

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

Bakalářská práce

ÚCHOPOVÝ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ
ELEKTROADHEZI

Jan FESSL

2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan FESSL**

Osobní číslo: **E14B0191P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Úchopový systém využívající elektroadhezi**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte rešerši současných chapadel určených pro robotické systémy.
2. Proveďte základní teoretický rozbor jevu elektroadheze.
3. Sestavte laboratorní zařízení pro experimenty s úchopovými systémy využívající principu elektroadheze.
4. Navrhněte chapadlo využívající jevu elektroadheze a experimentálně ověřte jeho funkčnost.
5. Zhodnoťte možnosti využití navrženého systému jako chapadla pro miniaturní roboty ovládané elektromagnetickým polem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, 2008.
2. TRIVEDI, Deepak, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. Applied Bionics and Biomechanics, 2008, 5.3: 99-117.
3. TÉLLEZ, Juan P. Díaz; KRAHN, Jeff; MENON, Carlo. Characterization of electro-adhesives for robotic applications. In: Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011. p. 1867-1872.
4. MONKMAN, Gareth. Electroadhesive microgrippers. Industrial Robot: An International Journal, 2003, 30.4: 326-330.
5. GERMANN, Jürg, et al. Active connection mechanism for soft modular robots. Advanced Robotics, 2012, 26.7: 785-798.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Mach, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Práce nabízí komplexní pohled na úchopový systém využívající elektroadhezi a její další aplikace v oblasti soudobé techniky. V první části je rozebrána fyzikální podstata elektroadheze. Zahrnuty jsou základní podmínky pro vznik a dále je také popsáno provedení fólie, která je prostředkem pro použití elektroadheze (elektroadhezivní fólie).

Na základě těchto poznatků je vytvořen matematický model elektroadhezivní fólie a je provedena numerická simulace. Zkoumanými parametry jsou závislosti velikosti elektroadhezivní síly na přiloženém napětí, poměru šířky elektrod ku šířce izolační mezery, výšce izolační vrstvy fólie, materiálových konstantách a okolních podmínkách. Z výsledků simulace jsou vyvozeny důležité závěry, které jsou kritické pro návrh elektroadhezivní fólie jako návrh elektrod a volba materiálů.

V návaznosti na simulaci jsou vyvinuty dva výrobní postupy pro výrobu elektroadhezivní fólie, kdy výsledkem první metody je flexibilní elektroadhezivní fólie a výsledkem druhé metody fólie elastická. Flexibilní fólie je vyrobena technologií Aerosol Jet Printing. Jako izolační materiál je použit Kapton®. Elektrody jsou ze stříbrných částic a další izolační vrstva je ze silikonu. U elastická fólie je základním materiálem silikon. Elektrody jsou tvořeny směsí uhlíkových částic se silikonem a udržují si elektrickou vodivost i při značném relativním prodloužení. Izolační materiál je čirý silikon. V práci jsou tyto dvě metody porovnány z hlediska náročnosti výroby a kvality finálního produktu.

V závěru je ověřen matematický model pomocí experimentu prováděném na vyrobeném prototypu. Jsou zde také rozebrány možné aplikace elektroadheze v oblasti mikro-robotů, vesmírného průmyslu a logistiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektroadheze, numerická analýza, uhlíkový prášek, silikon, aerosol jet printing, elastická fólie, elektromagnetické aktuátory, vesmírný průmysl

ANOTATION AND KEYWORDS

The work offers complex view on electroadhesion gripping system and other applications of electroadhesion in current technology. The first part contains the fundamental physical principle of electroadhesion, including basic conditions that must be met to create electroadhesion. It also covers the structure of electroadhesion foil, the instrument for electroadhesion.

Based on this knowledge a mathematical model of electroadhesion is created and numerical analyzed. The investigated parameters are dependence of electroadhesion force on applied voltage, on ratio of electrode width and insulation gap, on height of the insulation layer, also on materials constant and surrounding environment. The results serve to improve the design and are critical for materials selection.

From the results of simulation two manufacturing processes were developed. The first method results in flexible foil and the second one results in stretchable foil. Flexible foil is made by Aerosol Jet Printing technology. Insulation material is Kapton® foil. Electrodes are pattern using silver powder and next insulation layer consists of pure silicon. Stretchable foil uses silicon as primary material. Electrodes are made by mixing carbon powder with silicon and remains electrically conductive even under large relative elongation. Insulation layer consists of pure silicon. Methods are also compared in demands on manufacturing and quality of the final product.

In the end the mathematical model is verified by experiment using one prototype that was manufactured. Case study on electroadhesion usage is done with focuses on microrobots, space industry and logistics.

KEYWORDS

electroadhesion, numerical analysis, carbon powder, silicon, aerosol jet printing, electromagnetic actuators, space industry

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jirímu Navrátilovi za vyrobení prototypu technologií Aerosol Jet Printing.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení bakalářskou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury, a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, 6.6.2017

Jan Fessl

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

F_c	N	přitažlivá síla mezi elektrodami kondenzátoru
W_e	m	energie elektrického pole
E_y	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole ve směru y
D_y	N	elektrická indukce ve směru y
V	m^3	objem
ε	$F \cdot m^{-1}$	permitivita
U	V	elektrické napětí
d	m	výška dielektrické vrstvy
w	m	šířka elektrod
l	m	délka elektrod
$\overleftrightarrow{T}_{ij}$	$m \cdot v \cdot m^{-2}$	Maxwellův tenzor pnutí
E_i	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole ve směru i
E_j	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole ve směru j
δ_{ij}	–	Kroneckerovo delta
E	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
μ_0	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita vakua
B_i	T	magnetická indukce ve směru i
B_j	T	magnetická indukce ve směru j
B	T	magnetická indukce
T_{yy}	$m \cdot v \cdot m^{-2}$	Maxwellův tenzor napětí ve směru yy
E_x	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole ve směru x
F	N	elektroadhesivní síla
ε_0	$F \cdot m^{-1}$	permitivita vakua
L	m	vzdálenost os elektrod
∇	–	operátor nabla
φ	V	elektrický potenciál
ρ	$C \cdot m^{-3}$	hustota volného náboje
AG	m	výška vzduchové mezery
m	g	váha manipulovaného předmětu
F_g	N	gravitační síla

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
I.1 MOTIVACE PRÁCE	3
I.1.1 Definice základních pojmů	3
I.1.2 Vymezení řešené oblasti	4
I.2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	5
I.2.1 Historie a současnost elektroadheze	5
I.2.2 Aktivní polymery	6
I.3 HLAVNÍ CÍLE PRÁCE	8
ii TEORETICKÝ ROZBOR	9
II.1 ELEKTROADHEZE	10
II.1.1 Fyzikální princip elektroadheze	10
II.1.2 Matematický model elektroadheze	12
II.1.3 Simulace Elektroadheze	13
II.1.4 Diskuze výsledků	20
iii NÁVRH A VÝROBA ÚCHOPOVÝCH ZAŘÍZENÍ	22
III.1 NÁVRH ÚCHOPOVÝCH ZAŘÍZENÍ	23
III.1.1 Návrh motivů elektrod pro fólie	23
III.1.2 Návrh nevodivé konstrukce pro experimenty	24
III.2 VÝROBA FOLIÍ	26
III.2.1 Příprava materiálu pro elastické elektrody	26
III.2.2 Výroba fólie pomocí odlévací formy	27
III.2.3 Výroba fólie pomocí plastové šablony	27
III.2.4 Výroba fólie pomocí metody razítkování	28
III.2.5 Výroba fólie pomocí technologie sítotisku	30
III.2.6 Výroba fólie pomocí technologie Aerosol Jet Printing	30
III.2.7 Diskuse výsledků	31

Obsah

IV EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	35
IV.1 EXPERIMENT	36
IV.1.1 Fólie s elastickými elektrodami	36
IV.1.2 Fólie vyrobena metodou Aerosol Jet Printing	37
IV.1.3 Ověření matematického modelu	38
V ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	41
V.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	42
V.1.1 Zhodnocení dosažených výsledků	42
V.1.2 Směry pokračování práce	43
V.2 APLIKACE ELEKTROADHEZE	46
V.2.1 Aplikace na elektromagnetické aktuátory	46
V.2.2 Vesmírný průmysl	47
V.2.3 Mobilní roboti	48
V.2.4 Manipulace v automatické technice	49
V.2.5 Logistika	49
A PŘÍLOHY	56

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

MOTIVACE PRÁCE

PRÁCE vznikla za účelem vyvinutí miniaturního manipulativního nástroje s co nejnižší hmotností a zároveň s co nejlepšími vlastnostmi pro úchop předmětů různých tvarů a materiálů. Po vyrobení je cílem implementovat tuto technologii na mikroroboty polohované magnetickým polem.

I.1.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

ADHEZE Schopnost materiálu (především dvou rozdílných materiálů) spolu přilnout. Fyzikálně je to schopnost přenosu tečných sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu. Adheze je taktéž definovatelná chemicky jako síla přilnavosti, mezimolekulární přitažlivé chemické a fyzikální síly na styčných plochách v nerovnostech a pórech materiálů (Van der Waalsova síla). Van der Waalsovy síly jsou velmi slabé přitažlivé síly, které působí mezi nepolárními molekulami a jsou důsledkem vzniku okamžitého elektrického dipólu.

Pěti základními mechanizmy adheze jsou mechanická adheze (suchý zip), chemická adheze (dva materiály vzájemně tvoří sloučeninu a díky tomu drží pohromadě), disperzní adheze (Van der Waalsova síla), elektrostatická adheze, difuzní adheze (polymery)

POLARIZACE DIELEKTRIKA Jev, který se odehrává v dielektriku po vložení do elektrického pole. Dochází k orientování dipólů v jednom směru. Tento jev je základem pro elektroadhezi.

I.1.2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI

ELEKTROADHEZE Fyzikální jev, při kterém dochází vlivem intenzity elektrického pole dojde k přitažlivosti dvou těles oddělených tenkou vrstvou izolačního materiálu.

FLEXIBILNÍ VS ELASTICKÉ MATERIÁLY Tyto dva pojmy jsou pro celou práci velmi zásadní a je důležité pochopit rozdíl mezi nimi. Flexibilitu je možné si představit jako běžnou tenkou plastovou fólii. Lze ji tedy libovolně ohýbat bez toho aby došlo k poškození materiálu. To je charakteristické i pro elastické materiály, ale ty mají ještě navíc schopnost i prodlužovat svojí délku bez vznikutí trvalé deformace. Právě tato vlastnost je obrovskou výhodou. Typickým zástupcem může být silikon.

ELASTICKÁ ELEKTRODA Elektroda z elektricky vodivého materiálu, která neztrácí své elektrické vlastnosti při značné deformaci a ani při relativním prodloužením o 100 % původní délky.

MIKROROBOT POLOHOVANÝ MAGNETICKÝM POLEM Zařízení, kde jsou polohovány miniaturní magnety pomocí magnetického pole, které vzniká průchodem proudu cívkou.

I.1.2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI

Oblastí zkoumání je aplikace elektroadheze jako úchopového systému. Jev elektroadheze je v této práci komplexně popsán od fyzikálního principu po numerickou simulaci. Je zde také probrána problematika výroby elektroadhezivní fólie a na závěr slouží všechny nabrané poznatky z předchozích dvou oblastí pro vyvození nových a důležitých závěrů na poli aplikace elektroadheze. Práce obsahuje také vytyčení cílů do budoucna, kterých bude muset být dosaženo pro ještě lepší a širší využití elektroadheze.

i.2

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Vývoj moderních robotických systémů opouští od klasických mechanických úchopů, které jsou v některých případech velmi složité a zejména poruchové. Existuje několik nových technologií pro robotiku a elektroadheze je jednou z nich.

I.2.1 HISTORIE A SOUČASNOST ELEKTROADHEZE

Elektrostatická přitažlivost byla známa již v dobách antického Řecka. Již v 6. století př. n. l. tento jev objevil řecký filozof Thales Milénský (625-545). Při tření jantarové tyče pozoroval přitahování malých částic k povrchu jantaru.

Po Thalesovi se elektrostatickým nábojem dlouhou dobu nikdo nezabýval. K dalšímu bádání na poli elektrostatiky došlo až v roce 1600, kdy William Gilbert (1544-1603) rozlišil kladný, záporný náboj a jejich vzájemné působení. Jelikož jantar znamená v řečtině elektron, zavedl pojem "elektrina". S kvantitativním popisem tohoto jevu přišli Henry Cavendish (1731-1810) a Charles August Coulomb (1736-1806), podle kterého je také pojmenovaný Coulombův zákon.

V minulosti se věřilo, že elektrostatické síly dosahují jen velmi malých hodnot. Pokud se ale podíváme například na elektrostatickou vazbu mezi elektronem a protonem v atomu vodíku je tato vazba o 40 řádů větší než jejich gravitační vazba.

Elektrické pole může vyvolat přitažlivé síly mezi dvěma materiály. To umožňuje manipulovat s předměty bez použití mechanických chapadel, spojek nebo chemických lepidel. Elektroadhezivní zařízení se skládá z elektrod umístěných mezi dvěma tenkými vrstvami dielektrického materiálu. Přiložením opačného napětí na elektrody jsou vytvářeny adhezivní síly na široké spektrum materiálů (dřevo, plasty, kovy atd.) s různým tvarem a velikostí.

1.2.2 AKTIVNÍ POLYMERY

Ve srovnání s mechanickou nebo chemickou adhezí má velmi rychlou odezvu (v řádech ms), tichý chod, nízkou spotřebu energie a levnou výrobu. Vzhledem k těmto výhodám jsou elektroadhezivní zařízení používána např. při výrobě LCD k manipulování tekutými krystaly, k manipulování mikročástic polovodičů a také je využívána u robotů, kteří se mohou pohybovat po svislých stěnách. Využití má také ve vitreoretinální chirurgii [1]. V současné době je již elektroadheze využívána i pro komerční užití ve velmi jednoduchých aplikacích jako jsou přilnavé tabule [2] nebo technika pro automatickou manipulaci [3].

V porovnání s jinými současnými uchopovými systémy, jako například vakuové, které jsou již často používány v běžném provozu, je výhoda elektroadheze v rychlosti odezvy. Tato vlastnost je velmi kritická pro jakýkoliv uchopový systém. Další velká výhoda oproti vakuové technice je spotřeba energie. Tam kde je potřeba vakuový uchopový systém s kompresorem o výkonu v řádu kW, tam může být nahrazen elektroadhezivním zařízením se spotřebou v řádech wattů. O tři řády menší výkon je obrovskou výhodou v automatizační technice, kde může z tohoto důvodu značně snížit náklady.

Ke snížení nákladů také dojde v oblasti příslušenství. Není potřeba kompresor jako u vakuových systémů. Jediné příslušenství je zde zdroj napětí, který při dnešních technologiích lze vyrobit ve velmi malých rozměrech a za nízkou cenu. Tímto se redukuje rozměr a váha celého elektroadhezivního systému a je možné ho použít ve velmi náročných aplikacích, kde by konvenční metody selhaly. Tyto oblasti jsou zejména v kosmickém průmyslu, kde jsou váha a rozměry jedny z nejdůležitějších aspektů.

1.2.2 AKTIVNÍ POLYMERY

Elektroadheze není jediná nová technologie na poli robotiky. Další inovativní technologií pro tuto oblast, která se rychle vyvíjí jsou v současnosti aktivní polymery. Tyto polymery mění svůj tvar na různé podměty jako je elektrické pole, pH, magnetické pole, světlo a teplota. Díky těmto vlastnostem jsou označovány jako inteligentní materiály. Tyto materiály jsou využívány zejména v oboru biomimetika [4]. Aktivní polymery se rozdělují podle stimulu do dvou základních kategorií. První skupinou jsou neelektricky deformující se polymery, kde jsou stimuly pH [5], chemická reakce [6], světlo [7], magnetické pole [8] atd.

Druhou skupinou jsou polymery, které reagují deformací na elektrické pole (EAP). Ty se dále dělí na dielektrické (DEA) a ionické polymery. Do skupiny DEA patří feroelektrické polymery [9], dielektrické elastomery [10] pro výrobu úchopových systémů [11], elektrostriktivní elastomery [12], electro-viskoelastické polymery [13] a elastomery s tekutými krystaly [14]. Zástupci ionických polymerů jsou ionické gelové polymery [15], ionické polymery s kovovými kompozity [16], vodivé polymery [17] s použitím jako biosensory [18] a uhlíkové nanotrubičky [19].

Dielektrické a ionické polymery se od sebe výrazně liší v potřebné intenzitě elektrického pole k aktivaci deformace. U dielektrický polymerů je to hodnota >10 V/ μm . Na druhé straně pro ionické polymery pouze 1-2 Volty. Ve srovnání výsledné síly deformace je na tom na lépe dielektrická skupina polymerů. Další velkou výhodou dielektrických materiálů je stálost na vzduchu. Jsou velmi odolné a nepotřebují zvláštní ochranné prostředky jako je to u ionických polymerů, které musí setrvávat v tekutém stavu a na vzduchu značně degradují.

Vzhledem k široké škále těchto inteligentních materiálů vzniká velké množství prostoru tyto technologie aplikovat místo dnešních konvenčních manipulačních systémů. Limitem pro jejich častější a širší aplikaci je především dostupnost materiálů, kdy velká většina výše popsaných je zatím pouze ve fázi výzkumu na akademické půdě.

