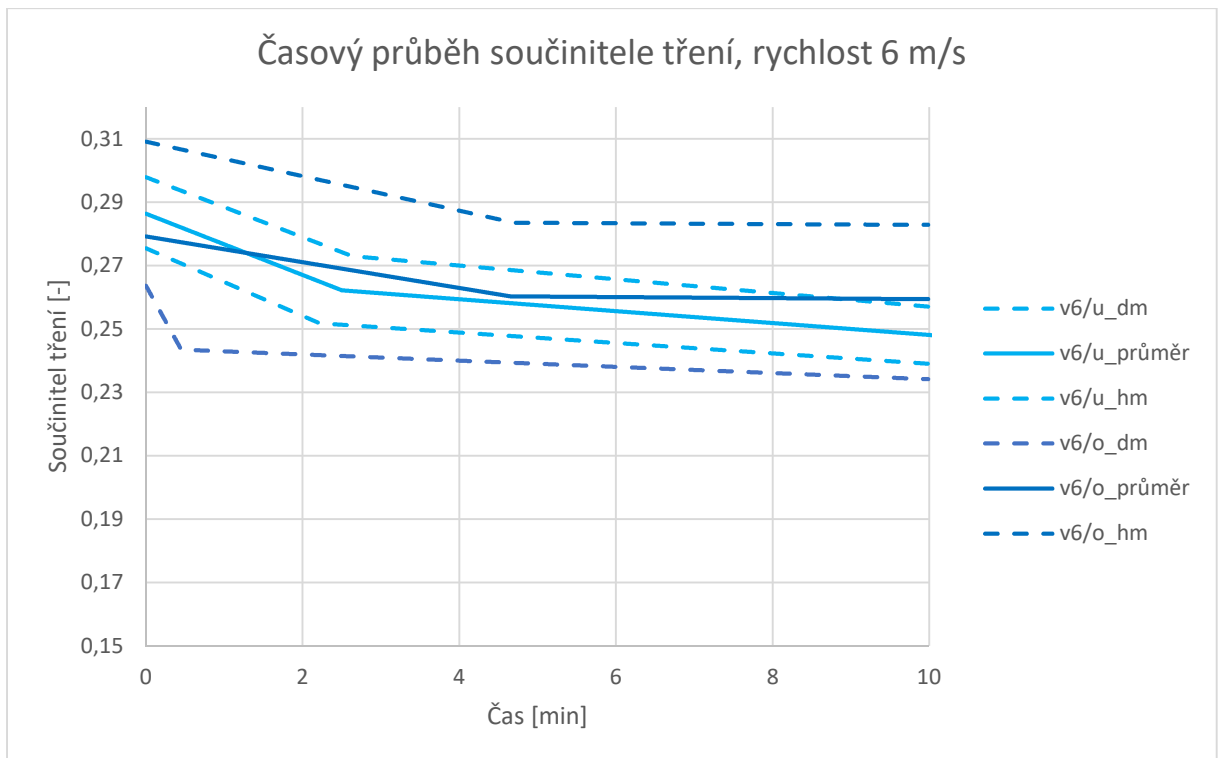
Na obrázku 30 jsou vyneseny hodnoty 95% intervalu spolehlivosti. Čarou jsou vyznačeny hodnoty horní a dolní meze a kruhem průměry napínací síly. Vzorky orientované po osnově jsou vyneseny černě a vzorky orientované po útku oranžově. Hodnoty vzorků orientovaných po osnově jsou mírně vyšší než u vzorků orientovaných po útku, u rychlostí 6 a 12 m/s lze sledovat statisticky významný rozdíl orientace na napínací sílu. U vzorků orientovaných po útku zřejmě došlo k protažení vzorku a snížení napínací síly. U vzorků orientovaných po osnově ke snížení napínací síly nedošlo, nebo bylo menší než u vzorků orientovaných po útku, neboť soustava osnovních nití je při tkaní napnutá. Interval pro vzorek V18/o (rychlost 18 m/s, orientace po osnově) je výrazně širší než u ostatních měření, a to z důvodu opakovaného poškození vzorku, kvůli němuž bylo měření předčasně ukončeno. Vlivem vysoké variability naměřených dat nelze u této rychlosti sledovat statisticky významný rozdíl mezi různě orientovanými vzorky. Mezi stejně orientovanými vzorky nenastal při měření při různých rychlostech statisticky významný rozdíl.

Na obrázku 31 jsou vyneseny vyhlazené průběhy součinitele tření v závislosti na čase pro různě orientované vzorky a rychlosti 6, 12 a 18 m/s. Vyhlazení je popsáno dvěma úseky dle lineární lomené funkce LLF2 (dle rovnice 19).

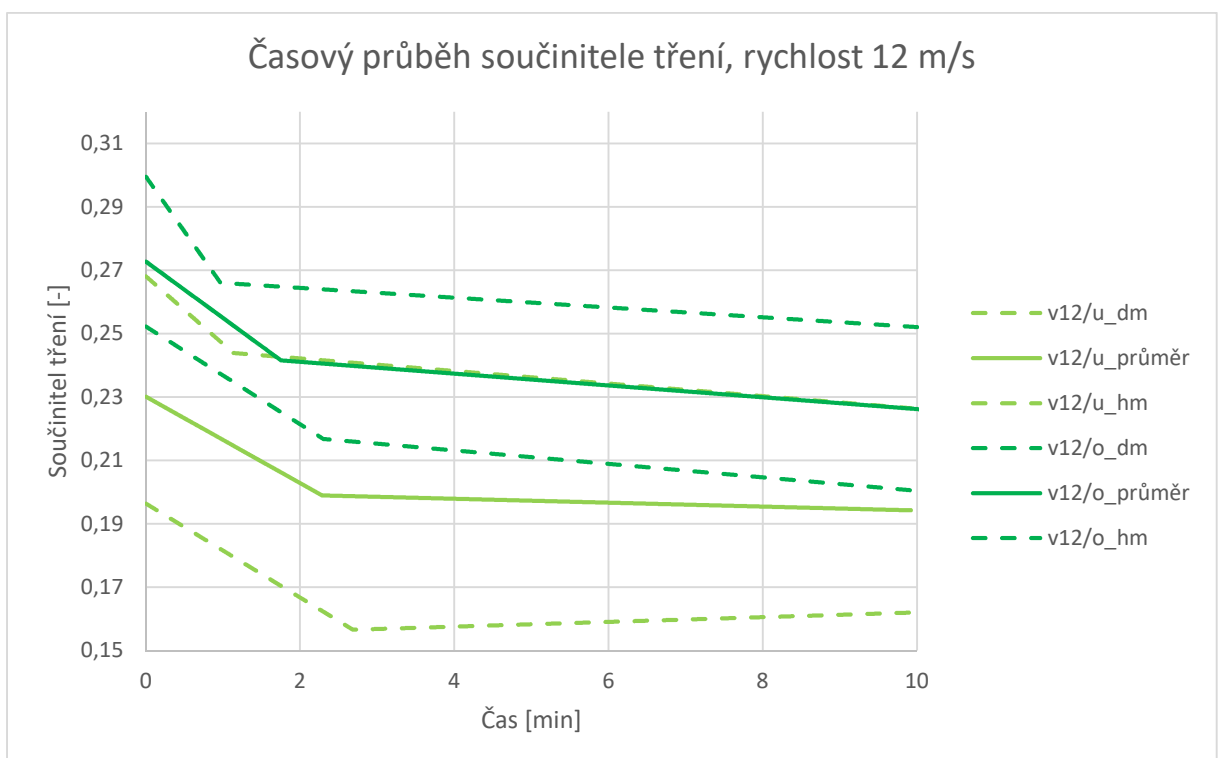


Obrázek 32: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro padákovou tkaninu

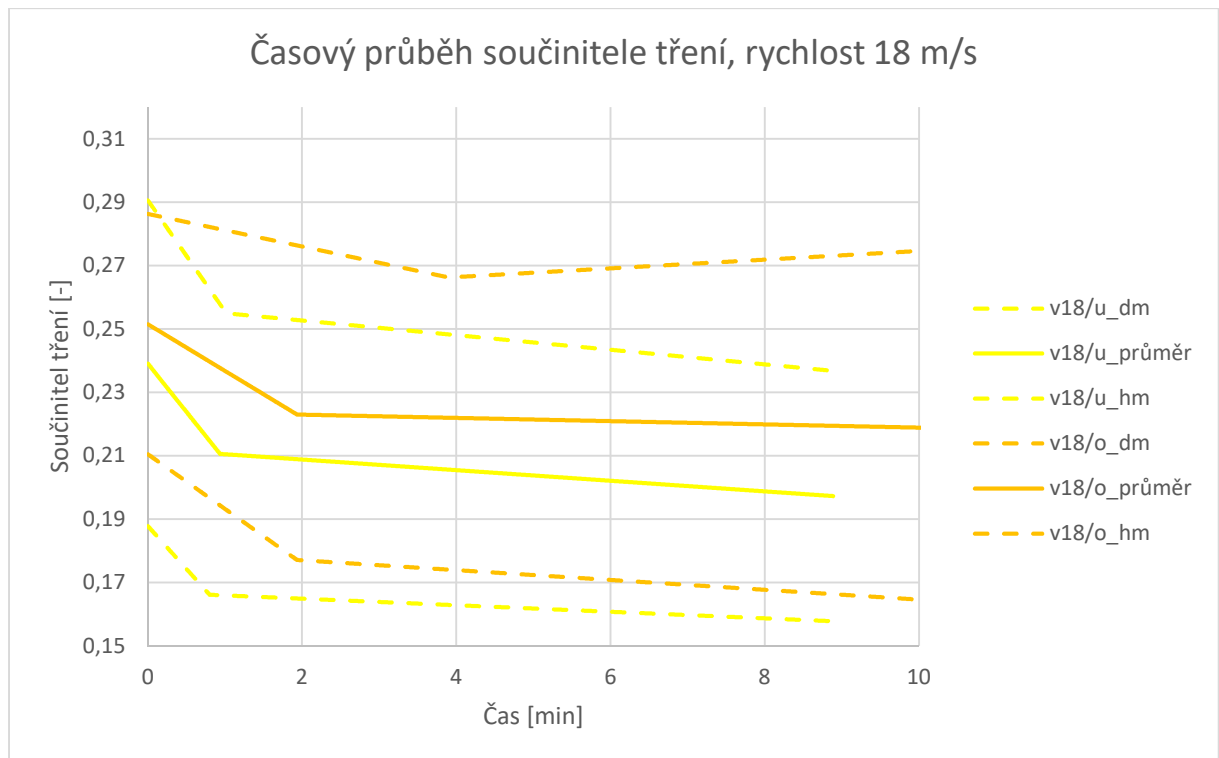
Na ose x je vynesena čas v minutách a na ose y součinitel tření. Plnou čarou je znázorněna průměrná hodnota z měření a přerušovanou čarou horní a dolní mez. Vzorky třené při rychlosti 6 m/s jsou vyneseny modře, rychlost 12 m/s zeleně a 18 m/s žlutě. Vzorky orientované po osnově jsou vyneseny tmavší barvou než vzorky orientované po útku. Pro lepší přehlednost jsou přidány grafy pro jednotlivé rychlosti, na obrázku 32 je zaznamenána rychlost 6 m/s, 33 rychlost 12 m/s a 34 rychlost 18 m/s.



Obrázek 33: Časový průběh součinitele tření, rychlost 6 m/s



Obrázek 34: Časový průběh součinitele tření, rychlost 12 m/s

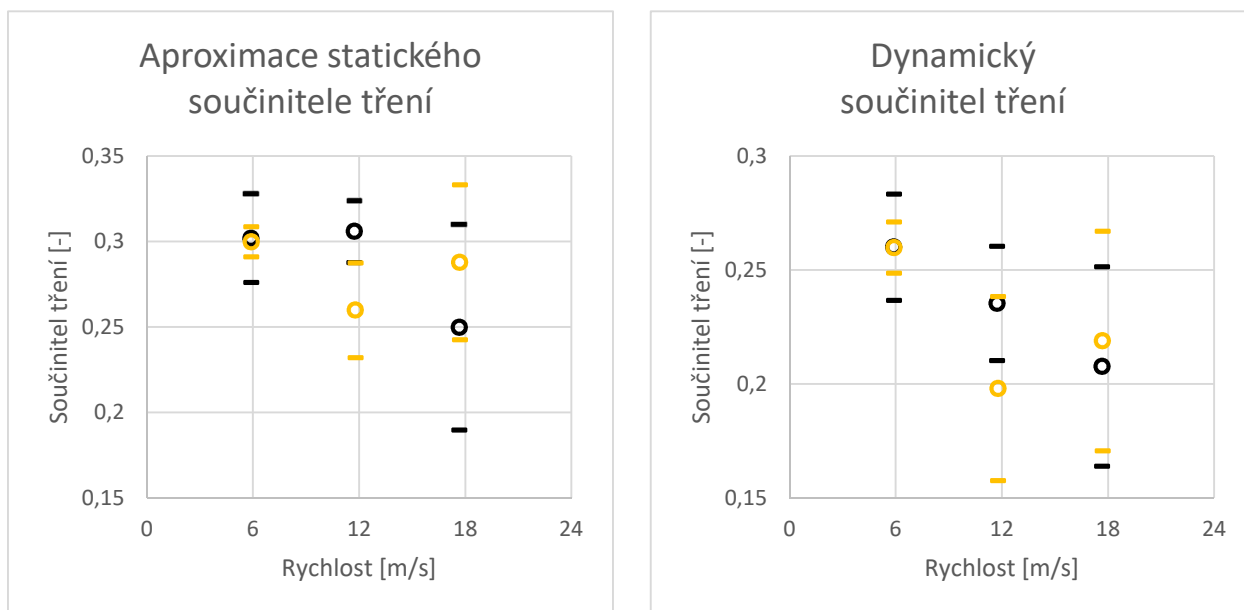


Obrázek 35: Časový průběh součinitele tření, rychlost 18 m/s

Součinitel tření v závislosti na čase klesá. Mezi časovým průběhem součinitele tření není statisticky významný rozdíl mezi vzorky orientovanými po útku a po osnově. Vliv rychlosti je statisticky významný pouze mezi vzorky orientovanými po útku sledovanými při rychlosti 6 a 12 m/s, intervaly ostatních vzorků se prolínají.

Pro součinitel tření byla také stanovena hodnota dynamického tření a odhadovaná hodnota statického tření, které jsou vyneseny na obrázku 35. Pro odhad hodnoty statického tření byla zjištěna nejvyšší hodnota při spuštění měření, tedy moment, kdy třecí materiál musel překonat počáteční odpor třeného materiálu, pro jednotlivá měření byl vypočten průměr a horní a dolní mez. Sledování statického tření na experimentálním zařízení je složité, zařízení slouží především k zaznamenávání dynamického tření, a proto je zde uváděna pouze aproximace statického součinitele tření pro porovnání s třením dynamickým. Pro přesnější určení byla uvedena metoda měření na nakloněné rovině.

Průměrná hodnota dynamického tření byla vypočtena z druhého úseku křivky. Pro všechna měření byl uvažován časový úsek dvě minuty, který se nacházel za bodem zlomu, data z konce měření nebyla uvažována, neboť u vysokých rychlostí docházelo k poškození některých vzorků a data těchto měření by mohla ovlivnit výslednou hodnotu.



