

Aplikace 3D tisku pro tvorbu vodivých drah na textilní materiály

Bakalářská práce

Studijní program:

B3107 Textil

Studijní obor:

Výroba oděvů a management obchodu s oděvy

Autor práce:

Barbora Pokorná

Vedoucí práce:

Ing. Viera Glombíková, Ph.D.

Katedra oděvnictví





Zadání bakalářské práce

Aplikace 3D tisku pro tvorbu vodivých drah na textilní materiály

Jméno a příjmení: **Barbora Pokorná**
Osobní číslo: T16000309
Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Výroba oděvů a management obchodu s oděvy
Zadávací katedra: Katedra oděvnictví
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na téma elektricky vodivých drah a jejich aplikace na textilní substráty.
2. Na základě rešerše definujte vlastnosti vodivých drah v závislosti od aplikované technologie (2D tisk, 3D tisk, atd.) s ohledem na kvalitu tisku (zejména trvanlivost před a po údržbě) a elektrickou vodivost.
3. Navrhněte a realizujte tisk elektricky vodivé dráhy na textilní materiál pomocí 3D tisku.
4. Proveďte ověření trvanlivosti elektrických vlastností aplikovaného tisku během užívání. Vymezte stěžejní faktory, které mohou ovlivňovat elektrické vlastnosti provedeného tisku.
5. Vyhodnoťte experiment a formulujte vyplývající závěry.

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

dle rozsahu dokumentace
cca 40 stran
tištěná
Čeština



Seznam odborné literatury:

- DIAS, T. Electronic textiles: smart fabrics and wearable technology. Woodhead Publishing series in textiles . Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 9780081002018, 2015.
- KORGER, M., BERGSCHNEIDER, J., LUTZ, M., MAHLTIG, B., FINSTERBUSCH, K., RABE, M. Possible Applications of 3D Printing Technology on Textile Substrates, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. vol. 141, no. 012011, 2016.
- SANTGAR, R.H., CHRISTINE, C., NIERSTRASZ, V. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters, Applied Surface Science, vol. 403, pp. 551-563, 2017.
- SPAHIU, T., GRIMMELSMANN, N., EHRMANN, A., EHRMANN. Effect of 3D printing on textile fabric, 1st International Conference Engineering and Entrepreneurship (ICEE), At Tirana /Albania, Volume: 1, 2017.

Vedoucí práce:

Ing. Viera Glombíková, Ph.D.
Katedra oděvnictví

Datum zadání práce:

5. listopadu 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

14. května 2021

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

L.S.

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs
vedoucí katedry

Prohlášení

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

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

29. srpna 2021

Barbora Pokorná

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Vieri Glombíkové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi během vypracování práce věnovala.

Dále jde mé poděkování panu Ing. Michalu Martinkovi za pomoc při elektrických měření, Ing. Marii Koldinské a Ing. Michalu Chotěborovi za odbornou pomoc při realizaci zkoušek tuhosti v ohybu a odolnosti v oděru.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině a přátelům za trpělivost a podporu při mém studiu na TUL.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá tématem aplikace 3D tisku pro tvorbu vodivých drah na textilní materiály. Teoretická část je v prvních kapitolách zaměřená na samostatný 3D tisk, jeho historii, metody a nejvíce používané tiskové materiály pro textil. Dále se stručně popisují vlastnosti vodivých drah podle použité technologie a různé aplikace vodivých drah. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na výzkumy podobné tematiky, které jsou zde stručně popsány.

Praktická část je zaměřená na výběr vhodného textilního materiálu pro tvorbu vodivé drahy vytvořenou 3D tiskem. Byly hledány a analyzovány ty nejlepší vhodné struktury materiálů, jejich kombinace a vodivosti vodivých strun. Vybrané materiály dále podstoupily zkoušky mechanického opotřebení a údržby. Cílem práce bylo zjištění zda se dají vodivé drahy aplikovat pomocí 3D tisku na textil. Dále se zjišťovala trvanlivost a stabilita vodivých drah na textilních materiálech z hlediska elektrického odporu a uchycení na textilu.

Klíčová slova

3D tisk

3D vodivé materiály

Elektricky vodivé drahy

Elektrický odpor

Tuhost v ohybu

Odolnost v oděru

Údržba - praní

Abstract

The bachelor thesis deals with the application of 3D printing for the creation of conductive tracks on textile materials. The theoretical part is in the first chapters focused on independent 3D printing, its history, methods and the most commonly used printing materials for textiles. Further the properties of conductive tracks are briefly described according to the technology used and different applications of conductive tracks. The last chapter of the theoretical part is focused on research on similar topics, which are briefly described here.

The practical part is focused on the selection of a suitable textile material for the creation of a conductive track created by 3D printing. We sought and analyzed the best suitable material structures, their combinations and the conductivity of conductive strings. Selected materials further underwent mechanical wear tests and washing maintenance. The aim of the work was to determine the durability of conductive tracks on textile materials in terms of electrical resistance and attachment to textiles.

Keywords

3D print

3D conductive materials

Electrically conductive track

Electrical resistance

Bending resistance

Abrasion resistance

Maintenance - washing

Obsah

Úvod.....	10
Teoretická část.....	11
1 3D tisk.....	11
1.1 Historie 3D tisku.....	11
1.2 Metody 3D tisku.....	12
1.2.1 SLA.....	12
1.2.2 FDM.....	13
1.2.3 SLS.....	14
1.2.4 DMLS.....	15
1.2.5 DLP.....	15
1.2.6 SDL.....	16
1.2.7 PolyJet.....	17
2 3D tisk na textil.....	18
2.1 Metody pro 3D tisk na textil.....	18
2.2 Materiály pro 3D tisk na textil.....	18
2.2.1 ABS.....	18
2.2.2 PLA.....	19
2.2.3 PETG.....	20
2.2.4 PVA.....	20
2.2.5 TPE/TPU.....	21
3 Inteligentní textilie.....	21
3.1 Vodivé dráhy.....	23
3.1.1 Vlastnosti vodivých drah v závislosti od aplikované technologie.....	23
3.1.1.1 Vodivé šicí nitě – vodivé dráhy šitím a vyšíváním.....	23
3.1.1.2 Sítotisk.....	24
3.1.1.3 Vodivé inkousty.....	25
3.1.1.4 3D tisk.....	25
3.1.2 Příklady aplikace nositelné elektroniky v oděvech.....	27
3.1.2.1 LifeShirt®.....	29
3.1.2.2 Inteligentní návlek na kolena.....	30
3.1.2.3 miCoach™.....	30

4	Průzkum trhu, přehled zdrojů zabývajících se řešenou problematikou.....	32
4.1	Výzkumy ohledně aplikace FDM na textiliích.....	32
4.2	Aplikace vodivého inkoustového tisku na textilie.....	36
4.3	Aplikace vodivého sítotisku na textilie.....	37
	Experimentální část.....	39
5	Charakteristika textilních materiálů a 3D tištěných strun.....	39
5.1	Textilní materiály – podkladové materiály.....	39
5.2	3D vodivé materiály pro tisk.....	41
5.2.1	Ověření elektrických odporů jednotlivých vodivých strun.....	44
6	Tvorba a zhotovení vodivých drah.....	46
6.1	Postup tisku.....	46
7	Testování výkonnosti aplikovaného tisku.....	48
7.1	Měření elektrického odporu před namáháním.....	48
7.1.1	Naměřené hodnoty elektrického odporu a vyhodnocení výsledků.....	49
7.1.1.1	Ověření variability elektrických odporů vodivé ABS struny.....	53
7.2	Zkouška tuhosti v ohybu.....	55
7.2.1	Vyhodnocení měření tuhosti v ohybu.....	57
7.2.1.1	Změna elektrického odporu a následné vyhodnocení.....	61
7.2.2	Proces praní.....	65
7.2.2.1	Změna elektrického odporu po praní a následné vyhodnocení.....	66
7.2.3	Vyhodnocení nově naměřených hodnot tuhosti v ohybu.....	70
7.2.3.1	Změna elektrického odporu a finální vyhodnocení.....	73
7.3	Měření odolnosti v oděru.....	77
7.3.1	Vyhodnocení měření odolnosti v oděru.....	78
7.3.1.1	Změna elektrického odporu po zkoušce odolnosti oděru a následné vyhodnocení.....	80
	Diskuze výsledků.....	83
	Závěr.....	88
	Použitá literatura.....	90
	Seznam obrázků.....	95
	Seznam tabulek.....	98
	Seznam příloh.....	99

Seznam zkratek a symbolů

3D - trojrozměrný

tzv. - takzvaně

atd. - a tak dále

např. - například

tzn. - to znamená

č. - číslo

obr. - obrázek

tab. - tabulka

SLA – Stereoligrafie

SLS – Selective Laser Sintering (Selektivní laserové slinování)

FDM – Fused deposition modeling

DMLS – Direct Metal Laser Sintering (Přímé kovové laserové slinování)

BPM - Ballistic Particle Manufacturing

LOM - Technologie Laminated Object Manufacturing

SGC - Solid Ground Curing

UV záření – ultrafialové záření

CAM (systém) – Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)

DLP – Digital light processing (Digitální zpracování světla)

SDL – Selective Deposition Lamination (Selektivní depoziční laminace)

ABS - akrylonitrilbutadienstyren

PLA – polyaktidová vlákna – kyselina polyaktická

PETG – polyetylén tereftlát-glykol

PVA – polyvinyl alkohol

TPE/TPU – termoplastický elastomer / termoplastický polyuretan

PP - polypropylen

PBT - polybutylentereftalátu

PA – polyamid

% - procento

µm – mikrometr (odvozená jednotka soustavy SI)

nm – nanometr (odvozená jednotka soustavy SI)

° - stupeň

Pa – Pascal (odvozená jednotka soustavy SI pro tlak)

Pa*s - jednotka dynamické viskozity

mPA*s – jednotka dynamické viskozity

°C – stupeň Celsia

mm – milimetr (jednotka délky)

PES – polyester

CO – bavlna

WO – vlna

PMMA – polymethylmethakrylát

® - symbol registrované ochranné známky

PC – počítač

EKG – elektrokardiografie, elektronické vyšetření srdce

RIP – respirační inductivní pletysmografie

cm – centimetr (jednotka délky)

m - metr (jednotka délky)

PA 66 – polyamid 66

DIN - německé normy

ISO (označení organizace) - mezinárodní organizace pro normalizaci

mm/s – milimetr za sekundu (rychlost tisku)

k Ω – kiloohm (jednotka elektrického odporu)

SEM – skenovací elektronová mikroskopie

PET - polyetylentereftalát

PCB - deska plošných spojů, základní součást elektroniky

RFID – vysokofrekvenční identifikace, identifikace pomocí elektromagnetických vln

R – elektrický odpor

Ω – ohm (jednotka elektrického odporu)

I – elektrický proud (jednotka A – ampér)

U – elektrický napětí (jednotka V – volt)

S – obsah průřezu vodiče

l – délka vodiče

ρ - měrný elektrický odpor materiálu

KES FB4 - model pro testování povrchových vlastností textilií, papíru, netkaných textilií a fólií (Kawabata Evaluation System)

g/ m^2 - gram/metr čtvereční

g – gram

MIU – střední hodnoty koeficientu tření

MMD – střední směrodatné odchytky koeficientu tření

SMD – střední odchytky geometrické drsnosti povrchu

ČR – Česká republika

M Ω – megaohm (jednotka elektrického odporu)

M Ω /m – megaohm/metr (měrný odpor na délku 1m)

$k\Omega/m$ – kiloohm/metr (měrný odpor na délku 1m)

g/cm^3 - gram/centimetr krychlový (jednotka plošné hmotnosti)

CNC (obrábění) - Computer Numerical Control (počítačem řízený obráběcí stroj)

STL (formát) – soubor určený pro technologii tisku stereolitografií, používán nejčastěji pro přenos dat do 3D tiskárny

KOD – katedra oděvnictví

TUL – Technická univerzita v Liberci

KES FB2 - přístroj, který se zabývá měřením ohybové tuhosti u plošných textilií jako jsou tkaniny, pleteniny, netkané textilie a příze (Kawabata Evaluation System)

B - ohybová tuhost vztažená na jednotku délky [$g \times cm^2 /cm$] – hodnota ohybové tuhosti

2HB - hystereze ohybového momentu na jednotku délky [$gf \times cm /cm$] – šířka hystereze

μA – mikroampér (jednotka elektrického proudu)

$mV/^\circ C$ – milivolt/stupeň celsia (výstupní napětí odpovídající okolní teplotě na základě teplotního koeficientu)

Úvod

Vodivé drahy vznikají různými způsoby, a to nejčastěji pomocí šití, vyšívání, ale také sítotiskem nebo 3D tiskem. Stále jsou vyvíjeny další nové materiály, technologie a možnosti jejich využití. Tato bakalářská práce se zabývá aplikací 3D tisku pro tvorbu vodivých drah na textilní materiály.

V současné době jsou velmi populární inteligentní textilie nebo rovnou celé oděvy, které mají zabudovanou elektroniku. Tato elektronika nijak člověku nebrání v pohybu. Nejčastěji se s takovými oděvy můžeme setkat v armádě a zdravotnictví, kde se díky těmto zařízením dají pozorovat životní funkce nositele. Také se často objevuje u sportovců, kde se navíc může kontrolovat výkon uživatele.

Bakalářská práce je v teoretické části zaměřena na celkem tři hlavní oblasti. První část se zaměřuje na 3D tisk, její historii, metody a nejčastěji používané materiály pro tento druh tisku na textil. Druhá část se zabývá vodivými drahami a stručně charakterizuje vlastnosti vodivých drah podle použité technologie. A ve třetí části se nachází přehled různých výzkumů týkající se této problematiky.

Praktická část je zaměřena na realizaci tvorby vodivé dráhy pomocí 3D tisku na textilní materiál. Bylo vybráno experimentálně 17 materiálů, z kterých se následně vybraly jen ty s nejlepší přilnavostí a trvanlivostí. Tyto materiály byly následně testovány na tuhost v ohybu, odolnost v oděru a na údržbu – praní. Tyto zkoušky měly za cíl simulovat běžné nošení a praní za normálních podmínek. Ve všech krocích se průběžně měřil elektrický odpor a sledovala se trvanlivost spoje na textilním materiálu.

V závěru bakalářské práce jsou shrnuty výsledky z provedených experimentálních měření. Poslední součástí je popsán návrh, kde by se tento druh tisku pro tvorbu vodivých drah mohl použít v oděvu dle dosažených výsledků.

Teoretická část

1 3D tisk

3D tisk nebo-li aditivní výroba, je proces, při kterém dochází k realizaci digitální předlohy 3D modelu na fyzický model, který vzniká pomocí několika po sobě jdoucích tenkých vrstev daného materiálu za využití 3D tiskárny. [1], [2]

1.1 Historie 3D tisku

Počátky 3D tisku se označovaly pod názvem Rapid Prototyping. Tato technologie se používala hlavně pro výrobu prototypů, příkladem může být výroba dálkových ovladačů pro televizi. Oficiálně se datuje vznik 3D tisku na rok 1984 Charlesem Hullem. V roce 1986 si nechal patentovat stereolitografický přístroj (SLA) a následně také založil společnost 3D Systems. Roku 1992 se firma pustila do výroby prvních 3D tiskáren pro tuto technologii.

Během 80. - 90. let se ještě objevily další technologie a procesy 3D tisku jako například proces selektivního laserového slinování (SLS), technologie Fused Deposition Modeling (FDM), proces přímého kovového laserového slinování (DMLS), dále také Ballistic Particle Manufacturing (BPM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Solid Ground Curing (SGC) a tak dále.

Velmi důležitým rokem pro 3D tisk byl rok 1999, kdy se podařilo vytvořit první 3D-tištěný orgán, který byl implantován do člověka. Jednalo se o tzv. syntetické části močového měchýře, které se následně potáhli lidskými buňkami. Dále se po čase vymyslela miniatura funkční ledviny nebo taky umělá „náhradní noha“ pro lidi, co prošli amputací.

Dalším velkým zlomem byl rok 2005, kdy byl vymyšlen projekt RepRap jako open source doktorem Adrianem Bowyerem. Ten navrhl vytvořit 3D tiskárnu, která dokáže vytisknout co nejvíce vlastních součástí. Jelikož projekt spadá pod licenci open source, tak má velkou výhodu v tom, že ho mohou používat všichni, protože všechny zdrojové kódy jsou veřejné a zdarma. [1], [2], [3]

1.2 Metody 3D tisku

Před začátkem samotného tisku je důležité vytvořit si samotný model určený k tisku. Tento model může být vytvořený pomocí počítačových programů nebo pomocí 3D skenerů. Všechny metody 3D tisku mají stejný princip, a to postupné nanášení vrstev na sebe. Neexistuje žádná stoprocentní vhodná metoda 3D tisku, která by se dala použít pro všechna použití, proto se musí zvažovat jaký materiál se použije, co se bude na dané tiskárně tisknout a co se od ní očekává.

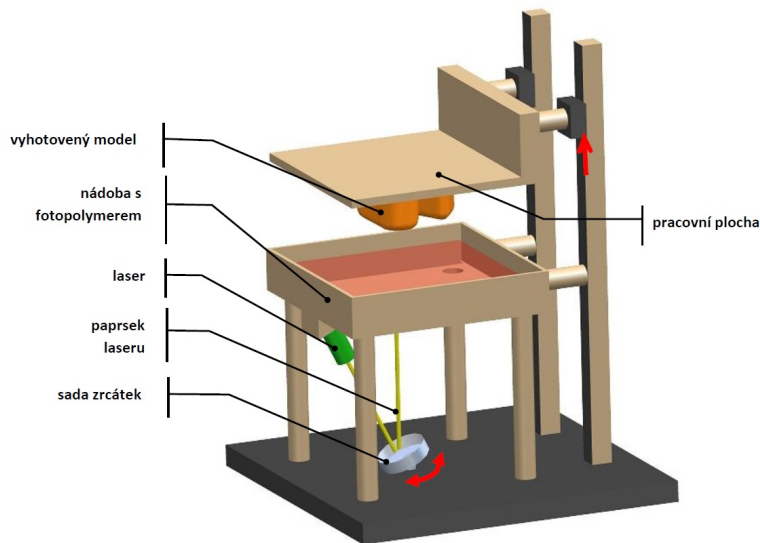
1.2.1 SLA

Technologie SLA (Stereolitografie) je jak jednou z prvních, tak i nejčastěji používaných technologií (*viz obr. 1*), kterou jak již víme, vynalezl Charles Hull.

U SLA technologie jde o tzv. princip vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světla. Za pomoci světla (laserového paprsku – nejčastěji na bázi UV záření) je daný model směřován do nádoby v osách X a Y, a postupně se vykresluje první vrstva modelu, který je vytvrzován působením záření. Následně se pracovní plocha s dokončenou vrstvou platformy posune po ose Z a proběhne vytvrzení fotopolymeru na určitých místech dokud nevznikne daný model. Takto hotový model není ještě vhodný pro okamžité použití, jelikož obsahuje nečistoty nevytvrzené pryskyřice na povrchu, proto je model na dotek lepkavý a je vhodné využít ještě jedno zařízení. Aby se docílilo k odstranění (smytí) pryskyřice, doporučuje se model namáčet v isopropylalkoholu, a také dodatečně model vytrvdit UV světlem. Tento postup je doporučován provádět s vysokou opatrností a pomocí ochranných rukavic. Proto již existuje na tuto práci speciální přístroj, který se o mytí a vytvrzování dokáže postarat sám.

Výhodou této technologie je velká přesnost, hladký a detailní tisk, a že je bez viditelných vrstev materiálu. Nevýhodou je například menší tisková plocha.

Využití SLA technologie je hlavně v medicíně a šperkařství. [1], [4]



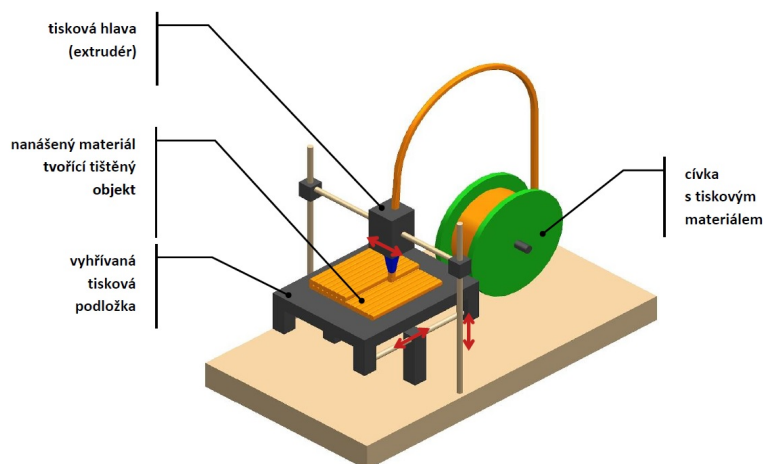
Obrázek 1: Princip SLA technologie [7]

1.2.2 FDM

FDM (Fused deposition modeling) technologie patří mezi nejvíce rozšířené metody 3D tisku (viz obr. 2), kterou vynalezl Scott Crump na konci 80. let.

Stavebním materiálem je nejčastěji roztavený plast a tiskovým materiálem je tisková struna (filament). U této technologie funguje princip protlačování vstupního materiálu ve formě struny skrz trysku nahřátou na teplotu tání použitého materiálu. Trysku lze posouvat jak v horizontálním, tak vertikálním směru pomocí počítače (CAM systému). Roztavený materiál vytéká z trysky, která svým pohybem vykresluje jednotlivé vrstvy. Dále se materiál uchytí na tiskovou podložku nebo předchozí vrstvu a dochází k ochlazení pomocí ventilátoru. Po dokončení vrstvy se tryska posune v ose Z a začne se nová vrstva. FDM metoda využívá nejčastěji materiály jako je ABS plast, polykarbonát, elastomer nebo vosk, který se do zařízení musí vkládat ve speciální kazetě.

Výhodou FDM technologie je její jednoduchost, bezpečnost, cena tiskáren, slušné mechanické vlastnosti a vysoká teplotní odolnost. Nevýhoda spočívá v tom, že tu jsou patrné tiskové vrstvy a obtížnost tisknutí komplikovaných struktur. Využívá se převážně pro kosmonautiku, zdravotnictví, automobilový průmysl, elektroniku a další speciální aplikace [1], [5], [6], [26]



Obrázek 2: Princip FDM technologie [7]

1.2.3 SLS

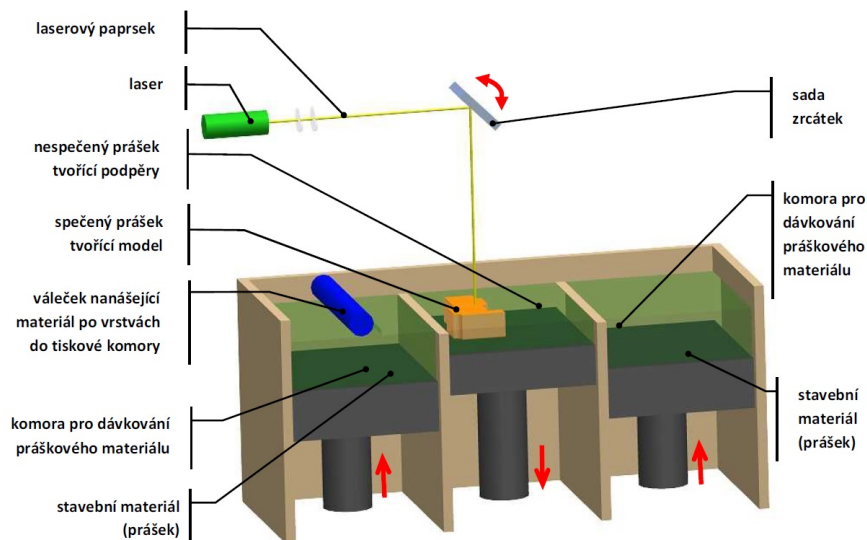
Technologie SLS (Selective Laser Sintering – Selektivní laserové slinování) vznikla na texaské univerzitě v Austinu.

SLS (*viz obr. 3*) během tisku používá vysoce výkonný laser k roztavení či spékání malých jemných částic plastových, keramických nebo skleněných prášků do hmoty, která má požadovaný trojrozměrný tvar. Okolní nespečený prášek se používá jako podpora, díky tomu je možné zhotovit i velké díly. Konec tisku nastává tehdy, kdy je celkově daný model zasypaný v tiskovém materiálu, proto je potřeba vytvořit otvory, které umožňují vysypání netvrzeného materiálu. Ten se dále používá pro další tisk. Používaným materiálem může být termoplast, pryž, kov, keramika a nebo speciální písek.

Výhodou SLS je minimální odpad tiskového materiálu a jde o velmi nevýrazné vrstvení materiálu. Nevýhodou je relativně vysoká cena, proto se tato technologie využívá spíše v průmyslu. Využívá se v oblasti průmyslové výroby a výrobě prototypů k funkčnímu testování, příkladem může být letecký průmysl. [1], [5], [26]

1.2.4 DMLS

Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering - Přímé kovové laserové slinování) je vesměs stejný proces jako SLS, jen se místo jemného prášku používá prášek kovový (viz obr. 3). Nepoužitý prášek zůstává v takovém stavu jaký je a následně ho lze znovu použít pro další tisk. [5]

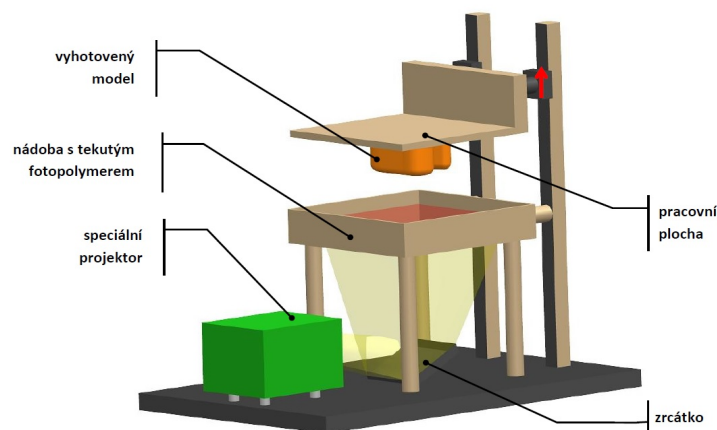


Obrázek 3: Princip SLS a DMLS technologie [7]

1.2.5 DLP

DLP (Digital light processing – Digitální zpracování světla) je proces, který se podobá technologii SLA. Největším rozdílem mezi těmito technologiemi je ten, že u DLP je jiný zdroj světla, převážně se používá oblouková lampa (viz obr. 4). Další rozdíl vzniká v momentě, kdy světlo osvítí celý daný model najednou a není potřeba ho postupně vykreslovat, dochází tak k rychlejšímu procesu samotné výroby.

Využití této technologie je nejen v automobilovém průmyslu, ale začíná se objevovat i v zubních laboratořích, šperkařství, ve výrobních firmách či strojírenství. [2], [4]



Obrázek 4: Princip DLP technologie [7]

1.2.6 SDL

SDL (Selective Deposition Lamination – Selektivní depoziční laminace) technologie vznikl společností Mcor Technologies.

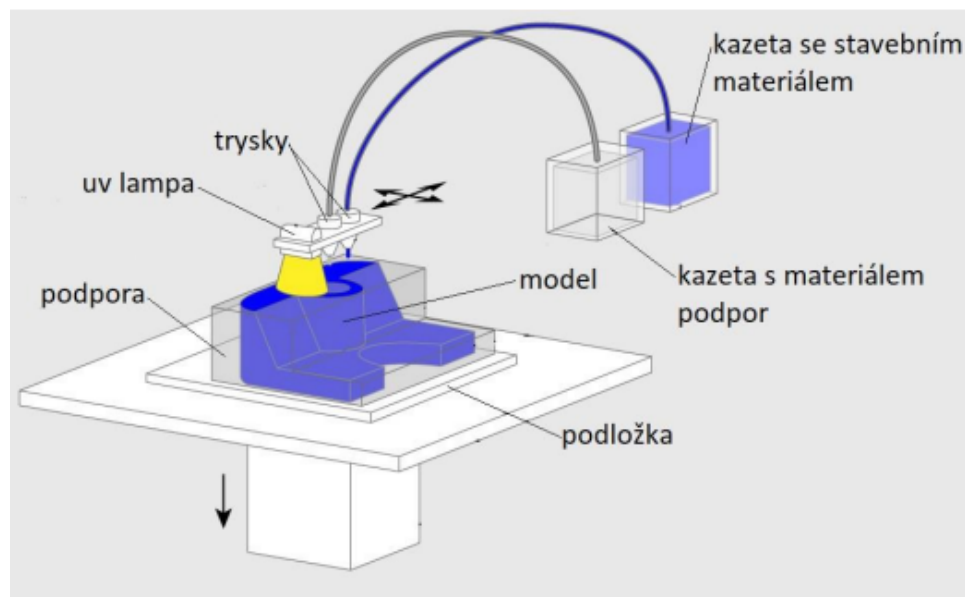
Tato metoda vytváří jednotlivé vrstvy po vrstvách pomocí standardního kopírovacího papíru. Všechny nové vrstvy jsou upevněny k předchozí vrstvě pomocí lepidla. Dále je sestavovací deska posunuta nahoru na topnou desku a je na ní vyvíjen tlak, tento tlak způsobuje spojení mezi dvěma listy papíru. Sestavovací deska se pak vrací k původní výšce, kde se řeže jeden list papíru najednou a sleduje objekt daného předmětu. Po tomto dokončení se uloží nová vrstva lepidla, další papír a opakuje se tento postup dokud není model hotový.

Jednou z hlavních výhod SDL je, že jako jeden z mála procesů dokáže vytvářet barevné 3D tiskové části. Také se jedná o bezpečnou technologii a díky používání standardního papíru je také šetrný k životnímu prostředí. Použití SDL je převážně ve výrobě, kde dochází k rychlejší výrobě modelů, a tak dochází i k vylepšení designu. Další využití může být například v architektuře. [2]

1.2.7 PolyJet

Technologie PolyJet je patentovaná izraelskou firmou Objet (nyní součást společnosti Stratasys). PolyJet je výkonná 3D tisková technologie, která produkuje hladké a přesné díly, prototypy a nástroje. Tato technologie tiskne pomocí trysek tekutý fotopolymer na sestavovací zásobník, který je následně vytvrzován UV světlem (*viz obr. 5*). Vrstvy jsou klasicky vytvářeny jedna po druhé, dokud nevznikne celý 3D model. Vytvořené modely se mohou používat ihned po dokončení procesu. Tisk je možný z různých pevných, pružných a průhledných materiálů ve spoustě barevných odstínech.

Mezi hlavní výhody PolyJet tisku patří zejména způsob tisku, který může kombinovat různé 3D tiskové materiály ve stejném tiskovém modelu. Technologie vytváří přesné modely, jejich velmi tenké vrstvy tisku umožňují vytvářet různé složité tvary, jemné detaily a hladké dokončené povrchy. PolyJet se využívá pro mnoho průmyslových odvětví, ale mezi nejhlavnější patří stomatologický průmysl, také architektura. [19], [20], [26]



Obrázek 5: Princip PolyJet technologie [26]

2 3D tisk na textil

3D tisk na textilie a oděvy je nejnovější úspěšnou metodou, která umožňuje nové designové aplikace. Tato technologie nabízí materiály s vlastnostmi, které se liší od tradičních tkanin. Jde o výrobu ve formě 3D skenování těla a 3D modelování, kdy 3D skenování těla skenuje celé tělo a generuje jeho výsledky a 3D modelování uskutečňuje počítačovou vizualizaci, jak bude výsledný oděv vypadat. [10]

2.1 Metody pro 3D tisk na textil

V poslední době je k dispozici široký výběr 3D tiskáren, které jsou vhodné pro 3D tisk na textil. Mezi nejpoužívanější se však považují metody SLA, SLS, FDM a PolyJet, a to hlavně proto, že povolené vstupní materiály poskytují lepší flexibilitu tištěných vrstev, která souvisí s pohodlnějším nošením daného oděvu. [11]

2.2 Materiály pro 3D tisk na textil

Co se týče materiálu, nejpoužívanější jsou hlavně polymery nebo polymerní kompozity. Díky tomu, že jsou lehčí a pružnější, tak usnadňují lépe se pohybovat. [11]

2.2.1 ABS

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je termoplastický materiál o hustotě 1045 kg/m^3 a jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů. Jde o druh nízkonákladového materiálu, který je vhodný pro tisk trvanlivých produktů používaných v prostředí s vysokou teplotou.

ABS je jeden z materiálů, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Jedná se o tuhý, houževnatý materiál, který je také odolný proti nízkým i vysokým teplotám a chemikáliím jako jsou např. kyseliny, uhlovodíky, oleje, atd. Což jsou velké výhody ABS a taky je málo nasákový a zdravotně nezávadný. Nevýhodou mohou být mírné výpary, a tím způsobený problém s dýcháním, i když většina lidí tyto výpary snáší dobře. Je zapotřebí, aby tiskárna byla v dobrých odvětrávacích prostorech. ABS obsahuje příměs uhlíkových částic, díky nimž se zajišťuje elektrická vodivost.