Může se zdát, že elektroadheze a aktivní polymery jsou konkurenti v oblasti robotiky, ale není tomu tak. Oba principy lze zkombinovat do jednoho úchopového systému. Ten touto kombinací vytěží z obou maximum [20]. Takto pokročilé systémy jsou zatím ve fázi vývoje, ale do budoucna je to veliký příslib. Spolu se zlepšováním dostupných materiálů bude růst i poptávka po tzv. soft grippers, které díky materiálům obdrží ještě lepší a spolehlivější vlastnosti. Spolu s aktivními polymery tvoří elektroadheze možnou budoucnost robotiky bez mechanických částí jako jsou převodovky, úchopové hlavice atd.

i.3

HLAVNÍ CÍLE PRÁCE

KOMPLEXNÍ náhled na elektroadhezivní systémy od numerické simulace po experimenty a případové studie jsou hlavní oblasti zkoumání této práce. Celou práci lze shrnout do následujících bodů:

- Formulace a verifikace matematického modelu elektroadheze pro budoucí výpočty elektroadhezivní síly
- Numerická simulace jevu elektroadheze a odvození důležitých charakteristik pro výrobu
- Návrh fólie podle získaných znalostí ze simulace
- Výroba prototypu pomocí konvenčních i nekonvenčních metod s cílem co nejvíce zjednodušit výrobu a následně porovnat všechny metody výroby elektroadhezivní fólie podle náročnosti a výsledné kvality produktu
- Pomocí funkčního prototypu provést experimenty s cílem ověřit vytvořený matematický model elektroadheze
- Navrhnout možnost implementace elektroadhezivní fólie na mikroroboty polohované magnetickým polem
- Případové studie pro aplikace elektroadheze v kosmickém průmyslu, logistice a robotice

Část II

TEORETICKÝ ROZBOR

ii.1

ELEKTROADHEZE

ELEKTROADHEZE je elektrostatický jev mezi dvěma povrchy vystavenými elektrickému poli. Důsledkem tohoto jevu je vzájemná atraktivita dvou těles.

II.1.1 FYZIKALNÍ PRINCIP ELEKTROADHEZE

Princip elektroadheze je založen na základním zákonu elektrostatiky, kterým je vzájemná atraktivita dvou opačných nábojů. Tato atraktivita má za následek vznik přitažlivých sil.

Prostředkem pro vyvolání elektroadhezivního jevu je fólie složená s dvou vodivých elektrod umístěných mezi dvěma nevodivými vrstvami. Elektrody jsou nejčastěji uspořádány tak, že navzájem tvoří motiv tzv. dvou vnořených hřebenů. Tato fólie je označována jako fólie elektroadhezivní (Obr.1).

V případě připojení jedné z elektrod na zdroj vysokého napětí a současně připojení druhé elektrody na potenciál rovný nule, vzniká v okolí fólie elektrické pole, které je schopno indukovat náboje v blízkém předmětu takovým způsobem, jaký je vidět na Obr.1. Mezi náboji na elektrodách a oblastmi naindukovaných opačných nábojů v manipulovaném předmětu vznikají přitažlivé síly. Pro vznik dostatečně velkých přitažlivých sil je potřeba použít zdroj vysokého napětí zpravidla v řádech kV.

Obecně si lze také elektroadhezi představit jako elektroastickou sílu vzniklou mezi dvěma paralelními elektrodami v kondenzátoru. Síla která vzniká mezi elektrodami, ale nejde aplikovat pro přesný výpočet elektroadhezivní síly. Důvodem je polarizace. V případě elektrod u kondenzátoru jde o čisté náboje. Naopak u elektroadheze, kde se manipuluje i s nevodivými materiály, jde o dipóly. Proto elektroadhezivní síla nabývá menších hodnot než síla vypočtená aproximací na paralelní elektrody kondenzátoru. Tato úvaha

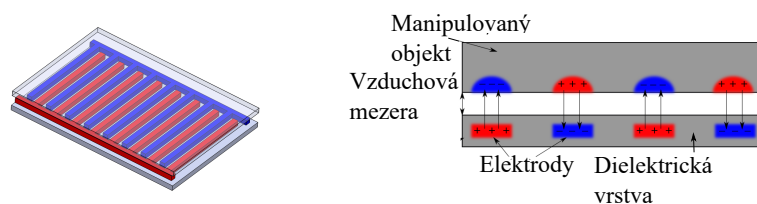
je lépe použitelná v případě uvažování manipulování vodivými předměty, kde nedochází k polarizaci a tudíž jsou si jevy více podobné.

Největších hodnot dosahuje elektroadhezivní síla na hranicích elektrod. To je důvod, proč se používá motiv tzv. dvou vnořených hřebenu, který vyniká svojí členitostí. Na druhé straně s přidáváním hran elektrod, resp. přidáváním více elektrod na stejnou plochu, dochází logicky ke zmenšování plochy elektrod, protože izolační mezeru nelze zmenšovat do nekonečna, a to vede k celkovému snížení elektroadheze. Je zde tedy optimální poměr mezi šířkou elektrod a izolační mezerou mezi nimi. Tato problematika je podrobněji rozebrána v kapitole zabývající se simulací elektroadheze (kapitola ii.1.3).

Ačkoliv mezi jednotlivými segmenty na elektroadhezivní fólii a manipulovaným materiálem vznikají velmi malé síly, po sečtení jednotlivých segmentů na celé ploše již síla dosahuje větších hodnot. Tato síla je již schopna vyvinout úchop pro manipulaci s různými objekty.

Malé síly mezi jednotlivými segmenty poskytují také jednu výhodu, a tou je potřebná síla pro oddělení dvou těles, které jsou vzájemně přitahovány vlivem elektroadheze. Pro jejich oddělení je možno použít velmi malou sílu, která se rovná přitažlivé síle na jednom segmentu a následně vznikne tzv. peeling efekt, kdy se objekty se a není tedy nutno vyvinout stejně velkou sílu, kterou jsou oba materiály vzájemně přitahovány, ale mnohem menší resp. sílu rovnající se elektroadhezivní síle na jednom segmentu.

Další fakt, který musí být uvažován při elektroadhezivním jevu, je vznik vzduchové mezery, která vzniká na kontaktu elektroadhezivní fólie a manipulovaného materiálu. Vzniku této mezery nelze zabránit a lze ji pouze minimalizovat. Důvodem je nedokonalý kontakt a je to velmi důležitý aspekt, který musí být brán v úvahu pro výpočet elektroadhezivní síly.



Obr. 1: Náhled elektroadhezivní fólie ve 3D pohledu a znázornění principu elektroadheze pro dielektrické materiály v řezu fólií

II.1.2 MATEMATICKÝ MODEL ELEKTROADHEZE

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole (kapitola ii.1.1) jev elektroadhzeze si lze představit jako elektrostatické síly mezi dvěma paralelními elektrodami kondenzátoru. Tento postup se nezaobírá jevem polarizace, který při elektroadhezivním jevu v dielektrických materiálech vzniká a je jeho důležitou součástí. Zde je tedy uveden výpočet přitažlivé síly mezi paralelními elektrodami kondenzátoru

$$\begin{aligned} F_c &= -\frac{\partial W_e}{\partial y} = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} E_y D_y \int_V dV = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon \left(\frac{U}{d} \right)^2 w l \cdot y = -\frac{1}{2} \varepsilon \left(\frac{U}{d} \right)^2 w l, \end{aligned} \quad (1)$$

kde F_c je přitažlivá síla mezi elektrodami kondenzátoru, W_e celková energie, E_y je složka y intenzity elektrického pole, D_y elektrická indukce ve směru y , V objem, ε_0 permitivita vakua, U napětí, d výška dielektrické vrstvy, w šířka elektrod a konečně l délka elektrod. Tento vztah může sloužit pro hrubou představu hodnot, jakých hodnot může elektroadhezivní síla pro daný návrh dosahovat.

Pro přesnější výsledek s uvažováním jevu polarizace je třeba elektroadhezivní sílu počítat pomocí Maxwellova tenzoru pnutí. Tato metoda byla použita v této práci a níže je odvozen vztah pro výpočet elektroadhezivní síly. V další kapitole jsou prezentovány výsledky simulace, kde byl použit tento způsob výpočtu.

Postup pro výpočet výsledné elektroadhezivní síly je tedy následující. Vyjdeme z rovnice pro Maxwellův tenzor pnutí

$$\overleftrightarrow{T}_{ij} = \varepsilon_0 (E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2) + \frac{1}{\mu_0} (B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2), \quad (2)$$

kde $\overleftrightarrow{T}_{ij}$ je Maxwellův tenzor pnutí, ε_0 permitivita vakua, E_i složka intenzity elektrického pole ve směru i , E_j složka intenzity elektrického pole ve směru j , δ_{ij} je Kroneckerovo delta, μ_0 permeabilita vakua, B_i složka magnetické indukce ve směru i , B_j složka magnetické indukce ve směru j . Maxwellův tenzor pnutí může směřovat celkem do devíti směrů. To lze reprezentovat následující maticí.

$$\overleftrightarrow{T}_{ij} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Jelikož nás zajímá výsledná síla pouze kolmá k manipulovanému tělesu tj. ve směru osy y můžeme ostatní směry zcela zanedbat a vypočítáme pouze T_{yy} . Dosazením T_{yy} do rov.(2) a po zanedbání druhé poloviny rov.(2), z důvodu zanedbatelně malého proudu, dostáváme následující vztah

$$T_{yy} = \frac{1}{2}\epsilon_0(E_y^2 - E_x^2), \quad (4)$$

kde E_x složka x intenzity elektrického pole

Pro vypočítání velikosti elektroadhezivní síly byl použita rovnice (5) s dosazením funkce intenzity elektrického pole uprostřed vzduchové mezery mezi fólií a manipulovaným tělesem

$$F = \frac{1}{2}\epsilon_0 l \int_0^L (E_y^2 - E_x^2) dx, \quad (5)$$

kde L je vzdálenost os dvou sousedících elektrod. Tento vztah vypočítá výslednou sílu mezi dvěma sousedícími elektrodami.

Pro zjištění síly pro celý povrch fólie už stačí pouze vynásobit počtem elektrod -1.

II.1.3 SIMULACE ELEKTROADHEZE

Simulace rozložení elektrického potenciálu a elektrického pole byla provedena v programu COMSOL Multiphysics® Modeling Software, kde pro výpočet rozložení intenzity elektrického pole byla použita studie stacionární elektrostatického pole za využití těchto rovnic

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -\rho \quad (6)$$

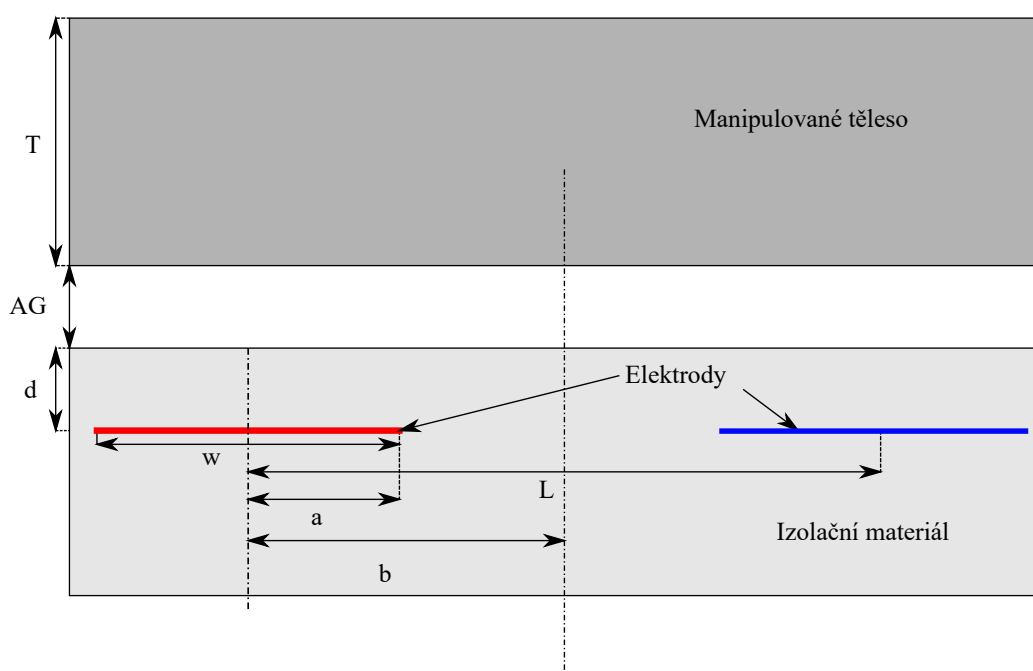
$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (7)$$

kde φ je elektrický potenciál a ρ je hustota volného náboje. Následné výpočty a vykreslení závislostí na jednotlivých parametrech byly prováděny v prostředí Matlab.

Vzhledem k periodickému opakování motivu elektrod na fólii lze provést simulaci pouze na části fólie. Zkoumaným segment ohraničují osy dvou sousedících elektrod s opačným nábojem. Celý model ale musí obsahovat ještě další čtyři elektrody, které jsou

nejblíže zkoumanému segmentu resp. dvě na obou stranách segmentu. Je to z toho důvodu, že nejbližší elektrody ovlivňují výsledné elektrické pole na zkoumaném segmentu. V případě, že se použijí pouze dvě elektrody dochází k chybě výsledku o cca 20 %. Počet šesti elektrod byl zvolen experimentálně, kdy při přidání více elektrod se již výsledné elektrické pole neměnilo. Je to výrazné zjednodušení modelu pro rychlejší vyhodnocování výsledků se zanedbatelnou chybou oproti modelování elektrického pole na celé ploše fólie.

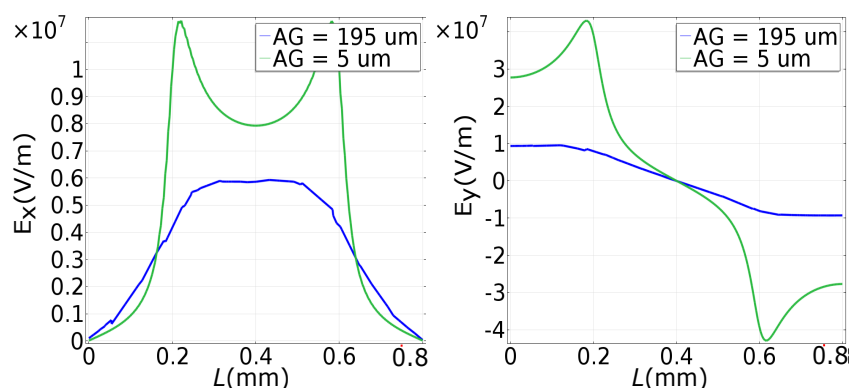
Zkoumaný segment modelu tedy obsahuje izolační materiál, ve kterém jsou umístěny dvě elektrody s opačným nábojem. Dále je zde manipulované těleso a vzduchová mezera AG (Obr.2).



Obr. 2: Vytvořený model se znázorněnými důležitými parametry

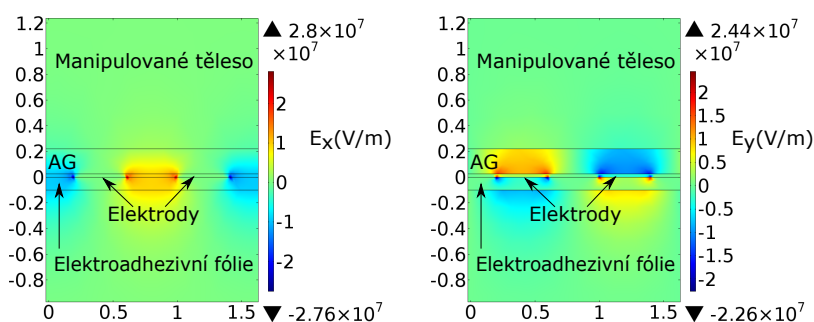
Velikost elektroadhezivní síly, jak můžeme vidět z rov.(5), závisí na složkách x a y intenzity elektrického pole. Čím větší je složka y , tím dosahuje výsledná elektroadhezivní síla vyšších hodnot. Velikost této složky je velmi závislá na velikosti vzduchové mezery mezi fólií a manipulovaným tělesem. Snížením vzduchové mezery o 0.19 mm se maximum i minimum intenzity zvýší až o 400 %. Závislost elektroadhezivní síly na složce x intenzity elektrického pole je opačná, tedy s rostoucí velikostí E_x klesá výsledná elek-

troadhezivní síla. Zde dochází také ke zvýšení maxima i minima se snižující se šířkou vzduchové mezery. Rozdíl je v tom, že zde je nárůst výrazně menší. Se stejným snížením vzduchové mezery jako v předchozím případě, dochází k navýšení maxima o 100%, jak je patrné na Obr.3.



Obr. 3: Složka x a y intenzity elektrického pole E mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným tělesem ve vzduchové mezeře pro jeden segment mezi dvěma elektrodami

Dalším výrazným rozdílem mezi složkami E_x a E_y je prostor, ve kterém se nachází jejich celkové maximální i minimální hodnoty. Složka E_x je nejvýraznější v těsném okolí elektrod zejména na jejich okrajích. Toto je důvod proč se snížením vzduchové mezery nedochází k tak značnému nárůstu maxima a minima. Naopak složka E_y je nejvýraznější ve vzduchové mezeře mezi fólií a manipulovaným tělesem (Obr.4). Z toho vyplývá velká závislost na šířce vzduchové mezery. Toto potvrzuje informaci, která byla uvedena v předchozím odstavci.