Obrázek 36: Statický a dynamický součinitel tření padákové tkaniny

Na obrázku 35 jsou vedle sebe vyneseny aproximace statického a hodnoty dynamického součinitele tření. Vzorky orientované po osnově jsou vyneseny černou barvou a vzorky orientované po útku oranžovou barvou. Hodnoty dynamického tření jsou nižší než hodnoty statického tření, a to především u vyšších rychlostí. Statisticky významný rozdíl mezi statickým a dynamickým třením nastal u vzorků orientovaných po útku při rychlosti 6 m/s a u vzorků orientovaných po osnově při 12 m/s.

Hodnoty lze vypočítat zmíněným postupem, nebo získat z programu Matlab. Tyto hodnoty se při porovnání mírně liší z toho důvodu, že Matlab pracuje s vyhlazeným průběhem tření. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6 pro statické tření a v tabulce 7 pro tření dynamické.

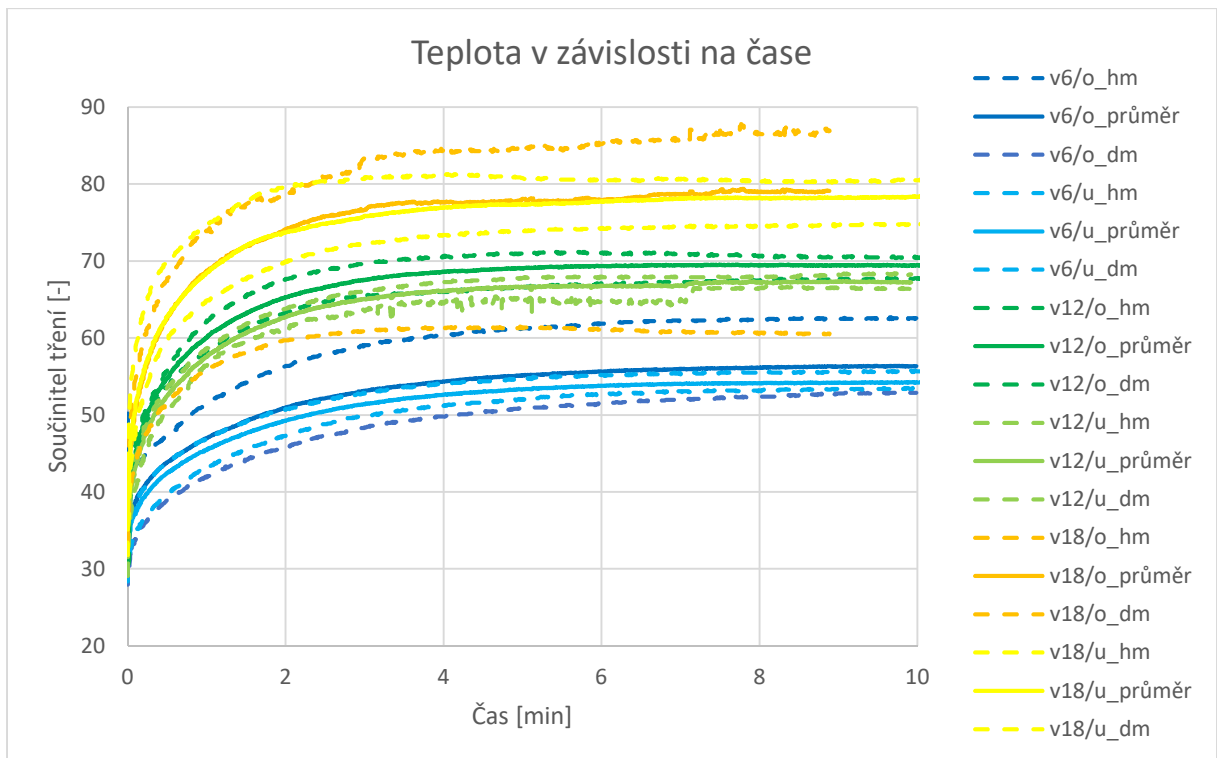
Tabulka 6: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	v6/o	v6/u	v12/o	v12/u	v18/o	v18/u
HM z měření	0,309	0,298	0,300	0,268	0,291	0,286
HM Matlab	0,328	0,309	0,324	0,288	0,310	0,333
průměr z měření	0,279	0,286	0,273	0,230	0,239	0,252
průměr Matlab	0,302	0,300	0,306	0,260	0,250	0,288
DM z měření	0,264	0,275	0,252	0,196	0,188	0,210
DM Matlab	0,276	0,291	0,288	0,232	0,190	0,243

Tabulka 7: Dynamického tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	v6/o	v6/u	v12/o	v12/u	v18/o	v18/u
HM z měření	0,283	0,271	0,261	0,238	0,252	0,267
HM Matlab	0,284	0,279	0,268	0,246	0,257	0,261
průměr z měření	0,260	0,260	0,235	0,198	0,208	0,219
průměr Matlab	0,261	0,267	0,245	0,200	0,212	0,224
DM z měření	0,237	0,249	0,210	0,158	0,164	0,171
DM Matlab	0,244	0,255	0,222	0,155	0,167	0,180

Zařízení zaznamenává také skutečnou teplotu v průběhu měření, ta je vypočtena z teploty měřené pyrometrem a hodnoty emisivity daného materiálu. Časový průběh teploty je znázorněn na obrázku 36.



Obrázek 37: Průběh teploty v závislosti na čase pro padákovou tkaninu

Na ose x je vynesena čas v minutách a na ose y teplota ve stupních Celsia. Teplota v průběhu měření roste, až dojde k jejímu ustálení. Z obrázku je vidět, že měření vzorků orientovaných po útku při rychlosti 18 m/s bylo ukončeno dříve než ostatní měření z důvodu opakovaného přerušení vzorků.

Z grafu lze vyvodit, že rozdíly mezi různě orientovanými vzorky při stejné rychlosti tření jsou statisticky nevýznamné. U vzorků orientovaných po útku je statistický rozdíl mezi všemi rychlostmi. U vzorku orientovaného po osnově a sledovaném při rychlosti 18 m/s byla zjištěna vysoká variabilita měření vlivem poškození, intervaly měření se proto pro rychlost 18 a 12 m/s překrývají. Při porovnání obou intervalů s měřením při 6 m/s byl zjištěn statisticky významný rozdíl.

2.3.4 Vizuální změny

Po měření byly pozorovány vizuální změny na měřeném vzorku, tkaniny po tření při různých rychlostech a různé orientaci jsou znázorněny na obrázku 40. Všechny vzorky byly použity jako stacionární vzorek, vzorek opásání není zdokumentován, neboť při jeho uvolnění ze zařízení dochází k poškození. První tři vzorky zleva jsou střiženy po směru útku, zbylé tři vzorky jsou střiženy po směru osnovy. V každé skupině jsou vzorky seřazeny

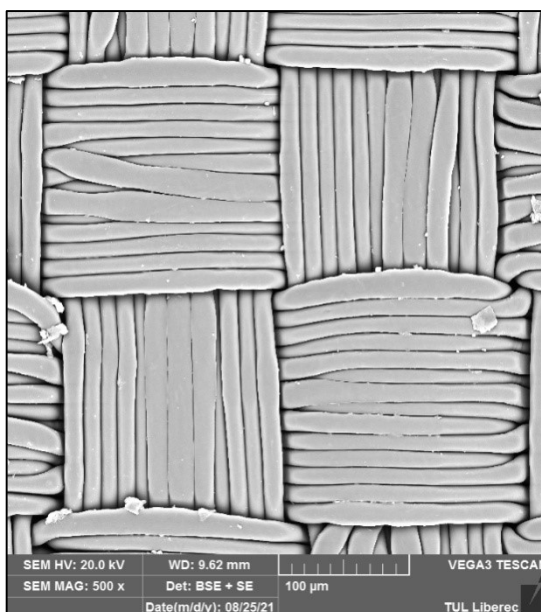
zleva v závislosti na rychlosti otáček při měření tření. První vzorek byl třen při rychlosti 6 m/s, druhý při rychlosti 12 m/s a třetí 18 m/s.



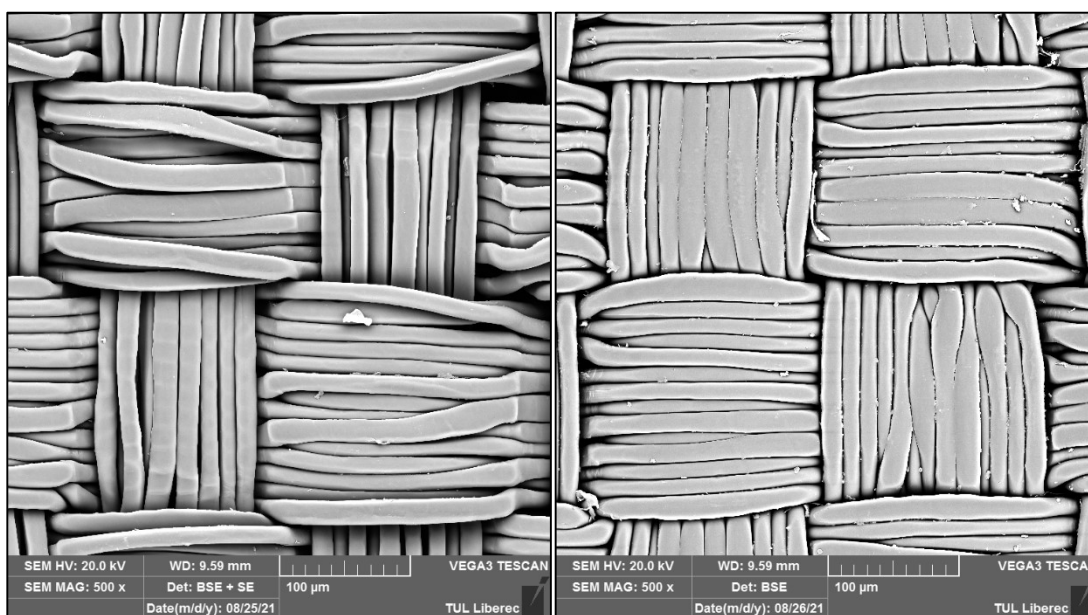
Obrázek 38: Stacionární vzorky po sundání z přístroje, zleva vzorky střiženy po směru osnovy, zprava po směru útku (rychlost 6, 12 a 18 m/s)

Z obrázku 37 je vidět, že k výraznějším změnám došlo u vzorků orientovaných po osnově. U vzorku, který byl třený při otáčkách 12 m/s, došlo k posunu útkových nití (příčný směr) ve směru osnovních (podélný směr). K výraznějšímu poškození došlo u stejně orientovaného vzorku při rychlosti 18 m/s. Zde je patrné poškození v ploše, která přibližně odpovídá ploše kontaktu stacionárního vzorku se vzorkem upnutým na bubnu. V některých místech je útková nit přerušena tam, kde byla ripstopová vazba v podélném směru zesílena. Provázání osnovních a útkových nití tak zůstalo pouze v úsecích tkaných v plátnové vazbě.

Pro lepší popis vizuálních změn při nižších otáčkách byly vyhotoveny mikroskopické snímky se zvětšením 500x. Na obrázku 38 je vzorek před měřením a na obrázku 39 po měření při rychlosti 12 m/s. Na druhém obrázku jsou zobrazeny obě orientace vzorku, vzorek před třením je orientovaný po útku.



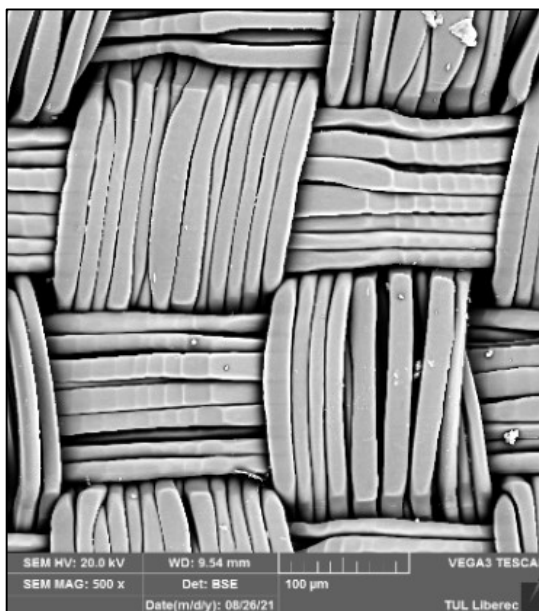
Obrázek 39: Mikroskopický snímek padákové tkaniny před třením



Obrázek 40: Mikroskopické snímky stacionárních vzorků po tření při rychlosti 12 m/s, vlevo vzorek třený po směru osnovy, vpravo po směru útku

Z makroskopických snímků lze pozorovat, že k výraznějším změnám došlo u vzorku orientovaného po osnově. V porovnání se snímkem před měřením došlo k posuvu nití a částečnému vytažení vazného bodu. U osnovních nití došlo k přiblížení a u útkových k oddálení multifilu. Původní rozlohu vazných bodů lze pozorovat nejen z obrázku před měřením, ale také z otisků na útkových nitích, které jsou položeny pod osnovními.

Otisky vláken v opačném směru jsou patrné také na jednotlivých vláknech. Nejlépe patrné jsou na osnovním vazném bodu vlevo dole, kde lze pozorovat otisk přibližně pěti vláken. U vzorku orientovaného po útku k tak výrazným změnám nedošlo. V některých částech lze pozorovat větší zploštění vláken než po samotném kalandrování a mírné rozvolnění krajních vláken v multifilu v obou směrech.



Obrázek 41: Mikroskopický snímek vzorku opásání po tření při rychlosti 12 m/s, třený po směru útku

Ke změnám došlo také u vzorku opásání (obrázek 40), okem viditelné bylo částečné vytažení krajních nití a mírné zaoblení zesílených částí. Tyto úseky, které byly původně rovné, byly po měření lukovitě prohnuté. Pod mikroskopem bylo možné pozorovat, že došlo k posuvu nití ve směru tření. Částečné vytažení vazného bodu a otisk původního umístění multifilů je výraznější než u stacionárních vzorků.

2.3.5 Vliv úhlu opásání na tření padákové tkaniny

Základní soubor tření padákové tkaniny byl měřen při nastavení úhlu opásání 80 stupňů. Měření bylo doplněno o měření při nejmenším a největším nastavitelném úhlu při vedení vzorku vrchem. Měření pro úhel 65, 80 a 105 stupňů byla vynesena do společných grafů. Všechna měření v tomto souboru byla provedena na vzorcích orientovaných po útku a měření probíhala při rychlosti 6 m/s. Pro doplněné úhly byla provedena tři opakování, pro úhel 80° byla použita data z předchozího souboru, kde bylo k dispozici pět opakování.

Plochu, kde dochází ke tření mezi vzorky, při nastavení jednotlivých úhlů opásání lze vypočíst dosazením do rovnice:

$$A = \alpha * r * h \quad (20)$$

kde α představuje velikost úhlu opásání v radiánech, r [mm] poloměr třecího kotouče a h [mm] šířku vzorku. Poloměr bubnu zařízení je 77,5 mm a šířka vzorku 30 mm.

