

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra materiálů a technologií

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Povrchová montáž komponent na elastické plošné spoje

Autor práce: **Bc. Lukáš Lang**  
Vedoucí práce: **Ing. Silvan Pretl, Ph.D.**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš LANG**  
Osobní číslo: **E20N0015P**  
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**  
Téma práce: **Povrchová montáž komponent na elastické plošné spoje**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

## Zásady pro vypracování

1. Popište používané materiály, technologie a konstrukční řešení pružných a elastických plošných spojů realizovaných tiskovými postupy.
2. Zpracujte přehled vhodných montážních technologií pro osazování SMD komponent na tištěné elastické plošné spoje.
3. Uveďte možnosti testování klíčových parametrů charakterizujících kvalitu SMT montáže na tištěných elastických plošných spojkách.
4. Navrhněte a prakticky realizujte testovací platformu pro ověření vybraných variant SMT montáže na vzorcích tištěných elastických plošných spojů s ohledem na dostupnou laboratorní infrastrukturu FEL KET ZČU.
5. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky, identifikujte případné nedostatky a navrhněte vhodné úpravy a rozšíření testovací platformy.

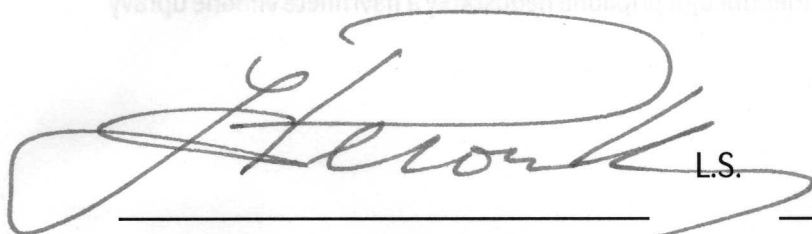
Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Nagels & Deferme, 2018. Fabrication Approaches to Interconnect Based Devices for Stretchable Electronics: A Review. Materials, 11(3), p.375. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11030375>.
2. Neff, Elston & Schrand, 2020. Interconnections for Additively Manufactured Hybridized Printed Electronics in Harsh Environments. Designs, 4(2), p.14. <http://dx.doi.org/10.3390/designs4020014>.
3. Arrese et al., 2017. Flexible hybrid circuit fully inkjet-printed: Surface mount devices assembled by silver nanoparticles-based inkjet ink. Journal of Applied Physics, 121(10), p.104904. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4977961>.
4. Li et al., 2018. Soldering surface mount components on screen-printed Ag patterns on paper and polyimide substrates for hybrid printed electronics. Flexible and Printed Electronics, 3(1), p.015003. <http://dx.doi.org/10.1088/2058-8585/aa9dc7>.
5. Schirmer et al., 2018. Long-Term Behavior of SMT Components Mounted on Printed Polymer Thick Film Pastes. In 2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices, MID 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <http://dx.doi.org/10.1109/ICMID.2018.8526939>.
6. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, ResearchGate, Google Scholar ...)

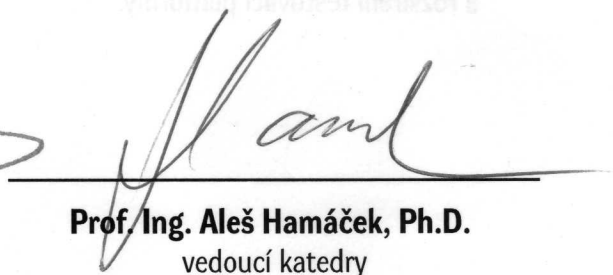
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Silvan Pretl, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá elastickými plošnými spoji, se zaměřením na typy montážních technologií. Úvodní část této práce se věnovala materiálům, technologii a konstrukčnímu provedení elastických plošných spojů, realizovaných tiskovými postupy. Dále byly v práci popsány jednotlivé montážní technologie pro osazování SMD komponent a metodami testování klíčových parametrů, charakterizující kvalitu montáže. Ve zbylých částech se tato práce zabývala návrhem a praktickou realizací testovací platformy, se zpracováním a vyhodnocením naměřených dat.

## **Klíčová slova**

Elastické plošné spoje, tisk, montáž SMD komponent, testování pružnosti.

## **Abstract**

The presented diploma thesis deals with elastic printed circuit boards, with a focus on types of assembly technologies. The introductory part of this work was devoted to the materials, technology and design of elastic printed circuit boards, realized by printing procedures. Furthermore, the work described individual assembly technologies for fitting SMD components and methods of testing key parameters characterizing assembly quality. In the remaining amounts, this work dealt with the design and practical implementation of the test platform, with the processing and evaluation of the measured data.

## **Key Words**

Elastic printed circuit boards, printing, assembly of SMD components, flexibility testing.

## **Poděkování**

V průběhu návrhu a realizace měřicí platformy pro účely této práce, probíhala úzká spolupráce se zaměstnanci FEL KET ZČU. Z výše uvedených důvodů bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům KET, který se podíleli na spolupráci a konkrétně vedoucímu této diplomové práce Ing. Silvanu Pretlovi, Ph.D..

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Konstrukční provedení elastických plošných spojů .....	- 2 -
1.1 Strukturální konfigurace .....	- 2 -
1.1.1 In Plane Structures - IPS.....	- 3 -
1.1.2 Out Plane Structures - OPS .....	- 4 -
1.2 Materiálová konfigurace .....	- 5 -
1.2.1 Elasticé kompozity .....	- 5 -
1.2.2 Tekuté kovy a vodivé polymery .....	- 7 -
1.2.3 Elasticé substráty a enkapsulanty .....	- 8 -
2 Tiskové metody výroby elastických plošných spojů .....	- 9 -
2.1 Metody Roll to roll .....	- 9 -
2.1.1 Sítotisk.....	- 9 -
2.1.2 Flexotisk .....	- 10 -
2.1.3 Hlubotisk .....	- 11 -
2.2 Metody digitálního tisku .....	- 12 -
2.2.1 Dispensing .....	- 13 -
2.2.2 Ink jet.....	- 15 -
2.2.3 Aerosol jet .....	- 17 -
3 Montážní technologie pro osazování SMT komponent.....	- 20 -
3.1 Metody kontaktování .....	- 20 -
3.2 Montáž součástek s technologií Surface Mount Device na elastické plošné spoje - 21 -	
3.2.1 Lepení vodivými lepidly.....	- 21 -
3.2.2 Lepení nevodivými lepidly .....	- 24 -
3.2.3 Wet assembly.....	- 25 -
3.2.4 Pájení .....	- 26 -
4 Testování elastických plošných spojů .....	- 27 -
4.1 Posuzování zátěžových testů .....	- 27 -
4.2 Typy testů elastických plošných spojů .....	- 28 -

4.2.1	Optická kontrola .....	- 29 -
4.2.2	Elektrická zkouška.....	- 29 -
4.2.3	Mechanické zkoušky .....	- 29 -
4.2.4	Enviromentální zkoušky .....	- 32 -
4.3	Návrh měření .....	- 32 -
5	Návrh a realizace testovací platformy .....	- 34 -
5.1	Návrhy testovacích vzorků .....	- 35 -
5.1.1	Motiv pro testování pružnosti drah.....	- 36 -
5.1.2	Motiv pro ohybové testování montáže součástek.....	- 37 -
5.1.3	Motiv pro testování pružnosti montáže součástek.....	- 38 -
5.2	Návrh testovacího přípravku.....	- 39 -
5.3	Realizace textilních vzorků.....	- 41 -
5.4	Realizace vzorků s tiskovými motivy .....	- 42 -
5.4.1	Motivy pro testování pružnosti vodivých drah.....	- 43 -
5.4.2	Motivy pro testování montáže součástek .....	- 45 -
5.5	Realizace testovacího přípravku .....	- 46 -
5.5.1	Realizace dílů dynamických nebo statických čelistí .....	- 46 -
5.5.2	Realizace fixačního rámu .....	- 48 -
5.6	Postup upnutí testovacích vzorků .....	- 48 -
5.6.1	Upnutí textilních vzorků.....	- 48 -
5.6.2	Upnutí motivů pro testování pružnosti .....	- 49 -
5.6.3	Upnutí motivů pro testování v ohybu.....	- 51 -
6	Testování vzorků .....	- 52 -
6.1	Analýza chování substrátu .....	- 52 -
6.1.1	Zkouška meze pružnosti textilních vzorků.....	- 52 -
6.1.2	Cyklické zkoušky pružnosti textilních vzorků .....	- 54 -
6.2	Testování vodivých drah.....	- 58 -
6.2.1	Testování DuPont .....	- 58 -
6.2.2	Testování SIP 2005.....	- 62 -
6.3	Testování montáže .....	- 64 -



6.3.1	Testy v ohybu .....	- 64 -
6.3.2	Tahové testy.....	- 66 -
7	Kritické zhodnocení testování .....	- 71 -
7.1	Metodika praktické části práce .....	- 71 -
7.1.1	Návrh testovací platformy .....	- 71 -
7.1.2	Realizace testovací platformy.....	- 72 -
7.1.3	Měření testovacích vzorků.....	- 72 -
7.2	Zhodnocení měření .....	- 73 -
7.2.1	Substráty .....	- 73 -
7.2.2	Vodivé dráhy .....	- 73 -
7.2.3	Montáž.....	- 74 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 75 -
	Literatura .....	- 76 -
	Přílohy .....	I
	ElasticéElasticéenkapsulant	

## Seznam symbolů a zkratk

<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<i>ACA</i>		anizotropně vodivé lepidlo
<i>CIJ</i>		kontinuální inkoustový tisk
<i>CVD</i>		chemické napařování
<i>DOP</i>		kapka na vyžádání
<i>ECA</i>		elektricky vodivé lepidlo
<i>FPC</i>		flexibilní plošný spoj
<i>ICA</i>		izotropně vodivé lepidlo
<i>IPS</i>		konstrukce v rovině
<i>MBM</i>		metoda mechanického vzpírání
<i>NCA</i>		nevodivé lepidlo
<i>OPS</i>		konstrukce mimo rovinu
<i>PCB</i>		deska plošných spojů
<i>Roll to roll, RtoR</i>		z role na roli
<i>SMD</i>		součástky pro povrchovou montáž
<i>SMT</i>		technologie povrchové montáže
<i>SPC</i>		roztážitelný plošný spoj
<i>UV</i>		ultrafialové světlo

## Úvod

Pokrok ve vývoji nových materiálů a s tím související zlepšení jejich vlastností, kterého bylo v poslední době dosaženo, umožňují návrh pokročilých forem elektrických odvodů, zachovávajících si běžné elektrické vlastnosti klasických tuhých plošných spojů, ale převyšující je svými mechanickými vlastnostmi (roztahitelnost, deformovatelnost a přizpůsobitelnost). Elektrické obvody vykazující výše popsané vlastnosti, jsou založeny na bázi měkkých materiálů nebo tekutin v mikro či nano měřítku [1, 2]. I přes zmíněné výhody těchto elektrických obvodů vzhledem k jiným technologickým provedením plošných spojů, zůstávají tyto obvody stále ve fázi výzkumu a vývoje. Hlavním důvodem je, že řada nově vyvinutých materiálů a technologií výroby těchto elektrických obvodů je nekonvenční, a tedy nevhodná pro velkoobjemovou výrobu. S výše zmíněným problémem souvisí i fakt, že v naprosté většině mají obvody jen jednu aktivní vrstvu a umožňují integraci jen méně složitých komponent. Zásadní omezení působící při integraci komponent na aktivní vrstvu je nedostatečná optimalizace montáže tuhých komponent na elastické substráty. Omezení způsobuje, že při výrobě takových to obvodů lze dosáhnout jen jejich nízké složitosti [3].

## 1 Konstrukční provedení elastických plošných spojů

Tato část práce se bude zabývat typy materiálů využívaných k výrobě elastických plošných spojů a způsoby jejich provedení. Složení elastického plošného spoje se skládá ze stejných částí, jako je tomu u běžného tuhého plošného spoje. Mezi hlavní části plošného spoje patří (základní substrát, vodič, krycí materiál atd.). Tato práce se z pohledu konstrukčního provedení primárně zaměřuje na popis vodivého propojení mezi součástkami, případně mezi jednotlivými aktivními vrstvami, protože právě jejich provedení v posledních několika letech patřilo k jednomu z hlavních limitujících faktorů mechanických vlastností [4].

Vodivé stopy jsou základními funkčními materiály elastických plošných spojů a zajišťují přenos elektrického proudu mezi jednotlivými komponenty. Vodivých stop na elastických plošných spojích lze dosáhnout dvěma odlišnými způsoby konstrukčního provedení, která se navzájem kombinují. První způsob provedení, označovaný jako strukturální konfigurace, využívá běžně používaných konvenční tuhých materiálů, které jsou upraveny tak, aby bylo dosaženo jejich mechanické roztažitelnosti. Druhý způsob naopak využívá nových materiálů, jejichž charakteristickou vlastností je elasticita a je označován jako materiálová konfigurace [1, 2, 5]. V následujících kapitolách budou jednotlivé způsoby provedení popsány blíže.

### 1.1 Strukturální konfigurace

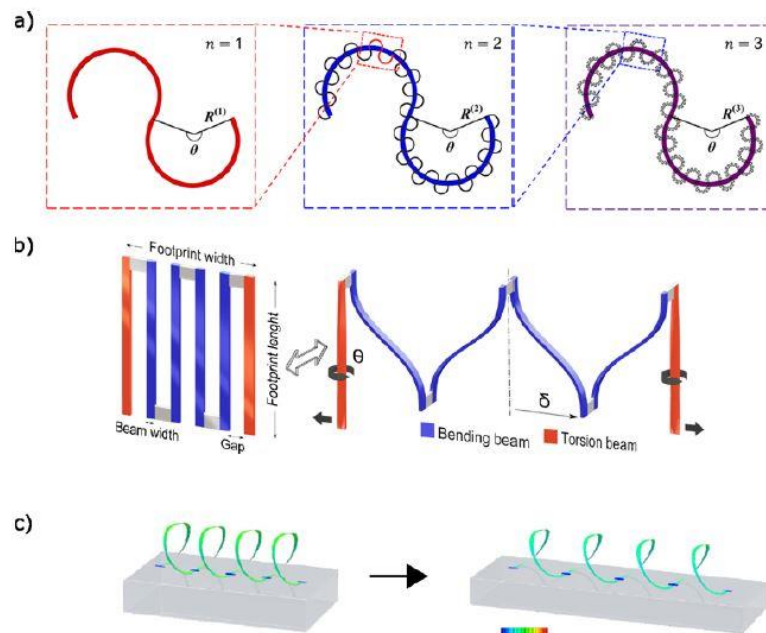
Tento způsob provedení je založen na změně vlastností materiálu, po zmenšení jeho rozměrů na velmi tenké vrstvy. Mezi takové materiály patří například konvenční tuhé vodiče (měď (Cu), zlato (Au), hliník (Al) atd.) nebo křehké polovodiče (křemík (Si), arsenid galitý (GaAs) nebo fosfid inditý (InP)), které po rozdělení do pásků a vláken o rozměrech v řádu nanometrů, vykazují elastické vlastnosti. Příkladem jsou vlákna Si, o tloušťce 100 nm, při zakřivení do poloměru 1 cm, se deformace pohybuje v maximální velikosti 0,0005 %. Takto upravená vlákna a pásy se nanášejí na elastomerní substráty (např.: polydimethylsiloxan (PDMS)) a to buď na jejich povrch nebo mezi jednotlivé vrstvy substrátu, pro výraznější omezení ohybových deformací [1, 2].

Pro zajištění výraznější roztažitelnosti tenkých vrstev byly vyvinuty takzvané Deterministické struktury, které geometricky modifikují tenké vrstvy, pro zlepšení jejich roztažitelnosti v jednotlivých směrech, při zachování dostatečné elektrické vodivosti. Modifikace umožňují výraznější ohyb nebo natažení v konkrétním směru, nežli deformovatelnost ve všech směrech. Deterministické struktury rozdělujeme podle jejich geometrické modifikace na

Rovinné struktury (In Plane Structures - IPS) a Mimo rovinné struktury (Out Plane Structures - OPS) [2].

### 1.1.1 In Plane Structures - IPS

IPS označuje, oproti OPS, struktury ve 2D rovině substrátu. Struktury jsou nejčastěji vytvořeny ve tvaru meandrujících stop na povrchu substrátu, označované jako Fraktální stopy. Fraktální stopy se při zatížení chovají jako mechanické pružiny a jsou schopny se částečně roztáhnout. Klíčovou roli v roztažitelnosti stop hraje jejich geometrie. Jako jedny z nejodolnějších se při jednostranném zatížení ukázaly stopy podkovovité geometrie [2, 6]. Nevýhodou fraktálních stop je, že nenabízejí tak vysokou míru roztažitelnosti v porovnání s OPS, ale mezi jejich hlavní přednosti patří rychlá realizovatelnost tiskovými postupy [2, 5]. Z důvodů nižší roztažitelnosti fraktálních stop, byly vyvinuty vzory odolávající vyšším deformacím. Příkladem takových vzorů jsou například fraktální podkovovité vzory vyšších řádů zobrazené na Obr. 1 a). S rostoucím řádem vzoru vzrůstá roztažnost. Mimo fraktálních vzorů vyšších řádů se experimentálně zkoumají vzory páskových hliníkových serpentin, Obr. 1 b) nebo šroubovice, Obr. 1 c). Výše zmíněnými vzory se tato práce nebude více zabývat, protože se v současné době jedná o experimentálně zkoumané vzory, kterým se věnují pouze vybrané odborné studie [2, 6].



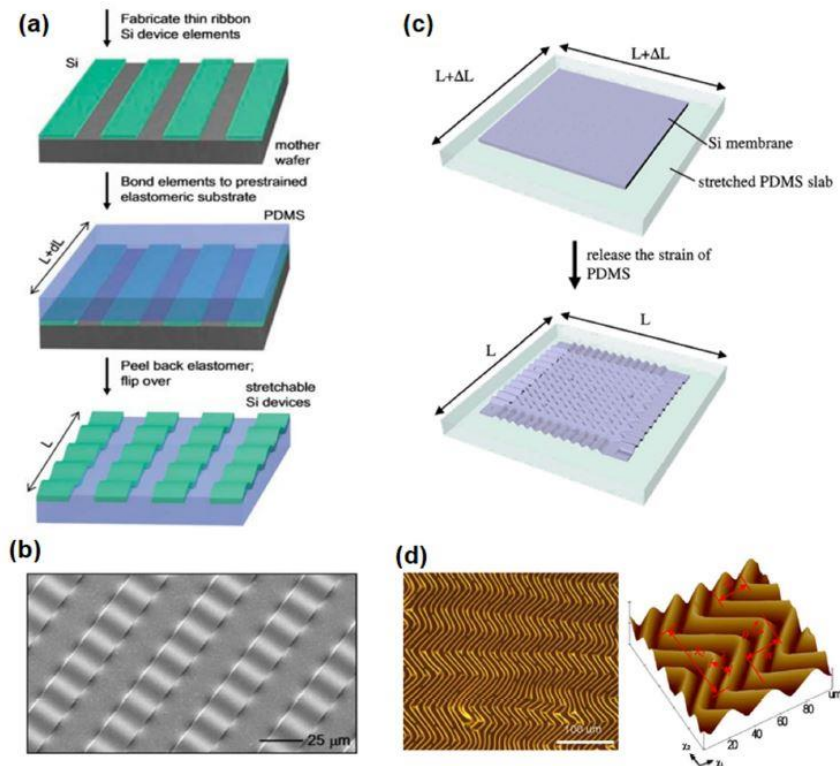
Obr. 1 a) fraktální stopy podkovovité geometrie vyšších řádů b) hliníkové serpentiny v neroztaženém a roztaženém stavu c) šroubovice v neroztaženém a roztaženém stavu [6].

### 1.1.2 Out Plane Structures - OPS

Typickým provedením této struktury je zvlnění funkčního materiálu, označované jako Metoda mechanického vzpírání (Mechanical Buckling Method - MBM), vytvořené, jak v podélné, tak v příčné ose, za účelem přiblížení se mechanickým vlastnostem harmonického měchu. Zvlnění je dosaženo napnutím elastomerního substrátu, při kterém jsou na něj naneseny vrstvy funkčního materiálu a následným smrštěním substrátu dojde k zvlnění vrstev, viz Obr. 2 a). Dalším možným postupem výroby MBM je ohřátí a následné ochlazení tenké vrstvy funkčního materiálu na elastomerním substrátu. Rozdílem teplotních koeficientů roztažnosti dojde k zvlnění tenké vrstvy. Klíčovými parametry vln jsou vlnová délka a amplituda, udávající deformační schopnosti vrstev výsledného systému. Vlnové délky a amplitudy se mění během mechanického namáhání a zabraňují poškození funkčního materiálu, při značné deformaci nosného substrátu na Obr. 2 [5]. Strukturální konfigurací materiálu pomocí MBM, lze konkrétně u Si dosáhnout roztažnosti v rozsahu (10 – 20 %), což znamená 10 až 20-krát větší roztažitelnost, než u běžného křemíku [1, 2].

Dalším úpravou je skládání elektroniky pomocí technik origami a kirigami. Technika origami spočívá ve skládání měkkých materiálů do daných vzorů, které udávají materiálu výsledné mechanické vlastnosti. Skládáním elektroniky do těchto tvarů pak získáme požadovanou roztažnost. Technika kirigami se od techniky origami liší pouze v tom ohledu, že mimo skládání se materiál ještě zastříhuje [5].

Zmíněné struktury mohou být ještě dále zdokonaleny, vytvořením ostrůvkové sítě obloukových pásků na povrchu substrátu, se kterým je síť propojena pouze v uzlech “ostrůvcích”. Uzlové propojení se substrátem umožňuje funkčnímu materiálu dokonalejší přenášení deformací, blížící se až deformačním limitům samotného substrátu [7].



Obr. 2 a) nanosení Si pásků na substrát PDMS a vytvoření vln b) zobrazení zvlněného Si pásků pořízeného pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) c) vytvoření vln na membráně Si, po nanosení na substrát PDMS d) zobrazení vln Si membrány pomocí optického mikroskopu (vlevo) zobrazení pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM) (vpravo) [7].

## 1.2 Materiálová konfigurace

Jak již bylo zmíněno, dalším možným způsobem dosažení roztažitelnosti vodivých stop je materiálová konfigurace, založená na materiálech, které vykazují elasticitu. Elasticita je schopnost materiálu opakovaně odolávat mechanickému napětí, deformovat se a po odstranění zdroje mechanického napětí se vrátit do původního stavu [1, 2, 5]. Jedním z nejčastějších způsobů provedení materiálové konfigurace vodivých stop je pomocí disperze vodivých plniv v elastomeru, tím se docílí elektrické vodivosti elastomeru. Novější konstrukční provedení jsou založena na materiálech na bázi tekutých kovů nebo vodivých polymerů. Výše zmíněným způsobům materiálové konfigurace se podrobněji věnují následující částí této kapitoly [6].

### 1.2.1 Elasticé kompozity

Elasticé kompozity označují elastické materiály vykazující elektrickou vodivost. Získání těchto kompozitů je docíleno rozptýlením vodivých plniv (mikro částice, nano částice, nano drátky) v elastomerní matici. Elastomery a polymery obecně jsou považovány za nevodiče s měrnou elektrickou vodivostí (konduktivitou) v řádu  $10^{-12} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ . U těchto kompozitů je

důležité zajistit dostatečnou koncentraci vodivých plniv v celém objemu elastomerního materiálu, tak aby došlo k vodivému propojení mezi částicemi plniva [2, 6]. Koncentrace plniva musí být vyšší, jak hodnota perkolačního prahu, která udává kritickou koncentraci plniva, při které jsou částice v dostatečné vzájemné vzdálenosti a dochází k jejich vodivému propojení. Překročení hodnoty perkolačního prahu se projevuje skokovým zvýšením konduktivity kompozitu o několik řádů, s dalším zvyšováním koncentrace plniv se hodnota konduktivity již výrazněji nemění. Hodnota perkolačního prahu úzce souvisí nejen s koncentrací plniva, ale i s jeho disperzí a geometrií. Rovnoměrná disperze plniva v elastomerním materiálu zaručuje snížení perkolačního prahu, v opačném případě vznikají shluky částic plniva a práh perkolace se zvyšuje [8]. Mezi techniky používané pro disperzi plniv patří např.: míchání roztoků, válcování, tryskové frézování, dávkování vysokou smykovou silou a planetární gravitační míchání [6]. Vyjmenovaným technikám disperze se tato práce více věnovat nebude. Z pohledu samotného plniva je podstatná jeho geometrie, kdy se upřednostňují plniva s vysokým poměrem vnější plochy vůči objemu (drátky, destičky, vločky), před kulovými částicemi. Plniva s vysokým poměrem stran snižují práh perkolace a zachovávají vodivost i při výrazném natahování materiálu. Zvyšováním koncentrace plniva v matrici však snižujeme pružnost kompozitu [8]. Zvolení vhodné koncentrace plniv je proto důležité nejen, pro dosažení dostatečné vodivosti, ale i pro zachování odpovídajících mechanických vlastností [6].

Pro účely matrice se využívají materiály vykazující elasticitu, nejčastěji se jedná o elastomery (polydimethylsiloxan (PDMS), termoplastický polyuretan (TPU) atd.), konkrétněji se těmito materiálům věnuje kapitola 1.2.3 Konstrukční provedení elastických plošných spojuenkapsulant. Jako vodivá plniva se používá řada materiálů, kdy jedním z nejpoužívanějších je uhlík a jeho alotropy. Uhlíkové nanotrubičky (CNT) jsou alotropem uhlíku s vysokým poměrem stran. Průměr trubice se pohybuje v rozmezí (10 – 100 nm), délka (0,5 – 10  $\mu\text{m}$ ) a hodnota perkolačního prahu (0,1 – 1 %) podílu hmotnosti, odpovídající (0,05 - 0,5 %) [6] podílu objemu kompozitu. Nejvíce využívaným materiálem pro plniva je stříbro (Ag), které se používá buď ve formě vloček nebo nanodrátků. Nanovločky mají velikost (10 – 100 nm) a hodnota perkolačního práhu je (60 – 80 %) podílu hmotnosti, odpovídající (10 – 30 %) podílu objemu. Kompozity obsahující vločky Ag v takovém množství, vykazují měrný elektrický odpor (0,01  $\Omega\cdot\text{cm}$ ). Nanodrátky Ag mají průměr kolem 100nm, s délkou (10 – 100  $\mu\text{m}$ ) [6]. Rozdílem oproti předchozímu plnivu je, že nízký perkolační práh umožňuje vytváření průhledných vodivých vrstev a tenkých vodivých.



Plošný odpor takto vzniklých vrstev se vyjadřuje v jednotkách  $\Omega/\square$ , na místo měrného elektrického odporu ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) a pohybuje se v hodnotách (1 - 100 $\Omega/\square$ ) [6].

## 1.2.2 Tekuté kovy a vodivé polymery

Druhý způsob Materiálové konfigurace, kterým je dosaženo vodivých stop, je založen na tekutých kovech (LM). Označením tekuté kovy se nazývají takové kovy nebo slitiny kovů, které si při pokojové teplotě udržují kapalné skupenství [2]. Nejznámějším z těchto kovů je rtuť (Hg), která však není vhodná pro pružnou elektroniku, kvůli své toxicitě a špatné smáčivosti [nagels2018]. Nejčastěji prakticky využívanými tekutými kovy jsou eutektické slitiny kovů gallia (Ga), india (In) nebo cínu (Sn), označované jako EGaIn (75,5 % Ga, 24,5 % In) a Galistan (68 % Ga, 22 % In, 10 % Sn). Slitiny vykazují velmi dobrou elektrickou vodivost, která je pro EGaIn ( $3,4 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) a Galistan ( $3,5 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) [2]. Elastické vodivé cesty založené na LM jsou zapouzdřeny v deformovatelném kanálu. Kanál udržuje tvar tekutého kovu a brání jeho úniku. Zapouzdřující látka kanálu pak udává maximální mez roztažitelnosti vodivých cest LM, které mohou dosáhnout až 700 % [2]. Zapouzdření je prováděno bez přístupu vzduchu, kvůli omezení možné oxidace. Vlastností slitin na bázi gallia je vznik povrchové vrstvy oxidu gallia, o tloušťce 10 nm [6], při vystavení vzduchu. Vznikem vrstvy oxidu gallia se zvýší povrchové napětí, to se projeví ztrátou tekutosti a formováním tekutého kovu do kapek, což je nežádoucí při tvorbě roztažitelných vodivých cest. Další vlastností slitin na bázi gallia je jejich dobrá smáčivost na širokém spektru substrátů [2, 6]. Tekuté skupenství umožňuje kovům zachovat si své mechanické a elektrické vlastnosti, i při výrazném natahování a deformacích materiálu. Provedení vodivých spojů založené na LM je v současné době poměrně nové a je stále ve fázi výzkumu a optimalizace, lze však tvrdit, že nabízí jedny z nejlepších parametrů roztažitelnosti ze všech způsobů provedení roztažitelných vodičů.

Poslední možností, jak vytvořit vodivé stopy, je použití elektricky vodivých polymerů. Jako elektricky vodivé polymery se označují takové polymery, jejichž makromolekulární řetězce se skládají z opakujících se jednoduchých a dvojných vazeb, tzv. konjugovaných vazeb. Makromolekulární řetězce takovýchto polymerů se ještě dopují, podobně jako polovodiče, atomy donorů (n-typ) (Na, Li) a akceptorů (p-typ) (I<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>), pro dosažení vysoké elektrické vodivosti. Nejběžnějšími typy elektricky vodivých polymerů jsou (polyanilin (PANI), polythiofen (PTh) a polypyrrol (PPy), polyethylenedioxythiophene (PEDOT)). Takovéto polymery mají velmi vysokou elektrickou vodivost (až  $10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) [9], chemickou odolnost a jsou nerozpustné v organických rozpouštědlech. Výraznou nevýhodou je jejich nízká

mechanická roztažnost, kterou je zvyšována úpravou jejich makromolekulární struktury. Strukturu dopujeme solemi, karboxylovými nebo anorganickými kyselinami a tím zvyšujeme rozpustnost nepolárních makromolekul, elektrickou vodivost a mechanickou roztažnost. Výsledný polymer pak umožňuje roztahování až o 270 % bez ztráty elektrické vodivosti [5, 6].

### 1.2.3 Elastické substráty a enkapsulanty

Jak již bylo zmíněno v úvodní části kapitoly 1.1 Konstrukční provedení, konstrukce elastického plošného spoje se mimo vodivých stop skládá z dalších částí (nosný substrát, enkapsulant atd.). Zmíněným částem je věnována tato podkapitola. Hlavní funkcí nosného substrátu je od sebe izolovat a nést vodivé stopy, zaručit mechanické vlastnosti (roztažnost, deformovatelnost), být kompatibilní se spojovacími materiály vodivých stop, chemicky odolný a odvádět přebytečné teplo [4]. Na tyto substráty se následně nanáší elastické vodivé stopy a další funkční prvky elektrického systému. Substrátové materiály ve vyznačují vysokou mírou elasticity, roztažitelnosti (více než 200 %) a vysokou rezistivitou, mezi tyto materiály patří např. přírodní kaučuk (NR), styren-butadienová pryž (SBR), polyuretan (PU), ethylen-propylen-dienový monomer (EPDM), termoplastický polyuretan (TPU), Ecoflex nebo velmi často používaný polydimethylsiloxan (PDMS) a další [2, 5].