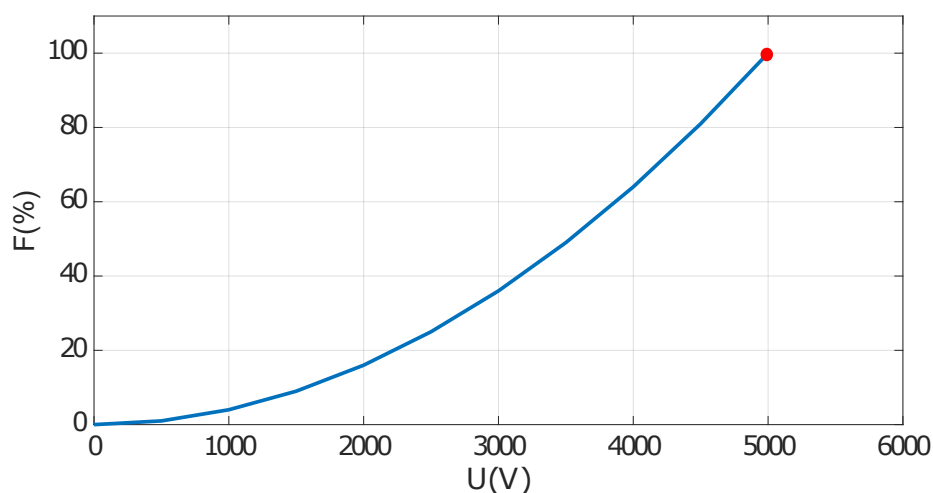


Obr. 4: Složka x a y intenzity elektrického pole E mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným tělesem ve vzduchové mezeře

Po provedení simulace s měněním různých parametrů, a to jak přivedeného napětí, tak i parametrů fólie jako šířky elektrod, šířky izolační mezery, výšky dielektrické vrstvy, výšky vzduchové mezery a použitých materiálů s různou permitivitou, lze graficky zobrazit velikost elektroadhezivní síly na těchto parametrech. Příslušné závislosti jsou jednotlivě probrány níže.

Jako referenční hodnota u všech závislostí je zavedená velikost síly vypočítané pro fólii s následujícími parametry: šířka elektrod $w = 400 \mu\text{m}$ stejně jako izolační mezera mezi nimi, výška dielektrické vrstvy $d = 25,4 \mu\text{m}$, výška vzduchové mezery $AG = 195 \mu\text{m}$ (tato výška byla experimentálně změřena), relativní permitivita dielektrické vrstvy $\epsilon_r = 3,4$, manipulovaného materiálu $\epsilon_r = 4$, přiložené napětí $U = 5000 \text{ V}$ a tloušťka materiálu $T = 1,8 \text{ mm}$. Velikost elektroadhezivní síly je na grafech zobrazena jako červený bod.

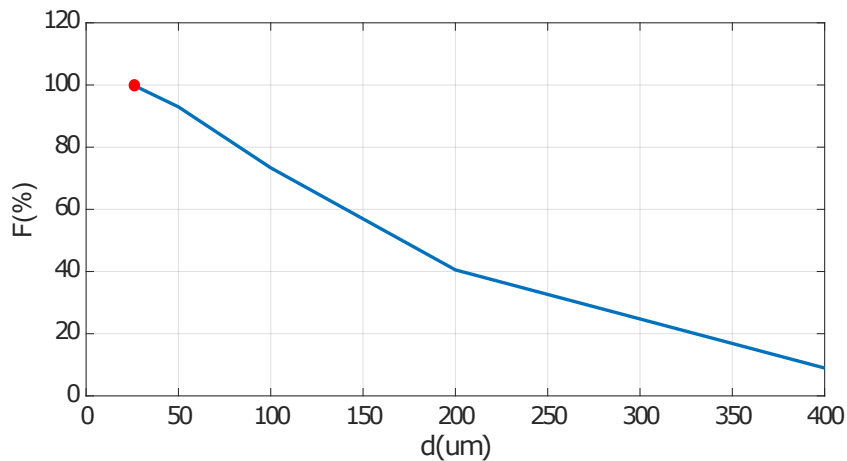
Základním parametrem pro elektroadhezivní sílu je přiložené napětí U . Na Obr.5 můžeme vidět, že s rostoucím napětím roste i elektroadhezivní síla. Například při snížení napětí z 5000 V na 2500 V , výsledná síla klesne o 75% .



Obr. 5: Závislost elektroadheze na přiloženém napětí

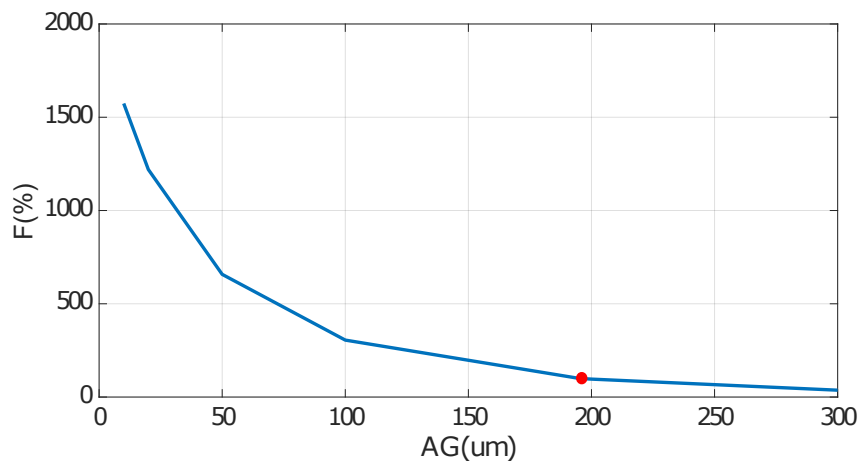
Výška materiálu d , který odděluje elektrody od okolí ovlivňuje velikost dosažené elektroadheze negativně. Závislost na tomto parametru je velmi důležitá při výrobě fólie, aby nebyla vzniklá vrstva příliš silná. Již pro tloušťku $d = 400 \mu\text{m}$ je jev elektroadheze degradován o 75% oproti uvažované referenční hodnotě (Obr.6).

ii.1.3 SIMULACE ELEKTROADHEZE



Obr. 6: Závislost elektroadhezivní síly na výšce izolační vrstvy folie

Dalším základním parametrem pro elektroadhezivní jev je vzduchová mezera mezi fólií a manipulovaným předmětem AG. Zde je závislost opačná než v případě přiloženého napětí. Se zvětšující se vzduchovou mezerou degraduje síla velmi strmě a již od vzdálenosti $300 \mu\text{m}$ je výsledná síla téměř zanedbatelná. Na Obr.7 můžeme vidět, že referenční hodnota dosahuje pouze polovinu velikosti síly, která je možná při vzduchové mezeře $AG = 150 \mu\text{m}$. I takto malé zredukování vzduchové mezery způsobuje značný nárůst maxima síly.

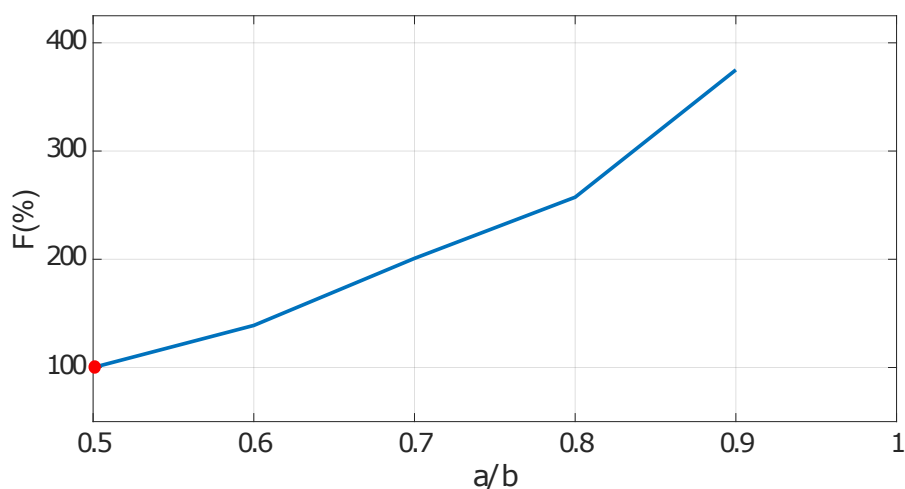


Obr. 7: Závislost elektroadhezivní síly na velikosti vzduchové mezery mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným předmětem

Velikost elektroadhezivní síly závisí také na vlastnostech materiálu, který odděluje elektrody od manipulovaného předmětu. Čím větší je relativní permitivita izolačního materiálu, tím je větší elektrická intenzita ve vzduchové mezeře mezi tělesy. S větší intenzitou elektrického pole zákonitě roste i velikost elektroadhezivní síly (Obr.30).

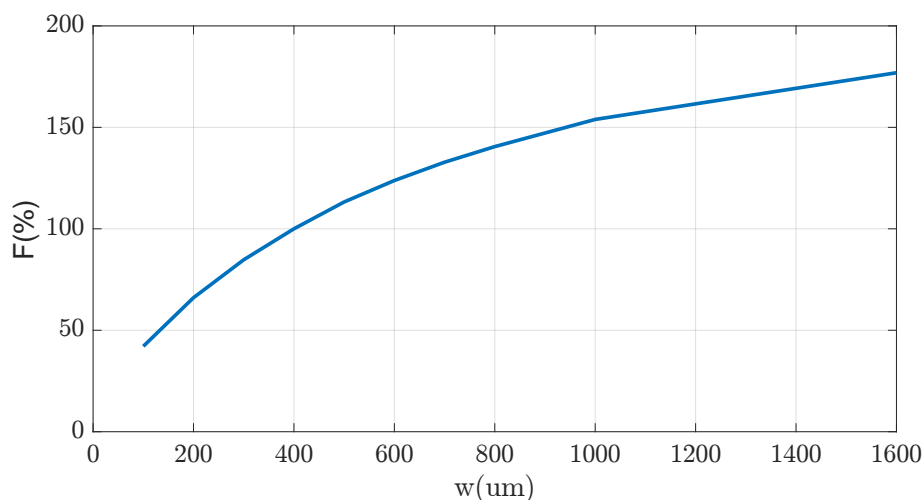
Velikost elektroadhezivní síly také závisí na tloušťce manipulovaného materiálu T . Pro předměty s velmi malou tloušťkou v řádech desetin milimetru je velikost elektroadhezivní síly negativně ovlivněna. Od tloušťky objektu cca 1 mm dosáhne síla maxima a s narůstající tloušťkou se již nemění (Obr.31).

Velikost síly závisí také na poměru šířky elektrod a izolační mezery mezi nimi, resp. na poměru a/b . Pro dosažení co nejvyšší hodnoty výsledné síly musí být tento poměr co největší, zároveň ale tento poměr nesmí být větší nebo roven 1, protože by došlo k uzavření elektrického obvodu uvnitř fólie a výsledná elektroadhezivní síla by se rovnala nule. Tato závislost je zobrazena na Obr.8. Při pouhém rozšíření elektrod o 0.2 mm (tzn. ze stávajících 0.4 mm na 0.8 mm) na obou stranách je výsledná síla o 100 % větší.



Obr. 8: Závislost elektroadhezivní síly na poměru šířky elektrody a mezery

Dalším předmětem simulace bylo zjistit optimální poměr mezi šířkou elektrody s fixní izolační mezerou pro co největší možnou výslednou sílu. Bylo porovnáno několik možným šířek elektrod s různou výškou vzduchové mezery. Následně byly tyto hodnoty vzájemně porovnány.



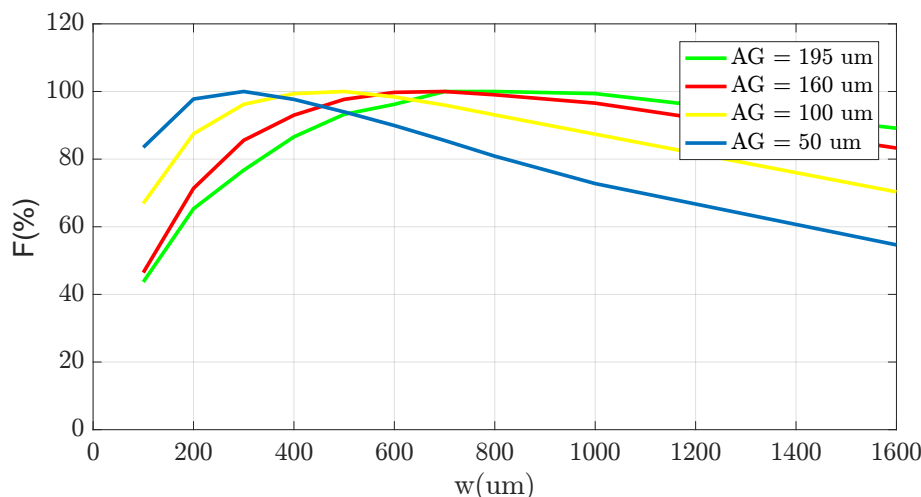
Obr. 9: Závislost velikosti elektroadhezivní síly při fixní izolační mezeře na šířce elektrody

V předchozím případě (Obr.8) byly osy elektrod stále na stejném místě a zmenšovala se pouze izolační mezera při konstantním napětí. V praxi je to ale právě izolační mezera, která je dána použitým materiálem a nelze jí takto zmenšovat bez snížení napětí. Proto Obr.9 ukazuje závislost velikosti síly při fixní izolační vzdálenosti na šířce elektrod w . Pro zobrazený případ byla použita vzduchová mezera $AG = 100 \mu\text{m}$. Zde je vidět, že síla narůstá, ale strmost křivky s rostoucí šířkou elektrody klesá. Další rozdíl oproti předchozímu případu je v tom, že zkoumaný segment, tedy vzdálenost mezi osami elektrod, nemá již fixní délku, ale s šířkou elektrody se rozšiřuje. Z důvodu klesající strmosti křivky lze najít bod, resp. šířku elektrody, pro kterou výsledná síla dosáhne maxima na určité velikosti plochy. Právě tento bod reprezentuje ideální šířku elektrody. To znamená, že když je šířka elektrod větší než tato optimální hodnota, tak sice síla na jednom segmentu se zvětší, ale segment je již moc široký a tudíž se segment, skládající se ze dvou elektrod, nevejde na elektroadhezivní fólii tolikrát jako optimální šířka elektrody a celková síla bude ve výsledku nabývat menších hodnot. Na druhé straně, když bude šířka elektrod menší než optimální šířka, tak se sice vejde na motiv vícekrát, ale síla na jednom segmentu není dostatečně vysoká, aby dosáhla celkových hodnot jako u optimálního návrhu.

Optimální šířka elektrody popsaná v předchozím odstavci je závislá na velikosti vzduchové mezery AG . To znamená, že pro každou vzduchovou mezera existuje při fixní izolační mezeře optimální šířka elektrody. Tato závislost je zobrazena na Obr.10, kde je

ii.1.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

vidět, že čím menší velikost má vzduchová mezera, tím je optimální šířka elektrod menší. Důvodem je, že čím je vzduchová mezera větší, tím musí být generovaná intenzita elektrického pole větší a toho se docílí rozšířením elektrody.



Obr. 10: Porovnání optimalizačních křivek pro různé výšky vzduchové mezery

II.1.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

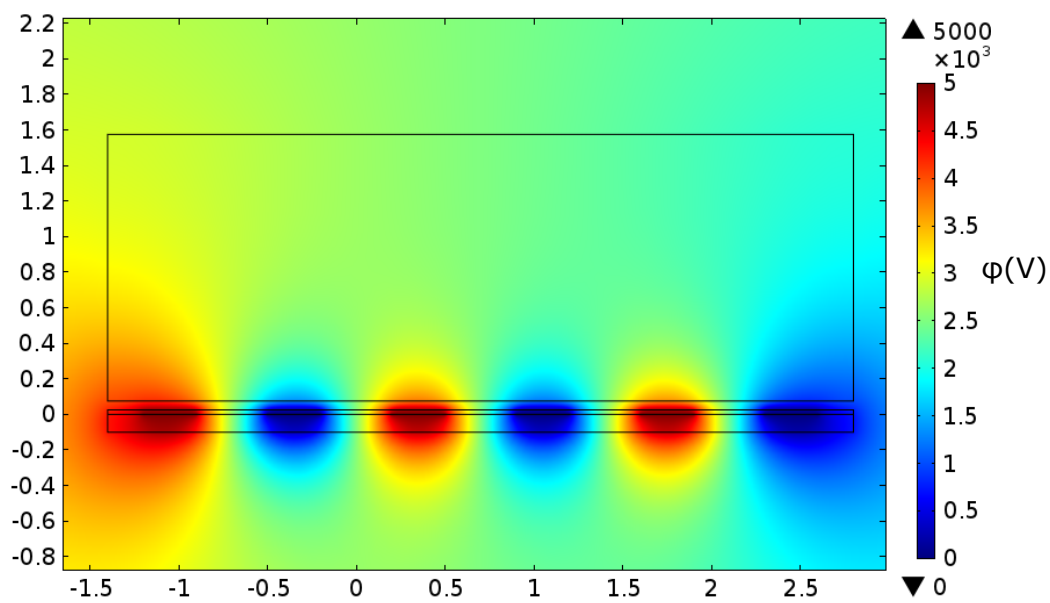
Ze simulace může být odvozeno několik velmi důležitých závěrů, které se týkají budoucího návrhu fólie a materiálů pro její výrobu.

Prvním aspektem je volba izolačního materiálu. Ten by měl mít velmi vysokou elektrickou pevnost v řádech desítek kV/mm. Důvodem je závislost elektroadhezivní síla na přiloženém napětí U a výšce izolační mezery d . Oba tyto parametry fólie dokáží značně ovlivnit výslednou sílu. Právě s kvalitním elektrickým izolantem je možné použít vysoké napětí 3-5 kV při použití izolační vrstvy v řádech desítek μm bez poškození izolace.