Tabulka 8: Plocha tření při nastavení úhlu opásání 65°, 80° a 105°

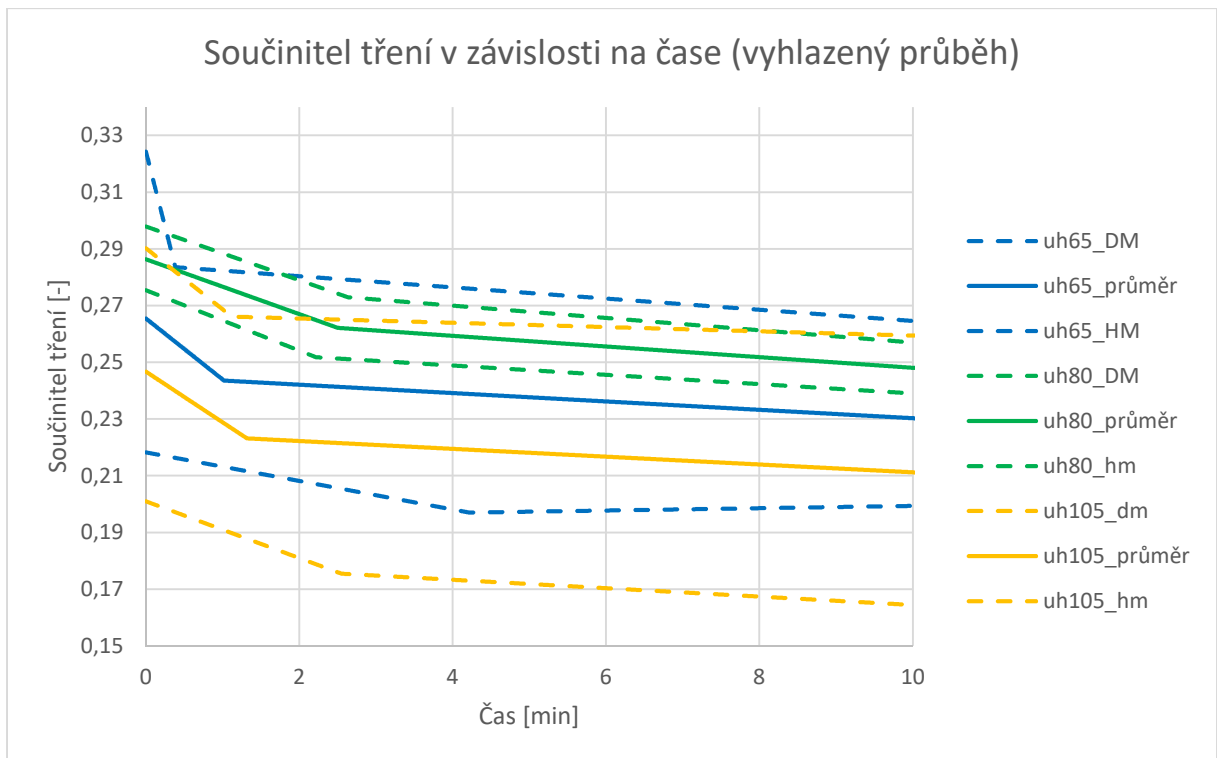
Úhel opásání	Úhel opásání	Plocha tření
65	0,567	13,183
80	0,698	16,229
105	0,916	21,297

Plocha tření se zvětšuje s velikostí úhlu opásání, hodnoty pro měřené úhly jsou uvedeny v tabulce 8. Pro úhel 65° dochází ke tření mezi vzorky v ploše 13,183 cm², pro úhel 80° je třecí plocha 16,229 cm² a pro úhel 105° je třecí plocha 21,297 cm². Z rovnice (17), lze vyvodit, že s rostoucí velikostí třecí plochy (rostoucím úhlem opásání) klesá součinitel tření.

Tabulka 9: Skutečná rychlost a napínací síla pro různé úhly opásání

Měření	Skutečná rychlost [m/s]			Napínací síla [N]		
	DM	průměr	HM	DM	průměr	HM
úhel 65	5,901	5,916	5,930	9,373	9,656	9,940
úhel 80	5,886	5,889	5,891	9,444	9,541	9,638
úhel 105	5,846	5,862	5,878	9,487	9,596	9,704

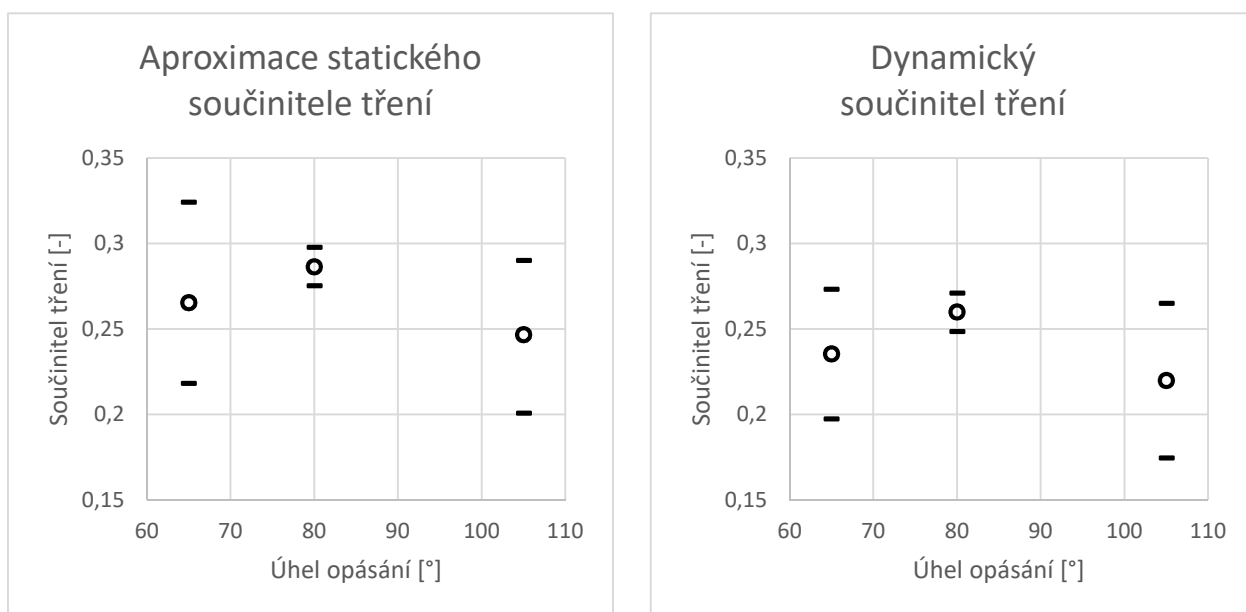
Skutečná rychlost a napínací síla jsou zaznamenány v tabulce 9. Naměřené hodnoty napínací síly se navzájem příliš neliší. K největšímu rozptylu dochází u úhlu 65°, při měření však nedocházelo k poškození vzorku. Tento rozdíl může být způsoben rozdílným upnutím vzorku. Mezi jednotlivými úhly opásání nenastal statisticky významný rozdíl.



Obrázek 42: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro různé úhly opásání

Na obrázku 41 jsou vyneseny vyhlazené hodnoty součinitele tření pro všechny měřené úhly opásání. Na ose x je vynesen čas v minutách a na ose y součinitel tření. Plnou čarou je znázorněna průměrná hodnota z měření a přerušovanou čarou horní a dolní mez. Měření při úhlu opásání 65° je vyneseno modrou barvou, úhel 80° zelenou a úhel 105° žlutou. Součinitel tření v čase klesá. Mezi jednotlivými úhly opásání není statisticky významný rozdíl.

Z rovnice (17), lze vyvodit, že úhel opásání má mít vliv na součinitel tření, jenž by měl klesat s rostoucím úhlem opásání, který je v tomto vztahu ve jmenovateli. Z naměřených dat tento závěr nelze potvrdit, nejnižší průměrná hodnota byla naměřena pro nejvyšší úhel opásání, avšak pro úhly 65° a 80° toto pořadí neplatí. Pro ověření by bylo potřeba provést více měření a porovnat také menší úhly, kterých je možné dosáhnout při vedení vzorku spodem.



Obrázek 43: Součinitel tření pro různé úhly opásání při statickém a při dynamickém tření

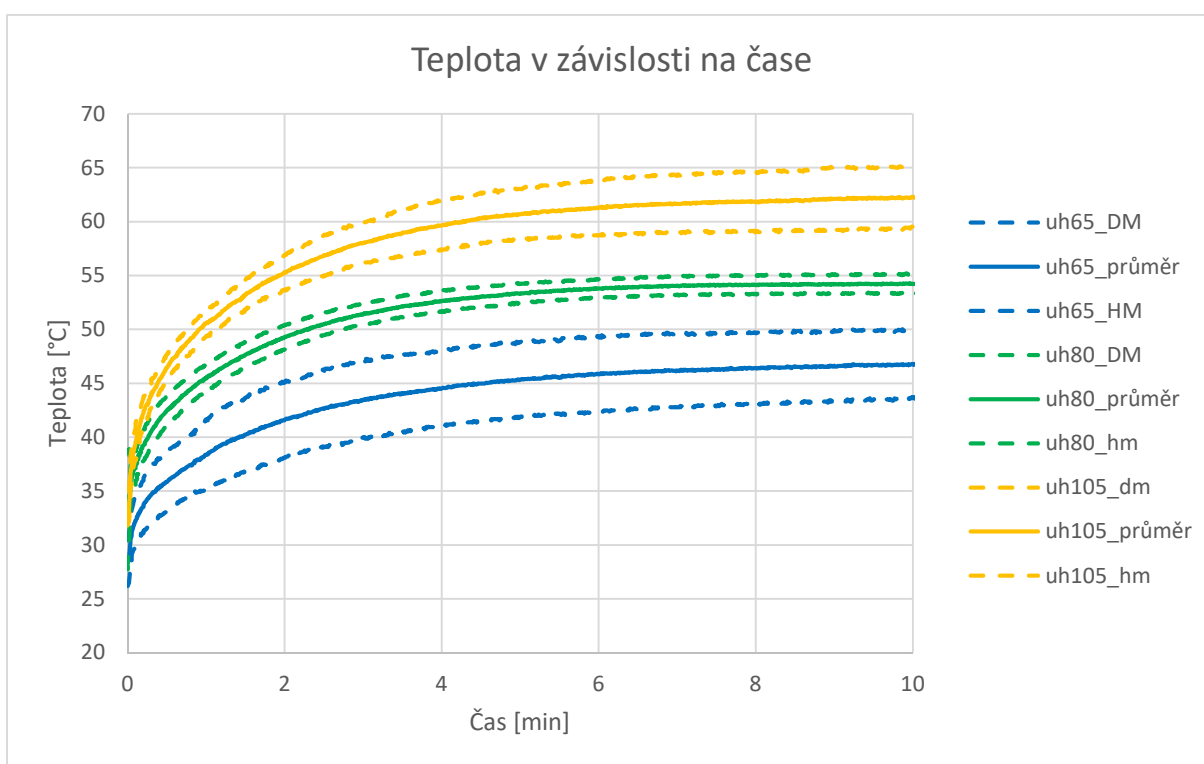
Průběh součinitele tření byl rozdělen na aproximaci statického a hodnoty dynamického tření (obrázek 42). Stejně jako v případě padákové tkaniny jsou vyšší hodnoty naměřené pro statické než pro dynamické tření. Nejvyšší průměrná hodnota byla v obou případech zjištěna pro úhel 80°, díky většímu počtu opakování je také interval spolehlivosti pro tato data menší. U vzorků je vysoká variabilita, zjištěné rozdíly mezi jednotlivými rychlostmi nejsou statisticky významné. Při porovnání statického a dynamického součinitele tření byl zjištěn statisticky významný rozdíl pouze pro úhel 80°. Hodnoty vypočtené z průběhu měření byly porovnány s hodnotami z programu Matlab (tabulka 10 a 11), které se mohou mírně lišit vlivem vyhlazení.

Tabulka 10: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	úhel 65	úhel 80	úhel 105
HM z měření	0,324	0,298	0,290
HM Matlab	0,324	0,298	0,290
průměr z měření	0,265	0,286	0,247
průměr Matlab	0,265	0,286	0,247
DM z měření	0,218	0,275	0,201
DM Matlab	0,218	0,275	0,201

Tabulka 11: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	úhel 65	úhel 80	úhel 105
HM z měření	0,273	0,271	0,265
HM Matlab	0,284	0,279	0,267
průměr z měření	0,235	0,260	0,220
průměr Matlab	0,245	0,267	0,225
DM z měření	0,198	0,249	0,175
DM Matlab	0,195	0,255	0,179



Obrázek 44: Průběh teploty v závislosti na čase pro různé úhly opásání

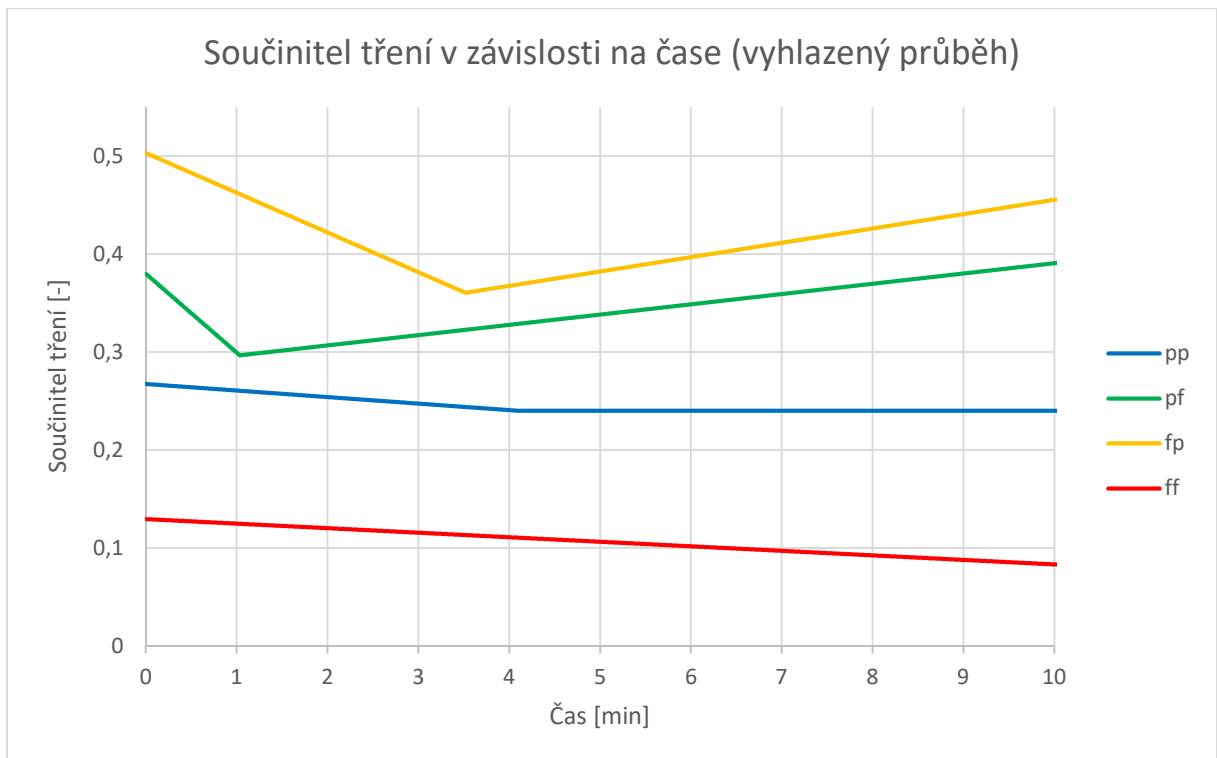
Na obrázku 43 je znázorněn průběh teploty v čase, na ose x je vyneseno čas v minutách a na ose y součinitel tření. Barevné značení je stejné jako u předchozího obrázku. Teplota v čase roste, intervaly spolehlivosti pro jednotlivá měření se nepřekrývají, mezi daty je statisticky významný rozdíl. Nejvyšší teploty byly naměřeny při nastavení nejvyššího úhlu opásání. Zde platí, že s rostoucím úhlem opásání roste teplota.