Z důvodu vysokého mechanického napětí působícího na vodivé stopy na povrchu substrátu, je nutné vodivé stopy chránit pomocí zapouzdřovací vrstvy (enkapsulace), snižující míru mechanického namáhání. Zapouzdřením vodivých stop a jiných funkčních materiálů zároveň tyto materiály chráníme před okolními vlivy (vlhkost, teplota, prach atd.). Proces zapouzdření probíhá tak, že na funkční materiály a substrát se nanese (např. sítotiskem) souvislá vrstva dielektrické pasty nebo inkoustu, která se vytvrdí a na ní se následně nalaminuje krycí vrstva. Pro účely dielektrických past na SPC se využívá silikonů a jako krycí vrstvy se nejčastěji používají materiály použité pro substrát [10, 11].

## 2 Tiskové metody výroby elastických plošných spojů

Výrobní metody elastické elektroniky se ve velké míře stále optimalizují, ve srovnání s technologicky lépe zvládnutelnými metodami výroby PCB (Printed Circuit Board) a FPC (Flexible Printed Circuit). Současný vývoj a optimalizace těchto výrobních metod je způsoben omezeními, které musí překonat, jak z pohledu vlastností samotných materiálů (mechanické, tepelné, elektrické atd.), tak z pohledu přizpůsobení konvenčních a nových metod výroby těmto požadavkům [12].

Metody výroby elastické elektroniky se rozdělují do dvou skupin, na suché a mokré. Mezi suché metody výroby patří například Přímá chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition - CVD) a Naprašování, které dosahují vysoké přesnosti nanášené vrstvy funkčního materiálu na nosný substrát, ale za vysokých nákladů. Mokré metody výroby pod sebou zahrnují výrobu tiskem, rotační nanášení, Drop casting nebo Spin coating, které nejsou tak přesné v nanášení. Výhodou mokřích metod výroby v porovnání se suchými metodami výroby však je, že umožňují nízkoteplotní zpracování, nanášení na široké množství substrátů a lze je vyrábět ve velkém měřítku [12]. V dalších podkapitolách se bude tato práce věnovat metodě výroby pomocí tisku. Při popisu tiskových metod bude soustředěna pozornost, jak na klasické metody Roll to roll (z role na roli), někdy označované jako matricové metody (sítotisk, Flexotisk, Hlubotisk), tak novější Metody digitálního tisku (Dispensing, Ink jet, Aerosolový tisk atd.) [2, 13].

### 2.1 Metody Roll to roll

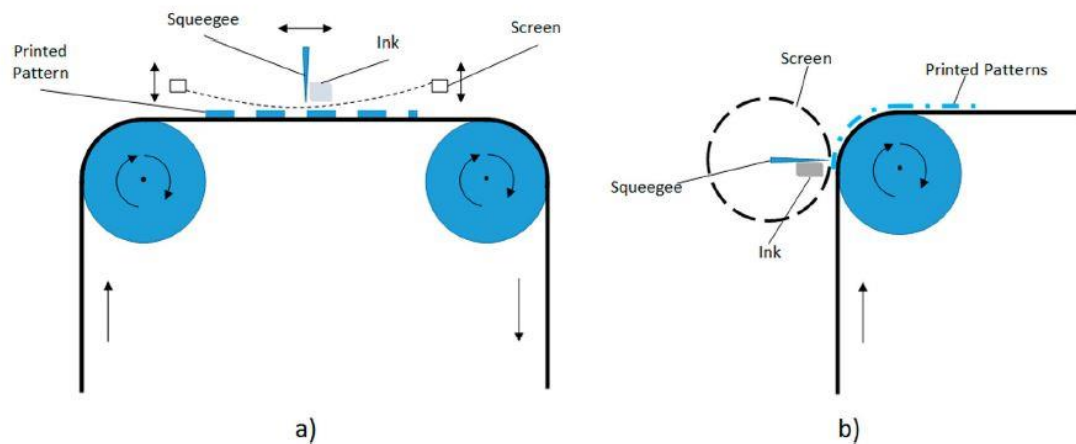
Metody Roll to roll se v češtině někdy označují jako metody „z na válec“. Všechny tyto metody tisku patří mezi kontaktní metody tisku, vycházející z konvenčních tiskařských technik. Při těchto technikách dochází k přímému přenosu tiskového motivu (matrice) z pevného nosiče, na podkladový materiál. Přenos motivu na materiál je umožněn pomocí tiskových inkoustů nebo past. Výhodou metod Roll to roll oproti metodám digitálního tisku je možnost tisku ve velkých objemech, při malých nákladech na výrobu [13, 14].

#### 2.1.1 Sítotisk

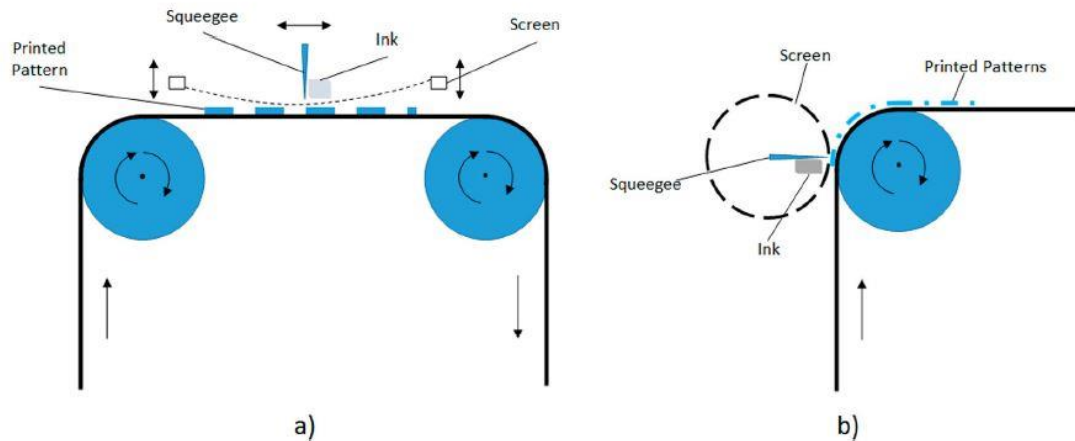
Sítotisk je nejpoužívanější metodou hromadného Roll to roll tisku elastických materiálů, a to pro své nízké náklady na zavedení, univerzálnosti vzorů, malému plýtvání tiskových past a rozsáhlému množství inkoustů a substrátů, které je možné pro tisk použít [15]. Základním principem této technologie je, že se do těsné vzdálenosti od substrátu přiloží síto s tiskovým

vzorem, na kterou se nanese inkoust. Tahem těrky se následně přenesou inkoust na substrát, skrze volné otvory v sítu, která se po přenesení odebere. Síta jsou vyráběna nejčastěji z porézní tkaniny (nylon) nebo nerezové oceli. Přiložené síto definuje velikostí svých otvorů a tloušťkou vláken, jak velikost plochy naneseného materiálu, tak jeho tloušťku pohybující se v rozmezí (30 – 50  $\mu\text{m}$ ) [16]. Důležitá je také dostatečná viskozita naneseného inkoustu, která nesmí být příliš nízká kvůli přílišné roztékavosti vzoru. Mimo těchto parametrů je nutné uvažovat i další parametry, ovlivňující samotnou kvalitu tisku, jako je rychlost tisku, přítlak stěrky a její úhel, tiskový materiál a další [15].

Výše popsanému způsobu tisku odpovídá metoda plošného sítotisku (flat bed), kdy pás, na který se tiskne, projíždí pod sítí a zastaví se v okamžiku tisku. Výhodou této metody je možnost tisknout velké plochy do 10  $\text{m}^2$ . Nevýhodou je nutnost zastavovat pás a s tím související nízká rychlost tisku (do 35  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) [14]. Z těchto důvodů byla vyvinuta druhá metoda sítotisku, rotační sítotisk. Metoda rotačního sítotisku využívá dutého děrovaného válce, do kterého je přiváděn inkoust. Uvnitř válce je dále umístěna těrka potlačující inkoust skrze jeho stěnu na pás. Válec se otáčí stejnou rychlostí jako pás, proto je tato metoda považována za plně RtR technologii. Rychlost tisku u této metody může dosáhnout ( $<100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) [14]. Princip obou metod je zobrazen na



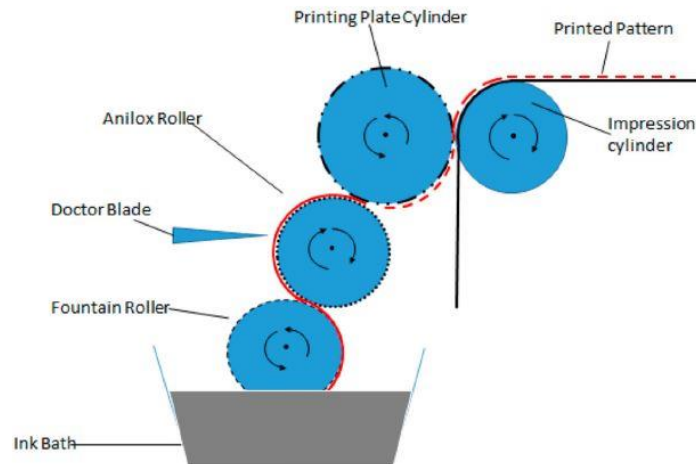
Obr. 3.



Obr. 3 Metoda a) plošného sítotisku (flat bed), b) rotačního sítotisku (Screen- síť, Ink- inkoust, Squeegee- třerka, Printed pattern- tištěný vzor) [16].

### 2.1.2 Flexotisk

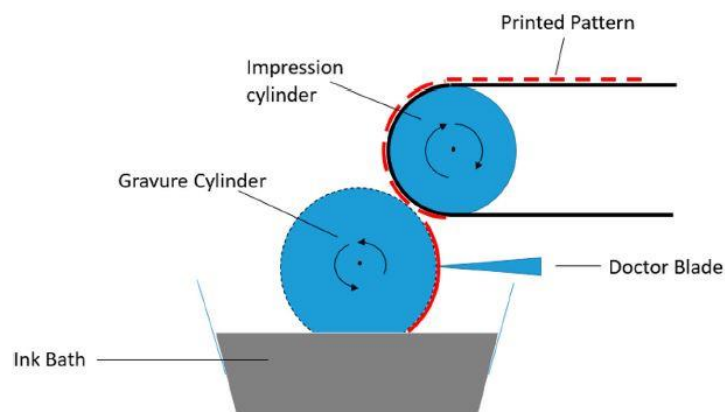
Metoda flexotisku, anglicky označovaná jako Flexography nebo tisk z výšky, je metoda, při které dochází k přímému kontaktu měkkého tiskového válce a podkladu. Na tiskovém válci je vytvořen tiskový vzor z měkké pryže nebo fotopolymeru, který z válce vystupuje jako razítko. Inkoustování tiskového válce provádí aniloxový (rastrový) válec, který má na svém povrchu vytvořeny jamky, pro přenos barvy. Hloubka, tvar a počet jamek na aniloxovém válci udává, jak velké množství inkoustu bude nanášeno na tiskový válec. Odstranění přebytečného inkoustu, který se nenachází v jamkách aniloxového válce, zajišťuje nůž. Posledním typem válce, který může být u flexotisku, je fontánový válec, přenášející inkoust z inkoustového zásobníku na aniloxový válec. Za účelem zabránění vyprchání rozpouštědla inkoustu se nejčastěji využívá inkoustový zásobník ve formě komorového systému [14]. Celý systém válců flexotisku je zobrazen na Obr. 4. Flexotisk pak může dosahovat tiskové rychlosti až 500m/min, při viskozitě inkoustu pohybující se v rozmezí 50 – 500 cP [16]. V porovnání s metodami sítotisku nebo digitálními tiskovými metodami, se flexotisk při výrobě elastické elektroniky využívá jen ve velmi malé míře, a proto se jím tato práce nebude dále zabývat.



Obr. 4 Metoda flexotisku (flexography) (Printing Plate Cylinder- tiskový válec, Anilox Roller- aniloxový válec, Fountain Roller- fontánový válec, Impression Cylinder- otiskový válec, Ink Bath- inkoustová lázeň, Doctor Blade- třerka pro ořez přebytečného inkoustu, Printed Pattern- tištěný vzor) [16].

### 2.1.3 Hlubotisk

Hlubotisk je v angličtině označován jako Gravure printing. Hlavní rozdíl mezi Hlubotiskem a Flexotiskem je v tom, že tiskový vzor na tiskovém válci je v podobě míst na válci pod úrovní netisknutelných míst, kdy tyto místa pod úrovní obsahují inkoust. Umístění inkoustu je hlavní rozdíl oproti flexotisku, u kterého je inkoust nanášen na reliéf tiskového vzoru. Udržení inkoustu v místech pod úrovní provádí jamky, jako u aniloxového válce. Tiskový válec pak přenáší inkoust přímým kontaktem s podkladovým materiálem, jenž je tlačeny měkčím otiskovacím válcem na tiskový válec, viz Obr. 5. Inkoustování válce probíhá ponořením části tiskového válce do inkoustové lázně a přebytek inkoustu je odstraněn třerkou doctor blade [14]. Kvalita tisku u hlubotisku úzce souvisí s podmínkami zpracování a složení inkoustu, zvláště na jeho viskozitě, kdy pro hlubotisk jsou nejvhodnější nízkoviskózní inkousty (50 – 200 cP). Dalším faktorem ovlivňující kvalitu tisku je dostatečný přítlak otiskovacího válce a rychlost podkladového materiálu. Pokud jsou všechny tyto parametry optimálně nastaveny, lze dosáhnout rychlosti tisku až  $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  [14, 16]. Metoda hlubotisku se stejně jako flexotisk využívá pro tisk elastické elektroniky jen málo a zde byla uvedena, jako jedna z možných technologií využitelných pro tisk elastické elektroniky.



Obr. 5 Metoda hlubotisku (Gravure printing) (Gravure Cylinder- tiskový válec, Impression Cylinder- otiskový válec, Ink Bath- inkoustová lázeň, Doctor Blade- komorový systém, Printed Pattern- tištěný vzor) [16].

### 2.2 Metody digitálního tisku

Výroba elastické elektroniky pomocí metod digitálního tisku je stále poměrně mladá a stále se vyvíjející. V posledních několika letech, kdy byla zkoumána, však roste její význam a očekává se, že v budoucnosti bude dominantní technologií výroby pro malosériovou výrobu (rapid prototyping) elastické elektroniky. Důvodem vysokého potenciálu je řada jejích výhod oproti Roll to roll metodám, kterými jsou například rychlá prototypizace, využití větší škály materiálů, jednodušší automatizace, eliminace potřeby šablon a další výhody [2].

Digitální tisk se dělí dle několika kritérií, jednou ze základních je dělení na kontaktní a bezkontaktní tisk. Kontaktní tisk vytváří zvolené tvary vytlačováním inkoustů materiálu na substrát, při kterém dochází ke kontaktu tiskové hlavy se substrátem. Výhodou tohoto způsobu tisku je relativní jednoduchost, při zaručení dostatečné adheze mezi inkoustem a podkladovým materiálem. Typy tisku náležící mezi kontaktní jsou například dispensing nebo mikro-extruzní tisk. Bezkontaktní tisk naopak nanáší materiál pomocí tryskání a kapání, kdy se tisková hlava nedostane do kontaktu se substrátem. Mezi tyto typy tisku pak patří inkjetový, aerosolový nebo elektro-hydrodynamický tisk [2]. Vybraným typům tisku jsou věnovány další části této kapitoly.

#### 2.2.1 Dispensing

Jednou z nejstarších a nejjednodušších metod digitálního tisku je právě dispensing. Jako dispensní tisk je označován takový tisk, kdy je skrze hrot tiskové hlavy vytlačován tiskový materiál (viskózní pasty a inkousty). Hrot tiskové hlavy je v přímém kontaktu se substrátem. Dispensing se dělí dle dávkovací technologie tiskové hlavy na časový tlakový systém, pístový systém nebo Augerovu pumpu. Časový tlakový systém pracuje na principu změny

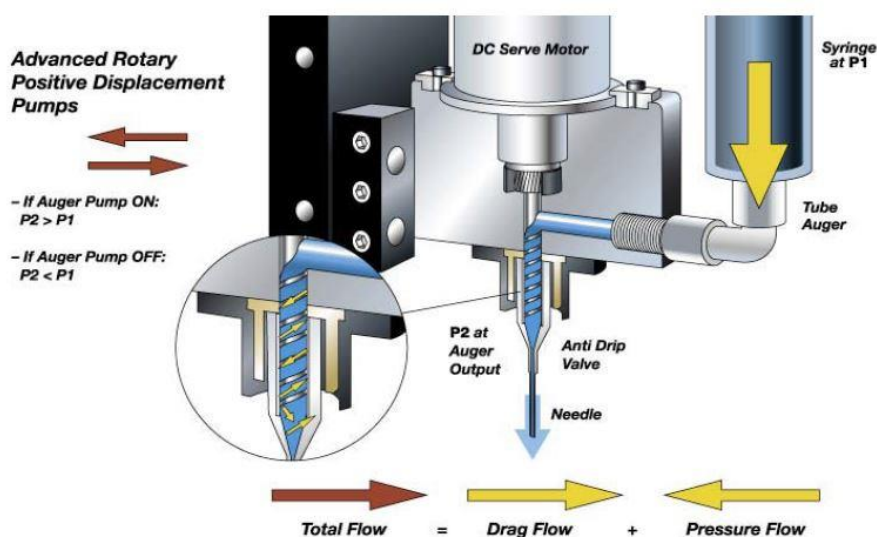
tlaku v čase, kdy na tiskový materiál v tiskové hlavici působí tlak vzduchu, buď přímo nebo přes dělicí píst, pro rovnoměrné vytlačení materiálu. Čím déle působí tlak vzduchu, tím více se protlačí tiskového materiálu skrz hrot. Po ukončení působení tlaku vzduchu je tiskový materiál držen uvnitř hrotu. Výhodou časové tlakové technologie je její poměrná jednoduchost a provozní flexibilita (jednoduchá změna způsobu dávkování). Zásadní nevýhodou této technologie je její vysoká náchylnost na změny teploty (rychlé změny proudícího vzduchu, okolní teplota), které způsobují změny viskozity tiskového materiálu a tím i jeho množství [17, 18]. Pro odstranění této nevýhody byl vyvinut pístový systém. Tiskový materiál je z hlavice vytlačován za pomoci pístu pohybujícího se pomocí elektromotoru nebo elektromagnetickým ventilem se stlačeným vzduchem. Po každém vytlačení daného množství tiskového materiálu se píst vrátí do své původní pozice před tiskem a dávkovací komora v tiskové hlavě je naplněna tiskovým materiálem. Výhodou pístového tisku je nízká citlivost k změnám teplot a přesné dávkování množství tiskového materiálu odměřeného komorou [17]. Poslední dávkovací technologií dispensingu je Augerova pumpa. Augerova pumpa využívá otáčení šneku uvnitř válce, který svým točivým pohybem přesně dávkuje požadované množství tiskového materiálu, systém pumpy je zobrazen na Obr. 6. Pumpa nepracuje na principu Archimédova šroubu, ale jedná se složitý vztah mezi geometrií šneku, geometrií jehly, tlakem působícím na tiskový materiál a jeho viskozitou. Výhodou této dávkovací technologie je přesné dávkování množství tiskového materiálu. Nevýhoda však spočívá v potřebě složitého nastavení tolerance mezi šnekem a stěnou hlavy, pro zajištění optimálního posunu tiskového materiálu o dané viskozitě a velikosti částic plniva. Na typu šneku dále závisí rychlost náběhu a doběhu, pro přesné dávkování, související s problémem počtu otáček a jejich přesným snímáním. Pro všechny tři výše zmíněné technologie dávkování je dále podstatné povrchové napětí tiskového materiálu, zaručující správné vytvoření kapky a její oddělení od hrotu jehly. V neposlední řadě měření optimální vzdálenosti jehly od povrchu substrátu [18].

Výsledná kvalita naneseného materiálu je pak závislá na velikosti adheze mezi tiskovým materiálem a nosným substrátem, na který je tento materiál nanášen. Adheze by měla být dostatečně vysoká, aby se v průběhu tisku zabránilo odstranění nanášených materiálů ze substrátu [2]. Dalším parametrem určující kvalitu tisku je jeho rozlišení, kdy u běžných dispenserů lze dosáhnout šířky tištěné cesty v rozmezí (50 – 200  $\mu\text{m}$ ), s tloušťkou vrstvy (1 – 100  $\mu\text{m}$ ), vyššího rozlišení je tímto typem tisku stále komplikované dosáhnout [2].

V současné době se zdokonalování této technologie tisku zaměřuje právě na zvýšení rozlišitelnosti, při změně hardwaru tiskárny, případně použití nových typů tiskových



materiálů. Hardwarové změny se nejčastěji týkají úpravy trysky, konkrétně zmenšení vnitřního průměru, to umožňuje zúžit šířku nanášené dráhy materiálu. Jak již bylo řečeno, nanášený materiál je nejčastěji na bázi polymerních inkoustů, s nebo bez pevných plniv, jejichž viskozita je vyšší jak 300 kcP. Velikosti částic těchto funkčních materiálů udávají, jak moc je možné snížit vnitřní průměr trysky, aby nedošlo k jejímu ucpání. Obecně lze říci, že průměr trysky nesmí být menší, než padesátinásobek velikosti částice, jejíž průměr se pohybují řádově od jednotek nanometrů až po jednotky mikrometrů. Právě kvůli těmto omezením s rozlišením tisku dispenserů, byly vyvinuty další typy digitálního tisku zvyšující jeho rozlišení [2]. Mezi tyto typy tisku patří například mikro-extruzní tisk, který má zmenšený průměr trysky nebo elektrodynamický tisk, využívající elektrického napětí.



Obr. 6 Dispensing pomocí Augerovy pumpy se zobrazením vnitřního systému dávkování. Zobrazení výsledného tlaku, skládající se z tlaku zásobníku P1 a šroubu P2, proti kterým působí vnitřní tlak vytlačovaného materiálu [18].

### 2.2.2 Ink jet

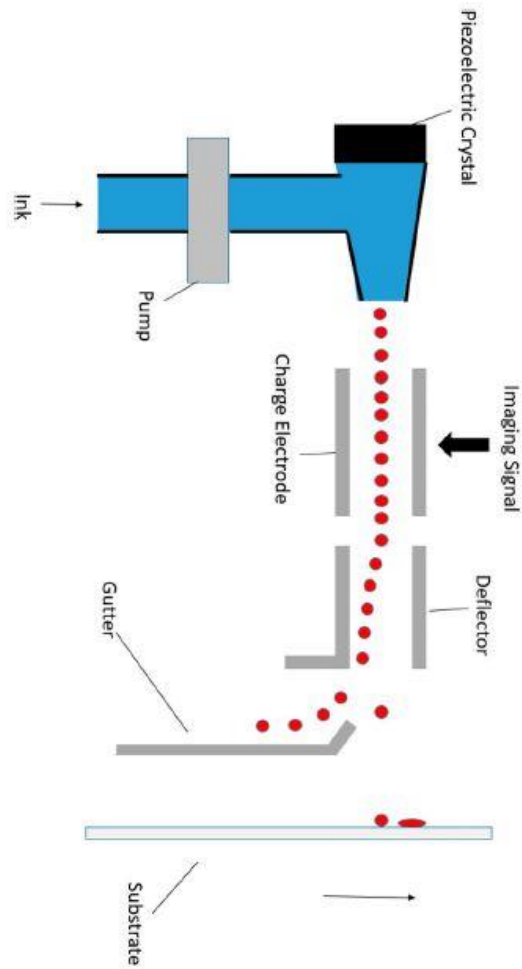
Velmi často využívanou metodou je také metoda ink jet tisku. Jedná se o bezkontaktní metodu tisku, při které je na substrát nanášen inkoust ve formě kapek. Metoda umožňuje tisk s vysokým rozlišením, s šířkou tištěné cesty (10 – 50  $\mu\text{m}$ ), která bude nanášena ve vrstvě o tloušťce (0,5 – 10  $\mu\text{m}$ ). Ink jet se dělí na dva typy, vzájemně se lišící schopností ovládat vypouštění kapiček inkoustu, CIJ (Continuous Ink Jet) a DOD (Dop On Demand) [16].

CIJ je tiskový proces, při kterém jsou z tiskové hlavičky bez přerušení vypouštěny kapičky inkoustu, které jsou pomocí elektrostatických sil deflektoru směřovány do požadovaných míst na substrátu. Podle počtů nábojů, které mohou kapky získat při průchodu nabíjecími elektrodami, rozlišujeme proces CIJ na, binární deflekcí nebo multi deflekcí. Při binární

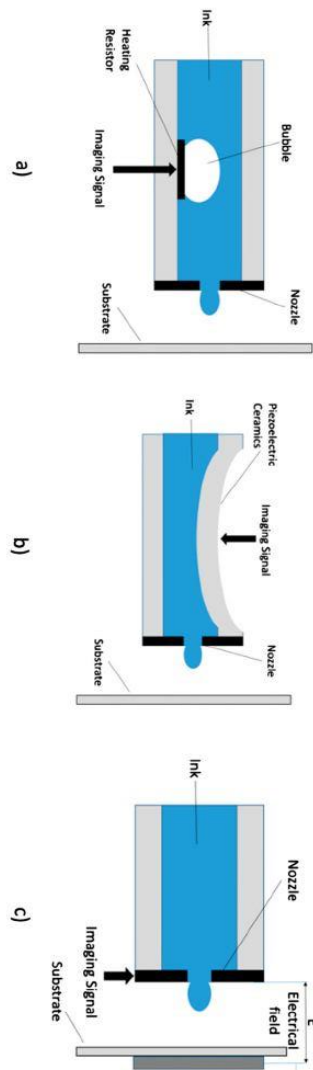
deflekcí jsou kapičky buď nabité, pak je elektrické pole deflektoru odklání do záchytného žlabu nebo jsou nenabité a dopadnou přímo na substrát, jak je zobrazeno na Obr. 7. Oproti tomu při multi deflekcí kapky získávají různé náboje a jsou směřovány do požadovaných míst na substrátu [2, 16].

DOD tiskový proces se liší od CIJ tím, že tisková hlava vypouští kapky inkoustu pouze na vyžádání, kdy proces rozdělujeme podle provedení tiskové hlavičky na tepelný, piezoelektrický nebo elektrostatický. Tepelný proces využívá topného odporu uvnitř hlavičky, který se zahřeje a tím způsobí odpaření inkoustu. Vlivem odpaření se v hlavičce vytvoří bublina, která vytlačí kapku inkoustu, zobrazeno na Obr. 8 a). Piezoelektrický proces založen na deformaci piezoelektrického aktuátoru, kdy k této deformaci dojde po přivedení elektrického napětí na aktuátor. Deformací je zvýšen tlak působící v hlavičce na inkoust a ten je vytlačen, Obr. 8 b). Proces elektrostatického tisku pak pracuje na bázi elektrostatických sil působících mezi rozdílně nabitým vodivým inkoustem a elektricky nabitou mezideskou, nacházející se nad substrátem, viz Obr. 8 c). Pokud vzájemně porovnáme metody CIJ a DOD, tak metoda CIJ je rychlejší a nanáší větší množství materiálu, oproti tomu metoda DOD je přesnější a dosahuje lepšího rozlišení [2].

Výhodou Ink jet metody je, že nanášení inkoustu ve formě kapek, umožňuje nanést inkoust na bázi vodivých částic nebo polymerů jen v potřebném množství, tím ho šetří a zbytečně nekontaminují substrát materiálem navíc. Další předností je poměrně vysoká rychlost tisku v rozmezí ( $15 - 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Nevýhodou při tisku touto metodou je pouze nutnost nízké viskozity inkoustů, která se pohybuje v rozmezí ( $5 - 20 \text{ cP}$ ) a omezuje množství a velikost použitých částic ve směsích [16].



Obr. 7 Metoda Ink jet, typ CIJ (Continuous Ink Jet). (Piezoelectric Crystal- piezoelektrický krystal, Pump- pumpa, Ink- inkoust, Charged Electrode- nabíjecí elektrody, Imaging Signal- přídící signál, Deflector- deflektor, Gutter- záchytný žlábek Substrate- substrát) [16].



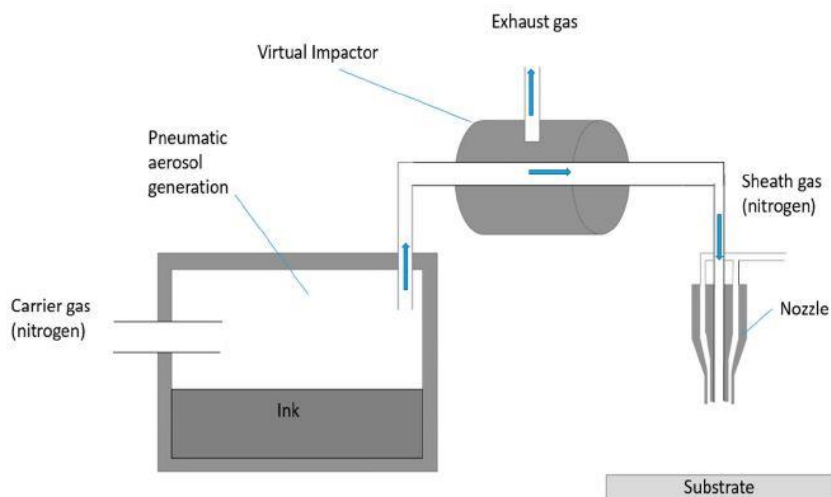
Obr. 8 Metoda Ink jet, typ DOD (Dop On Demand): a) Tepelný proces, b) Piezoelektrický proces, c) Elektrostatický proces. (Ink- inkoust, Bubble- bublina, Heating Resistor- topný odpor, Nozzle- tryska, Imaging Signal- signál, Piezoelectric Ceramic- piezoelektrická keramika, Electrical field- elektrické pole) [16].

### 2.2.3 Aerosol jet

Aerosol jet je stejně jako Ink jet bezkontaktní metoda tisku. Princip této metody je založen na přenosu tiskového inkoustu na substrát pomocí proudu plynu, sloužícího k přesnému zaostření. Metoda umožňuje nanášet jak polymery, tak tištěné keramiky a biomateriály. Dále je možné nanášet dielektrické materiály, nanotrubičky a grafen [16]. Principiální zobrazení systému aerosol jetu je zobrazeno na Obr. 9.