Materiál lze zpracovávat maximálně do 280°C , smrštění se pak pohybuje kolem 0,3 – 0,7% a teplota měknutí je okolo 100°C . Teplota trysky je nejčastěji kolem 245°C . Tisknutím ABS materiálem je důležitou součástí vyhřívání stůl, u kterého se uvádí teplota v rozmezí $80 - 110^\circ\text{C}$. [12], [13], [28]



Obrázek 6: Tisk ABS. [32]

2.2.2 PLA

PLA (polyaktidová vlákna – kyselina polyaktická) se považuje spolu s ABS mezi nejpoužívanější materiály pro 3D tisk. Tento termoplastický materiál je získáván z obnovitelných zdrojů jako např. z kukuřičného, bramborového škrobu nebo také z cukrové třtiny. Jde tedy o biologicky odbouratelný polymer. PLA obsahuje přibližně 20% uhlíkových částic, díky nimž se zajišťuje elektrická vodivost.

Pokud porovnáme PLA s ABS materiálem, tak PLA je snadněji a rychleji zpracovatelný při stejných výchozích podmínkách, ale výrobky z něj jsou výrazně méně odolné vůči vyšším teplotám, PLA začíná měknout už kolem 60°C. PLA drží dobře i při nízkých teplotách a vytištěným dílům dává dostatečnou pevnost. Vlivem chladnutí materiálu není PLA tolik náchylné k deformacím jako to je u ABS, nevyžaduje tedy použití vyhřívané podložky – jinak se teplota podložky pohybuje kolem 50 - 60°C. Teplota trysky je mezi 190 – 220°C.

Jedná se o tvrdý a poměrně křehký materiál. Z materiálového hlediska jsou výrobky z PLA oproti ABS méně pružné a mají vyšší lesk. Pro účely 3D tisku je dodáván obvykle ve formě drátu o průměru 1,75 až 3 milimetry. [12], [13], [29]



Obrázek 7: Tisk PLA. [32]

2.2.3 PETG

PETG (polyetylén tereftalát-glykol) vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození a dokáže zajistit odolnost proti vodě, a taky hladší povrch potištěného předmětu. Jde o lesklý, tuhý, houževnatý materiál, který je odolný proti nízkým i vysokým teplotám, je minimálně nasákavý a zdravotně nezávadný. Dále je odolný vůči zředěným roztokům různých kyselin, zásad, mýdel i solí. PETG je možné v mnoha případech nahradit materiálem ABS s využitím jeho menšího tepelného smrštění. Nevýhodou PETG je, že může být poškozen či rozpuštěn aromatickými a halogenovými uhlovodíky.

Teplota trysky je nejčastěji kolem 235°C. Důležitá součást pro tisknutí z PETG materiálu je vyhřívaný stůl, teplota kolem 80 - 100°C. [11], [12]



Obrázek 8: Tisk PETG. [32]

2.2.4 PVA

PVA (polyvinyl alkohol) je jako materiál ve vodě rozpustný. Typický PVA materiál je lesklý a křehký, a také jde o netoxický a biologicky odbouratelný materiál.

Používá se pro tisk na dvouhlavých 3D tiskárnách, jedna z hlav vytiskne podpůrné konstrukce z PVA a druhá samotný model z ABS nebo PLA materiálu. Po skončení celého tisku se podpůrné konstrukce rozpustí ve vodě. Pokud chceme urychlit rozpouštění stačí zvýšit teplotu vody. Tato velká citlivost vůči vodě je jedna z největších nevýhod PVA vlákna.

Během tisku je důležité, aby teplota trysky nepřesáhla 225°C, při této teplotě PVA začíná krystalizovat. [11], [12]

2.2.5 TPE/TPU

TPE (termoplastický elastomer)/TPU (termoplastický polyuretan) je kaučukový materiál, který lze zpracovávat pomocí termoplastických technologií, jako je např. injekční vstřikování, dvoukomponentní vstřikování nebo vytlačování. TPE jsou směsi vyrobené z tvrdých termoplastických polymerů, jako jsou PP, PBT nebo PA v kombinaci s měkkým gumovým materiálem a obsahujícím přísady, jako např. olej nebo plnivo. Typický TPE/TPU je měkký a pružný, to je taky hlavní důvod, kdy se ve 3D tisku tento materiál používá. Působením vnějších sil materiál lze výrazně deformovat, a potom dokáže opět zaujmout původní tvar.

Teplota trysky je nejčastěji kolem 240 – 260°C a teplota podložky 40 – 60°C. [12], [14]

3 Inteligentní textilie

Inteligentní textilie nebo-li smart textilie jsou definovány jako textilie, které mohou snímat a reagovat na okolní podmínky nebo podněty z mechanických, tepelných, chemických, elektrických a magnetických zdrojů. [15]

V dnešní době a i pro následující roky budou inteligentní textilie stále více součástí každodenního života. Příkladem je třeba rozsáhlá inovace v oděvních tkaninách, které mohou poskytnout další izolaci v horkých nebo chladných podmínkách. [17] Jako další příklad se můžou uvést různé senzory, které jsou do oděvu integrovány za účelem jako je měření srdeční či dechové frekvence nebo sledování lékařských či sportovních aplikací, tyto senzory reagují na vnější podněty pomocí pohybu. [18]

Inteligentní textilie mohou hrát různou roli, díky změně charakteru, ke které dochází díky vnějším vlivům a tím se aplikace inteligentních textilií rozšiřuje. Textilie se používají např. pro biomedicínské aplikace, pro ochranné oděvy, pro sportovní a volnočasové aktivity, ale také jako módní doplněk. Taky se využití najde pro stavební materiály, geotextilní materiály a technické textilie. [17]

Inteligentní textilie dělíme do tří kategorií, a to na:

- a) **Pasivní inteligentní textilie** – Jedná se o první generaci inteligentních textilií, které mají schopnost poznat jen vnější podmínky prostředí a podněty. Textilie jsou tedy citlivé na vnější podněty a reagují nevratně. Pasivní textilie fungují jako různé typy čidel. Příkladem pasivních textilií jsou textilie, které jsou zabudované do optických vláken – ty přenáší světelný signál.
- b) **Aktivní inteligentní textilie** – Jde o druhou generaci inteligentních textilií, která má ovladače a senzory. Nejenže dokážou poznat změnu vnějších podnětů, ale taky na ně umí reagovat. Aktivní inteligentní textilie mají např. tvarovou paměť, dokáží zadržovat či uvolňovat teplo (termoregulace), mohou v reakci měnit barvu, elektrickou vodivost, atd.
- c) **Velmi inteligentní textilie** – Jsou třetí generací inteligentních textilií, které dokáží poznat změnu vnějších podnětů, dokáží na ně reagovat, ale také se umí přizpůsobit. Tyto inteligentní textilie lze zastoupit čidly, ovladači, různými kontrolními jednotkami, systémy uložení (dat, energie) a přenosu dat. Spadají sem nejčastěji výrobky, které označujeme jako oblékající (wearable) elektronika. [15], [16]

Výhodou těchto textilií je především možnost poskytnutí vysokého komfortu, trvanlivost, snadná údržba, nízká měrná hmotnost spojená s dobrou pevností, tažností, elasticitou, extrémně velký měrný povrch, snadná výroba, ergonomie, testování a cenová dostupnost. [16]

Nositelná textilie, která nejčastěji zahrnuje tyto části:

- **Senzory** – pro zjišťování parametrů těla nebo prostředí
- **Jednotka pro zpracování dat** - pro sběr a zpracování získaných dat
- **Pohon** – dává signály nositeli
- **Komunikační zařízení** – zavádí bezdrátové komunikační spojení s blízkou základovou stanicí
- **Zdroj energie** – umožňuje fungování celého systému
- **Propojení** – spojuje různé komponenty. [18]

3.1 Vodivé dráhy

Elektricky vodivé dráhy v textilním a oděvním průmyslu se stávají velmi populární, a to hlavně díky schopnosti rozvíjet nositelnost bezdrátové elektroniky. Je mnoho způsobů jak takovéto bezdrátové spojení provést. Tzv. elektro-textilie se mohou vytvořit z různých materiálů jako jsou například různá uhlíková vlákna (částičky), kovová vlákna, a také vodivé polymery, které jsou na trhu vyráběny jako vlákna, příze, pasty, atd. Tyto materiály jsou pak aplikovány na textilie klasickými technikami, kam patří tkaní, pletení, vyšívání, šití, potahování, laminování, různé druhy tisku, atd. [21]

3.1.1 Vlastnosti vodivých drah v závislosti od aplikované technologie

3.1.1.1 Vodivé šicí nitě – vodivé dráhy šitím a vyšíváním

Vodivé nitě z nerezové oceli nejsou náchylné k poškození při praní a pocení, což je jedna z hlavních výhod. Nitě se liší svým složením, a to ze 100% nekonečných vodivých ocelových vláken nebo směsí polyesteru a krátkých ocelových vláken. Různé změny poměru obou složek vedou k rozdílům v elektrickém odporu. Vodivost nití je také omezena vodivostí samotných vláken z nerezové oceli. Jejich vodivost je omezena jejich výrobním procesem, zpracováním za studena a jejich průměrem. Vlákna jsou nejčastěji k dispozici v průměrech od 100 μm do 12 μm , a také s menším průměrem jako 2 μm , které se používají pro velmi metalurgické čisté slitiny. Kovové nitě se nejčastěji používají při tkaní, pletení, šití a nebo vyšívání. Ocelová vlákna se vybírají pro jejich pevnost, odolnost proti korozi, biologickou inertnost a snadnou dostupnost v textilní formě při nízkých nákladech. Hlavní nevýhodou ocelových vláken je obtížnost jejich připojení k existujícím elektronickým součástkám.

Pro strojní šití jsou využívány staplové nitě z krátkých ocelových vláken a polyesteru, a také lze použít příze u nekonečných vláknitých nití. [9]

3.1.1.2 Sítotisk

U sítotisku jde o tiskovou techniku, která spočívá v protlačení pasty skrz propustná místa (motiv) obrazové šablony – ta je zafixovaná k sítovině, která je napnutá na pevném rámu. Propustná místa se vytvoří na sítu pomocí fotocitlivé emulze, která pomocí osvětlení vytvrdne a zneprůchodní síto. Ty části, které jsou při osvětlení zakryté, zůstanou průchodné a při tisku se jimi protlačí barva na textil.

Důležitými body pro správný výběr sítoviny je použitý materiál, elasticita, tloušťka vláken, počet vláken na centimetr a velikost ok. Nesmí chybět ani správně volený poměr formátu rámu a obrazce a hodnota napnutí sítoviny.

Další faktor je úhel mezi směrem vláken síta a tištěným motivem. V běžné situaci se síto uchycuje pod úhlem 45° vůči rámu, a to z důvodů jako je deformace rámu způsobená pnutím síta – pokud bude úhel natočení nulový působí síla na strany rámu, které se následně mohou prohýbat, ale při natočení o 45° působí síla převážně na rohy. Další důvod je ten, že při nulovém úhlu stěrka po celou dobu pohybu zatěžuje v podélném směru ta samá vlákna a tím je opotřebovává. Pokud dojde k natočení, tak se zatížení rozloží a prodlouží se tím životnost síta. Mimo klasického úhlu natočení o 45° se také používá úhel $22,5^\circ$.

Dalšími důležitými parametry je přítlak, úhel, rychlost posuvu stěrky a výška odtrhu – vzdálenost síta od substrátu.

Použité tiskové pasty většinou obsahují částice kovů a vhodné pryskyřice v organickém nebo anorganickém rozpouštědle. Nejvíce používané kovy jsou měď, stříbro nebo zlato. Co se týče parametrů je nejdůležitější hlavně viskozita, plošná rezistivita, povrchové pnutí, vysychavost, teplota, doba vytvrzování a velikost částic, které by měly snadno projít sítem. Problém při použití vodivých past nastává při natahování potištěné látky a při jejím praní. Pokud je napínaná potištěná textilie, dochází tak k přerušování vodivé cesty, díky tomu to zjištění by se měly vodivé pasty nanášet spíše na co nejméně elastické textilie. Další zmiňovaný problém nastává při praní, kdy může dojít k postupnému vymývání vodivých past z textilu. [33]

3.1.1.3 Vodivé inkousty

Pro výběr vhodného elektricky vodivého inkoustu je důležité dbát na jeho vlastnosti, díky kterým se rozhoduje o technologii tisku a vhodném podkladovém materiálu. Mezi důležité vlastnosti patří viskozita, povrchové napětí, obsah a velikost kovových částic, rychlost vytvrzení a přilnavost. Tyto vlastnosti ovlivňují charakter inkoustu, kvalitu tisku, ale i jeho budoucí elektrické vlastnosti, které mají dopad na elektrickou vodivost celého výrobku.

Jedna z nejdůležitějších vlastností je velikost částic. Ta určuje jejich pohyb v kapalině. Čím jsou částice menší, tím rychleji se v kapalině pohybují. Jsou-li částice kovu v inkoustu velké, dochází v případě inkoustového tisku k shlukování a následnému ucpávání trysek, které vystřelují inkoust na podkladový materiál. Následkem je přímý vliv na trvanlivost a přilnavost inkoustu. Velikostí částic je také ovlivněná barva a odstín pigmentu inkoustu. Velikost částic se pohybuje v řádech μm a nm .

Neméně důležitou vlastností je dynamická viskozita. Dynamická viskozita je definována jako odpor tekutiny působící proti silám snažícím se vzájemně posunout její nejmenší částice. Jde o základní parametr vodivých inkoustů. Inkousty pro tisk musí mít viskozitu velmi nízkou v řádech $5.0 - 6.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (při pokojové teplotě cca 22°C). Inkousty pro sítotisk mají viskozitu v řádech $30 - 40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Viskozita inkoustu se nesmí měnit a má přímý vliv na tvorbu tisku. Viskozita definuje formu a objem kapky. Příčinou nízké viskozity je tvorba přidržených kapek vhodných pro inkoustový tisk. Příčinou vysoké zase může být ucpávání trysek, a proto se inkousty s vysokou viskozitou používají pro sítotisk. Pro inkoust s vysokou viskozitou se používá také termín pasta.

Dále jsou vytvrzovací podmínky inkoustů závislé zejména na velikosti, tvaru a druhu použitých vodivých částic jako jsou stříbrné vločky, nanočástice stříbra a nanočástice mědi. [34]

3.1.1.4 3D tisk

Kvalita tisku je souhrn dílčích částí, mezi ně patří kvalita tiskového materiálu (kovový prášek, inkoust, tiskové struny, atd.), stroj, model a operátor. Tiskový materiál

má velmi důležitou roli, kvalita materiálu má významný vliv na mechanické vlastnosti vytištěné součásti. Dalším faktorem je samotný stroj, který zpravidla nelze ovlivňovat. Provoz stroje a jeho údržba jednotlivých částí má také významný vliv na výsledek procesu tisku. Co se týká samotného modelu, tak ten ovlivňuje kvalitu součástí především z hlediska drsnosti a rozměrové přesnosti. To znamená, že jde nejen o kvalitu modelu, ale i model z hlediska technologičnosti konstrukce. Jestliže jsou tyto tři vstupy provedeny podle podmínek stanovených výrobcem, pak operátor představuje hlavní faktor ovlivňující výslednou kvalitu tisku. [35]

Výsledek tisku je nejvíce ovlivněn:

Orientace součástí – má významný vliv na výrobní čas, kvalitu povrchu, nutnost použití podpůrných struktur, množství prášku nezbytného pro tisk a smrštění součástí. Musí být provedena především s ohledem na funkci součásti.

Podpůrné struktury – návrhy podpor jsou závislé na funkci a orientaci součásti a na zkušenosti operátora. Struktury jsou vygenerovány softwarem jako podpory, jejichž tvar je takový, že je lze jednoduše odlamovat.

Tloušťka vrstvy – každý tištěný materiál má nastavenou tloušťku vrstvy, která lze zvolit při použití přednastavených parametrů. Proměnlivost tohoto parametru je omezena výrobcem v závislosti na mnoha aspektech, mezi nejdůležitější patří mechanické vlastnosti, které by měly být shodné s vlastnostmi konvenčně vyráběných dílů. Tloušťka vrstvy ovlivňuje výrobní čas, kvalitu povrchu a s tím související schodišťový efekt, smrštění součástí a rozměrovou přesnost.

Parametry tisku – parametry jako takové jsou dány buďto výrobcem nebo vlastní parametry pomocí Parameter Editors. Ovlivňujících parametrů je mnoho, ale obecně platí, že výsledek tisku závisí nejvíce na výkonu laseru, rychlosti skenování, strategii tisku a překrývání sousedních drah laseru. [35]

Zásadní vliv na přilnavost má teplota trysky, rychlost tisku a materiál. Pokud jde o tisk malého a přesného objektu, používá se často pomalejší rychlost a nižší teplota. Pokud tiskneme rychleji, teplota trysky se musí naopak zvýšit. Tyto tvrzení jsou takové, protože čím rychleji tiskneme, tím rychleji musí vlákno tryskou protékat a tím rychleji se musí daný průměr za kratší dobu ohřát na stejnou teplotu, jako to je při tisku

pomalém. Rychlost tisku je ovlivněn samotným průměrem trysky. Pokud máme na tiskárně například trysku průměru 0,25 mm, tak teplota trysky bude rozhodně nižší než u průměru 0,8 mm a to při stejné rychlosti. Na teplotu trysky má vliv i materiál, některé materiály začínají „téct“ při 220°C (ABS) a některé už při 170°C (WoodenPLA). Také dost záleží na tom, jaký je daný průměr plastového prutu. Některé tiskárny používají průměr 2,85 mm, některé již 1,75 mm. Proto se u stejného materiálu s užším průměrem prutu nastavuje nižší teplota trysky. [36] Tímto problémem se zabývá studie, která zjistila, že adhezní síly jsou více závislé na textilním substrátu než na tiskovém materiálu, pro lepší přilnavost se používají více textilní povrchy, které jsou zdrsňené nebo chlupaté jako je použito v tomto výzkumu, a to konkrétně PES (polyester), CO (bavlna) a WO (vlna). Dále se zjistilo, že tisk FDM na bavlněných a polyesterových textiliích může mít za následek skvělé přilnavé vlastnosti, tato přilnavost je rozhodujícím způsobem ovlivňována tvarovými spoji roztaveného polymeru s textilním substrátem. [22]

Jiná studie [38] se zabývá návrhem nového způsobu pro zlepšení přilnavosti 3D tištěného předmětu na textilní tkaninu (bavlněnou textilií) a to tak, že se předtím potáhne polymerní vrstvou. Tento způsob dokazuje, že přilnavost může být zvýšena, aniž by se významně změnila ohybová tuhost a haptické vlastnosti tkaniny. U nepotažených bavlněných textiliích výsledky vedly jak u PLA, tak u ABS k velmi nízkým adhezním silám, což znamená, že oba materiály se již mohly oddělit pouhým ohnutím. Naopak u potažených se prokázalo, že tento postup nejlépe fungoval pro tisk PLA na PMMA nebo PLA povlaky. Pro tisk ABS byly nejlepšími textilními povlaky ABS a PLA. Dále se ukázalo, že morfologie textilie silně ovlivňuje přilnavost – obecně se přilnavost zvyšuje u silnějších tkanin s většími póry uvnitř a mezi přízemi, ve kterých může tiskový polymer vyčnívat, aby se vytvořily spoje blokující tvar. Zjistilo se, že chemické vlastnosti textilních tkanin a tiskových polymerů významně ovlivňují přilnavost mezi oběma materiály.

3.1.2 Příklady aplikace nositelné elektroniky v oděvech

Nositelná elektronika se nejvíce využívá ve zdravotnictví. Výhodou monitorovacích systémů je, že pokud je senzor nošen na lidském těle pomocí oděvu nebo různých příslušenství, tak je možné nepřetržitého monitorování v reálném čase.

Následná analýza fyziologických signálů zachycená senzory se provádí elektronikou mimo oděv, a tak může poskytovat zdravotní údaje dané osobě nebo jiným osobám, např. lékařům. [24]

Monitorovací systémy se nejčastěji skládají ze senzoru pro vstup, elektronického modulu pro zpracování a mobilního zařízení pro výstup.

- a) **Textilní senzory** se vytvářejí začleněním vodivých materiálů do textilních struktur. Nejčastěji se využívá v textilních senzorech stříbro, ale jsou zde i jiné vodivé materiály, jako je zlato, měď a nerezová ocel. Dále jsou vodivé materiály kombinovány s nevodivými složkami, a to s polymery.
- b) **Elektronický modul** řídí signály shromážděné z textilních sensorů a přenáší je na výstupní zařízení například pomocí známé technologie Bluetooth™. Tento modul se skládá ze zesilovače, mikrokontroléru a bezdrátových komunikačních jednotek, které jsou dostatečně zmenšeny, aby se vešly do kompaktního pouzdra. I přesto, že je modul zmenšený, tak stále zůstává vnější součástí skutečných produktů, a to hlavně kvůli chemickým a fyzikálním narušením, jako je vlhkost a mechanické vlastnosti deformace.
- c) **Mobilní zařízení** se používají jako platforma pro výstup vizuální nebo sluchové zpětné vazby. Díky instalaci softwaru do chytrých telefonů nebo tabletů se zdravotnická data získaná pomocí elektronického modulu filtrují a analyzují. [24]

Od původních aplikací ve vesmírných oblecích a vojenských uniformách se dnes nositelné zdravotnické monitorovací systémy rozšiřují na běžné nošené výrobky, jako je sportovní oblečení a spodní prádlo. Tyto nositelné systémy mohou zabránit fyzické náhle srdeční smrti nebo infarktu během fyzických aktivit. U sportovců se můžeme setkat s velkým množstvím takovýchto komerčních produktů. Tady se nejčastěji senzory nosí v oblasti hrudi, paží nebo zápěstí. Tyto produkty mají za cíl sledovat životně důležité signály, ale taky poskytnout analýzu výkonu, kde spadají například spálené kalorie a informace o poloze a čase. [24]

3.1.2.1 LifeShirt®

LifeShirt® jde o jeden z prvních modelů nositelných zdravotních monitorovacích systémů (viz obr. 9), který byl na trh vypuštěn počátkem roku 2000. Tento systém zahrnuje oděv, ruční zařízení a software pro analýzu na PC. Oděv je formou vesty nebo hrudního popruhu, ve kterém jsou uloženy senzory. Signál EKG je zjišťován tradičními EKG elektrodami vloženými skrz štěrbiny na vestě. Respirační (dýchací) data se měří pomocí RIP. Dále je zabudován do středové přední části vesty dvouosý akcelerometr, který má za úkol zaznamenávat polohu a aktivitu uživatele. Tyto senzory jsou zapojeny do ručního zařízení, které zaznamenává, šifruje a nahrává data do databáze Vivologic™ pro analýzu.

Provedly se spousty výzkumů, kde bylo zjištěno, že přesnost přístroje LifeShirt® souhlasí s tradičním laboratorním vybavením. Tento systém byl použit ve výzkumných ústavech, lékařských fakultách a nemocnicích pro klinické nebo výzkumné aplikace, nejvíce se využívá ke sledování různých druhů spánkové apnoe. [24]

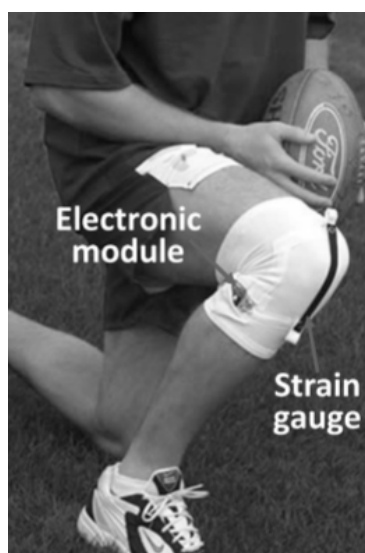


Obrázek 9: LifeShirt® [24]

3.1.2.2 Inteligentní návlek na kolena

Jedná se o zařízení vyvinuté pro prevenci úrazů. Má za cíl poskytnout okamžitou zpětnou vazbu. Elektronický modul byl zmenšen na pár centimetrů tak, aby se jednoduše zaklapnul na stranu pouzdra (*viz obr. 10*). Byla použita technologie Core-Sensing, což je piezorezistivní senzor, který se používá k zjišťování lokálního namáhání textilie. Tenzometr je vytvořený potažením textilie Lycra® tenkou vrstvou polypyrrolu, který je vodivý.

Bylo vypořádováno, že tenzometr pod tlakem je bez mechanického poškození polymerního povlaku, textury a mechanické vlastnosti základní tkaniny. Zjistilo se, že délka tenzometru se zvyšuje o 24% s flexí kolena 25° a 31% s flexí kolena 45°. Tento návlek se nejvíce využívá při sportech jako je basketbal a fotbal, kde dochází k nejčastějším zraněním kolene. Systém je nápomocen jak sportovcům, tak jejich školitelům při prevenci takovýchto zranění. [24]



Obrázek 10: Inteligentní návlek na kolena [24]

3.1.2.3 miCoach™

Existuje podobný systém, který byl vyroben společností Nike +. Jde o školící systém pro běžce, který vznikl společným projektem mezi společnostmi Nike a Apple. Tyto produkty jsou poskytovány ve formě hodinek, které jsou připojeny k mobilním

telefonům pomocí technologie Bluetooth a sledují výkonnost při cvičení – vzdálenost, dobu trvání, spálené kalorie a kroky.

Společnost Adidas vytvořila podobný systém pro sledování těchto funkcí pod názvem miCoach™ (viz obr. 11). Tady se hodinky vyměnily za měkký textilní pásek, který byl vyvinut ve spolupráci s Polar Electro pro aplikace elektrod EKG. Popruh je zapuštěn v oblasti hrudníku do sportovních podprsenek nebo triček, který umožňuje shromažďovat signály v bezprostřední blízkosti srdce. Vnitřní povrch popruhu je vytvořen v žebrovém úpletu ze stříbrné příze a pomocí dvou kovových pojistných tlačítek je k textilnímu popruhu připojen malý senzorový modul. Ten snímá elektrické signály srdce z textilních elektrod a bezdrátově přenáší data EKG do mobilní elektroniky, buď smartphone nebo tablet.

Pomocí běžeckého pásu se prokázala úspěšnost výkonu při odhadování vzdálenosti, rychlosti a počtu kalorií v laboratorním prostředí. Při polním testu se ale prokázala naopak menší přesnost těchto údajů. [24]



Obrázek 11: miCoach™ [24]

4 Průzkum trhu, přehled zdrojů zabývajících se řešenou problematikou

4.1 Výzkumy ohledně aplikace FDM na textiliích

FDM tisk se může používat k vývoji funkčních nebo inteligentních textilií, kde se nanáší polymer na textilní tkaninu. Velkou výhodou má v tom, že umí zpracovávat materiály s vysokou viskozitou a tisknout více vrstev, a tím dosáhne vysoké elektrické vodivosti. [8]

Výzkum R. H. Santgara a spol

Touto technologií se zabývá studie, která řeší vliv parametrů procesu 3D tisku jako je teplota tiskové hlavy, teplota konstrukční platformy a rychlost tisku. Dále se řeší adheze polymerů a nanokompozit na tkanině. Pro tuto studii byla použita 3D tiskárna dvouhlavý WANHAO Duplicator 4/4x, který byl zakoupený od Creative Tools AB. Maximální velikost tisku byla 22,5 cm x 14,5 cm x 15 cm (délka, šířka a výška) s průměrem trysky 0,4 mm. Pro tisk byl zvolen přírodní bílý nylon (Taulman 3D-618 Nylon) s vodivými uhlíkovými nanotrubičkami, který byl tisknut na různé struktury splétané tkaniny z vlákna PLA a polyamidu 66 (PA66). Tato studie byla provedena pro porovnání adheze nylonu na PLA a PA 66, kde se určovali měnící faktory, a to pro teploty tiskové hlavy, teploty konstrukční platformy a rychlost tisku. Samotné testy adheze byly provedeny podle standardní zkušební metody SS-EN ISO 11339: 2010 s použitím tahového testeru Zwick/Z010.

Bylo zjištěno, že adhezní síla a teplota tiskové hlavy má lineárně upadající faktor, což znamená, že existuje významný účinek teploty tiskové hlavy na adhezi. Pokud se teplota tiskové hlavy v nylonu blíží k bodu tání tkaniny PA 66 při 268,6°C, tak dochází k difúzi, a to může způsobit vyšší adhezi.

Dále se zjistilo, že adhezní síly závisí na tloušťce tištěné vrstvy. Přišlo se na to, díky analýze vlivu rychlosti tisku na tloušťku 3D tištěných vrstev. Při větší rychlosti tisku dochází ke snížení tloušťky vrstvy, a také se snižuje přilnavost. [8]

Výzkum T. Spahiua a spol

Cílem tohoto výzkumu bylo prozkoumání vlivu parametrů 3D tisku na adhezní sílu na textilní tkaninu. 3D tiskové parametry byly změněny a adhezní testy byly

provedeny podle DIN 53530 a vyhodnoceny s ohledem na ISO 6133. Výzkum je zaměřen na přilnavost mezi 3D tištěným modelem a textilní tkaninou, dále se zabývá údržbou – praním.

Různé formy 3D tisku na textilie se považují za novou možnost pro inteligentní či funkční textilie. 3D tištěné objekty používané jako tzv. kontakty mezi textilními a menšími elektronickými součástkami prokázaly vhodnost technologie FDM pro elektrické a mechanické spojení výsledných více–materiálových objektů.

Pro tuto práci byla použita technologie FDM, která nejčastěji využívá polymerní vlákna, což znamená, že objekty vytvořené touto technikou jsou často nepružné. Byla použita 3D tiskárna FDM Orcabot XXL od společnosti Prodim. Průměr trysky byl vybrán standardní velikost a to 0,4 mm. Tiskový materiál byl použit PLA, který prokázal nejlepší adhezi k textilním materiálům. V tomto výzkumu byly experimenty vytvářeny na polyesterové tkanině, která měla tloušťku 0,55 mm a plošnou hustotu 114 g / m². Rozměry tištěných obdélníků byly 250 mm x 25 mm a tloušťka 0,4 mm, která byla dosažena tiskem vrstev.

Z výzkumu je patrné, že zvýšení teploty trysky má významný vliv na adhezní sílu. Pokud zvýšíme teploty tisku z hodnot typických pro PLA na vyšší, tak dochází ke zvýšení adhezní síly, což toto zjištění jde vysvětlit sníženou viskozitou PLA při vyšších teplotách, která umožňuje materiálu proniknout hlouběji do tkaniny.

Zjistilo se, že nejsilnější efekt je patrný při změně teploty tiskové podložky. Změna typické teploty 60°C na pokojovou teplotu na jedné straně nebo nejvyšší dosažitelné teploty 100°C na druhé se adhezní síla změní v obou směrech.

Dál se testoval parametr šířky vytlačování. Nejlepší výsledky poskytuje vytlačovací šířka 0,4 mm, která je stejná jako průměr trysky.

Předposlední zkoumání bylo na vliv výšky první vrstvy. Bylo zjištěno, že zvýšení první vrstvy má za následek snížení adhezní síly. Ale pokud se sníží výška první vrstvy z typické hodnoty 0,2 mm na polovinu, tak se adhezní síly nezvyšují, protože vrstva je příliš tenká na to, aby umožňovala proniknutí více polymeru do tkaniny.

Posledním zjištěním byla údržba. Byly provedeny testy praním při 40°C, ale žádné změny adhezních sil nebyly prokázány. Pro prací cyklus byla použita pračka pro domácnost Miele Primavera. [23]

Výzkum Attila Penteka a spol

Tento výzkum sleduje vliv parametrů tisku na elektrickou vodivost a mechanické vlastnosti uhlíkových kompozitů na bázi PLA a ABS při aditivní výrobě protetik horních končetin. Cílem práce bylo charakterizovat dvě vodivé uhlíkové struny na bázi PLA a ABS z hlediska elektrického a mechanického chování a rozšířit pozorování o strukturální analýzu a analýzu přenosu signálu. Měření byla prováděna změnou různých parametrů tisku, včetně rozlišení vrstev, orientace tisku a hustoty výplně.

Zkoumanými vodivými strunami v tomto výzkumu byly ESD-ABS (dále ABS) a ESD-PLA (dále PLA). Struny byly o průměru 1,75 mm, což je ideální pro tiskovou technologii FFF. Vzorky byly vytištěny pomocí trysky o průměru 0,4 mm na stolní 3D tiskárně Craftbot Plus. Vzorky potištěné PLA měly nastavenou teplotu podložky na 210°C a 50°C s rychlostí tisku 60 mm/s. U vzorků potištěných ABS byly parametry 240°C a 100°C s rychlostí tisku u první vrstvy 40 mm/s a následně byla použita rychlost 60 mm/s. Při tisku ve směru Y byl použit podpůrný tisk pro zkoušku pevnosti v tahu.