2.3.6 Orientační tření padákové tkaniny a folie

Padáková tkanina z polyamidu 6.6 byla třena také s folií z polyamidu 6. Folie má tloušťku 0,02 mm a plošnou hmotnost 29,9 g/m². V tomto souboru dat bylo zaznamenáno tření folie o folii, padákové tkaniny o padákovou tkaninu a měření folie a tkaniny o sebe s umístěním padákové tkaniny na pozici stacionárního vzorku i vzorku opásání. Jednotlivá měření jsou značena počátečními písmeny použitých materiálu, přičemž první písmeno značí stacionární vzorek a druhé vzorek opásání. Všechna měření byla provedena při úhlu opásání 80° a rychlosti 6 m/s. Jedná se o orientační měření, neboť z časových důvodů a důvodu nedostatečného množství padákové tkaniny bylo provedeno pouze jedno měření. V tabulce 12 jsou zaznamenány jednotlivé hodnoty pro skutečnou rychlost a napínací sílu.

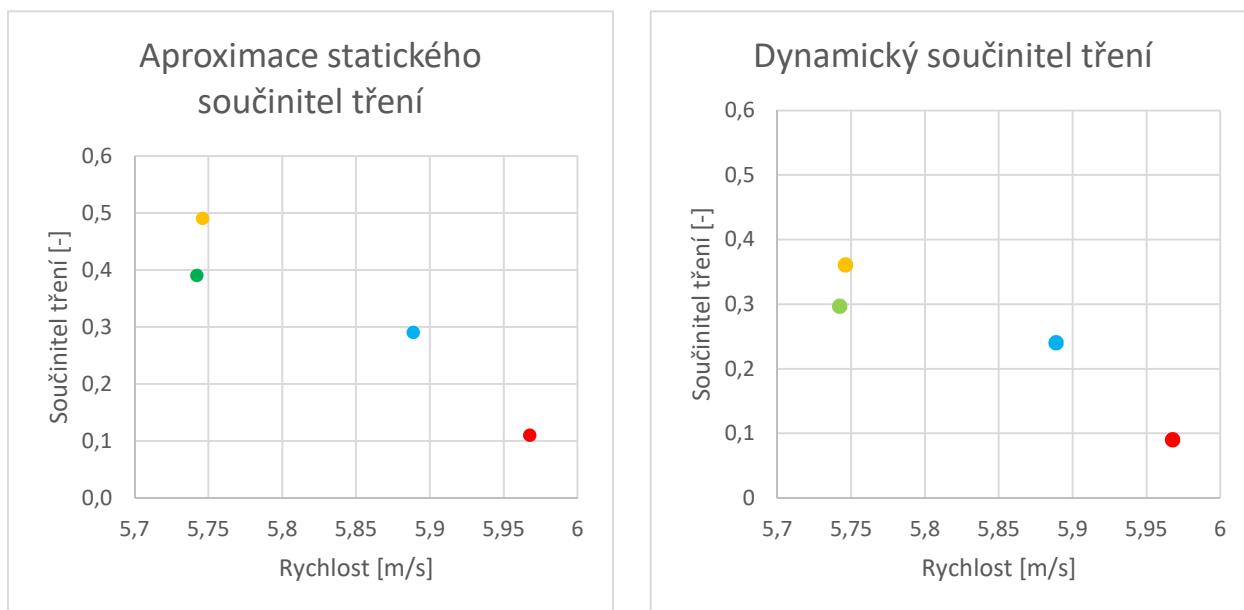
Tabulka 12: Skutečná rychlost a napínací síla pro tření padákové tkaniny a folie

Měření	Třený materiál	Třecí materiál	Skutečná rychlost [m/s]	Napínací síla [N]
pp	padáková tkanina	padáková tkanina	5,889	9,399
pf	padáková tkanina	folie	5,742	9,175
fp	folie	padáková tkanina	5,746	9,707
ff	folie	folie	5,968	9,729



Obrázek 45: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro tření padákové tkaniny a folie

Na obrázku 44 je vyneseno vyhlazený průběh měření součinitele tření. Na ose x je vyneseno čas a na ose y součinitel tření. Modrou barvou je vyneseno měření tření mezi padákovými tkaninami, zelenou měření, při kterém byla použita padáková tkanina jako stacionární vzorek, a žlutou barvou, kdy představovala vzorek opásání, červenou barvou je vyneseno měření, kdy o sebe byly třeny vzorky folie. Nejvyšší hodnoty součinitele tření byly zaznamenány pro tření padákové tkaniny a folie, mírně vyšší hodnoty pro měření, kdy byla padáková tkanina použita jako vzorek opásání. Průběh se liší především v prvním úseku křivky, kdy pro měření vzorku fp hodnota součinitele tření klesá po delší dobu, poté dojde k ustálení a mírnému růstu hodnoty v obou případech. Nejnižší součinitel tření byl zaznamenán pro tření mezi vzorky polyamidové folie.



Obrázek 46: Součinitel tření pro tření padákové tkaniny a folie při statickém a při dynamickém tření

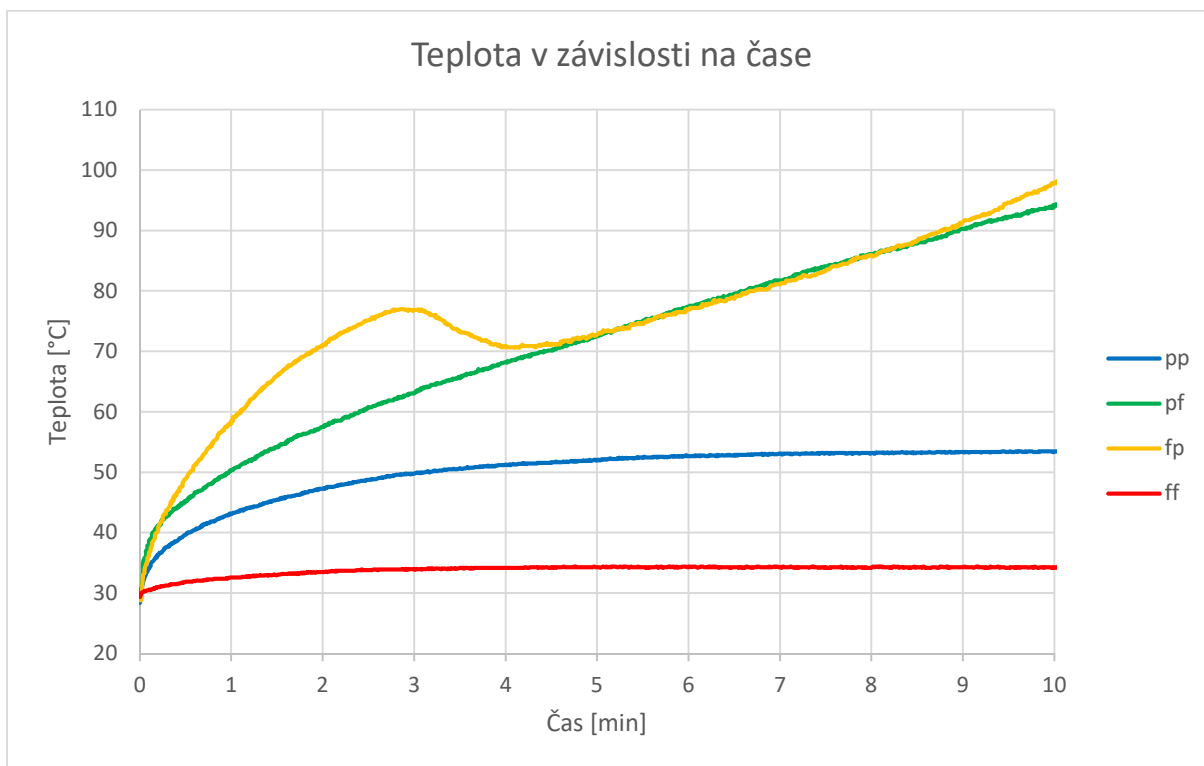
Hodnoty součinitele tření pro oba úseky měření jsou vyneseny na obrázku 45, stejnými barvami jako v předchozím obrázku. Při statickém tření jsou průměrné hodnoty vyšší než při dynamickém. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u vzorku fp a pp, nejnižší u ff. Odhad statického součinitele tření je uveden v tabulce 13 a hodnoty dynamického v tabulce 14, kde jsou zároveň porovnány s hodnotami z programu Matlab.

Tabulka 13: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	pp	pf	fp	ff
průměr z měření	0,290	0,390	0,490	0,110
průměr Matlab	0,267	0,380	0,503	0,130

Tabulka 14: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	pp	pf	fp	ff
průměr z měření	0,240	0,297	0,361	0,090
průměr Matlab	0,240	0,286	0,309	0,090



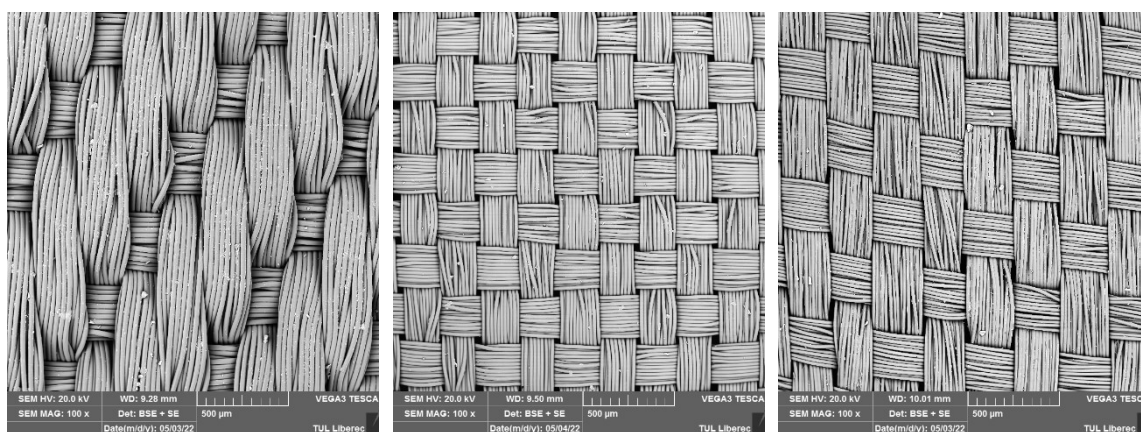
Obrázek 47: Teplota v závislosti na čase pro tření padákové tkaniny a folie

Na obrázku 46 je vynesena průběh teploty v čase, na ose x je vynesena čas v minutách a na ose y součinitel tření. Barevné značení je stejné jako pro průběh součinitele tření. Nejvyšší teploty byly dosaženy při měření tření mezi folií a padákovou tkaninou. U měření fp došlo v počátku k rychlejšímu nárůstu teploty, ale po ustálení je průběh téměř stejný jako pro měření pf, které mělo po celou dobu konstantnější průběh teploty. Nejnižší teplota byla změřena při tření dvou vzorků folie. Stejně pořadí vzorků bylo zaznamenáno i u součinitele tření.

U vzorků došlo také k vizuální změně, kdy u měření pf a fp došlo k přenosu vláken do folie. Na folii tak vzniklo podélné pruhování ve stejné vzdálenosti, jako jsou na tkanině zesílené úseky. Tato změna byla výraznější u měření, kde byla padáková tkanina použita jako vzorek opásání. Pomocí mikroskopu pak bylo možné pozorovat, že se jedná o přenos vláken.

2.3.7 Orientační tření padákové tkaniny a polyamidových tkanin

Experiment byl dále doplněn o orientační měření tření padákové tkaniny s tkaninami z polyamidu 6.6. Po vyřazení vzorků nevhodných pro upnutí do zařízení byly vybrány tři vzorky, které byly číselně označeny. Bylo měřeno tření mezi padákovou a vybranou tkaninou. Měření, kdy byla padáková tkanina použita jako stacionární vzorek, jsou označena písmenem B a měření s padákovou tkaninou na bubnu písmenem A. Všechna měření probíhala při úhlu opásání 80° a rychlosti 6 m/s. Bylo provedeno jedno opakování ze stejného důvodu jako u předchozího souboru měření.



Vzorek 1

Vzorek 2

Vzorek 3

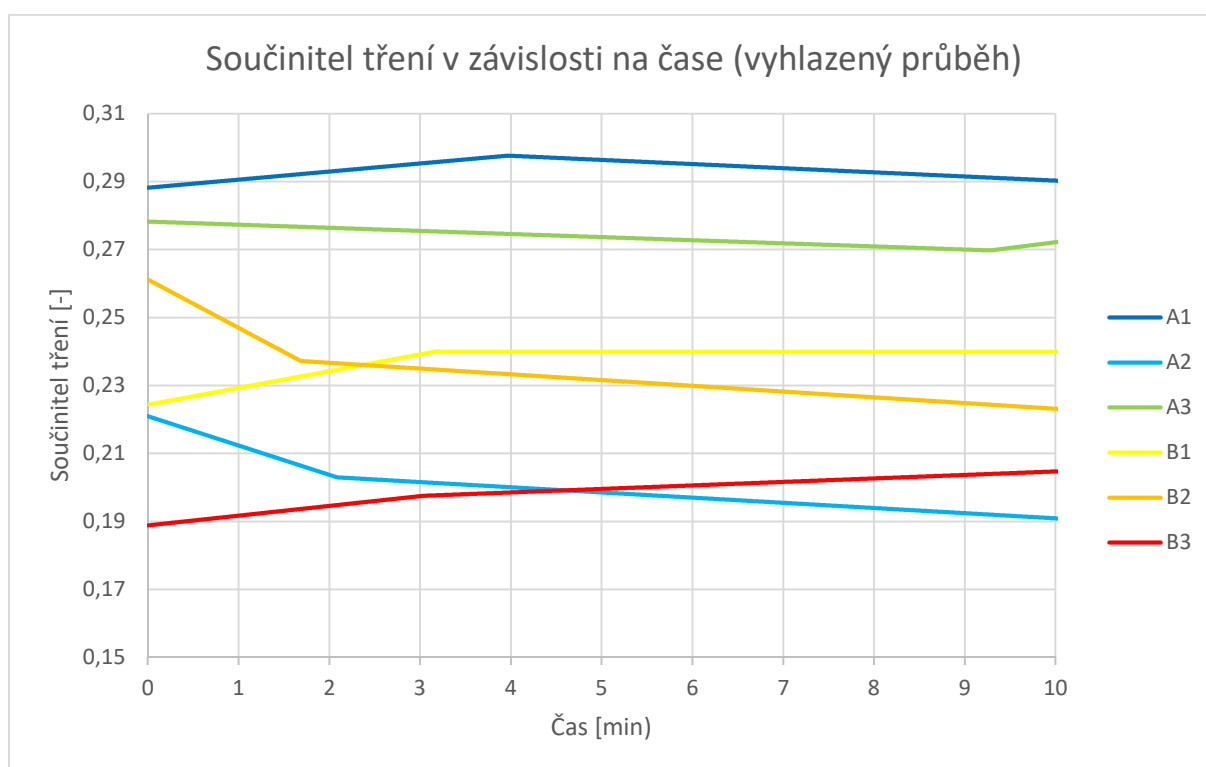
Obrázek 48: Mikroskopické snímky vybraných polyamidových tkanin

Vybrané tkaniny byly utkány v keprové (vzorek 1) a plátňové vazbě, mikroskopické snímky jsou zobrazeny na obrázku 47. U vzorků byla zjištěna tloušťka a plošná hmotnost. První vzorek váží $175,5 \text{ g/m}^2$, druhý $63,4 \text{ g/m}^2$ a třetí $53,4 \text{ g/m}^2$. Tloušťka prvního vzorku je 0,31, druhého 0,11 a pro třetího 0,10 mm.