V prvním kroku je v zásobníku inkoustu rozprášen inkoust na jemné kapky, pomocí ultrazvukového nebo pneumatického atomizéru. Viskozita inkoustu se pohybuje v rozmezí (1 – 5 cP) u ultrazvukových a (1 – 1000 cP) u pneumatických rozprašovačů, kdy kapky mají velikost od 1 do 5  $\mu\text{m}$ . Kapky větších rozměrů (>5  $\mu\text{m}$ ) spadnou vlivem gravitace zpět do

zásobníku. Zásobníkem prochází nosný plyn (např.: dusík), který odnáší kapky přes impaktor, v kterém je zbaven proud plynu a kapek přebytečného plynu, pro zvýšení hustoty kapek v nosném plynu. Hustota kapek v plynu dosahuje až 10 milionů kapek·mm<sup>3</sup> [16]. Následně je vypuštěn proud směsi plynu a inkoustu z trysky, společně s plášťovým plynem (např.: dusík), zabraňující dotyku kapek se stěnou trysky, přesně cílíci proud na substrát. Proud směsi má průměr menší než 10 μm, tím je docíleno šířky tištěné cesty (~10 μm) o tloušťce (0,1 – 2 μm) [16]. Výhodou této metody je výše zmíněné vysoké rozlišení, malá kontaminace substrátu nežádoucími kapkami inkoustu a kompatibilita s velkým množstvím materiálů. Nevýhodou je vysoká cena zařízení a potřeba přizpůsobení vlastností inkoustů tomuto tisku (viskozita, velikost částic, průměr trysky atd.). Po správném nastavení všech těchto parametrů se aerosol jet stává velmi kvalitní digitální tiskovou metodou [2].



Obr. 9 Metoda Aerosol jet (Carrier gas- nosný plyn, Pneumatic aerosol generation- pneumatický rozprašovač, Ink- inkoust, Virtual Impactor- impaktor, Sheath gas- plynný plášť, Nozzle- tryska, Substrate- substrát) [16].

## 2 TISKOVÉ METODY VÝROBY ELASTICKÝCH PLOŠNÝCH SPOJŮ

Tabulka 1 Porovnání jednotlivých metod RtR tisku a digitálního tisku [2, 16, 18].

Metoda	Sítotisk	Flexotisk	Hlubotisk	Dispensing	Ink jet	Aerosol jet
Typ	matricový, kontaktní	RtR, kontaktní	RtR, kontaktní	digitální, kontaktní	digitální bezkontaktní	digitální, bezkontaktní
Viskozita inkoustu (cP)	1k - 5k	50 - 500	50 - 200	>300k	5 – 20 k	1 - 5 (UR) 1 - 1000 (PR)
Min. šířka cesty (μm)	30 - 50	45 - 100	10 - 50	50 - 200	30 - 50	~10
Tloušťka vrstvy (μm)	<12	0,8 - 1	0,8 - 1	1 - 100	< 0,5	0,1 - 2
Rychlost tisku (m/min)	10 - 15	100 - 500	100 – 1k	< 0,12	15 – 500	< 12

UP – ultrazvukový rozprašovač, PR – pneumatický rozprašovač

### 3 Montážní technologie pro osazování SMT komponent

Jedním ze základních problémů, který je potřeba u výroby elastických plošných spojů vyřešit, je jejich vzájemné propojení s široce používanými SMT součástkami a obecně komerční tuhou elektronikou [19]. Problémy s integrací komerční elektroniky na elastické plošné spoje jsou hlavní překážkou v docílení levné, rychlé a škálovatelné výroby elastické elektroniky [20]. Zásadní rozpor spočívá v tom, že elastické plošné spoje a elastické vodiče jsou navrženy tak, aby je bylo možné deformovat, přičemž tuhá elektroniku nikoli. Rozpor v těchto mechanických vlastnostech má za následek výrazné mechanické namáhání propojovacích materiálů, při vysokých deformacích, na rozhraní tuhé elektroniky a elastických plošných spojů a v konečném důsledku zhoršení celkové pružnosti [19]. V úvahu je také potřeba vzít další vlastnosti, jako vzájemnou materiálovou kompatibilitu kontaktního materiálu, součástky a substrátu (přilnavost atd.), rozdílnou teplotní odolnost, environmentální namáhání (navlhavost atd.) a v neposlední řadě rozdílné elektrické a mechanické vlastnosti jednotlivých kontaktních médií. Tato kapitola je věnována jednotlivým přístupům k montáži.

#### 3.1 Metody kontaktování

Standardními metodami kontaktování součástek v průmyslové praxi, které jsou široce využívány a z technologického hlediska dobře zvládnuty, jsou metody pájení vlnou<sup>1</sup> a pájení přetavením<sup>2</sup> [21]. Nevýhodou těchto metod pájení je nutnost dosažení vysokých teplot bezolovnatého pájení (nad 200 °C) [22], z těchto důvodů jsou vhodné pouze pro kontaktování součástek na tuhých deskách plošných spojů (PCB) nebo flexibilních deskách plošných spojů (FPC), které těmito teplotám odolají [23]. Se zvyšující se teplotou pájení dochází k vyšším tepelným deformacím plošného spoje a objevování vad. Pokud je materiál, z kterého je plošný spoj vyroben, citlivý na vlhkost, může dojít k jeho degradaci ve formě delaminace nebo popraskání. Z důvodu nižší teplotní odolnosti roztažitelných plošných spojů (SPC), byly pro kontaktování na těchto plošných spojkách vyvinuty nízkoteplotní pájky,

---

<sup>1</sup> Metoda pájení vlnou je založena na nanášení toku roztavené pájky, která je na desku plošných spojů (DPS) nanášena pod určitým úhlem pomocí vlny roztavené pájky [47, 48].

<sup>2</sup> Metoda přetavení je založena na nanesení pájky ve formě pájecí pasty (směs tavidla a pájky ve formě sférických částic nebo vloček) na pájená místa. Po osazení součástek na pájená místa je celá DPS zahřáta nad teplotu tání pájky a dojde k přetavení [47, 48].

s teplotou tání kolem 140 °C. Těmto typům pájek a metodám pájení na SPC je věnována podkapitola 3.2.4 Pájení.

Dominantní metodou kontaktování na SPC, v porovnání s pájením, je lepení SMD součástek pomocí lepidel, nejčastěji vodivých lepidel (ECA). Vodivá lepidla jsou dále dělena na dva základní typy lepidel, izotropní vodivá lepidla (ICA) a anizotropní vodivá lepidla (ACA). Výhodou lepeného spoje v porovnání s pájeným spojem je, že umožňuje vytvrzení při nižších teplotách a je pružnější. I přesto, že má lepený spoj v porovnání s pájeným spojem také své nevýhody, jako delší dobu vytvrzení lepidla v porovnání s procesem pájení, menší elektrickou vodivost, vyšší pořizovací cenu, z pohledu montáže na SPC převažují jeho výhody [24, 25]. Mimo ECA se za účelem vytvoření elektrického kontaktu využívají i nevodivá lepidla (NCA). Výhodou takto vzniklého spoje ve srovnání s lepením pomocí ECA je potřeba nižších teplot vytvrzování, tím zkrácení celkové délky montáže. Dalšími výhodami jsou absence vlivu perkolace a s tím související nižší výrobní náklady, při zachování srovnatelných elektrických a mechanických vlastností [21, 24, 26]. Obecnou nevýhodou NCA spojů je možnost nedosednutí kontaktů na kontaktní plošky součástky a nízké množství informací o těchto spojkách z důvodu stále probíhajícího výzkumu [21, 24]. Podrobněji popis je jednotlivým lepidlům věnován v podkapitolách 3.2.1 Lepení vodivými lepidly a 3.2.2 Lepení nevodivými lepidly.

Poslední metodou kontaktování, která bude v této práci zmíněna, je metoda osazení do nevytvrzené pasty označovaná také jako wet assembly. Výhodou takto vytvořených spojů je, jednodušší integrace součástek na povrch substrátu, se zvýšením roztažnosti a elektrické vodivosti mezi součástkou a pastou [20]. Naopak nevýhodou je v současnosti stále trvající výzkum a s tím spojené malé množství odborných publikací zabývajících se touto technologií montáže. Metoda wet assembly je podrobněji popsána v kapitole 3.2.3 Wet assembly.

## **3.2 Montáž součástek s technologií Surface Mount Device na elastické plošné spoje**

Z důvodů zmíněných v předchozí kapitole, které zmiňuje například Janda [25] nebo také Hirman [24] a [26], bylo rozhodnuto, že pro účely této práce budou nejvhodnější metody montáže pomocí ECAs, NCAs a wet assemblingu. V průběhu následujících kapitol bude těmto metodám věnována hlavní pozornost.

### **3.2.1 Lepení vodivými lepidly**

Elektricky vodivá lepidla (ECAs - Electrically Conductive Adhesives) jsou kompozity, které se skládají z matrice (polymer) a plniv (vodivé částice). Polymerní matrice udávají



mechanické vlastnosti lepidla, mají dielektrické vlastnosti a chovají se jako izolant. Vodivé částice plniva naopak udávají elektrické vlastnosti lepidla. Významným rozdílem vodivých lepidel oproti pájkám je právě to, že u lepidel se na poskytování elektrických a mechanických vlastností podílejí různé složky, kdežto u pájek jsou zajišťovány pouze pájecí slitinou. Vodivá lepidla (ECAs) rozdělujeme do dvou skupin na anizotropní vodivá lepidla (ACA - Anisotropically Conductive Adhesives) a izotropní vodivá lepidla (ICAs - Isotropically Conductive Adhesives) [11, 27].

#### **Anizotropní vodivá lepidla**

Anizotropně vodivá lepidla (ACAs) se vyznačují elektrickou vodivostí, která je závislá na určitém směru, nejčastěji se jedná o vertikální směr (osa Z). Směrové vodivosti je dosaženo přidáním vodivých plniv (5-20% objemu lepidla) do polymerní matrice [27]. Nízký objem vodivých plniv sám o sobě brání jejich vzájemnému kontaktu a vodivosti ve všech směrech [11]. V dalším kroku je lepidlo nanášeno mezi vodivou plošku a kontakt součástky, pomocí šablonového tisku nebo dispensingu.

Anizotropní vodivá lepidla se dělí dle vzniku směrové vodivosti, na lepidla se směrovou vodivostí získanou a) před zpracováním a na lepidla se směrovou vodivostí získanou b) během zpracování. Lepidlo se směrovou vodivostí získanou a) před zpracováním je docíleno vytvořením adhezivní matricové fólie, která má symetricky uspořádané vodivé prvky v jedné vrstvě. Adhezivní matricová fólie, označovaná jako anizotropní vodivý film (ACF - Anisotropically Conductive Film), je laminována na vodivé plošky SPC a za působení tlaku a teploty je vytvrzením vytvořen vodivý kontakt o tloušťce jedné částice [11, 27]. Nevýhodou této směrové vodivosti je vysoká náročnost výroby ACFs, nespornou výhodou je však předvídatelnost vzniklého kontaktu.

Druhý typ lepidel, se směrovou vodivostí získanou b) během zpracování, vznikne po nanesení vodivého lepidla na vodivé plošky [27]. Následně je lepidlo vystaveno vlivu magnetického pole, které zarovná feromagnetické částice v jednom směru a za působení tlaku, teploty, UV světla nebo přidaných katalyzátorů je lepidlo vytvrzeno. Reaktoplasty jsou nejčastěji vytvrzovány tepelně, při teplotě kolem 100 °C po dobu jednotek minut. Vytvrzování termoplastů probíhá převážně UV zářením po dobu několika sekund. Pomocí UV zářením však nedosáhneme úplného vytvrzení termoplastického lepidla, a proto je potřeba další vytvrzení [11, 28]. Vytvrzení polymerní matrice probíhá, vždy po získání elektrické vodivosti, jako chemická reakce v polymeru (reaktoplasty) nebo se jedná o ochlazení polymeru (termoplasty). Takto vytvrzená matrice působí konstantní silou na vodivé kontakty a vodivá plniva [27].

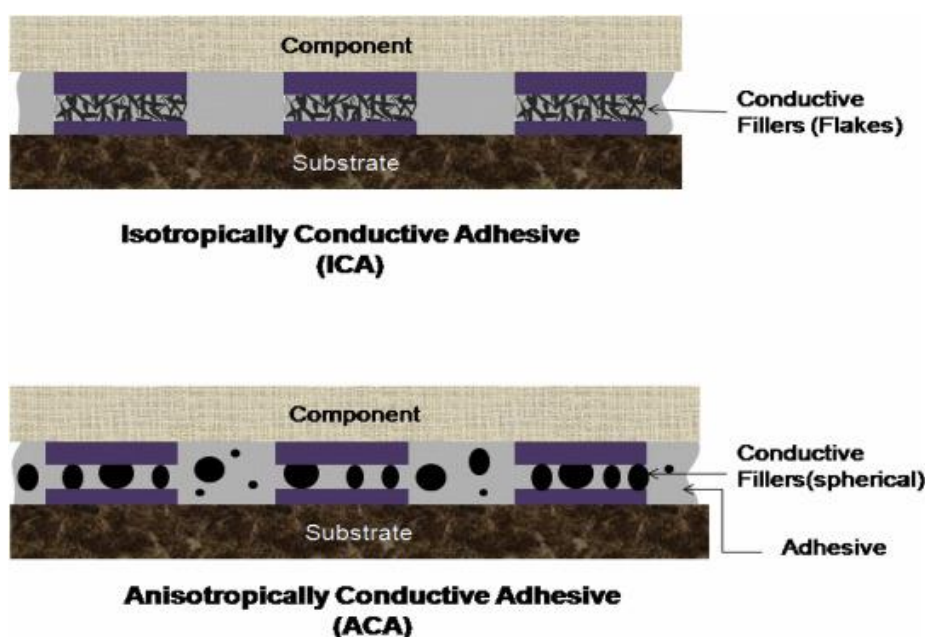
Jako polymerní materiály matric jsou používány termoplasty nebo reaktoplasty, z nichž každý má své typické vlastnosti, které jsou zohledňovány při použití lepidla. Termoplastická lepidla jsou lepidla, u kterých hraje významnou roli teplota skelného přechodu ( $T_g$ ). Pro účely lepidel jsou využívány takové typy termoplastů, které mají dostatečně vysokou teplotu  $T_g$ , aby se zabránilo jejich tečení a zároveň musí být  $T_g$  dostatečně nízká, aby se zabránilo tepelnému poškození částí SPC během procesu vytvrzení. Velkou výhodou těchto lepidel, oproti reaktoplastickým lepidlům, je rozebíratelnost vytvořeného spoje. Termoplastická lepidla trpí i řadou nevýhod, jako špatnou adhezí k vodivým částicím, to způsobuje pohyb částic během teplotních šoků. Další nevýhodou je jev zvaný “odpružení”, který způsobí až trojnásobné zvýšení přechodového odporu mezi částicemi a kontakty, po přitlačení součástek do lepidla. V praxi jsou se používány termoplasty na bázi akrylátu [11, 27]. Reaktoplastická lepidla se liší od termoplastů tím, že při zvyšování teploty neměkknou, ale dochází k jejich trojrozměrnému zesítnění. Proces zesítnění se nevratná chemická reakce, která způsobí, že se z lepidla vytvoří tuhá a pevná látka. Výhodou, takto vzniklého lepidla je jeho stabilita a nízký přechodový odpor mezi vodivými částicemi i při zvyšující se teplotě, nevýhodou je nerozebíratelnost vzniklého spoje [27]. Pro účely reaktoplastický lepidel jsou používány jednosložkové epoxidové pryskyřice [11].

Do matric jsou přidávána vodivá plniva, jako pevné kovové částice (zlato, stříbro, nikl, měď, indium nebo bezolovnaté pájky (SnBi)). Částice jsou nejčastěji sférického tvaru o průměru (3-15  $\mu\text{m}$ ), alternativními tvary jsou tyčinky nebo vločky. Vodivá plniva jsou také vyráběna ve formě kuliček z nevodivého materiálu (plast, sklo), potažené vodivým povlakem (zlato, stříbro, nikl, chrom atd.). Účelem plastového jádra je deformovat se pod tlakem vytvrzování a tím zvětšit velikost kontaktní plochy částice s vodivou ploškou. Skleněná jádra kuliček se nedeformují a lze tak určit výslednou tloušťku spoje. Na vodivou vrstvu částice může být ještě nanášena izolační vrstva, která se poškozí po vystavení částice tlaku jiných částic nebo kontaktní plochy součástky. Izolační vrstva brání vzniku zkratu v jiných směrech [27].

#### **Izotropní vodivá lepidla**

Izotropní vodivá lepidla (ICAs) jsou, stejně jako anizotropní vodivá lepidla (ACAs), kompozity skládající se z polymerní matrice, určující mechanické vlastnosti a vodivých plniv, určujících elektrické vlastnosti lepidla. Narozdíl od ACAs jsou ICAs vodivá ve všech směrech. Všesměrové vodivosti ICAs je dosaženo pomocí takzvané teorie perkolace. Teorie perkolace říká, že pokud koncentrace vodivých plniv v matrici dosáhne nebo přesáhne kritické koncentrace ( $V_c$ ), takzvaného perkolačního práhu, zvýší se vodivost lepidla o

několik řádů. Při dosažení perkolačního práhu dojde k vzájemnému vodivému propojení plniv, které vytvoří trojrozměrnou síť. Dalším zvyšováním koncentrace plniv na práhem perkolace se vodivost lepidla zvyšuje jen mírně [8]. Nadměrná koncentrace plniv může způsobit zhoršení mechanických vlastností spoje, proto je potřeba zvolit optimální rovnováhu mezi, co nejvyšší vodivostí lepidla a minimálním vlivem na mechanické vlastnosti spoje. Optimální koncentrace plniv v ICA se pohybuje v rozmezí (25-30% objemu lepidla) [11, 27]. Po dosažení optimálních elektrických a mechanických vlastností lepidla je, stejně jako u ACAs, nanášeno na vodivé plošky a jsou osazeny součástky. Na lepidlo působí konstantní tlak součástky a teplotou nebo UV zářením dojde k vytvrzení polymerní matrice. Pro účely polymerních matic se používají reaktoplasty a termoplasty stejně jako pro ACAs. Nejčastějšími vodivými plnivými jsou částice stříbra, na kterých vzniká vodivý oxid ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ). Vodivá plniva jsou ve tvaru vloček, jak je zobrazeno na Obr. 10 (horní část), aby měli větší plochu a více kontaktních bodů se sousedními částicemi než částice sférického tvaru [11, 27].

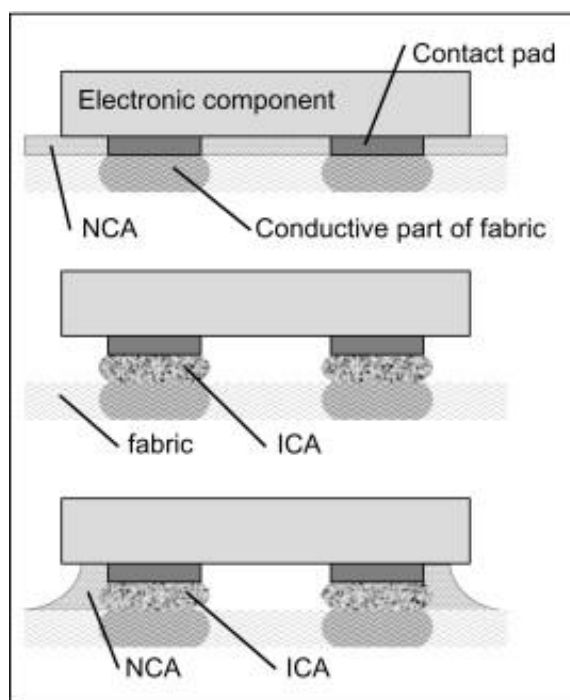


Obr. 10 Princip rozložení plniv v ICA (vodivá plniva: vločky) (horní část) a v ACA (vodivá plniva: sférické částice) (dolní část) [29].

### 3.2.2 Lepení nevodivými lepidly

Nevodivá lepidla (NCAs) se skládají z polymeru, který není elektricky vodivý a zajišťuje pouze mechanické vlastnosti spoje. Rozdílem NCAs oproti ECAs je právě to, že NCAs neobsahují vodivá plniva [11]. Elektricky vodivého spoje je dosaženo tak, že po nanášení lepidla na vodivé plošky jsou osazeny součástky a dojde k vytvrzení lepidla. Kombinací

působení upínacího tlaku na součástku a smršťováním lepidla během vytvrzení, dojde k přímému spojení mezi kontaktem součástky a vodivou ploškou, tím vznikne vodivý spoj, tento spoj lze vidět na Obr. 11 (horní část). Kvalita spoje pak záleží jak na geometrii kontaktů součástky, ale i na vzájemné kompatibilitě NCA a substrátu a míře deformovatelnosti spoje [30]. Vytvrzování lepidla je prováděno, stejně jako u ECAs, pomocí tepla (reaktoplasty) nebo UV záření (termoplasty), za působení stálého tlaku. Jako reaktoplastická lepidla se nejčastěji užívají jednosložkové epoxidové pryskyřice a jako termoplastická lepidla, akrylové pryskyřice [11]. Výhodou kontaktování pomocí NCAs, ve srovnání s ECAs, je rychlejší vytvrzení, při potřebě nižších vytvrzovacích teplot. Další výhodou jsou nižší náklady na výrobu lepidla, kvůli absenci vodivých plniv. Nevýhodou je potřeba kompatibility mezi substrátem a lepidlem a možné narušení kontaktu vlivem jeho deformací [30].



Obr. 11 Principiální použití NCA při montáži (přímé spojení kontaktu součástky a vodivé plošky) (horní část), fixace součástky a zpevnění vodivého spoje ICA (střední a dolní část) [31].

### 3.2.3 Wet assembly

V současné době je wet assembly (montáž do nevytvrzeného tištěného motivu) nově zkoumanou metodou kontaktování. Montáž pomocí této metody je prováděna ve třech po sobě jdoucích krocích (tisk motivu, osazení součástek a přechod polymer-gel). V prvním kroku je pomocí vodivého inkoustu na substrátu vytištěn vodivý motiv. Podmínkou je, že substrát a matrice vodivého inkoustu se musí skládat ze stejného typu polymeru, který po

tom, co je vystaven výparům vlastního rozpouštědla, přechází do gelového stavu. Například Lopes a spol. [20] pro tyto účely použili styren-isoprenové blokové kopolymery (SIS). V druhém kroku jsou na vytištěný motiv osazeny součástky. Poslední, třetí, krok zahrnuje vystavení vytištěného a osazeného plošného spoje výparům jeho rozpouštědla. Výpary rozpouštědla způsobí přechod mezi stavem polymer-gel. Osazená součástka je pak z pěti stran obklopena vodivým inkoustem, označované jako „samopájení“, který přilne k substrátu a lze dosáhnout maximální tolerance namáhání ( $> 500\%$ ). Po přechodu polymer-gel se na povrchu vodivého inkoustu vytvoří krycí vrstva SIS. Vytvoření krycí vrstvy na povrchu inkoustu je způsobeno tím, že samotný inkoust obsahuje, jak vodivé částice, tak SIS, který se při přechodu polymer-gel dostane na povrch inkoustu, kde dojde k „samopotahu“ [20]. Všechny tyto procesy „samopájení“ a „samopotahu“ probíhají v jednom kroku, během expozice par rozpouštědel v plynové komoře, to je velkou výhodou wet assemblyngu. Další výhodou je lepší schopnost inkoustu se přizpůsobit vnějším deformacím a tím si zachovat nižší odpor (stovky-m $\Omega$ ), v porovnání se spoji ECA [25]. Naopak nevýhodou je v současnosti stále trvající výzkum a s tím spojené malé množství odborných prací zabývajících se touto technologií montáže.

#### 3.2.4 Pájení

Pro kontaktování SMD součástek pomocí pájení, na roztažitelných plošných spojích, se využívá nízkoteplotního pájení. Jako nízkoteplotní pájení označujeme takové pájení, při kterém se špičková teplota pohybuje v rozsahu teplot (130 – 200 °C) [32]. Proces pájení na SPC však reálně probíhá při teplotách ve spodní části tohoto teplotního rozsahu nízkoteplotních pájek, především kvůli tepelné odolnosti elastomerních substrátů pohybující se v rozmezí (160-180 °C) [33] a tepelnému namáhání komponent [34]. Požadavek na takto nízkou teplotu tání splňují pouze nízkoteplotní pájky jako Sn-In (bod tání kolem 118 °C) a Sn-Bi (bod tání kolem 138 °C) [22, 34]. Spoje vytvořené na SPC pomocí nízkoteplotních pájek, vykazují sice nižší hodnoty kontaktního odporu (desítky-m $\Omega$ ) v nenamáhaném stavu, v porovnání se spoji vytvořenými pomocí (ECA, NCA a wet assembly), ale i v případě malých hodnot namáhání dochází k jejich skokovému zvýšení odporu, delaminaci pájky a selhání spoje na rozhraní substrát-pájka [24, 25]. Pájkám proto nebude v této práci věnována větší pozornost, protože pro účely této práce nejsou vhodné.

## 4 Testování elastických plošných spojů

Na jakýkoliv typ zařízení působí během jeho provozního životního cyklu určité vnější vlivy. Zásadní otázkou při návrhu zařízení tedy je, do jaké míry budou tyto vnější vlivy ovlivňovat správnou funkci zařízení nebo zda bude funkce zařízení v takovýchto podmínkách vůbec možná. U zařízení je zjišťována jeho odolnost. Zjištění odolnosti zařízení se provádí takzvanými zátěžovými testy, označované také jako testy spolehlivosti, během kterých je zařízení vystaveno působení vnějšího namáhání a výsledky testů jsou následně analyzovány [35]. Tato kapitola se bude věnovat typům těchto testů, jak obecně pro plošné spoje, tak konkrétně pro kvalitu montáže SMT komponent na SPC.

### 4.1 Posuzování zátěžových testů

Vlastnosti plošných spojů se dělí obecně na tři základní kategorie zobrazené v Tabulka 2.

Tabulka 2 Dělení vlastností plošných spojů a jejich namáhání [35].

Vlastnosti plošného spoje	Sledované parametry	Potencionální selhání
Elektrické	Vodivost, kapacita a indukčnost tras a prokovů	Průrazy, přeskoky, spáleniny
Mechanické	Konstrukční integrita	Deformace, praskliny, lomy
Teplotní/vlhkostní (Environmentální)	Teplotní rozsah, počet cyklů ohřev-ochlazení, navlhnutí	Delaminace, špatné spojení pájených spojů

Podle vlastností a typů namáhání, uvedených v tabulce výše, jsou prováděny zátěžovací testy (elektrické, mechanické, tepelné/vlhkostní- environmentální), které se zaměřují na konkrétní typ namáhání [35]. Provedení zátěžových testů je závislé, jak na zmíněném typu namáhání, tak na technologickém provedení plošného spoje (PCB, FPC nebo SPC). Nejvýraznější rozdíly v testování jednotlivých typů plošných spojů, jsou patrné při provádění mechanických zátěžových testů, vycházejících z typických mechanických vlastností spojů. Příkladem je test ve smyku, během kterého působí silou na součástku hrot a je zjišťována maximální síla, při které dojde mechanickému selhání spoje [36]. Tento typ testu lze provádět pouze u PCB nebo FPC, protože u těchto spojů nedochází k elastickému natahování podkladového substrátu, které zvyšuje potřebnou sílu k odtržení součástky. Konkrétním metodám testování na SPC budou věnovány následující podkapitoly.

Poslední obecnou podmínkou je, jak správně provádět a vyhodnocovat zátěžové testy a co vše musí testované zařízení, v našem případě testované vzorky elastických plošných spojů včetně montáže SMD součástek. Všechny tyto podmínky jsou definovány konkrétními normami jako (IPC, JEDEC, IEC, ASTM, CEN, ISO atd.). Normy IPC jsou obecně uznávanými normami v elektronickém průmyslu, pro návrh, výrobu a montáž plošných spojů a elektronických sestav a testy prováděné v této práci se budou primárně řídit těmito normami [35][37].

Standardizace elastických plošných spojů (SPC) a elastické elektroniky je v současné době jednou z kritických oblastí tohoto oboru, z důvodu malého množství norem týkajících se SPC nebo kvůli jejich relativní obecnosti. Nedostatečná standardizace se týká všech stupňů návrhu, testování a vyhodnocení a je způsobena stále trvajícím výzkumem v této oblasti elektroniky [6]. Jednou z mála norem zaměřujících se na tento typ plošných spojů je norma IPC-9204 (Guideline on Flexibility and Stretchability Testing for Printed Electronics), popisující metody mechanického testování [38]. Normou IPC-9204 se bude řídit návrh metod testování vzorků v dalších částech této práce. Další normy, které lze využít, se věnují elastickým materiálům (tahovým vlastnostem vulkanizované pryže a termoplastických elastomerů) a nepřímo elastickým plošným spojům, jako jsou normy ISO 37 a ASTM D412. V normách ISO 37 a ASTM D412 jsou uvedeny pokyny týkající se: zkoušených vlastností, požadavků na zařízení, přípravy vzorků, postupu zkoušení, zpracování měření a obsahu protokolu o zkoušce [6]. Z důvodu výše zmíněných nedostatků standardizace SPC, se v řadě odborných prací vyhodnocují výsledky testů podle podobných, již provedených testů. Vzájemné porovnávání má za následek, že všechny porovnávané hodnoty jsou srovnatelné pouze do určité úrovně a měly by být považovány za údaje o řádové velikosti určitého parametru [6]. Tato práce bude kombinovaně čerpat, jak ze zmíněné normy IPC-9204, tak odborných prací zabývajících se podobnou problematikou.

### 4.2 Typy testů elastických plošných spojů

Jak bylo zmíněno v Tabulka 2 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, vlastnosti plošných spojů jsou děleny na (elektrické, mechanické, tepelné/vlhkostní- environmentální). Testy v této práci se primárně zaměří na testování mechanických a elektrických vlastností, které budou prověřovat spolehlivost testovaných vzorků a kontaktování na nich osazených SMD součástek. Mimo testování výše uvedených vlastností, bude v této práci ještě použita optická inspekční metoda která má za cíl odhalit viditelné vady testovaných vzorků [39].

#### 4.2.1 Optická kontrola

Optická kontrola se provádí před a po testování vzorku a má za cíl odhalit viditelné vady a zhodnotit případný stav poškození. Nejedná se tedy o zátěžový test, který nějakým způsobem namáhá testovaný vzorek. Kontrola je prováděna pomocí konfokálních mikroskopů [39, 40].

#### 4.2.2 Elektrická zkouška

Elektrické testování se primárně zaměřuje na měření elektrického odporu a jeho změn v čase a v závislosti na působení zvolených zátěžových faktorů. elastickéSamotné měření probíhalo pomocí 4 bodové metody, oddělující napěťové a proudové svorky, pro měření velmi malých odporů [41]. Na vzorcích se nejčastěji provádí měření odporu buď samotných vodivých cest, případně jsou k těmto vodivým cestám přidány ještě nulové SMD odpory, pro měření i samotného odporu spojů [21]. Během měření odporu je zapotřebí počítat i s vnějšími vlivy, které mohou ovlivnit velikost odporu. Jedním z těchto vlivů je koeficient teplotního odporu materiálu, kvůli kterému je potřeba měřit při definované konstantní teplotě [6].