Dalším parametrem izolačního materiálu jsou jeho mechanické vlastnosti, konkrétně jeho flexibilita a pružnost. Právě tyto dva parametry velmi ovlivňují velikost elektroadhezivní síly. Použitím elastického a flexibilního materiálu dojde k redukci vzduchové mezery AG mezi fólií a manipulovaným předmětem a tím dojde ke značnému zvýšení elektroadhezivní síly. Stejně mechanické vlastnosti jako pro izolační materiál musí platit i pro vodivé elektrody z důvodu zachování celistvosti celé fólie jako celku.

ii.1.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V obou kategoriích jak v elektrických, tak v mechanických vlastnostech musí být fólie na vysoké úrovni. Výrazný nedostatek v jedné kategorii může mít za následek degradování elektroadhezivního jevu na nepoužitelné hodnoty. Tento fakt musí být vzat v potaz při výrobě elektroadhezivní fólie. Problematika výroby elektroadhezivních fólií je probrána v následující kapitole.



Obr. 11: Rozložení elektrického potenciálu na celé ploše modelu

Část III

NÁVRH A VÝROBA ÚCHOPOVÝCH ZAŘÍZENÍ

iii.1

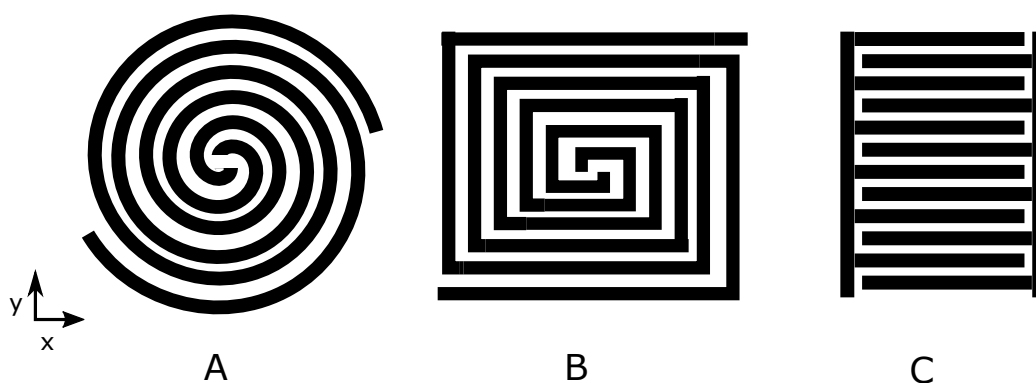
NÁVRH ÚCHOPOVÝCH ZAŘÍZENÍ

V TĚTO kapitole je probrána problematika návrhu fólie tzn. motiv elektrod. Na začátku práce (kapitola ii.1.1) bylo uvedeno, že elektroadhezivní fólie obsahuje elektrody, které utvářejí motiv tzv. dvou vnořených hřebenů. Nyní dojde k vysvětlení, proč tomu tak je.

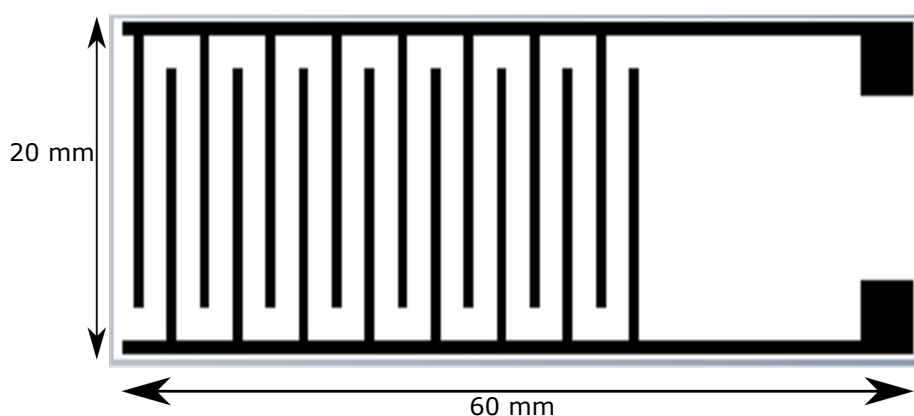
III.1.1 NÁVRH MOTIVŮ ELEKTROD PRO FÓLIE

Pro výrobu elektroadhezivní fólie byl zvolen motiv elektrod tzv. dvou vnořených hřebenů (Obr.12 C). Důvodem je, že složka síly, která je majoritní, působí kolmo směrem od fólie přičemž ostatní složky jsou zanedbatelné a je tedy dosaženo maximální velikosti síly v požadovaném směru. U jiných motivů toto neplatí. Příkladem může být uspořádání elektrod jako dvou spirál (Obr.12 A), kdy se výsledná síla rozdělí rovnoměrně mezi všechny směry. Toto může být využito v aplikacích, kde dochází k úchopu na více plochách a je tedy potřeba vyvíjet sílu více směry. U uspořádání elektrod ve čtvercové spirále (Obr.12 B) dochází k rozdělení síly do dvou směrů a to do směru x a y . V obou zmíněných případech, u kruhové a čtvercové spirály, dosahuje výsledná síla v jednotlivých složkách menších hodnot, než je tomu u zvoleného motivu tzv. dvou vnořených hřebenů. Právě proto byl zvolen tento motiv na úkor ostatních, protože právě tato složka síly se v aplikaci, kterou se tato práce zabývá, nejvíce uplatňuje.

Další výhodou hřebenů je také jejich jednoduchost. Ze všech tří možných motivů obsahují nejméně různých ohybů elektrod a jde prakticky pouze o přímé elektrody. Tento aspekt je výhodou zejména z hlediska výroby, kdy klade menší nároky na výrobní zařízení. Pro design elektroadhezivních folií byl použit 3D CAD software (Solidworks® 2016).



Obr. 12: (A) motiv dvojité spirály, kde je síla nejvíce rozptýlena, (B) motiv čtvercové spirály, kde je síla koncentrována již pouze do směrů x a y , (C) motiv tzv. hřeben, v této práci zvolený. Majoritní složka kolmá k folii ve směru y

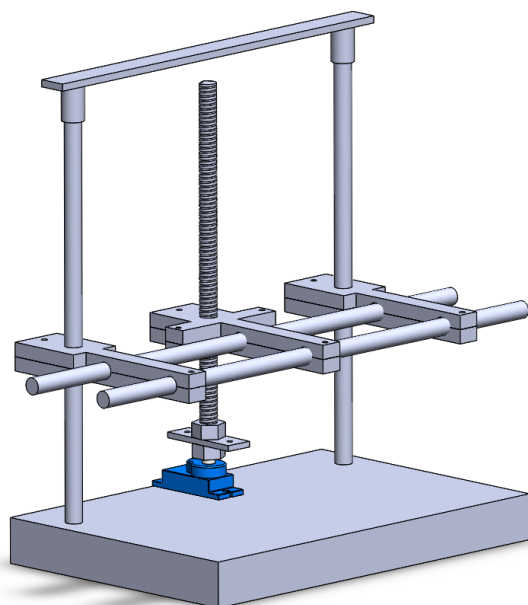


Obr. 13: Vytvořený návrh motivu elektrod tzv. dvou vnořených hřebenů i s vývody

III.1.2 NÁVRH NEVODIVÉ KONSTRUKCE PRO EXPERIMENTY

Pro vytvoření modelu nevodivé sestavy byl použit 3D CAD software. Pro výrobu byla použita 3D tiskárna (Prusa i3) nacházející se v laboratoři katedry Teoretické elektrotechniky. Velkou výhodou této konstrukce bylo kompletní sestavení z nevodivých materiálů, tudíž nedocházelo k přeskokům i při vysokém napětí až 25 kV. Sestava byla poháněna kontinuálně se točícím servomotorem, který byl připojen na závitovou tyč s připevněnou platformou. Rotací závitové tyče bylo možno pohybovat platformou nahoru a dolů. Na řízení celé sestavy byla použita vývojová deska Arduino UNO (Obr.14).

iii.1.2 NÁVRH NEVODIVÉ KONSTRUKCE PRO EXPERIMENTY



Obr. 14: Nevodivá konstrukce pro experimenty poháněná servo motorem

iii.2

VÝROBA FOLIÍ

VÝROBA fólií byla založena na výsledcích, které byly prezentovány v kapitole simulace elektroadheze (kapitola ii.1.3). Byly to především ty závěry, které se týkaly volby materiálů. Při výrobě fólií bylo použito několik postupů pro dosažení co nejlepší mechanických a současně udržení dobrých elektrických vlastností. Zejména u elektricky vodivé elektrody jsou tyto dva aspekty kritické pro správnou funkci a maximalizování elektroadhezivního jevu. Další kritérium pro výrobu byla časová a technologická náročnost. Z tohoto důvodu bylo předem opuštěno od technologií jako je chemické leptání.

III.2.1 PŘÍPRAVA MATERIÁLU PRO ELASTICKÉ ELEKTRODY

Pro výrobu byly použity dva materiály. Jako základní substrát byl zvolen silikon od firmy Smooth-On (Ecoflex 00-30, Smooth On). Tento silikon se skládá ze dvou složek. Po smíchání těchto složek v poměru 1:1 objemově i hmotnostně dojde za 4 hodiny při pokojové teplotě k jeho zatuhnutí. Po uplynutí této doby má silikon výborné mechanické vlastnosti. Je velmi pružný a vydrží relativní prodloužení až o 900 % původní délky bez poruchy struktury. Jeho elektrické vlastnosti pro použití jako vodiče jsou ale nepříznivé. Vyznačuje se jako velmi dobrý izolant s vysokou elektrickou pevností (>13 kV/mm).

Pro dosažení dobré elektrické vodivosti při současném udržení dobrých mechanických vlastností byl přimíchán do směsi silikonu uhlíkový prášek (Vulcan XC27, Cabot) v poměru 1:5 hmotnostně k silikonu.

Postup při výrobě obsahoval několik kroků. Nejdříve byly přesně naváženy všechny složky do jednotlivých nádob. Jako první se smíchal uhlíkový prášek s alkoholem (ethanol), aby došlo k narušení struktury uhlíku a došlo k lepšímu spojení se silikonem. Jako druhý krok se smíchal uhlíkový prášek se složkou A silikonu a velmi důkladně se směs

iii.2.2 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ ODLÉVACÍ FORMY

promíchala. Až poté se přidala druhá složka B a znovu se směs velmi důkladně promíchala, aby došlo k co nejlepšímu spojení mezi částicemi uhlíku a silikonem. Výsledná směs má horší mechanické vlastnosti než samostatný silikon, ale stále je materiál velmi pružný, nejsou znatelné stopy po uhlíkovém prášku a materiál je celistvý. Jeho elektrická vodivost se velmi zvýšila a směs má v průměru vodivost $0,55 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Vodivost je relativně nízká, ale při prodloužení materiálu se snižuje jen nepatrně. A právě tato vlastnost je kritická pro správnou funkci elektroadhezivní fólie při ohýbání a prodlužování, ke kterému dochází při kontaktu s manipulovaným objektem.

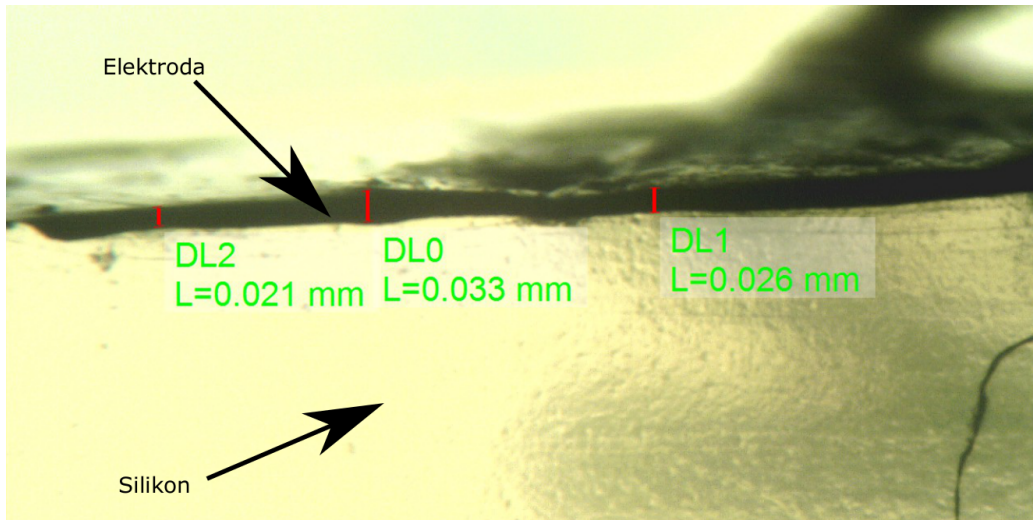
III.2.2 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ ODLÉVACÍ FORMY

Nejdůležitější prvkem této metody je odlévací forma z ABS vyrobená technologií 3D tisku (Obr.35), ve které je vytvořen motiv elektrod. Prvním krokem je vylití motivu elektrod v odlévací formě vodivou směsí. Po vylití se vodivá směs zalije silikonem a nechá se na vzduchu vytvrdit, čímž dojde k pevné vazbě mezi vodivou směsí a silikonem. Vytvrzená fólie s elektrodami se následně s formy vyjme, vloží se do druhé formy elektrodami směřujícími vzhůru a je nanesen opět silikon pro odizolování elektrod.

III.2.3 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ PLASTOVÉ ŠABLONY

Při tomto postupu výroby elektroadhezivní fólie je použita tenká fólie s plastového materiálu (PET). Do této folie je pomocí laseru vypálen zvolený motiv elektrod (Obr.38). Následně je plastová šablona s motivem elektrod položena na substrát a přes celý povrch je nanášena vrstva směsi uhlík/silikon viz. předchozí kapitola. Poté je stěrkou směs odstraněna a zůstává pouze tam, kde byla fólie vypálena laserem. Jako další krok je odstraněna fólie s motivem elektrod. Tím je dosaženo odstranění zbytkové směsi mezi jednotlivými elektrodami. Po odstranění je motiv elektrod okamžitě zalit čistou směsí silikonu. Materiál se nechá ztuhnout, aby došlo k pevnému spojení mezi elektrodami a silikonem. Po uplynutí doby pro ztuhnutí je fólie opatrně sejmuta a elektrody se zalijí s druhé strany opět silikonem pro kompletní izolování a opět se nechá ztuhnout.

iii.2.4 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ METODY RAZÍTKOVÁNÍ



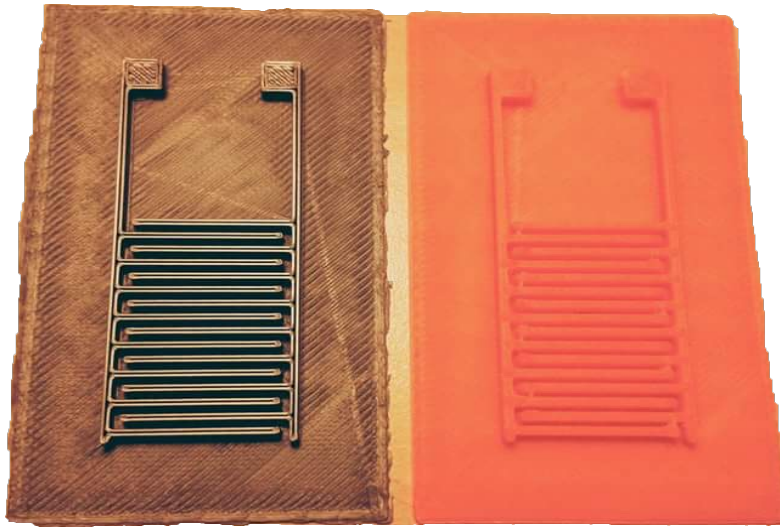
Obr. 15: Řez fólie vyrobené pomocí plastové šablony pod mikroskopem

III.2.4 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ METODY RAZÍTKOVÁNÍ

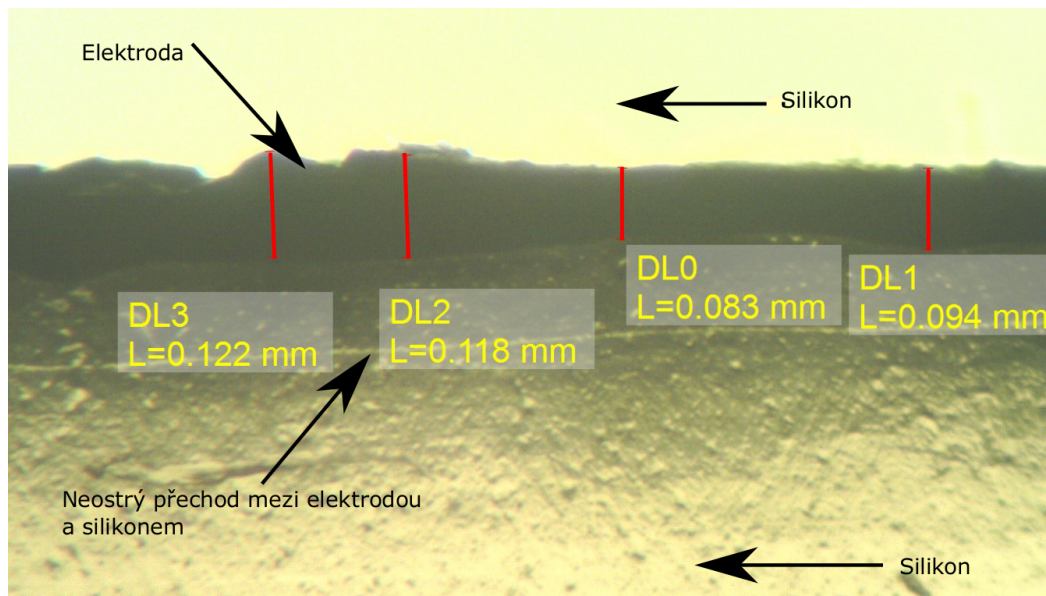
Tato metoda je velmi jednoduchá a výhodná pro rychlou výrobu celé fólie. Postup spočíval ve výrobě pevného razítka. Pomocí 3D CAD softwaru (Solidworks 2016, Dassault Systemes) byla navržena forma s motivem elektrod a ta byla následně vyrobena na 3D tiskárně. Dále byla vytvořena na fólii Melinex tenká vrstva vodivého materiálu pro flexibilní elektrody. Po přitisknutí formy na vrstvu vodivé směsi a následném oddělení se na formě vytvoří vrstva s vodivou směsí. Poté se forma opatrně přesune nad nevodivý substrát. Při doteku se substrátem dochází na místech s vodivou vrstvou k vytvoření motivu elektrod na daném substrátu. Po odejmutí formy se vodivý materiál zalije izolační vrstvou. Po ztuhnutí směsi se vzniklý materiál odloupne od substrátu, otočí se aby nyní ležel na izolační vrstvě a proces se zalitím silikonu se opakuje i z druhé strany. Následně je fólie připravena k použití.