V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty pro skutečnou rychlost a napínací sílu. V průběhu měření nedošlo k žádnému poškození vzorků, které by způsobilo kolísání napínací síly.

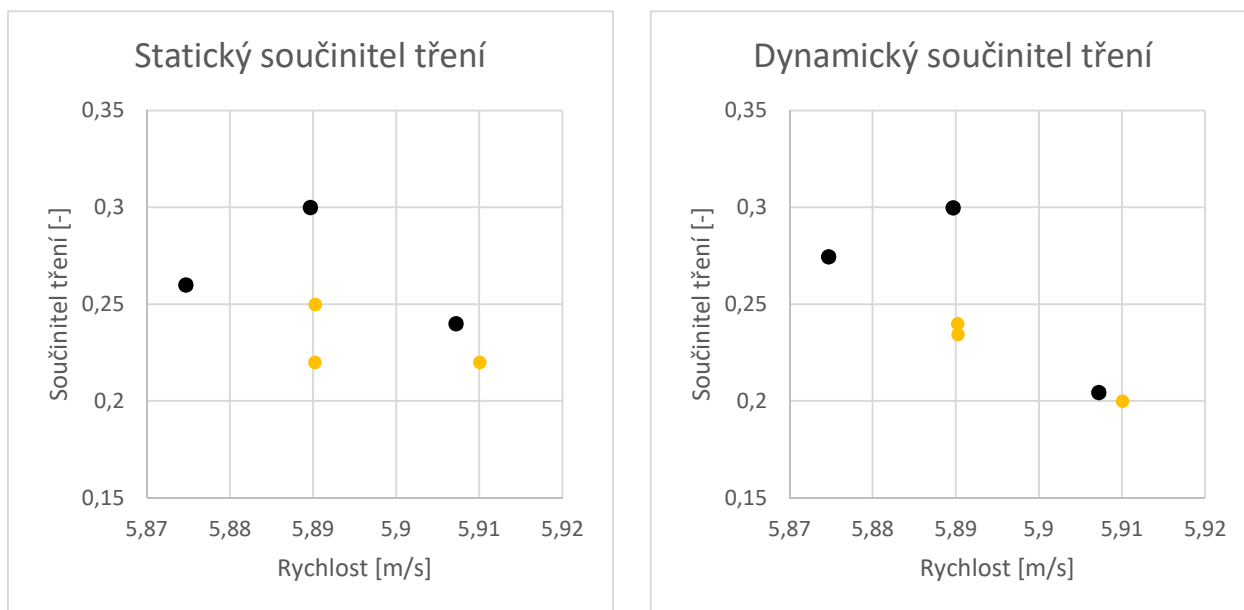
Tabulka 15: Skutečná rychlost a napínací síla pro tření padákové tkaniny a folie

Měření	Třený materiál	Třecí materiál	Skutečná rychlost [m/s]	Napínací síla [N]
A1	vzorek 1	padáková tkanina	5,890	9,977
A2	vzorek 2	padáková tkanina	5,907	9,908
A3	vzorek 3	padáková tkanina	5,875	9,914
B1	padáková tkanina	vzorek 1	5,890	9,533
B2	padáková tkanina	vzorek 2	5,890	9,905
B3	padáková tkanina	vzorek 3	5,910	9,410



Obrázek 49: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro tření padákové a polyamidové tkaniny

Na obrázku 39 je vyneseny vyhlazený průběh součinitele tření. Na ose x je vynesen čas v minutách a na ose y součinitel tření. Měření bylo dále rozděleno na statické a dynamické tření.



Obrázek 50: Součinitel tření pro tření padákové a polyamidové tkaniny

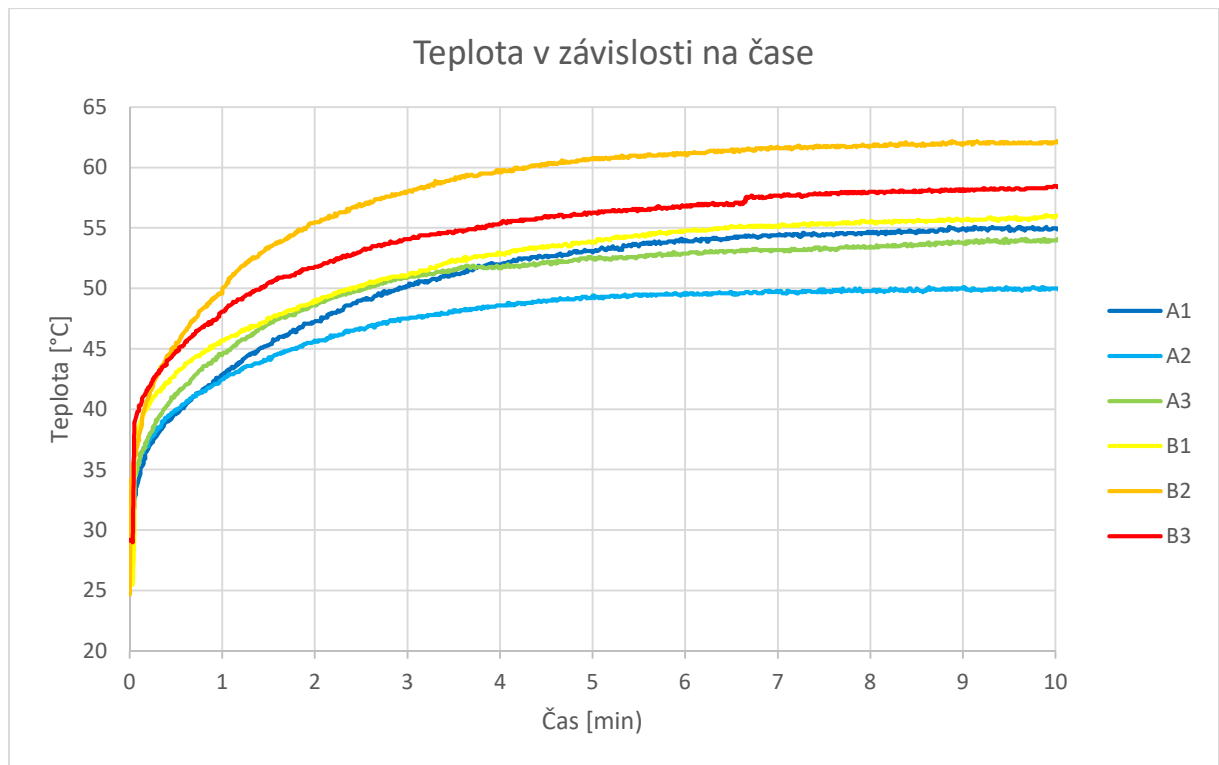
Měření, kdy byla padáková tkanina použita jako stacionární vzorek, jsou vynesena černě, zatímco měření s padákovou tkaninou jako vzorkem opásání jsou vynesena šedě. Rozdíl mezi statickým a dynamickým třením není tak výrazný jako u předchozích souborů měření. Jednotlivé hodnoty v porovnání s hodnotami z programu Matlab jsou uvedeny v tabulce 16 a 17.

Tabulka 16: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
průměr z měření	0,3	0,24	0,26	0,22	0,25	0,22
průměr Matlab	0,288203	0,220965	0,278248	0,224439	0,261231	0,188898

Tabulka 17: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
průměr z měření	0,29985	0,204573	0,274589	0,24	0,23444	0,2
průměr Matlab	0,302493	0,206189	0,23845	0,240035	0,240123	0,194473



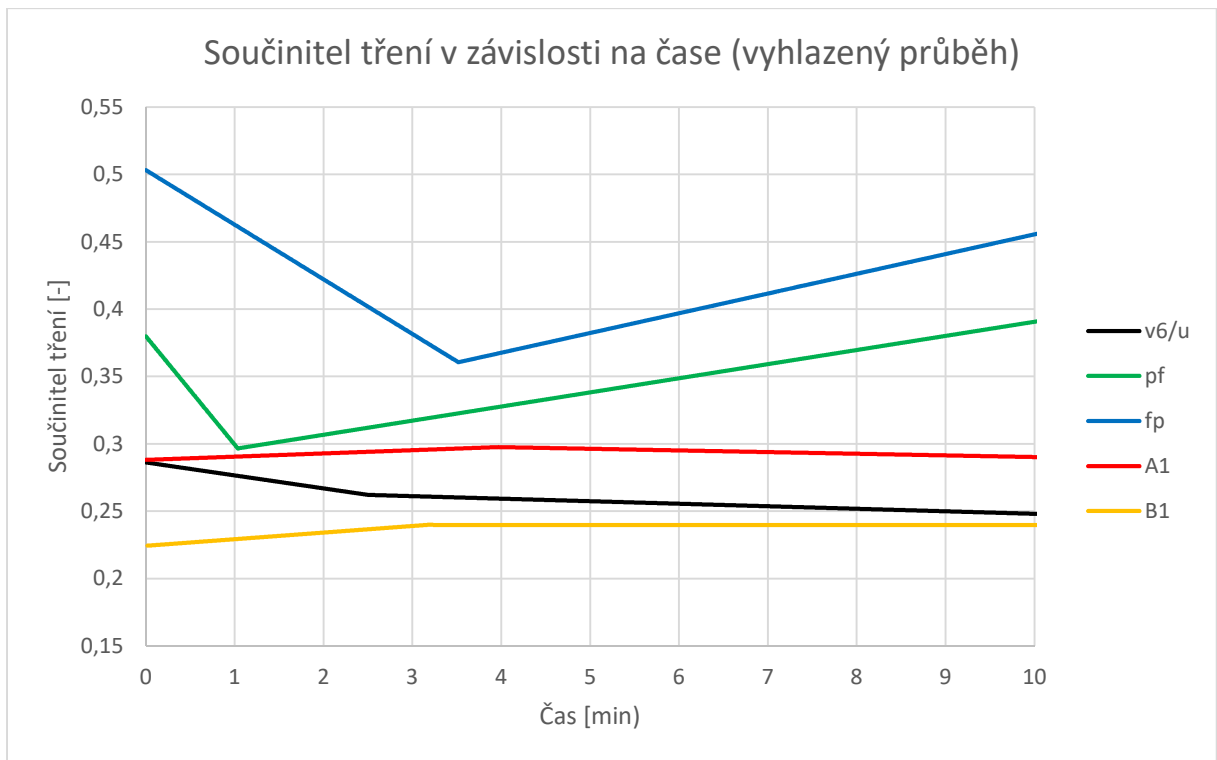
Obrázek 51: Teplota v závislosti na čase pro tření padákové a polyamidové tkaniny

Na obrázku 50 je na ose x vynesena čas a na ose y teplota. Naměřené teploty jednotlivých měření jsou v rozmezí deset stupňů Celsia. Nejvyšší teplota byla zaznamenána při měření B2 a nejnižší při měření A2. U těchto vzorků byla pro tření s padákovou tkaninou použita stejná polyamidová tkanina, v prvním případě byla upnuta na buben, v druhém jako vzorek opásání. U ostatních tkanin bylo dosaženo vyšší teploty u měření ze skupiny A.

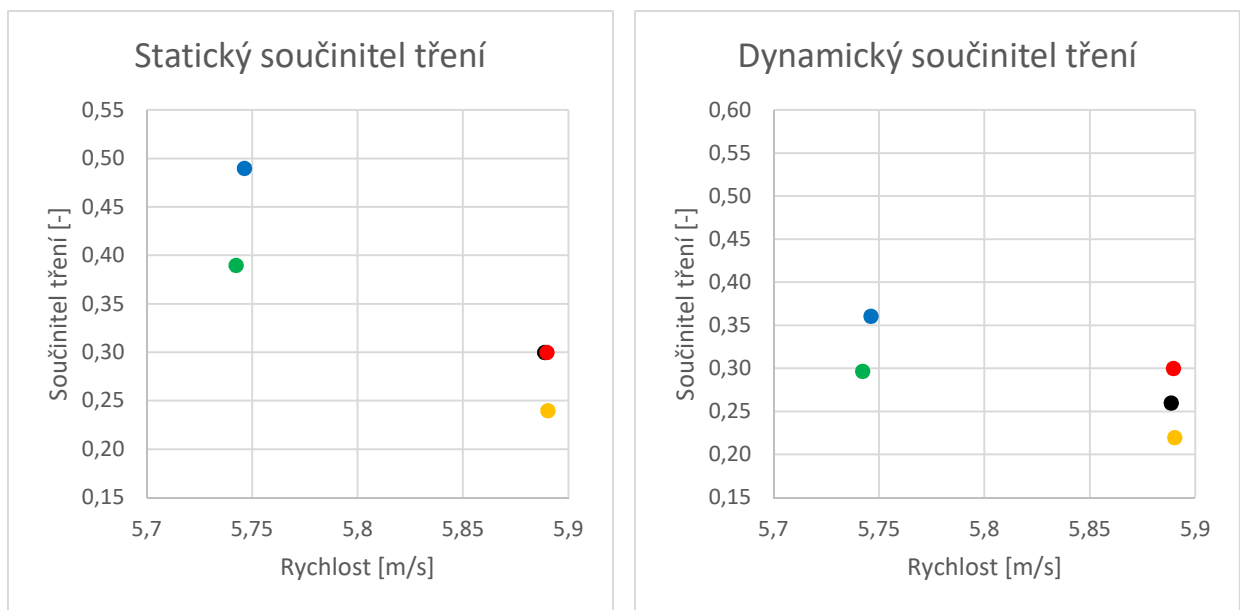
2.3.8 Porovnání měřených materiálů

Jednotlivé výstupní parametry byly porovnány mezi různými materiály. Pro porovnání byla vybrána měření padákové tkaniny, kombinace padákové tkaniny s folií a s polyamidovou tkaninou 1. Měření jsou označena následovně: tření padákové tkaniny orientované po útku černě; tření s folií, kdy je padáková tkanina použita jako stacionární vzorek, zeleně a modře pro vzorek opásání; tření s polyamidovou tkaninou, kdy je padáková tkanina použita jako stacionární vzorek, žlutě a vzorek opásání červeně.

Reálná rychlost a napínací síla nejsou pro tato měření porovnávány, neboť jsou považovány za konstantní nastavené parametry. Průběh součinitele tření je zachycen na obrázku 51 a hodnoty statického a dynamického součinitele tření na obrázku 52.