Zkušební vzorky byly vyrobeny, s ohledem na elektrickou charakterizaci strun, s použitím různých parametrů tisku. První byl vyhodnocen vliv výšky vrstvy na odpor, kde velikost vzorků byla 20 mm x 2 mm x 2 mm a rozlišení tisku bylo nastaveno v rozmezí 100 – 400 μm. Z každého zkušební vzorku se vytvořilo šest kusů s jinou výškou vrstvy a vzorky byly vytvořené také v ose X a Z. Hustota výplně byla všude 100%.

Další byla závislost odporu od hustoty výplně, která byla testována na vzorcích o rozměru 50 mm x 8 mm x 5 mm, výška vrstvy byla opět v rozsahu 100 – 400 μm. Při každém dalším kroku se zvyšovala o 100 μm. Každý vzorek byl zhotovený s hustotu výplně 20%, 50% a 100% a k určení vlivu orientace tisku byly vzorky potištěny také ve směru X a Z.

Měření vodivosti bylo provedeno pomocí dvou konců multimetru. Testy byly prováděny při okolní teplotě 27°C a také v chladicí komoře při 3°C po temperování po dobu 5 hodin. Všechna měření byla takto opakována v časovém rozpětí 30 minut.

V tomto experimentu došli k závěru, že PLA a ABS mají výrazně odlišné elektrické vlastnosti. Výsledky také ukazují, že orientace tisku, hustota výplně a výška vrstvy silně korelují s elektrickým odporem tištěných předmětů. Zjistilo se, že vodivé struny měly výrazně lepší vodivé schopnosti při okolní teplotě 3°C, což odpovídá podobnému elektrickému chování kovu. Vzorky kompozitů na bázi PLA měly vyšší hodnoty elektrického odporu v jakémkoli směru tisku než ABS. Výška vrstvy v orientaci Z neměla významný vliv na měrný odpor, v orientaci X zvýšení výšky vrstvy zvýšilo odpor v PLA kompozitu. U PLA v orientaci X byla naměřená hodnota odporu s výškou vrstvy 100 μ m $10,85 \pm 0,22$ k Ω , zatímco při 400 μ m hodnota byla $25,93 \pm 5,04$ k Ω . U ABS byla naměřena hodnota elektrického odporu 5k při každém rozlišení tisku v orientaci X.

Hustota výplně je jedním z nejdůležitějších parametrů tisku. Zkušební vzorky, které byly vytištěné se 100% hustotou výplně měly nižší hodnoty odporu u všech vzorků. Všechny vzorky vytištěné v orientaci Z měly výrazně vyšší hodnoty odporu, dokonce až 100x vyšší než tomu je v orientaci X. Nejvyššího odporu bylo dosaženo u PLA s výškou vrstvy 200 μ m a 20% hustotou výplně, naměřený odpor vzorku odpovídal $946,66 \pm 184,78$ k Ω . Se stejnými parametry tisku byla hodnota odporu u ABS jen $49,12 \pm 1,86$ k Ω . Při experimentu bylo vyzorováno, že ABS struna měla nižší hodnoty elektrického odporu s porovnáním se vzorky PLA vytvořenými se stejnými parametry tisku. Zvyšováním výšky vrstvy při stejné hustotě výplně se odpor snižoval. Tyto výsledky vedou k závěru, že v případě vodivosti funguje ABS lépe. Znamená to tedy, že tato vodivá struna by měla být použita pro vytvoření prototypů pro elektrické součásti jako jsou dráty nebo senzory.

Druhou částí výzkumu bylo provedení mechanických zkoušek, hlavně statické a dynamické. Jako statické měření bylo provedeno tříbodová ohybová zkouška, zkouška pevnosti v tahu a měření tvrdosti Shore D. Dynamické zkoušky byly prováděny podle normy ISO-179-1 s rozměry vzorku 80 mm x 4 mm x10 mm. U všech zmíněných zkoušek byly vzorky vytištěny ve směru X, Y a Z s výškou vrstvy 100 μ m a 100%

výplní tak, aby bylo možno přesně určit vliv orientace tisku na mechanické vlastnosti. Všechny zkoušky byly opakovány 5krát.

Při porovnání tahových zkoušek bylo zjištěno při orientaci Y nejvyšší výsledky $21,79 \pm 0,79$ MPa pro ABS a $25,87 \pm 0,89$ MPa pro vzorky PLA při orientaci X. Orientace Z měla nejnižší výsledky, kde nebyl naměřen žádný významný rozdíl mezi materiály.

Třibodová ohybová zkouška ukázala ve srovnání velké rozdíly, co se týče orientace tisku. Nejvyšší hodnota byla naměřena pro ABS v orientaci Y, a to $43,3 \pm 2,58$ MPa. Nejnižší hodnota pro PLA v orientaci Z, kde byla naměřena hodnota $7,11 \pm 0,28$ MPa. Přidání uhlíku do PLA mírně snižuje pevnost v ohybu ve srovnání s čistým polymerem PLA a výrazně snižuje hodnoty pevnosti v tahu. Měření Shore D nevykazovala významné rozdíly.

Dále byla ve výzkumu provedena strukturální analýza, pro tento účel byl použit skenovací elektronová mikroskopie (SEM). Zlomené povrchy byly zkoumány z každé orientace tisku a byly také zachyceny snímky ze struny před 3D tiskem. ABS struna měla hustší a homogennější strukturu, kde byly uhlíkové částice hladce rozpuštěny. U PLA struny šlo vyzorovat, že jeho uhlíková „vlákna“ probíhají navzájem paralelně a spadají do menších, tenčích a jemnějších oddílů.

Výsledkem výzkumu bylo zjištění, že parametry tisku měly významný vliv na mechanické a elektrické vlastnosti u obou vodivých strun. Zásadní zjištění bylo, že uhlíková vodivá struna ABS má příznivější chování v případě aditivní výroby elektrických komponentů protetiky horních končetin a lze je také použít jako pohyblivé a rotující součásti. [40]

4.2 Aplikace vodivého inkoustového tisku na textilie

Inkoustový tisk funkčních inkoustů na textil k zabudování pasivních elektronických zařízení a senzorů je novým přístupem v prostoru nositelných elektronických textilií. Dosažitelnost vodivosti inkoustovým tiskem na textil je zpochybňováno porézností a drsností povrchu textilie. Vodivé inkousty často způsobují

ucpání trysek inkoustové tiskárny, což z něj činí méně než ideální způsob použití těchto funkčních materiálů. Velmi náročné je vytvořit přizpůsobivý vodivý povlak a dosáhnout elektricky vodivé perkolace inkoustovým tiskem kovových nanočásticích inkoustů na hrubých a porézních textilních a papírových substrátech.

V této studii je použit nový spolehlivý a přizpůsobivý inkoustový tiskový proces, který je předváděn pro tisk reaktivního stříbrného inkoustu neobsahujícího částice na nepotažené polyesterové textilní pletené, tkané a netkané textilie. Reaktivní chemie stříbrného inkoustu je kompatibilní s PET a bikomponentními PA a PET polymerními vlákny. Reaktivní inkoust bez částic může povlékat textilní vlákna po celém povrchu, aniž by změnila své vlastní vlastnosti textilií. Vodivost tištěných drah na vybraných tkaninách závisí na těsnosti struktur textilie, průměru vláken, pórovitosti a povrchové energie.

Ukázalo se, že u kompatibilních textilií s velikostí vláken menšími než kapička inkoustu má inkoust tendenci zdržovat se ve spojení vláken než se šířit podélně podél délky vlákna.

Bylo zjištěno, že inkoustový tisk reaktivního stříbrného inkoustu na pletených textiliích navíc dosáhl velké vodivosti, trvanlivosti v ohybu a praní, aniž by se nějak změnil komfort a nedotčené mechanické vlastnosti tkaniny.

Cílem těchto zjištění je urychlit design E-textilních výrobků integrací inkoustového tisku jako nízkonákladového, rozšiřitelného a automatizovaného výrobního procesu. [37]

4.3 Aplikace vodivého sítotisku na textilie

Během vývoje inteligentních textilií a nositelných textilních systémů je stále více potřeba elektricky vodivých textilií. Této vodivosti se často docílí zapojením kovových částic, vláken nebo přízí do textilií nebo potažením textilu kovovou vrstvou. Ve výzkumu se však zkoumá jiná metoda, a to metoda sítotisku textilu s vodivým inkoustem. Tento způsob tisku je zajímavou alternativou, jelikož je nenákladný, flexibilní a jde o rychlý způsob získání lehkých vodivých potahovaných textilií, které lze zapojit do inteligentních textilií. Vodivé inkousty se vyskytují v mnoha aplikacích,

včetně elektroniky, počítačů a komunikace, ale i například se najde využití pro desky plošných spojů (PCB), RFID štítky (vysokofrekvenční identifikace) nebo kabelové desky a pro tyto tuhé substráty byl zejména použit sítotisk.

V tomto výzkumu se uplatňuje metoda, ze které získáme omyvatelnou, sítotiskem elektrovodivou textilií a elektrické vlastnosti v této studii byly zjišťovány pomocí měření elektrického odporu v různých stádiích, a to po potisku, oděru a praní. Na textilní substráty byly nanесeny dva elektricky vodivé inkousty na bázi stříbra, konkrétně Electrodag PF 410 a 5025.

Elektrický odpor získaný z obou inkoustů byl vyšší než odpor inkoustů uvedených v datových listech, což bylo způsobeno hlubším průnikem vodivého inkoustu do textilního substrátu. Elektrický odpor ovlivňuje taky viskozita a povrchové napětí, protože vodivý inkoust Electrodag PF 410 má nejnižší povrchové napětí, a tak proniká snadno a hlouběji do textilního substrátu, což vede k vyššímu odporu než u vodivého inkoustu 5025. Hodnoty elektrického odporu před a po praní pro vodivý inkoust Electrodag PF 410 ($0,032 - 0,171 \Omega / sq$) byl vyšší než u vodivého inkoustu 5025 ($0,010 - 0,074 \Omega / sq$). Díky těmto výsledkům se zjistilo, že elektrovodivé textilie získané sítotiskem u obou inkoustů na bázi stříbra jsou omyvatelné.

Dále se zkoumala údržba praním. Textilní substráty nepokryté TPU vrstvou byly vyprány až 20krát, ale elektrické vlastnosti nebyly po vyprání tak dobré. Odkrytá potištěná vrstva měla praskliny a vodivá vrstva během pracích cyklů vypadla, což znamená ztrátu vodivosti. Díky těmto výsledkům byla vodivá vrstva pokryta vrstvou TPU, a tak byla vodivost udržována po 20 pracích cyklů. [25]

Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na realizaci vodivých drah pomocí 3D tisku. Cílem práce bylo zjistit zda se 3D vodivý tisk dá aplikovat na textilní materiály a jestli aplikovaný tisk bude dosahovat dostatečné elektrické vodivosti pro implementaci součástek do nositelné elektroniky. Dalším cílem bylo najít ideální textilní materiály s takovou strukturou, aby měly dostatečnou trvanlivost a životnost. Experimentální část byla rozdělena do těchto částí:

1. Výběr textilních materiálů, byl navrhnout typ (geometrie) vodivé dráhy s optimalizovanými parametry (tloušťka, délka a šířka drahy) a byly vybrány vodivé struny pro 3D tisk.
2. Testování vlastností trvanlivosti a životnosti vodivého spoje. Probíhalo měření elektrických odporů před a po aplikaci mechanických zkoušek a po údržbě, které by mohly ovlivnit tyto vlastnosti.

5 Charakteristika textilních materiálů a 3D tištěných strun

5.1 Textilní materiály – podkladové materiály

Pro experimentální část byly použity textilní materiály, které byly zvoleny experimentálně – tzv. zkouškou přilnavosti. Na začátku experimentu bylo potřeba vybrat vhodné materiály. Vycházelo se z rešeršní části, kde se ve výzkumech přišlo na to, že vodivé struny drží lépe na materiálech s chlupatější, drsnější a hrubší strukturou, a také na membránových materiálech. Díky subjektivní zkoušce přilnavosti se zjistilo, že struna na membránových materiálech nedrží. Bylo to pravděpodobně z toho důvodu, protože některé vodivé struny mohou být i z polyuretanu a membrány ho obsahují také.

Na základě těchto informací byl sestaven výběrový testovací soubor textilních materiálů, na kterých byl realizován 3D tisk. Celkem šlo o 17 materiálů. Na tyto materiály byla aplikována vodivá struna ABS a byly provedeny subjektivní zkoušky přilnavosti. A podle těchto zkoušek byl zúžený testovací soubor na tyto 4 materiály, které prokázaly nejvyšší přilnavost. Na těchto 4 materiálech byla dále provedena zkouška na tuhost v ohybu. Na základě finálních výsledků subjektivního posouzení přilnavosti a objektivního posouzení pomocí zkoušky tuhosti v ohybu byly vybrány tyto

materiály. Všechny experimentálně vybrané materiály, které se nepoužily z důvodu špatné přilnavosti a trvanlivosti jsou uvedeny v *příloze 2*. Finální testovaný soubor materiálů je ukázán v *tab. 1* a reálné vzorky jsou vloženy v *příloze 1*.

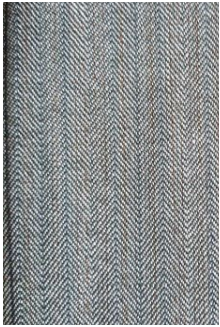



Tabulka obsahuje základní charakteristiky finálního testovaného souboru materiálů, a to jejich druh, vazbu, plošnou hmotnost, tloušťku materiálu, dostavu osnovy, dostavu útku a povrchové vlastnosti materiálů.

Plošná hmotnost – hmotnost materiálů byla změřena pomocí digitální váhy. Vzorky byly velikosti 10x10 cm. Plošná hmotnost je v tabulce uvedena v g/m^2 .

Tloušťka materiálu se doměřila na tloušťkoměru SDLM034A. Byla provedena tři měření od každého vzorku, z toho se následně vyjádřila průměrná hodnota tloušťky materiálu. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v *příloze 3*.

Povrchové vlastnosti materiálů byly měřeny na přístroji KES FB4, ukázky z výsledného měření viz *příloha 4*. Toto měření bylo provedeno z toho důvodu, že následně změřené velikosti elektrických odporů po potisku souvisí se strukturou textilie, a ta se promítá do hodnot povrchových vlastnosti měřených na tomto přístroji. Potvrdilo se u materiálu, kde byla naměřená nejvyšší hodnota elektrického odporu (u struny TPU, vzorek 1T), že odpovídá nejvyšší hodnotě geometrické drsnosti a naopak nejnižší hodnota odporu (u struny TPU, vzorek 2T) odpovídala nejnižší hodnotě geometrické drsnosti (viz *tab. 5, oddíl 7.1.1*).

Tabulka 1: Použité textilní materiály.

Označení	1	2	3	4
Ukázka materiálu				
Druh materiálu	Tkanina (obleková textilie)	Softshell	Tkanina	Tkanina
Vazba	plátňová	-	keprová	kohoutí stopa
Plošná hmotnost [g/ m²]	612,4	462,4	633,6	702,8
Tloušťka [mm]	0,54	1,27	0,61	0,66
Do [g/1cm]	30	-	30	26
Du [g/1cm]	22	-	17	26
Hodnoty povrchových vlastností				
MIU¹ [-]	0,201	0,265	0,133	0,197
MMD² [-]	0,0527	0,0111	0,0246	0,0251
SMD³ [μm]	11,205	3,412	4,050	6,464

5.2 3D vodivé materiály pro tisk

3D vodivé struny byly vybrány dle dostupnosti v ČR a na základě velikosti elektrického odporu, který nám pak umožní aplikovat vodivou drahu a využít pro zabudování elektroniky. V experimentu byly celkem vybrány tři vodivé struny, a to s různým elektrickým odporem a různým materiálovým složením, u kterých se předpokládalo, že by byly vhodné a byly výrobci doporučené pro aplikaci na textil. Tyto struny byly následně aplikovány na námi vybrané čtyři textilní materiály. Použité

1 MIU – střední hodnota koeficientu tření

2 MMD – střední směrodatná odchylka koeficientu tření

3 SMD – střední odchylka geometrické drsnosti povrchu

vodivé struny pro tento experiment byly ABS, PLA proto – pasta (dále jen PLA) a NinjaTek (dále jen TPU).

V *tab. 2* je uvedena charakteristika a vlastnosti pro vodivou strunu ABS. Tato vodivá struna v sobě obsahuje malé části uhlíku. Důležité vlastnosti jako jsou například teplota skelného přechodu, tepelná odolnost a doporučené nastavení pro tisk lze vyčíst z tabulky. Naměřený elektrický odpor byl přibližně 10 MΩ/m. Deklarovaná hodnota výrobcem nebyla uvedena. [28]

Tabulka 2: Použitá vodivá struna ABS a její vlastnosti.

Název vodivé struny	ABS
Obecné informace	<ul style="list-style-type: none"> • obsahuje části uhlíku • průměr 1,75 mm • <i>použití</i> – výroba stínících krabiček, různých maloproudových zařízení nebo kapacitních senzorů [28] • naměřený elektrický odpor vodivé struny – cca 10MΩ/m • deklarovaná hodnota – není uvedena výrobcem
Vlastnosti	<ul style="list-style-type: none"> • teplota skelného přechodu (měknutí) – cca 105°C • tepelná odolnost – 40 – 80°C • rozpouští se v koncentrovaných kyselinách, alkoholech, arenech, halogenovodících a acetonech • nutné tisknout na vyhřívané podložce – vysoká tendence k deformaci při chladnutí • zdravotně nezávadný, ale při tavení se do vzduchu uvolňují výpary, které mohou být ve větší míře škodlivé – proto vždy tisknout v dobře větraném prostoru [28]
Doporučené nastavení pro tisk	<ul style="list-style-type: none"> • teplota extruderu – rozsah 235 – 260°C, doporučená hodnota 245°C • teplota podložky – 90°C a více [28]

Charakteristika a vlastnosti pro vodivou strunu PLA jsou popsány v *tab. 3*. Tato vodivá struna v sobě obsahuje až 20% uhlíkových částí. Mezi vlastnosti, které jsou významné pro tuto vodivou strunu patří teplota skelného přechodu, tepelná odolnost a doporučené nastavení pro tisk, které jsou uvedené v tabulce. Naměřený elektrický odpor byl přibližně 15 kΩ/m. Deklarovaná hodnota výrobcem je 20-30 kΩ/m. [29]

Tabulka 3: Použitá vodivá struna PLA proto - pasta a její vlastnosti.

Název vodivé struny	PLA proto - pasta
Obecné informace	<ul style="list-style-type: none"> • obsahuje až 20% uhlíkových částí • průměr 1,75 mm • hustota - 1.24 g/cm³ • <i>použití</i> - hodí se jak pro různá maloproudová zařízení, tak i pro kapacitní senzory (např. jednoduché obvody s nízkým proudem, kapacitní dotykové senzory, interaktivní projekty) • složením zajišťuje skvělou přilnavost vrstev, mechanickou odolnost a konzistentní tisk [29] • <i>naměřený elektrický odpor vodivé struny – cca 15kΩ/m deklarovaná hodnota – 20 - 30 kΩ/m</i>
Vlastnosti	<ul style="list-style-type: none"> • teplota skleného přechodu (měknutí) – cca 70°C • tepelná odolnost – do 55°C • hustota – cca 1,24 g/cm³ • rezistivita na vrstvách X, Y – 30 Ω cm • rezistivita na vrstvě Z – 115 Ω cm • odpor 10 cm filamentu (před tiskem) – 2-3 kΩ • rozpouští se v různých kyselinách, alkoholech, arenech, esterech a v dalších chemikáliích • na vzduchu může absorbovat vlhkost a degradovat – doporučeno před použitím uchovávat v uzavřeném obalu • při tisku nemá velkou tendenci k deformacím, na rozdíl od ABS a jiných materiálů [29]
Doporučené nastavení pro tisk	<ul style="list-style-type: none"> • teplota extruderu – rozsah 215 – 230°C, doporučená hodnota 220°C • teplota podložky – podložka není nutná; doporučená hodnota 55°C a více [29]

Tab. 4 je zaměřena na charakteristiku a vlastnosti vodivé struny TPU. Důležitá vlastnost TPU je ta, že jeho prodloužení, až o 355%, umožňuje opakovaný ohyb bez opotřebení nebo prasknutí. Doporučené nastavení tisku je uvedeno podrobněji v tabulce. Naměřený elektrický odpor byl přibližně 52 kΩ/m. Deklarovaná hodnota výrobcem je 1,5 kΩ/m. [39]

Tabulka 4: Použitá vodivá struna TPU.

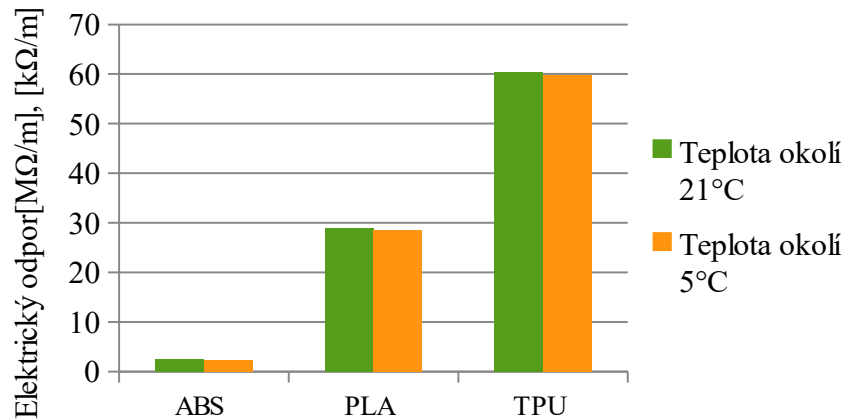
Název vodivé struny	TPU
Obecné informace	<ul style="list-style-type: none"> • průměr 1,75 mm • hustota - 1.18 g/cm³ • <i>použití</i> – elektrické obvody, integrované flexibilní vodiče, antistatické úchytky, vodivé části oblečení [39] • naměřený elektrický odpor vodivé struny – cca 52kΩ/m • deklarovaná hodnota – 1,5kΩ/m
Vlastnosti	<ul style="list-style-type: none"> • prodloužení o 355% umožňuje opakovaný ohyb bez opotřebení nebo praskání • spolehlivý a vysoce kvalitní tisk • je chemicky odolné vůči mnoha chemikáliím [39]
Doporučené nastavení pro tisk	<ul style="list-style-type: none"> • teplota extruderu – 220 – 230°C • teplota desky – pokojová, cca 45°C (není-li vyhřívaná deska, doporučuje se lepidlo nebo modrá páska) [39]

5.2.1 Ověření elektrických odporů jednotlivých vodivých strun

V rámci této práce se ověřoval elektrický odpor u jednotlivých vodivých strun. Zjišťovalo se, zda se změní jejich odpor vlivem okolní teploty, a také se ověřovaly deklarované hodnoty, které uvedli výrobci. Připravily se od každé vodivé struny 1 m dlouhé vzorky, z kterých se nastříhalo 5 stejně velkých vzorků po 20 cm. Těmto vzorkům se nejdříve měřili elektrické odpory za klimatických podmínek při 21°C – toto měření bylo provedeno dvakrát. Z tabulky (viz příloha 5) a grafického znázornění (viz obr. 12) lze vidět, že nejvyšších hodnot dosahovala vodivá ABS, která jako jediná dosahovala jednotek MΩ/m. Variační koeficient rozdílů mezi naměřenými elektrickými odpory byl u této struny téměř 17%. Nejlepších výsledků vykazovala vodivá struna PLA, která ale měla variační koeficient 16,56 % mezi naměřenými daty. Co se týče variability dat, tak s variačním koeficientem 11,12 % byla nejlepší vodivá struna TPU.

Další krok byl inspirován z výzkumu Attila Penteka a spol (viz kapitola 4.1). Vzorky se vložily do chladicí komory při teplotě 5°C, a změřil se opět elektrický odpor. Zjistilo se, že se vliv okolní teploty na velikosti elektrického odporu u jednotlivých strun neprokázal. Podle grafického vyjádření (viz obr. 12) lze vypožorovat, že došlo u všech vodivých strun k zanedbatelnému snížení odporů. Stále platí stejná tvrzení, že nejvyšší hodnoty měla struna ABS s největší variabilitou dat, a to s variačním

koeficientem 22,22 %. Nejlepší výsledky opět dosáhla vodivá PLA struna, která měla variační koeficient mezi daty 13,36 %. S nejlepší variabilitou dat se znovu potvrdila struna TPU s variačním koeficientem 12,65 %.



Obrázek 12: Graf elektrických odporů při zkoumání vlivu okolní teploty pro jednotlivé vodivé struny.

Z tohoto měření lze usoudit, že vliv okolní teploty nijak neovlivňuje chování struny před potiskem na textilní materiál. Potvrzuje se však tvrzení z výzkumu Attila Penteka a spol. (viz kapitola 4.1), že došlo ke zlepšení elektrických odporů při nižší teplotě okolí, i když v našem případě zanedbatelnému. Nejlepší výsledky měla vodivá struna PLA a největší data byla naměřena u ABS, jejíž hodnoty byly v MΩ. Za to tu byla přítomna poměrně velká variabilita dat z naměřených hodnot odporů u jednotlivých strun.

6 Tvorba a zhotovení vodivých drah

Tisk vodivých drah byl proveden na 3D tiskárně Creality CP-01 na katedře oděvnictví (viz obr. 13). Tiskárna obsahuje celkem tři hlavy, a to pro 3D tisk, gravírování laserem a CNC obrábění. Jedna z výhod této tiskárny je kompatibilita s různými tiskovými materiály, nejčastěji se používá PLA, ABS nebo TPU. Podložka se zahřívá na 100°C a maximální možná teplota trysky je 260°C. Tiskárna nabízí tvorbu 3D modelu o rozměrech 20x20x20 cm. Průměr filamentu je 1,75 mm, rychlost tisku dosahuje až 80mm/s a obvyklá tloušťka vrstvy je mezi 0,1 – 0,4 mm. Mezi ulehčující prvek této tiskárny patří dotykový displej, který uživateli dodává většího komfortu. [30]

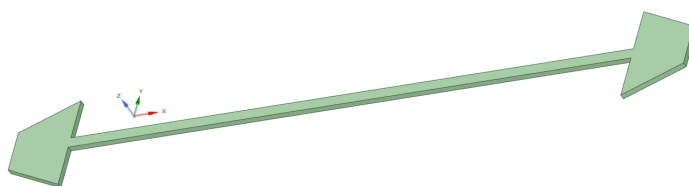


Obrázek 13: Tiskárna Creality CP-01. [30]

6.1 Postup tisku

Příprava vzorku pro samotný tisk probíhal následovně – byl vytvořen vzorek o rozměru 25x25 cm, na něj byl aplikován tisk vodivé drahy. Tento rozměr vycházel z rozměru vzorku, který byl potřebný k objektivnímu testování na KES FB2 a pro zkoušku odolnosti v oděru.

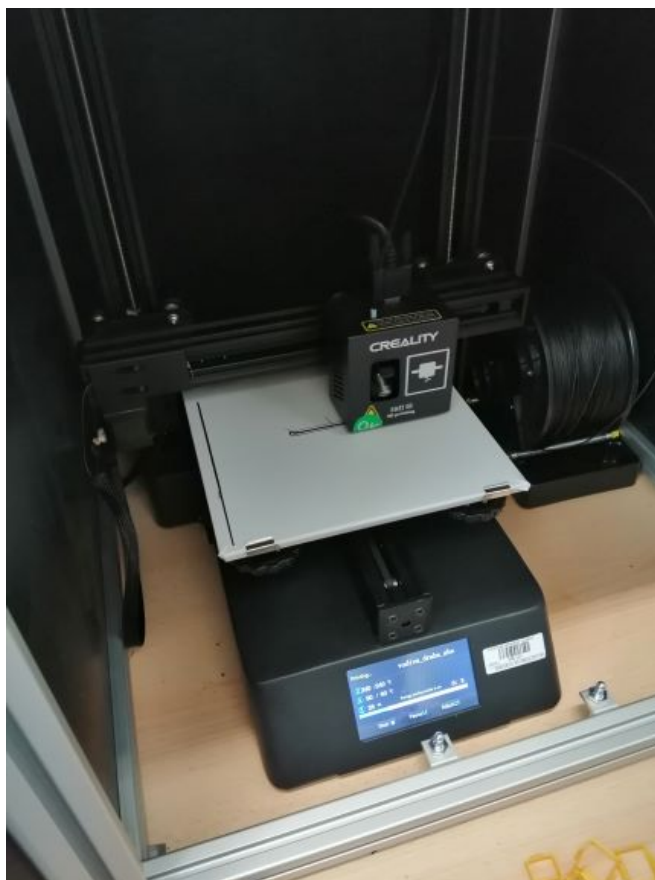
Důležitým krokem byl návrh samotné geometrie potisku. Byla navržena jednoduchá geometrie vodivé drahy liniového tvaru o délce 120 mm, šířce 2 mm a tloušťce 1 mm v systému Inventor, který byl následně převeden do STL formátu (viz obr. 14).



Obrázek 14: 3D tvar tištěné vodivé drahy.

Pokud by byl povrch materiálu moc mastný, tak tisková struna špatně přiléhá, proto se v těchto případech může použít isopropylalkohol, který slouží právě pro odmaštění povrchu.

Kvůli složitějšímu nastavování tiskárny byly vzorky potištěny pracovníkem na katedře KOD.



Obrázek 15: Ukázka tisku na membránový materiál.

7 Testování výkonnosti aplikovaného tisku

V této kapitole budou popsány zkoušky na tuhost v ohybu, odolnost v oděru a údržby. Po celou dobu experimentu budou sledovány hodnoty elektrických odporů.

7.1 Měření elektrického odporu před namáháním

Měření elektrického odporu vodivých drah bylo provedeno na digitálním multimetru PDM 300 C2 PARKSIDE (viz obr. 16).



Obrázek 16: Měřicí přístroj elektrického odporu - multimetr PDM 300 C2 (PARKSIDE). [31]

Měřil se na všech vybraných materiálech, které byly potištěny vodivými strunami ABS, PLA a TPU a byly měřeny před jakýmkoli namáháním. Elektrický odpor byl měřen na délku 10 cm a následně převeden na 1 m. Cílem bylo najít tu nejlepší vodivou strunu tak, aby měla co nejnižší elektrický odpor a zároveň byla co nejvíce trvanlivá. Průměrné hodnoty elektrického odporu jsou postupně uvedeny v tab. 5. Všechna výsledná měření jsou v příloze 6.

Elektrický odpor patří také k fyzikálním veličinám, která charakterizuje schopnost elektrických vodičů vést elektrický proud. Hodnota elektrického odporu je dána materiálem, tvarem i teplotou vodiče. Velikost odporu závisí na délce vodiče, na obsahu průřezu vodiče, na materiálu vodiče a na teplotě. Elektrický odpor má vždy

kladnou hodnotu. Jedná se o převrácenou hodnotu elektrické vodivosti. Označuje se symbolem R a jednotkou je Ω . [27]

Pro výpočet elektrického odporu lze použít převrácený vztah pro elektrickou vodivost

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

U... napětí na koncích vodiče [V - volt]

I... proud procházející vodičem [A - ampér].

Další možností jak vypočítat elektrický odpor je z vlastností vodiče, a to ze

vztahu $R = \frac{\rho * l}{S}$ (2)

ρ ... měrný elektrický odpor materiálu

l... délka vodiče

S... obsah příčného průřezu vodiče. [27]

7.1.1 Naměřené hodnoty elektrického odporu a vyhodnocení výsledků

Z tab. 5 je patrné, že vodivá struna ABS není vhodná pro tisk na textil z hlediska vysokého odporu. Nejlepších hodnot elektrického odporu vykazoval materiál 4A, jehož odpor byl 142,7 M Ω /m. Naopak nejhorší hodnota odpovídala u materiálu 2A s odporem 202,4 M Ω /m.

Vodivá PLA struna jevila nejmenší odchylky mezi elektrickými odpory u jednotlivých textilních materiálů. Nejlepší hodnota byla prokázána u materiálu 3P, který měl odpor 150,2 k Ω /m. Nejhorší hodnotu měl materiál 2P s elektrickým odporem 164,2 k Ω /m.

V tabulce u vodivé struny TPU lze vyzorovat největší odchylky odporů mezi materiály. Z těchto výsledků plyne, že nejlepší hodnota elektrického odporu byla u materiálu 2T, který měl odpor 320,2 k Ω /m, a tu nejhorší materiál 1T, jehož odpor byl 548,7 k Ω /m.