V průběhu práce došlo k vylepšení postupu výroby. Zlepšení spočívalo v nanesení motivu elektrod pomocí razítka přímo na již ztuhlou tenkou vrstvu silikonu. To urychlilo celkový čas na výrobu fólie. Druhou výhodou této metody je, že nanášením na silikon, který je měkký materiál, nejsou kladeny tak velké nároky na drsnost povrchu razítka.

iii.2.4 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ METODY RAZÍTKOVÁNÍ

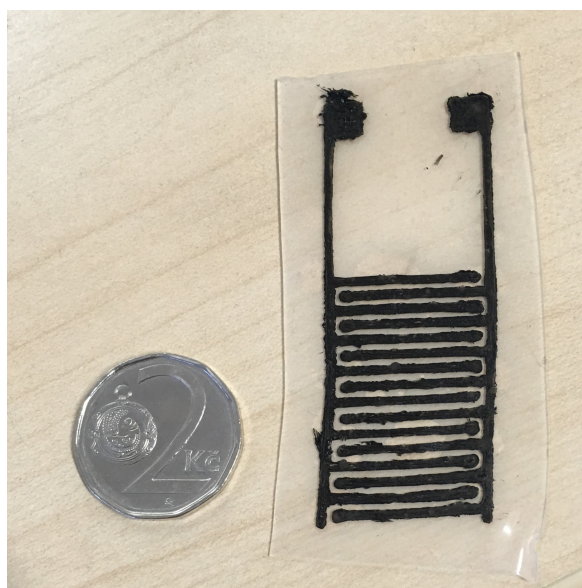


Obr. 16: Razítka pro nanesení motivu elektrod vlevo z materiálu PLA a vpravo z materiálu ABS



Obr. 17: Řez elektrody vyrobené metodou razítkování pod mikroskopem

iii.2.5 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ TECHNOLOGIE SÍTOTISKU



Obr. 18: Vyrobená fólie pomocí metody razítkování (pro srovnání s mincí 2 Kč)

III.2.5 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ TECHNOLOGIE SÍTOTISKU

Zde byla použita konvenční metoda pomocí technologie sítotisku, kdy byla vodivá směs tlačena stěrkou skrz mechanické síto na tenkou vrstvu silikonu, která byla s předstihem vytvrzena, nebo na plastovou fólii. Po nanesení vodivé směsi se motiv elektrod zalije opět vrstvou silikonu a nechá se na vzduchu vytvrdit. V případě nanesení při sítotisku přímo na silikon je elektroadhezivní fólie již hotová. Při použití plastové fólie musí ještě dojít po vytvrzení silikonu k odejmutí silikonu a vodivé směsi z plastové fólie a zalití z druhé strany fólie opět silikonem pro odizolování elektrod.

III.2.6 VÝROBA FÓLIE POMOCÍ TECHNOLOGIE AEROSOL JET PRINTING

Na výrobu fólie touto metodou bylo zapotřebí použití trojice materiálů. Prvním byla polyamidová fólie (Kapton®, DuPont). Tento materiál vyniká svojí vysokou izolační schopností i při své tloušťce $25.4 \mu\text{m}$ (236 kV/mm) a právě proto byla zvolena jako izolační vrstva, která odděluje elektrody od manipulovaného objektu. Pro nanesení elektrod byla zvolena směs stříbrných částic. Třetím použitým materiálem byl stejný silikon, který byl použit v předchozích dvou metodách.

iii.2.7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

U této metody, jako u jediné, bylo opuštěno od flexibilních elektrod. Další změna oproti předchozím metodám je nutnost využití nákladné techniky, která je schopna použít technologii Aerosol Jet Printing. Doba a náročnost výroby se tedy značně prodlužují.

Aerosol Jet Printing (AJP) je tisková technologie v současnosti vyráběná pouze společností Optomec (USA - Nové Mexiko). Jedná se o aditivní, selektivní, depoziční techniku, která umožňuje miniaturizaci elektronických systémů, realizaci jemných vodivých motivů a integraci pasivních součástek bez nutnosti přípravy masek a filmových předloh. Patentované řešení selektivní depoziční, které je zcela odlišné od principu inkoustové tiskárny, využívá aerodynamického proudu nosného plynu pro soustředění aerosolu deponovaného materiálu na přesně definovanou plochu substrátu.

Nyní je stručně popsán celý proces výroby elektroadhezivní fólie za pomoci technologie Aerosol Jet Printing. Nejdříve je pomocí AJP na fólii Kapton nanesen motiv elektrod složený ze stříbrných částic, který se následně v peci za zvýšené teploty nechá vytvrdit. Poté se motiv elektrod překryje vrstvou čistého silikonu pro úplné odizolování elektrod a ten se následně nechá na vzduchu ztuhnout. Není zapotřebí používat jakýchkoliv adheziv na dobré spojení fólie Kapton se silikonem. Po ztuhnutí silikonu mají oba materiály velmi pevnou vazbu bez vzduchové mezery. To bylo ověřeno pomocí měření elektrické pevnosti fólie pomocí zdroje vysokého napětí, kdy došlo k průrazu až po překročení elektrické pevnosti silikonu (Obr.36).

III.2.7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výroba zcela elastické fólie, tedy pomocí odlévací formy, plastové šablony nebo razítkování, ukázala problémy, které mohou nastat při operacích se směsí na elastické elektrody.

U metody pomocí odlévací formy vyvstal problém týkající se viskozity. Při zachování hmotnostního poměru 5:1 silikonu a uhlíkových částic ve vodivé směsi měla směs příliš vysokou viskozitu a nebylo možné rovnoměrně rozlít směs v odlévací formě. Při snížení množství uhlíkových částic ve vodivé směsi byl tento problém odstraněn, ale elektrická vodivost byla příliš nízká a nebylo tedy možné ji použít jako vodivé elektrody. Z tohoto důvodu byla metoda pomocí odlévací formy pro zbytek práce zavržena.

Při delším manipulování s elektricky vodivou směsí docházelo k vysýchání směsi a k jejímu následnému ztvrdnutí. To znemožňovalo její další použití. Dalším problémem vznikalo při vytvoření tenké vrstvy z tohoto materiálu, kdy docházelo v řádech vteřin k odpaření

ředidla a to mělo za následek nepřesné nanesení motivu elektrod s viditelnými místy, kam se materiál z důvodu vyšší viskozity nedostal. Při metodě pomocí plastové šablony docházelo ke komplikaci s odloupáváním plastové fólie od nevodivého substrátu a docházelo k nanesení směsi i pod šablonu.

Toto se netýkalo metody razítkování, ale zde na druhé straně docházelo ke značnému porušení ostrých hran elektrod a výsledný motiv elektrod nebyl zcela homogenní (Obr.34). Tento fakt je velmi zásadní z důvodu používání vysokého napětí při aplikaci fólie.

Kvalita nanesené vodivé směsi elektrod se liší pro metody pomocí plastové šablony a razítkování. U razítkování, jak můžeme vidět na Obr.17, dochází na ploše, kde se po nanesení motivu odděluje razítko, k neostrému přechodu mezi elektrodou a izolační vrstvou silikonu. Důvodem je vznik adhezivních sil mezi razítkem a směsí na elektrody. Motiv elektrod v případě metody pomocí plastové šablony (Obr.15) má ostrý přechod na hranici vodivé a izolační vrstvy. V porovnání kvality nanesení vodivé směsi lze říci, že vodivá směs nanesená pomocí plastové šablony má vlastnosti lepší, než je tomu u metody razítkování, zejména v přechodu mezi vodivou a izolační vrstvou.

Tento nedostatek u metody razítkování lze minimalizovat několika způsoby, např. vhodnou volbou materiálu pro razítko, kdy se volí materiál s nízkou adhezí k uhlíkové směsi, a dále lze na razítko před použitím nanést vrstvu ochranné vrstvy pro snížení adheze. Tento postup lze provádět pouze do bodu, kdy je motiv přenesen zcela bez defektů. Po překročení této hranice je již adheze mezi razítkem a vodivou směsí příliš nízká a motiv se nepřenesne na nevodivý substrát. Z porovnání těchto dvou metod vyšla lépe metoda razítkování, zejména kvůli jednoduchosti a rychlosti výroby a proto bylo od metody pomocí plastové šablony na zbytek této práce opuštěno. Dalším důvodem pro zvolení metody razítkování bylo, že v průběhu práce se všechny výše probrané problémy týkající se této metody podařilo velmi výrazně minimalizovat a výsledek je vidět na Obr.18.

I přes uvedené problémy při metodě razítkování je výsledná fólie velmi mechanicky odolná a vydrží i značné prodloužení bez trvalých poruch, a to, jak je popsáno v kapitole zabývající se výsledky simulace iv, je velmi kritická vlastnost. Důvodem je hlavně velmi pevná vazba mezi elektricky vodivou a izolační vrstvou, protože obě obsahují z větší části ten stejný materiál, kterým je silikon a to při procesu výroby vytvoří pevnou a odolnou vazbu.

Další postupem byla technologie sítotisku. Zde vyvstaly dva problémy. První problém se týkal vodivé směsi, která způsobovala ucpání síta a to zabraňovalo přenesení motivu

elektrod (Obr.33). Druhý problém vyvstal při používání sítotisku přímo na vrstvu silikonu. Díky nízkému povrchovému napětí silikonu se nedařilo uchytit vodivou směs na silikon a to navíc také přispívalo k ucpání síta. Díky těmto dvěma problémům byla metoda sítotisku pro zbytek práce zavrhnuta.

Situace u výroby fólie pomocí Aerosol Jet Printingu je opačná. Nanesení motivu elektrod je velmi přesné a homogenní na celé ploše (Obr.32). Mechanické vlastnosti s porovnáním elastické fólie jsou ale výrazně horší. Fólie je pouze flexibilní a motiv elektrod se v ohybech velmi opotřebovává a časem může dojít i k úplnému přerušení elektrody.

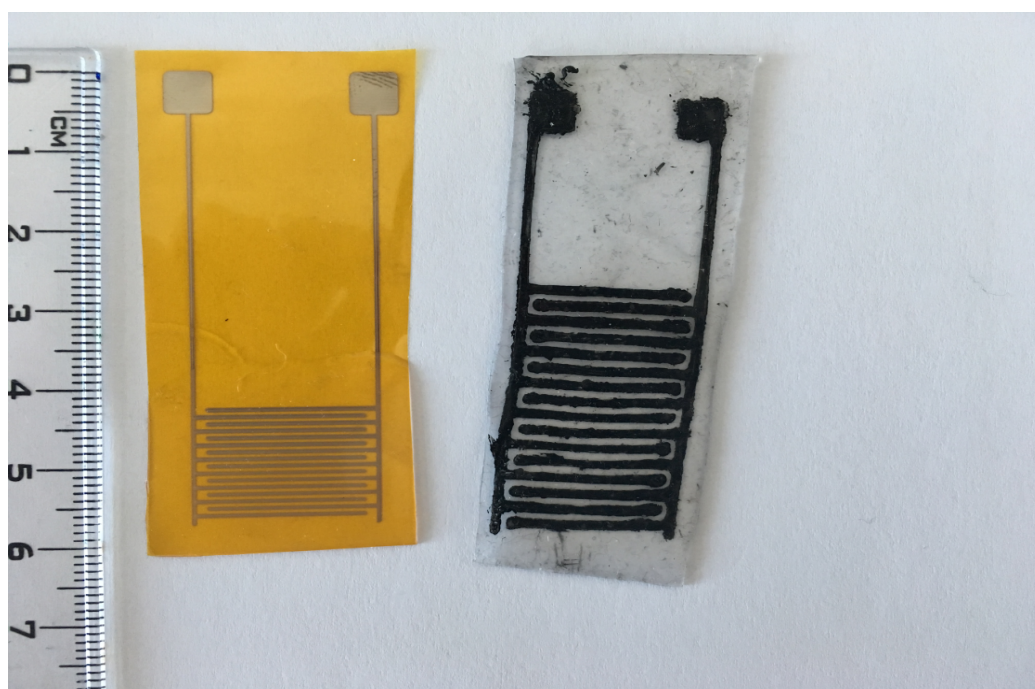
V oblasti časové a cenové náročnosti dopadla elastická elektroadhezivní fólie lépe než flexibilní. U výroby elastické elektrody je zapotřebí minimální množství nástrojů. Potřeba je pouze míchačka pro pečlivé promíchání silikonu s uhlíkovým práškem a vyrobené razítko (3D tisk, CNC). Na metodu výroby pomocí technologie Aerosol Jet Printing je zapotřebí více druhů materiálu a mnohem delší postup. Navíc je k výrobě potřeba nákladný přístroj pro technologii Aerosol Jet Printing a následně i vytvrzovací pec.

Závěr z této kapitoly zabývající se výrobou elektroadhezivní fólie je takový, že v současné době se bohužel přes výše uvedené překážky nepodařilo vyrobit elastickou plně funkční elektroadhezivní fólii. Nicméně tyto problémy lze vyřešit v dohledné době a zcela elastická fólie je velkým příslibem do budoucna na poli elektroadheze zejména co se týká zvýšení elektroadhezivní síly, zjednodušení výroby a snadné možnosti sériovosti oproti jiným dnes běžně používaným metodám, jako je chemické leptání, Aerosol Jet Printing atd. V tab. 1 jsou porovnány základní parametry flexibilní a elastické fólie.

Tab. 1: Porovnání základních parametrů vyrobených fólií

Kategorie	Flexibilní fólie	Elastická fólie
Materiály	Kapton, stříbrný prášek, silikon	uhlíkový prášek, silikon
Výroba	Aerosol Jet Printing	Razítkování
Výška izolační mezery(um)	25.4	400
Elektrická pevnost (kV/mm)	236	15
Flexibilita	Pouze omezený počet ohýbání	ANO
Elasticita	NE	ANO

iii.2.7 DISKUSE VÝSLEDKŮ



Obr. 19: Vlevo vyrobená fólie technologií Aerosol Jet Printing a vpravo fólie technologií razítkování

Část IV

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

iv.1

EXPERIMENT

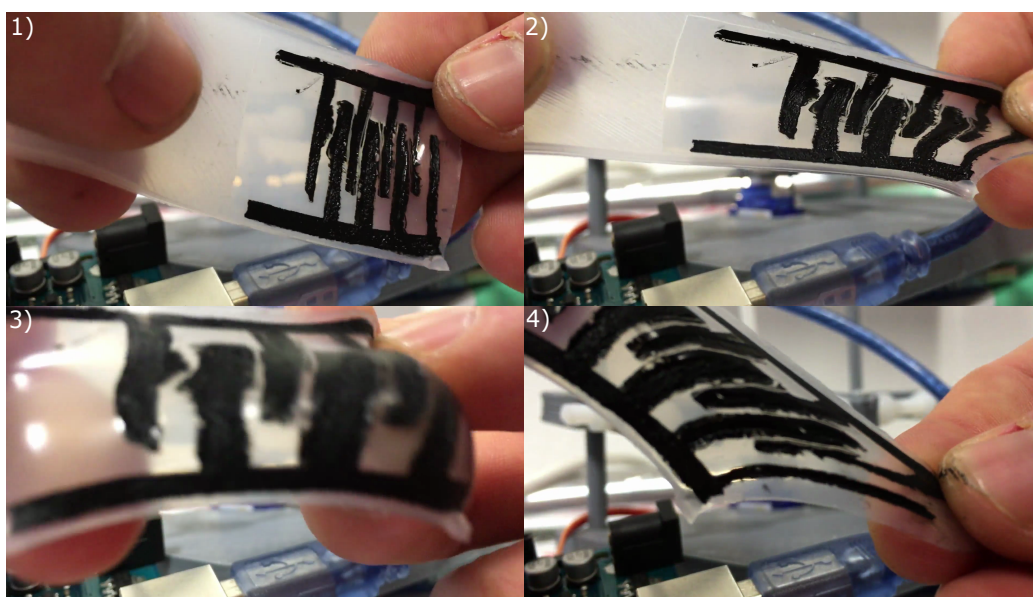
CÍLEM praktické části práce bylo experimentálně ověřit funkce fólií vyrobených pomocí různých technologií a verifikovat matematický model uvedený v úvodu práce (kapitola ii.1.2) na základě výsledků experimentu. Níže jsou podrobněji rozebrány postupy a výsledky jednotlivých experimentů a měření.

IV.1.1 FÓLIE S ELASTICKÝMI ELEKTRODAMI

Zde bylo vyrobeno několik variant a prototypy byly neustále miniaturizovány (Obr.37) a zlepšovány. Elektrické vlastnosti byly zkoušeny pomocí vysokonapěťového zdroje. Bohužel u prototypu, který měl již požadované rozměry, se nepodařilo vyrobit elektrody s dostatečně ostrými hranami, ale bylo pouhým okem možno spatřit výrazné výčnělky. Právě v těchto místech docházelo k průrazu izolačního materiálu mezi dvěma sousedícími elektrodami. V průběhu této práce se podařilo vyrobit fólii se šířkou elektrody 1 mm a izolační mezerou také 1 mm. U větších rozměrů fólie elektrickými vlastnostmi obstála i při vyšších napětích, ale rozměry byly příliš velké, aby bylo možné pozorovat elektroadhezivní jev.