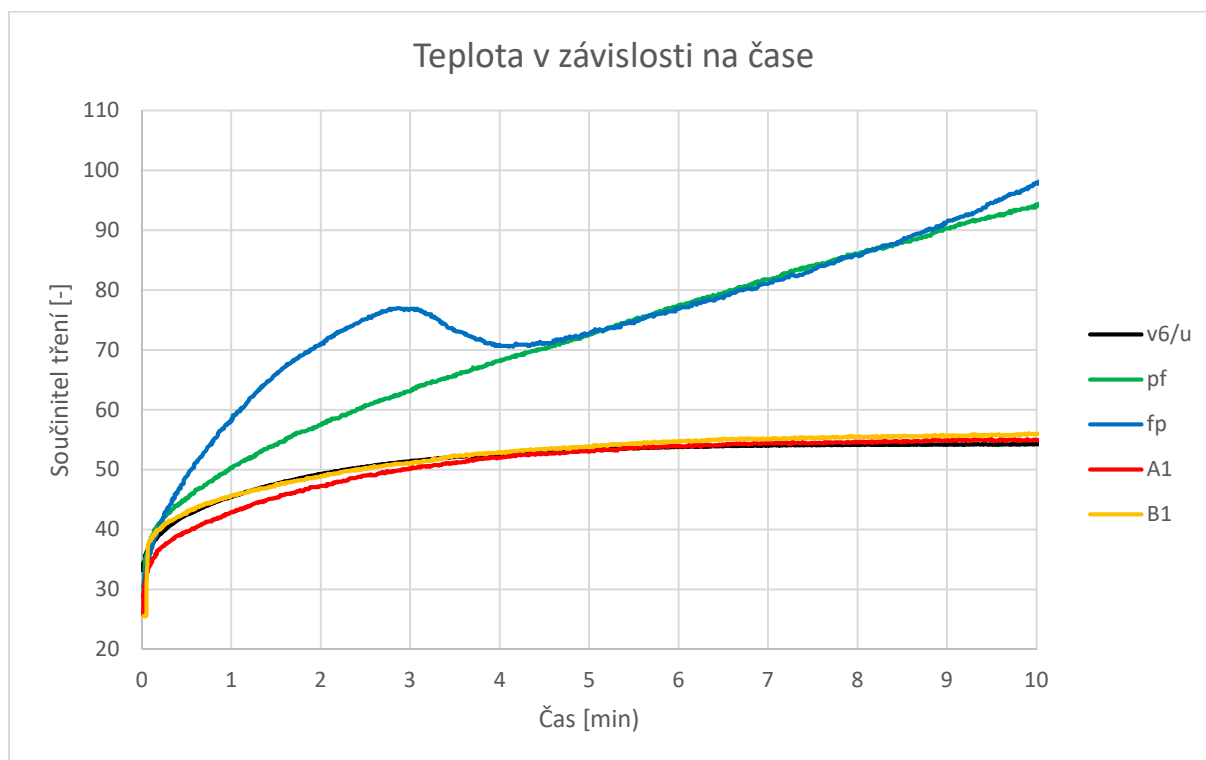
Obrázek 52: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh)



Obrázek 53: Statický a dynamický součinitel tření pro vybrané materiály

Součinitel tření je nejvyšší pro tření mezi padákovou tkaninou a folií, při tření padákové tkaniny na obou pozicích, nebo v kombinaci s polyamidovou tkaninou 1 byly naměřeny podobné hodnoty. Při porovnání statického a dynamického součinitele tření pro jednotlivá

měření bylo zjištěno, že u textilních vzorků nejsou tak výrazné rozdíly jako u měření, kde byla použita folie. Měření s folií mají výrazně vyšší statický koeficient tření, z toho lze vyvodit, že při počátku měření je potřeba překonat větší odpor než při tření dvou textilních vzorků. Z obrázku 46 je však vidět, že při tření folie o folii byl naměřen nejnižší koeficient tření z celého experimentu.



Obrázek 54: Teplota v závislosti na čase

Podobný závěr lze vyvodit i z průběhu teploty (obrázek 53); zatímco tření padákové a polyamidové tkaniny se podobá tření padákové tkaniny s padákovou tkaninou, při tření s folií byly naměřeny vyšší hodnoty. Zatímco při tření textilních vzorků teploty nedosahují ani 60°C, při tření s folií se nejvyšší teploty blíží 100°C. Průběh teplot u vzorku fp (modrá křivka) se chová odlišně než ostatní měření, teplota po třech minutách začne klesat a později znovu dochází k jejímu růstu. Tento jev může být zapříčiněn chybou měření, neboť folie použitá jako stacionární vzorek je průhledná a pyrometr může zaznamenávat teplotu vzorku opásání. Pokles teploty může být způsoben také chováním materiálu při dosažení teploty skleného přechodu.

2.3.9 Měření na nakloněné rovině

Experimentální zařízení je určeno pro měření dynamického tření, v rámci experimentu byl učiněn také odhad statického součinitele tření. Pro ověření tohoto odhadu bylo provedeno měření na nakloněné rovině.

Na elektronické vodováze byl zjištěn úhel naklonění, při kterém se těleso začne smýkat po nakloněné rovině. Úhel nakloněné roviny byl volen manuálně, na obrázku 51 je znázorněna výchozí pozice a naklonění roviny. Na vodováhu i na závaží, které se po ploše vodováhy smýkalo, byl upevněn měřený vzorek. Měření bylo rozděleno na textilní vzorky, kdy bylo provedeno měření tření mezi padákovými tkaninami (orientace po útku), tření mezi padákovou tkaninou na nakloněné rovině a polyamidovými tkaninami na závaží, a na tření padákové tkaniny s folií, kdy bylo provedeno tření mezi stejnými materiály i mezi folií a padákovou tkaninou na obou pozicích.



Obrázek 55: Měření na nakloněné rovině

Z displeje vodováhy byl odečten úhel, při němž dojde k pohybu tělesa. Součinitel tření pro daný úhel byl vypočten dosazením do rovnice (22), která vychází z rovnice (21),

$$M * \sin \alpha = M * \cos \alpha * f \quad (21)$$

$$f = \tan \alpha \quad (22)$$

kde M je hmotnost závaží (pro toto měření 15,85 g), α úhel nakloněné roviny.

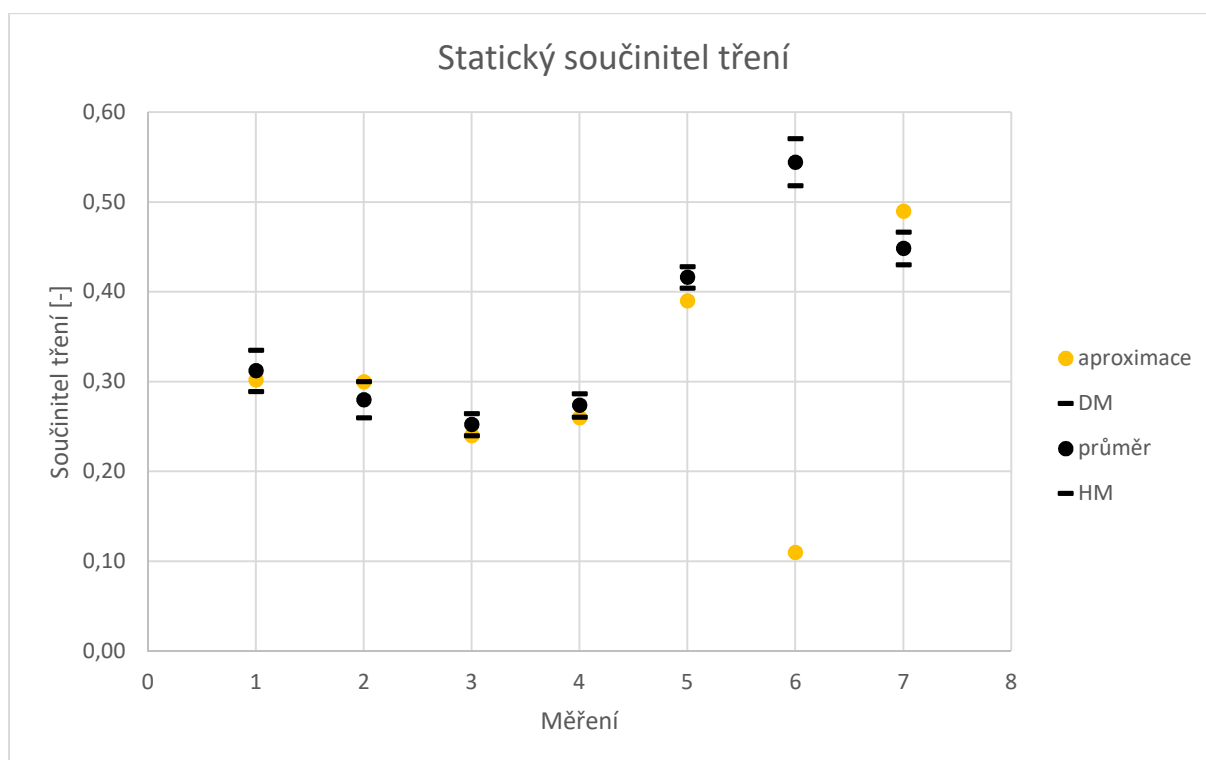
Pro jednotlivé kombinace bylo provedeno 5 opakování (10 pro tření padákové tkaniny o padákovou tkaninu) a vypočten 95% interval spolehlivosti střední hodnoty pro naměřené úhly i výsledný součinitel tření. V tabulce 18 jsou vyneseny hodnoty pro naměřené úhly a v tabulce 19 pro součinitel tření. Součinitel tření byl zároveň porovnán s aproximací z předchozího měření, tyto hodnoty jsou vyneseny také na obrázku 55.

Tabulka 18: Hodnoty úhlu opásání na nakloněné rovině

Měření	Třený materiál	Třecí materiál	DM	průměr	HM
1	padáková tkanina	padáková tkanina	16,127	17,320	18,513
2	padáková tkanina	tkanina 1	14,573	15,640	16,707
3	padáková tkanina	tkanina 2	13,485	14,160	14,835
4	padáková tkanina	tkanina 3	14,610	15,300	15,990
5	padáková tkanina	folie	22,022	22,600	23,178
6	folie	folie	27,401	28,560	29,719
7	folie	padáková tkanina	23,295	24,160	25,025

Tabulka 19: Hodnoty součinitele tření na nakloněné rovině

Měření	DM	průměr	HM	aproximace
1	0,289	0,312	0,335	0,302
2	0,260	0,280	0,300	0,300
3	0,240	0,252	0,265	0,240
4	0,261	0,274	0,287	0,260
5	0,404	0,416	0,428	0,390
6	0,518	0,545	0,571	0,110
7	0,430	0,449	0,467	0,490



Obrázek 56: Statický součinitel tření, porovnání hodnot z nakloněné roviny a odhadované hodnoty

Na ose x jsou vyznačeny jednotlivá měření (třený a třecí materiál je uveden v tabulce 18), na ose y je vynesena součinitel tření. Hodnoty horní a dolní meze jsou vyneseny čarou a průměrné hodnoty jsou vyneseny kruhem. Hodnoty pro aproximaci součinitele tření z měření na experimentálním zařízení jsou vyneseny oranžově.

Z naměřených dat je možné vyzorovat, že pro textilní vzorky leží aproximace součinitele tření z předchozích měření uvnitř 95% IS součinitele tření měřeného na nakloněné rovině. Pro měření tření s folií jsou tyto hodnoty různé. K největšímu rozdílu odhadované a naměřené hodnoty došlo v případě tření mezi folií na obou pozicích; odhadovaná hodnota byla nejnižší ze všech měření, zatímco skutečná hodnota nejvyšší. To by mohlo být vysvětleno charakterem povrchových vlastností materiálu, nebo tzv. stick-slip fenoménem. Pro objasnění tohoto chování by bylo potřeba se více zaměřit na tření folie.

2.4 Návrh metodiky

Na základě zjištění omezujících faktorů experimentálního zařízení a vyhodnocení naměřených dat byla sestavena metodika pro práci s tímto zařízením a pro interpretaci naměřených výsledků. Navrhovaná metodika se skládá z následujících bodů:

1. Nastavení experimentu
2. Volba materiálu
3. Samotné měření
4. Vyhodnocení napínací síly, rychlosti, součinitele tření a teploty
5. Vyhlazení průběhu součinitele tření
6. Aproximace statické a hodnota dynamického součinitele tření z ustáleného úseku měření
7. Záznam hmotnostních a vizuálních změn

V prvním bodě je potřeba stanovit podmínky experimentu. Na naměřená data mají vliv zvolená rychlost (podíl otáček maximálního výkonu zařízení) a úhel opásání. Doba měření závisí na aplikaci výsledků, lze sledovat průběh měření v počátku, v úseku, kdy dochází k výrazným změnám, či při ustálení.

Je potřeba ověřit vhodnost zvoleného materiálu na základě omezujících faktorů zařízení nebo zkušebního měření. Na měření má vliv také orientace vzorku a případné kombinace. Je potřeba stanovit, který materiál bude použit jako stacionární vzorek (třený materiál) a vzorek opásání (třecí materiál).

Parametry jako napínací síla a reálná rychlost jsou považovány za konstantní a jejich hodnota se v průběhu nemění měření, je však potřeba si tuto skutečnost ověřit vnesením průměrné hodnoty z měření a 95% intervalu spolehlivosti pro střední hodnotu.

Kolísání napínací síly může značit poškození vzorku, či nevhodně zvolený materiál (deformace). – vypočíst, kolísá – ale průměrná stejná.

Během měření je zaznamenáván časový průběh součinitele tření a teploty. Součinitel tření v čase klesá, teplota roste. Z opakovaných měření je třeba vypočíst průměrnou hodnotu a meze 95% intervalu spolehlivosti střední hodnoty pro součinitel tření i pro teplotu. Součinitel tření je vyhlazen pomocí lineárně regresního modelu LLF2 (rovnice (18)). Průběh je rozdělen do dvou fází, hodnota úseku první fáze udává aproximaci statického součinitele tření a úsek druhé fáze dynamický součinitel tření. Pro textilní vzorky měřené v rámci této práce lze aproximaci statického součinitele tření považovat za odpovídající skutečné hodnotě. Pro měření jiných textilií či netextilních vzorků je potřeba porovnat odhad s hodnotami naměřenými jiným způsobem, jako je například měření na nakloněné rovině.

Po tření je zjištěna významnost hmotnostního úbytku a vizuální změny způsobené oděrem. Tyto změny mohou být viditelné pouhým okem, důležité je se zaměřit i na změny na mikroskopické úrovni a porovnat mezi sebou snímky vzorků před a po měření.

2.4.1 Optimální nastavení parametrů pro padákovou tkaninu

Během experimentu bylo provedeno nejvíce měření na padákové tkanině a z naměřených dat lze vyvodit optimální nastavení pro tento materiál.

Doporučené rychlosti tření jsou od 6 do 12 m/s. Při nižších rychlostech dochází k zastavení zařízení vlivem přehřátí a při vyšších k výraznějšímu poškození vzorku (to nastalo v několika případech i u rychlosti 12 m/s při tření vzorků orientovaných po osnově). Úhel opásání má vliv na naměřenou teplotu; aby ji bylo možné zaznamenávat, je nutné vést stacionární vzorek vrchem. Při tomto vedení je možné dosáhnout velikosti úhlu od 65 do 105°, při volbě těchto úhlů nebylo zjištěno omezení měření.