#### 4.2.3 Mechanické zkoušky

Zkoušky slouží k vyhodnocení chování elastické elektroniky, při mechanickém namáhání. Tato práce se bude zaměřovat na opakované nebo konstantní jednoosé natažení, a to konkrétně zkouškou meze pružnosti, pružnost za podmínek konstantního prodloužení a test cyklické pružnosti. Popis zkoušek v kapitolách níže se bude řídit dle normy IPC-9204. Všechny typy zkoušek obsažené v normě IPC-9204 jsou zobrazeny v Tabulka 3 [42].

Tabulka 3 *Standardizované testy mechanických vlastností, prováděné na elastických plošných spojích* [42].

Typ testu	Testované chování	Použitý standard
Testy pružnosti	Zkouška meze pružnosti	Neznámý průmyslový standard
	Test cyklické pružnosti	Neznámý průmyslový standard
	Pružnost za podmínek konstantního prodloužení	Neznámý průmyslový standard
	Pružnost za podmínek konstantního kroucení	Neznámý průmyslový standard
	Pružnost za podmínek cyklické kroucení	Neznámý průmyslový standard

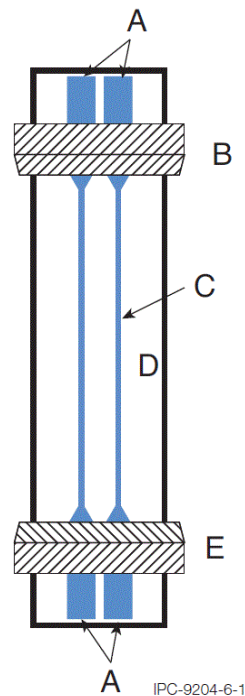


Ohybové zkoušky	Test s proměnným poloměrem ohybu	IEC 62715-6-1
	Test s proměnným úhlem ohybu	Neznámý průmyslový standard
	Zkouška ohybu volným obloukem	Neznámý průmyslový standard
	Test flexibility DeMattia	ASTM D813, ASTM D430, ISO 7854
	Test ohybu smyčky	Neznámý průmyslový standard
	Test odolnosti při skládání	ISO 5626, IEC 62899-201
Torzni zkouška	Torzni zkouška	Neznámý průmyslový standard
Testy válcováním	Test valivého ohybu	ASTM F2750
	Test navíjení pružnosti	Neznámý průmyslový standard
	Test posuvné desky	Neznámý průmyslový standard
Deformační zkoušky	Zkouška pomačkání	ASTM F2749
	Schildknechtův test	ISO 7854
	Deformační test	ISO 7854, ASTM F392
	Vamp flex test	ISO 5402-2
	Bally flex test	ASTM D6182

### Zkouška meze pružnosti

Zkouška meze pružnosti se používá k zjištění limitu prodloužení elastické elektroniky, který se udává v procentech a provádí se pomocí jednoosé zkoušky tahem. Testování probíhá buď na vzorcích již vyvinutého produktu nebo testovacích kuponů ve tvaru rovných proužků, případně proužků tvaru “psí kosti”. Konkrétní upevnění vzorku v testovacím zařízení zobrazuje Obr. 12. Vzorek je na každém svém konci upevněn mezi dvě čelisti. Během testu

zůstává dvojice čelistí na jednom konci vzorku nehybná (E – statické čelisti) a pohybuje se pouze dvojice čelistí na opačném konci (B - dynamické čelisti). Pohybem horních čelistí dochází k natažení vzorku o stanovené procento prodloužení, do doby, než dojde k jeho mechanickému nebo elektrickému selhání. V průběhu testu je podstatné sledovat změny velikosti odporu a funkčnost testovaného vzorku. Mimo varianty testovacího přípravku s jednou dvojicí pohyblivých čelistí, existuje ještě varianta testovacího přípravku, u kterého se pohybují obě dvě dvojice čelistí [42].



Obr. 12 Testovací přípravek s upevněním vzorku (A – kontaktní plošky pro měření odporu, B – dynamické čelisti, C – vodivá dráha, D - pružný substrát, E – statické čelisti) [42].

### **Pružnost za podmínek konstantního prodloužení**

Tento typ testu je prováděn na stejném testovacím přípravku, na němž se provádí zkouška meze roztažnosti, jenž je zobrazen na Obr. 12. Během tohoto testu se také prohybuje pouze dvojice čelistí na jednom konci vzorku, zatímco na opačném konci jsou čelisti nehybné. Dynamické čelisti způsobují natažení vzorku o předem stanovené procento prodloužení a na této hodnotě prodloužení zůstane vzorek po předem stanovenou dobu. V průběhu celého testu je nezbytné sledovat velikost odporu a funkčnost vzorku [42].

### **Test cyklické pružnosti**

Test cyklické pružnosti se typicky využívá za účelem zjištění, zda elastická elektronika odolá cyklickému natahování. Stejně jako u předchozích dvou mechanických testů je i tento test prováděn na testovacím zařízení, zobrazeném na Obr. 12. Nejprve je vzorek pomocí

dynamických čelistí natažen o určité stanovené procento prodloužení testovaného vzorku, na tomto prodloužení vzorek zůstává po určitou předem stanovenou dobu (jednotky s) a následně se vrátí do původního stavu před natažením. Popsaný cyklus se pak dále opakuje v předem stanoveném počtu a v jeho průběhu je sledována velikost odporu vzorku a jeho funkčnost [42].

### 4.2.4 Enviromentální zkoušky

Environmentální zkoušky mají za cíl simulovat reálné přírodní vlivy (klimatické a mechanické namáhání) působící na zařízení a ověřit, zda zařízení odolá těmto vlivům. Těmto typům zkoušek elektroniky se věnují normy IPC 9701 nebo JESD-22 A101 [38, 43, 44].

#### Klimatická zkouška

Klimatická zkouška je prováděna pro vyhodnocení spolehlivosti elasticé elektroniky, při působení klimatického namáhání (teplota a vlhkost). Zkouška probíhá v klimatické (environmentální) komoře, v které jsou testované vzorky vystaveny vlivu teploty a relativní vlhkosti. Velikost působící teploty a relativní vlhkosti se může buď cyklicky měnit v čase nebo zůstává neměnná. Změny teploty a relativní vlhkosti způsobují kondenzaci vlhkosti na povrchu, případně i uvnitř elektroniky. Kondenzace vody pak způsobuje chemické a fyzikální reakce na povrchu nebo uvnitř materiálu elektroniky (koroze kovů, elektrické zkraty, degradace materiálů, delaminace atd.). Po provedení klimatické zkoušky se zjišťována funkčnost testovaného vzorku elektroniky, případně s tím se sleduje elektrický odpor [39, 45].

#### Test zrychleného stárnutí

Tento typ testu simuluje atmosférické podmínky působící na materiály (teplo, el. pole, UV záření). Cyklickým opakováním zmíněných podmínek, je dosaženo zrychleného stárnutí materiálů. Vytvoření těchto podmínek probíhá v pecích nebo pod UV lampami. Zkouška přináší rychlé informace (stovky hodin), oproti zdlouhavému povětrnostnímu testování (roky), o vlivu klimatických podmínek na elektroniku a jednotlivé materiály. Stejně jako u předchozí zkoušek je i po ukončení této zkoušky testována funkčnost elektroniky [36, 46].

### 4.3 Návrh měření

Měření provedené na vzorcích elastických plošných spojů, bylo zaměřené na získání informací o změně jejich mechanických a elektrických vlastností, v průběhu mechanického namáhání vzorků. Typické mechanické namáhání, kterému je elastická elektronika vystavena v průběhu svého životního cyklu, je jednoosé tahové namáhání, z tohoto důvodu

byly vzorky elastických plošných spojů v této práci testovány pomocí testů pružnosti, dle normy IPC-9204 (zkouška meze pružnosti, pružnost za podmínek konstantního prodloužení a test cyklické pružnosti). Testy pružnosti byly provedeny pomocí vybavení dostupného v prostorách laboratoří KET, kdy pro účely těchto testů byl vybrán univerzální testovací strojuniverzální testovací stroj Exceed Model E42.

První navrhované testy měli za cíl zjistit, jaké je chování jednotlivých materiálů elastického substrátu, z kterých jsou testované vzorky vyrobeny a jaký vliv na toto chování mají případné změny v procesu výroby. Pro účely těchto testů postačovaly malé vzorky, na niž byly měněny použité materiály a parametry procesu výroby. Na vzorcích byly nejdříve provedeny zkoušky meze pružnosti, aby bylo zjištěno, do jakých hodnot ( $\epsilon$  (%)) – procentuální prodloužení) dochází k vratným změnám a od jakých hodnot dochází k nevratným změnám vzorků. Následující testy cyklické pružnosti pak byly zvoleny tak, aby byly testované vzorky namáhány pouze v rozmezí hodnot vratných změn.

Po získání informací o vlivu změn procesu výroby na materiály testovaných vzorků, bylo přistoupeno k testování vlivu mechanického namáhání vzorků na velikost elektrického odporu plošných spojů v průběhu testů cyklické pružnosti. Pro účely těchto testů bylo nutné použít pokročilejší formy vzorků s natištěnými vodivými spoji, na kterých bylo provedeno měření. Samotné testovací vzorky musely být přizpůsobeny testům pružnosti tak, aby se jejich návrh a realizace řídily dle normy IPC-9204, viz kapitola Zkouška meze pružnosti. Dále bylo nutné navrhnout a realizovat testovací přípravek, sloužící k upnutí vzorků do čelistí univerzální testovací stroj, nastavení podobného počátečního napnutí všech vzorků a umožňující snímání měřeného elektrického odporu tištěných spojů. Pro účely měření elektrického odporu byl zvolen multimetr Keithley 2701, který byl propojen s testovacím přípravkem.

Poslední skupiny testů byly zaměřeny na porovnání jednotlivých testovaných vzorků dle typu montáže součástek SMD, z pohledu změn jejich mechanického a elektrického chování během testů cyklické pružnosti. Pro účely těchto testů bylo potřeba navrhnout a realizovat testované vzorky s na tištěnými vodivými spoji a možností montáže součástek SMD, dle normy IPC-9204, viz kapitola Zkouška meze pružnosti. V dalších kapitolách se tato práce zaměřila na návrh a realizaci testovaných vzorků a testovacího přípravku.

## 5 Návrh a realizace testovací platformy

Pod souhrnným názvem testovací platforma jsou v této práci zahrnuty (testovací vzorky, testovací přípravek a testovací procedury). V následujících částech této kapitoly budou popsány návrhy a realizace jednotlivých částí testovací platformy.

Návrhy testovací platformy se odvíjeli od návrhu vzorků, které budou v této kapitole popsány a splňovaly stanovené požadavky na geometrii vzorků. Požadavkem na geometrii byla 100 mm aktivní délka dráhy vzorku, která je dostatečně dlouhá k sledování změn způsobených natahováním. Dalším požadavkem bylo, aby byla 100 mm aktivní délka dráhy vytištěna na jednom vzorku ve čtyřech paralelních provedeních, pro možnost jejich vzájemného porovnání. Posledním požadavkem bylo, aby byl elektrický odpor vodivých drah měřen pomocí Kelvinova zapojení<sup>3</sup>. Z těchto požadavků pak vycházely další rozměry vzorků, které byly popsány v podkapitole 5.1 Návrhy testovacích vzorků. Mimo geometrie vzorků samotných definují požadované rozměry i geometrii přípravku (rozměry čelistí, vzájemnou vzdálenost čelistí atd.), na kterém byly vzorky testovány, více v podkapitole 5.2 Návrh testovacího přípravku. Výjimku z těchto požadavků na geometrii měli návrhy vzorků pro ohybové testy, na které byly kladeny specifické požadavky, konkrétněji zmíněné v podkapitole 5.1.2 Motiv pro ohybové testování montáže součástek.

Obecným problémem při návrhu, jak vzorků, tak přípravku, byl nedostatečný počet odborných publikací, které se věnovali návrhu vhodné geometrie pro jednoosé tahové zkoušky, v kombinaci s vhodným měřením elektrického odporu. Z výše uvedených důvodů byly z odborných publikací čerpány pouze obecné informace o použitých materiálech, případně geometrii vodivých cest. Návrhy se proto primárně řídily formulovanými požadavky a normou IPC-9204. Všechny návrhy byly vytvářeny buď pomocí programu Solidworks nebo Auto CAD, ve spolupráci se zaměstnanci KET.

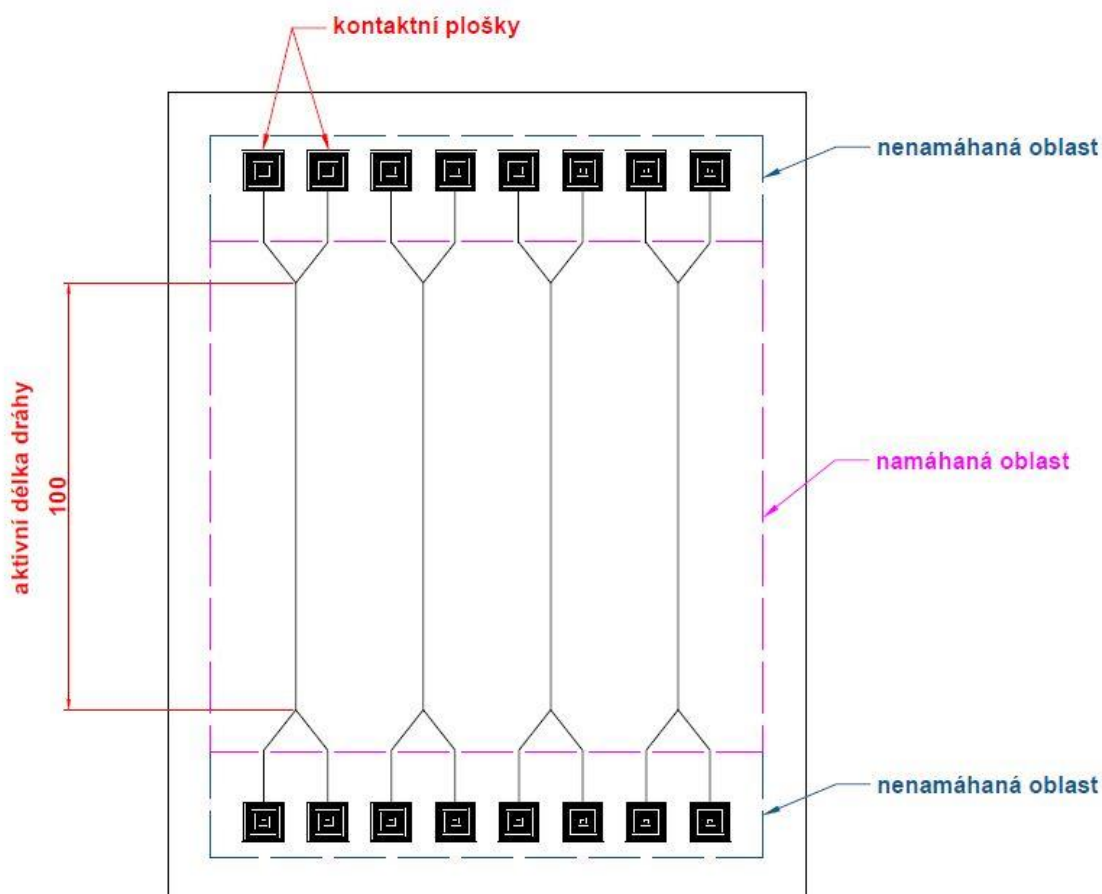
Během realizace testovací platformy byla snaha, co nejvíce využít materiály a vybavení dostupné v laboratořích KET. V případě, že nebyl některý z typů materiálů v laboratořích dostupný nebo laboratoře neměly vhodné vybavení na jeho zpracování, byl materiál či výroba zajištěna externě mimo KET. V průběhu celé realizace probíhala úzká spolupráce se zaměstnanci KET.

---

<sup>3</sup> 4-bodové měření odporu potřebné pro správné měření malých elektrických odporů během mechanického namáhání vzorků.

### 5.1 Návrhy testovacích vzorků

Požadavky na geometrii vzorků byly definovány v úvodní části této kapitoly. Zbylé rozměry vzorků, které nebyly definovány požadavky nebo z nich nebyly odvozeny, byly vhodně zvoleny. V průběhu návrhu vzorků bylo nutné brát v potaz i to, že konce vzorků budou muset být upnuty do čelistí testovacího přípravku a tím bude omezeno jejich mechanické namáhání, v porovnání se zbylou částí vzorku. Jednotlivé části vzorku jsou zobrazeny na Obr. 13, kde jsou konce vzorků pod čelistmi označeny jako nenamáhaná oblast a oblast mezi čelistmi je označena jako namáhaná oblast.



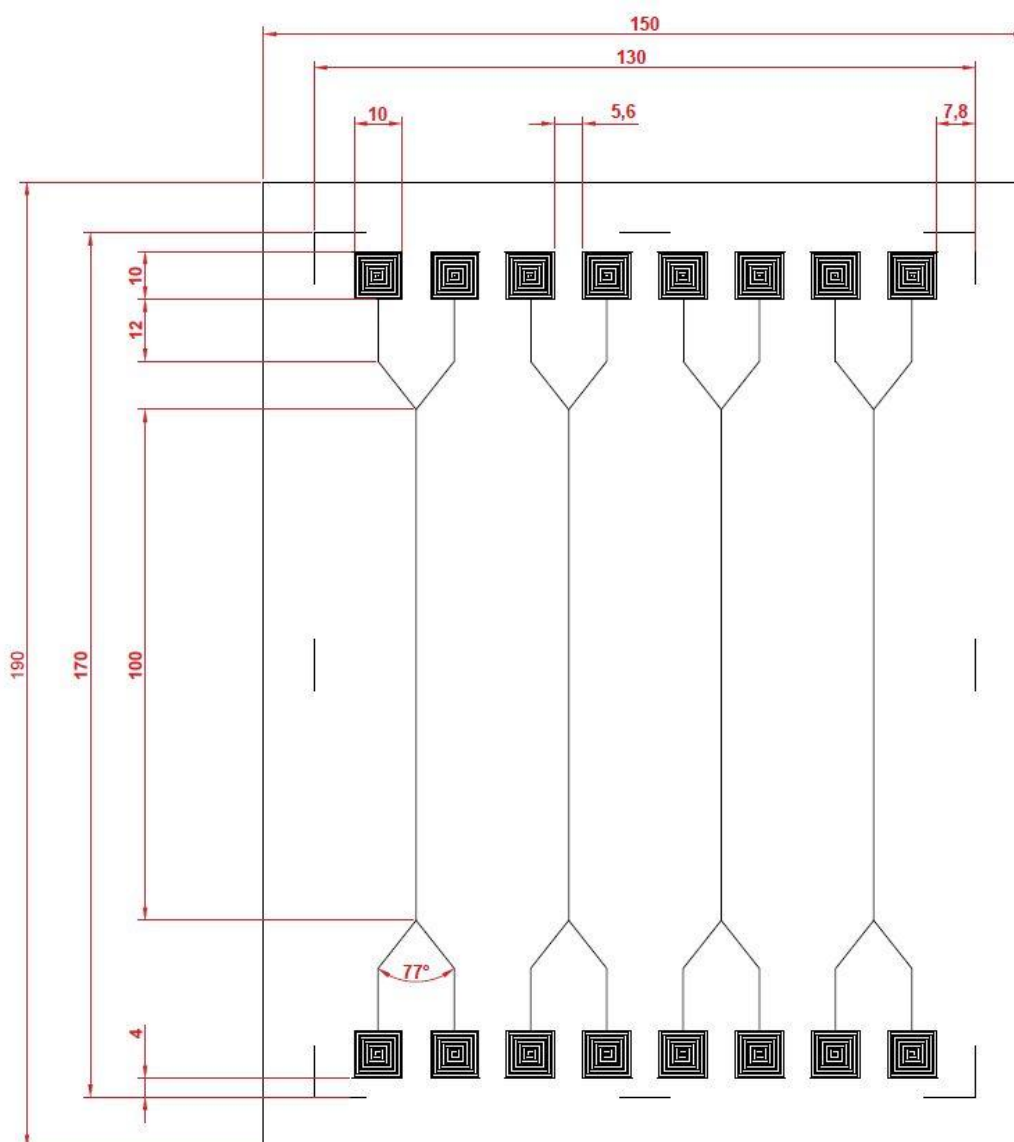
Obr. 13 Požadavky na vzorek a jeho rozdělení na oblasti, dle jejich namáhání.

V průběhu návrhu vzorků, bylo nutné uvažovat i vliv použitého tiskového inkoustu a s tím spojené změny šířky dráhy, které ovlivňují celkové rozměry vzorku. Čáry spojů, vytvořené v tiskových návrzích motivů, představují střední osu pohybu duté jehly dispenseru. V

následujících podkapitolách se bude práce věnovat návrhu jednotlivých motivů vzorků, tak jak byly v průběhu práce navrhovány, pro účely jejich realizace a testování.

### 5.1.1 Motiv pro testování pružnosti drah

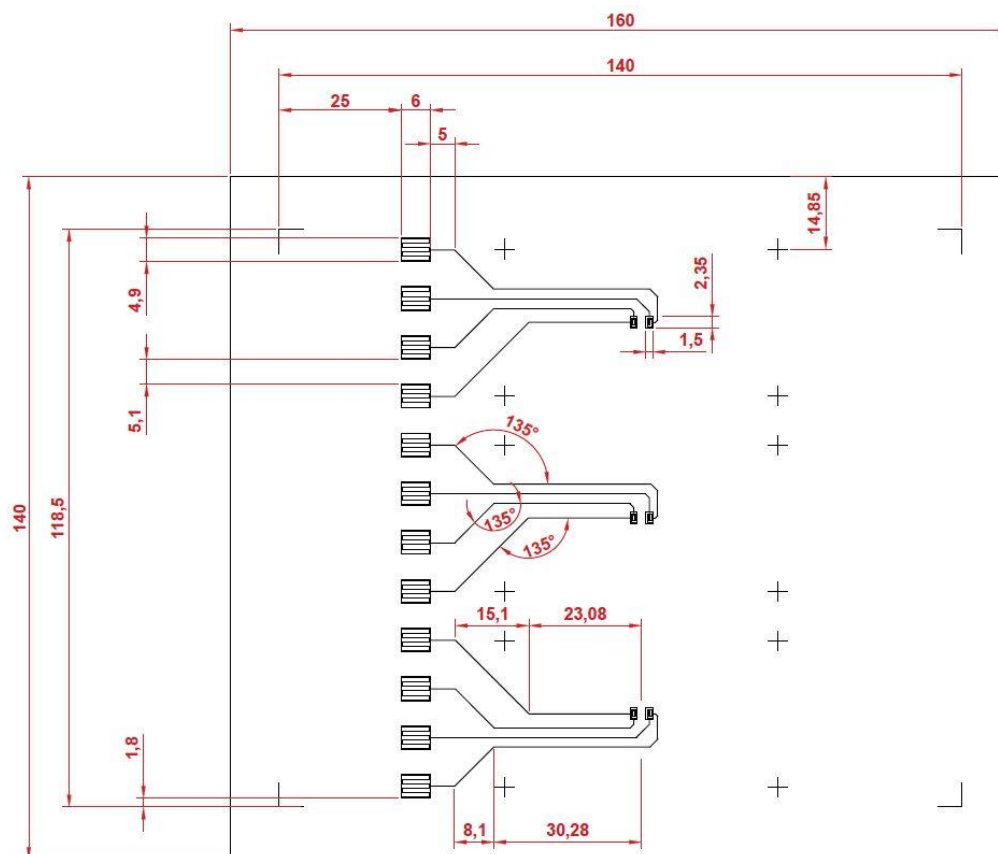
Návrhy tiskového motivu, zobrazený na Obr. 14, byly určeny pro testy pružnosti samotných vodičů drah, popsaných v kapitole 6.2 Testování vodičů drah a testování vlivu rozhraní draha-enkapsulant, v kapitole 6.3.2 Tahové testy. Návrhy motivů pro testování drah byly vytvořeny v několika variantách, vzájemně se lišících pouze svou geometrií kontaktních plošek. Geometrie kontaktních plošek byla změněna z důvodu snížení spotřeby tiskového materiálu. Změny geometrie kontaktních plošek neměli žádný vliv na jejich funkci.



Obr. 14 Návrh tiskového motivu pro tahové testování drah..

### 5.1.2 Motiv pro ohybové testování montáže součástek

Motiv pro ohybové testování montáže součástek, zobrazený na obrázku 17, byl určen pro testování montáže na enkapsulovaných součástkách, popsané v kapitole 6.3.1 Testy v ohybu. Navržený motiv vzorků se svou geometrií výrazně liší oproti všem ostatním geometriím tiskových motivů určených k tahovým testům. Důvodem rozdílného návrhu geometrie bylo použití motivu pro ohybové testy, během kterých byl zkoumán vliv ohybu vzorku na změny v elektrickém chování kontaktního média osazených a zapouzdřených součástek. Z těchto důvodů byl vzorek navržen tak, aby byl pomocí Kelvinova zapojení měřen přímo elektrický odpor kontaktu, bez měření elektrického odporu vodivé dráhy, jehož měření se například provádí v návrhu 5.1.3 Motiv pro testování pružnosti montáže součástek. Dalším rozdílem v návrhu geometrie oproti tiskovým motivům pro tahové testy je ztráta potřeby aktivní délky dráhy a pouze tři paralelní provedení zapojení na jednom vzorku. Mimo kontaktních plošek byly na vzorku vytvořeny sesazovací značky ve formě křížků, sloužící ke správnému sesazení šablony a kontaktních plošek. Návrh geometrie tištěného motivu s uvedením jednotlivých rozměrů je zobrazen na obrázku 17.

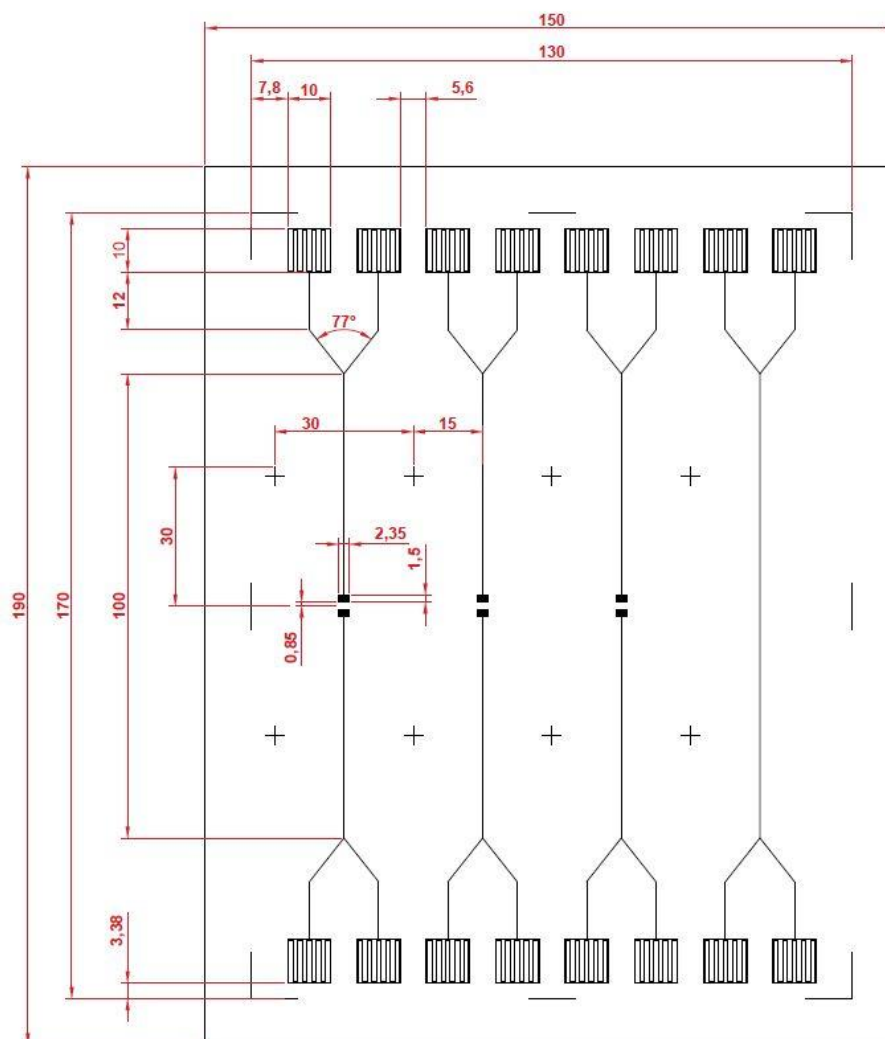


Obr. 15 Návrh tiskového motivu pro ohybové testy.



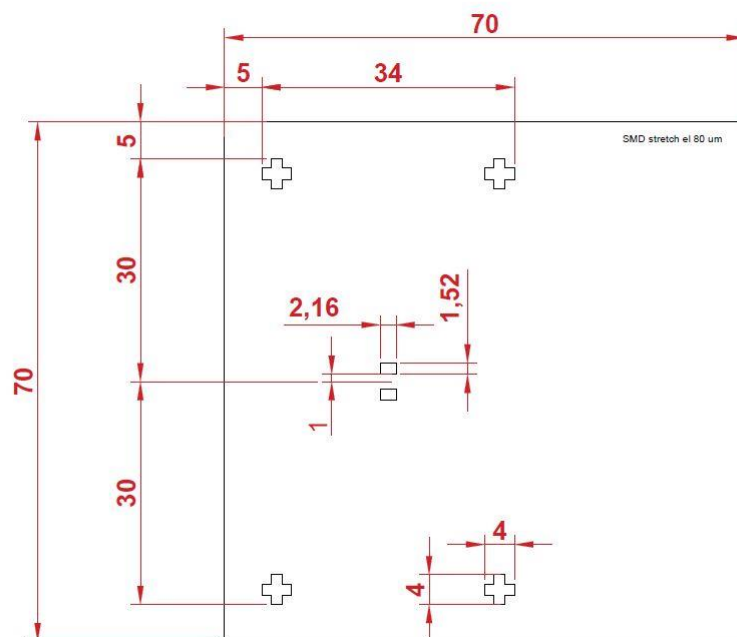
### 5.1.3 Motiv pro testování pružnosti montáže součástek

Motiv pro testování pružnosti montáže součástek, zobrazený na obrázku 17, byl určen pro testování montáže na enkapsulovaných součástkách, popsané v kapitole 6.3.2 Tahové testy. Specifikem těchto motivů je, že uprostřed namáhané oblasti byly na vodivém spoji navrženy kontaktní plošky, určené k následné montáži součástek. Mimo kontaktních plošek byly na vzorku vytvořeny sesazovací značky ve formě křížků, sloužící ke správnému sesazení šablony a kontaktních plošek.



Obr. 16 Návrh tiskového motivu pro tahové testy montáže součástek.

Šablona zajišťuje správné nanesení kontaktního média pouze na místa kontaktních plošek. Navržená šablona měla větší šířku izolační mezery (2 mm), pro zabránění vzniku vodivých můstků mezi kontaktními ploškami, v porovnání s návrhem motivu pro testování montáže součástek (1,7 mm).