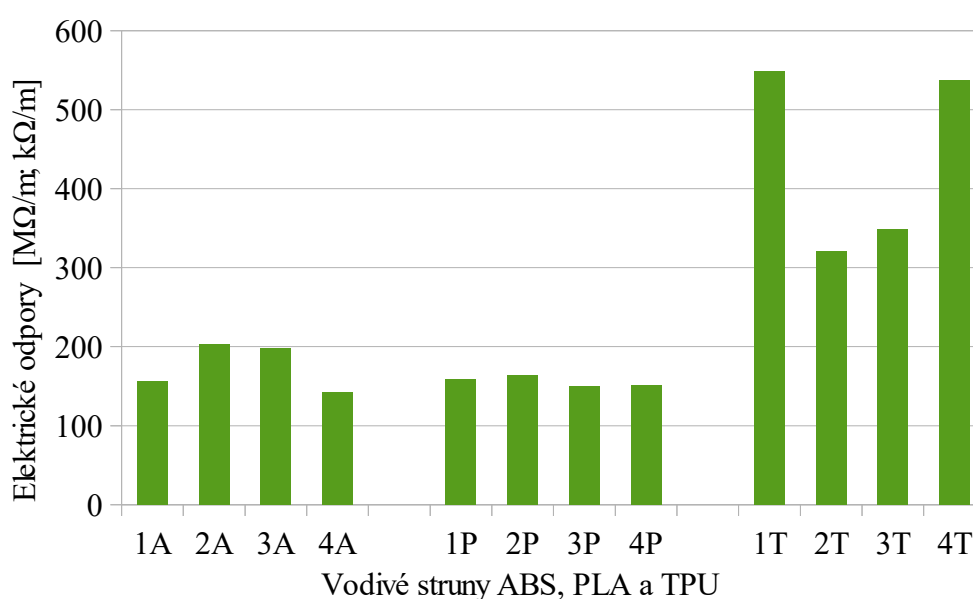
Podkladový materiál by neměl mít významnou rozdílnost odporů při stejném potištění strunou. Proto variabilita hodnot elektrických odporů v rámci jednotlivých materiálů potištěných vodivými strunami ABS a TPU mohla být způsobena buď to nestejným složením nebo vlivem struktury textilního materiálu, kde se mohly promítnout geometrické parametry textilie do geometrie té dráhy – tzn. do tloušťky. Pokud ale byla vodivá struna správně vyrobena, tak by variabilita měla být menší, což lze vyzorovat v tabulce u vodivého PLA – pravděpodobně má homogennější strukturu.

Z tabulkových hodnot odporů 4 vybraných textilií se u každé vodivé struny vypočítal průměrný odpor. Podle těchto výsledků vyplývá, že nejstabilnější vodivou strunou po potisku je opravdu struna PLA, která měla variační koeficient 4,15 %. Nejvyšší výkyvy jevila vodivá struna TPU, kde variační koeficient byl až 27,56 %. U této vodivé struny lze tedy vyzorovat výrazné změny elektrických odporů v závislosti na struktuře textilního materiálu. Vodivá ABS struna není ideálním materiálem pro tisk na textil už z hlediska vysokého odporu, a také měla variační koeficient téměř 17 %.

Tabulka 5: Naměřené elektrické odpory před namáháním.

ABS				
Materiál	Průměr elektrického odporu [MΩ/m]	Rozptyl [MΩ/m]	Směrodatná odchylka [MΩ/m]	Variační koeficient [%]
1A	156,7	1,85185	1,36083	0,87
2A	202,4	1,48148	1,21716	0,60
3A	197,3	16,41975	4,05213	2,05
4A	142,7	1,60494	1,26686	0,89
Průměrný elektrický odpor [MΩ/m]				
	174,8	875,3425	29,58619	16,93
PLA				
Materiál	Průměr elektrického odporu [kΩ/m]	Rozptyl [kΩ/m]	Směrodatná odchylka [kΩ/m]	Variační koeficient [%]
1P	158,4	0,98765	0,99381	0,63
2P	164,2	13,20988	3,63454	2,21
3P	150,2	3,95062	1,98762	1,32
4P	151,6	16,41975	4,05213	2,67
Průměrný elektrický odpor [kΩ/m]				
	156,1	41,98667	6,47971	4,15
TPU				
Materiál	Průměr elektrického odporu [kΩ/m]	Rozptyl [kΩ/m]	Směrodatná odchylka [kΩ/m]	Variační koeficient [%]
1T	548,7	46,54321	6,82226	1,24
2T	320,2	23,70370	4,86864	1,52
3T	348,9	74,07407	8,60663	2,47
4T	536,9	12,59259	3,54860	0,66
Průměrný elektrický odpor [kΩ/m]				
	438,7	14616,50917	120,89876	27,56

V grafu (viz obr. 17) jsou vyobrazeny hodnoty elektrických odporů všech námi potištěných vzorků pomocí ABS, PLA a TPU strunami. Zde lze vypořadovat, jak se měnil elektrický odpor z hlediska struktury podkladových materiálů a jak tyto struktury ovlivňují velikost odporů. U ABS se projevilo to, že vzorky 1A a 4A měly takřka o čtvrtinu menší hodnoty odporů než zbylé vzorky. PLA struna měla velmi dobrou stabilitu po potisku na textilie a jejich změny jsou zanedbatelné. Co se týče vzorků potištěných TPU strunou, ty měly největší rozdíly. Některé, jak lze vidět z grafu, mají skoro až poloviční změny odporů v závislosti na struktuře.



Obrázek 17: Elektrické odpory po potisku před namáháním.

Všeobecně lze tedy říci podle hodnot z tab. 5, že nejvíce vyhovující vodivá struna by byla PLA, která měla nejstabilnější a nejnižší hodnoty u všech textilních materiálů. Hodnoty se pohybovaly kolem 150 – 164 kΩ/m. Díky svým stabilním výsledkům je téměř jedno na jakou strukturu se tato vodivá struna potiskne, musí ale mít drsnější, chlupatější nebo hrubší strukturu. Vodivá TPU struna vykazovala jako druhá nejlepší hodnoty elektrických odporů, ale byla u jednotlivých materiálů vypořadována největší rozdílností variability vzhledem ke struktuře textilních materiálů. Nejvyšší odpor měla vodivá struna ABS, hodnoty elektrického odporu dosahovaly MΩ, což je pro tisk na textil nepoužitelné.

Z těchto výsledků je potřeba zdůraznit, že struktura vybraných textilních materiálů značně ovlivňuje velikost elektrických odporů.

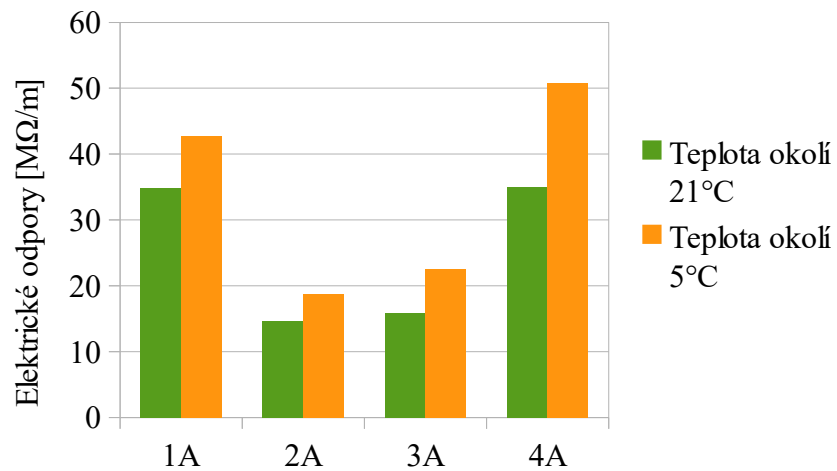
7.1.1.1 Ověření variability elektrických odporů vodivé ABS struny

Z důvodu velké variability elektrických odporů mezi jednotlivými textilními materiály bylo provedeno kontrolní měření a pouze u vodivého ABS. Na jednotlivé materiály bylo aplikováno 5 drah, aby se zjistila jaká je mezi nimi variabilita a jestli může mít textilní materiál vliv na velikost odporu. Také se zjišťovalo, jestli má vliv na elektrický odpor okolní teplota.

Opakoval se stejný postup jako u ověřování elektrických odporů u vodivých strun (*viz oddíl 5.2.1*). Nejdříve se odpory měřily za klimatických podmínek při 21°C, toto měření bylo provedeno dvakrát. Z tabulky (*viz příloha 7*) a grafického vyjádření (*viz obr. 18*) je patrné, že nejnižší variabilitu vykazoval softshellový materiál (2A), který měl variační koeficient 5,78 %. Největšího odporu dosáhla tkanina s vazbou kohoutí stopy (4A), jehož variační koeficient byl ale druhý nejmenší, a to 9,33 %. Největší variabilitu měla tkanina plátnové vazby (obleková textilie - 1A), jeho variační koeficient dosahoval až 24,18%. Poslední materiál keprové vazby (3A) měl druhý největší variační koeficient, a to 16,09 %. Potvrdilo se tedy tvrzení, že variabilita mezi jednotlivými textilními materiály opravdu je a že textilní materiál má vliv na velikost odporu. Z rešeršní částí a průzkumu víme, že ve vodivé struně mohly být uhlíkové části navzájem paralelní a neměly tedy homogennější strukturu, což byl pravděpodobně další důvod proč byla výrazná variabilita (strukturální analýza v tomto experimentu nebyla provedena).

Další krok byl inspirován z výzkumu Attila Penteka a spol (*viz kapitola 4.1*). Vzorky se vložily do chladicí komory, kde bylo 5°C. Následně se znovu změřil elektrický odpor – zkoumalo se zda se odpor změnil v závislosti na okolní teplotě. Jak lze vypočítat z tabulky a grafického znázornění (*viz obr. 18*) tento vliv teploty se prokázal. Všechny textilní materiály potištěny ABS strunou vykazovaly nárůst odporů. Nejvýraznější zvýšení elektrického odporu bylo u vzorku 4A, kde došlo k růstu odporu téměř o třetinu. U tohoto vzorku byl variační koeficient 25,34 %. Druhý vzorek, který vykazoval velkou variabilitu dat, byl 3A, který měl variační koeficient 18,08 %.

Poslední dva vzorky 1A a 2A měly podobnou variabilitu, jejich variační koeficienty byly 15,19 % a 14,12 %.



Obrázek 18: Graf elektrických odporů při zkoumání vlivu okolní teploty pro ABS.

Z těchto výsledků je patrné, že je pro uživatele lepší využít takto aplikované drahy za vyšších teplot okolí. Je tedy důležité dávat si pozor do jakého prostředí si daný oděv uživatel obleče, protože u teploty okolí 5°C a méně se výrazně zvýší elektrický odpor (tady v tom případě až o čtvrtinu, v jednom i o třetinu) a nemusí se tak signál přenést správně, ne-li vůbec. Pokud by uživatel chtěl, aby daný oděv dokázal reagovat i na takovou změnu odporů, kterou ovlivňuje okolní teplota, byla by potřeba to nějakým způsobem vyladit v elektrickém obvodu.

7.2 Zkouška tuhosti v ohybu

Pro realizaci zkoušky tuhosti v ohybu byl použit přístroj KES FB2 (*viz obr. 19*). Jedná se o přístroj, který se zabývá měřením ohybové tuhosti u plošných textilií jako jsou tkaniny, pleteniny, netkané textilie a příze. Obecně lze říct, že tuhost v ohybu ovlivňuje komfort nošení a tato zkouška simulovala běžné používání.

Tuhost je odolnost plošné textilie vůči ohýbání. Je to schopnost materiálu reagovat momentem vnitřních sil soudržnosti proti namáhání momentem vnějších sil způsobených deformací.

Cílem zkoušky bylo zjištění změny tuhosti v ohybu mezi samostatným textilním materiálem a materiálem s natištěnou vodivou drahou. Dále se zjišťovalo zda se během ohybu vodivá draha nějak nepoškodí a jak se změní elektrický odpor. Následně materiály, které měly natištěnou vodivou drahu, se vypraly a provedlo se u těchto vzorků měření ještě jednou, abychom zjistili rozdíl tuhosti v ohybu po údržbě. Celou dobu byly sledovány hodnoty elektrických odporů.



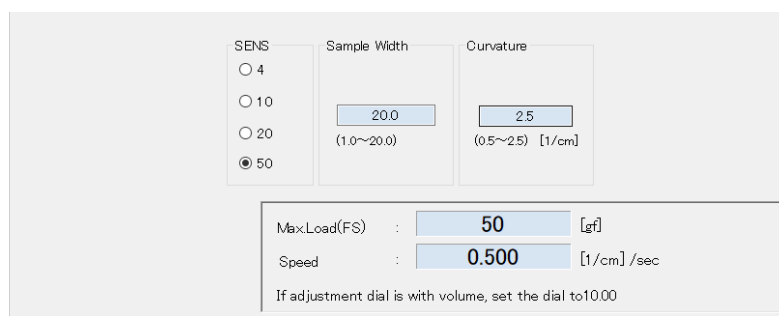
Obrázek 19: Přístroj KES FB2.

Postup zkoušky:

Z každého materiálu se připravily 4 vzorky, jeden byl bez potisku (*viz obr. 22*) a zbylé byly potištěny vodivými drahami, rozměry vzorků byly 20x20 cm. Měření bylo provedeno za nastavených standardních podmínek a pro všechny vzorky byly stejné (*viz obr. 20*).

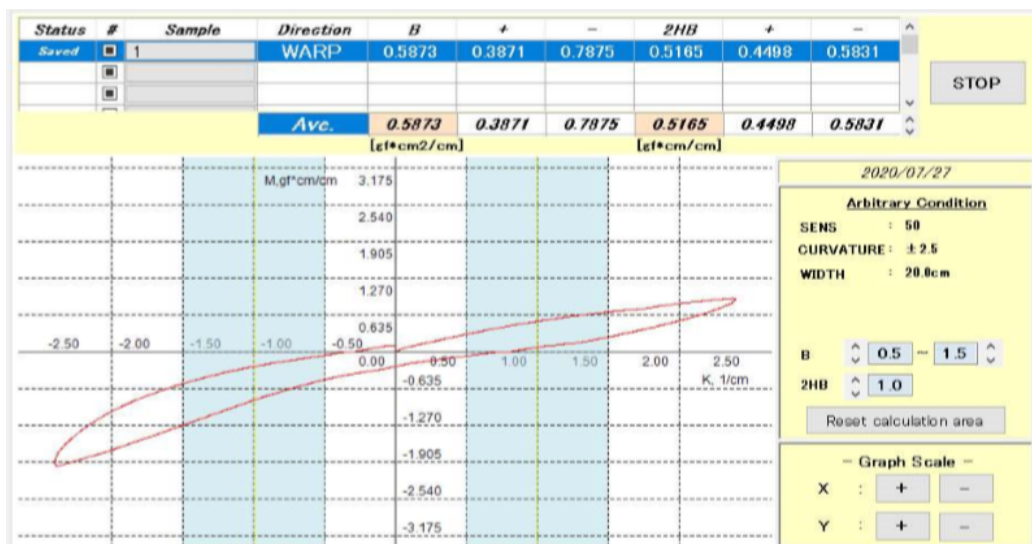
Vzorek se vkládá mezi dvě čelisti – přední čelist je pevná a vzorek během celého měření drží, druhá je pohyblivá – ty jsou od sebe vzdáleny 10 mm. Přístroj má optická čidla, která kontrolují správnost uložení vzorku. Zapnutím spínače se přístroj uvede do

pohybu. Vzorek je uchycený mezi čelistmi a následně je ohýbán do určitého zakřivení – maximální zakřivení $K \pm 2,5 \text{ cm}^{-1}$. Vzorek, který byl ve vodorovné poloze upnut v čelistech - tedy v pozici 0 - se ohýbal pod pracovní desku do určitého zakřivení, vrátil se do původní polohy a následovalo ohnutí i nad pracovní desku do maximální křivosti, odtud se vracel opět do původní vodorovné pozice. Ohybové vlastnosti jsou proměřovány vždy ve směru útku a osnovy, po lícni i rubové straně – v tomto případě se měření provedlo pouze po směru osnovy. Data jsou velmi přesná a jsou přístrojem zapsána a uložena do PC. Celkové měření jednoho vzorku je rychlé. Měření bylo provedeno kvalifikovaným pracovníkem TUL na katedře KOD.



Obrázek 20: Podmínky měření ohybových charakteristik.

K dispozici byly již naměřená data, ukázka viz obr. 21.



Obrázek 21: Ukázka vyhodnocení z ohybové charakteristiky vzorku 1A - obleková textilie.

B... ohybová tuhost vztažená na jednotku délky [$\text{gf} \times \text{cm}^2 / \text{cm}$] – hodnota ohybové tuhosti

2HB... hystereze ohybového momentu na jednotku délky [$\text{gf} \times \text{cm} / \text{cm}$] – šířka hystereze

+ kvadrant horní, pravé části

- ... kvadrant dolní, levé části

Označení vzorků pro tuto zkoušku:

- vzorky bez tisku: 1, 2, 3, 4



Obrázek 22: Použité materiály před namáháním na ohyb - bez spoje.

- vzorky s vytištěnými vodivými drahami ABS: 1A, 2A, 3A, 4A
- vzorky s vytištěnými vodivými drahami PLA: 1P, 2P, 3P, 4P
- vzorky s vytištěnými vodivými drahami TPU: 1T, 2T, 3T, 4T

7.2.1 Vyhodnocení měření tuhosti v ohybu

Výsledky ze zkoušky tuhosti v ohybu jsou vyjádřeny v *tab. 6 a 7*. Všechny vyhodnocení nepotištěných a potištěných materiálů na ohybovou tuhost z přístroje KES FB2 jsou vloženy v *příloze 8*.

Tab. 6 znázorňuje ohybovou tuhost změřených materiálů, které nebyli potištěné. Nepotištěný materiál č. 2 (softshellový materiál) má nižší ohybovou tuhost než všechny ostatní materiály – tyto materiály jsou tkané. Nejvyšší ohybové tuhosti dosahuje materiál č. 3 – tkanina keprové vazby. Materiály č. 1 a 4 měly takřka shodnou ohybovou tuhost, rozdíl mezi nimi byl $0,0061 \text{ g} \times \text{cm}^2 / \text{cm}$.

Změřené hodnoty všech vzorků, které byly potištěné vodivou strunou, a to ABS, PLA a TPU, jsou uvedené v *tab. 7*. U ABS můžeme vypořádat podobnou situaci jako byla u nepotištěných materiálů, a to konkrétně, že nejnižší ohybovou tuhost měl vzorek 2A a tu nejvyšší vzorek 3A.

Vzorky potištěné PLA byly na přístroji KES FB2 nezměřitelné, měly velkou ohybovou tuhost. Natištěný vodivý spoj zvýšil textilním materiálům tuhost natolik, že hodnoty byly mimo pracovní rozsah přístroje KES FB2 – vzorky nedosahovaly do požadované křivosti.

Poslední vodivá struna, která byla na textilie natištěna, byla TPU. Z výsledných hodnot lze vyčíst, že tento vodivý materiál měl nejnižší ohybovou tuhost. Všechny vzorky měly nižší ohybovou tuhost než vzorek 3T. Nejnižší tuhost byla u vzorku 1T (obleková textilie) nebo také u vzorku 2T, ten měl nepatrný rozdíl v ohybové tuhosti, který činil $0,0101 \text{ g} \times \text{cm}^2 / \text{cm}$.

Pokud bychom porovnali všeobecně hodnoty obou tabulek je z nich patrné, že nižší ohybové tuhosti dosahovaly materiály, které nejsou potištěné. Vzorky, které mají natištěnou vodivou dráhu měly naopak vyšší ohybovou tuhost – tyto vzorky jsou tužší díky svým vodivým spojům, které textilní materiál zpevňují.

Obecně lze vidět u materiálu č. 3 - jak nepotištěném, tak potištěném -, že jeho výrazná vysoká ohybová tuhost byla způsobena jeho keprovou hustou vazbou. Naopak nižší tuhost měly tkaniny, které jsou jemnější. Materiál č. 2 měl nejnižší ohybovou tuhost, což mohlo být ovlivněno pravděpodobně tím, že je tvořen ze dvou vrstev – spodní vrstva je z hřejivého (šedého) materiálu a vrchní materiál je tkaný.

Tabulka 6: Výsledné ohybové vlastnosti pro nepotištěné materiály.

Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g × cm² /cm]
1	0,2022
2	0,1529
3	1,2608
4	0,2083

Tabulka 7: Výsledné ohybové vlastnosti pro potištěné materiály ABS, PLA a TPU.

Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]
1A	0,5351	1P	neměřitelné	1T	0,3476
2A	0,3834	2P	neměřitelné	2T	0,3577
3A	1,4552	3P	neměřitelné	3T	1,3516
4A	0,6236	4P	neměřitelné	4T	0,5189

V tab. 8 je uveden procentuální rozdíl mezi naměřenými hodnotami tuhosti v ohybu nepotištěných a potištěných vzorků. Při porovnání určitých naměřených hodnot lze tvrdit, že nejvyšší ohybové tuhosti dosahovaly vzorky potištěné PLA. Ty měly nezměřitelně velkou ohybovou tuhost na přístroji KES FB2, tudíž nelze konkrétně uvést rozdíl mezi čistým textilním materiálem a potištěným.

Vzorky potištěné ABS strunou jevíly jako druhý největší rozdíly mezi nepotištěnými vzorky. Nejvyšší nárůst tuhosti v ohybu zaznamenal vzorek 4A, který měl o 199,38 % větší ohybovou tuhost než nepotištěný vzorek. Podobný rozdíl mezi vzorky byl vypořovován u vzorku 1A, kde byl rozdíl 164,64 % a u vzorku 2A, který měl rozdíl 150,75 %. Z tabulky lze dále vypořovat, že nejmenší rozdíl v ohybové tuhosti měl vzorek 3A, který se lišil pouze o 15,42 %.

Nejmenší rozdíly byly vypořovány u vzorků, které byly potištěny TPU. U této tiskové struny měl nejvyšší rozdílnost v ohybové tuhosti vzorek 4T, který měl rozdíl 149,11% a vzorek 2T, jehož rozdíl byl 133,94 % oproti nepotištěným vzorkům. Takřka nepatrný rozdíl se prokázal u vzorku 3T, který se lišil od nepotištěného vzorku pouze o 7,20 %. Druhý vzorek, který měl nižší rozdíl v ohybové tuhosti, byl 1T, u něj se tuhost zvýšila o 71,91 %.

Žádný potištěný vzorek nedosáhl poškození vodivé drahy při jeho ohýbání.

Tabulka 8: Procentuální vyjádření rozdílů tuhosti v ohybu mezi nepotíštěnými a potíštěnými vzorky.

ABS					
Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Rozdíly mezi nepotíštěným a potíštěným vzorkem [g× cm² /cm]	Rozdíl [%]
1	0,2022	1A	0,5351	0,3329	164,64
2	0,1529	2A	0,3834	0,2305	150,75
3	1,2608	3A	1,4552	0,1944	15,42
4	0,2083	4A	0,6236	0,4153	199,38
PLA proto - pasta					
Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Rozdíly mezi nepotíštěným a potíštěným vzorkem [g× cm² /cm]	Rozdíl [%]
1	0,2022	1P	neměřitelné	-	-
2	0,1529	2P	neměřitelné	-	-
3	1,2608	3P	neměřitelné	-	-
4	0,2083	4P	neměřitelné	-	-
NinjaTek					
Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Vzorek	Hodnota tuhosti v ohybu [g× cm² /cm]	Rozdíly mezi nepotíštěným a potíštěným vzorkem [g× cm² /cm]	Rozdíl [%]
1	0,2022	1T	0,3476	0,1454	71,91
2	0,1529	2T	0,3577	0,2048	133,94
3	1,2608	3T	1,3516	0,0908	7,20
4	0,2083	4T	0,5189	0,3106	149,11

7.2.1.1 Změna elektrického odporu a následné vyhodnocení

Po namáhání na ohyb byly vzorkům přeměřeny elektrické odpory. Průměrné hodnoty jsou zaznamenány v *tab. 9*. Všechny naměřené hodnoty odporů jsou dány v *příloze 9*.

V *tab. 9* jsou uvedeny naměřené elektrické odpory po namáhání na ohyb pro všechny použité vodivé struny. Při srovnání hodnot pro ABS před a po zkoušce tuhosti v ohybu je vidět velké snížení odporů u všech vzorků. Hodnota odporu u vzorku 1A se snížila o 58,71 %, jde o nejvyšší pokles odporu ze všech vzorků po tomto namáhání. U vzorku 2A došlo ke snížení jen o 25,44 %, což je naopak nejnižší pokles odporu. Další vzorek, který měl nižší pokles elektrické hodnoty byl 3A, který se snížil o 27,93 %. Poslední vzorek 4A měl jako druhý vyšší pokles, odpor klesl o 48,63 %. Stále se jedná o vodivý materiál s vysokým elektrickým odporem a tedy není vhodný.

U druhé vodivé struny PLA došlo k menšímu snížení elektrických odporů u všech vzorků. Nejvyšší pokles odporu po ohybu byl u vzorku 2P, který se snížil o 23,70 %. Za to u vzorků 1P, 3P a 4P došlo k zanedbatelným změnám elektrického odporu, které byly v rozmezí 1,5 – 6 %.

Poslední naměřené hodnoty vodivé TPU vykazovaly taktéž menší snížení odporů jako u PLA. K největšímu poklesu mezi elektrickými odpory došlo u vzorku 2T, kde se odpor snížil o 10,56 %. U vzorků 1T, 3T a 4T došlo také k bezvýznamným změnám odporů v rozmezí 4 – 6 %.

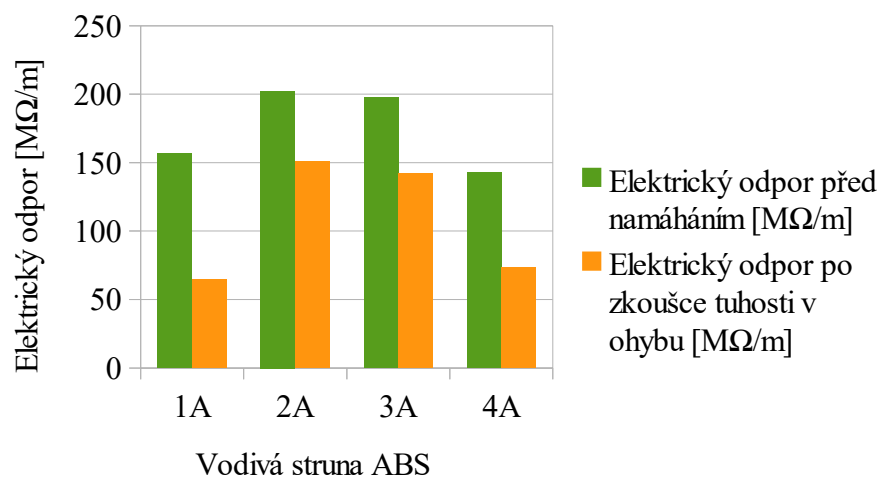
Tabulka 9: Změna elektrických odporů po zkoušce tuhosti v ohybu.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
Původní elektrický odpor [MΩ/m]	156,7	202,4	197,3	142,7
Průměr elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu [MΩ/m]	64,7	150,9	142,2	73,3
Rozptyl [MΩ/m]	310,74074	115,67901	339,50617	2,46914
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	17,62784	10,75542	18,42569	1,57135
Variační koeficient [%]	27,26	7,13	12,96	2,14
Rozdíl mezi el. odpory [MΩ/m]	92	51,5	55,1	69,4
Rozdíl [%]	58,71	25,44	27,93	48,63
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
Původní elektrický odpor [kΩ/m]	158,4	164,2	150,2	151,6
Průměr elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu [kΩ/m]	149,1	125,3	141,8	149,3
Rozptyl [kΩ/m]	2,09877	0,86420	10,86420	2,83951
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	1,44871	0,92962	3,29609	1,68508
Variační koeficient [%]	0,97	0,74	2,32	1,13
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	9,3	38,9	8,4	2,3
Rozdíl [%]	5,87	23,70	5,59	1,52
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
Původní elektrický odpor [kΩ/m]	548,7	320,2	348,9	536,9
Průměr elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu [kΩ/m]	524,7	286,4	327,3	508,4
Rozptyl [kΩ/m]	710,74074	166,29630	26,91358	132,46914
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	26,65972	12,89559	5,18783	11,50952
Variační koeficient [%]	5,08	4,50	1,58	2,26
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	24,0	33,8	21,6	28,5
Rozdíl [%]	4,37	10,56	6,19	5,31

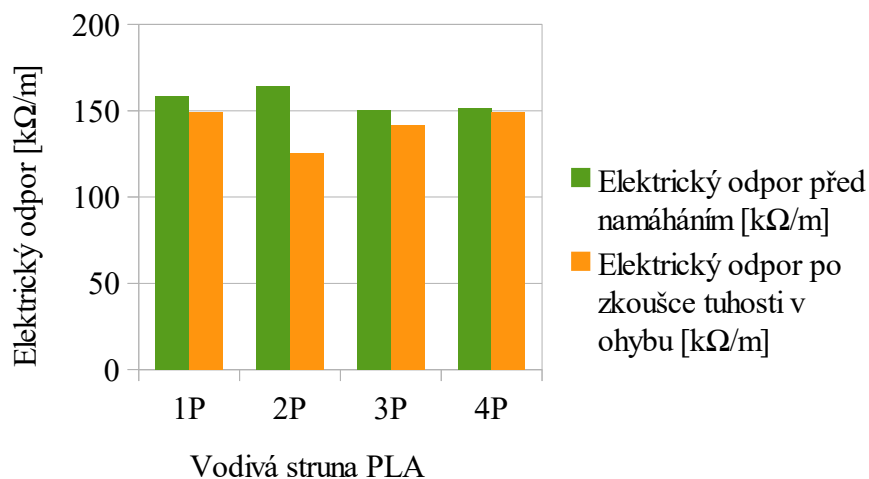
Hodnoty elektrického odporu před a po namáhání na ohyb pro vodivou strunu ABS jsou graficky znázorněny na *obr. 23*. Z grafu je patrné, že nejvyšší pokles odporu po namáhání opravdu měl vzorek 1A. Druhý viditelně větší úbytek měl vzorek 4A. Jak lze vypočítat i z grafu, k podobným poklesům odporu došlo u vzorků 2A a 3A, ty jeví největší odolnost při namáhání na ohyb.

Elektrické odpory pro vodivou PLA jsou graficky vyobrazeny na *obr. 24*. Lze vypočítat z grafu, že opravdu k výraznému úbytku odporu došlo pouze u vzorku 2P. Dále vyplývá, že k nepatrnému poklesu před a po namáhání došlo u vzorku 4P. Vzorky 1P a 3P jeví také mírné snížení elektrických odporů, a jak lze vidět v grafu, vzorky měly téměř shodné rozdíly mezi odpory před a po namáhání na ohyb. Z grafického vyjádření lze konstatovat, že většina vzorků měla velmi dobrou odolnost při namáhání na ohyb kromě vzorku 2P.

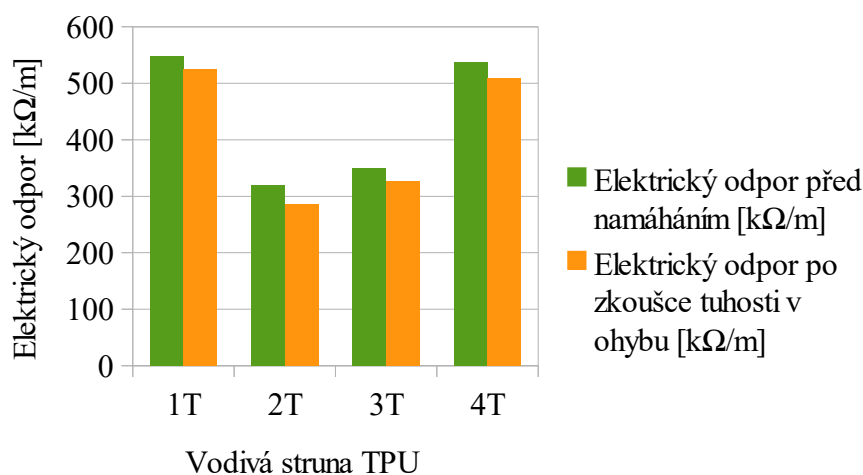
Grafické zpracování elektrických odporů pro TPU je vyjádřeno na *obr. 25*. Při pohledu na graf lze říci, že rozdíly odporů před a po namáhání u vzorků 1T a 3T byly podobné a nižší než u zbylých vzorků. U vzorků 2T a 4T z grafu je vidět, že jde o největší snížení elektrických odporů z této vodivé struny. Z grafu vyplývá, že u všech vzorků se prokázala relativně dobrá odolnost vůči ohybu.



Obrázek 23: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro ABS.



Obrázek 24: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro PLA.



Obrázek 25: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro TPU.