Na druhé straně tato fólie vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti. Izolační a vodivý materiál tvoří celistvý materiál. Fólii lze značně zdeformovat (Obr.20). Vydrží také značné relativní prodloužení. Dále vydrží působení vysokého tlaku. Další výtečnou vlastností je i stálost vodivého materiálu, který i při relativním prodlužování a ohýbání si dlouhodobě zachovává svojí elektrickou vodivost.

IV.1.2 FÓLIE VYROBENA METODOU AEROSOL JET PRINTING



Obr. 20: Mechanické vlastnosti prototypu elastické elektroadhezivní fólie

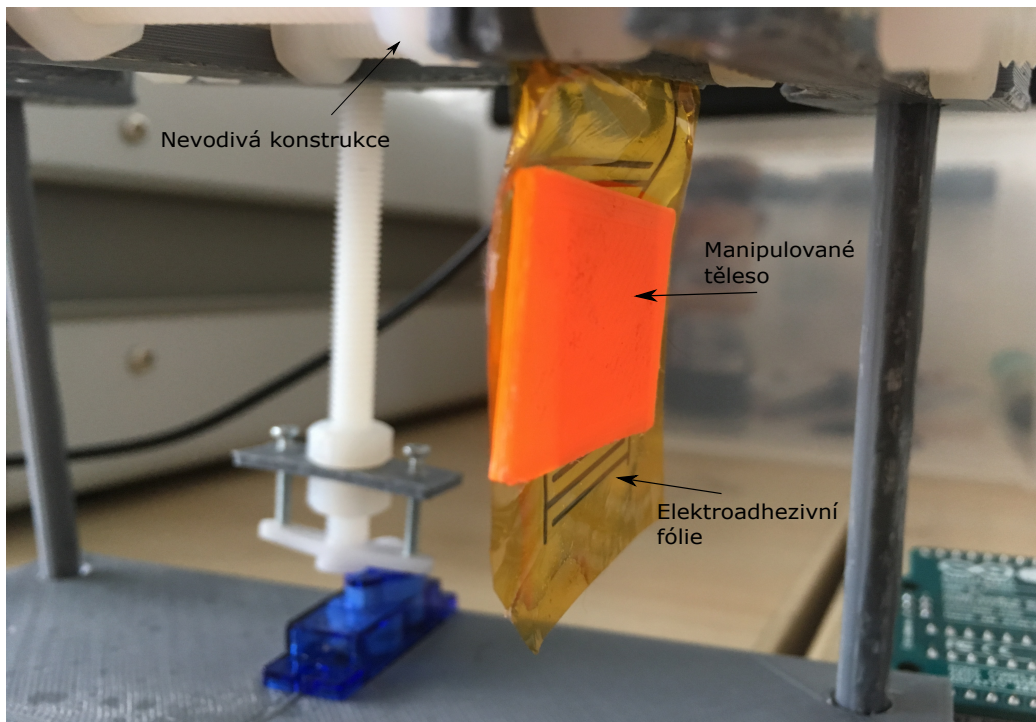
IV.1.2 FÓLIE VYROBENA METODOU AEROSOL JET PRINTING

Díky výrobě pomocí technologie Aerosol Jet Printing byl motiv elektrod nanesen velmi přesně a bylo dosaženo požadovaných rozměrů u šířky elektrod a izolačních mezer mezi nimi. Další výhodou byly ostré a nepřerušované hrany elektrod ve srovnání s motivem u elastické fólie a tudíž po přiložení napětí vznikalo homogenní pole a nedocházelo k průrazu izolačního materiálu jako to bylo v předešlém případě u elastické fólie.

Pomocí tohoto prototypu proběhlo úspěšné ověření elektroadhezivního jevu. Bylo manipulováno pomocí zavěšené fólie připevněné na nevodivou konstrukci, jejíž popis byl uveden dříve. Ukázka manipulování předmětem je zobrazena na Obr.21. Jde o těleso vytisknuté technologií 3D tisku, má šířku 1.8 mm, je vyrobena z materiálu ABS a váží 1.3 g. Použitá elektroadhezivní fólie použitá na Obr.21 má šířku elektrod 0.6 mm a izolační mezeru mezi elektrodami 1.4 mm. Použité napětí je 7 kV.

Váha celé fólie je 0.39 g. Při hodnotě napětí 4 750 kV byla fólie schopna manipulovat s předmětem o váze až 3.8 g. Z toho vyplývá, že fólie dokáže manipulovat s předměty cca. 10x převyšující její vlastní váhu. Tento výsledek lze určitě ještě zlepšit a to redukováním množství naneseného silikonu. Snížení váhy bude značné, protože z celkové váhy fólie silikon zaujímá cca. 75 %.

IV.1.3 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU



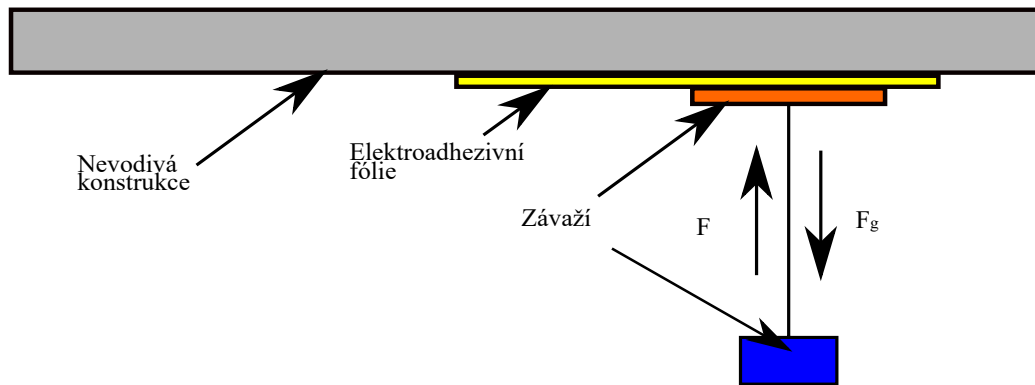
Obr. 21: Manipulování objektem pomocí zavěšeného prototypu elektroadhezivní fólie

IV.1.3 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU

Ověření matematického modelu proběhlo pomocí fólie vyrobené technologií Aerosol Jet Printing. Parametry fólie jsou následující: šířka elektrod 0.4 mm, izolační mezera 0.4 mm. Tato fólie byla taktéž považovaná za referenční v kapitole simulace elektroadheze a z tohoto důvodu byla vybrána pro experiment za účelem ověření matematického modelu.

Za účelem experimentu byla fólie upevněna na tvrdou nevodivou podložku orientovanou paralelně se zemí a s funkční částí fólie orientovanou směrem dolů. Pro změření výsledné elektroadhezivní síly bylo následně použito závaží, u kterého bylo možno regulovat váhu (Obr.24).

Postup experimentu byl následující. U závaží, které bylo pomocí elektroadheze přitahováno k elektroadhezivní fólii, byla postupně zvyšována váha za konstantního napětí, dokud nedošlo k oddělení závaží a elektroadhezivní fólie vlivem překročení elektroadhezivní síly F silou F_g , kterou je těleso přitahováno vlivem gravitace k zemskému povrchu. Poté byla vzata nejvyšší manipulovaná váha, kterou lze pomocí elektroadheze udržet.



Obr. 22: Princip experimentu za účelem ověřit matematický model elektroadheze

Tato váha je poté porovnána s výsledky simulace, kde byla váha vypočítána pomocí vztahu

$$m = F * 102, \quad (8)$$

kde m je hmotnost manipulovaného tělesa a hodnota 102 odpovídá množství gramů, které působením 1 N překonají svojí přitažlivou sílu k zemskému povrchu.

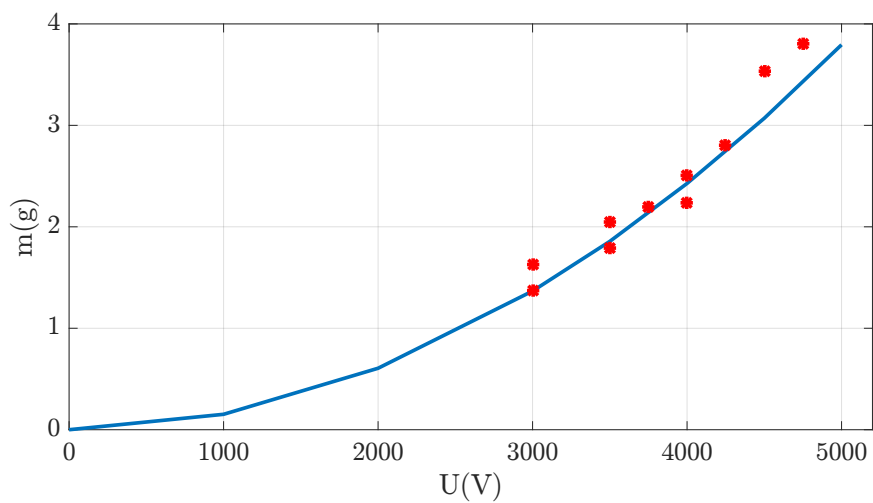
Před provedením experimentu nebylo možné určit vzduchovou mezeru, která vzniká mezi manipulovaným tělesem a elektroadhezivní fólií. Z tohoto důvodu bylo nejprve experimentálně změřena největší manipulovaná váha při napětí 3 kV. Výsledná síla byla poté hledána pomocí simulace se změnami vzduchové mezery. Pro experiment byla nalezena vzduchová mezera 195 μm . Cílem experimentu bylo následně porovnat závislost elektroadheze na přiloženém napětí.

Výsledek porovnání experimentu a simulace je možné vidět na Obr.23. Experiment byl prováděn opakovaně v různých dnech. Odchytky jsou dané ne zcela konstantní vzduchovou mezerou při všech pokusech. Nicméně je vidět, že změřené body sledují trend křivky matematického modelu a lze prohlásit, že matematický model byl úspěšně experimentálně ověřen.

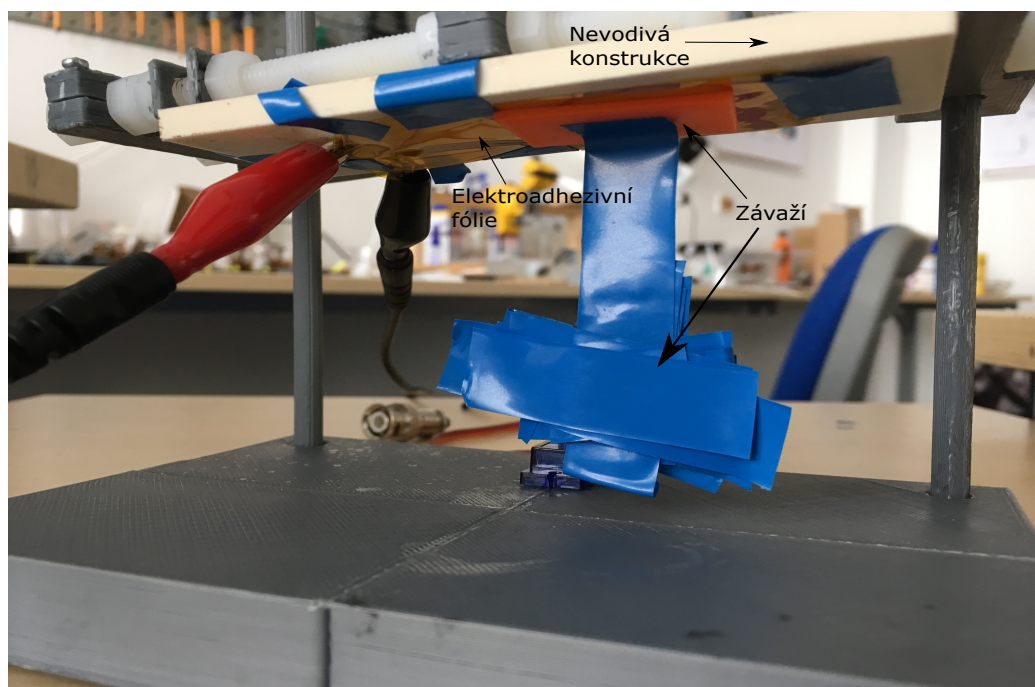
Tab. 2: Manipulované maximální váhy při různých hodnotách napětí změřené při experimentálním měření

Napětí (V)	3000	3500	3750	4000	4250	4500	4750
Manipulovaná váha max (g)	1.63	2.05	2.19	2.5	2.81	3.53	3.8

iv.1.3 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU



Obr. 23: Zobrazení změřených zvednutých vah pomocí prototypu elektroadhezivní fólie se srovnáním výsledků simulace



Obr. 24: Fotografie při provádění experimentu pro ověření matematického modelu

Část V

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

ELEKTROADHEZIVNÍ jev byl úspěšně experimentálně ověřen. Dále byly vyvozeny základní závěry ze simulace a proběhla komplexní výroba více druhů fólií. Jednotlivé výsledky a závěry z nich jsou rozebrány níže.

V.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Výsledky v oblasti simulace, lze shrnout do několika bodů. Z výsledků je zřejmé, že pro elektroadhezivní fólii je zapotřebí velmi pokročilých materiálů, které vynikají svými mechanickými vlastnostmi jako například elasticitou a zároveň musí vykazovat elektrické vlastnosti na stejné kvalitativní úrovni. Při dodržení těchto dvou kritérií, se může výsledná elektroadhezivní síla podstatně zvětšit až o několiknásobek.

Dalším závěrem ze simulace je nutnost uvažovat zvolený motiv elektrod, resp. poměr šířky elektrod k šířce izolační mezery mezi nimi. Tímto se dá optimalizovat návrh elektrody pro dosažení co nejlepšího výkonu. Nárůst síly zde není tak markantní jako u vylepšení zvolených materiálů a pohybuje se v jednotkách procent.

Výsledky simulace byly vzaty v potaz při výrobě fólií. Byly vyvinuty dva postupy, kde jedním výsledkem byla fólie s vynikajícími elektrickými vlastnostmi (flexibilní fólie) a druhá naopak vynikala těmi mechanickými (elastická fólie).

Flexibilní fólie, vyznačující se zejména výbornou izolační vrstvou oddělující elektrody od manipulovaného materiálu, se při ověření elektroadheze prokázala s nejlepšími vlastnostmi ze všech vyrobených prototypů. Důvodem je zejména velice tenká a odolná izolační vrstva. S touto fólií byl také úspěšně proveden experiment za účelem ověření matematického modelu, který byl prezentován v kapitole Experiment (kapitola iv.1.3).

Výrobě zcela elastické fólie byla věnovaná největší část této práce. Podařilo se vyvinout elastický vodivý materiál pomocí uhlíkového prášku se silikonem, kdy materiál je schopný udržet elektrickou vodivost i při značném relativním prodloužení. Dále byl vytvořen postup výroby, u kterého je zapotřebí minimální počet nástrojů a je snadno opakovatelný a časově nenáročný (razítkování). Výsledkem je fólie, která se jeví jako velmi ucelená a nedochází zde k mechanickým poškozením i při značném namáhání. Důvodem jsou především výborné vlastnosti silikonu. Obsah silikonu v elektrodách také zaručuje velmi pevnou vazbu mezi elektrodami a izolačními vrstvami.

Během této práce se ale nepodařilo vyrobit výše popsaný prototyp elastické fólie, tak aby byl pozorován elektroadhezivní jev. Na vině je především nepřesná technologie výroby, kdy dochází k nepřesnému nanesení motivu elektrod a zejména k nepravidelným hranám elektrod, které mají za důsledek proražení izolačního materiálu mezi elektrodami. I přes tyto problémy je tato fólie díky svým mechanickým vlastnostem velkým příslibem pro budoucnost, kdy stačí již pouze vylepšit vyvinutou technologii výroby.

Pozitivní výsledek této práce je především v její komplexnosti. Je zde popsán celkový proces od fyzikálního principu a simulace až po aplikaci elektroadheze. Popisuje problémy, které v různých fázích procesu mohou nastat a nabízí možná řešení. Z tohoto důvodu může práce sloužit jako dobrý zdroj pro budoucí práce zabývající se problematikou elektroadheze.