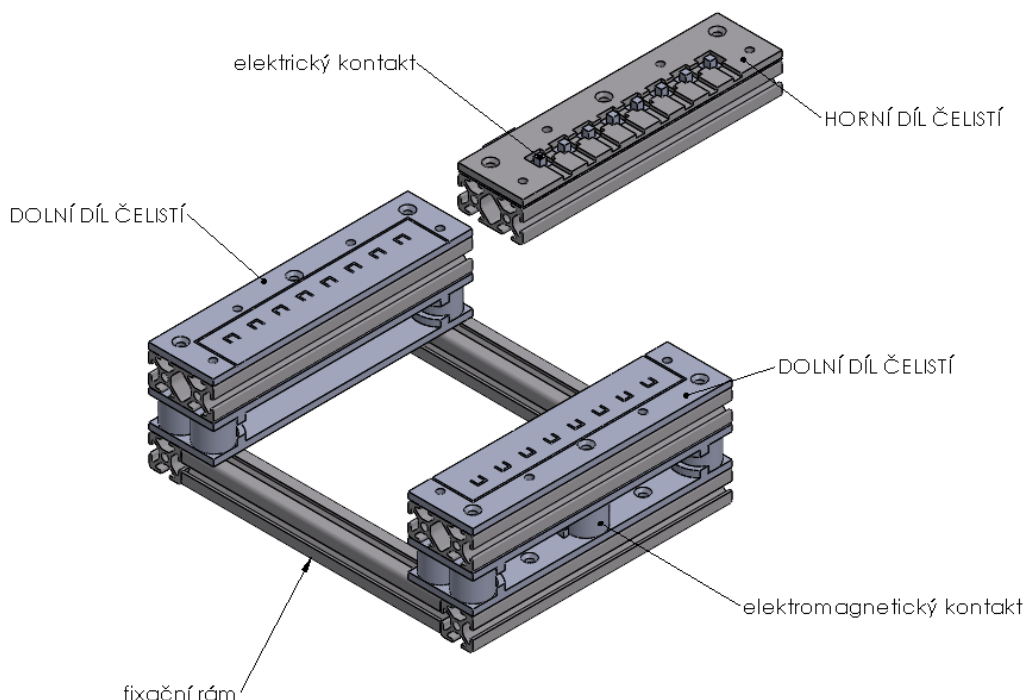
Obr. 17 Návrh geometrie šablony pro nanášení kontaktního materiálu.

## 5.2 Návrh testovacího přípravku

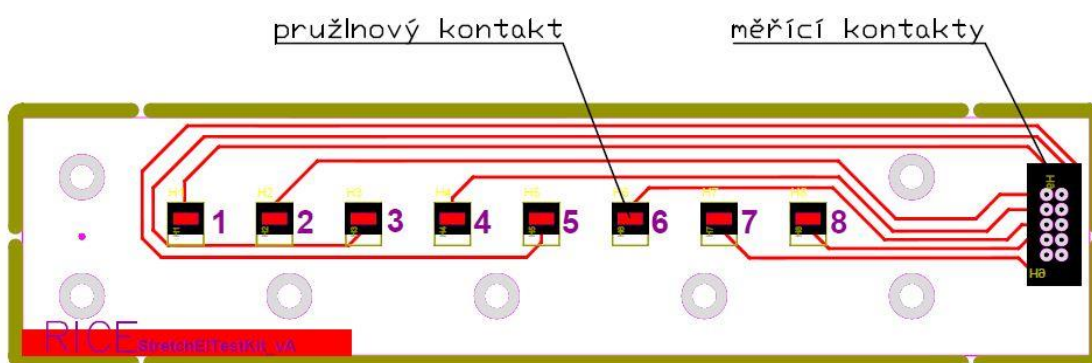
Testovací přípravek byl navržen tak, aby zafixoval testovaný vzorek před měřením a pro montáž do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42. Tahové testy vzorků upnutých v přípravku jsou pak prováděny trhačkou, která dle nastaveného programu namáhá vzorek a zaznamenává jeho mechanické parametry. Mimo upnutí vzorku a jeho montáže do čelistí univerzálního testovacího stroje, slouží přípravek k propojení vzorku a zařízení měřící elektrický odpor vodivých spojů.

Základem konstrukce přípravku jsou nosné hliníkové profily (od společnosti Alutec KK), které jsou doplněny o 3D vytištěné díly (materiál PET). 3D vytištěné díly slouží jako čelisti, pro fixaci DPS a vymezení pozic pro elektromagnety. Konkrétní 3D model testovací platformy je možné vidět na Obr. 18. Z Obr. 18 je patrné, že testovací platforma se skládá ze dvou navzájem oddělených částí, z nichž jednou částí je fixační rám, na kterém jsou rozpojitelně, pomocí elektromagnetů, připevněny spodní díly čelistí a druhou částí je horní díl čelistí. Fixační rám s elektromagnety zajišťuje pevné uchycení spodních dílů čelistí, aby byla zajištěna jejich vzájemně stejná vzdálenost, pro definované propnutí testovaného vzorku. Horní díl čelistí je zobrazen na Obr. 18 pouze jeden, ale reálně jsou dva, každý je upevněn na jeden spodní díl čelistí. Úkolem horních dílů čelistí je pevné uchycení konců

testovaného vzorku a zároveň vodivé propojení natištěných kontaktních plošek přes elektrické kontakty upevněné na PCB, viz Obr. 19, pro vyvedení měřeného elektrického signálu sloužícího k měření velikosti elektrického odporu vodivých spojů.



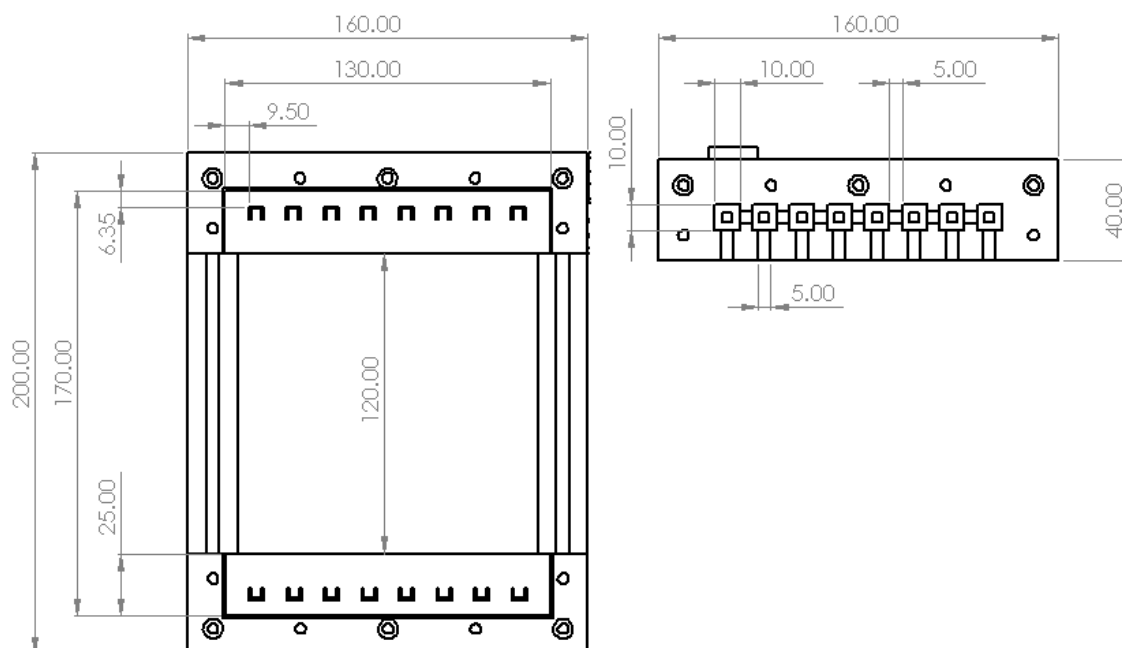
Obr. 18 3D model testovací platformy v izometrické orientaci.



Obr. 19 Návrh PCB.

Pro další návrhy testovacích vzorků byly podstatné rozměry testovací platformy, zobrazené na Obr. 20. Z těchto rozměrů je zřejmé, že celkové rozměry testovacího vzorku jsou (170 na 130 mm) s tím, že na každém konci bylo 25 mm z délky testovacího vzorku uchyceno mezi čelistmi, uchycenou oblast označujeme jako nenamáhanou oblast. Dále lze říci, že vzájemná vzdálenost mezi spodními díly čelistí na koncích fixačního rámu je 120 mm. Vzdálenost

mezi čelistmi nám definuje délku vzorku při 0 % natažení, na které budou probíhat mechanické testy, tuto oblast označujeme jako namáhanou oblast. Konkrétní rozměry jednotlivých částí je možné dohledat v modelu testovací platformy uvedeného v přílohách.



Obr. 20 Model testovací platformy v půdorysu, s vyznačením klíčových rozměrů potřebných pro návrh testovacích vzorků.

### 5.3 Realizace textilních vzorků

Pro účely úvodní tahových testů, viz kapitola 6.1 Analýza chování substrátu, byly realizovány textilní vzorky. Textilní vzorky byly realizovány ve třech variantách (samotná textilie, textilie s TPU substrátem a textilie s TPU substrátem, která byla tepelně zatížena). Tepelné zatížení sloužilo k simulaci vytvrzování kontaktního média. Typy textilií, z kterých probíhala výroba vzorků jsou zobrazeny v Tabulka 4.

Tabulka 4 Typy použitých textilií.

Vlastní označení	Typ textilie	Materiálové složení
A	Twill (tkanina)	100 % (bavlna)
B	Twill (tkanina)	95 % (bavlna), 5 % (elastan)
C	pletenina	79 % (polyester), 17 % (viskóza), 4 % (elastan)

### **Textilní vzorek**

Textilní vzorek byl určen pro testování mechanických tahových vlastností samotné textilie, popsanych v kapitole 6.1 Analýza chování substrátu. Realizace probíhala tak, že vzorky textilie, o rozměrech 2 x 10 cm, byly odříznuty z role textilie. Odříznutí vzorků probíhalo vždy tak, aby ve směru natahování textilie byla vždy osa hlavních vláken textilie.

### **Textilní vzorek s TPU**

Textilní vzorek s naneseným TPU substrátem byl určen pro testování mechanických tahových vlastností samotné textilie, popsanych v kapitole 6.1 Analýza chování substrátu. Realizace probíhala tak, že vzorky textilie, o rozměrech 2 x 10 cm, byly odříznuty z role textilie. Následně byl za pomoci lisu HP8IN-3 na vzorek textilie na laminován substrát TPU DuPont TE-11C, při nastavené teplotě ( $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a času laminace ( $\tau = 70\text{ s}$ ).

### **Tepelně zatížený textilní vzorek s TPU**

Tepelně zatížený textilní vzorek s naneseným TPU substrátem, zobrazený na , byl určen pro testování mechanických tahových vlastností samotné textilie, popsanych v kapitole 6.1 Analýza chování substrátu. Realizace vzorků probíhala totožně jako u vzorku 0 **Textilní vzorek s TPU** , s tím rozdílem, že na konci celé výroby byly vzorky tepelně zatěžovány v peci Memmert. Tepelné zatěžování se provádělo, aby se zjistilo, jak se mění mechanické chování na laminovaného TPU a nosné textilie, po vystavení teplotám nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu desítek minut. Vzorky byly ponechány v peci po jejím zapnutí, než dosáhla teplota pece ( $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a následně byly vzorky ponechány po dobu ( $\tau = 30\text{ min}$ ), při teplotě ( $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Po uběhnutí doby ( $\tau = 30\text{ min}$ ), byla pec vypnuta a vzorky byly po dobu ( $\tau = 15\text{ min}$ ) chlazeny otevřenými dveřmi pece.

## **5.4 Realizace vzorků s tiskovými motivy**

Vzorky s tiskovými motivy, které jsou popsány v kapitolách níže, byly primárně určeny pro testování elektrických vlastností vodivých spojů v průběhu jejich mechanického namáhání. Konkrétní testy a jejich účel, ke kterým byly jednotlivé motivy použity, jsou specifikován u jednotlivých motivů.

Realizace vzorků probíhala ve dvou základních fázích (výroba tiskového motivu na TPU, na laminování TPU s tiskovým motivem na textilií), jimž se bude věnovat tato část práce. V první fázi byl pomocí robotického dispenseru Nordson EFD ProPlus 4l/A, dle navržených motivů v kapitole 5.1 Návrhy testovacích vzorků, vytištěn tiskový motiv na substrát TPU DuPont TE-11C a následně byl motiv vytvrzen v peci UF-55m. Konkrétní nastavení parametrů tisku, použité tiskové materiály a nastavení vytvrzení je pro jednotlivé motivy uvedeno v Tabulka 5. Část vyrobených vzorků byla realizována pouze na TPU substrát. V druhé fázi výroby byly TPU substráty s vytištěnými motivy na laminovány za pomoci lisu HP8IN-3 na jednotlivé textilní nosiče, viz Tabulka 4. Parametry laminace jednotlivých TPU substrátů s tiskovými motivy jsou uvedeny v Tabulka 5. Další fáze výroby byly popsány konkrétně u jednotlivých typů tiskových motivů.

Tabulka 5 Nastavené parametry výroby pro jednotlivé tiskové motivy.

		Motiv pro testování drah						Motiv pro testování montáže součástek
		A (Twill)	-	A (Twill)	-			A (Twill)
Materiály vzorku	Textilní nosič							A (Twill)
	Elastomerní substrát	TPU DuPont TE-11C			TPU DuPont TE-11C			TPU DuPont TE-11C
	Vodivá pasta	DuPont PE 874			Dycotec SIP 2005PU			Dycotec SIP 2005PU
Tisk	Tlak dispenseru (bar)	0.45			0.9			0.9
	Rychlost tisku ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	7			7			7
	Průměr jehly ( $\mu\text{m}$ )	200			200			200
Vytvrzení	Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	130			110			110
	Čas (min)	30			20			20
Laminace	Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	150	120	150	120		120	
	Čas (s)	90	70	30	90	70	30	30

#### 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah

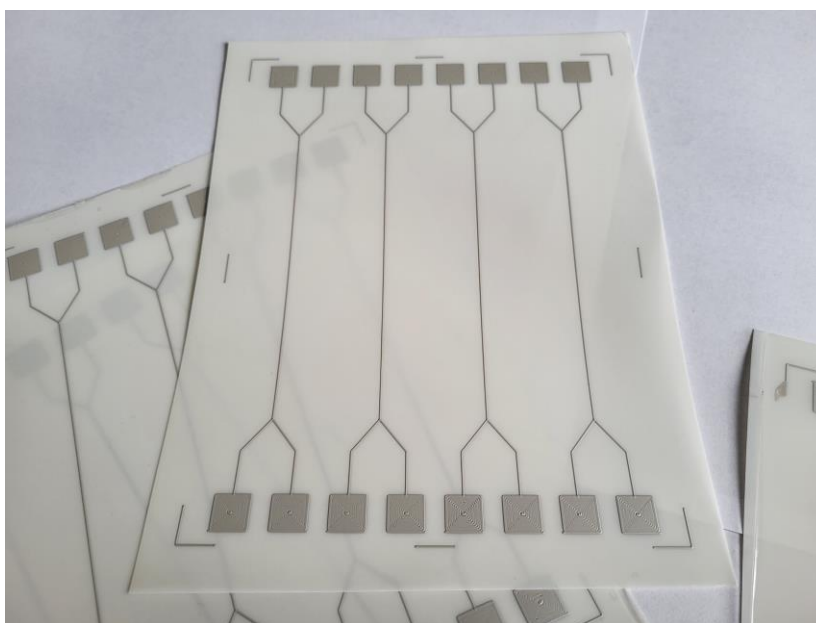
Realizovaný vzorek motivu pro testování drah, zobrazený na Obr. 21, byl určen pro testování samotných vodivých spojů, popsaných v kapitole 6.2 Testování vodivých drah a dále pro testování vlivu rozhraní tištěný spoj-enkapsulant, v kapitole 6.3.2 Tahové testy. Proces realizace probíhal tak, jak bylo popsáno v úvodu kapitoly 5.4.1 Motivy pro testování

pružnosti vodivých dráha dle parametrů v Tabulka 5. Během realizace byly modifikovány pouze parametry laminace, při kterých se měnila její teplota a čas.

Na vyrobené vzorky, určené pro testy vlivu enkapsulačního média nebo testování vlivu rozhraní tištěný spoj-enkapsulant, byl následně za pomoci dispenseru VIEWEG DC 1200 nanesen enkapsulant. Enkapsulant byl nanesen doprostřed aktivní délky dráhy, protože následný motiv pro montáž součástek je symetrický. Optimální nanesení enkapsulantu na SMD součástku je zobrazeno na obrázku . V posledním kroku byl enkapsulant před vytvrzen UV svítilnou a pak vytvrzen v UV expoziční jednotce DFE 2340. Konkrétní nastavení parametrů enkapsulace a vytvrzení je uvedeno v Tabulka 6.

Tabulka 6 Nastavené parametry procesu enkapsulace.

	Typ enkapsulantu	LOCTITE EDAG PF021
Dispenser	Tlak dispenseru (bar)	2,4
	Čas dávkování (s)	0,25
Jehla	Průměr jehly (mm)	0,84
	Délka jehly (inch)	0,5''
UV svítilna	Čas vytvrzení (s)	20
Expoziční jednotka	Čas vytvrzení (min)	14

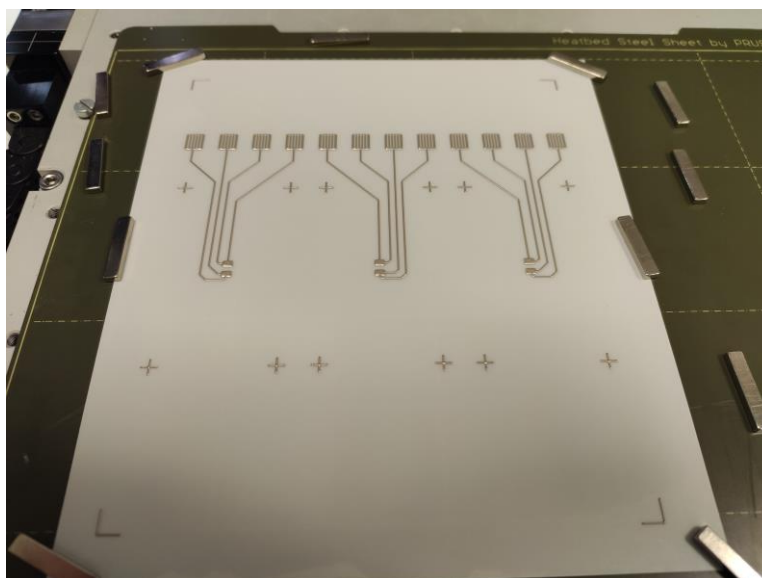


Obr. 21 Realizovaný vzorek s tiskovým motivem pro testování spojů.

### 5.4.2 Motivy pro testování montáže součástek

#### Motivy pro testy v ohybu

Realizované vzorky motivů pro testy v ohybu, zobrazené na , byly určeny pro testování montáže na enkapsulovaných součástkách v ohybu, v kapitole 6.3.1 Testy v ohybu. Proces realizace tiskových vzorků probíhal tak, jak bylo popsáno v úvodu kapitoly 5.4 Realizace vzorků s tiskovými motivy a dle parametrů v Tabulka 5.



Obr. 22 Realizovaný vzorek s tiskovým motivem pro testování montáže součástek v ohybu.

Po realizaci tiskových motivů vzorků, určených pro ohybové testy, bylo přistoupeno k montáži součástek na vzorky. Za pomoci šablony bylo na kontaktní plošky těchto vzorků nanášeno kontaktní médium, viz Tabulka 7. Dále došlo k osazení SMD nulových rezistorů s typem pouzdra 1206. Osazené vzorky byly následně vytvrzeny v peci Memmert. Montáž součástek se neprováděla pro vzorky určené pro testování vlivu enkapsulace na tištěný motiv vzorku.

V dalším kroku byl na osazené SMD součástky nanášen enkapsulant, průběh procesu enkapsulace byl popsán u předchozích typů vzorků v kapitole 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah. a nastavené parametry jsou uvedeny v Tabulka 6.

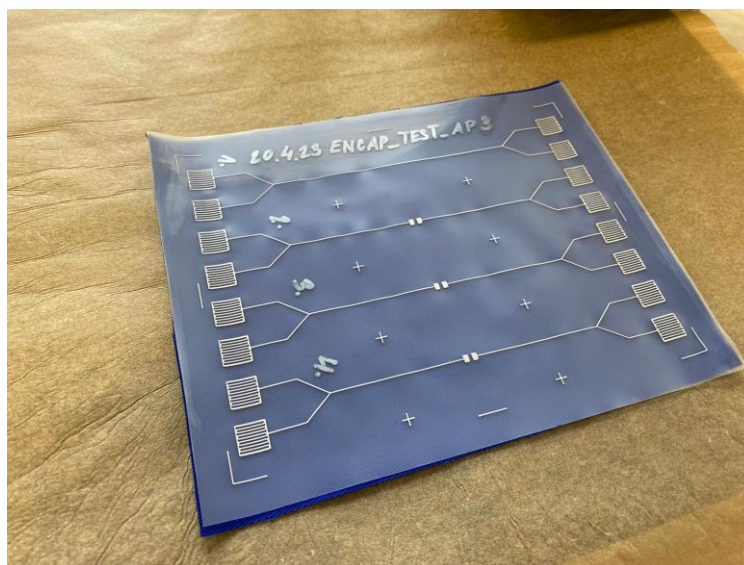
Tabulka 7 Typy kontaktních médií a parametry jejich vytvrzení, pro montáž součástek.

	Izotropně vodivé lepidlo	Izotropně vodivé lepidlo	Tisková pasta
<b>Kontaktní médium</b>	SAS-10010	ACI FE-1101	SIP 2005PU
<b>Vytvrzení</b>	120 °C/ 30 min	80 °C/ 10 min (konst.) 120 °C/ ≈20 min (teplotní rampa)	120 °C/ 15 min



### Motivy pro tahové testy

Realizované vzorky motivů pro tahové testy, zobrazené na Obr. 23, byly určeny pro tahové testy montáže na enkapsulovaných součástkách, popsanych v kapitole 6.3.2 Tahové testy. Proces realizace tiskových vzorků probíhal tak, jak bylo popsáno v úvodu kapitoly 5.4 Realizace vzorků s tiskovými motivy a dle parametrů v Tabulka 5. Postup a kontaktní média použitá při montáži součástek byla stejná, jako u vzorků s motivy pro testy v ohybu, popsané v této podkapitole. Proces enkapsulace probíhal totožně, jako dříve popsaný proces u vzorků v kapitole 5.4.1 a nastavené parametry procesu jsou uvedeny v Tabulka 6.



Obr. 23 Realizovaný vzorek s tiskovým motivem pro tahové testy montáže součástek.

## 5.5 Realizace testovacího přípravku

Realizaci testovacího přípravku je rozdělována do několika fází, v kterých probíhala, a to dle konkrétních částí přípravku, které byly v této fázi realizovány. V počátečních fázích probíhala realizace dynamických a statických čelistí. V následující fázi bylo přistoupeno k realizaci fixačního rámu.

### 5.5.1 Realizace dílů dynamických nebo statických čelistí

Základem konstrukce všech dílů čelistí je nosný hliníkový profil (40 x 20 mm), na který je upevněna přitlačná plastová destička, zobrazená na Obr. 24. Drážka patrná na této desce slouží k vymezení okraje substrátu a jeho přesnému umístění. Na Obr. 24 jsou dále vidět čtyři otvory pro šrouby, sloužící k sešroubování s horní částí čelistí a úhelník sloužící pro uchycení do trhačického zařízení. Jak výše popsaná destička, tak všechny další plastové destičky využitě k realizaci testovací přípravku byly vytištěny pomocí 3D tiskárny Prusa MK3S+.

Na opačnou stranu hliníkových profilů na dolních dílech čelistí byly upevněny plastové destičky s vymezenými prostory pro připevnění rýhovaných plochých šroubů DIN 653'' M5x10 s plochou hlavou o průměru 20 mm, stejný jako je průměr elektromagnetů.



Obr. 24 Konstrukce dolního dílu dynamických nebo statických čelistí.

Jak je patrné z Obr. 29 SEQ Obr. \\* ARABIC, horní díl čelistí má oproti dolnímu dílu čelistí odlišnou geometrii přitlačné plastové destičky. Geometrie přitlačné plastové destičky obsahující otvory, skrze které jsou vyvedeny elektrické kontakty plošného spoje.



Obr. 29 Konstrukce horního dílu dynamických nebo statických čelistí.

Další odlišností konstrukce horních dílů čelistí je tištěný plošný spoj (PCB) s elektrickými kontakty, jenž je upevněn mezi přitlačnou plastovou destičkou a nosným hliníkovým profilem, viz Obr. 29. PCB slouží k upevnění elektrických kontaktů a přenosu signálu na

měřicí kontakty. Oba dva takto vyrobené díly čelistí jsou k sobě připevněny pomocí čtyř šroubů.

### 5.5.2 Realizace fixačního rámu

V další fázi bylo přistoupeno k výrobě fixačního rámu. Stejně jako u svorek, byla nosná konstrukce vyrobena z hliníkových profilů (20 x 20 mm) a sestavena do tvaru rámu. Na šířku rámu byly upevněny plastové destičky s vymezenými místy pro elektromagnety o průměru 20 mm a na každou byly následně namontovány tři elektromagnety. Všechny plastové destičky byly, stejně jako u čelistí, vytištěny na 3D tiskárně Prusa MK3S+. Elektromagnety slouží k pevnému uchycení dolních dílů čelistí za pomoci rýhovaných plochých šroubů. Aktivace elektromagnetů byla provedena pomocí spínače na 12 V přívodním adaptéru, který byl napájen ze síťové zásuvky 230 V. Kompletní testovací přípravek je zobrazena na Obr. 25.



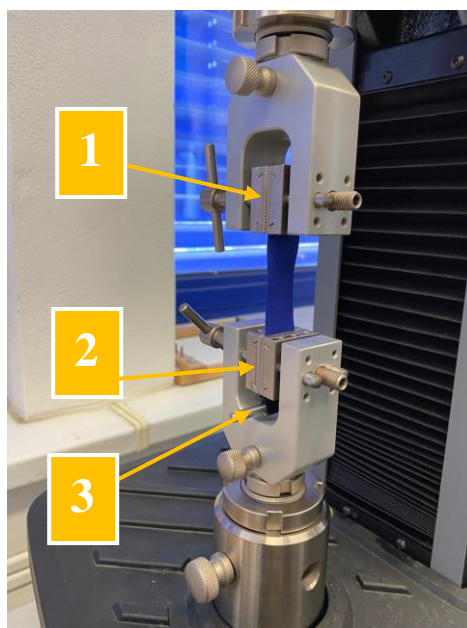
Obr. 25 Kompletní provedení testovací platformy.

## 5.6 Postup upnutí testovacích vzorků

### 5.6.1 Upnutí textilních vzorků

V případě úvodních testů na textilních vzorcích, o rozměrech (2 x 10 cm), se postupovalo tak, že na jeden konec testovacího vzorku byl připnut kovový klip se závažím a druhý konec vzorku byl upnut do dynamických čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42. Kovový klip se závažím zajišťoval mírné propnutí vzorku. Konec zatížený kovovým klipem se závažím, byl následně upnut do statických čelistí univerzálního testovacího stroje.

Úplné upnutí textilního vzorku do čelistí univerzálního testovacího stroje je viditelné na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obr. 26 Uchycení textilního vzorku (2 x 10 cm) do čelistí univerzálního testovacího stroje (1 – dynamické čelisti, 2 – statické čelisti, 3 – kovový klip se závažím).

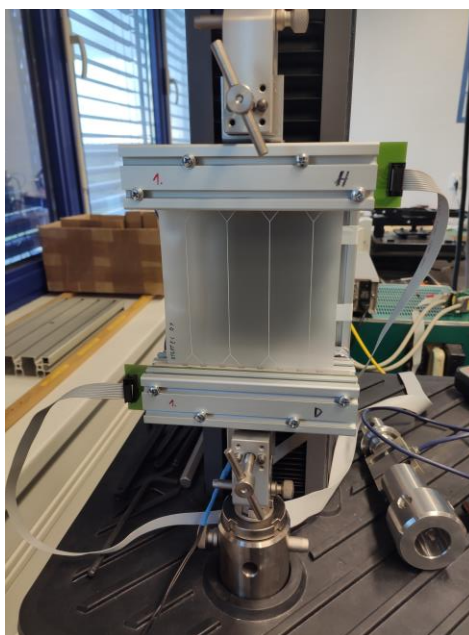
### 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti

Před samotným upnutím testovacího vzorku do přípravku, bylo potřeba na toto upnutí přípravek připravit. Příprava spočívala, v položení čelistí na fixační rám a ve vložení vymezených kvádrů mezi čelisti, aby se zajistila co největší rovnoběžnost čelistí na koncích fixačního rámu. Po nastavení co největší rovnoběžnosti čelistí, byly za pomoci spínače přívodního adaptéru aktivovány elektromagnety a tím došlo k uchycení spodních dílů čelistí k fixačnímu rámu. Mezi čelisti byla ještě vložena destička, udržující testovací vzorek ve vodorovné poloze s dolními díly čelistí. Na takto připravený přípravek byl do vymezených oblastí čelistí položen testovací vzorek, který byl na každém konci uchycen mezi čelisti, jak je vidět na Obr. 27. Horní a dolní díl čelistí byl sobě přišroubován za pomoci čtyř šroubů.



Obr. 27 Upnutí testovacího vzorku do přípravku.

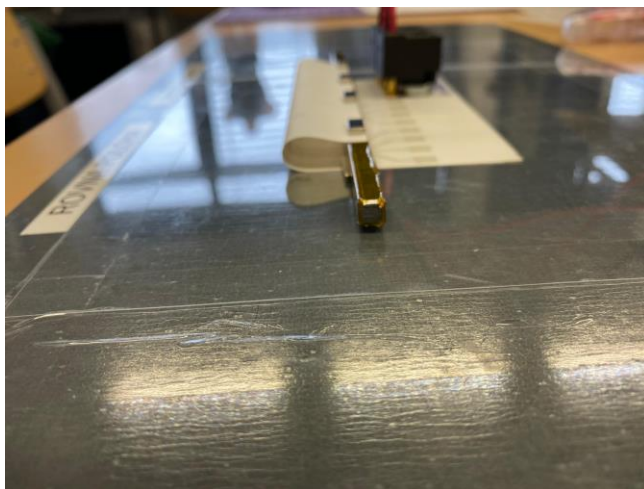
Testovací přípravek, v kterém byl upnut testovací vzorek, byl pomocí úhelníků na svých čelistech uchycen do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42. Po tom, co byly úhelníky upnuty do čelistí, došlo k deaktivaci elektromagnetů a odpojení fixačního rámu přípravku od jeho čelistí. Na měřicí kontakty čelistí přípravku byl nakonec připojen multimetr Keithley 2701, který pomocí měřicí karty přepínal mezi jednotlivými měřicími kanály a zaznamenával hodnoty elektrického odporu vodivých drah, zobrazeno na Obr. 28.