Po namáhání vzorků na ohyb lze říci, že nejlépe se chovala, z hlediska změny elektrického odporu, vodivá struna PLA a TPU, kde byly nejmenší rozdíly mezi odpory před a po namáhání. PLA i přesto, že měla nezměřitelnou ohybovou tuhost, tak dosahovala nejlepších výsledků elektrického odporu. U těchto vodivých strun a z naměřených hodnot elektrického odporu lze zhodnotit, že nejlépe si vedly textilní materiály č. 1, 3 a 4. U textilního materiálu č. 2 docházelo často k většímu výkyvu odporu oproti ostatním materiálům. Vodivá ABS struna vykazovala největší poklesy elektrických odporů u všech textilních materiálů po namáhání na ohyb. Po namáhání na ohyb by nemělo docházet ke snížení odporů, v tomto případě k tomu došlo u všech

vodivých strun. U struny ABS však došlo k výraznému poklesu oproti ostatním strunám. U těch sice odpor také klesá, ale ne až tak výrazně. Tento fakt mohl být ovlivněný opět homogenitou rozložení vodivých skupin částic a strukturou textilních materiálů.

7.2.2 Proces praní

Účelem této části zkoušky byla simulace běžného praní, ozkoušení kvality životnosti vodivých drah na textilních materiálech, a jestli by mohla údržba mít významný vliv na elektrický odpor. Byla provedena pouze u vzorků s natištěnou drahou, čisté vzorky se už dále netestovaly. Praní bylo provedeno na KOD a typ použité pračky pro údržbu tištěných vzorků byla automatická pračka značky MIELE W 1734 (*viz obr. 26*). Prací program byl nastaven na vlnu, při 30°C a počet otáček 800. Délka pracího programu byla 38 minut. Po vyprání se vzorky sušily v rozloženém stavu na stole.



Obrázek 26: Automatická pračka MIELE W 1734.

Při tomto pracím cyklu došlo k poškození u dvou vzorků – 2P a 3T (*viz obr. 27*) – vodivé drahy se odlepují od textilního materiálu.



Obrázek 27: Porušené vodivé drahy po praní - vzorky 2P a 3T.

7.2.2.1 Změna elektrického odporu po praní a následné vyhodnocení

Dalším krokem po usušení bylo změření elektrického odporu a porovnání jejich změn. Průměrné hodnoty všech vzorků jsou uvedené v *tab. 10* a všechny naměřené odpory v *příloze 10*.

Naměřené hodnoty všech vodivých strun jsou uvedeny v *tab. 10*. U vodivé struny ABS podle naměřených elektrických odporů lze vidět, že došlo ke zvýšení elektrických odporů po praní u všech textilních materiálů. K nejvyššímu růstu odporu došlo u vzorku 1A, u kterého byla hodnota odporu zvýšena o 15,46 %. Druhý větší nárůst byl u vzorku 4A, kde se jeho odpor zvýšil o 14,05 %. U vzorku 2A došlo k nejnižšímu růstu mezi elektrickými odpory, a to o pouhé 6,76 %. Poslední vzorek 3A se odpor zvýšil o 8,79 %, šlo tedy o druhý nižší nárůst odporu.

Hodnoty nově naměřených odporů po praní pro PLA vykazovaly nejstabilnější výsledky. U dvou vzorků si lze povšimnout, že došlo k poklesu elektrických odporů. Jde o vzorky 3P a 4P. Naopak u jediného vzorku 1P došlo ke zvýšení odporu. Všechny tyto vzorky měly velmi dobrou stabilitu a tyto naměřené hodnoty měly zanedbatelnou

změnu odporů v rozmezí 1,3 – 3,6 %. U vzorku 2P byl během praní vodivý spoj porušen (*viz obr. 27*).

U vodivého TPU podle hodnot uvedených v tabulce lze vypočítat pokles odporu u vzorku 1T a u vzorků 2T a 4T došlo k nepatrnému zvýšení odporů. Všechny vzorky opět vykazovaly dobrou stabilitu a změna odporů byla v rozmezí 1 – 4,6 %. K přerušení vodivého spoje po praní došlo u materiálu 3T (*viz obr. 27*).

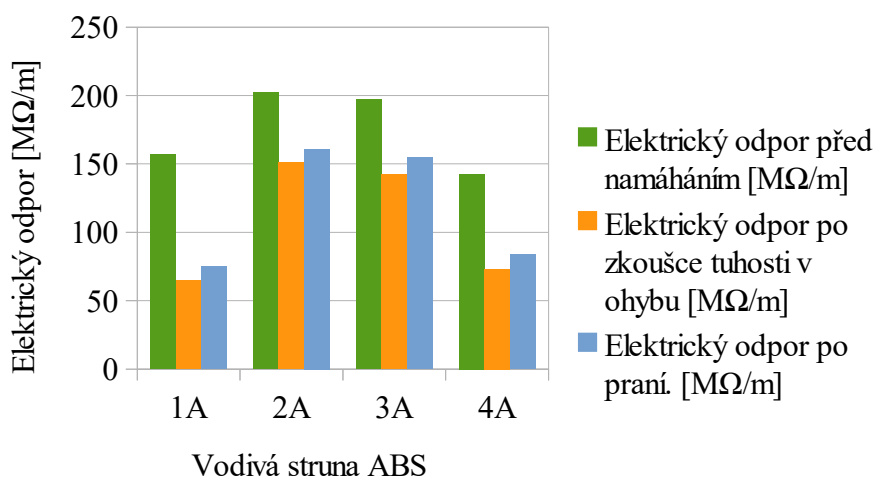
Tabulka 10: Změna elektrických odporů po praní.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti v ohybu [$M\Omega/m$]	64,7	150,9	142,2	73,3
Průměr nového elektrického odporu po praní [$M\Omega/m$]	74,7	161,1	154,7	83,6
Rozptyl [$M\Omega/m$]	358,27160	423,45679	397,16049	27,40741
Směrodatná odchylka [$M\Omega/m$]	18,92806	20,57807	19,92889	5,23521
Variační koeficient [%]	25,35	12,77	12,89	6,27
Rozdíl mezi el. odpory [$M\Omega/m$]	10,0	10,2	12,5	10,3
Rozdíl [%]	15,46	6,76	8,79	14,05
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti v ohybu [$k\Omega/m$]	149,1	125,3	141,8	149,3
Průměr nového elektrického odporu po praní [$k\Omega/m$]	151,8	PORUŠENO	136,7	147,3
Rozptyl [$k\Omega/m$]	1,60494	-	2,46914	5,30864
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	1,26686	-	1,57135	2,30405
Variační koeficient [%]	0,83	-	1,15	1,56
Rozdíl mezi el. odpory [$k\Omega/m$]	2,7	-	5,1	2,0
Rozdíl [%]	1,81	-	3,60	1,34
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti v ohybu [$k\Omega/m$]	524,7	286,4	327,3	508,4
Průměr nového elektrického odporu po praní [$k\Omega/m$]	505,1	299,6	PORUŠENO	514,2
Rozptyl [$k\Omega/m$]	94,19753	62,71605	-	495,30864
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	9,70554	7,91935	-	22,25553
Variační koeficient [%]	1,92	2,64	-	4,33
Rozdíl mezi el. odpory [$k\Omega/m$]	19,6	13,2	-	5,8
Rozdíl [%]	3,74	4,61	-	1,14

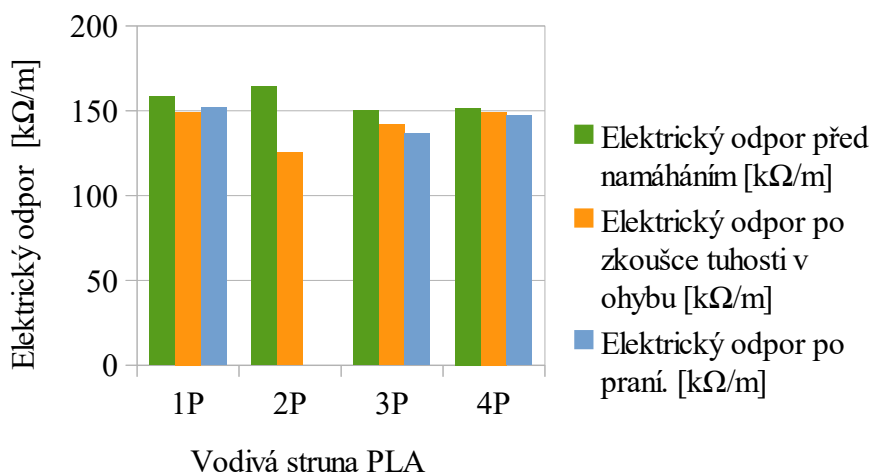
Hodnoty elektrických odporů po praní pro každou vodivou strunu jsou graficky vyobrazeny viz obr. 28 - 30. Z grafického znázornění (viz obr. 28) je vidět jednotlivé zvýšení elektrických odporů po praní pro vodivou strunu ABS. Z tohoto grafu lze vypočítat, že všechny vzorky po vyprání jeví podobné nárůsty elektrických odporů.

Hodnoty elektrického odporu pro PLA jsou graficky vyobrazeny na obr. 29 a lze potvrdit, že došlo k minimálnímu snížení odporů u vzorků 3P a 4P. U vzorku 1P je vidět naopak mírné zvýšení.

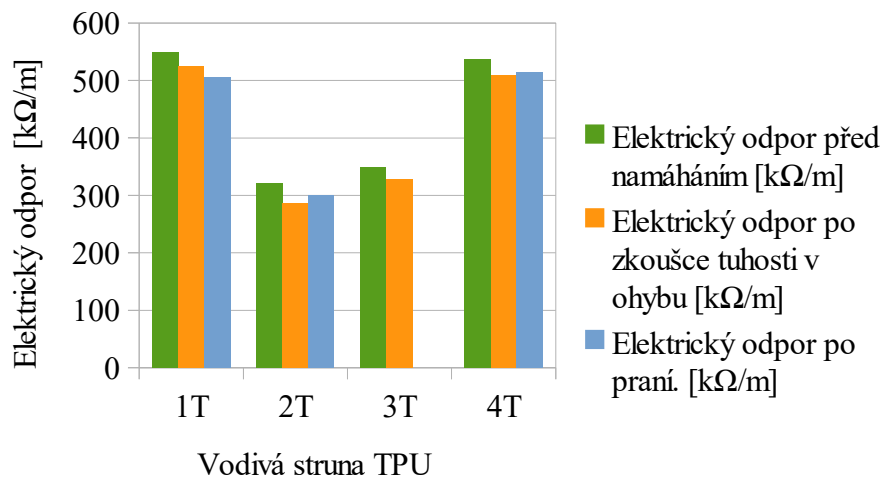
Elektrické odpory pro TPU jsou graficky znázorněny na obr. 30. Graf ukazuje, že u jediného vzorku 1T opravdu došlo k poklesu elektrického odporu. Vzorky 2T a 4T se podle grafu prokázaly nepatrným zvýšením odporu po vyprání.



Obrázek 28: Graf změny elektrického odporu po praní pro ABS.



Obrázek 29: Graf změny elektrického odporu po praní pro PLA.



Obrázek 30: Graf změny elektrického odporu po praní pro TPU.

Po tomto pracím cyklu lze říci, že nejlépe si vedly vzorky, které byly potištěné vodivou strunou PLA, kde hodnoty elektrického odporu se ukázaly být nejstabilnější a nejevily výrazné rozdíly mezi odpory. Dále lze tvrdit, že u vodivého TPU se také neprokázaly až tak velké rozdíly odporů. Výrobci deklarovali, že vodivá struna TPU by měla být nejvhodnějším materiálem na oděvy a mít dobrou přilnavost, ale podle výsledků i po údržbě odpovídá, že nejlepší je struna PLA. Při praní u těchto zmiňovaných vodivých strun došlo k poškození jednoho vzorku (*viz obr. 27*), u kterých se poté hodnota elektrického odporu nenaměřila a dále se s nimi neparuje. U vodivé struny ABS lze říct, že došlo u všech vzorků ke zvýšení jejich elektrických odporů o zhruba 10 - 12 MΩ/m. Jde ale o vodivou strunu, která během praní na textilních materiálech vydržela a nijak se nepoškodila. Tato struna není ale vhodná, protože má stále vysoký elektrický odpor.

7.2.3 Vyhodnocení nově naměřených hodnot tuhosti v ohybu

Nově naměřené výsledky zkoušky tuhosti v ohybu po vyprání jsou uvedeny v *tab. 11*. Všechny nové vyhodnocení potištěných vzorků na ohybovou tuhost z přístroje KES FB2 jsou vloženy v *příloze 11*.

Tabulka zobrazuje rozdíly hodnot ohybové tuhosti před a po praní (*viz tab. 11*). U vodivé PLA nelze určit rozdíl mezi hodnotami, protože vzorky byly opět nezměřitelné na přístroji KES FB2, a to i po vyprání. Můžeme tedy konstatovat, že jde o nejvyšší ohybovou tuhost ze všech použitých vodivých strun. Je to dáno jeho složením, které zajišťuje skvělou přilnavost vrstvy a mechanickou odolnost, jak je uvedeno v *tab. 3*.

Z rešeršní části víme, že ABS materiál všeobecně má dobrou odolnost vůči mechanickému poškození (*viz oddíl 2.2.1*). Z této tabulky lze toto tvrzení potvrdit, protože u ABS nedošlo k poškození vodivých spojů po údržbě. Stále platí, že u vodivé ABS jsou naměřená data druhá nejvyšší. Největší výkyvy ohybové tuhosti jevila právě vodivá struna ABS. U vzorku 1A a 3A došlo ke snížení tuhosti v ohybu – u vzorku 1A o 10,67 % a u vzorku 3A o 7,22 %. Naopak vzorky 2A a 4A měly hodnoty ohybové tuhosti zvýšené – u vzorku 2A došlo k zvýšení o 19,67 % a u vzorku 4A o 22,18 %.

O vodivé struně TPU víme z *tab. 4*, že by měl být vodivý materiál odolný vůči ohýbání, což se opět prokázalo ve všech případech. Ale stále se jedná o vodivý materiál, který má nejnižší naměřené hodnoty ohybové tuhosti. Jak lze vypožorovat z tabulky u vodivého TPU došlo k mírnějším rozdílům mezi hodnotami ohybové tuhosti. Ke zvýšení těchto dat došlo u vzorků 1T a 2T – u vzorku 1T došlo k minimálnímu zvýšení, a to o 2,22 %. A u vzorku 2T se zvýšila tuhost v ohybu o 6,21 %. Jediný pokles ohybové tuhosti zaznamenal vzorek 4T, ten se snížil o 19,66 %.

Žádný z měřených vzorků nedosáhl poškození vodivé drahy při ohýbání po praní.

Tabulka 11: Procentuální vyjádření rozdílů tuhosti v ohybu před a po praní.

ABS				
Vzorek	Původní hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Nová hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Rozdíly mezi vzorky [g× cm ² /cm]	Rozdíl [%]
1A	0,5351	0,4780	0,0571	10,67
2A	0,3834	0,4588	0,0754	19,67
3A	1,4552	1,3501	0,1051	7,22
4A	0,6236	0,7619	0,1383	22,18
PLA				
Vzorek	Původní hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Nová hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Rozdíly mezi nepotřštěným a potřštěným vzorkem [g× cm ² /cm]	Rozdíl [%]
1P	neměřitelné	neměřitelné	-	-
2P	neměřitelné	přerušeno	-	-
3P	neměřitelné	neměřitelné	-	-
4P	neměřitelné	neměřitelné	-	-
TPU				
Vzorek	Původní hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Nová hodnota tuhosti v ohybu [g× cm ² /cm]	Rozdíly mezi vzorky [g× cm ² /cm]	Rozdíl [%]
1T	0,3476	0,3553	0,0077	2,22
2T	0,3577	0,3799	0,0222	6,21
3T	1,3516	přerušeno	-	-
4T	0,5189	0,4169	0,1020	19,66

7.2.3.1 Změna elektrického odporu a finální vyhodnocení

Po tomto dalším namáhání na ohyb se opět vzorkům změřil elektrický odpor. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v *tab. 12* a všechny naměřené odpory v *příloze 12*.

Naměřené hodnoty elektrického odporu všech vodivých strun jsou uvedeny v *tab. 12*. U vodivé struny ABS po zkoušce tuhosti v ohybu po vyprání vzorků lze říci, že došlo u všech vzorků k větším poklesům odporů kromě vzorku 4A, kde došlo k zanedbatelné změně (4,55 %). Hodnota u vzorku 1A měla opět nejvyšší pokles odporu, který činil 32,53 %. Relativně nízký pokles měly vzorky 2A a 3A, kde se odpor po namáhání snížil o 11 – 13,5 %. Vzorky stále dosahují velkého odporu v $M\Omega$.

Vodivá PLA struna po namáhání na ohyb nejevila výrazné snížení odporů. U všech vzorků lze tvrdit, že stabilita byla dobrá a změny poklesu odporů byly v tomto případě zanedbatelné. Poklesy se pohybovaly kolem 0,3 – 2,5 %.

U poslední měřené vodivé struny TPU lze také říci, že se elektrický odpor po tomto namáhání také snížil. Nejvyšší pokles mezi elektrickými odpory měl vzorek 4T, kde se odpor snížil o 14,62%. K podobnému snížení došlo i u vzorku 2T, odpor se snížil o 13,95 %. U vzorku 1T došlo k nejnižšímu snížení, a to o 11,19%.

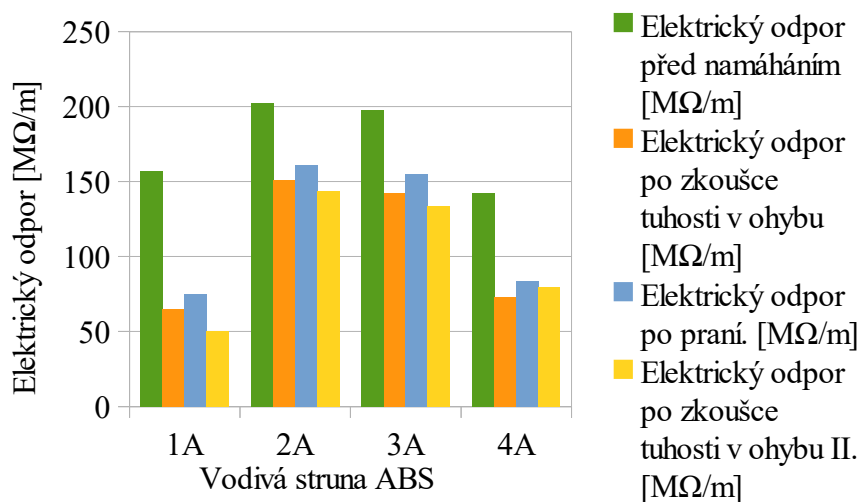
Tabulka 12: Změna elektrických odporů po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
Elektrické odpory po praní [MΩ/m]	74,7	161,1	154,7	83,6
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce tuhosti [MΩ/m]	50,4	143,6	133,8	79,8
Rozptyl [MΩ/m]	12,8	40,8	8,2	48,7
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	3,57771	6,38749	2,86356	6,97854
Variační koeficient [%]	7,10	4,45	2,14	8,75
Rozdíl mezi el. odpory [MΩ/m]	24,3	17,5	20,9	3,8
Rozdíl [%]	32,53	10,86	13,51	4,55
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
Elektrické odpory po praní [kΩ/m]	151,8	PORUŠENO	136,7	147,3
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce tuhosti [kΩ/m]	151,4	-	133,6	143,6
Rozptyl [kΩ/m]	2,3	-	4,8	0,8
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	1,51658	-	2,19089	0,89443
Variační koeficient [%]	1,00	-	1,64	0,62
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	0,4	-	3,1	3,7
Rozdíl [%]	0,26	-	2,27	2,51
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
Elektrické odpory po praní [kΩ/m]	505,1	299,6	PORUŠENO	514,2
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce tuhosti [kΩ/m]	448,6	257,8	-	439,0
Rozptyl [kΩ/m]	114,8	60,7	-	9,5
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	10,71448	7,79102	-	3,08221
Variační koeficient [%]	2,39	3,02	-	0,70
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	56,5	41,8	-	75,2
Rozdíl [%]	11,19	13,95	-	14,62

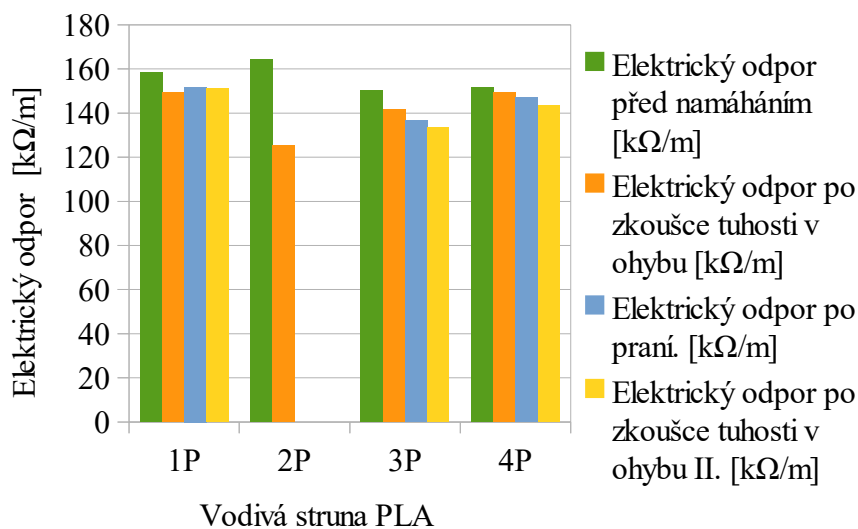
Hodnoty elektrických odporů po zkoušce tuhosti v ohybu po praní pro vodivou strunu ABS jsou graficky vyjádřeny na *obr. 31*. Z grafu lze vypožorovat nejvyšší pokles odporu, který opravdu měl po namáhání opět vzorek 1A. U vzorků 2A a 3A došlo k podobným poklesům. K nepatrné změně odporu, jak lze vidět z grafu, došlo u vzorku 4A.

Elektrické odpory pro vodivou PLA jsou graficky znázorněny na *obr. 32*. Podle grafu u všech vzorků došlo k zanedbatelným změnám odporů.

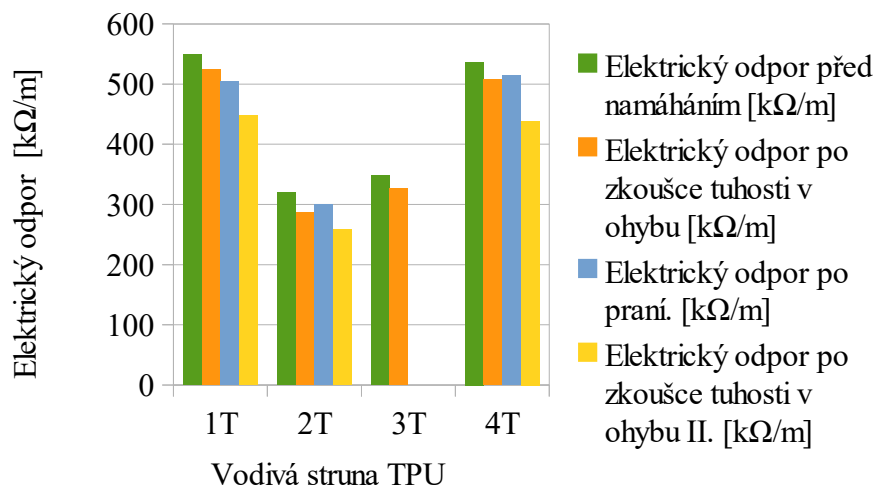
Naměřené hodnoty odporů pro TPU strunu jsou zobrazeny graficky na *obr. 33*. Z grafu se potvrzuje fakt, že všechny vzorky měli podobné změny elektrických odporů.



Obrázek 31: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro ABS.



Obrázek 32: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro PLA.



Obrázek 33: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro TPU.

Po opětovném namáhání vzorků na ohyb po vyprání lze potvrdit fakt, že vodivá struna PLA jevila nejlepší výsledky. Tato struna měla nepatrné rozdíly mezi odpory po namáhání a byla nejstabilnější. Vodivá struna TPU měla ohybovou tuhost po údržbě, ve srovnání s předchozím namáháním na ohyb, velké rozdíly elektrických odporů. ABS struna v tom případě opět prokázala větší snížení elektrických odporů. Tentokrát ale nedošlo k tak velkým změnám. Po prvním namáhání došlo u některých vzorků i o poloviční úbytek odporu. Po druhém ohybu po praní se u vzorku 1A, kde došlo k největšímu poklesu, snížil odpor pouze o třetinu.

7.3 Měření odolnosti v oděru

Pro realizaci měření odolnosti v oděru byl použit přístroj Martindale M235 (viz obr. 34).

Odolnost proti opotřebení je schopnost plošné textilie zachovat původní vzhled, tj. odolávat oděru, popřípadě dále rozvláknění, žmolkování a změně barevného odstínu při předepsaném plošném namáhání.

Cílem této zkoušky bylo zjištění zda se vodivé dráhy na použitých materiálech přeruší díky namáhání na oděr a jak se eventuálně změní jejich elektrický odpor. Elektrický odpor se měřil po zkoušce tehdy, pokud nebyla vodivá struna porušena během odírání při 20 000 otáčkách. Měření bylo provedeno kvalifikovaným pracovníkem TUL na katedře KOD.



Obrázek 34: Přístroj MARTINDALE M235.

Postup zkoušky:

Vzorky s natištěnými vodivými drahami se upevnily na odírací pevné stoly. Do čtyř držáků se vložily odštrihy odírací vlněné tkaniny – pod tkaninu se ještě vložila velikostně odpovídající podložka. Držáky se následně zatížily závažím. Konečný počet otáček byl nastaven na 20 000 pro všechny předložené vzorky. Stisknutím tlačítka START se přístroj uvede do pohybu. K přerušení měření by došlo tehdy, kdyby se vodivá struna na vzorku přerušila či odlepila dříve než by docílila 20 000 otáčkám. Dosáhne-li však zvoleného počtu otáček, tak se přístroj zastaví.

7.3.1 Vyhodnocení měření odolnosti v oděru

ABS

Prvními odíranými vzorky byly s vodivou strunou ABS. Jde o jedinou strunu, která se během tohoto namáhání nepoškodila či neodlepila a vydržela všech 20 000 otáček jak lze vypozorovat z *obr. 35*. Vzhled vodivé dráhy se nijak nezměnil a vzhled textilie je pro tentokrát nevýznamný. Pokud by nás ale vzhled textilie zajímal, tak k největším změnám došlo u vzorků 2A, kde došlo k mírné ztrátě šedého „chlupu“ a u vzorku 3A, kde se v místech namáhání odírala barva textilie.



Obrázek 35: Vzorky potištěné ABS strunou po zkoušce odolnosti oděru.

PLA

Další vzorky namáhané na oděr byly se strunou PLA. Z *obr. 36* lze vidět, že u všech vzorků došlo k poškození vodivé drahy. Vzorek 1P jevil nejlepších výsledků, dospěl 7 500 otáček a u tohoto vzorku došlo k trvalému přerušení. U vzorku 3P došlo pouze k odlepení a u vzorku 4P k přerušení drahy. Oba vzorky byly porušeny při pouhých 4 otáčkách.



Obrázek 36: Vzorky potištěné PLA strunou po zkoušce odolnosti oděru.

TPU

Poslední vzorky s vodivou strunou TPU zaznamenaly podobný výsledky jako PLA. Všechny vzorky vykazovaly známky porušení drahy jak ukazuje *obr. 37*. Vzorek 1T opět dosáhl nejlepších výsledků, přerušil se při 8 000 otáčkách. U vzorku 2T došlo k odlepení drahy již při 3 otáčkách. Vzorek 4T se odlepil po 30 otáčkách.



Obrázek 37: Vzorky potištěné TPU strunou po zkoušce odolnosti oděru.

7.3.1.1 Změna elektrického odporu po zkoušce odolnosti oděru a následné vyhodnocení

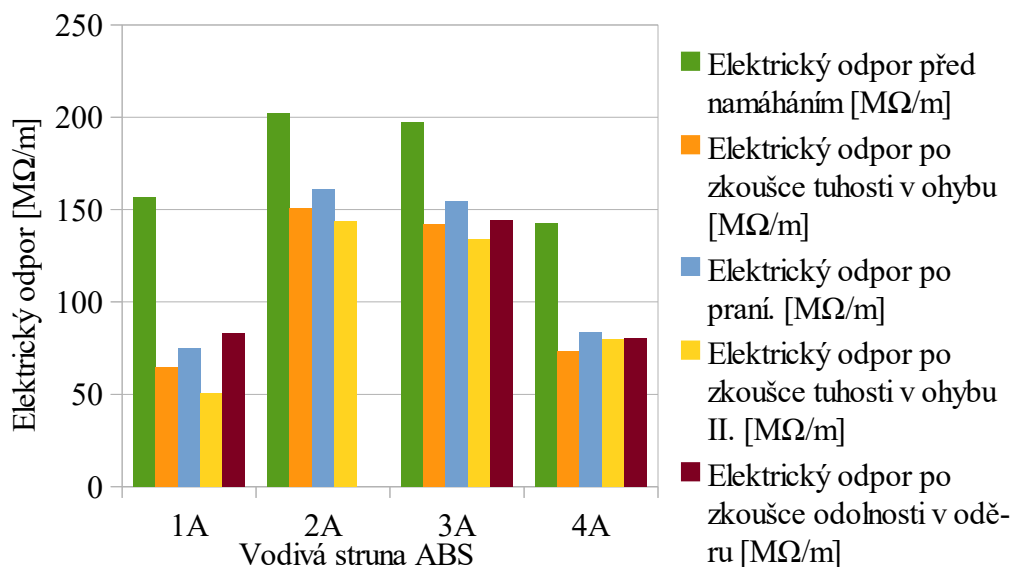
Po namáhání na oděr byly vzorkům přeměřeny elektrické odpory. Průměrné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 13. Všechny naměřené hodnoty odporů jsou dány v příloze 13.

U vodivé ABS struny si lze povšimnout z nově naměřených průměrných hodnot, že došlo ke zvýšení odporů u všech vzorků. U jediného vzorku 2A se hodnota nedala změřit – odpor šel změřit pouze na 2 cm drahy. Pravděpodobně došlo k vnitřnímu porušení ve vodivé struně. K nejvyššímu nárůstu elektrického odporu došlo u vzorku 1A, kde byl rozdíl až 65,08 % od předchozí naměřené hodnoty. U vzorku 3A došlo k nižšímu nárůstu odporu, a to o 7,77 %. Vzorek 4A vykazoval zanedbatelný nárůst odporu – pouze 0,75 %. Z tabulky je patrné, že vodivé PLA a TPU struny jsou trvale porušené, a tak se jejich elektrický odpor nedal změřit.

Tabulka 13: Změna elektrických odporů po zkoušce odolnosti v oděru.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti [MΩ/m]	50,4	143,6	133,8	79,8
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru [MΩ/m]	83,2	NENAMĚŘE - NO	144,2	80,4
Rozptyl [MΩ/m]	55,2	-	6,7	92,8
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	7,42967	-	2,58844	9,63328
Variační koeficient [%]	8,93	-	1,80	11,98
Rozdíl mezi el. odpory [MΩ/m]	32,8	-	10,4	0,6
Rozdíl [%]	65,08	-	7,77	0,75
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti [kΩ/m]	151,4	PORUŠENO	133,6	143,6
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru [kΩ/m]	PORUŠENO	-	PORUŠENO	PORUŠENO
Rozptyl [kΩ/m]	-	-	-	-
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	-	-	-	-
Variační koeficient [%]	-	-	-	-
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	-	-	-	-
Rozdíl [%]	-	-	-	-
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
Elektrické odpory po zkoušce tuhosti [kΩ/m]	448,6	257,8	PORUŠENO	439,0
Průměr nového elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru [kΩ/m]	PORUŠENO	PORUŠENO	-	PORUŠENO
Rozptyl [kΩ/m]	-	-	-	-
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	-	-	-	-
Variační koeficient [%]	-	-	-	-
Rozdíl mezi el. odpory [kΩ/m]	-	-	-	-
Rozdíl [%]	-	-	-	-

Hodnoty elektrických odporů po zkoušce odolnosti oděru jsou pro vodivou ABS strunu graficky zaznamenány na *obr. 38*. Při pohledu na graf je patrné, že u vzorku 1A došlo opravdu k největšímu nárůstu odporu, více jak o třetinu. Vzorek 3A měl mnohem nižší nárůst než lze vypočítat u vzorku 1A. Poslední vzorek 4A prokázal zanedbatelně malé zvýšení odporu.



Obrázek 38: Graf změny elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru pro ABS.

Po namáhání vzorků na oděr lze říci, že nejlepší odolnost měly vzorky ABS, které vydržely stanovený počet otáček. Měly tedy velmi dobrou trvanlivost a přilnavost. U jediného vzorku 2A nešla naměřit hodnota elektrického odporu v celé délce drahy, došlo pravděpodobně k nějakému vnitřnímu poškození vodivé struny. Všechny vzorky vykazovaly nárůst odporů. Vodivé drahy, potištěné PLA a TPU strunami, se u všech vzorků během odírání porušily. Nejlepších výsledků však vykazovaly vzorky, které byly natištěny na materiál č. 1. Je možné, že tento materiál dosahoval lepších výsledků díky své hustější struktuře.