V.1.2 SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

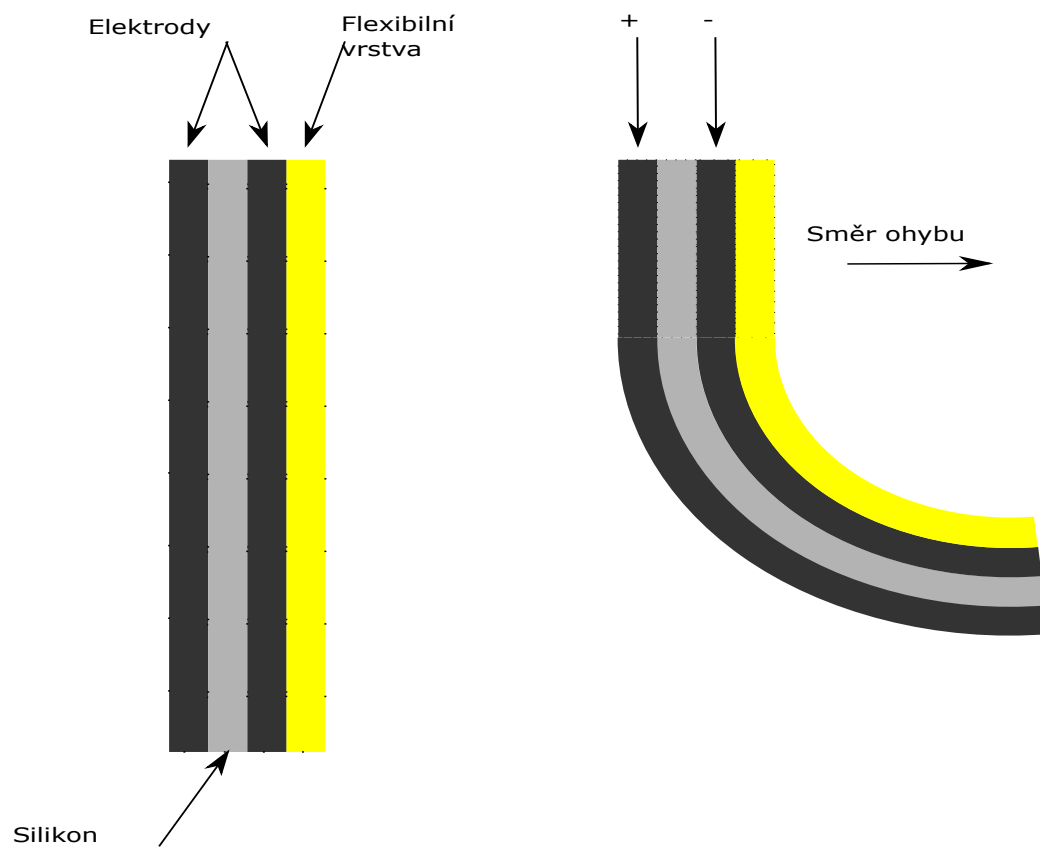
Na výsledcích této práce může být pokračováno různými směry. V současné době je nejspíše největší výzvou výše zmíněná technologie výroby. Zde je velký prostor pro další hlubší výzkum. Zejména stojí za to zabývat se výrobou elektricky vodivé směsi pro elastické elektrody, kde jsou již v současné době známé podklady pro zlepšení, které jsou v této práci uvedené v kapitole výroba. Je to například použití jiného ředidla, která nebude tak agresivní vůči silikonu a nebude docházet k je tak rychlému vypařování. Tím by došlo ke značnému zlepšení průběhu, kdy se směs nanáší na nevodivý substrát. U výroby lze také zlepšit metodu razítkování. Je zde velký prostor pro vyzkoušení výroby razítka s různých materiálů. Bylo pozorováno, že u různých materiálů je kvalita nanesení motivu elektrod různá. V oblasti výroby je spousta bodů ke zlepšení a je tedy asi největším a nejdůležitějším cílem do budoucna.

Dalším směrem, kterým se lze vydat, je důkladné měření jak mechanických tak elektrických vlastností elastické fólie a to zvláště při mechanickém zatížení (relativní prodloužení, deformace). Výsledky z tohoto měření mohou mít zásadní vliv na finální aplikaci elektroadhezivní fólie, kdy mohou určit maximální hodnoty mechanického zatížení, kdy bude fólie ještě schopna spolehlivé funkce.

Další oblastí možného budoucího zkoumání, které úzce souvisí s jevem elektroadheze, je zkoumání drsnosti materiálů a zejména podrobnější zkoumání rozhraní dvou rozdílných materiálů, tzn. kontakt mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným materiálem. Je to právě drsnost povrchů která určuje, jak velká bude parazitní vzduchová mezera. Právě vzduchová mezera, jak bylo uvedeno v práci, má obrovský vliv na výslednou velikost elektroadhezivní síly.

Zajímavou oblastí výzkumu je vyvinout systém, který s elektroadhezivní fólií dokáže pohybovat a přiblížit jí tak, aby se dostala do blízkosti manipulovaného materiálu a došlo k elektroadhezivnímu jevu a následně i k úchopu. Tento systém může být jednoduše mechanický, ale vzhledem k tomu, že úchopový systém využívající elektroadhezi přináší jako jednu ze svých výhod právě absenci mechanických částí, je toto řešení nedostačující. K tomuto účelu mohou být využity dielektrické polymery (DEA), které byly popsány v úvodu práce (i.2.2). V této práci použitý silikon je právě zástupce DEA. Bylo experimentálně ověřeno, že při vložení tenké vrstvy silikonu mezi dvě opačně nabitě elektrody dochází ke zvětšování plochy (prodlužování) silikonu vlivem přitažlivých sil elektrod. Možný mechanismus je naznačen na Obr.25. Objekt je složený ze čtyř vrstev. Dvě vrstvy tvoří elastické elektrody a mezi nimi je tenká vrstva DEA polymeru (silikon). Poslední vrstva je právě elektroadhezivní fólie která je pouze flexibilní. Při napájení elektrod opačným nábojem dojde k prodloužení silikonu a tím pádem dojde k ohnutí celého objektu zobrazeným směrem.

Díky vyvinutému funkčnímu prototypu v této práci může být také již provedena kompletní výroba zařízení jako je pohybující se robot a různé úchopové systémy využívající elektroadhezi.



Obr. 25: Mechanismus úchopu s využitím DEA polymeru

V.2

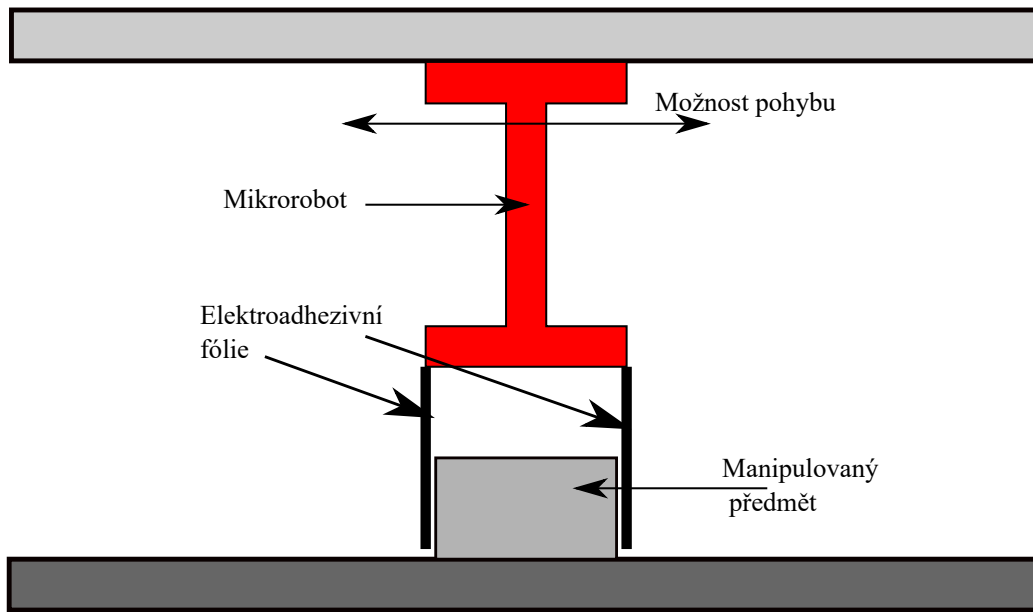
APLIKACE ELEKTROADHEZE

Díky velmi dobrým mechanickým vlastnostem a snadnou výrobou má elektroadheze velký potenciál do budoucna být použita v různých odvětvích. Může nahradit dnešní technologie (mechanické a vakuové úchopové systémy). Využití může najít také v kosmickém průmyslu díky výbornému poměru hmotnost:výkon. Konkrétní aplikace je pak implementace na mikroroboty jako úchopový systém. Níže jsou jednotlivé možné aplikace elektroadheze rozebrány podrobněji.

V.2.1 APLIKACE NA ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY

Flexibilní fólii vyrobenou technologií Aerosol Jet Printing je možno implementovat na mikroroboty polohované magnetickým polem, které byly vyvinuty Jiřím Kuthanem jako součást jeho diplomové práce [21]. Magnetické pole je zde vytvářeno integrovanými cívkami v desce plošného spoje. Spínáním jednotlivých cívek pak lze magnety polohovat. Právě malá velikost mikrobotů si žádá vyvinutí nevšedního úchopového systému, který musí splňovat dvě nutné podmínky. Jsou jimi malé rozměry a především velmi nízká hmotnost. Obě tyto podmínky úchopový systém využívající elektroadhezi dokáže splnit.

Byla vybrána aplikace tzv. jeřáb. Jde o robota (magnet), který na ploše s integrovanými cívkami dokáže pohybovat s lehkou konstrukcí s elektroadhezivní fólií. Tím může dojít k manipulování s předměty a proces připomíná činnost jeřábu (Obr.26). K uskutečnění této aplikace v současné době nic nebrání. Z časového důvodu se nestihl před dokončením práce plně funkční mikrorobot vyrobit a tak je zde uveden pouze zamýšlený princip.



Obr. 26: Aplikace na elektroadhezivní fólie na mikroroboty jako tzv. jeřáb

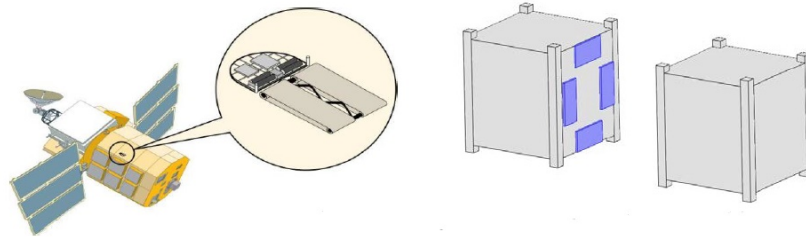
V.2.2 VESMÍRNÝ PRŮMYSL

Vesmírný průmysl je znám velkým tlakem na vlastnosti systémů zejména v oblasti hmotnosti, rozměrů, celkové spolehlivosti a poměru hmotnost:výkon. Právě z těchto důvodů je úchopový systém využívající elektroadhezi velmi nadějnou technologií ve vesmírném průmyslu.

Příklady aplikací zahrnují například externí práci na vesmírných stanicích, kde se může pohybovat robot využívající elektroadhezi a provádět nezbytné opravy, které jinak v současné době může provádět pouze člověk. Stav bez tíže je pro elektroadhezi výhodou a k rušení kosmickým zářením také nedochází, díky použitým materiálům, které už jsou za tímto účelem používány několik let v jiných kosmických systémech.

Další aplikací může být spojování malých satelitů tzv. CubeSatů. Jedná se o malou krychli o straně 100 mm. Pokrytím jedné strany elektroadhezivní fólií může jednoduše dojít ke spojení jednotlivých CubeSatů na oběžné dráze bez nutnosti složitých adaptérů a tudíž dojde i snížení ceny a váhy celého satelitu.

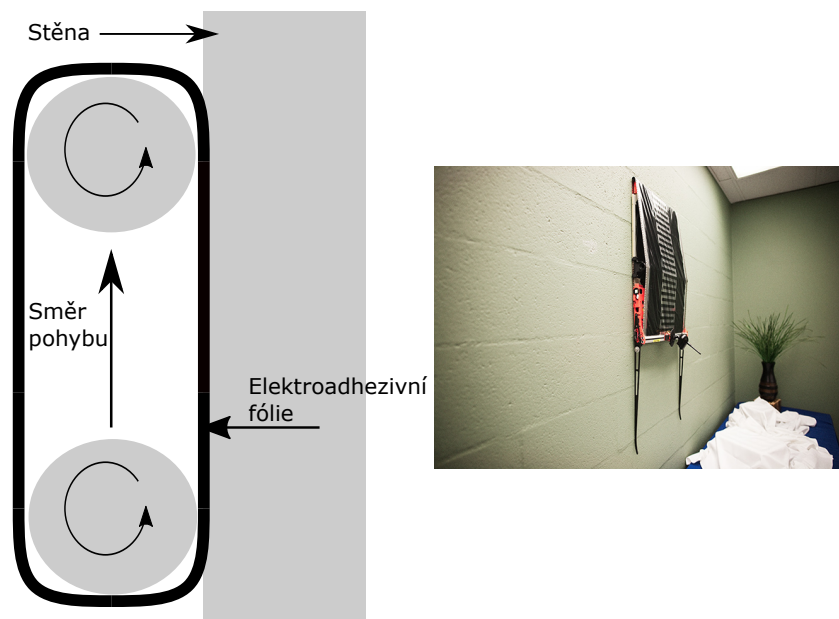
V.2.3 MOBILNÍ ROBOTI



Obr. 27: Aplikace elektroadheze ve vesmírném průmyslu [22]

V.2.3 MOBILNÍ ROBOTI

Stejně jako se robot s elektroadhezí může pohybovat po povrchu vesmírné stanice na oběžné dráze Země nebo jinde ve vesmíru, se může pohybovat na povrchu Země a dostat se tak do těžko přístupných míst, kam se současní ostatní roboti nemohou z důvodů rozměrů nebo nepřístupnosti dostat. Toto využití může být velmi užitečné při záchranných akcích po přírodní katastrofě nebo požáru, kde může robot nacházet zraněné lidi, kteří se nemají jak dostat z trosky ven. Tuto vlastnost lze využít i jinak a to při vojenských operacích. Konkrétně ke špionáži na nepřátelských územích.



Obr. 28: Princip mobilního robota a ukázka robota využívajícího elektroadhezi [23]

V.2.4 MANIPULACE V AUTOMATICKÉ TECHNICE

Výhodou, kterou elektroadheze pro tuto oblast nabízí, je velmi nízká spotřeba (jednotky wattů). Ve srovnání s ostatními metodami je to o několik řádů nižší spotřeba.

Dále nejsou potřeba žádné úchopové vidlice, které musí manipulovaný objekt uchopit, a může tedy objekty umisťovat blíže k sobě. To je obzvlášť v sériové výrobě velká výhoda, kde může dojít k zredukování celkovou velikost pracovní plochy.

Navíc, jeden úchopový systém může pracovat s různými objekty bez nutnosti jakákoliv úpravy či výměny nástrojů. U křehkých materiálů nedochází ke škrábancům, tudíž je použití velmi široké od manipulování krabicemi ve skladu po jemné umisťování tekutých krystalů v technologii LCD.

V.2.5 LOGISTIKA

Elektroadheze má také široké použití v oblasti logistiky. Zde může být využita při návrhu tzv. inteligentního dopravníkového pásu. Princip spočívá v tom, že na pás se aplikují segmenty elektroadhezivních fólií a ty pak mohou být libovolně ovládány a dochází tak ke třídění materiálu na páse bez použití operátorů nebo robotických ramen. Jde tedy o značné zjednodušení a zlevnění provozu.



Obr. 29: Inteligentní dopravníkový pás využívající elektroadhezi [3]

LITERATURA

- [1] Alexander B. Vankov, Philip Huie, Mark S. Blumenkranz, and Daniel V. Palanker. Electro-adhesive forceps for tissue manipulation.
- [2] Dreamstate Interactive. Electro adhesion product, 2016.
- [3] Charlie Duncheon and Harsha Prahlad. Grabbit, inc, 2011.
- [4] Ayre Mark. Biomimicry – a review. Technical report, European Space Agency, 2004.
- [5] G. Kocak, C. Tuncer, and V. Butun. ph-responsive polymers. *Polym. Chem.*, 8:144–176, 2017.
- [6] M.J.B Evans, E Halliop, and J.A.F MacDonald. The production of chemically-activated carbon. *Carbon*, 37(2):269 – 274, 1999.
- [7] Emily Dumm, Nesredin Kadir, Dave Newton, Zara Simpson, Hanna Walston, and Erik Wienhold. Light-activated shape memory polymers: Muscle actuation for prosthetics, 2013.
- [8] Markus Gusenbauer, Harald Özelt, Johann Fischbacher, Franz Reichel, Lukas Exl, Simon Bance, Nadezhda Kataeva, Claudia Binder, Hubert Brückl, and Thomas Schrefl. Simulation of magnetic actvce polymers for versatile microfluidic device. 2013.
- [9] Stephen Ducharme, S. P. Palto, L.M. Blinov, and V. M. Fridkin. Physics of two-dimensional ferroelectric polymers, •.
- [10] L.J. Romasanta, M.A. Lopez-Manchado, and R. Verdejo. Increasing the performance of dielectric elastomer actuators: A review from the materials perspective. *Progress in Polymer Science*, 51:188 – 211, 2015. Environmentally Relevant and Hybrid Polymer Materials.
- [11] Samuel Shian, Katia Bertoldi, and David R. Clarke. Dielectric elastomer based “grippers” for soft robotics. *Advanced Materials*, 27(43):6814–6819, 2015.