Obr. 28 Uchycení testovacího přípravku do univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42.

### 5.6.3 Upnutí motivů pro testování v ohybu

Vzorek pro ohybové testy byl umístěn na plech. Na vzorek byl následně přiložen dlouhý feromagnetický profil, který byl vyrovnán dle sesazovacích značek na vzorku. Spodní okraj vzorku byl pak ohnut k horní hraně dlouhého feromagnetického profilu a byl připevněn dalšími magnety, viz Obr. 29. Takto ohnutý vzorek byl měřen multimetrem Keithley 7510, pro zjištění velikosti kontaktního odporu.



Obr. 29 Upnutí vzorku mezi magnety.

## 6 Testování vzorků

### 6.1 Analýza chování substrátu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3 Návrh měření, úvodní testy provedené na vzorcích měli za cíl zjistit, jaké je chování jednotlivých materiálů elastického substrátu, z kterých jsou testované vzorky vyrobeny a jaký vliv na toto chování mají případné změny v procesu výroby vzorků. Pro lepší přehlednost této práce, je v ní uváděna jen část naměřených hodnot nebo získaných grafů. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách této práce.

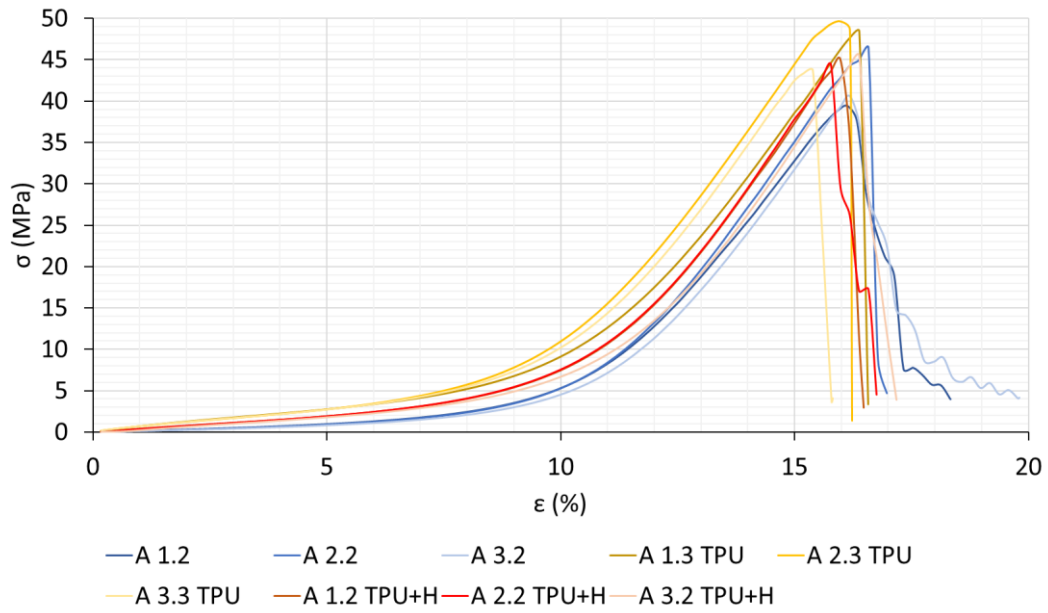
#### 6.1.1 Zkouška meze pružnosti textilních vzorků

Na úvod průřezové analýzy chování vzorků byly na vzorcích provedeny zkoušky meze pružnosti, aby bylo přesně zjištěno, v jaké oblasti hodnot procentuálního prodloužení ( $\epsilon$  (%)) převládají vratné změny a v jaké oblasti nevratné změny namáhání vzorků. Na základě mechanických vlastností substrátů byly stanoveny parametry dalších testů tak, aby nedocházelo k mechanickému poničení substrátu a textilie a pracovala v oblasti elastické deformace. Vzorky použité pro tyto zkoušky, byly vyrobeny dle kapitoly 5.3 Realizace textilních vzorků. Všechny varianty vzorků byly pro každý typ textilie vyrobeny třikrát, aby bylo možné vzorky vzájemně porovnat. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsaném v kapitole 5.6.1 Upnutí textilních vzorků. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 8. Naměřené hodnoty mechanického chování vzorků, změřené pomocí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, byly zobrazeny ve formě tahových diagramů níže.

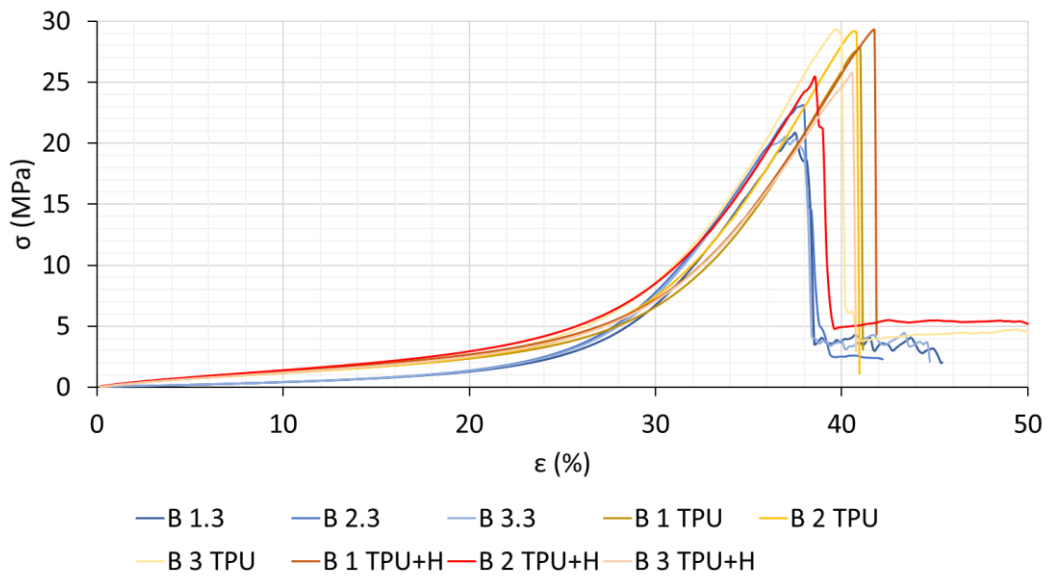
Tabulka 8 Nastavené parametry univerzální testovací stroj Exceed Model E42, pro zkoušku meze pružnosti.

<b>Šířka čelistí (mm)</b>	20
<b>Tloušťka vzorku (mm)</b>	0,3
<b>Vzdálenost čelistí (mm)</b>	50
<b>Rychlost ukládání dat (Hz)</b>	10
<b>Předpětí (N)<sup>4</sup></b>	0,5

<sup>4</sup> Předpětí udává hodnotu síly, kterou musí na trhačku působit materiál, aby univerzální testovací stroj začala zaznamenávat měřená data. Pro čisté textilie A a B, které nevykazují vysokou míru elasticity, byla zvolena hodnota 0 N.

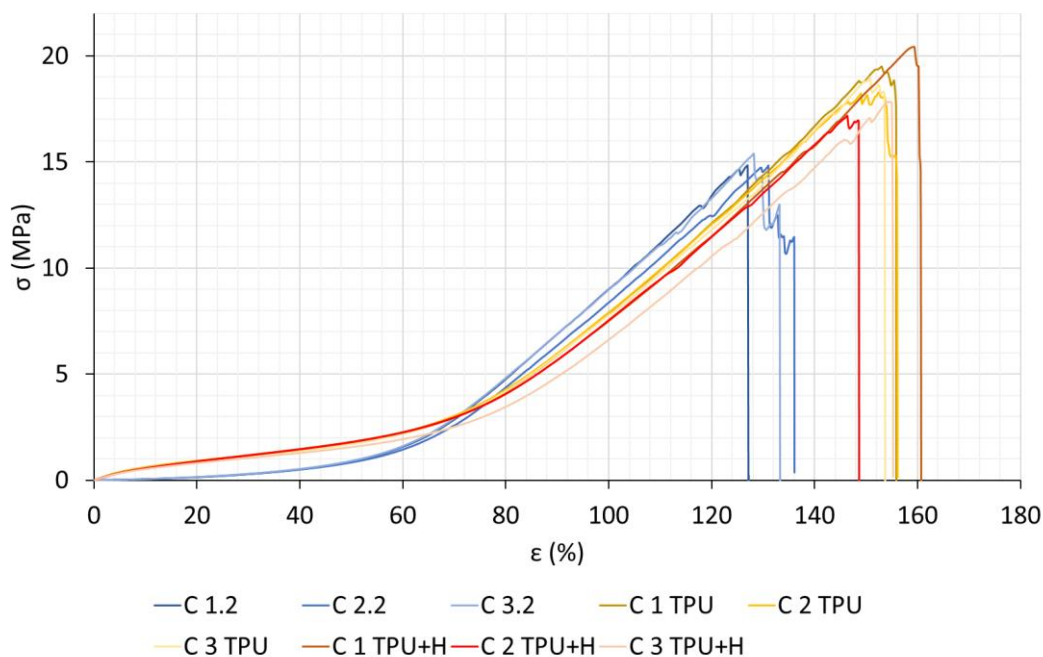


Obr. 30 Tahový diagram textilního vzorku, textile typu A (Twill, 100 % - bavlna).



Obr. 31 Tahový diagram textilního vzorku, textile typu B (Twill, 95 % - bavlna, 5 % - elastan).





Obr. 32 Tahový diagram textilního vzorku, textilie typu C (pletina, 79 % - polyester, 17 % - viskóza, 4 % - elastan)

Z průběhů výše uvedených tahových diagramů je možné odvodit, že v počáteční oblasti před zakřivením tahového diagramu, dochází k malému namáhání vzorků, v porovnání s jinými částmi diagramu. Zvyšování procentuálního prodloužení vzorků dochází v oblasti zakřivení tahového diagramu (A -  $\epsilon \approx 8\%$ , B -  $\epsilon \approx 20\%$ , C -  $\epsilon \approx 80\%$ ) a nad touto oblastí, k nárůstu namáhání vzorků až do přetržení vzorků. Na základě průběhu tahových diagramů vzorků lze předpokládat, že k elastickým deformacím vzorků dochází zřejmě v oblasti před zakřivením diagramů. Oblast před zakřivením však může být částečně ovlivněna i plastickou deformací, která se může projevit ve větší míře, při namáhání vzorků v blízkosti zakřivení diagramu. Pro zjištění konkrétních hodnot prodloužení, při kterých dochází k elastické deformaci a do jaké míry se plastická deformace projevuje v oblasti před zakřivením diagramu, byly pro každý typ textilie zvoleny čtyři hodnoty prodloužení, v oblasti před zakřivením diagramu, na kterých proběhnou zkoušky cyklické pružnosti.

### 6.1.2 Cyklické zkoušky pružnosti textilních vzorků

Zkoušky cyklické pružnosti textilních vzorků měly za cíl zjistit, při jakých hodnotách procentuálního prodloužení dochází k elastické deformaci jednotlivých typů vzorků. Pro účely měření byly zvoleny čtyři hodnoty prodloužení (A -  $\epsilon = 2, 4, 6, 8\%$ ; B -  $\epsilon = 5, 10, 15, 20\%$ ; C -  $\epsilon = 20, 40, 60, 80\%$ ), na kterých proběhnou zkoušky cyklické pružnosti. Hodnoty prodloužení byly zvoleny tak, aby pokrývaly celé oblasti před zakřivením křivek tahových

diagramů, kde byly předpokládány elastické deformace. Vzorky použité pro tyto zkoušky byly vyrobeny dle kapitoly 5.3 Realizace textilních vzorků. Všechny varianty vzorků byly pro každý typ textilie vyrobeny třikrát, aby bylo možné vzorky vzájemně porovnat. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsáném v kapitole 5.6.1 Upnutí textilních vzorků. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 9. Naměřené hodnoty mechanického chování vzorků, změřené pomocí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, byly zobrazeny ve formě tahových diagramů a sloupcových grafů níže.

Tabulka 9 Nastavené parametry univerzální testovací stroj Exceed Model E42, pro cyklické zkoušky pružnosti.

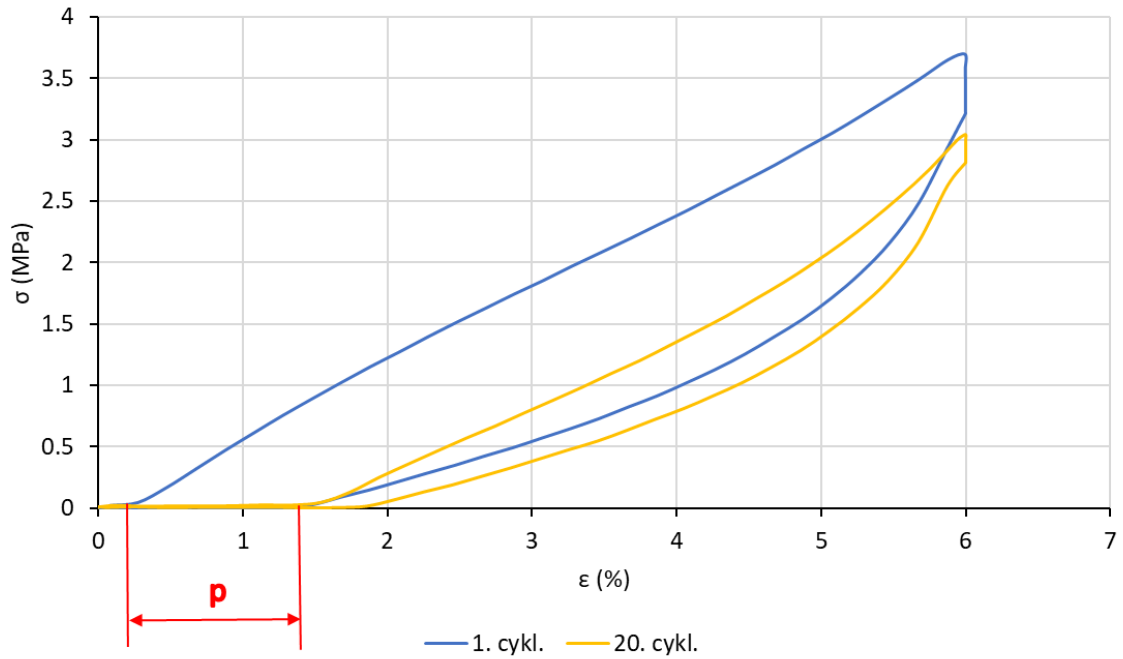
<b>Rychlost (<math>\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	1
<b>Počet cyklů (-)</b>	20
<b>Příčnick horní (<math>\text{mm}</math>)<sup>5</sup></b>	hodnota prodloužení
<b>Příčnick dolní (<math>\text{mm}</math>)<sup>6</sup></b>	0
<b>Rychlost ukládání dat (Hz)</b>	10
<b>Čas čekání (s)<sup>7</sup></b>	1

Pro účely této práce byl dále stanoven parametr ( $p$  (%)), viz Obr. 33, který reprezentuje velikost offsetu mezi 1. a 20. cyklem. Offset mezi cykly je způsoben plastickou deformací vzorků.

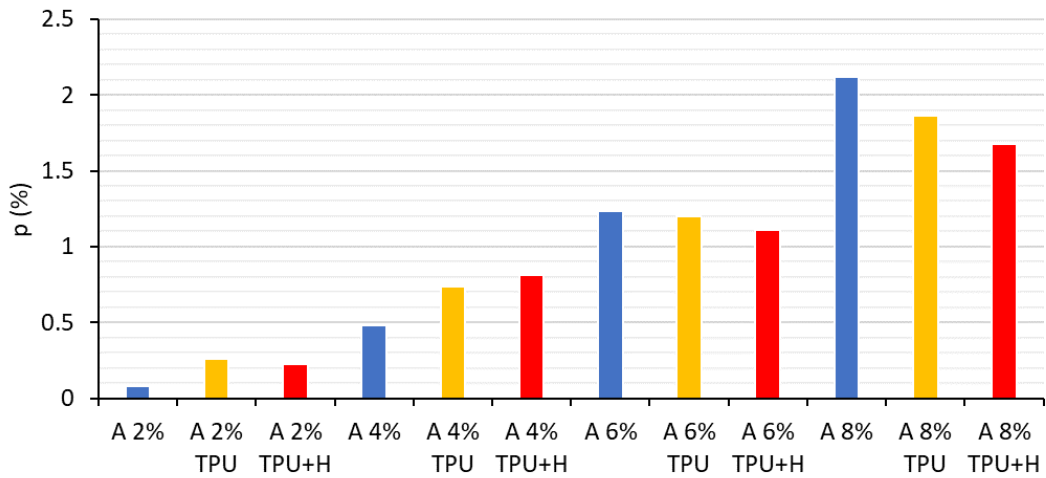
<sup>5</sup> Hodnota udává změny polohy dynamických čelistí univerzální testovací stroj. Nastavené hodnoty prodloužení textilií jsou přepočítávány z procent na mm, vzhledem ke klidové vzdálenosti čelistí 50 mm (1 % = 0,5 mm).

<sup>6</sup> Hodnota udává změny polohy statických čelistí univerzální testovací stroj, proto je vždy 0 mm.

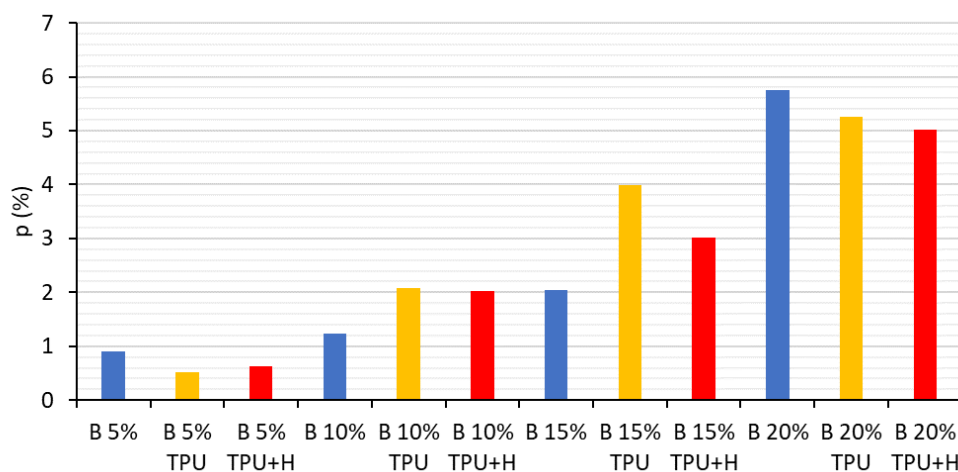
<sup>7</sup> Parametr udávající, jakou dobu zůstane univerzální testovací stroj v nastavené krajní poloze (Příčnick horní).



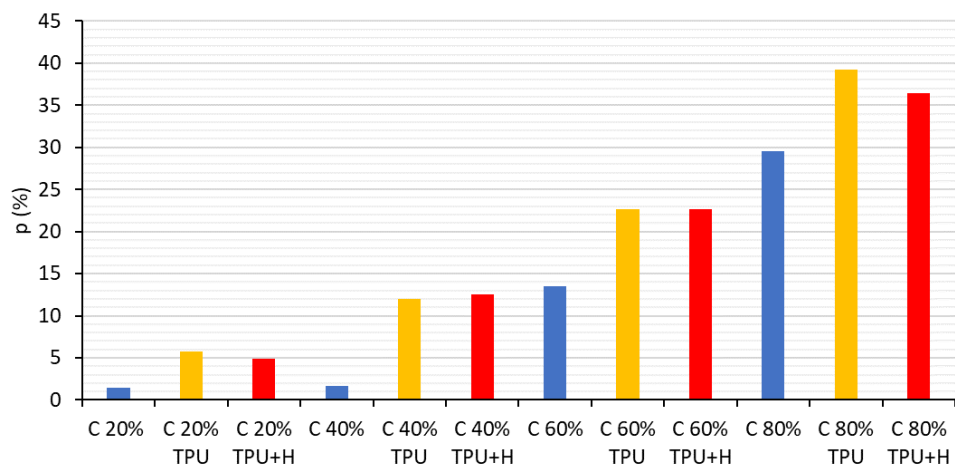
Obr. 33 Tahový diagram textilních vzorků s TPU, pro 1., 2. a 20. cyklus, při 6 % prodloužení textilie typu A (Twill, 100 % - bavlna).



Obr. 34 Velikost offsetů mezi 1. a 20. cyklem měřených vzorků, pro textilie typu A (Twill, 100 % - bavlna).



Obr. 35 Velikost offsetů mezi 1. a 20. cyklem měřených vzorků, pro textilie typu B (Twill, 95 % - bavlna, 5 % - elastan).



Obr. 36 Velikost offsetů mezi 1. a 20. cyklem měřených vzorků, pro textilie typu C (pletenina, 79 % - polyester, 17 % - viskóza, 4 % - elastan).

Získaný průběh tahového diagramu dokládá, zobrazený na Obr. 33, že se zvyšováním počtu cyklů, dochází k postupné deformaci vzorku, projevující se změnami v offsetu mezi hysterezními smyčkami jednotlivých cyklů. Tento jev je viditelný na Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36, na kterých je patrný postupný trend zvyšování vzájemného offsetu mezi 1. a 20. cyklem tahových diagramů pro rozdílné typy vzorků. Proto je potřeba v průběhu dalších testů na textiliích počítat s tímto chováním.

## 6.2 Testování vodivých drah

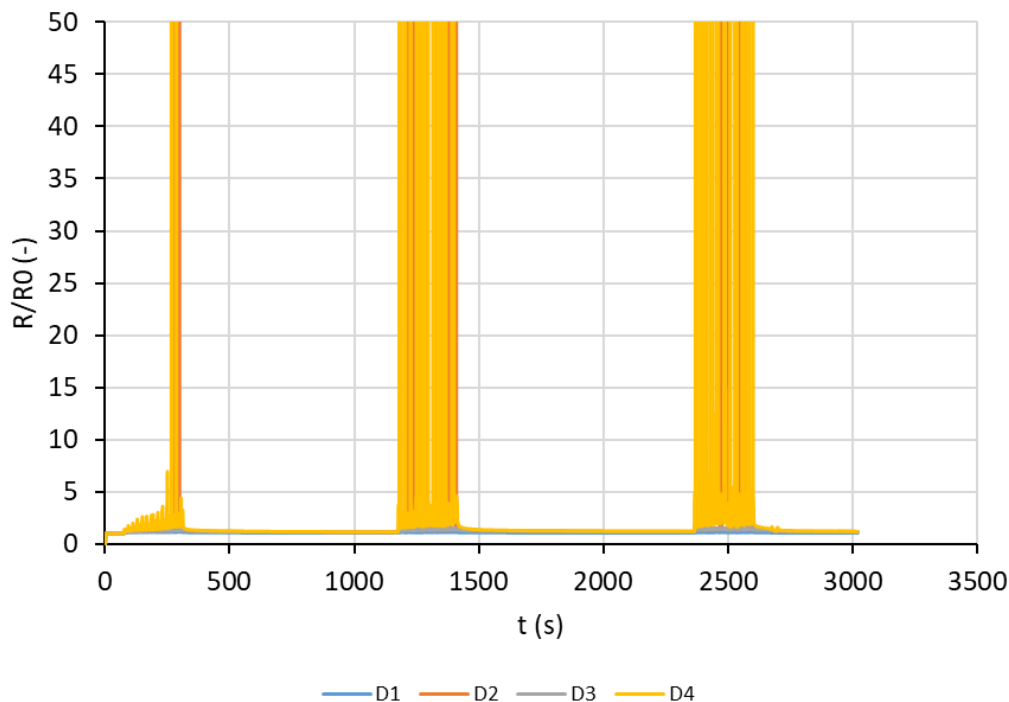
Po získání informací o chování vzorků bez osazených součástek, bylo potřeba otestovat mechanické a elektrické vlastnosti tiskových past, použitých při tisku motivů na substrát TPU. Pro lepší přehlednost této práce, je v ní uváděna jen část naměřených hodnot nebo získaných grafů. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách této práce.

### 6.2.1 Testování DuPont

Po tom, co byly získány informace o vlivu plastické deformace na textilní vzorky, bylo přistoupeno k testům na vzorcích s tištěnými motivy. Testy na vzorcích s tištěnými motivy měly zjistit, jak se mění elektrický odpor na vzorcích v závislosti na jejich cyklickém namáhání. Vzorky použité pro tyto zkoušky byly vyrobeny dle kapitoly 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsáném v kapitole 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 10. Před spuštěním samotné cyklické zkoušky na univerzálním testovacím stroji, byl zapnut multimetr Keithley 2701, který zaznamenával velikost elektrického odporu vodivých drah. Cyklická zkouška byla provedena vždy třikrát na stejném vzorku a mezi jednotlivými opakováními zkoušky byl ponechán vzorek relaxovat ( $\tau = 15$  minut). Naměřené hodnoty elektrického odporu, změřené pomocí multimetru Keithley 2701, byly následně zobrazeny ve formě grafu časové závislosti odporu níže.

Tabulka 10 Nastavené parametry univerzální testovací stroj Exceed Model E42, pro cyklické zkoušky pružnosti na tištěném motivu s vodivou pastou DuPont PE 874.

<b>Rychlost (<math>\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	2
<b>Počet cyklů (-)</b>	50
<b>Příčník horní (mm)</b>	hodnota prodloužení
<b>Příčník dolní (mm)</b>	0
<b>Rychlost ukládání dat (Hz)</b>	20
<b>Čas čekání (s)</b>	2



Obr. 37 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, při 1 % cyklickém namáhání vzorku A (Twill, 100 % - bavlna).

Z průběh časové závislosti odporu na obrázku je viditelné, že s opakováním zkoušek dochází k postupnému zvyšování odporu vodivých drah. Na vzorku s textilním nosičem typu A, na kterém byla provedena zkouška, došlo k selhání 2. (D2) a 4. (D4) dráhy. Některé další vzorky byly stabilní, ale u jiných docházelo k selhávání, a to už při 1 %. K selhávání docházelo, ač byly všechny vzorky realizovány za stejných podmínek. Vzorky byly tištěny v jeden den, ale z důvodu časové náročnosti probíhalo testování postupně v několika dnech. Jediným měnícím se kritériem pak byl čas mezi depozicí a testováním. Na základě těchto poznatků byla důkladně zkoumána degradace materiálu.

#### Testování vlivu stárnutí a laminace

Na základě závěru, ke kterému došly zkoušky v předešlé kapitole 6.2.1 Testování DuPont, bylo rozhodnuto o provedení cyklických zkoušek na vzorcích s tištěným motivem, po stárnutí pasty DuPont PE 874 a změnách parametrů laminace. Vzorky použité pro tyto zkoušky byly vyrobeny dle kapitoly 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah a jednalo se jak o vzorky realizované vytištěním tiskového motivu pouze na TPU substrát, tak o vzorky na textilním nosiči. Prováděním prvních testů na vzorcích bez textilního nosiče, byl zkoumán pouze vliv stárnutí na chování vodivé pasty, bez možného nežádoucího vlivu laminace. Vzorky s textilním nosičem byly zkoumány na vliv laminace. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje

Exceed Model E42, dle postupu popsaném v kapitole 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 11. Před spuštěním samotné cyklické zkoušky na univerzálním testovacím stroji, byl zapnut multimetr Keithley 2701, který zaznamenával velikost elektrického odporu vodivých drah. Cyklická zkouška byla provedena vždy třikrát na stejném vzorku, pro zvyšující se hodnotu prodloužení (1. zkouška – 1 %, 2. zkouška – 2 % a 3. zkouška – 4 %) a mezi jednotlivými zkouškami byl ponechán vzorek relaxovat ( $\tau \approx 10$  minut). Průběh testování na jednotlivých vzorcích je zobrazen níže v Tabulka 12.

Tabulka 11 Nastavené parametry univerzální testovací stroj Exceed Model E42, pro cyklické zkoušky pružnosti, při vlivu stárnutí a laminace, na tištěném motivu s vodivou pastou DuPont PE 874.

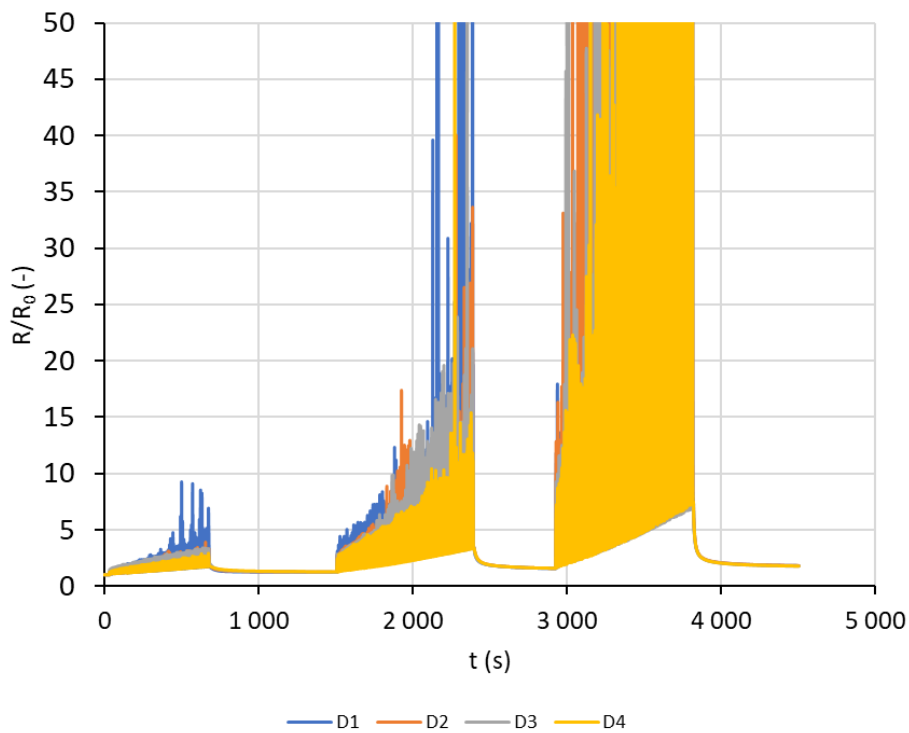
<b>Rychlost (<math>\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	2
<b>Počet cyklů (-)</b>	100
<b>Příčnick horní (mm)</b>	hodnota prodloužení
<b>Příčnick dolní (mm)</b>	0
<b>Rychlost ukládání dat (Hz)</b>	20
<b>Čas čekání (s)</b>	2

Tabulka 12 Souhrn cyklicky testovaných vzorků s tištěnými motivy vodivou pastou DuPont PE 874, při vlivu laminace a stárnutí.