Diskuze výsledků

Experimentální část se v prvním kroku zaměřovala na realizaci tvorby vodivé drahy pomocí 3D tisku na textilní materiály. Podkladové materiály byly vybrány experimentálně vzhledem k jejich struktuře. Na všechny vybrané textilní materiály byla aplikována vodivá ABS struna a subjektivně se hodnotila přilnavost drah. Ze 17 vybraných materiálů byly nejvhodnější tyto 4 textilní materiály: tkanina plátňové vazby (1), softshellový materiál (2), tkanina s keprovou vazbou (3) a tkanina s vazbou kohoutí stopy (4). Tyto materiály vykazovaly po subjektivní zkoušce přilnavosti nejlepší trvanlivost vodivých drah před jakýmkoliv namáháním. Všechny vybrané materiály potvrzovaly fakt, který jsme se dozvěděli v teoretické části, že nejlépe vodivé struny drží na materiálech, které jsou chlupatější, drsnější a hrubší struktury. V neposlední řadě byly na tyto materiály aplikovány další zaopatřené vodivé struny, a to PLA a TPU.

V této části se ověřovaly elektrické odpory u jednotlivých vodivých strun. Zkoumalo se, jestli má vliv okolní teplota na velikost elektrického odporu – odpor se měřil při teplotě 21°C a 5°C. A z výsledků se zjistilo, že vliv okolní teploty neovlivňuje chování strun před potiskem na textilní materiály, ale byla vyzorována poměrně velká variabilita dat z naměřených odporů u jednotlivých strun. Nejvyšších hodnot v obou případech teplot okolí byla vyzorována u ABS struny – při teplotě 21°C byl variační koeficient téměř 17%, při 5°C měla variační koeficient 22,22 %. Nejlepší výsledky se prokázaly u PLA struny, kde ale byl při 21°C variační koeficient 16,56 % mezi daty. Při 5°C měla tato struna variační koeficient 13,36 %. U TPU struny je patrné, že byla nejlepší z hlediska variability naměřených dat – při 21°C měla variační koeficient 11,12 % a při 5°C byl variační koeficient 12,65 %.

Při měření elektrického odporu před jakýmkoliv namáháním se zjistilo, že vodivé struny TPU a ABS vykazovali velkou variabilitu mezi jednotlivými textilními materiály. Variační koeficient pro TPU odpovídal 27,56 %, což byla největší změna elektrického odporu v závislosti na struktuře. U vzorků potištěné TPU byly vyzorovány největší rozdíly, některé vzorky měly skoro až poloviční změny odporů vzhledem ke struktuře. Vodivá ABS struna měla nejvyšší odpor, který dosahoval $M\Omega$, tudíž tato vodivá struna

je pro tento druh tisku na textil nepoužitelná a její variační koeficient dosahoval téměř 17 %. Bylo zjištěno, že vzorky 1A a 4A měly téměř o čtvrtinu menší hodnoty odporů než zbylé vzorky. Podkladový materiál by však neměl mít vliv na rozdílnost odporů při stejném potištění strunou. Mohlo to být způsobeno pravděpodobně nestejným složením nebo vlivem struktury textilního materiálu. Vodivá struna PLA naopak měla nejstabilnější a nejnižší hodnoty elektrického odporu, její variační koeficient byl 4,15 %. PLA potvrdil fakt, že struna má homogennější strukturu, jeho variabilita mezi materiály byla menší a je tedy lépe vyrobena. Zjistilo se, že díky těmto výsledkům je téměř jedno na jakou strukturu se PLA struna potiskne, musí ale mít drsnější, chlupatější nebo hrubší strukturu.

Při zjištění vysoké variability mezi materiály se provedlo ověření u vodivé ABS struny. Na všechny textilní materiály se natisklo 5 drah a změřil se jejich odpor při 21°C. Pozorovala se variabilita mezi jednotlivými vzorky a zjišťovalo se jestli textilní materiál může mít vliv na velikost odporu. Z výsledků bylo patrné, že celkem nízkou variabilitu měl softshellový materiál (2A), jehož variační koeficient byl 5,78%. Za to největší variabilitu dat dosahovala tkanina plátňové vazby (obleková textilie – 1A), variační koeficient byl až 24,18 %. U těchto dvou vzorků šlo konkrétně vyzorovat více jak dvojnásobný rozdíl elektrického odporu. Zde se potvrdil fakt, že variabilita mezi jednotlivými textilními materiály je a má tedy vliv na velikost odporu.

Dále se v této části zjišťoval vliv okolní teploty na velikost odporu, kdy se vzorky vložily do chladicí komory, kde bylo 5°C. U všech vzorků došlo k nárůstu odporů. Výrazné navýšení elektrického odporu bylo u vzorku 4A, kde došlo ke zvýšení o téměř třetinu – variační koeficient vzorku byl 25,34 %. Další vzorek s větší variabilitou dat byl 3A, který měl variační koeficient 18,08 %. U vzorků 1A a 2A šla vyzorovat podobná variabilita, jejich variační koeficienty byly 15,19 % a 14,12 %. Zjistilo se tedy, že teplota okolí má významný vliv na velikost odporu a že pro uživatele, který by chtěl oděv se zabudovanou elektronikou, je lepší využít takto aplikované drahy za vyšších okolních teplot.

Dalším krokem experimentální části bylo odzkoušení trvanlivosti a životnosti vodivých drah. Práce se zaměřila na zkoušky, které simulovaly běžné nošení a údržbu, šlo konkrétně o měření tuhosti v ohybu, praní a odolnost v oděru.

Zkouška tuhosti v ohybu a praní

Vzorky byly na tuhost v ohybu měřeny na přístroji KES FB2 za nastavených standardních podmínek. V první fázi se zjistilo, že textilní materiály, které nejsou potištěné mají nižší ohybovou tuhost než ty potištěné – ty dosahovaly větší ohybové tuhosti díky vodivému spoji, který textilní materiál zpevňuje. Například u ABS struny byl rozdíl v ohybové tuhosti mezi vzorkem 4A a nepotištěným vzorkem č. 4 až dvojnásobný, což byl největší nárůst tuhosti u této struny. Za to u vzorku 3A a nepotištěného vzorku č. 3 byl rozdíl pouze 15,42 %. Ve druhé fázi se přišlo na to, že vodivá struna PLA měla nejvyšší ohybovou tuhost, její hodnota se na přístroji KES FB2 nedala naměřit. Nejdeálnější ohybovou tuhost vykazovala vodivá struna TPU, kde naměřené hodnoty byly nejnižší. Příkladem u vodivé TPU struny byl rozdíl v ohybové tuhosti mezi vzorkem 4T a nepotištěným vzorkem č. 4 nejvyšší, a to o 149,11 %. Za to u vzorku 3A a nepotištěného vzorku č. 3 byl rozdíl pouze 7,20 %. Během ohýbání nedošlo k žádnému poškození vodivých drah. Po tomto namáhání byly elektrické odpory u všech vodivých strun snižené. Teoreticky by po namáhání na ohyb nemělo dojít ke snížení odporů. Mohlo to však být ovlivněno opět homogenitou rozložení vodivých částic ve strunách a strukturou textilních materiálů. K největšímu poklesu odporu došlo u vodivé struny ABS, kde se snížení u vzorků pohybovalo okolo 25 – 59 % oproti původním hodnotám. Nejlepších výsledků po tomto namáhání vykazovaly vodivé struny PLA a TPU, které měly zanedbatelné rozdíly mezi odpory. Výjimku tvořil textilní materiál č. 2, kde byly u obou strun větší výkyvy – u PLA se vzorek snížil o 23,70 % a u TPU o 10,56 %. Z těchto výsledků se zjistilo, že i přestože PLA struna měla nezměřitelnou ohybovou tuhost, tak dosahovala nejlepších výsledků elektrického odporu.

V této části experimentu se vzorky podrobily údržbě, kdy program byl nastaven pro vlnu, při 30°C a počtu otáček 800. Po vyprání a následném usušení došlo k odlepení dvou vodivých drah od materiálu, šlo o vzorky 2P a 3T. ABS vodivá struna byla nepoškozena. Zjistilo se, že po tomto pracím cyklu na tom byly nejlépe vzorky potištěné

PLA strunou, kde hodnoty elektrického odporu se ukázaly být nejstabilnější a nejevily výrazné rozdíly mezi odpory – změna odporů byla v rozmezí 1,3 – 3,6 %. U TPU se prokázala relativní stabilita vzorků a nejevily se výraznější změny mezi odpory – rozmezí kolem 1 – 4,6 %. I když bylo výrobcí deklarováno, že by vodivá TPU struna měla být nejvhodnějším materiálem na oděvy a mít dobrou přilnavost, tak podle námi dosažených výsledků i po údržbě odpovídá, že nejlepší je struna PLA. Dále se přišlo na to, že u ABS došlo k velkému nárůstu odporů u všech vzorků (cca 10 – 12 M Ω /m), a tak není tato struna vhodná pro tisk na textil, jelikož má vysoký elektrický odpor.

Po druhém změření ohybové tuhosti se zjistilo, že všechny vodivé struny vykazují relativně dobrou odolnost vůči mechanickému poškození vzhledem k ohybu. Nejvyšší ohybovou tuhost měla opět PLA struna, která se nedala změřit na přístroji KES FB2. Nejnižší ohybovou tuhost měla opět vodivá struna TPU. Během ohýbání nedošlo k žádnému poškození vodivých drah. Z následného změření elektrických odporů u ABS struny se došlo k závěru, že nejvyšší pokles odporu měl vzorek 1A, který se snížil o 32,53 %. K zanedbatelné změně odporu došlo u vzorku 4A. U vzorků 2A a 3A došlo k nižším změnám odporů, a to o 11 – 13,5 %. Vodivá PLA struna dále potvrzovala svou dobrou stabilitu a změna hodnot odporů byla opět zanedbatelná, poklesy se pohybovaly v rozmezí 0,3 – 2,5 %. U vodivé TPU struny se také snížily elektrické odpory, změna odporů se u vzorků pohybovala kolem 11 – 14,6 %. Tato struna měla ohybovou tuhost po údržbě, ve srovnání s předchozím namáháním na ohyb, velké rozdíly elektrických odporů.

Z této celkové zkoušky se zjistilo, že nejvhodnějším vodivým materiálem by měla být struna PLA. I když se jevila jako nejužší, jelikož se nedala na přístroji KES FB2 naměřit její ohybová tuhost, tak hodnoty a změny elektrických odporů byly nejstabilnější. Z důvodu velké tuhosti by se tato struna musela použít na místech, kde nedochází k velkému namáhání na ohyb.

Zkouška odolnosti v oděru

Další zkouškou byla odolnost v oděru, která se měřila na přístroji Martindale M235. V první části se zkoumalo, zda se vodivá dráha vlivem tohoto namáhání poškodí a pokud k poškození dojde, tak při kolika otáčkách. Zjistilo se, že nejlépe na tom byly

vzorky potištěné ABS strunou. Tyto vzorky se nijak nepoškodily do stanoveného počtu otáček, tedy do 20 000. Vzhled vodivých drah (povrchu) se nezměnil. Velké zklamání přišlo u vzorků potištěné hlavně PLA strunou, které jinak prokazovaly nejlepší výsledky z předchozích zkoušek. U všech vzorků došlo k poškození drah. Nejlepších výsledků vykazoval vzorek 1P, kde se vodivá draha přerušila při 7 500 otáčkách. Zbylé vzorky se porušily takřka hned (po 4 otáčkách). Vodivá TPU struna měla podobný dopad jako PLA. Opět se jevil jako nejlepší vzorek 1T, u kterého došlo k přerušení drahy po 8 000 otáčkách. Ostatní vzorky se porušily také hned ze začátku – vzorek 2T po 3 otáčkách, vzorek 4T po 30 otáčkách. Vzorky, které měly nejlepší výsledky na materiálu č. 1 u těchto vodivých strun, mohly dosahovat těchto výsledků díky své hustější struktuře.

V druhé části se měřil elektrický odpor, a to pouze u vzorků potištěných ABS strunou. U zbylých strun došlo trvale k porušení drah, proto už se odpor dál neměřil. Z naměřených dat odporů se zjistilo, že nejlepší hodnoty měl vzorek 4A, u kterého došlo k zanedbatelné změně odporu (pouze 0,75 %). Nejvyšší zvýšení odporu došlo u vzorku 1A, zde se odpor zvýšil o 65,08 % od předchozí hodnoty odporu. Vzorek 3A měl také nižší nárůst odporu, a to o 7,77 %. U vzorku 2A se zjistilo, že se hodnota nedala změřit po celé délce natištěné drahy. Došlo pravděpodobně k vnitřnímu poškození uvnitř vodivé struny. Šlo nám pouze naměřit odpor na kraji potištěné drahy kolem 2 cm.

Z této zkoušky se zjistilo, že PLA vodivá struna není tolik odolná vůči odírání, i když v jiných zkouškách se prokazovala jako nejideálnější struna, která se dá použít na textil. Zvýšením přilnavosti u PLA se zabýval výzkum T. Spahua a spol (*viz kapitola 4.1*), kde se zjistilo, že se přilnavost zlepšila díky zvýšení teploty (trysky) při tisku, která tu přilnavost také značně ovlivňuje. V tomto výzkumu taky přišli na to, že by se přilnavost mohla zlepšit při zvýšení teploty vyhřívané podložky. Těmito způsoby by se mohlo docílit vyšší přilnavosti vodivé drahy na textilu, a tím by mohly více odolávat namáhání na oděr. Z hlediska odolnosti v oděru se zjistilo, že ideální vodivá struna by měla být ABS, u této struny nedošlo k žádnému viditelnému poškození, ale z hlediska vysokého elektrického odporu není vhodná.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala aplikací 3D tisku pro tvorbu vodivých drah na textilní materiály.

Teoretická část byla zaměřena v prvních kapitolách na 3D tisk, její historii, metody a nejčastěji využívané materiály pro 3D tisk na textil. V další části se zabývala všeobecně vodivými drahami a stručně se zde charakterizovaly vlastnosti vodivých drah dle typu použité technologie jako je např. šití, vyšívání, inkoustový tisk nebo 3D tisk. V neposlední řadě byly v teoretické části stručně popsány různé výzkumy, které se zabývaly touto problematikou vodivých drah.

Cílem práce bylo zjištění zda se 3D vodivý tisk dá aplikovat na textilní materiály, najít vhodné textilní materiály a vodivé struny k tomu určené, a následně odzkoušet jejich trvanlivost z hlediska užívání a údržby. Proto se experimentální část rozdělila do dvou částí.

V první části byly námi subjektivně vybrány 4 textilní materiály, a také vodivé struny na základě velikosti elektrického odporu (podle dostupnosti v ČR). Vybrané struny – ABS, PLA a TPU – byly aplikovány na námi vybrané textilní materiály.

Po aplikaci vodivých drah na textilie se zjistilo, že struktura textilních materiálů ovlivňuje velikost elektrického odporu před jakýmkoliv namáháním, což se konkrétně prokázalo u ABS a TPU. Za to PLA se jevila jako nejlepší a nejstabilnější, co se týče změn odporů v rámci struktury. Při ověřování variability u ABS struny se zkoumal i vliv okolní teploty a zjistilo se, že pro uživatele, který by chtěl takto aplikované drahy s nositelnou elektronikou, je lepší a výhodnější využití při vyšších teplotách (21°C a více). Při těchto teplotách dosahují drahy menších elektrických odporů než při 5°C a méně. Důležité je si dávat pozor kam si takový oděv uživatel obleče, jelikož při nižších teplotách může dojít k výraznému zvýšení odporů a nemusí se signál správně přenést nebo také vůbec.

Z analýzy výsledků po ohybu a údržbě vyplynulo, že vodivá struna PLA se jevila jako nejstabilnější vzhledem k změnám elektrického odporu. Během ohybu PLA dosahovala příliš velké ohybové tuhosti, a tak vzorky nebylo možno změřit na přístroji KES FB2, ale vzhledem ke změnám elektrických odporů se jevila jako nejlepší. Při

testování odolnosti v oděru se zjistilo, že nejlépe na tom byla struna ABS, která nebyla porušená, ale stále dosahovala vysokých odporů a jejich největších změn. Je tedy pro tento druh tisku na textil nepoužitelná. U PLA a TPU došlo u všech vzorků k poškození – jediný vhodnější materiál se zjistil, že by mohl být materiál č. 1, kde vodivé drahy vydržely skoro polovinu množství stanovených otáček.

Závěrem tedy vyplývá, že z odzkoušených tří vodivých strun, které jsou v současnosti nejpreferovanější výrobci, by dle většiny výsledků měla být struna PLA. Pokud bychom chtěli použít vodivou strunu PLA, doporučila bych ji aplikovat na místa, kde jak nedochází k velkému ohýbání, tak aby nedocházelo i k odírání. Ideálně tvar rovné linie, kde nemůže docházet k výraznému odírání mezi jinou částí oděvu.

Použití by mohlo fungovat například na nízkopříkonová čidla. Příkladem je teplotní čidlo od firmy Microchip, které by při použití 4 vodičové metody mohlo být použitelné. Jedná se o analogové čidla teploty, převádějící teplotu na výstupní napětí. Čidla od této firmy mají typickou spotřebu 6 μA , tak by se na přírodních drátech ztratilo při 100 $\text{k}\Omega$ cca 0,6 V. Toto čidlo konkrétně může mít napájení od 2,3 V do 5,5 V, tudíž by se na dvou drátech ztratilo cca 1,2 V. Výstupní napětí čidla odpovídá okolní teplotě na základě teplotního koeficientu, který dává u varianty MCP9700 až 10 $\text{mV}/^\circ\text{C}$ a u varianty MCP9701 téměř 20 $\text{mV}/^\circ\text{C}$. [41]

Při této práci, kdy se před dvěma lety začínalo, byla dostupná pouze struna ABS, která dosahuje $\text{M}\Omega$. Během práce jsem však byla schopna zakoupit další dvě struny PLA a TPU, které už dosahují řádově odporu v $\text{k}\Omega$. Díky těmto výsledkům jsme si vědomi, že elektrický odpor je dost vysoký a struny mají tedy nízkou vodivost, ale vývoj jde neustále dopředu. Je tu předpoklad, že v budoucnu budou výrobci schopni vyrábět struny, které budou ideálnější pro použití v elektrických obvodech pro nositelnou elektroniku a budou schopni eliminovat tuto nevýhodu nízké vodivosti. Ideální by bylo dostat se na jednotky $\text{k}\Omega$ (jako je hodnota odporu deklarovaná výrobcem u TPU – 1,5 $\text{k}\Omega/\text{m}$) nebo Ω . V tu chvíli by bylo možné v takové to velikosti elektrického odporu vodivé drahy použít například na rozsvícení LED DIOD, protože ta dioda má takovou velikost elektrického odporu, který umožňuje přechod tou strunou – ta zase umožňuje takovou hodnotu elektrického proudu, která diodu rozsvítí.

Použitá literatura

- [1] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [2] *The Free Beginner's Guide* [online]. 2018 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- [3] *History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)* [online]. 2018 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>
- [4] KADLEC, Martin. *Reprodukce objektů pomocí 3D tisku v hyperbarickém prostředí* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GYSWodITcQYJ:https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130223283+&cd=2&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce Mgr. David Vondrášek.
- [5] *What is 3D Printing?* [online]. [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#sla>
- [6] DOLENSKÝ, Zoltán. *Optimalizace 3D tisku SLS technologií* [online]. Liberec, 2019 [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153236/Bakalarska_Prace_Zoltan_Dolensky_2019.pdf. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
- [7] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. Nový Jičín, Ostrava, 2018 [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [8] SANTGAR, R.H., CHRISTINE, C., NIERSTRASZ, V. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters, *Applied Surface Science*, vol. 403, pp. 551-563, 2017.

- [9] *E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing* [online]. 2000 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://cba.mit.edu/docs/papers/00.07.E-broidery.pdf>
- [10] Corral, Laura C. and Walker, Kaitlyn J., "Exploring the Abilities of 3D Printing and its Viability for Consumption in the Fashion Industry" (2017). Apparel Merchandising and Product Development Undergraduate Honors Theses. 1.
<http://scholarworks.uark.edu/ampduht/1>
- [11] *3D Printing in Modern Fashion Industry* [online]. Heriot Watt University, UK, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://irispublishers.com/jtsft/fulltext/3d-printing-in-modern-fashion-industry.ID.000535.php>
- [12] *Přehled materiálů pro 3D tisk* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>
- [13] *Encyklopedie 3D tisku* [online]. Vydavatelství Nová média, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [14] *TPU* [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/tpu/>
- [15] *The state-of-art Smart Textiles* [online]. India [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.ptj.com.pk/Web%202004/08-2004/Smart%20Textiles.html>
- [16] *Co to jsou smart textilie?* [online]. 2008 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/68946>
- [17] MATHER, Robert R. Intelligent textiles. *Coloration technology* [online]. 2001, , 6 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://dev.sdc.org.uk/knowledgevault/chris/2001RP036.pdf>
- [18] *Smart Textiles* [online]. Ghent University [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.ugent.be/ea/match/textiles/en/research/researchtopics/smart-textiles/overview.htm#projecten>
- [19] *What is PolyJet Technology?* [online]. Stratasys [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/polyjet-technology>
- [20] *PolyJet Technology* [online]. Computer Aided Technology [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://www.cati.com/3d-printing/polyjet-technology/>

- [21] RIUS, Josep, Salvador MANICH, Rosa RODRÍGUEZ a Miquel RIDAO. *Electrical Characterization of Conductive Ink Layers on Textile Fabrics: Model and Experimental Results* [online]. , 6 [cit. 2020-01-03]. DOI: Josep Rius1 , Salvador Manich1 , Rosa Rodríguez1 , Miquel Ridao2 ,. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.610.3491&rep=rep1&type=pdf>
- [22] KORGER, M., BERGSCHNEIDER, J., LUTZ, M., MAHLTIG, B., FINSTERBUSCH, K., RABE, M. Possible Applications of 3D Printing Technology on Textile Substrates, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. vol. 141, no. 012011, 2016.
- [23] SPAHIU, T., GRIMMELSMANN, N., EHRMANN, A., EHRMANN. Effect of 3D printing on textile fabric, 1st International Conference Engineering and Entrepreneurship (ICEE), At Tirana /Albania, Volume: 1, 2017.
- [24] DIAS, T. *Electronic textiles: smart fabrics and wearable technology*. Woodhead Publishing series in textiles . Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 9780081002018, 2015.
- [25] Kazani, Ilda & Hertleer, Carla & Mey, Gilbert & Schwarz-Pfeiffer, Anne & Guxho, Genti & Van Langenhove, Lieva. (2012). *Electrical Conductive Textiles Obtained by Screen Printing*. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 20.
- [26] VILÍMOVSKÝ, Daniel. *Návrh výroby pouzdra analogových hodinek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191978. BP. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D
- [27] *Elektrický odpor* [online]. 2019 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_odpor
- [28] *ABS Conductive filament černá 1,75 mm 1 kg* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/ABS-Conductive-filament-cerna-1-75-mm-1-kg-d76.htm>
- [29] *PLA Conductive filament Proto-Pasta černá 1,75 mm 0,5 kg* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/PLA-Conductive-filament-Proto-Pasta-cerna-1-75-mm-0-5-kg-d221.htm>
- [30] *Creality CP-01 3v1* [online]. Alza [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/creality-cr-100?dq=5663677#popis>

- [31] *PARKSIDE® Digitální multimetr PDM 300 C2* [online]. [cit. 2021-02-20].
Dostupné z: <https://www.setrikacky.cz/produkt/parkside-digitalni-multimetr-pdm-300-c2/>
- [32] *Průvodce materiály* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z:
<https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [33] PLIC, Václav. *Testování parametrů síťotiskových past pro textilní substráty Václav* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z:
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27824/1/BP%20Plic%20Vaclav.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Tomáš Bystřický.
- [34] NEZHYBOVÁ, Jana. *Tisk vodivých inkoustů na textilní materiály* [online].
Liberec, 2014 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z:
https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/112590/V_02214_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Ladislav Torčík.
- [35] ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/28412?mode=full>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
- [36] *3D tisk – Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. 3D inventorblog, 2017 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
- [37] Shahariar, Hasan & Kim, Inhwan & Soewardiman, Henry & Jur, Jesse. (2019). Inkjet Printing of Reactive Silver Ink on Textiles. ACS Applied Materials & Interfaces. 11. 10.1021/acsami.8b18231.
- [38] Unger, Lena & Scheideler, Marvin & Meyer, Pia & Görzen, Andreas & Wortmann, Martin & Dreyer, Axel & Ehrmann, Andrea. (2018). Increasing Adhesion of 3D Printing on Textile Fabrics by Polymer Coating. *Tekstilec*. 61. 265-271. 10.14502/Tekstilec2018.61.265-271.

[39] *NinjaTek NT Eel Midnight 1,75 mm 0,5 kg* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny-antistaticke-a-vodive/ninjatek-nt-eel-midnight-1-75-mm-0-5-kg/>

[40] PENTEK, Attila, Miklos NYITRAI, Adam SCHIFFER, Hajnalka ABRAHAM, Matyas BENE, Emese MOLNAR, Roland TOLD a Peter MAROTI. The Effect of Printing Parameters on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of PLA and ABS Based Carbon Composites in Additive Manufacturing of Upper Limb Prosthetics. *Crystals*. 2020, , 13.

[41] MCP9700. *Microchip* [online]. [cit. 2021-8-24]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP9700>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip SLA technologie [7].....	13
Obrázek 2: Princip FDM technologie [7].....	14
Obrázek 3: Princip SLS a DMLS technologie [7].....	15
Obrázek 4: Princip DLP technologie [7].....	16
Obrázek 5: Princip PolyJet technologie [26].....	17
Obrázek 6: Tisk ABS. [32].....	19
Obrázek 7: Tisk PLA. [32].....	19
Obrázek 8: Tisk PETG. [32].....	20
Obrázek 9: LifeShirt® [24].....	29
Obrázek 10: Inteligentní návlek na kolena [24].....	30
Obrázek 11: miCoach™ [24].....	31
Obrázek 12: Graf elektrických odporů při zkoumání vlivu okolní teploty pro jednotlivé vodivé struny.....	45
Obrázek 13: Tiskárna Creality CP – 01. [30].....	46
Obrázek 14: 3D tvar tištěné vodivé drahy.....	47
Obrázek 15: Ukázka tisku na membránový materiál.....	47
Obrázek 16: Měřicí přístroj elektrického odporu - multimetr PDM 300 C2 (PARKSIDE). [31].....	48
Obrázek 17: Elektrické odpory po potisku před namáháním.....	52
Obrázek 18: Graf elektrických odporů při zkoumání vlivu okolní teploty pro ABS.....	54
Obrázek 19: Přístroj KES FB2.....	55
Obrázek 20: Podmínky měření ohybových charakteristik.....	56
Obrázek 21: Ukázka vyhodnocení z ohybové charakteristiky vzorku 1A - obleková textilie.....	56
Obrázek 22: Použité materiály před namáháním na ohyb - bez spoje.....	57
Obrázek 23: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro ABS....	63
Obrázek 24: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro PLA....	64
Obrázek 25: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu pro TPU....	64
Obrázek 26: Automatická pračka MIELE W 1754.....	65
Obrázek 27: Porušené vodivé drahy po praní - vzorky 2P a 3T.....	66
Obrázek 28: Graf změny elektrického odporu po praní pro ABS.....	69

Obrázek 29: Graf změny elektrického odporu po praní pro PLA.....	69
Obrázek 30: Graf změny elektrického odporu po praní pro TPU.....	70
Obrázek 31: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro ABS.....	75
Obrázek 32: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro PLA.....	75
Obrázek 33: Graf změny elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě pro TPU.....	76
Obrázek 34: Přístroj MARTINDALE M235.....	77
Obrázek 35: Vzorky potištěné ABS strunou po zkoušce odolnosti oděru.....	78
Obrázek 36: Vzorky potištěné PLA strunou po zkoušce odolnosti oděru.....	79
Obrázek 37: Vzorky potištěné TPU strunou po zkoušce odolnosti oděru.....	80
Obrázek 38: Graf změny elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru pro ABS.....	82
Obrázek 39: Materiál 1 – membránový dvouvrstvý laminát.....	102
Obrázek 40: Materiál 2 – membránový dvouvrstvý laminát.....	102
Obrázek 41: Materiál 4 – zátěrový materiál.....	102
Obrázek 42: Materiál 3 – zátěrový materiál.....	102
Obrázek 43: Materiál 5 – zátěrový materiál.....	102
Obrázek 44: Materiál 6 – membránový materiál.....	102
Obrázek 45: Materiál 8 – zátěrový materiál.....	103
Obrázek 46: Materiál 7 – membránový materiál.....	103
Obrázek 47: Materiál 9 – zátěrový materiál.....	103
Obrázek 48: Materiál 10 – membránový dvouvrstvý laminát.....	103
Obrázek 49: Materiál 12 – zátěrový materiál.....	103
Obrázek 50: Materiál 11 – membránový dvouvrstvý laminát.....	103
Obrázek 51: Materiál 13- tkanina.....	104
Obrázek 52: Povrchové vlastnosti materiálu č. 1.....	105
Obrázek 53: Povrchové vlastnosti materiálu č. 2.....	105
Obrázek 54: Povrchové vlastnosti materiálu č. 3.....	105
Obrázek 55: Povrchové vlastnosti materiálu č. 4.....	105
Obrázek 56: Ohybové charakteristiky vzorku 1 - obleková textilie.....	109
Obrázek 57: Ohybové charakteristiky vzorku 2 - softshell.....	109

Obrázek 58: Ohybové charakteristiky vzorku 3 - tkanina keprové vazby.....	110
Obrázek 59: Ohybové charakteristiky vzorku 4 - tkanina s kohoutí stopou.....	110
Obrázek 60: Ohybové charakteristiky vzorku 2A.....	110
Obrázek 61: Ohybové charakteristiky vzorku 3A.....	111
Obrázek 62: Ohybové charakteristiky vzorku 4A.....	111
Obrázek 63: Ohybová charakteristika vzorku 1P.....	111
Obrázek 64: Ohybová charakteristika vzorku 2P.....	112
Obrázek 65: Ohybová charakteristika vzorku 3P.....	112
Obrázek 66: Ohybová charakteristika vzorku 4P.....	112
Obrázek 67: Ohybová charakteristika vzorku 1T.....	113
Obrázek 68: Ohybová charakteristika vzorku 2T.....	113
Obrázek 69: Ohybová charakteristika vzorku 3T.....	113
Obrázek 70: Ohybová charakteristika vzorku 4T.....	114
Obrázek 71: Ohybová charakteristika vzorku 1A po praní.....	116
Obrázek 72: Ohybová charakteristika vzorku 2A po praní.....	117
Obrázek 73: Ohybová charakteristika vzorku 3A po praní.....	117
Obrázek 74: Ohybová charakteristika vzorku 4A po praní.....	117
Obrázek 75: Ohybová charakteristika vzorku 1P po praní.....	118
Obrázek 76: Ohybová charakteristika vzorku 3P po praní.....	118
Obrázek 77: Ohybová charakteristika vzorku 4P po praní.....	118
Obrázek 78: Ohybová charakteristika vzorku 1T po praní.....	119
Obrázek 79: Ohybová charakteristika vzorku 2T po praní.....	119
Obrázek 80: Ohybová charakteristika vzorku 4T po praní.....	119

Seznam tabulek

Tabulka 1: Použité textilní materiály.....	41
Tabulka 2: Použité vodivá struna ABS a její vlastnosti.....	42
Tabulka 3: Použité vodivá struna PLA proto - pasta a její vlastnosti.....	43
Tabulka 4: Použité vodivá struna TPU.....	44
Tabulka 5: Naměřené elektrické odpory před namáháním.....	51
Tabulka 6: Výsledné ohybové vlastnosti pro nepotištěné materiály.....	58
Tabulka 7: Výsledné ohybové vlastnosti pro potištěné materiály ABS, PLA a TPU.....	59
Tabulka 8: Procentuální vyjádření rozdílů tuhosti v ohybu mezi nepotištěnými a potištěnými vzorky.....	60
Tabulka 9: Změna elektrických odporů po zkoušce tuhosti v ohybu.....	62
Tabulka 10: Změna elektrických odporů po praní.....	68
Tabulka 11: Procentuální vyjádření rozdílů tuhosti v ohybu před a po praní.....	72
Tabulka 12: Změna elektrických odporů po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě.....	74
Tabulka 13: Změna elektrických odporů po zkoušce odolnosti v oděru.....	81
Tabulka 14: Naměřené hodnoty tloušťky textilních materiálů.....	104
Tabulka 15: Naměřené hodnoty elektrického odporu jednotlivých vodivých strun při okolních teplotách 21°C a 5°C.....	106
Tabulka 16: Naměřené hodnoty elektrického odporu bez namáhání.....	107
Tabulka 17: Naměřené hodnoty elektrických odporů vodivé ABS struny při okolních teplotách 21°C a 5°C.....	108
Tabulka 18: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu.....	114
Tabulka 19: Naměřené hodnoty elektrického odporu po praní.....	115
Tabulka 20: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě.....	120
Tabulka 21: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru....	121

Seznam příloh

Příloha 1: Reálné vzorky použitých textilních materiálů.....	100
Příloha 2: Soubor experimentálně analyzovaných materiálů.....	102
Příloha 3: Měření tloušťky textilních materiálů.....	104
Příloha 4: Povrchové vlastnosti materiálů měřeny na přístroji KES FB4.....	105
Příloha 5: Ověření elektrických odporů jednotlivých vodivých strun.....	106
Příloha 6: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU před namáháním.....	107
Příloha 7: Ověření variability elektrických odporů vodivé ABS struny.....	108
Příloha 8: Výsledky ohybových zkoušek.....	109
Příloha 9: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce tuhosti v ohybu.....	114
Příloha 10: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po praní.....	115
Příloha 11: Výsledky ohybových zkoušek po praní.....	116
Příloha 12: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě.....	120
Příloha 13: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce odolnosti v oděru.....	121

Příloha 1: Reálné vzorky použitých textilních materiálů

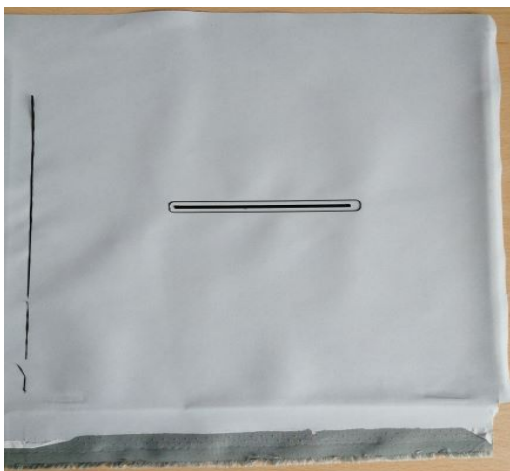
Označení	1
Druh materiálu	tkanina
Vazba	plátňová
Plošná hmotnost [g/ m²]	612,4
Tloušťka [mm]	0,54
Dostava osnovy [g/1cm]	30
Dostava útku [g/1cm]	22

Označení	2
Druh materiálu	softshell
Plošná hmotnost[g/ m²]	462,4
Tloušťka [mm]	1,27

Označení	3
Druh materiálu	tkanina
Vazba	keprová
Plošná hmotnost[g/ m²]	633,6
Tloušťka [mm]	0,61
Dostava osnovy [g/1cm]	30
Dostava útku [g/1cm]	17

Označení	4
Druh materiálu	tkanina
Vazba	kohoutí stopa
Plošná hmotnost[g/ m²]	702,8
Tloušťka [mm]	0,66
Dostava osnovy [g/1cm]	26
Dostava útku [g/1cm]	26

Příloha 2: Soubor experimentálně analyzovaných materiálů



Obrázek 39: Materiál 1 – membránový dvouvrstvý laminát.