Literatura

- [12] J. SU, J. S. Harrision, T.L. St.Clair, Y. Bar-Cohen, and S. Leary. Electrostrictive graft elastomers and applications. Technical report, NASA, •.
- [13] Anna Ask, Andreas Menzel, Ristinmaa, and Matti. Electrostriction in electroviscoelastic polymers. *Mechanics of Materials*, 2012.
- [14] *Liquid Crystal Elastomers: Materials and Applications*. Springer, 2012.
- [15] Masao Doi, Mitsuhiro Matsumoto, and Yoshiharu Hirose. Deformation of ionic polymer gels by electric fields. *Macromolecules*, 25(20):5504–5511, 1992.
- [16] Mohsen Shahinpoor and Kwang J Kim. Ionic polymer-metal composites: I. fundamentals. *Smart Materials and Structures*, 10(4):819, 2001.
- [17] Murat Ates, Tolga Karazehira, and A. Sezai Sarac. Conducting polymers and their applications. 2012.
- [18] Manju Gerard, Asha Chaubey, and B.D. Malhorta. Application of conducting polymers to biosensors. 2002.
- [19] Milo S. P. Shaffer and Alan H. Windle. Fabrication and characterization of carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composites. *Advanced Materials*, 11(11):937–941, 1999.
- [20] Jun Shintake, Samuel Rosset, Bryan Schubert, Dario Floreano, and Herbert Shea. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. *Advanced Materials*, 28(2):231–238, 2016.
- [21] Jiří Kuthan. *Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [22] Ron Pelrine. Microrobot inspectors - electroadhesive wall climbing robots and more. *SRI*, 2009.
- [23] Dylan Tweney. Sticky film makes nonslip ladders, wall-climbing robots, 2011.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Náhled elektroadhezivní folie ve 3D pohledu a znázornění principu elektroadheze pro dielektrické materiály v řezu fólií	11
Obrázek 2	Vytvořený model se znázorněnými důležitými parametry	14
Obrázek 3	Složka x a y intenzity elektrického pole E mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným tělesem ve vzduchové mezeře pro jeden segment mezi dvěma elektrodami	15
Obrázek 4	Složka x a y intenzity elektrického pole E mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným tělesem ve vzduchové mezeře	15
Obrázek 5	Závislost elektroadheze na přiloženém napětí	16
Obrázek 6	Závislost elektroadhezivní síly na výšce izolační vrstvy folie	17
Obrázek 7	Závislost elektroadhezivní síly na velikosti vzduchové mezery mezi elektroadhezivní fólií a manipulovaným předmětem	17
Obrázek 8	Závislost elektroadhezivní síly na poměru šířky elektrody a mezery	18
Obrázek 9	Závislost velikosti elektroadhezivní síly při fixní izolační mezeře na šířce elektrody	19
Obrázek 10	Porovnání optimalizačních křivek pro různé výšky vzduchové mezery	20
Obrázek 11	Rozložení elektrického potenciálu na celé ploše modelu	21
Obrázek 12	(A) motiv dvojité spirály, kde je síla nejvíce rozptýlena, (B) motiv čtvercové spirály, kde je síla koncentrovaná již pouze do směrů x a y , (C) motiv tzv. hřeben, v této práci zvolený. Majoritní složka kolmá k folii ve směru y	24
Obrázek 13	Vytvořený návrh motivu elektrod tzv. dvou vnořených hřebenů i s vývody	24
Obrázek 14	Nevodivá konstrukce pro experimenty poháněná servo motorem	25
Obrázek 15	Řez fólie vyrobené pomocí plastové šablony pod mikroskopem	28

Seznam obrázků

Obrázek 16	Razítka pro nanesení motivu elektrod vlevo z materiálu PLA a vpravo z materiálu ABS	29
Obrázek 17	Řez elektrody vyrobené metodou razítkování pod mikroskopem	29
Obrázek 18	Vyrobená fólie pomocí metody razítkování (pro srovnání s mincí z Kč)	30
Obrázek 19	Vlevo vyrobená fólie technologií Aerosol Jet Printing a vpravo fólie technologií razítkování	34
Obrázek 20	Mechanické vlastnosti prototypu elastické elektroadhezivní fólie	37
Obrázek 21	Manipulování objektem pomocí zavěšeného prototypu elektroadhezivní fólie	38
Obrázek 22	Princip experimentu za účelem ověřit matematický model elektroadheze	39
Obrázek 23	Zobrazení změřených zvednutých vah pomocí prototypu elektroadhezivní fólie se srovnáním výsledků simulace	40
Obrázek 24	Fotografie při provádění experimentu pro ověření matematického modelu	40
Obrázek 25	Mechanismus úchopu s využitím DEA polymeru	45
Obrázek 26	Aplikace na elektroadhezivní fólie na mikroroboty jako tzv. jeřáb	47
Obrázek 27	Aplikace elektroadheze ve vesmírném průmyslu [22]	48
Obrázek 28	Princip mobilního robota a ukázka robota využívajícího elektroadhezi [23]	48
Obrázek 29	Inteligentní dopravníkový pás využívající elektroadhezi [3]	49
Obrázek 30	Závislost elektroadhezivní síly na relativní permitivitě materiálu izolující elektrody	56
Obrázek 31	Závislost elektroadhezivní síly na tloušťce manipulovaného předmětu	56
Obrázek 32	Detail fólie vyrobené pomocí AJP pod mikroskopem	57
Obrázek 33	Detail fólie vyrobené pomocí sítotisku pod mikroskopem	57
Obrázek 34	Detail fólie vyrobené pomocí razítkování pod mikroskopem	58
Obrázek 35	Odlévací formy pro výrobu elektroadhezivní fólie	58
Obrázek 36	Proražení izolačního materiálu (silikonu) mezi elektrodami	59
Obrázek 37	Postupná miniaturizace prototypů, horní řada elastická fólie, dolní řada flexibilní fólie	60

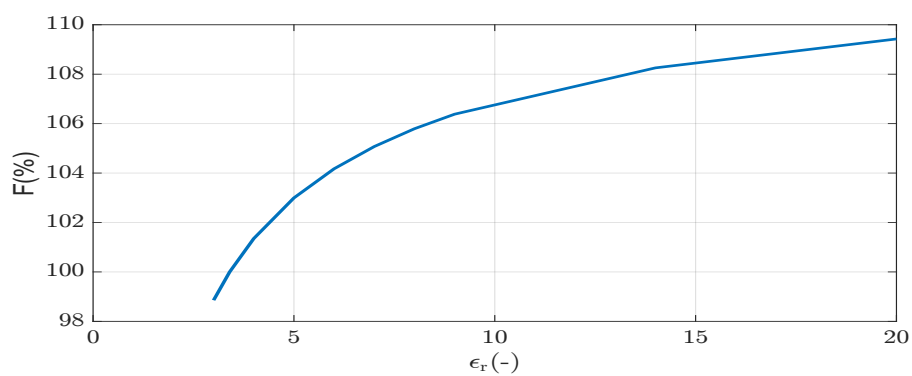
Seznam obrázků

Obrázek 38	Vypálený motiv elektrod do plastové fólie pomocí laseru s postupnou miniaturizací	61
------------	---	----

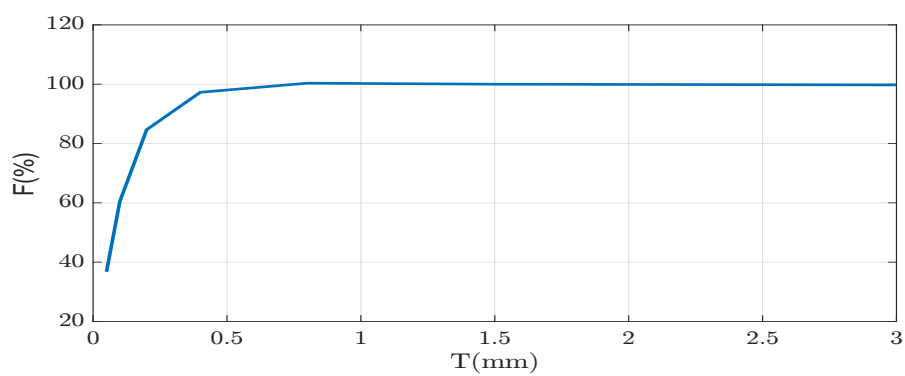
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Porovnání základních parametrů vyrobených fólií	33
Tabulka 2	Manipulované maximální váhy při různých hodnotách napětí změřené při experimentálním měření	39

PŘÍLOHY

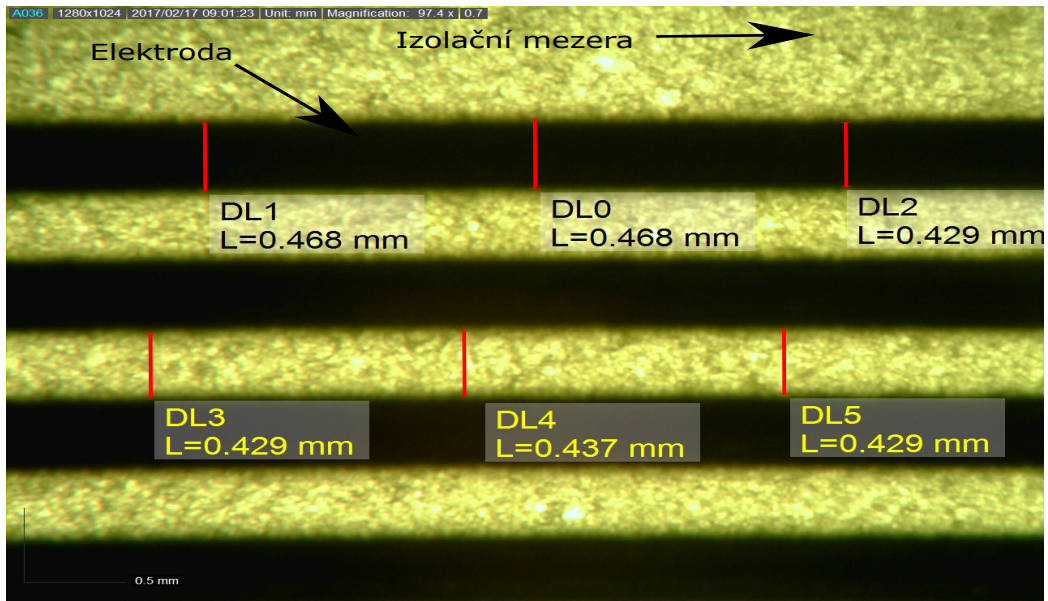


Obr. 30: Závislost elektroadhezivní síly na relativní permitivitě materiálu izolující elektrody

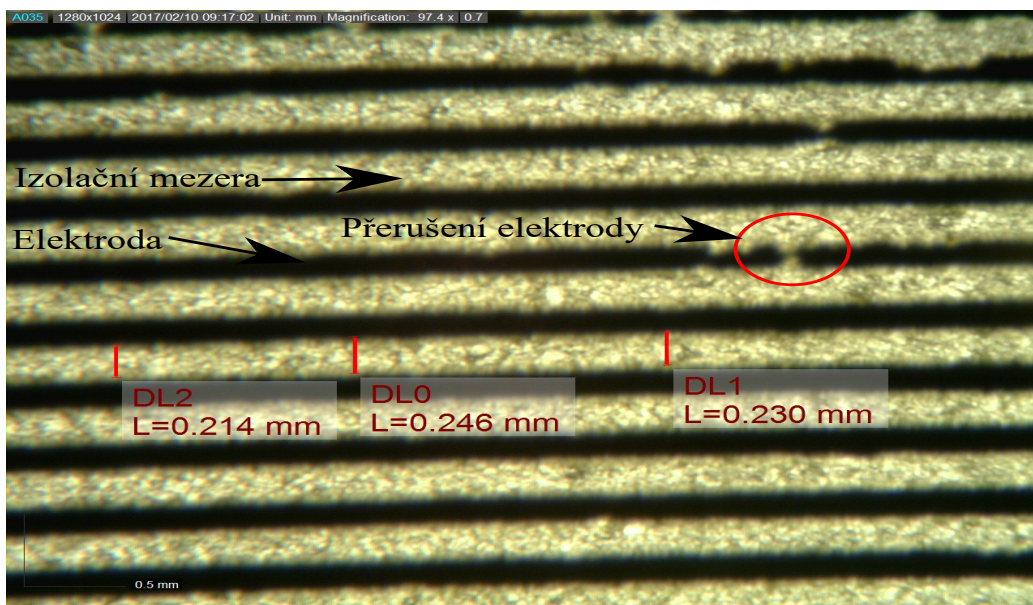


Obr. 31: Závislost elektroadhezivní síly na tloušťce manipulovaného předmětu

PŘÍLOHY

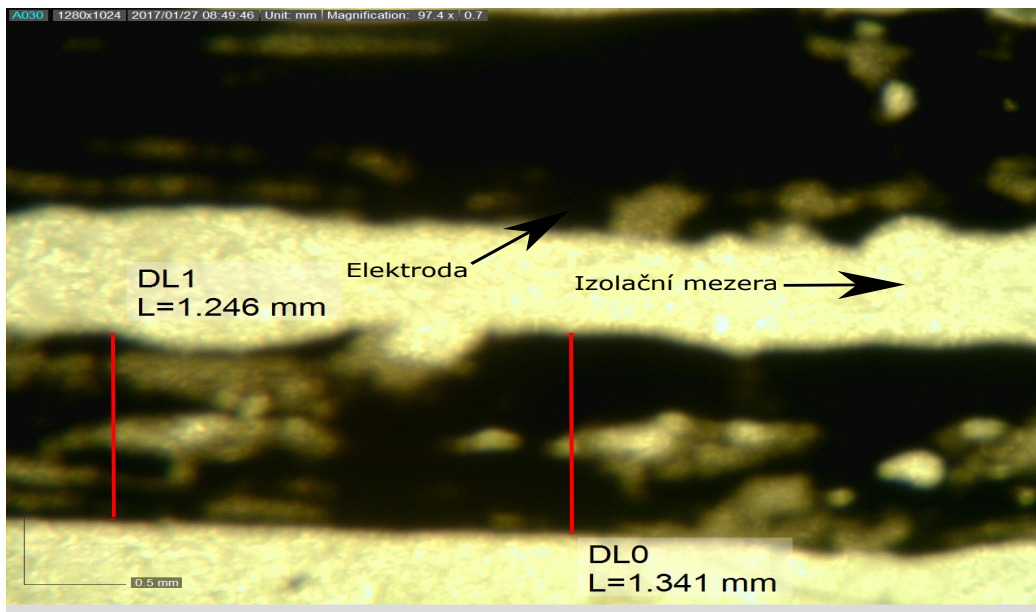


Obr. 32: Detail fólie vyrobené pomocí AJP pod mikroskopem



Obr. 33: Detail fólie vyrobené pomocí sitotisku pod mikroskopem

PŘÍLOHY



Obr. 34: Detail fólie vyrobené pomocí razítkování pod mikroskopem



Obr. 35: Odlévací formy pro výrobu elektroadhezivní fólie



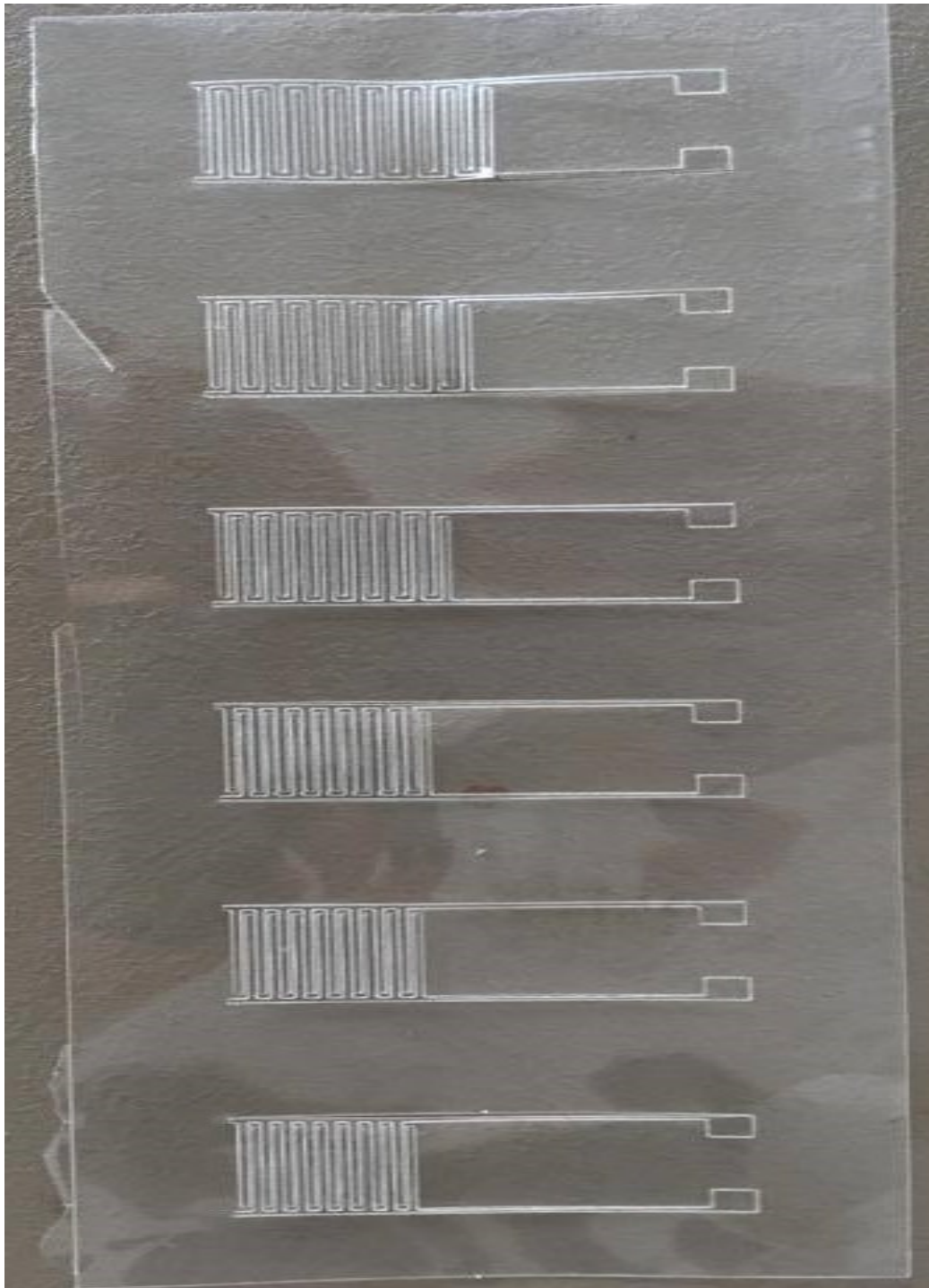
Obr. 36: Proražení izolačního materiálu (silikonu) mezi elektrodami

PŘÍLOHY



Obr. 37: Postupná miniaturizace prototypů, horní řada elastická fólie, dolní řada flexibilní fólie

PŘÍLOHY



Obr. 38: Vypálený motiv elektrod do plastové fólie pomocí laseru s postupnou miniaturizací