Vzorky padákové tkaniny orientované po útku odolávaly lépe poškození. Při měření při vyšších rychlostech docházelo u vzorků orientovaných po osnově k poškození a předčasnému ukončení měření. Při tření padákové tkaniny s jiným materiálem je potřeba znát daná konstrukční omezení pro oba vzorky. Pro padákovou tkaninu byly porovnány hmotnosti vzorků před a po tření, byl u nich zjištěn pouze zanedbatelný váhový úbytek. Díky tomuto zjištění lze tento krok pro daný materiál vyřadit.

Během měření byl sledován průběh součinitele tření, který byl vyhlazen pomocí lineárního regresního modelu. Ten rozděluje průběh do dvou fází. Z úseku první fáze byl zjištěn odhad statického součinitele tření a z druhého hodnota dynamického součinitele tření. Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami vypočtenými z naměřených dat. Aproximace statického součinitele tření byla porovnána s hodnotou zjištěnou na nakloněné rovině. Pro textilní vzorky měřené v rámci diplomové práce nenastal mezi daty statisticky významný rozdíl. Pro určení koeficientu statického i dynamického tření padákové tkaniny lze použít hodnoty vypočtené funkcí. Pro průběh i jednotlivé hodnoty součinitele tření a průběh teploty byl vypočten 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Byly vyhodnoceny statisticky významné rozdíly mezi daty a vliv nastavených parametrů. Pro měření padákové tkaniny byl zkoumán vliv rychlosti tření a úhlu opásání.

Pro tato měření byl zvolen časový úsek 10 minut, pro urychlení měření by bylo možné jej zkrátit. K výrazným změnám dochází přibližně po dobu dvou až tří minut (v závislosti na nastavených parametrech), při zkrácení doby měření na 4 minuty by tak mělo dojít k ustálení všech hodnot. Z tohoto měření by mělo být možné popsat průběh, kdy dochází k poklesu součinitele tření a růstu teploty, ale také určit hodnotu pro statický součinitel tření a dynamický součinitel tření z ustáleného úseku měření.

2.5 Diskuze

Během experimentu bylo zjištěno, že hmotnost pro měřené vzorky může být zanedbána. Hmotnostní úbytky vzorků padákové tkaniny v závislosti na rychlosti byly v řádu tisícín procenta, a to i v případě, kdy došlo k výraznému poškození. Při poškození dochází k pohybu nití, ale ne k jejich vypárání.

Napínací sílu lze považovat za konstantní parametr, který je dán upnutím vzorku do zařízení. Vzorek se upíná ručně, proto může dojít k mírným odchylkám mezi jednotlivými měřeními. Napínací síla je přibližně stejná po celou dobu měření, případné kolísání je způsobeno poškozením vzorku. Pokles napínací síly může značit nevhodně zvolený materiál, při jehož protažení může dojít k zastavení měření.

Rychlost se nastavuje v počátku měření a může být i průběžně změněna. Nastavení probíhá pomocí procentuální škály, na které je volena poměrná hodnota z maximálních možných otáček zařízení (3600 ot. /min). Vztah mezi nastavenou a reálnou hodnotou rychlosti tření nebylo možné blíže ověřit z důvodu nepřesnosti nastavení. Pro další měření by bylo vhodné upravit zadávání rychlosti v programu, tak aby bylo možné zadat opakovaně stejnou hodnotu, a prověřit vliv měřeného materiálu. Je možné, že povrch materiálu má vliv na rychlost.

Byl zaznamenán časový průběh součinitele tření a teploty. Pro oba parametry byl vypočten 95% interval spolehlivosti střední hodnoty a vyneseny horní a dolní mez. Na základě vnesených hodnot mezi daty stanovena statistická významnost rozdílů. Statisticky významné rozdíly nastávaly především u parametru teploty. U padákové tkaniny nastaly statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými intervaly spolehlivosti při ověření vlivu rychlosti i úhlu opásání, vyjma vzorku, u kterého došlo k poškození. Teplota v čase roste.

Součinitel tření v čase klesá. Statisticky významný rozdíl nastal pouze mezi dvěma vzorky padákové tkaniny třenými při různých rychlostech; při měření vlivu úhlu opásání nenastal mezi daty statisticky významný rozdíl. Součinitel tření je vyhlazen lineárně regresním modelem LLF2, který průběh dobře popisuje. Při proložení dat lineární funkcí jsou prvotní naměřené hodnoty odlehlé, jedná se o výrazně vyšší hodnoty než v průběhu měření. Tyto hodnoty jsou vyšší vlivem počátečního odporu materiálů, který je potřeba překonat. Lze je považovat za aproximaci statického součinitele tření, který také může být vyjádřen

hodnotou úseku první fáze funkce. Pro měřené textilní vzorky bylo ověřeno, že mezi hodnotou vypočtenou z programu a měření statického součinitele tření pomocí nakloněné roviny nenastal statisticky významný rozdíl, lze ji tedy uvažovat jako hodnotu statického součinitele tření. Hodnota dynamického tření je dána hodnotou úseku druhé fáze funkce. Tato hodnota byla vybrána na základě porovnání s hodnotou vypočtenou z ustáleného průběhu měření.

Byly sledovány také vizuální změny vzorku po tření, okem viditelné nastaly u padákové tkaniny a folie. Pro vzorky padákové tkaniny před a po tření byly vytvořeny mikroskopické snímky. Při jejich porovnání bylo zjištěno, že vlivem tření dochází k posunu nití a vytažení vazných bodů.

2.5.1 Padáková tkanina

Při měření padákové tkaniny byl v rámci prvního experimentu sledován vliv nastavené rychlosti tření a orientace vzorku, v druhém vliv úhlu opásání.

Reálná rychlost a napínací síla patří mezi parametry ovlivněné nastavením zařízení, rychlost je nastavena na požadovanou hodnotu a napínací síla je dána upnutím vzorku a uvolněním objímky se závažím. U napínací síly může dojít k poklesu hodnoty v průběhu měření vlivem poškození vzorku, jako tomu bylo u měření padákové tkaniny v18/o. Toto měření také muselo být předčasně ukončeno.

Lze sledovat, že součinitel tření klesá při rostoucí rychlosti tření, či při zvyšujícím se úhlu opásání. Vliv rychlosti byl ověřen v prvním souboru měření, kdy byly třeny padákové tkaniny různé orientace při nastavení úhlu opásání 80° a různé rychlosti. Byly zvoleny rychlosti 6, 12 a 18 m/s. Vliv úhlu byl ověřen v druhém souboru měření, kdy byly vzorky orientované po útku třeny při rychlosti 6 m/s při různém úhlu opásání. Úhly opásání byly nastaveny na 65° , 80° a 105° . V obou případech se však nejedná o statisticky významný rozdíl.

Součinitel tření byl rozdělen na statistický a dynamický podle úseku měření. Statický součinitel tření je vyšší než dynamický, to je způsobeno tím, že při statickém tření je potřeba překonat počáteční odpor mezi materiály.

Průběh teploty je také ovlivněn nastaveným úhlem opásání a zvolenou rychlostí. V prvním souboru měření, kdy byly voleny různé rychlosti, byl sledován také vliv orientace vzorku. Bylo zjištěno, že při tření za stejných podmínek dosahují vyšší teploty vzorky třené ve směru osnovy než vzorky třené ve směru útku. V rámci jednotlivých měření nedochází mezi různě orientovanými vzorky ke statisticky významnému rozdílu. Statisticky významný rozdíl teplot však nastává při porovnání jednotlivých rychlostí. Mezi měřeními při 6 a 12 m/s nastává statisticky významný rozdíl. Ten lze pozorovat také při porovnání měření v18/u (rychlost 18 m/s, orientace po útku), interval spolehlivosti pro v18/o (orientace po osnově) je však tak široký, že zasahuje také do nižších rychlostí. Tato variabilita byla způsobena poškozením vzorků v průběhu měření. U poškozených vzorků nedocházelo k takovému nárůstu teploty jako u nepoškozených. K poškození docházelo v různé fázi měření, opakovaně však nebylo možné dosáhnout požadovaného časového úseku 10 minut a tato měření byla předčasně ukončena.

Při měření tření při různých úhlech opásání nastaly statisticky významné rozdíly teplot mezi všemi měřenými úhly. Je tedy jisté, že úhel nastavení má vliv na naměřenou teplotu. Nejnížší teplota byla naměřena při nejnižším úhlu opásání 65° a nejvyšší při úhlu opásání 105°. Při volbě většího úhlu opásání docházelo ke tření ve větší ploše, a proto také rostla teplota.

U padákové tkaniny byly také sledovány vizuální změny způsobené při tření. Ty byly patrnější pro vzorky třené ve směru osnovy, tedy vzorky, u nichž docházelo v průběhu měření k poškození. Po měření při rychlosti 12 m/s byl sledován posun útkových nití ve směru tření, u rychlosti 18 m/s došlo k prodření zesílených úseků osnovní soustavy nití.

2.5.2 Ostatní materiály

Experiment byl doplněn o orientační měření padákové tkaniny s polyamidovou folií a tkaninami. Tato měření probíhala při rychlosti 6 m/s a při úhlu opásání 80°. Byl sledován vliv volby třecího (vzorek opásání) a třeného materiálu (stacionární vzorek).

Při měření folie bylo porovnáno tření folie o folii, padákové tkaniny o padákovou tkaninu a kombinace materiálů, kdy jednou byla padáková tkanina použita jako stacionární vzorek a podruhé jako vzorek opásání. Z naměřených dat bylo zjištěno, že použitý materiál má vliv, neboť tření folie o folii mělo nižší součinitel tření i teplotu než tření padákové tkaniny o padákovou tkaninu. Nejvyšší hodnoty však byly naměřeny pro kombinaci

materiálů. Součinitel tření byl mírně vyšší pro kombinaci s padákovou tkaninou použitou jako vzorek opásání. Stejně tomu bylo i v počátku měření teploty, v průběhu času se však hodnoty pro kombinované měření ustálily a teplota byla téměř stejná.

Byly vypočteny průměrné hodnoty pro aproximaci statického a hodnotu dynamického součinitele tření. Při porovnání hodnot s daty naměřenými na nakloněné rovině bylo zjištěno, že při tření s folií nelze uvažovat aproximaci statického součinitele tření jako skutečnou hodnotu. Největší rozdíl mezi odhadem a naměřenou hodnotou nastal pro měření tření mezi dvěma vzorky folie. Zatímco odhadovaná hodnota pro toto měření byla nejnižší ze všech zvolených materiálů, hodnota vypočtena z úhlu, při kterém dojde ke smýkání tělesa, byla nejvyšší.

Po tření padákové tkaniny a folie nastaly také vizuální změny. Ta byla nejvýraznější po tření, kdy byla folie použita jako stacionární vzorek a padáková tkanina jako vzorek opásání, patrná byla také při opačném umístění vzorků. U těchto měření došlo k přenosu vláken ze zesílených úseků padákové tkaniny do folie.

Tření s polyamidovou tkaninou bylo provedeno pouze v kombinaci s padákovou tkaninou, kdy byly měřeny oba způsoby umístění vzorků. Naměřené hodnoty byly podobné jako pro tření mezi vzorky padákové tkaniny. U měření teploty byly ve všech případech zjištěny vyšší hodnoty u kombinace s padákovou tkaninou na pozici stacionárního vzorku.

Při rozdělení měření na tření textilních vzorků a tření s folií bylo zjištěno, že při tření s folií jsou naměřeny vyšší hodnoty součinitele tření i teploty. Při vynesení vyhlazeného časového průběhu součinitele tření nedochází za bodem zlomu k ustálení na konstantní hodnotě, ale k opětovnému růstu. To je způsobeno charakterem použitého materiálu.

2.5.3 Další využití experimentálního zařízení a navrhované změny

Pro reálné využití naměřených hodnot na padákových tkaninách je nejzajímavější počátek měření, kdy v praxi dochází ke zvýšenému tření vlivem otevření padáku. V této diplomové práci bylo tření sledováno do ustálení (10 minut), neboť cílem bylo poznat experimentální zařízení a padáková tkanina byla pro toto použití vhodná.

Pro všestrannější použití zařízení a možnost upnutí jiných textilních materiálů by bylo potřeba provést konstrukční úpravy, jako je například výměna třecího kotouče za kotouč

se širší drážkou a volba upínacího zařízení, do kterého by bylo možné upnout i tužší materiály. Po těchto úpravách se jeví zajímavé zkoumat vliv tření bezpečnostního pásu a oděvních materiálů. To nebylo za stávajících podmínek možné z důvodu tuhosti a šíře pásu. Mezi další příklady, které je možné na zařízení po úpravě simulovat, patří například stahovací popruhy či popruhy používané na batohy a bezpečnostní sítě umístěné v lyžařských střediscích. Po úpravě kotouče lze zařízení použít ke sledování oděru třených materiálů. Dále by bylo vhodné ověřit vhodnost zařízení pro měření vzniku elektrostatického náboje při tření nebo zvukových efektech, jako je šustění. Změna sledovaných vlastností bude vyžadovat také úpravu, či vytvoření nové metodiky. Stávající metodika je vhodná pro materiály, které dobře odolávají tření při vysokých rychlostech. Při změně rychlostí je třeba brát v úvahu přehřívání zařízení a zkrátit čas měření, či přidat externí chlazení.

Při současné podobě připojeného programu je obtížné zvolit při měření přesnou rychlost tření. Rychlost se nastavuje pomocí procentuální škály (poměrná rychlost z maximálního výkonu) přetažením kurzoru. Tento způsob je zdlouhavý a nepřesný, při porovnávání jednotlivých měření při stejných podmínkách se rychlosti mírně liší z důvodu nastavení. Pro pohodlnější zadávání by škála mohla být nahrazena, nebo doplněna o pole, kam by bylo možno vepsat požadovanou hodnotu, nebo by hodnoty na škále mohly být omezeny na několik možností, například s odstupem 5 %.

3 Závěr

Diplomová práce byla věnována měření na experimentálním zařízení pro měření odolnosti proti tepelnému namáhání a ověření jeho vhodnosti. V teoretické části byly nastíněny základy problematiky tření a zpracován přehled dostupných způsobů měření tření při vysokých rychlostech. Část byla věnována také použitému materiálu.

V experimentální části bylo provedeno několik souborů měření, v nichž byla ve větší části použita padáková tkanina z materiálu PA 6.6. Na padákové tkanině byl ověřen vliv nastavení rychlosti tření, orientace vzorku a zvoleného úhlu opásání. Použité rychlosti byly 6, 12 a 18 m/s a porovnávané úhly 65, 80 a 105°. Tato měření byla doplněna o tření padákové tkaniny s folií PA 6 a vybranými tkaninami PA 6.6.