Obrázek 40: Materiál 2 – membránový dvouvrstvý laminát.



Obrázek 41: Materiál 4 – zátěrový materiál.



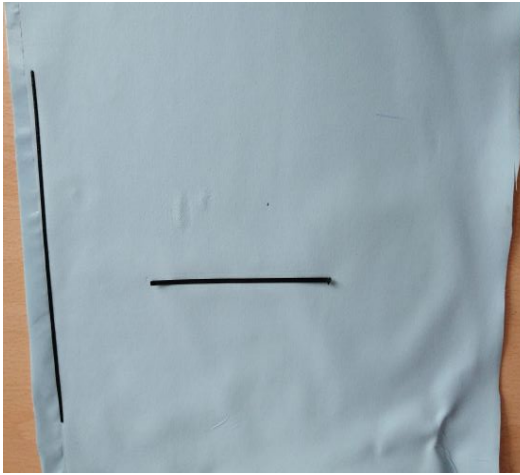
Obrázek 42: Materiál 3 – zátěrový materiál.



Obrázek 44: Materiál 6 – membránový materiál.



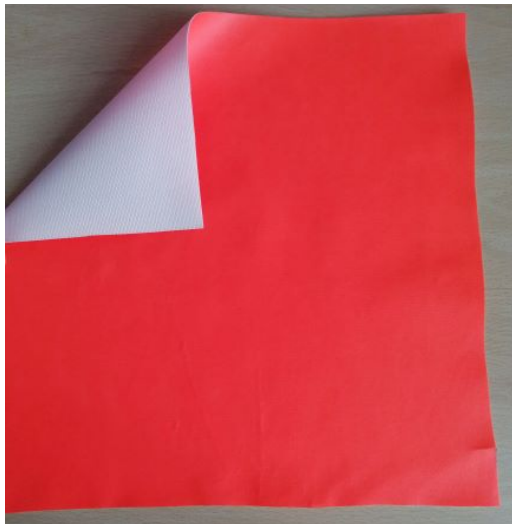
Obrázek 43: Materiál 5 – zátěrový materiál.



Obrázek 45: Materiál 8 – zátěrový materiál.



Obrázek 46: Materiál 7 – membránový materiál.



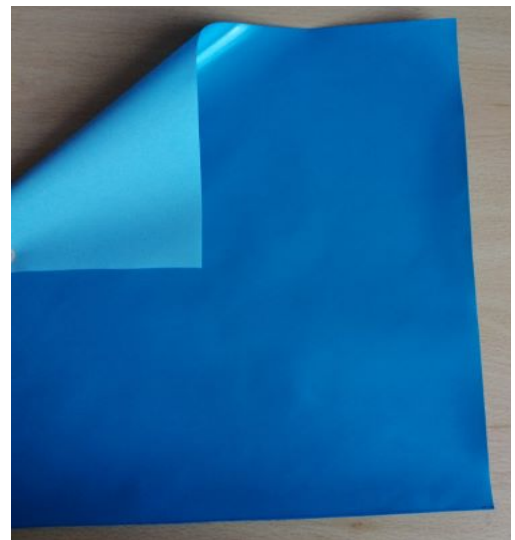
Obrázek 47: Materiál 9 – zátěrový materiál.



Obrázek 48: Materiál 10 – membránový dvouvrstvý laminát.



Obrázek 50: Materiál 11 – membránový dvouvrstvý laminát.



Obrázek 49: Materiál 12 – zátěrový materiál.



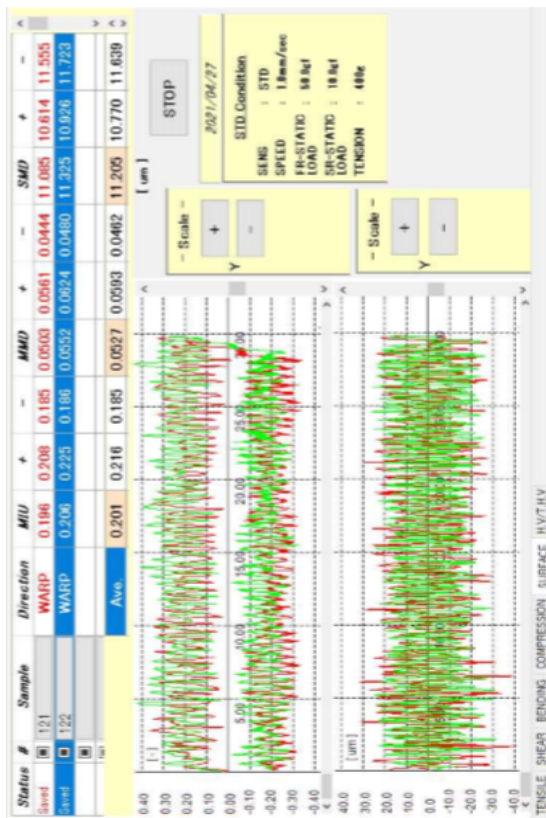
Obrázek 51: Materiál 13- tkanina.

Příloha 3: Měření tloušťky textilních materiálů

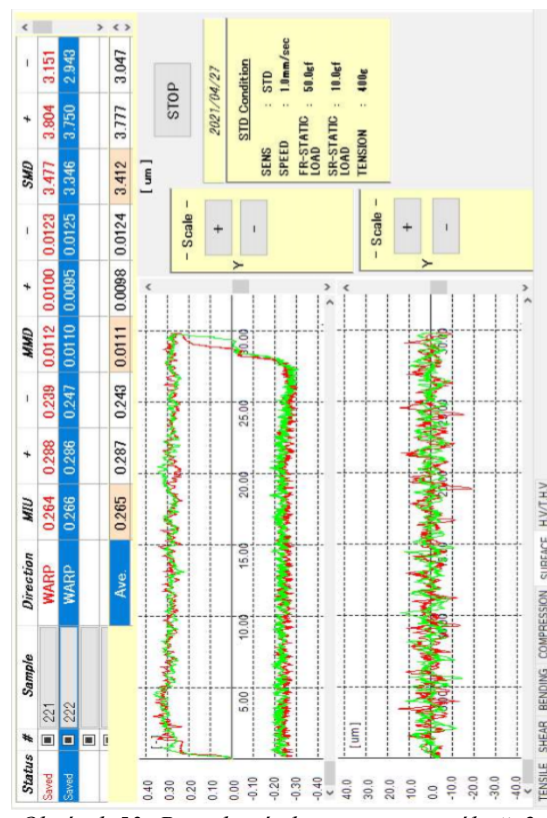
Tabulka 14: Naměřené hodnoty tloušťky textilních materiálů.

	1	2	3	4
1. měření [mm]	0,54	1,26	0,62	0,66
2. měření [mm]	0,54	1,25	0,61	0,65
3. měření [mm]	0,54	1,29	0,61	0,67
Průměr [mm]	0,54	1,27	0,61	0,66
Rozptyl [mm]	0	0,00043	0,00003	0,0001
Směrodatná odchylka [mm]	0	0,02082	0,00577	0,01
Variační koeficient [%]	0	1,64	0,94	1,52

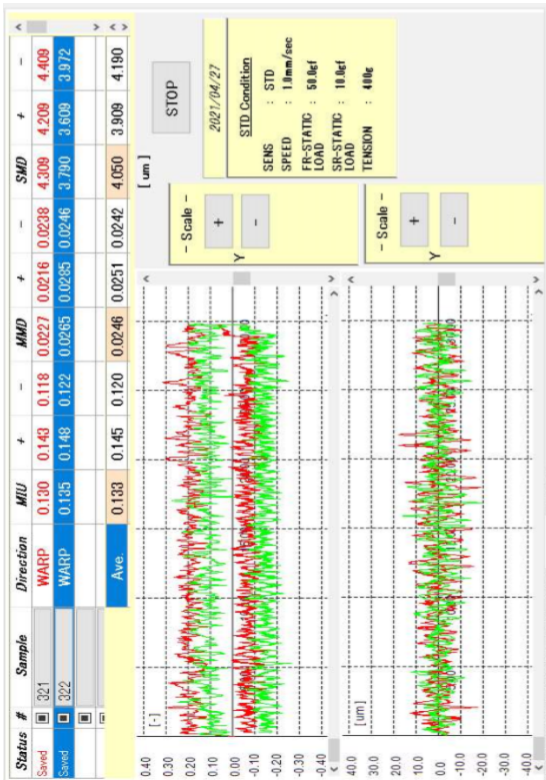
Příloha 4: Povrchové vlastnosti materiálů měřeny na přístroji KES FB4



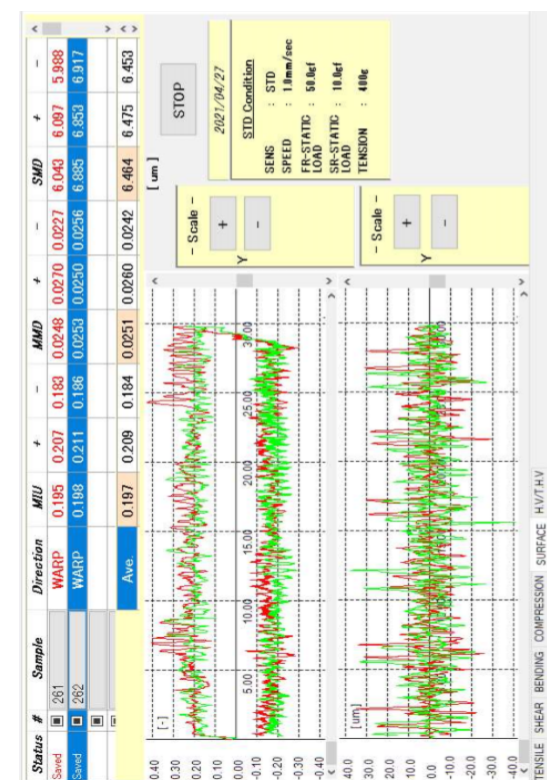
Obrázek 52: Povrchové vlastnosti materiálu č. 1.



Obrázek 53: Povrchové vlastnosti materiálu č. 2.



Obrázek 54: Povrchové vlastnosti materiálu č. 3.



Obrázek 55: Povrchové vlastnosti materiálu č. 4.

Příloha 5: Ověření elektrických odporů jednotlivých vodivých strun

Tabulka 15: Naměřené hodnoty elektrického odporu jednotlivých vodivých strun při okolních teplotách 21°C a 5°C.

Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí 21°C – I.			
	ABS [MΩ/m]	PLA [kΩ/m]	TPU [kΩ/m]
1. měření	3,5	33,5	57,0
2. měření	2,5	24,0	54,0
3. měření	2,5	24,0	70,0
4. měření	2,0	31,0	56,0
Průměr	2,6	28,1	59,3
Rozptyl	0,39583	23,72917	52,91667
Směrodatná odchylka	0,62915	4,87126	7,27438
Variační koeficient [%]	23,97	17,32	12,28
Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí 21°C – II.			
	ABS [MΩ/m]	PLA [kΩ/m]	TPU [kΩ/m]
1. měření	2,5	33,0	59,5
2. měření	2,5	25,0	72,0
3. měření	2,5	25,5	57,5
4. měření	3,0	35,5	57,5
Průměr	2,6	29,8	61,6
Rozptyl	0,0625	28,08333	48,72917
Směrodatná odchylka	0,25	5,29937	6,98063
Variační koeficient [%]	9,52	17,81	11,33
Průměrné hodnoty elektrických odporů při teplotě okolí 21°C			
Průměr	2,6	28,9	60,4
Rozptyl	0,2	22,96	45,17
Směrodatná odchylka	0,44	4,79	6,72
Variační koeficient [%]	16,88	16,56	11,12
Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí - 5°C			
	ABS [MΩ/m]	PLA [kΩ/m]	TPU [kΩ/m]
1. měření	2,0	32,5	57,0
2. měření	2,0	28,0	54,0
3. měření	2,0	23,5	71,0
4. měření	3,0	30,0	57,5
Průměr	2,3	28,5	59,9
Rozptyl	0,25	14,5	57,39583
Směrodatná odchylka	0,5	3,80789	7,57600
Variační koeficient [%]	22,22	13,36	12,65

Příloha 6: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU před namáháním

Tabulka 16: Naměřené hodnoty elektrického odporu bez namáhání.

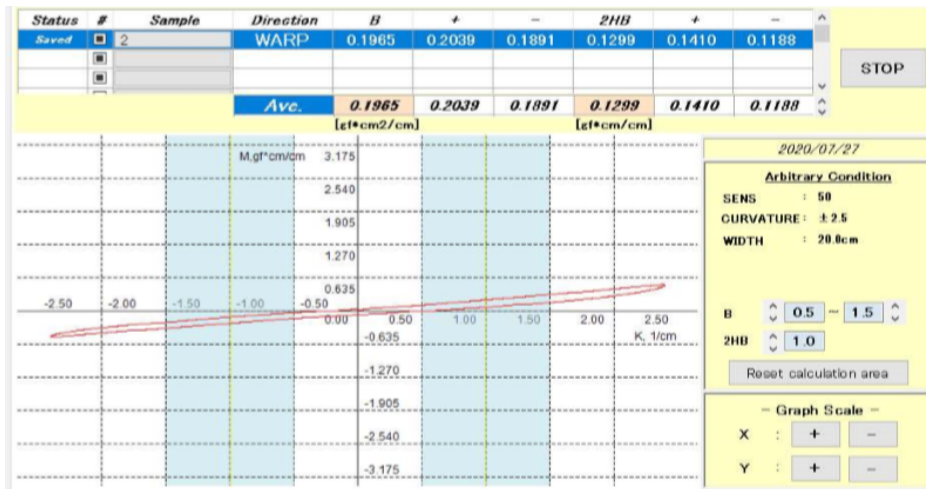
ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
1. měření [$M\Omega/m$]	156,7	202,2	191,1	142,2
2. měření [$M\Omega/m$]	154,4	201,1	196,7	142,2
3. měření [$M\Omega/m$]	156,7	204,4	202,2	141,1
4. měření [$M\Omega/m$]	157,8	202,2	198,9	144,4
5. měření [$M\Omega/m$]	157,8	202,2	197,8	143,3
Průměr [$M\Omega/m$]	156,7	202,4	197,3	142,7
Rozptyl [$M\Omega/m$]	1,85185	1,48148	16,41975	1,60494
Směrodatná odchylka [$M\Omega/m$]	1,36083	1,21716	4,05213	1,26686
Variační koeficient [%]	0,87	0,60	2,05	0,89
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
1. měření [$k\Omega/m$]	158,9	164,4	150,0	157,8
2. měření [$k\Omega/m$]	158,9	163,3	147,8	153,3
3. měření [$k\Omega/m$]	156,7	163,3	150,0	150,0
4. měření [$k\Omega/m$]	158,9	160,0	150,0	147,8
5. měření [$k\Omega/m$]	158,9	170,0	153,3	148,9
Průměr [$k\Omega/m$]	158,4	164,2	150,2	151,6
Rozptyl [$k\Omega/m$]	0,98765	13,20988	3,95062	16,41975
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	0,99381	3,63454	1,98762	4,05213
Variační koeficient [%]	0,63	2,21	1,32	2,67
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
1. měření [$k\Omega/m$]	550,0	318,9	342,2	542,2
2. měření [$k\Omega/m$]	537,8	322,2	355,6	536,7
3. měření [$k\Omega/m$]	556,7	313,3	357,8	536,7
4. měření [$k\Omega/m$]	550,0	320,0	337,8	532,2
5. měření [$k\Omega/m$]	548,9	326,7	351,1	536,7
Průměr [$k\Omega/m$]	548,7	320,2	348,9	536,9
Rozptyl [$k\Omega/m$]	46,54321	23,70370	74,07407	12,59259
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	6,82226	4,86864	8,60663	3,54860
Variační koeficient [%]	1,24	1,52	2,47	0,66

Příloha 7: Ověření variability elektrických odporů vodivé ABS struny

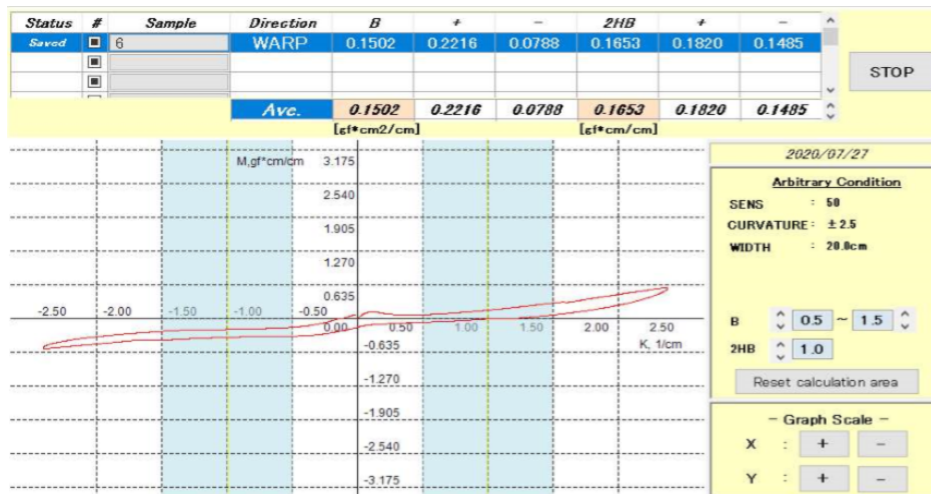
Tabulka 17: Naměřené hodnoty elektrických odporů vodivé ABS struny při okolních teplotách 21°C a 5°C.

Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí 21°C – I.				
	1A (oblekovka)	2A (softshell)	3A (denim)	4A (kohoutí stopa)
1. měření [MΩ/m]	53,0	14,0	12,0	30,0
2. měření [MΩ/m]	32,0	14,0	14,0	34,0
3. měření [MΩ/m]	41,0	14,0	15,0	32,0
4. měření [MΩ/m]	27,0	16,0	17,0	35,0
5. měření [MΩ/m]	26,0	16,0	20,0	38,0
Průměr [MΩ/m]	35,8	14,8	15,6	33,8
Rozptyl [MΩ/m]	127,7	1,2	9,3	9,2
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	11,30044	1,09545	3,04959	3,03315
Variační koeficient [%]	43,46	6,85	15,25	7,98
Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí 21°C – II.				
	1A (oblekovka)	2A (softshell)	3A (denim)	4A (kohoutí stopa)
1. měření [MΩ/m]	42,0	14,0	14,0	31,0
2. měření [MΩ/m]	32,0	14,0	14,0	35,0
3. měření [MΩ/m]	36,0	15,0	18,0	39,0
4. měření [MΩ/m]	33,0	15,0	16,0	37,0
5. měření [MΩ/m]	27,0	14,0	19,0	39,0
Průměr [MΩ/m]	34,0	14,4	16,2	36,2
Rozptyl [MΩ/m]	30,5	0,3	5,2	11,2
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	5,52268	0,54772	2,28035	3,34664
Variační koeficient [%]	20,45	3,91	12,00	8,58
Průměrné hodnoty elektrických odporů při teplotě okolí 21°C				
Průměr [MΩ/m]	34,9	14,6	15,9	35,0
Rozptyl [MΩ/m]	71,21111	0,71111	6,54444	10,66667
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	8,43867	0,84327	2,55821	3,26599
Variační koeficient [%]	24,18	5,78	16,09	9,33
Elektrický odpor vodivých strun při teplotě okolí - 5°C				
	1A (oblekovka)	2A (softshell)	3A (denim)	4A (kohoutí stopa)
1. měření [MΩ/m]	42,0	23,0	19,0	57,0
2. měření [MΩ/m]	31,0	16,0	25,0	62,0
3. měření [MΩ/m]	49,0	17,0	18,0	54,0
4. měření [MΩ/m]	42,0	19,0	28,0	42,0
5. měření [MΩ/m]	50,0	19,0	23,0	39,0
Průměr [MΩ/m]	42,8	18,8	22,6	50,8
Rozptyl [MΩ/m]	57,7	7,2	17,3	97,7
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	7,59605	2,68328	4,15933	9,88433
Variační koeficient [%]	15,19	14,12	18,08	25,34

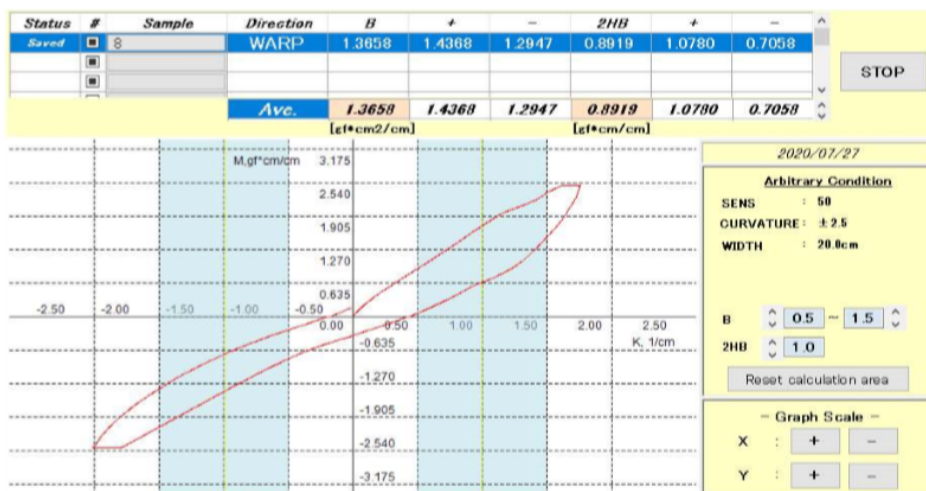
Příloha 8: Výsledky ohybových zkoušek



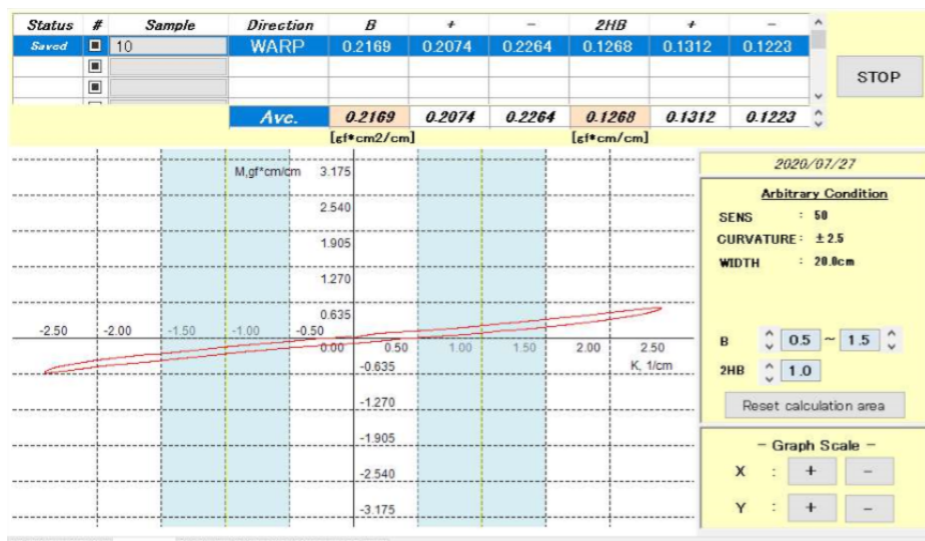
Obrázek 56: Ohybové charakteristiky vzorku 1 - obleková textilie.



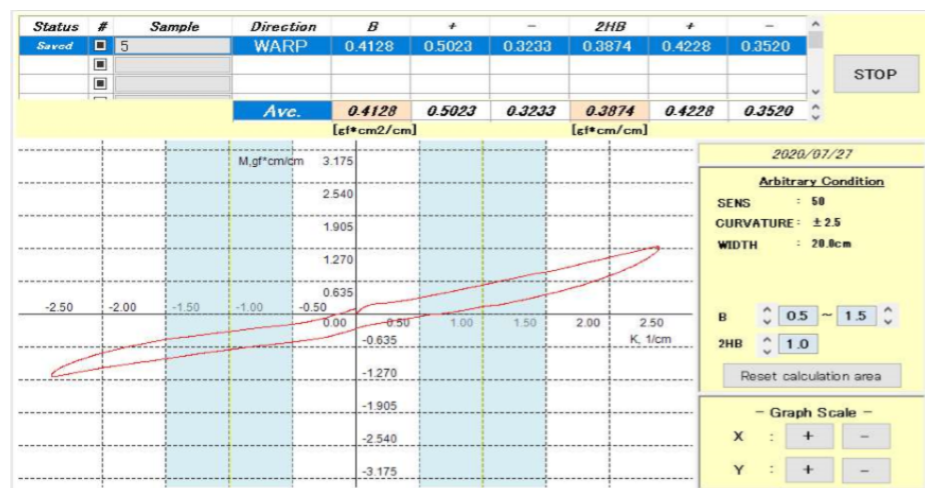
Obrázek 57: Ohybové charakteristiky vzorku 2 - softshell.



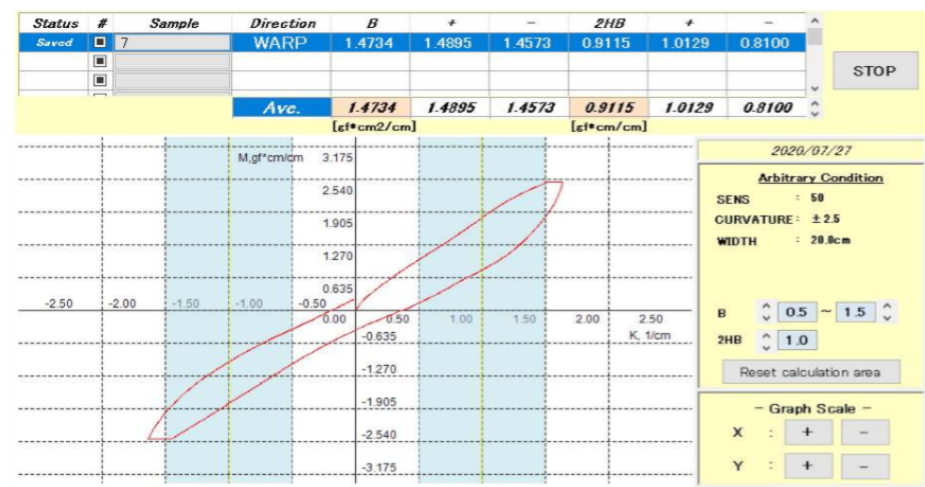
Obrázek 58: Ohybové charakteristiky vzorku 3 - tkanina keprové vazby.



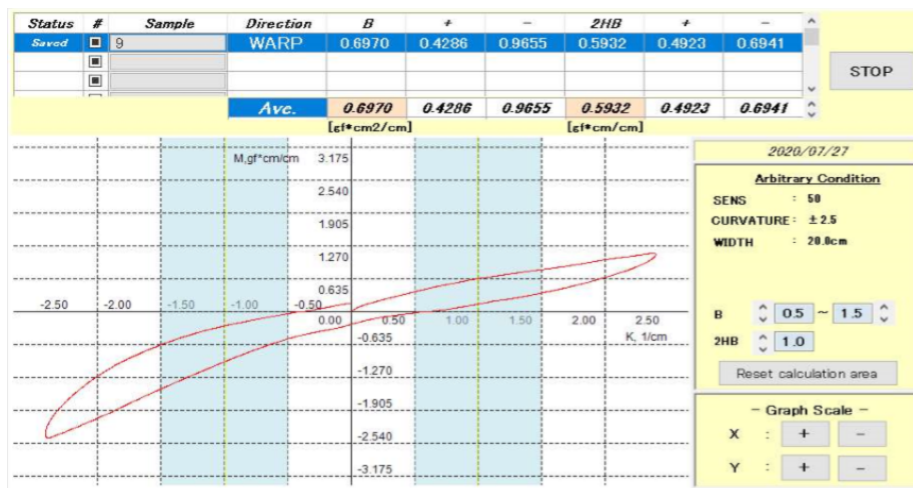
Obrázek 59: Ohybové charakteristiky vzorku 4 - tkanina s kohoutí stopou.



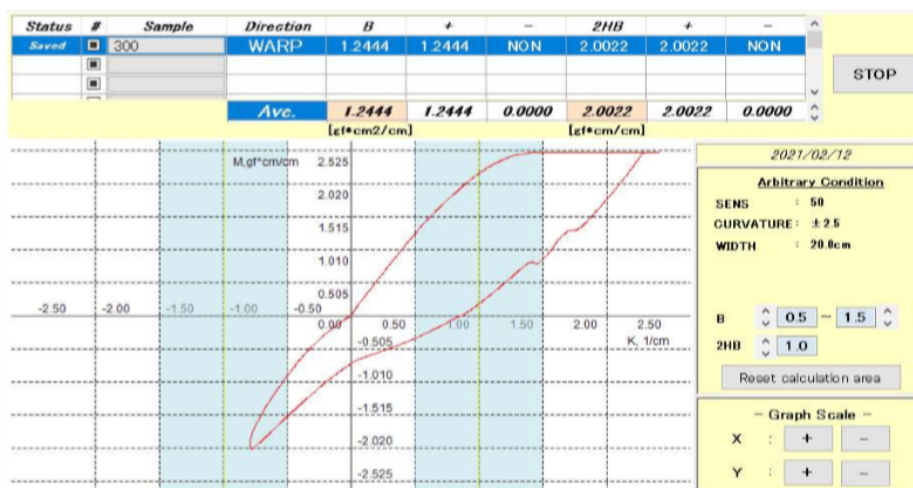
Obrázek 60: Ohybové charakteristiky vzorku 2A.