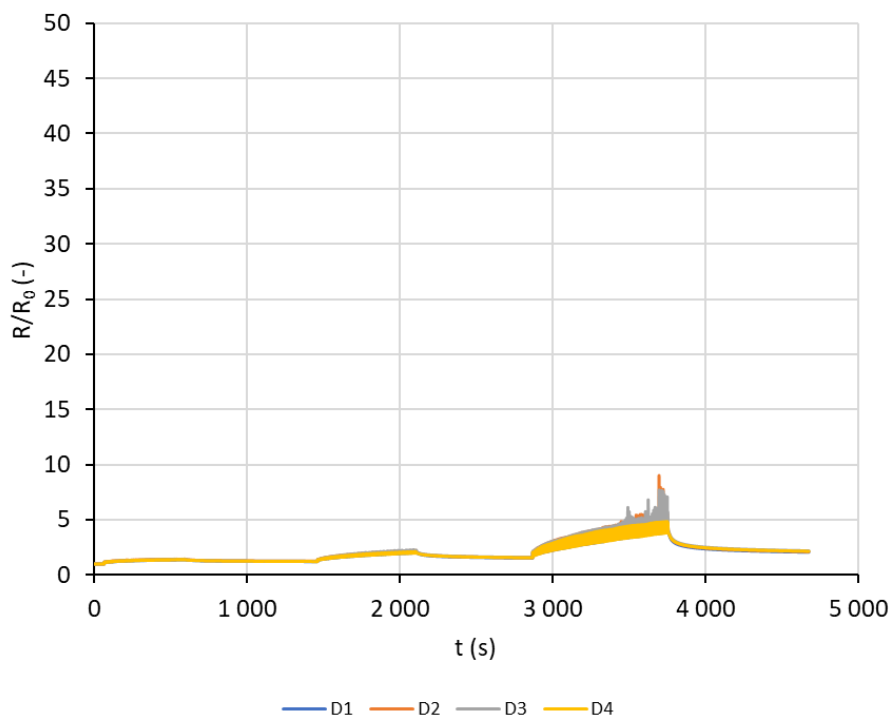
Označení	Popis	Depozice	Testování	Laminace	Doba stárnutí	Výsledek
PE1	PE 874 0,5 mm, TPU	22.3. 8:00	27.3. 16:00	-	5 dnů	selhal
PE2	PE 874 0,5 mm, TPU	28.3. 8:00	28.3. 13:00	-	7 hodin	spolehlivý
PE3	PE 874 0,5 mm, TPU/TWILL	31.3. 7:00	31.3. 14:30	120 °C / 30 s <sup>8</sup>	7 hodin	spolehlivý
PE4	PE 874 0,5 mm, TPU/TWILL	31.3. 7:30	31.3. 16:00	150 °C / 90 s <sup>9</sup>	8 hodin	selhal

<sup>8</sup> Nejnižší možná teplota ( $t = 120$  °C) a nejkratší čas ( $\tau = 30$  s) laminace.

<sup>9</sup> Nejvyšší možná teplota ( $t = 150$  °C) a nedelší čas ( $\tau = 90$  s) laminace.



Obr. 38 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: PE1, pasta: PE 874, stárnutí: 5 dnů, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.



Obr. 39 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: PE3, pasta: PE 874, stárnutí: 7 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.



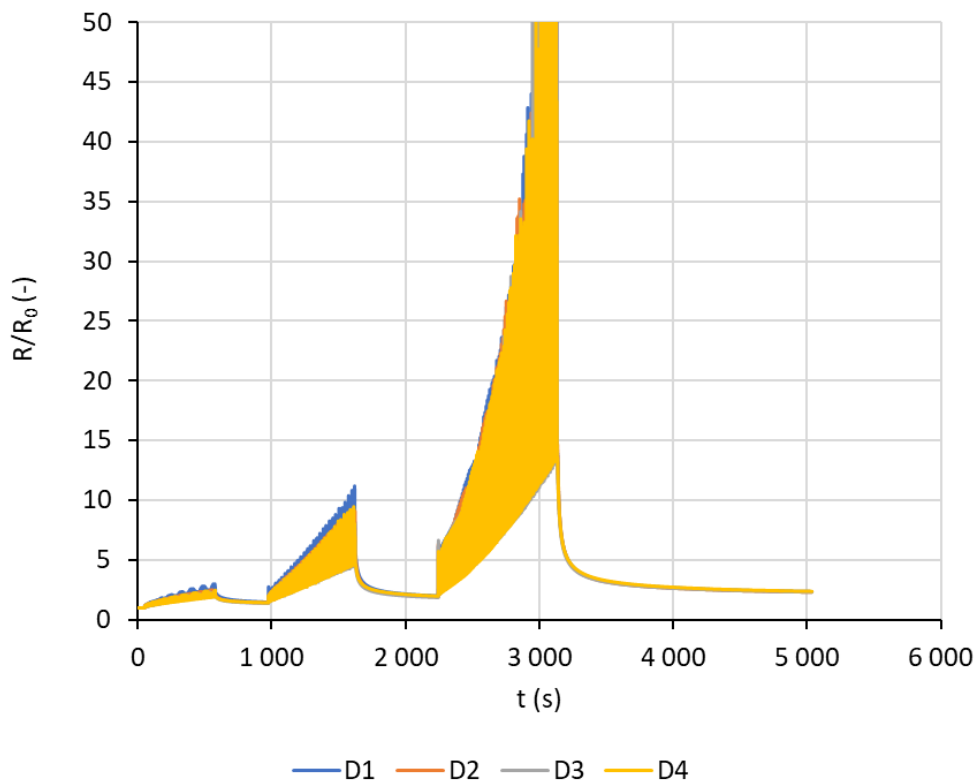
Z výsledků testování na jednotlivých vzorcích je patrné, že u vzorku PE1, který nebyl laminován a byl ponechán stárnout 5 dnů, u tohoto vzorku došlo k selhání vodivých drah, viz Obr. 38. Naopak vodivé dráhy vzorku PE2 a PE3, které byly testovány v řádu hodin po jejich depozici, tak tyto dráhy odolaly namáhání v průběhu cyklických testů. Vodivá pasta DuPont PE 874 podléhá vlivu stárnutí, které způsobuje její selhání, kvůli kterému bylo potřeba použít pro další testy pastu, která bude mít lepší vlastnosti.

### 6.2.2 Testování SIP 2005

Jako možná náhrada, nevyhovující pasty DuPont PE 874, byla zvolena pasta Dycotec SIP 2005PU. Vzorky vtištěné touto pastou byly podrobeny cyklickým zkouškám, po změnách parametrů laminace a stárnutí vzorku. Cílem testů bylo odhalit, zda je vodivá pasta odolná vůči těmto změnám. Vzorky použité pro tyto zkoušky byly vyrobeny dle kapitoly 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah a jednalo se jak o vzorky realizované vtištěním tiskového motivu pouze na TPU substrát, tak o vzorky na textilním nosiči. Prováděním prvních testů na vzorcích bez textilního nosiče, byl zkoumán pouze vliv stárnutí na chování vodivé pasty, bez možného nežádoucího vlivu laminace. Vzorky s textilním nosičem byly zkoumány na vliv laminace. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsaném v kapitole 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 11. Před spuštěním samotné cyklické zkoušky na univerzálním testovacím stroji, byl zapnut multimetr Keithley 2701, který zaznamenával velikost elektrického odporu vodivých drah. Cyklická zkouška byla provedena vždy třikrát na stejném vzorku, pro zvyšující se hodnotu prodloužení (1. zkouška – 1 %, 2. zkouška – 2 % a 3. zkouška – 4 %) a mezi jednotlivými zkouškami byl ponechán vzorek relaxovat ( $\tau \approx 10$  minut). Průběh testování na vzorcích je zobrazen níže v Tabulka 13.

Tabulka 13 Souhrn cyklicky testovaných vzorků s tištěnými motivy vodivou pastou Dycotec SIP 2005PU, při vlivu laminace a stárnutí.

Označení	Popis	Depozice	Testování	Laminace	Doba stárnutí	Výsledek
SIP1	SIP2005 0,4 mm, TPU	27.3. 8:30	27.3. 20:30	-	15 hodin	spolehlivý
SIP2	SIP2005 0,4 mm TPU/TWILL	31.3. 8:00	31.3. 19:30	150 °C / 90 s	12 hodin	spolehlivý
SIP3	SIP2005 0,4 mm, TPU/TWILL	31.3. 18:00	5.4. 11:00	120 °C / 30 s	5 dnů	spolehlivý



Obr. 40 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: SIP6, pasta: SIP 2005PU, stárnutí: 5 dnů, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.

Z Tabulka 13 je možné zjistit, že vodivé dráhy na všech námi testovaných vzorcích s tištěným motivem, ať už se jednalo o vzorky, které stárly (hodiny až dny) nebo byly laminovány, odolaly působícímu mechanickému namáhání v průběhu testů. V průběhu testů bylo možné pozorovat, že se zvyšujícím se prodloužením vzorků docházelo k zvyšování elektrického odporu vodivých drah, pro 4 % prodloužení až k padesátinásobnému, jak je vidět na Obr. 40. Po ukončení mechanického namáhání vzorku, začala hodnota elektrického odporu klesat k hodnotě odporu, před začátkem namáhání. Kvůli zjištěné odolnosti vodivých drah vzorků vůči stárnutí bylo rozhodnuto, že pro další testy budou tištěné motivy vzorků realizovány pomocí vodivé pasty SIP 2005PU.

Mimo rozhodnutí o použití vodivé pasty SIP 2005PU, pro realizaci vzorků k testování montáže součástek, bylo rozhodnuto o použití textilie A (Twill, 100 % - bavlna) jako textilního nosiče. Důvody pro výběr tohoto typu textilie byla dva. Prvním důvodem bylo, že čistá textilie A a textilie A s na laminovaném substrátu TPU, má stejný průběh tahového diagramu, viz Obr. 30. Stejný průběh tahového diagramu znamená, že substrát TPU neovlivňuje tuhost textilie, jako je tomu u jiných typů textilií zkoušených v této práci. Druhým důvodem pro použití textilie bylo, že z důvodu zvyšování elektrického odporu

vodivé pasty SIP 2005PU, nebude docházet k více jak 4 % prodloužení textilie, pro tyto hodnoty prodloužení textilie A postačuje.

### **6.3 Testování montáže**

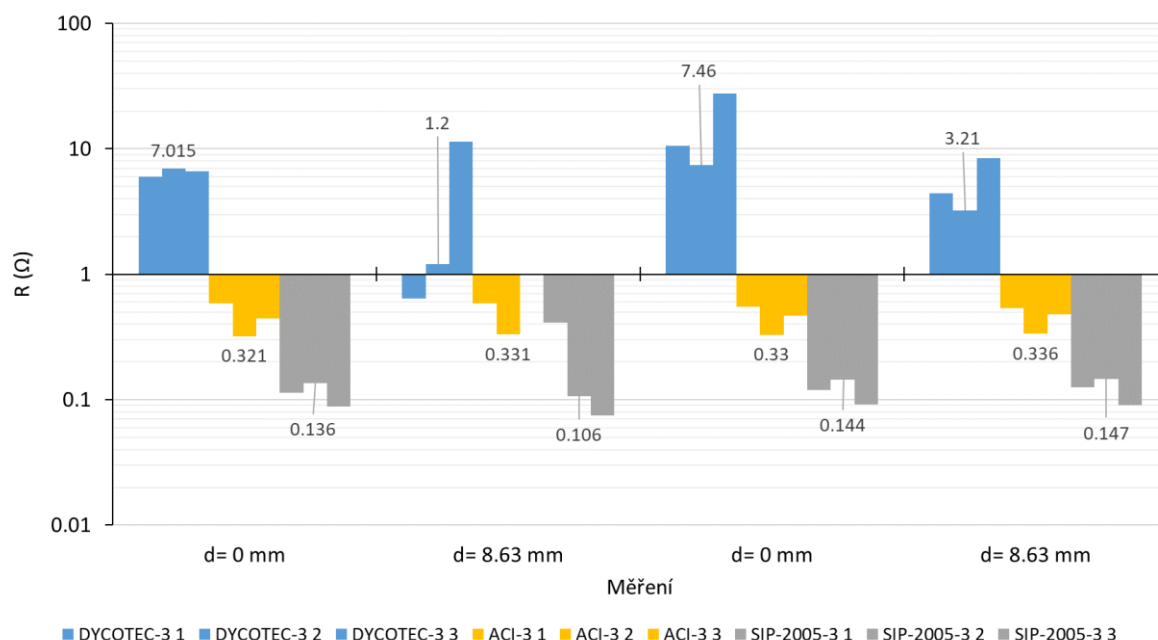
Testy níže měly zjistit, jaký vliv má montáž komponent na mechanické chování tištěných vzorků, a jaký je jejich elektrický odpor, v případě mechanického namáhání. Pro lepší přehlednost této práce, v ní je uváděna jen část naměřených hodnot nebo získaných grafů, tak jako v předešlé kapitole 6.1 Analýza chování substrátu. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách této práce.

#### **6.3.1 Testy v ohybu**

Testy v ohybu podávaly informaci o tom, jakých velikostí kontaktního odporu vzorků je dosaženo, při použití jednotlivých typů kontaktních médií v ohnutém a v narovnaném stavu vzorku. Pro účely těchto typů zkoušek byly vyrobeny vzorky dle kapitoly 5.4.2 Motivy pro testování montáže součástek a konkrétně se jednalo o motivy pro testy v ohybu. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly umístěny na plechovou podložku a při jejich upínání se postupovalo dle kapitoly 5.6.3 Upnutí motivů pro testování v ohybu. Na multimetru Keithley 7510 bylo následně nastaveno měření elektrického odporu pomocí čtyřvodičového zapojení a připojením multimetru na měřící svorky byl měřen kontaktní odpor. Konkrétní hodnoty odporů kontaktů, dle použitých kontaktních médií jsou uvedeny v Tabulka 14 a grafech níže.

Tabulka 14 Hodnoty naměřených elektrických kontaktních odporů na vzorcích testovaných v ohybu.

Kontaktní médium	Vzorek	ORO	První měření		Druhé měření	
			R ( $\Omega$ ) (d <sup>10</sup> = 0 mm)	R ( $\Omega$ ) (d= 8.63 mm)	R ( $\Omega$ ) (d= 0 mm)	R ( $\Omega$ ) (d= 8.63 mm)
DYCOTEC SAS-10010	DYCOTEC-3	1	6	0,64	10,6	4,44
		2	7,015	1,2	7,46	3,21
		3	6,6	11,38	27,7	8,38
ACI FE-1101	ACI-3	1	0,586	0,59	0,549	0,538
		2	0,321	0,331	0,33	0,336
		3	0,443	1	0,47	0,477
SIP 2005PU	SIP-2005-3	1	0,113	0,414	0,12	0,126
		2	0,136	0,106	0,144	0,147
		3	0,088	0,075	0,092	0,091



Obr. 41 Měření velikosti kontaktních odporů v ohybu.

Provedenými testy v ohybu bylo zjištěno, že při opakovaném ohnutí vzorků a jejich narovnání mají největší kontaktní odpor vzorky s izotropně vodivým lepidlem Dycotec SAS-10010. Kontaktní odpor Dycotec SAS-10010 se pohybuje řádově v jednotkách ohmů ve srovnání s izotropně vodivým lepidlem ACI FE-1101 nebo tiskovou pastou SIP 2005PU u kterých se velikost kontaktního odporu pohybuje v řádu stovek miliohmů. Při opakování

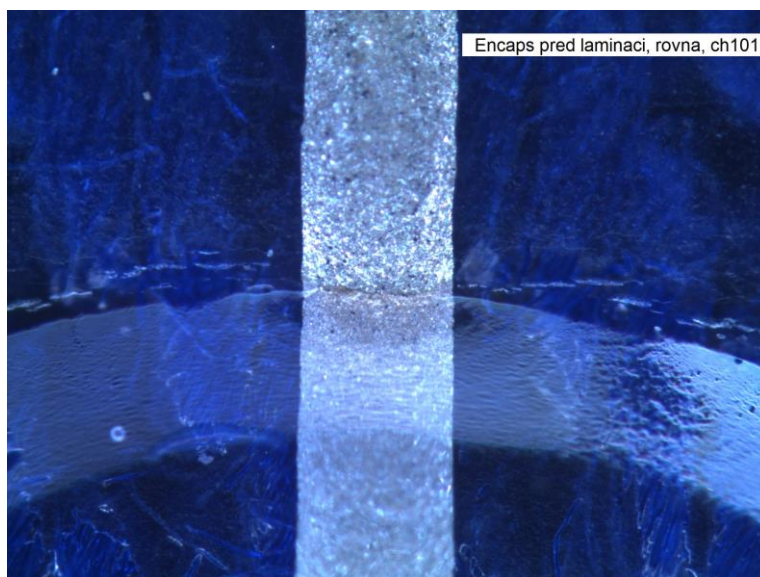
<sup>10</sup> Veličina d (mm) představuje průměr ohybu, pokud je vzorek ohnut, tak d= 8,63 mm (výška feromagnetického profilu).

ohybu vzorků, došlo k zvětšení kontaktního odporu Dycotec SAS-10010, viz Obr. 41. Z důvodů výrazně vyššího odporu lepidla Dycotec SAS-10010, oproti ostatním kontaktním médiím, bylo rozhodnuto o vyřazení tohoto typu lepidla z dalších měření.

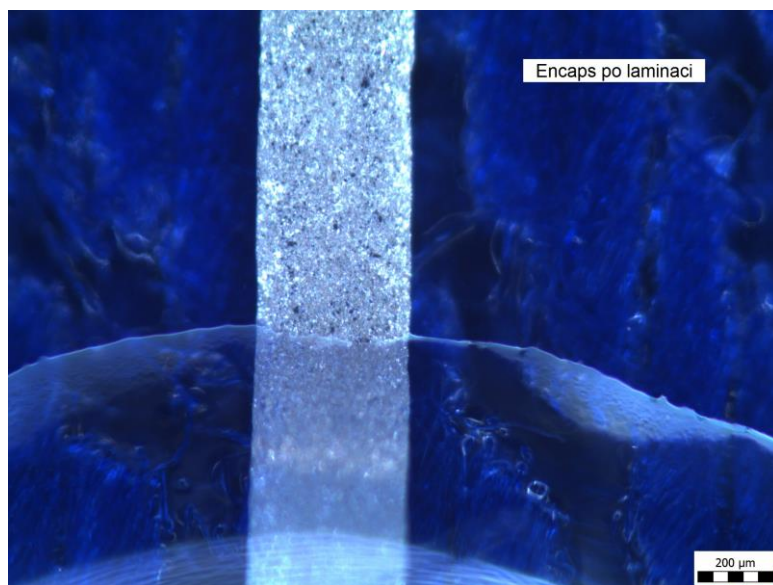
### 6.3.2 Tahové testy

#### Vliv enkapsulace na vlastnosti vodivé dráhy

Před samotným testováním montáže, bylo potřeba zjistit, jaký vliv má nanesený enkapsulant na mechanické chování vzorků 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah. Bylo předpokládáno, že k největšímu mechanickému napětí bude docházet na přechodu enkapsulant-vodivá dráha. Výroba vzorků použitých pro tyto zkoušky a nanesení enkapsulantu se řídilo dle kapitoly 5.4.1 Motivy pro testování pružnosti vodivých drah. Samotná zkouška probíhala tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsáném v kapitole 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti. Na univerzálním testovacím stroji byl následně nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 11. Cyklická zkouška byla provedena vždy třikrát na stejném vzorku, pro zvyšující se hodnotu prodloužení (1. zkouška – 1 %, 2. zkouška – 2 % a 3. zkouška – 4 %), mezi jednotlivými zkouškami byl vzorek ponechán relaxovat ( $\tau \approx 15$  minut). Mechanické chování, ke kterému dochází na přechodu enkapsulant-vodivá dráha, je zobrazeno na obrázcích níže.



Obr. 42 Nelaminovaný enkapsulant, enkapsulant: LOCTITE EDAG PF021, 1. dráha.



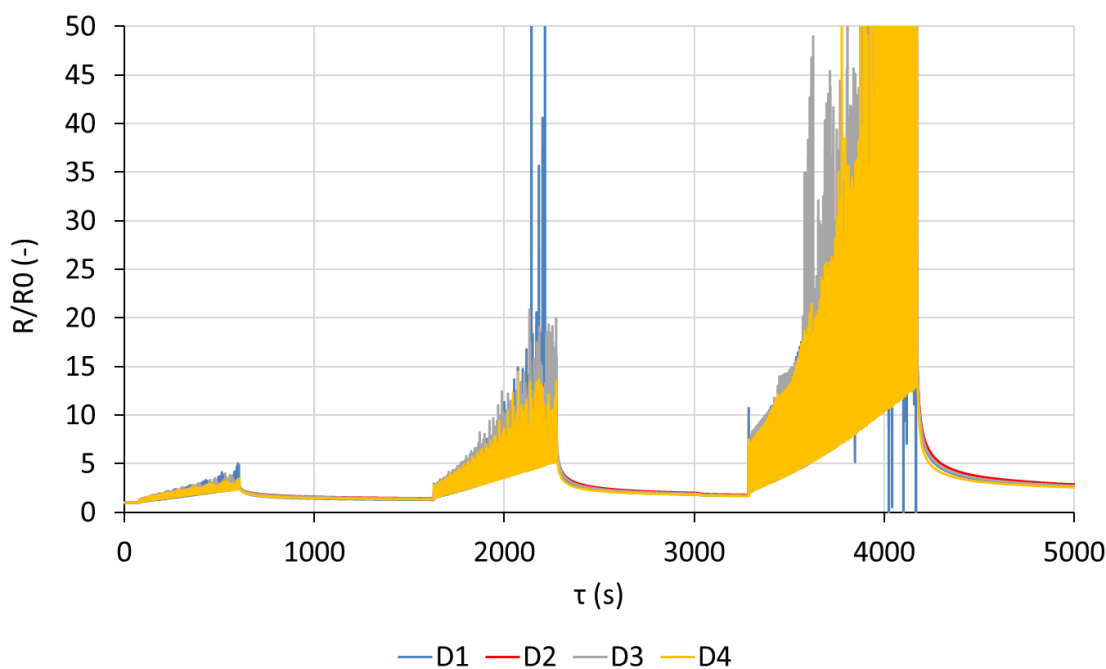
Obr. 43 Laminovaný enkapsulant, enkapsulant: LOCTITE EDAG PF021.

Z pořízených obrázků, na vzorcích testovaných s nelaminovaným enkapsulantem a vzorcích s laminovaným enkapsulantem, bylo patrné, že u nelaminovaných enkapsulantů, dochází na přechodu enkapsulant-vodivá dráha k mírnému snížení tloušťky enkapsulantu a šířky vodivé dráhy. Tento jev je viditelný na Obr. 42 a je způsoben vnitřními silami enkapsulantu, působícími ve formě mechanického napětí na přechodu enkapsulant-vodivá dráha, při změně jeho vnitřní struktury vytvrzením. Laminace enkapsulantu pak způsobí, že vlivem tlaku při laminaci dojde k zatlačení enkapsulantu to textilie a vodivé dráhy. Zatlačení enkapsulantu pak způsobí snížení mechanického napětí na přechodu enkapsulant-vodivá dráha, zobrazeno na Obr. 43. Změny mechanického napětí na přechodu enkapsulant-vodivá dráha, před a po laminaci, nezpůsobují degradaci vodivé dráhy.

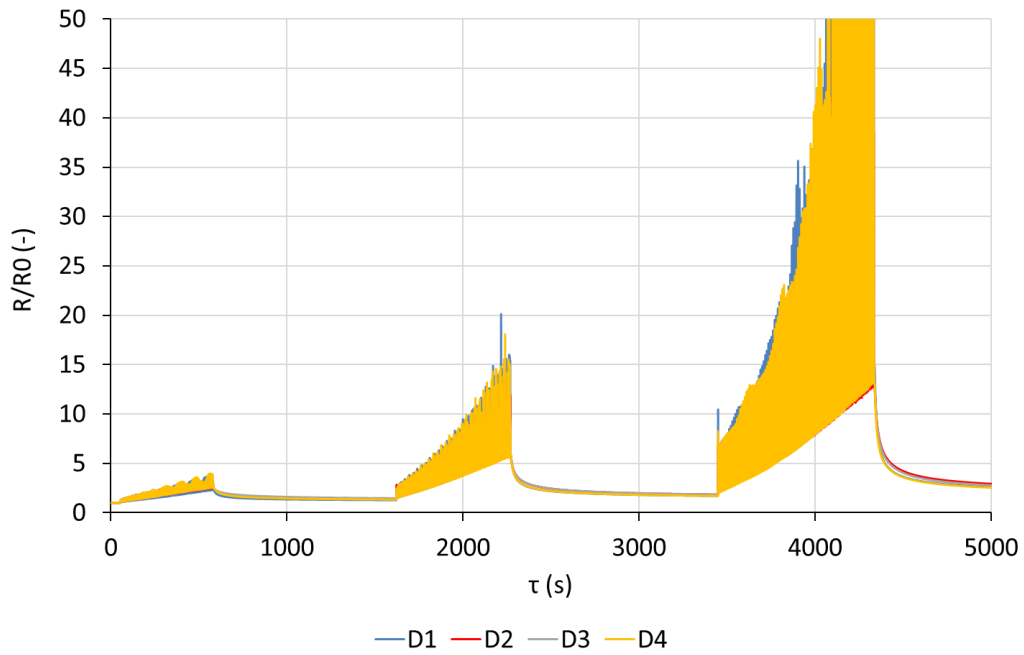
### Testy montáže

Závěrečné testy, které měly za cíl porovnat jednotlivé typy montáže, z pohledu změn jejich mechanického a elektrického chování během testů cyklické pružnosti a testů pružnosti za podmínek konstantního prodloužení. Výroba vzorků použitých pro tyto testy, montáž součástek a jejich enkapsulace se řídila dle kapitoly 5.4.2 Motivy pro testování montáže součástek, konkrétně se jednalo o motivy pro tahové testy. Samotné zkoušky probíhaly tak, že měřené vzorky byly upnuty do čelistí univerzálního testovacího stroje Exceed Model E42, dle postupu popsaného v kapitole 5.6.2 Upnutí motivů pro testování pružnosti. Na vzorcích byly nejdříve provedeny testy cyklické pružnosti, před kterými byl na univerzálním testovacím stroji nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 11. Cyklická zkouška

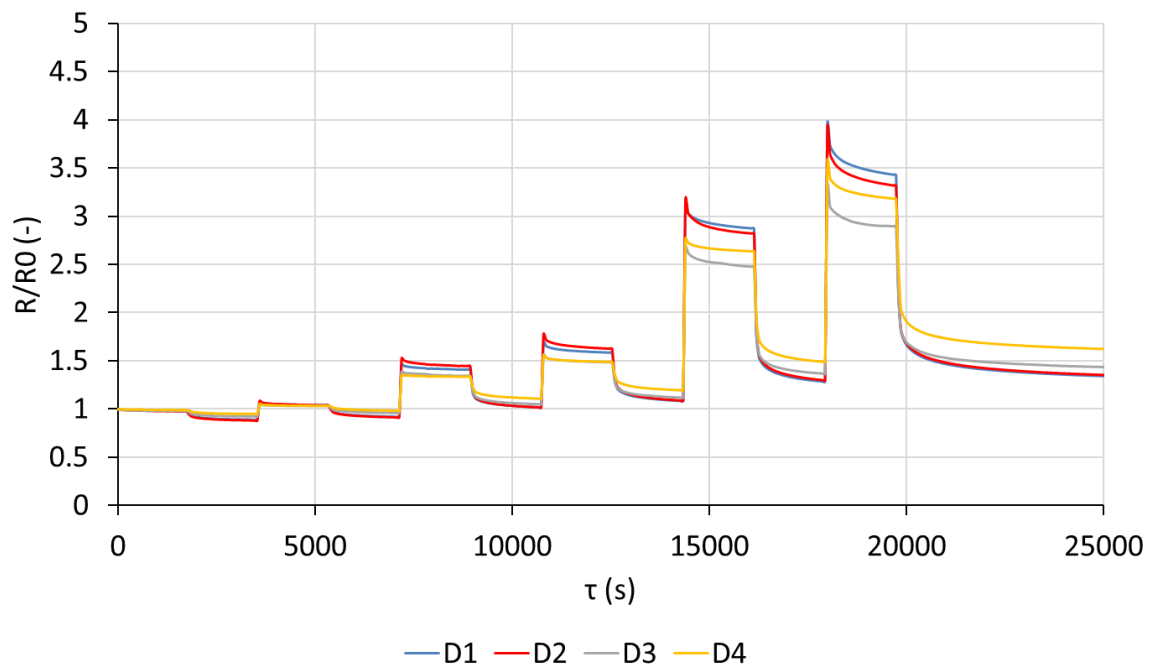
byla provedena vždy třikrát na stejném vzorku, pro zvyšující se hodnotu prodloužení (1. zkouška – 1 %, 2. zkouška – 2 % a 3. zkouška – 4 %), mezi jednotlivými zkouškami byl vzorek ponechán relaxovat ( $\tau \approx 15$  minut). Před spuštěním samotných testů na univerzálním testovacím stroji, byl zapnut multimetr Keithley 2701, který zaznamenával velikost elektrického odporu vodivých drah. Měření elektrického odporu probíhalo v průběhu odbou typů zkoušek. Následně došlo na nové sérii vzorků k provedení testů pružnosti za podmínek konstantního prodloužení, před kterými byl na univerzálním testovacím stroji nastaven průběh testů a jeho parametry, viz Tabulka 11. Testy provedené na jednom a tom samém vzorku, byly provedeny pro tři zvyšující se hodnoty prodloužení vzorku (1 %, 2 % a 4 %). Pro každou hodnotu prodloužení byl test pružnosti opakován dvakrát po sobě a mezi jednotlivými testy byl vzorek ponechán relaxovat ( $\tau \approx 30$  minut). Průběhy testování na vzorcích s rozdílným typem montáže jsou zobrazeny pomocí grafů níže.



Obr. 44 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: 230420 ENCAP\_TEST\_AP3\_ACI\_1, 2, 4, kontaktní médium: ACI FE-1101, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.

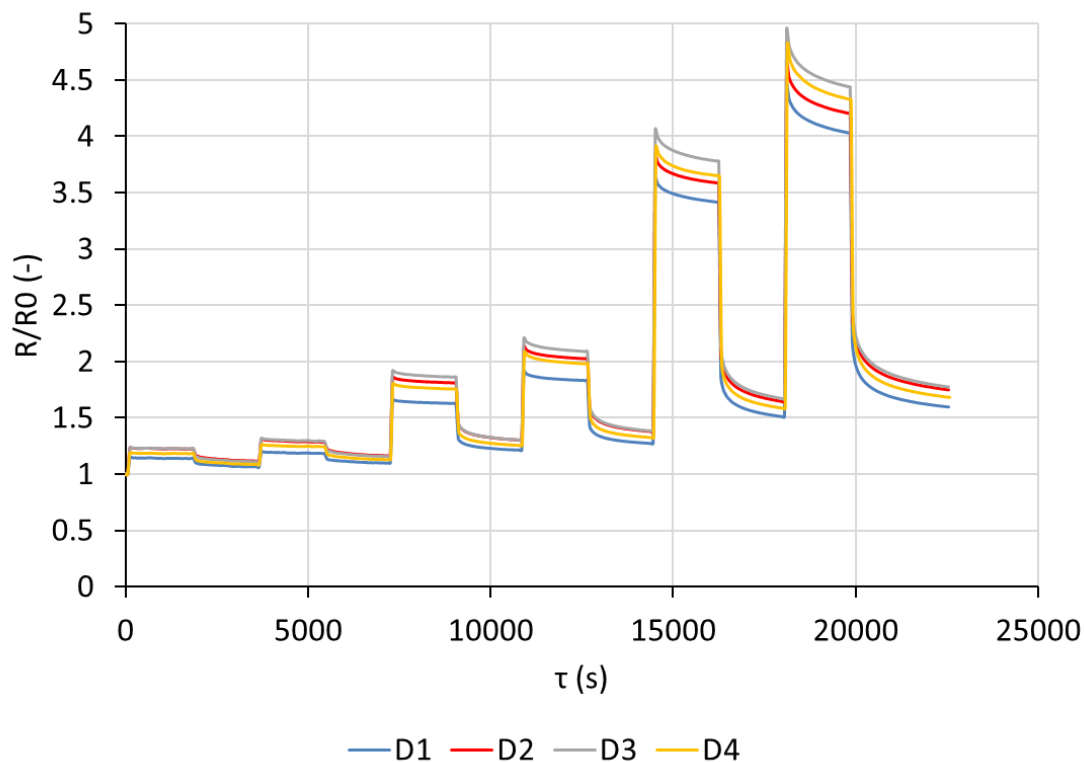


Obr. 45 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: 230420 ENCAP\_TEST\_AP4\_SIP\_1, 2, 4, kontaktní médium: SIP 2005PU, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.