U naměřených dat byl sledován časový průběh součinitele tření, který byl vyhlazen lineárním regresním modelem, a průběh teploty. Pro tyto hodnoty byla vypočtena průměrná hodnota a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Bylo zjištěno, že statisticky významný rozdíl nastává se změnou nastavení především mezi naměřenými teplotami, zatímco rozdíly součinitele tření nejsou, až na výjimky, statisticky významné. Součinitel tření byl rozdělen na dva úseky, z prvního byla zjištěna aproximace statického součinitele tření a z druhého hodnota dynamického tření při ustáleném měření. Vhodnost použití aproximace statického součinitele tření byla ověřena měřením na nakloněné rovině. Bylo zjištěno, že pro textilní vzorky měřené v experimentální části je možné použít odhadovanou hodnotu statického součinitele tření, zatímco pro měření, při kterých byla třena folie, se tato hodnota liší. U vzorků bylo také sledováno poškození a vliv zvolených materiálů.

Při tření padákové tkaniny s vybranými polyamidovými tkaninami byl součinitel tření i teplota podobná průběhu tření mezi dvěma vzorky padákové tkaniny. Při tření s folií byly tyto hodnoty výrazně vyšší, nejvyšší hodnoty byly dosaženy u součinitele tření pro folii na pozici stacionárního vzorku.

Z měření při různých podmínkách experimentu bylo zjištěno, že na výsledná data má vliv volba materiálu, umístění a orientace vzorku, velikost úhlu opásání a rychlost tření. Na základě experimentu byla navržena metodika pro měření na experimentálním zařízení a interpretaci výsledků. Bylo také sepsáno optimální nastavení pro měření padákové tkaniny. Mimo jiné bylo navrženo další využití zařízení a k tomu potřebné úpravy.

Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA, Miroslav. Měřič součinitele tření u textilních materiálů. Liberec, 2020
- [2] LUDEMA, Kenneth C. a AJAYI, Oyelayo O.. Friction, Wear, Lubrication : a Textbook in Tribology. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, ISBN 9780429444715
- [3] MANG, Theo, BOBZIN, Kristen a BATELS, Thorsten. Industrial tribology : tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication. Weinheim: Wiley-VCH, 2011, ISBN 9783527320578
- [4] TRIBONET. Tribology History [Online]. [cit. 2021-12-17] Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/tribology-history/>
- [5] REICHL, Jaroslav. Síla a Newtonovy zákony. Rozhledy matematicko-fyzikální. stránky 32-45. 2019.
- [6] KŘEMENÁKOVÁ, Dana a kol. Dynamická termomechanická analýza. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2021
- [7] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Encyklopedie fyziky: Síly brzdící pohyb. [Online]. [cit. 2021-10-05] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>.
- [8] ZAHRADNÍKOVÁ, Beáta. Fyzika tření. Brno, 2017. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání. Vedoucí práce: prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [9] SUN, Chong-fang & LIANG, Shu-ting & ZHU, Xiao-jun & LI, Hu & GUO, Jian-min & LI, Gang & SONG, Ya-min & WU, Dong-yue. Experimental Study and Numerical Simulation of Precast Shear Wall with Rabbet-Unbonded Horizontal Connection. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020
- [10] GUPTA, B. S. Friction in Textile Materials. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008, ISBN 9781845694722

- [11] GEENWOOD J.A., WILLIAMS J.B. Contact of Nominally Flat Surfaces. London: Proceedings of the Royal Society of London, 1966
- [12] RABINOWICZ, Ernest & SUH, Nam & CARIGNAN, Forest. A Study of High Speed Friction. Research Report. Cambridge, Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, U.S. Army Research Office, 1978
- [13] KRÍŽ, Antonín. Tribologická analýza Pin-on-Disc. Hradec nad Moravicí: ZČU v Plzni, 2004
- [14] YAN, Wenyi a kolektiv. Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc. 50, místo neznámé : Materials Science, 2002, Sv. Journal of The Mechanics and Physics of Solids
- [15] CROSS, Rod. Increase in friction force with sliding speed. American Journal of Physics, Sv. 73, stránky 812-816. 2005
- [16] SVOBODA, Miroslav. Device for determining the coefficient of dynamic friction of flexible planar and/or linear structures and a method for determining the coefficient of dynamic friction. EP21202368.3 Česká republika. Přihláška k udělení evropského patentu, datum podání: 13. říjen 2021
- [17] PŘÍVRATSKÁ, Kateřina. Hodnocení vybraných vlastností padákových tkanin. Liberec, 2018. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková
- [18] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Liberec, 2015, ISBN 9788088058663
- [19] MAZÁČOVÁ, Veronika. Možnosti aplikace metody DSC. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018
- [20] SHRIVASTAVA, Anshuman. Introduction to Plastics Engineering. Plastics Design Library Norwich: 2018, ISBN 9780323395007
- [21] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, ISBN 8070806176

- [22] RAHEEM, Zainab, PerkinElmer Solutions for Polymer Characterization. 2019
- [23] HOSCH L. William. Major Industrial Polymers - Polyamides. [Online] Encyclopedia Britannica., Poslední změna 6. červenec 2012. [cit. 2022-01-30] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polyamide>
- [24] Crow, Chemical Retrieval on the Web. Polyamides. [Online] [cit. 2022-01-30] Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyamide%20type.html>
- [25] MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2002, ISBN 9788070836446
- [26] GREGERSEN, Erik a HOSCH, L. William. Polyethylene terephthalate. [Online] Encyclopedia Britannica. Poslední změna 20. březen 2020. [cit. 2022-01-30] <https://www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate>
- [27] Crow, Chemical Retrieval on the Web. Polyesters. [Online] [cit. 2022-01-30] Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyester%20type.html>
- [28] UF PRO. Ripstop. [Online] Poslední změna 5. března 2021. [cit. 2022-02-25] Dostupné z: <https://ufpro.com/us/blog/materials-breakdown-ripstop>
- [29] GRMOLEC, Josef. Zušlechťování textilií. [Online] Škola textilu, E-LTex. [cit. 2022-03-10] Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/>
- [30] JEŘÁBKOVÁ, Jitka. Povrchové charakteristiky padákových textilií. Liberec, 2014. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Militký, CSc.
- [31] SVOBODOVÁ, Jana. Vývoj disciplíny přesnost přistání v závislosti. Praha : Univerzita Karlova v Praze, Fakulta tělesné výchovy a sportu, 2011
- [32] Paraškola Impact Praha, AFF - skripta. [Online] [cit. 2021-09-06] Dostupné z: <https://www.paraskolaimpact.cz/site/cz/list/aff-skripta/skripta-aff-1.html>

- [33] VINŠ, Jiří. Analýza účinnosti procesu rychlosti otevření záložního padáku v paraglidingu. Praha : Univerzita Karlova v Praze, Fakulta tělesné výchovy a sportu, 2016
- [34] ŠORF, Oldřich. Padákové záchranné systémy lehkých sportovních letadel. Brno, 2015. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, letecký ústav, 2015, Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Třetina CSc.
- [35] ÇEVIK, Hüseyin, ŞİMŞEK, Kerem Yildirim a YILMAZ, İlker. The evaluating of service quality in recreational sport events: kite festival sample. Pamukkale Journal of Sport Sciences, stránky 73-93, 2017
- [36] BALÓNY KUBÍČEK spol. s r. o., Altitude record. [Online] Poslední změna 25. červenec 1998. [cit. 2021-09-05] Dostupné z:
<https://www.kubicekballoons.eu/life-we-live/news-archive-1998/altitude-record>
- [37] Lake Powell Balloon Regatta, About Hot Air Balloons. [Online] [cit 2021-09-05] Dostupné z: <https://lakepowellballoonregatta.org>
- [38] DUNBAR, Brian. Scientific Balloons. [Online] National Aeronautics and Space Administration, Poslední změna 4. srpna 2017. [cit. 2021-09-05] Dostupné z:
<https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>
- [39] VACHTL, Pavel. Český rozhlas Vědecký balón NASA podnikl rekordní cestu ve stratosféře. [Online], Poslední změna 4. července 2016. [cit. 2021-09_04] Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz/vedecky-balon-nasa-podnikl-rekordni-cestu-ve-stratosfere-6685351>
- [40] SZAFRAN, Krzysztof & KRAMARSKI, Ireneusz. Service Life Extension of Parachutes with Use of Non-Destructive and Partially Destructive Testing Methods of Textile Materials., Fatigue of Aircraft Structures, stránky 113-122. 2020
- [41] ERICKSEN, R.H. & WHINERY, L.D. Storage life of parachutes - long time material degradation. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1995

- [42] KŘEMENÁKOVÁ, Dana, MILITKÝ, Jiří a MISHRA, Rajesh. Fibers for Optical Textiles. Handbook of Fibrous Materials. Weinheim : Viley-VCH Verlag GmbH. 2020, ISBN 9783527342587
- [43] SAHOO, P., DAS S.K. DAVIM J.P Tribology - A Tool for Mechanical and Industrial Engineering. Mechanical and Industrial Engineering. Materials Forming, Machining and Tribology. stránky 1-37 Cham : Springer, 2021, ISBN 9783319969688

Seznam obrázků

Obrázek 1: Znázornění obrazu z hrobky El-Bersheh zachycující muže lijícího mazivo pod sáně, na kterých je tažena socha. [43].....	13
Obrázek 2: Schéma tření [5]	18
Obrázek 3: Schéma smykového tření [9].....	21
Obrázek 4: Krystalické a amorfní části ve vláknech (a: třásnitá micela, b: třásnitá fibrila, c: třásnitá lamela, d: modifikovaná třásnitá fibrila s micelami seřazenými do sloupců) [10].....	23
Obrázek 5: Creepové chování u textilních vláken [10]	24
Obrázek 6: Schéma zařízení Pin on Disc [14]	27
Obrázek 7: Vztah koeficientu tření a rychlosti, na ose x smyková rychlost [stop/s] a na ose y koeficient tření f [12]	28
Obrázek 8: Měření tření při nízkých rychlostech [15].....	29
Obrázek 9: Měření tření při vyšších rychlostech [15]	30
Obrázek 10: Schéma zařízení pro měření odolnosti proti teplenému namáhání [1].....	32
Obrázek 11: Experimentální zařízení, pohled zepředu.....	33
Obrázek 12: Experimentální zařízení, pohled zezadu	34
Obrázek 13: Experimentální zařízení, řídicí jednotka	35
Obrázek 14: Náhled programu Měření tření – termo	36
Obrázek 15: Náhled programu Zobrazení měření tření.....	37
Obrázek 16: Semikrystalický polymer (vyznačení krystalické a amorfní části) [19].....	39
Obrázek 17: Schéma přechodových teplot pro amorfní a semikrystalické polymery [20].....	40
Obrázek 18: Přechodové teploty polyamidu 6 a 6.6 [22]	41
Obrázek 19: Chemické vzorce polyamidu 6 a 6.6 [10]	42
Obrázek 20: Základní plátnová vazba a ripstop [28].....	44
Obrázek 21: Části padáku – typ křídlo [32].....	46
Obrázek 22: Části horkovzdušného balónu [37].....	48
Obrázek 23: Padáková tkanina, ripstop: 18x1 + 2x2, Ú: 18x1 + 2x2.....	51
Obrázek 24: Absorbanční FTIR spektra pro zvolený materiál	52
Obrázek 25: DSC křivka pro zvolený materiál (polyamid 6.6).....	53
Obrázek 26: Porovnání teplot odečtených z ohříváče a čidel.....	57
Obrázek 27: Schéma umístění vzorků pro nastavení úhlu opásání	60

Obrázek 28: Proložení dat v programu Matlab (pro průměrné hodnoty vzorků orientovaných po osnově, rychlost 6 m/s), na ose x je vynesena čas [min] a na ose y součinitel tření $f [-]$	63
Obrázek 29: Proložení dat v programu Excel (pro průměrné hodnoty vzorků orientovaných po osnově, rychlost 6 m/s), na ose x je vynesena čas [min] a na ose y součinitel tření $f [-]$	64
Obrázek 30: Meze napínací síly při různých rychlostech pro padákovou tkaninu.....	66
Obrázek 31: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro padákovou tkaninu	67
Obrázek 32: Časový průběh součinitele tření, rychlost 6 m/s	68
Obrázek 33: Časový průběh součinitele tření, rychlost 12 m/s	68
Obrázek 34: Časový průběh součinitele tření, rychlost 18 m/s	69
Obrázek 35: Statický a dynamický součinitel tření padákové tkaniny.....	70
Obrázek 36: Průběh teploty v závislosti na čase pro padákovou tkaninu.....	72
Obrázek 37: Stacionární vzorky po sundání z přístroje, zleva vzorky střiženy po směru osnovy, zprava po směru útku (rychlost 6, 12 a 18 m/s).....	73
Obrázek 38: Mikroskopický snímek padákové tkaniny před třením.....	74
Obrázek 39: Mikroskopické snímky stacionárních vzorků po tření při rychlosti 12 m/s, vlevo vzorek třený po směru osnovy, vpravo po směru útku	74
Obrázek 40: Mikroskopický snímek vzorku opásání po tření při rychlosti 12 m/s, třený po směru útku.....	75
Obrázek 41: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro různé úhly opásání	77
Obrázek 42: Součinitel tření pro různé úhly opásání při statickém a při dynamickém tření	78
Obrázek 43: Průběh teploty v závislosti na čase pro různé úhly opásání	79
Obrázek 44: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro tření padákové tkaniny a folie	81
Obrázek 45: Součinitel tření pro tření padákové tkaniny a folie při statickém a při dynamickém tření	82
Obrázek 46: Teplota v závislosti na čase pro tření padákové tkaniny a folie.....	83
Obrázek 47: Mikroskopické snímky vybraných polyamidových tkanin.....	84
Obrázek 48: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh) pro tření padákové a polyamidové tkaniny.....	85

Obrázek 49: Součinitel tření pro tření padákové a polyamidové tkaniny.....	86
Obrázek 50: Teplota v závislosti na čase pro tření padákové a polyamidové tkaniny	87
Obrázek 51: Součinitel tření v závislosti na čase (vyhlazený průběh)	88
Obrázek 52: Statický a dynamický součinitel tření pro vybrané materiály.....	88
Obrázek 53: Teplota v závislosti na čase.....	89
Obrázek 54: Měření na nakloněné rovině.....	90
Obrázek 55: Statický součinitel tření, porovnání hodnot z nakloněné roviny a odhadované hodnoty	92

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti polyesterových a polyamidových vláken [25].....	42
Tabulka 2: Parametry padákové tkaniny	51
Tabulka 3: Porovnání teplot odečtených z ohříváče a čidel	57
Tabulka 4: Hmotnostní změna padákové tkaniny po měření	64
Tabulka 5: Skutečná rychlost a napínací síla pro padákovou tkaninu.....	65
Tabulka 6: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab	71
Tabulka 7: Dynamického tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab.....	71
Tabulka 8: Plocha tření při nastavení úhlu opásání 65°, 80° a 105°	76
Tabulka 9: Skutečná rychlost a napínací síla pro různé úhly opásání	76
Tabulka 10: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab	78
Tabulka 11: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab.....	79
Tabulka 12: Skutečná rychlost a napínací síla pro tření padákové tkaniny a folie.....	80
Tabulka 13: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab	82
Tabulka 14: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab.....	82
Tabulka 15: Skutečná rychlost a napínací síla pro tření padákové tkaniny a folie.....	85
Tabulka 16: Statické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab	86
Tabulka 17: Dynamické tření, porovnání hodnot z měření a z programu Matlab.....	86
Tabulka 18: Hodnoty úhlu opásání na nakloněné rovině	91
Tabulka 19: Hodnoty součinitele tření na nakloněné rovině	92