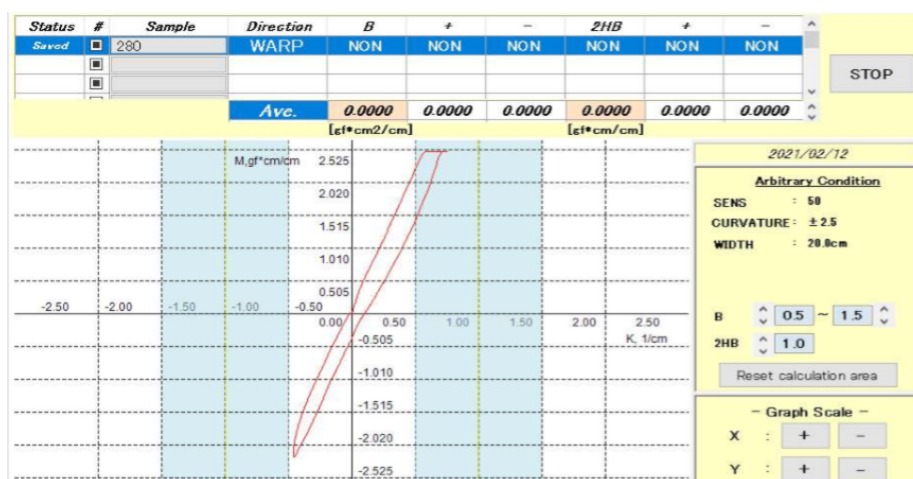
Obrázek 61: Ohybové charakteristiky vzorku 3A.



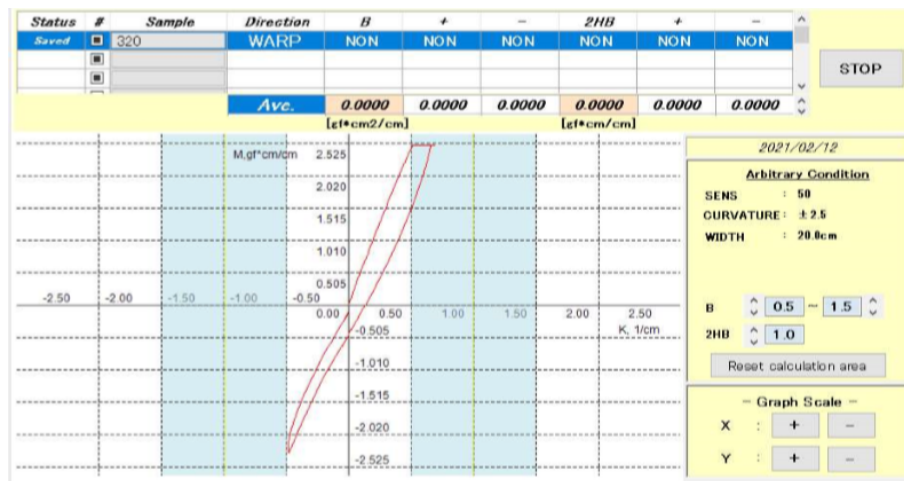
Obrázek 62: Ohybové charakteristiky vzorku 4A.



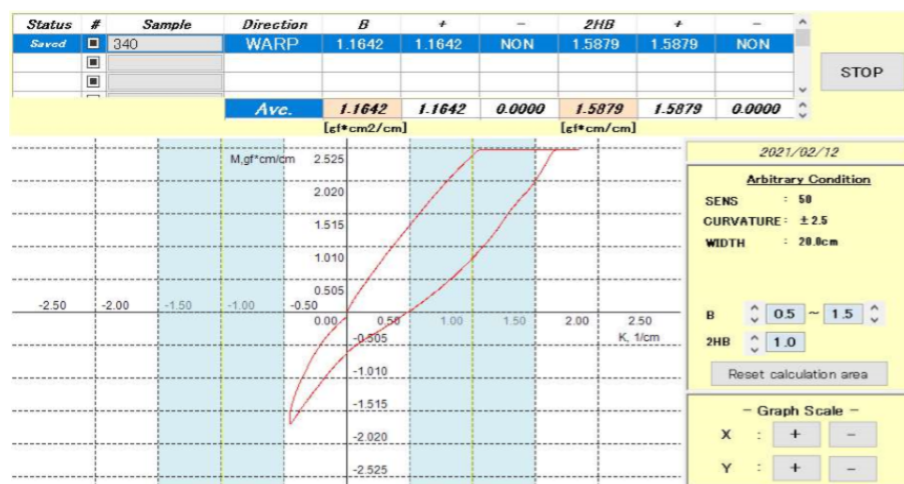
Obrázek 63: Ohybová charakteristika vzorku 1P.



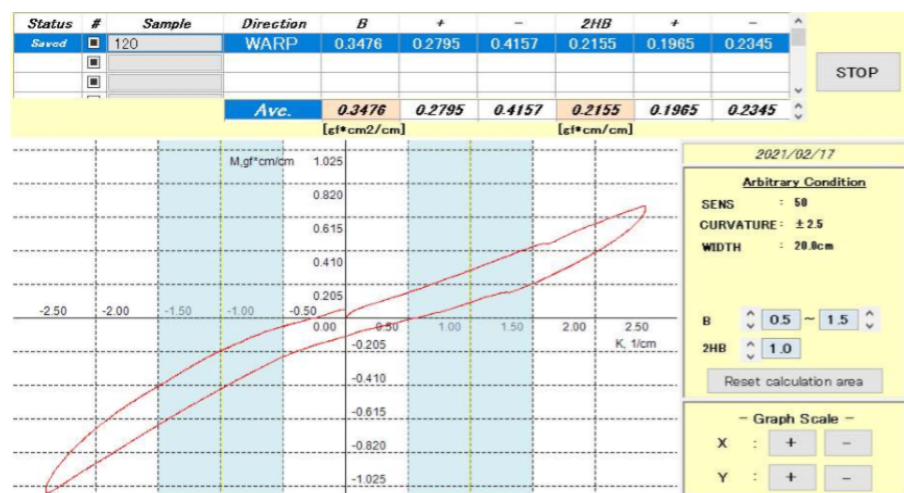
Obrázek 64: Ohybová charakteristika vzorku 2P.



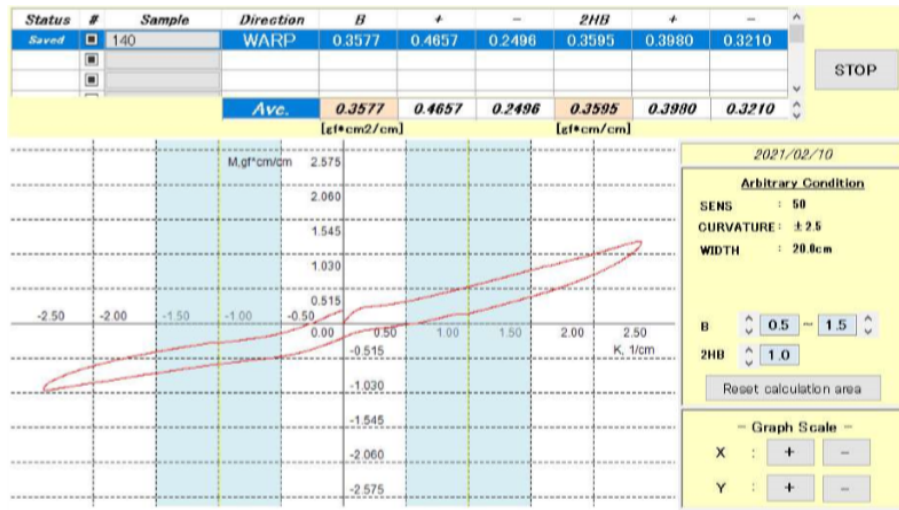
Obrázek 65: Ohybová charakteristika vzorku 3P.



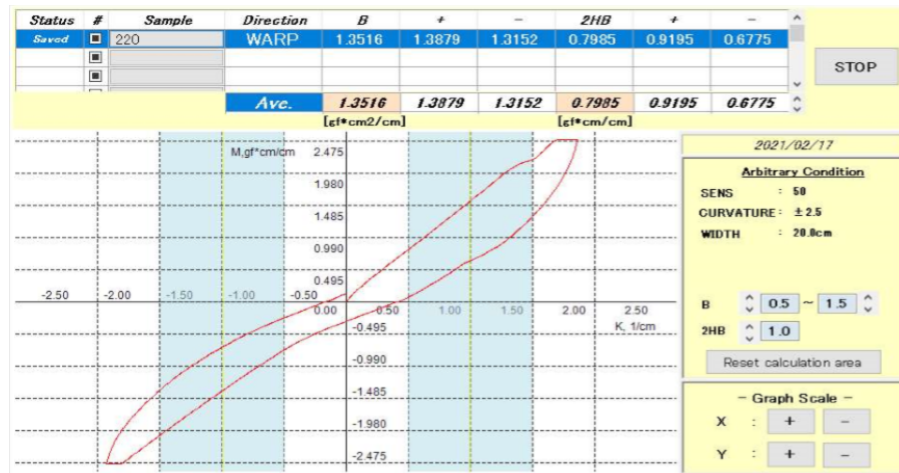
Obrázek 66: Ohybová charakteristika vzorku 4P.



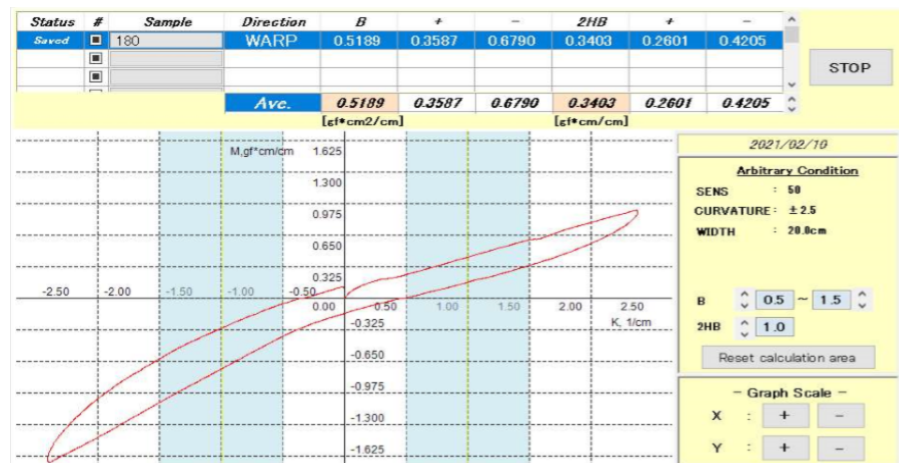
Obrázek 67: Ohybová charakteristika vzorku 1T.



Obrázek 68: Ohybová charakteristika vzorku 2T.



Obrázek 69: Ohybová charakteristika vzorku 3T.



Obrázek 70: Ohybová charakteristika vzorku 4T.

Příloha 9: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce tuhosti v ohybu

Tabulka 18: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu.

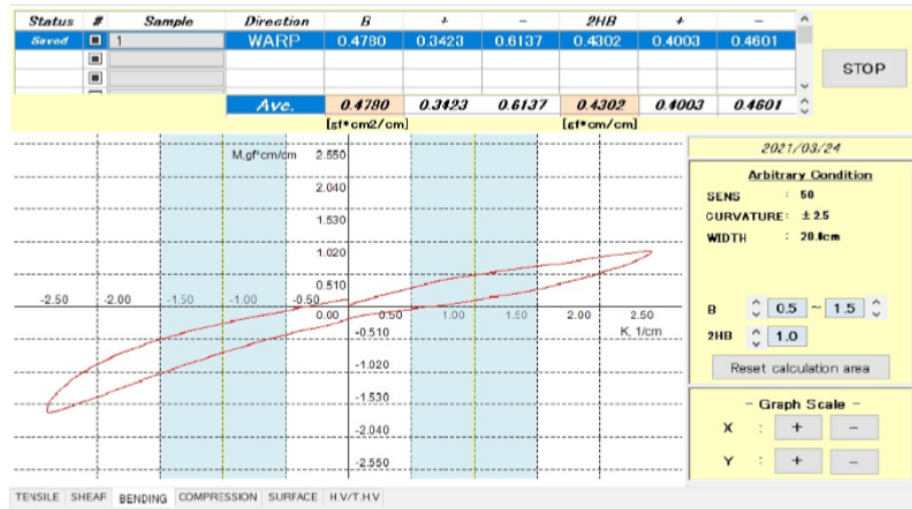
ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
1. měření [MΩ/m]	92,2	150,0	147,8	74,4
2. měření [MΩ/m]	52,2	162,2	128,9	72,2
3. měření [MΩ/m]	66,7	161,1	132,2	74,4
4. měření [MΩ/m]	65,6	137,8	172,2	74,4
5. měření [MΩ/m]	46,7	143,3	130,0	71,1
Průměr [MΩ/m]	64,7	150,9	142,2	73,3
Rozptyl [MΩ/m]	310,74074	115,67901	339,50617	2,46914
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	17,62784	10,75542	18,42569	1,57135
Variační koeficient [%]	27,26	7,13	12,96	2,14
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
1. měření [kΩ/m]	146,7	125,6	138,9	150,0
2. měření [kΩ/m]	148,9	125,6	138,9	146,7
3. měření [kΩ/m]	150,0	124,4	146,7	151,1
4. měření [kΩ/m]	150,0	126,7	143,3	150,0
5. měření [kΩ/m]	150,0	124,4	141,1	148,9
Průměr [kΩ/m]	149,1	125,3	141,8	149,3
Rozptyl [kΩ/m]	2,09877	0,86420	10,86420	2,83951
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	1,44871	0,92962	3,29609	1,68508
Variační koeficient [%]	0,97	0,74	2,32	1,13
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
1. měření [kΩ/m]	507,8	274,4	320,0	504,4
2. měření [kΩ/m]	524,4	294,4	324,4	493,3
3. měření [kΩ/m]	496,7	288,9	330,0	504,4
4. měření [kΩ/m]	566,7	272,2	333,3	518,9
5. měření [kΩ/m]	527,8	302,2	328,9	521,1
Průměr [kΩ/m]	524,7	286,4	327,3	508,4
Rozptyl [kΩ/m]	710,74074	166,29630	26,91358	132,46914
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	26,65972	12,89559	5,18783	11,50952
Variační koeficient [%]	5,08	4,50	1,58	2,26

Příloha 10: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po praní

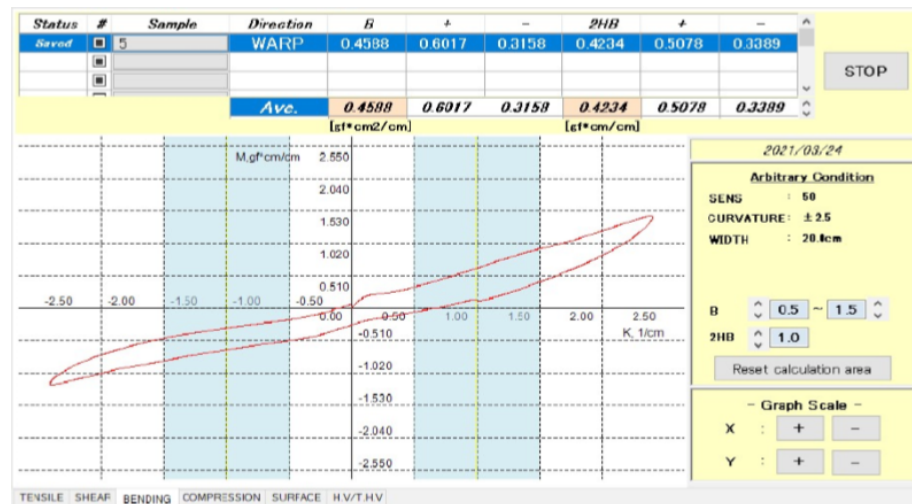
Tabulka 19: Naměřené hodnoty elektrického odporu po praní.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
1. měření [MΩ/m]	105,6	173,3	173,3	85,6
2. měření [MΩ/m]	61,1	151,1	138,9	75,6
3. měření [MΩ/m]	65,6	188,9	154,4	87,8
4. měření [MΩ/m]	61,1	156,7	175,6	81,1
5. měření [MΩ/m]	80,0	135,6	131,1	87,8
Průměr [MΩ/m]	74,7	161,1	154,7	83,6
Rozptyl [MΩ/m]	358,27160	423,45679	397,16049	27,40741
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	18,92806	20,57807	19,92889	5,23521
Variační koeficient [%]	25,35	12,77	12,89	6,27
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
1. měření [kΩ/m]	151,1	PORUŠENO	138,9	145,6
2. měření [kΩ/m]	150,0	-	134,4	144,4
3. měření [kΩ/m]	152,2	-	136,7	147,8
4. měření [kΩ/m]	152,2	-	136,7	148,9
5. měření [kΩ/m]	153,3	-	136,7	150,0
Průměr [kΩ/m]	151,8	-	136,7	147,3
Rozptyl [kΩ/m]	1,60494	-	2,46914	5,30864
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	1,26686	-	1,57135	2,30405
Variační koeficient [%]	0,83	-	1,15	1,56
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
1. měření [kΩ/m]	490,0	291,1	PORUŠENO	486,7
2. měření [kΩ/m]	501,1	292,2	-	511,1
3. měření [kΩ/m]	512,2	310,0	-	535,6
4. měření [kΩ/m]	508,9	301,1	-	537,8
5. měření [kΩ/m]	513,3	303,3	-	500,0
Průměr [kΩ/m]	505,1	299,6	-	514,2
Rozptyl [kΩ/m]	94,19753	62,71605	-	495,30864
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	9,70554	7,91935	-	22,25553
Variační koeficient [%]	1,92	2,64	-	4,33

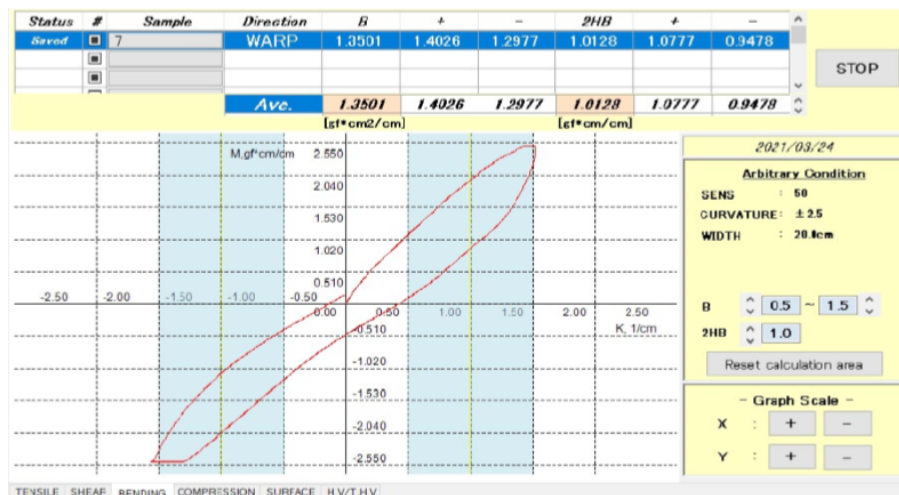
Příloha 11: Výsledky ohybových zkoušek po praní



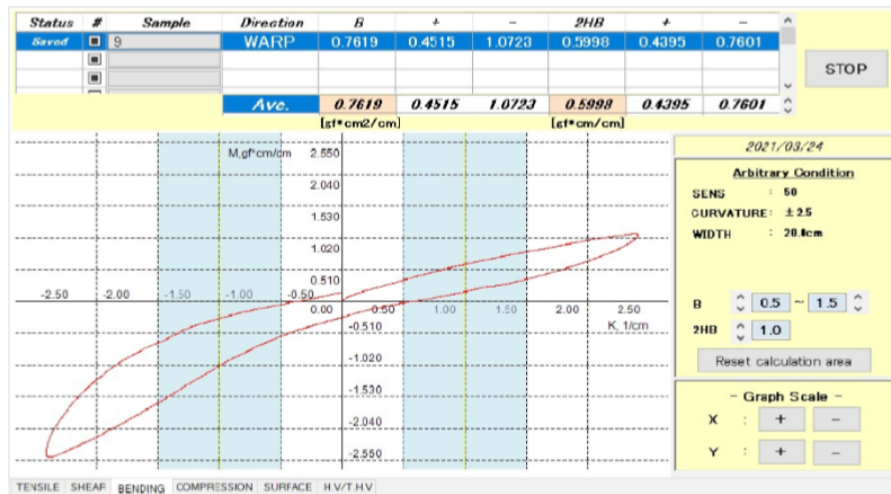
Obrázek 71: Ohybová charakteristika vzorku 1A po praní.



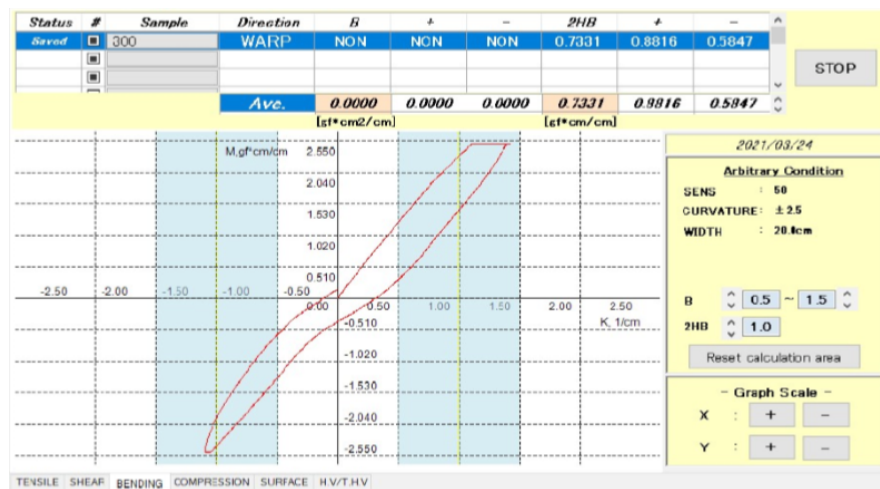
Obrázek 72: Ohybová charakteristika vzorku 2A po praní.



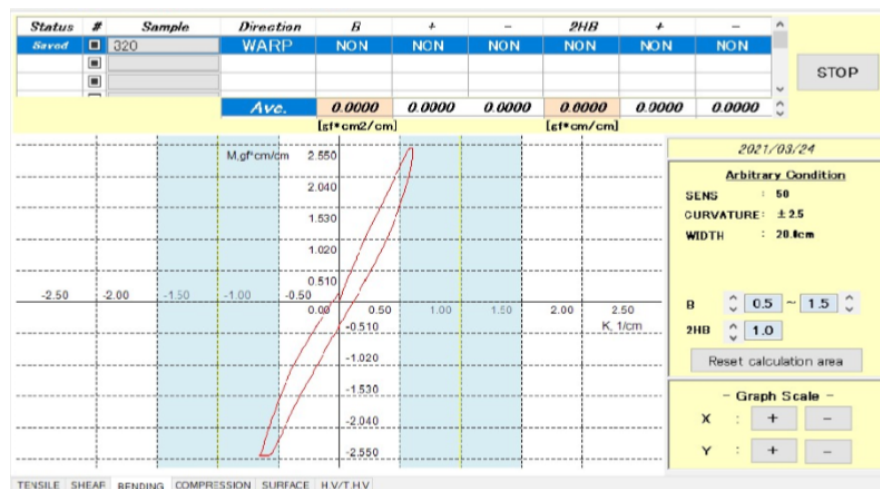
Obrázek 73: Ohybová charakteristika vzorku 3A po praní.



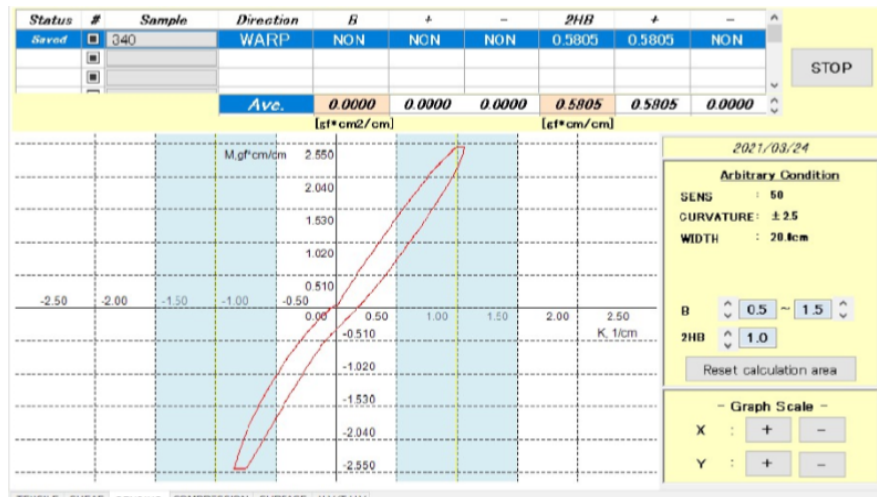
Obrázek 74: Ohybová charakteristika vzorku 4A po praní.



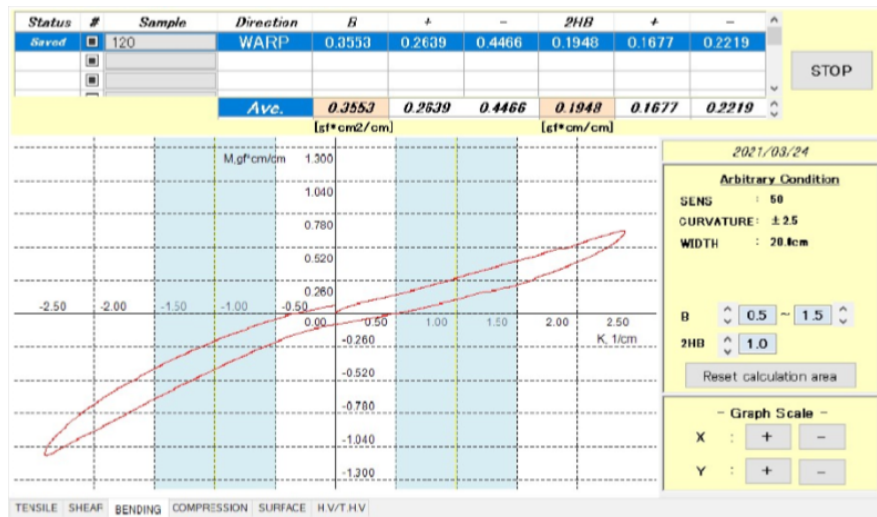
Obrázek 75: Ohybová charakteristika vzorku 1P po praní.



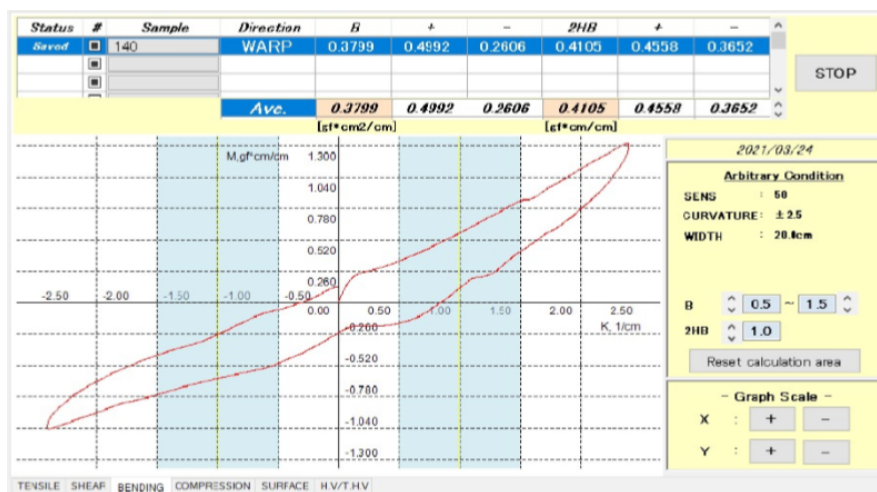
Obrázek 76: Ohybová charakteristika vzorku 3P po praní.



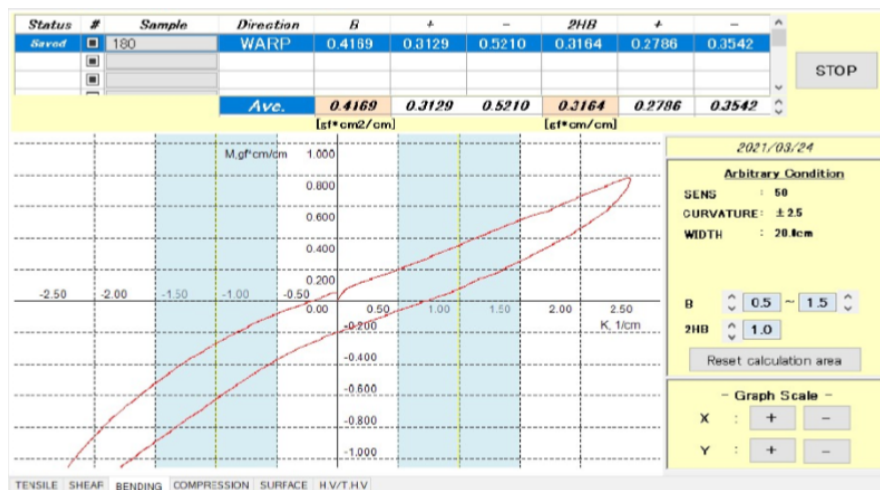
Obrázek 77: Ohybová charakteristika vzorku 4P po prání.



Obrázek 78: Ohybová charakteristika vzorku 1T po prání.



Obrázek 79: Ohybová charakteristika vzorku 2T po prání.



Obrázek 80: Ohybová charakteristika vzorku 4T po praní.

Příloha 12: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě

Tabulka 20: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce tuhosti v ohybu po údržbě.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
1. měření [MΩ/m]	47,0	153,0	132,0	88,0
2. měření [MΩ/m]	50,0	135,0	134,0	83,0
3. měření [MΩ/m]	53,0	144,0	136,0	83,0
4. měření [MΩ/m]	47,0	143,0	137,0	73,0
5. měření [MΩ/m]	55,0	143,0	130,0	72,0
Průměr [MΩ/m]	50,4	143,6	133,8	79,8
Rozptyl [MΩ/m]	12,8	40,8	8,2	48,7
Směrodatná odchylka [MΩ/m]	3,57771	6,38749	2,86356	6,97854
Variační koeficient [%]	7,10	4,45	2,14	8,75
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
1. měření [kΩ/m]	149,0	PORUŠENO	131,0	144,0
2. měření [kΩ/m]	151,0	-	134,0	143,0
3. měření [kΩ/m]	152,0	-	133,0	143,0
4. měření [kΩ/m]	152,0	-	133,0	143,0
5. měření [kΩ/m]	153,0	-	137,0	145,0
Průměr [kΩ/m]	151,4	-	133,6	143,6
Rozptyl [kΩ/m]	2,3	-	4,8	0,8
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	1,51658	-	2,19089	0,89443
Variační koeficient [%]	1,00	-	1,64	0,62
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
1. měření [kΩ/m]	442,0	255,0	PORUŠENO	440,0
2. měření [kΩ/m]	446,0	254,0	-	435,0
3. měření [kΩ/m]	457,0	251,0	-	440,0
4. měření [kΩ/m]	436,0	271,0	-	443,0
5. měření [kΩ/m]	462,0	258,0	-	437,0
Průměr [kΩ/m]	448,6	257,8	-	439,0
Rozptyl [kΩ/m]	114,8	60,7	-	9,5
Směrodatná odchylka [kΩ/m]	10,71448	7,79102	-	3,08221
Variační koeficient [%]	2,39	3,02	-	0,70

Příloha 13: Elektrické odpory pro ABS, PLA a TPU po zkoušce odolnosti v oděru

Tabulka 21: Naměřené hodnoty elektrického odporu po zkoušce odolnosti v oděru.

ABS				
Materiál	1A	2A	3A	4A
1. měření [$M\Omega/m$]	91,0	NENAMĚŘENO	144,0	80,0
2. měření [$M\Omega/m$]	85,0	-	148,0	72,0
3. měření [$M\Omega/m$]	71,0	-	143,0	88,0
4. měření [$M\Omega/m$]	83,0	-	141,0	92,0
5. měření [$M\Omega/m$]	86,0	-	145,0	70,0
Průměr [$M\Omega/m$]	83,2	-	144,2	80,4
Rozptyl [$M\Omega/m$]	55,2	-	6,7	92,8
Směrodatná odchylka [$M\Omega/m$]	7,42967	-	2,58844	9,63328
Variační koeficient [%]	8,93	-	1,80	11,98
PLA				
Materiál	1P	2P	3P	4P
1. měření [$k\Omega/m$]	PORUŠENO	PORUŠENO	PORUŠENO	PORUŠENO
2. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
3. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
4. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
5. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Průměr [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Rozptyl [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Variační koeficient [%]	-	-	-	-
TPU				
Materiál	1T	2T	3T	4T
1. měření [$k\Omega/m$]	PORUŠENO	PORUŠENO	PORUŠENO	PORUŠENO
2. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
3. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
4. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
5. měření [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Průměr [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Rozptyl [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Směrodatná odchylka [$k\Omega/m$]	-	-	-	-
Variační koeficient [%]	-	-	-	-