Obr. 46 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: 230424 ACI\_CIRC\_1, kontaktní médium: ACI FE-1101, test pružnosti za podmínek konstantního prodloužení pro 1, 2 a 4 %.





Obr. 47 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: 230424 SIP\_CIRC\_1, kontaktní médium: SIP 2005PU, test pružnosti za podmínek konstantního prodloužení 1, 2 a 4 %.

Ze získaných časových závislostí elektrického odporu vzorků, lišící se typem kontaktního média, bylo zjištěno, že z porovnávaných kontaktních médií vykazuje nejmenší nárůst elektrického odporu tisková pasta SIP 2005PU. Tento rozdíl ve velikosti elektrického odporu mezi izotropně vodivým lepidlem ACI FE-1101 a tiskovou pastou SIP 2005PU je možné pozorovat, jak na časových závislostech odporu pro zkoušku cyklické pružnosti, viz Obr. 44 a Obr. 45, tak pro testy pružnosti při konstantní hodnotě prodloužení, viz Obr. 46 a Obr. 47. Lepší výsledky SIP 2005PU mohou být způsobeny tím, že se jedná o montáž do nevytvrzené pasty, stejná pasta jako použitá pasta pro tisk motivu, a proto mezi nimi dochází k dobrému slinování a nízkému odporu.

## 7 Kritické zhodnocení testování

Úkolem této kapitoly je, na základě stanovených cílů, vytvoření a optimalizace metodiky testování provedeného v této práci a zhodnotit výsledky jím získané, s teoretickými předpoklady. Kapitola zároveň uvádí další možné rozšíření testování, pro získání nejkompaktnější představy o chování materiálů. Na závěr se kapitola věnuje predikci možného budoucího vývoje v oblasti elastické elektroniky.

### 7.1 Metodika praktické části práce

Níže popsaná metodika odhaluje obecný postup v průběhu praktické části této práce, při plnění dílčích cílů, pro možnost budoucího replikování testů. V průběhu všech praktických částí práce se primárně řídily formulovanými požadavky zadání diplomové práce a normou IPC-9204.

#### 7.1.1 Návrh testovací platformy

Před návrhem je nutné vyhledat konkrétní normy, kterými se bude budoucí návrh řídit (v této práci norma IPC-9204), případně další odporné práce zabývající se podobným tématem, pro získání informací o řešení návrhu. Dále je nutné zhodnotit, jaké materiály a vybavení je reálně dostupné (v konkrétních laboratořích, komerčně na trhu), při zahrnutí nákladů na pořízení a složitosti použití.

Po uvážení všech výše zmíněných vlivů je přistoupeno k samotnému návrhu testovací platformy, pro který je možné použít programy pro technické kreslení (v této práci programy Solidworks nebo AutoCAD). Návrh testovací platformy lze rozdělit na návrh přípravku určeného k testování vzorků a návrh testovacích vzorků.

Testovací přípravek je vytvářen pro uchycení do čelistí testovacího stroje (v této práci pro univerzální testovací stroj Exceed Model E42) a jeho rozměry jsou dány buď testovacím strojem nebo jsou vhodně zvoleny. Při návrhu je nutné zohlednit, že při použití přípravku nejsou měřeny pouze tahové testy, ale je nutné měřit i elektrický odpor budoucího tištěného motivu vzorků. Z tohoto důvodu jsou do návrhu zakomponovány měřicí kontakty, pro připojení multimetru měřícího elektrický odpor, pomocí čtyřvodičového Kelvinova zapojení. Návrh částí přípravku je pak prováděn jako 3D model v prostředí programu pro technické kreslení.

Po návrhu přípravku je přistoupeno k návrhu geometrie testovacích vzorků, se stanovenými rozměry testovacího přípravku, do kterého mají být testovací vzorky upnuty. Při návrhu

geometrie vzorků je potřeba zohlednit, nejen rozměry přípravku, ale také co konkrétně chceme na vzorku testovat a podle toho vytvořit konkrétní motivy (motivy pro testování pružnosti vodivých drah, motivy pro testování montáže součástek). Speciálním případem jsou motivy pro ohybové testování, které nejsou určeny pro upnutí do testovacího přípravku. Navržená geometrie vzorků je ve formě čar reprezentující střední osu pohybu tiskové jehly, tisknoucí vodivé dráhy. Konkrétní návrh je uvedena v kapitole 5.5 Realizace testovacího přípravku nebo 5.4 Realizace vzorků s tiskovými motivy.

### 7.1.2 Realizace testovací platformy

Realizaci testovací platformy je, stejně jako v kapitole 7.1.1 Návrh testovací platformy, opět možné rozdělit do dvou částí, na realizaci testovacího přípravku a realizaci testovacích vzorků. Před samotnou realizací je potřeba si připravit materiál a vybavení, případně je externě objednat.

Následuje realizace testovacího přípravku, kdy jsou jeho jednotlivé části vyráběny (plastové díly tištěny 3D tiskárnou Prusa MK3S+, řezání hliníkových profilů, DPS s měřicími kontakty atd.). Z jednotlivých částí je pak sestaven celý přípravek (čelisti, fixační rám). V další části je přistoupeno k realizaci tištěných motivů testovacích vzorků, která probíhá nejdříve pomocí tisku vodivého motivu na elastický substrát a jeho vytvrzení. Následně je substrát s motivem na laminován na textilie a případně dále upraven dle potřeb testů. Výjimkou jsou textilní vzorky pro úvodní testy, u kterých nedochází k tisku motivu na elastický substrát.

### 7.1.3 Měření testovacích vzorků

Před měřením byl testovací vzorek upnut do čelistí testovacího přípravku. V této části metodiky je nutné zdůraznit, že pro správné měření vzorků je důležité jeho rovnoměrné propnutí, při upínání do testovacího přípravku.

Nedostatkem při upínání vzorků do přípravku v této práci, bylo špatné dosažení jejich rovnoměrného propnutí. Problém s rovnoměrným propnutím, byl v této práci řešen tím, že byl vytvořen fixační rám, který vůči sobě udržoval čelisti rovnoběžně ve stejné vzdálenosti. Zajištění stejného propnutí každého vzorku však bylo příliš komplikované. Možným zjednodušením by mohlo být propnutí volného konce za pomoci závaží, které na něj bude upnuto a následně upnutí do čelistí.

Po upnutí vzorků do přípravku, je přípravek uchycen do čelistí testovacího stroje a odstraněn fixační rám. Na testovacím stroji byl následně nastaven průběh a parametry tahových testů a test byl spuštěn. Před spuštěním tahových testů na univerzálním testovacím stroji je potřeba zapnout multimetr, který zaznamenává velikost elektrického odporu vodivých drah.

### 7.2 Zhodnocení měření

#### 7.2.1 Substráty

Jako úvodní testy, byly provedeny testy na textilních vzorcích (čistá textilie, textilie s TPU substrátem, tepelně zatížená textilie s TPU substrátem), které měli za cíl zjistit, do jakých hodnot prodloužení je možné testovat nosný substrát, aby nedocházelo k plastickým deformacím substrátu. Z testů bylo zjištěno, že pro každý typ textilního vzorku dochází k deformaci už při hodnotě 1 % prodloužení vzorku, která se zvyšuje s procentuální hodnotou prodloužení. Dále bylo zjištěno, že velikost plastické deformace se zvyšuje v závislosti na pružnosti typu nosné textilie, z které je textilní vzorek vyroben. Důvodem zvyšování plastické deformace je postupné rozvolnění vazby mezi jednotlivými vlákny textilie, které se zvyšuje s prodloužením vzorku.

#### 7.2.2 Vodivé dráhy

Testováním vzorků s tiskovými motivy mělo za účel, získat informace o odolnosti jednotlivých tiskových past (DuPont PE 874 a Dycotec SIP 2005PU) použitých pro tisk vodivých drah. Při těchto testech bylo zjištěno, že vodivé dráhy vytvořené použitím obou dvou typů tiskových past jsou schopné odolat prodloužení až do hodnot 8 %. Mimo toho však bylo zjištěno, že na odolnost tiskové pasty DuPont PE 874 má výrazně negativní vliv stárnutí, kdy při stárnutí v řádu dnů dochází k selhání jí vytvořených drah vzorků už při 1 % prodloužení. Zjištění horších vlastností chování tiskové pasty DuPont, v porovnání s pastou Dycotec SIP 2005PU, bylo překvapující, protože právě u pasty DuPont výrobce garantoval použitelnost tiskové pasty pro elastickou elektroniku. Důvod tohoto rozporu mezi výrobcem garantovaným použitím a skutečným chováním pasty může být způsobeno, nízkou praktickou odzkoušeností past a tím pádem i nízkým množstvím dat o jejich chování.

### 7.2.3 Montáž

Závěrečné testy se zaměřily na hlavní cíl této práce, kterým bylo zhodnocení použitelnosti jednotlivých typů montážních technologií SMD komponent (izotropně vodivá lepidla - SAS-10010 a ACI FE-1101, tisková pasta - SIP 2005PU). Provedenými testy bylo pro účely montáže vyloučeno izotropně vodivé lepidlo Dycotec SAS-10010, kvůli vysokým hodnotám elektrického odporu v řádu jednotek ohmů. Dalšími testy na zbylých dvou kontaktních médiích bylo zjištěno, že nejmenší elektrický odpor v závislosti na velikosti na mechanického namáhání vykazuje montáž do nevytvrzeného tiskového motivu SIP 2005PU. Tento výsledek je připisován tomu, že nanesením a vytvrzením tiskové pasty na kontaktních ploškách, vyrobených ze stejné tiskové pasty, dojde k lepšímu slnutí obou past, než po nanesení rozdílných typů kontaktních médií. Lepším slnutím materiálů je dosaženo menšího přechodového odporu a vyšší pevnosti vzniklého spoje.

## Zhodnocení a závěr

Úvodní teoretická část této práce byla věnována obecnému přehledu o konstrukčním provedení elastických plošných spojů. Popis konstrukce byl zaměřen na různé typy strukturálních a materiálních konfigurací, s jejich možnou realizací pomocí tiskových postupů. V další části byly popsány typy montážních technologií pro osazení SMD komponent na elastické plošné spoje, v závislosti na míře jejich použití. Na závěr samotné teoretické části práce byly uvedeny možnosti testování klíčových parametrů charakterizující kvalitu SMT montáže na tištěných elastických plošných spojích.

Před měřením v praktické části, byl podrobně rozebrán návrh a následná realizace všech vzorků testovaných v této práci, s návrhem a realizací testovacího přípravku. Byly zdůrazněny složení a námi zvolené rozměry, které byly z pohledu následujícího měření klíčové. Dále byl vysvětlen i postup upnutí a příprava vzorků před měřením.

Výsledky prvních tahových testů provedených na textilních vzorcích odhalily, že na vzorky působí plastická deformace už při 1 % prodloužení a s jeho zvyšováním narůstá. Kvůli omezení vlivu plastické deformace byly vzorky namáhány pouze do 4 % hodnoty prodloužení. Zvyšování plastické deformace je způsobeno postupným rozvolněním vazby mezi jednotlivými vlákny textilie, které se zvyšuje s prodloužením vzorku.

U tiskových past je potřeba zahrnout do vlivů na jejich chování i vliv stárnutí. Vliv stárnutí se projevil u tiskové pasty DuPont PE 874, kdy po stárnutí 5 dnů, pasta selhávala i pro hodnotu 1 % prodloužení. K selhávání docházelo i přesto, že byla pasta samotným výrobcem určena pro aplikace na elastické elektronice.

Výsledkem měření vhodnosti jednotlivých montážních technologií bylo zjištění, že nejvhodnějším kontaktním médiem je montáž do nevytvrzeného tiskového motivu SIP 2005PU. Tiskový motiv vykazuje nižší hodnoty elektrického odporu, při stejných hodnotách prodloužení, než izotropně vodivé lepidlo ACI FE-1101.

## Literatura

- [1] ROGERS, John A., Takao SOMEYA and Yonggang HUANG. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *SCIENCE* [online]. 2010, **327**(March), 1603–1608. Available at: doi:10.1126/science.1182383
- [2] FERNANDES, Daniel F., Carmel MAJIDI and Mahmoud TAVAKOLI. Digitally printed stretchable electronics : a review. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2019, (7), 14035–14068. Available at: doi:10.1039/c9tc04246f
- [3] BISWAS, Shantonu, Andreas SCHOEBERL, Yufei HAO, Johannes REIPRICH, Thomas STAUDEN, Joerg PEZOLDT and Heiko O JACOBS. Integrated multilayer stretchable printed circuit boards paving the way for deformable active matrix. *Nature Communications* [online]. 2019, 1–8. ISSN 2041-1723. Available at: doi:10.1038/s41467-019-12870-7
- [4] ŘEBOUN, Jan. *Technologie pro Flexibilní Elektroniku*. 2021.
- [5] WU, Wei. Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications. *Science and Technology of Advanced Materials* [online]. 2019, **20**(1), 187–224. ISSN 18785514. Available at: doi:10.1080/14686996.2018.1549460
- [6] NAGELS, Steven and Wim DEFERME. Fabrication approaches to interconnect based devices for stretchable electronics: A review. *Materials* [online]. 2018, **11**(3). ISSN 19961944. Available at: doi:10.3390/ma11030375
- [7] WANG, Yu, Zhengwei LI and Jianliang XIAO. Stretchable Thin Film Materials: Fabrication, Application, and Mechanics. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME* [online]. 2016, **138**(2), 1–22. ISSN 15289044. Available at: doi:10.1115/1.4032984
- [8] PELÍŠKOVÁ, Michaela and Petr SÁHA. *Vliv lehčené struktury na elektrické vlastnosti polymerních kompozitů s elektrovodivými plnivý*. 2012.
- [9] MORAVCOVÁ, Daniela. *Elektricky vodivé polymery*. 2021.
- [10] MOSALLAEI, Mahmoud, Jarno JOKINEN, Mikko KANERVA and Matti MÄNTYSALO. The effect of encapsulation geometry on the performance of stretchable interconnects. *Micromachines* [online]. 2018, **9**(12), 1–13. ISSN 2072666X. Available at: doi:10.3390/mi9120645
- [11] PIZZI, Antonio and K. L. MITTAL. *Phenolic resin adhesives* [online]. 2017. ISBN 9781498736473. Available at: doi:10.1201/9781315120942
- [12] ZHAO, Yue, Aeree KIM, Guanxiang WAN and Benjamin C K TEE. Design and

- applications of stretchable and self - healable conductors for soft electronics. *Nano Convergence* [online]. 2019, **6**(25), 1–22. ISSN 2196-5404. Available at: doi:10.1186/s40580-019-0195-0
- [13] MENSING, Johannes P, Tanom LOMAS and Adisorn TUANTRANONT. 2D and 3D printing for graphene based supercapacitors and batteries : A review. *Sustainable Materials and Technologies* [online]. 2020, **25**. ISSN 2214-9937. Available at: doi:10.1016/j.susmat.2020.e00190
- [14] ROTH, B, R R SØNDERGAARD and F C KREBS. *7 - Roll-to-roll printing and coating techniques for manufacturing large-area flexible organic electronics* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2015. ISBN 9781782420354. Available at: doi:10.1016/B978-1-78242-035-4.00007-5
- [15] CAI, Shisheng, Zhiyuan HAN, Fengle WANG and Kunwei ZHENG. Review on flexible photonics / electronics integrated devices and fabrication strategy [online]. 2018, **61**(June), 1–27. Available at: doi:10.1007/s11432-018-9442-3
- [16] TAN, Hong Wei, T. TRAN and C. K. CHUA. A review of printed passive electronic components through fully additive manufacturing methods. *VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING* [online]. 2016, **11**(August), 271–288. Available at: doi:10.1080/17452759.2016.1217586
- [17] NGUON, B. and M. JOUANEH. Design and characterization of a precision fluid dispensing valve. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, **24**(3–4), 251–260. ISSN 02683768. Available at: doi:10.1007/s00170-003-1738-3
- [18] ADAMSON, Steven J, Alan LEWIS, Dan ASHLEY and Brian SCHMALTZ. *New Piezo Actuated Dispensing Method for Consistent Solder Paste Dots*. 2008.
- [19] DOU, Jiabin, Lixue TANG, Lei MOU, Rufan ZHANG and Xingyu JIANG. Stretchable conductive adhesives for connection of electronics in wearable devices based on metal-polymer conductors and carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* [online]. 2020, **197**(May), 108237. ISSN 02663538. Available at: doi:10.1016/j.compscitech.2020.108237
- [20] LOPES, Pedro Alhais, Bruno C. SANTOS, Anibal T. DE ALMEIDA and Mahmoud TAVAKOLI. Reversible polymer-gel transition for ultra-stretchable chip-integrated circuits through self-soldering and self-coating and self-healing. *Nature Communications* [online]. 2021, **12**(1), 1–10. ISSN 20411723. Available at: doi:10.1038/s41467-021-25008-5



- [21] NAVRÁTIL, Jiří and Martin HIRMAN. Kontaktování SMD součástek na flexibilní DPS s pomocí nevodivých lepidel Connection of SMD Components on a Flexible PCB by Non-Conductive Adhesive. 2018, 97–100.
- [22] KANG, Hyejun, Sri Harini RAJENDRAN and Jae Pil JUNG. Low melting temperature sn-bi solder: Effect of alloying and nanoparticle addition on the microstructural, thermal, interfacial bonding, and mechanical characteristics. *Metals* [online]. 2021, **11**(2), 1–25. ISSN 20754701. Available at: doi:10.3390/met11020364
- [23] VAN DEN ENDE, Daan A., Rob HENDRIKS, Romain CAUCHOIS, Roel H.L. KUSTERS, Maarten CAUWE, Wilhelm A. GROEN and Jeroen VAN DEN BRAND. Photonic flash soldering of thin chips and SMD components on foils for flexible electronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* [online]. 2014, **4**(11), 1879–1886. ISSN 21563950. Available at: doi:10.1109/TCPMT.2014.2360410
- [24] HIRMAN, Martin, Jiri NAVRATIL, Frantisek STEINER, Tomas DZUGAN and Ales HAMACEK. Alternative technology for SMD components connection by non-conductive adhesive on a flexible substrate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2019, **30**(15), 14214–14223. ISSN 1573482X. Available at: doi:10.1007/s10854-019-01789-w
- [25] JANDA, Martin, Michaela RADOUCHOVÁ and Jan ŘEBOUN. *Metody montáže součástek na tištěný vodivý motiv realizovaný na flexibilním substrátu*. 2022.
- [26] HIRMAN, Martin, Jiri NAVRATIL, Frantisek STEINER, Tomas DZUGAN and Ales HAMACEK. SMD Components Assembly on a Flexible Substrate by Non-Conductive Adhesives. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2018, **2018-May**, 1–6. ISSN 21612536. Available at: doi:10.1109/ISSE.2018.8443655
- [27] LU, Daniel and C. P. WONG. *Materials for Advanced Packaging* [online]. B.m.: Springer, 2016. ISBN 2013206534. Available at: doi:10.1007/978-0-387-78219-5
- [28] AL-HAIDARI, Riadh, Behnam GARAKANI, Mohammed ALHENDI, Udara S. SOMARATHNA, Mark D. POLIKS, Christopher E. TABOR, Michelle YUEN, Madhu STEMMERMANN and Nancy STOFFEL. Evaluation of an Anisotropic Conductive Epoxy for Interconnecting Highly Stretchable Conductors to Various Surfaces. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2022, **2022-May**, 1422–1429. ISSN 05695503. Available at: doi:10.1109/ECTC51906.2022.00228

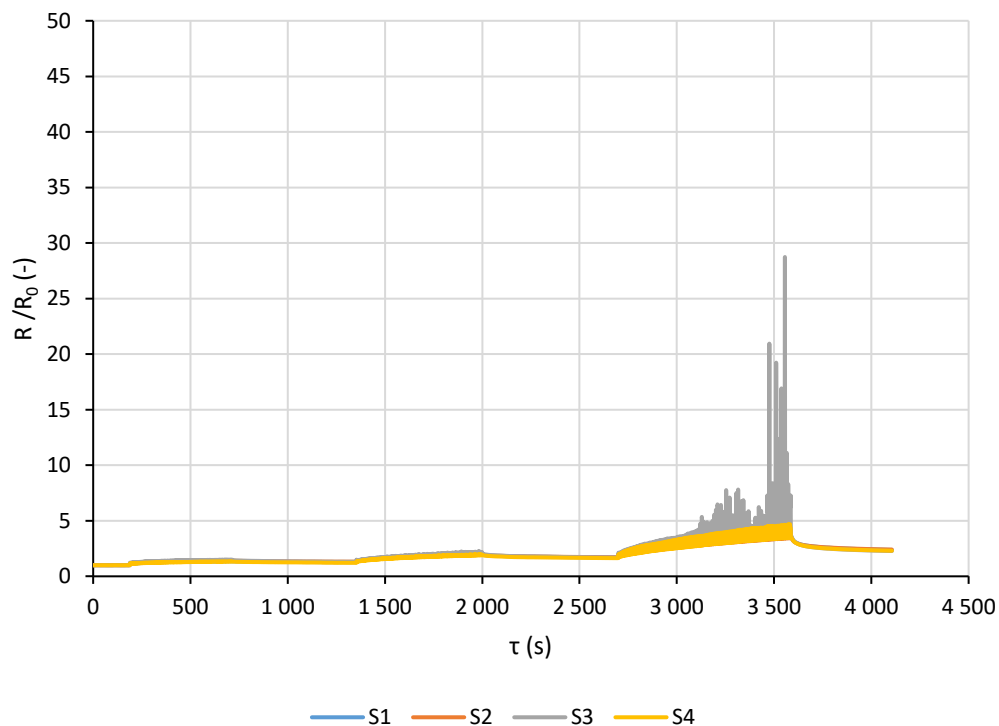
- [29] ARADHANA, Ruchi, Smita MOHANTY and Sanjay Kumar NAYAK. A review on epoxy-based electrically conductive adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2020, **99**, 102596. ISSN 0143-7496. Available at: doi:10.1016/J.IJADHADH.2020.102596
- [30] SALO, Teemu, Aki HALME, Mikko KANERVA and Jukka VANHALA. Bond Strength and Failure Mechanisms of Nonconductive Adhesives for Stretchable Electronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* [online]. 2020, **10**(5), 770–778. ISSN 21563985. Available at: doi:10.1109/TCPMT.2020.2980121
- [31] PEARSON, R. Thermoset Adhesives. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. 2001, 9204–9208. Available at: doi:10.1016/B0-08-043152-6/01658-2
- [32] RIBAS, Morgan, Tom HUNSINGER, CuCu TRAIAN and Ramakrishna H.V. *Low-Temperature Soldering Alpha Assembly Solutions*. B.m.: BR Publishing, Inc., 2018. ISBN 97809999864845.
- [33] CROW. *Elastomers* [online]. [accessed. 2023-05-24]. Available at: <https://polymerdatabase.com/Elastomers/Elastomers.html>
- [34] RIBAS, Morgana, Anil KUMAR, Divya KOSURI, Raghu R RANGARAJU, Pritha CHOUDHURY, Suresh TELU and Siuli SARKAR. Low Temperature Soldering Using Sn-Bi Alloys. *Proceedings of SMTA International*. 2017, **1**(c), 201–206.
- [35] *Using Stress Test Analysis to Ensure PCB Reliability | Advanced PCB Design Blog | Cadence* [online]. [accessed. 2023-05-24]. Available at: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/using-stress-test-analysis-to-ensure-pcb-reliability>
- [36] SCHIRMER, Julian, Kilian EISEN, Marcus REICHENBERGER, Jewgeni ROUDENKO, Simone NEERMANN and Jorg FRANKE. Long-Term Behavior of SMT Components Mounted on Printed Polymer Thick Film Pastes. *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices, MID 2018* [online]. 2018. Available at: doi:10.1109/ICMID.2018.8526939
- [37] TFE, K E T. Ket / tfe. 2020.
- [38] *IPC Store | IPC Store* [online]. [accessed. 2023-05-24]. Available at: [https://shop.ipc.org/?\\_\\_hstc=147325167.edb5fe761a1548f165be014765abf2d8.1673535715265.1673589943584.1673614058451.3&\\_\\_hssc=147325167.1.1673614058451&\\_\\_hsfp=1798653357](https://shop.ipc.org/?__hstc=147325167.edb5fe761a1548f165be014765abf2d8.1673535715265.1673589943584.1673614058451.3&__hssc=147325167.1.1673614058451&__hsfp=1798653357)

- [39] MANIAN RAMKUMAR, S., Andrew STEMMERMANN, Benny Mathew RAJAN, Isabelle QUELHAS, Mohammed ALHENDI, Mark POLIKS, El Mehdi ABBARA, Benson CHAN, Toshiaki OGIWARA, Nori SAKI, Masayoshi OTOMO and Ken ARAUJO. Development of Next Generation Stretchable Materials for Flexible Hybrid Electronics (FHE). *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2020, **2020-June**, 829–834. ISSN 05695503. Available at: doi:10.1109/ECTC32862.2020.00135
- [40] LI, Xiaotian, Henrik ANDERSSON, Johan SIDÉN and Thomas SCHÖN. Soldering surface mount components on screen-printed Ag patterns on paper and polyimide substrates for hybrid printed electronics. *Flexible and Printed Electronics* [online]. 2018, **3**(1). ISSN 20588585. Available at: doi:10.1088/2058-8585/aa9dc7
- [41] Čtyřkoncové snímání [online]. [accessed. 2023-05-24]. Available at: [https://wikijii.com/wiki/Four-terminal\\_sensing#Operating\\_principle](https://wikijii.com/wiki/Four-terminal_sensing#Operating_principle)
- [42] IPC-9204. Guideline on Flexibility and Stretchability Testing for Printed Electronics. *Printed Electronics Test Method Development Validation Subcommittee of the Printed Electronics Committee of IPC*. 2017.
- [43] Environmentální testování | TÜV SÜD Czech [online]. [accessed. 2023-05-24]. Available at: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/cinnosti/testovani/environmentalni-testovani>
- [44] GILLAN, Liam, Jussi HILTUNEN, Mohammad H. BEHFAR and Kari RÖNKÄ. Advances in design and manufacture of stretchable electronics. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 2022, **61**(SE). ISSN 13474065. Available at: doi:10.35848/1347-4065/ac586f
- [45] BENEŠOVÁ, Jaroslava. *Klimatické a korozní zkoušky* [online]. Available at: [http://www.svuom.cz/images/tnostatnizk/klimaticke\\_zkousky.pdf](http://www.svuom.cz/images/tnostatnizk/klimaticke_zkousky.pdf)
- [46] OF, Faculty, Electrical ENGINEERING and Electronic TECHNOLOGY. *Vysoké učení technické v brně*. 2013.
- [47] STEINER, František. *Technologie kontaktování a propojování*. 2020.
- [48] Pájení přetavením | SMTcentrum - služby v oblasti pájení [online]. [accessed. 2023-05-15]. Available at: <https://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pajeni-pretavenim/>

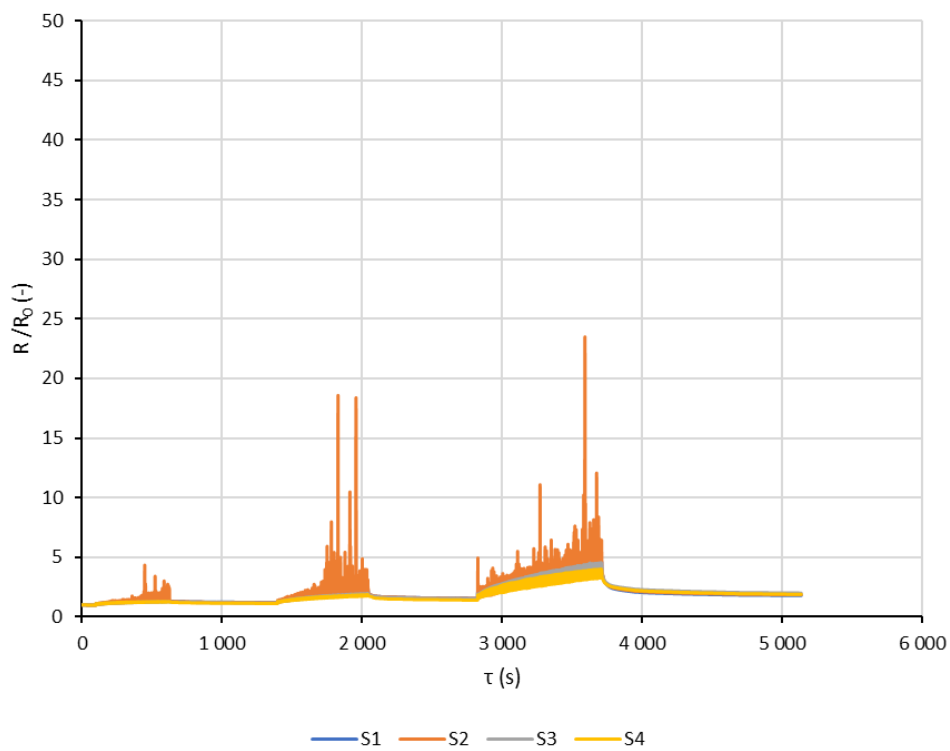
## Přílohy

Příloha 1 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: A4, pasta: PE 874, stárnutí: 5 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.....	II
Příloha 2 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: A5, pasta: PE 874, stárnutí: 6 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.....	II
Příloha 3 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: D3, pasta: SIP 2005PU, stárnutí: 10 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.....	III

Příloha 1 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: A4, pasta: PE 874, stárnutí: 5 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.



Příloha 2 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: A5, pasta: PE 874, stárnutí: 6 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.



Příloha 3 Časová závislost elektrického odporu tištěných drah, vzorek: D3, pasta: SIP 2005PU, stárnutí: 10 hodin, cyklická zkouška při 1, 2 a 4 % prodloužení.

