

České vysoké učení technické  
Fakulta elektrotechnická

Obor: Technologické systémy



Problematika nanášených vodivých cest na  
substráty

Problematics of conductive paths deposition  
on substrates

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Jakub Mareš  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mareš** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466381**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Problematika nanášených vodivých cest na substráty**

Název diplomové práce anglicky:

**Problematics of conductive paths deposition on substrates**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s možnostmi nanášení vodivých vrstev na různé substráty a s problémy z pohledu spolehlivosti
- 2) Připravte si vzorky, které následně analyzujete a na kterých ověříte, jak se mění jejich vlastnosti s ohledem na použité materiály.
- 3) Výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Alena Pietříková, Juraj Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis oškanu(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří mi pomohli s vypracováním této práce. Konkrétně bych rád poděkoval panu doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za vedení práce a odborné rady. Dále bych rád poděkoval firmě PragoBoard s.r.o. a firmě ENCETEX s.r.o. za poskytnutí potřebných materiálů. V neposlední řadě také své rodině a kamarádům, kteří mi poskytli oporu a potřebnou motivaci během studia.

## Seznam zkratek

DPS	Deska plošných spojů
PCB	Printed circuit board
THT	Through hole technology
SMT	Surface mount technology
THD	Through hole device
SMD	Surface mount device
CTE	Coefficient of thermal expansion
RA	Rolled annealed copper foil
PI	Polyimidové fólie
PET	Polyethylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
PEG	Polyethylenglykol

## Seznam symbolů

$T_g$	Glass transition temperature
$T_d$	Decomposition temperature
$\rho$	Měrný elektrický odpor
$\mu_r$	Relativní permeabilita
$\mu_0$	Permeabilita vakua
$T_t$	Jemnost nitě
$A_e$	Elektrochemický ekvivalent
$\alpha$	Hmotnost kilomolů

## **Anotace**

Proces návrhu desek plošných spojů je velice komplexní. Ve většině případů zahrnuje tvorbu prototypů a výrobu kusových řad. Kusové řady nejčastěji slouží pro testovací a měřicí účely. Pro tyto prototypy je vhodné využít výrobní postupy a technologie, které umožní za přijatelný časový úsek vytvořit modelovou desku plošného spoje. Tato práce je zaměřena na možné způsoby tvorby vodivých cest na deskách plošných spojů. Teoretická část práce je věnována technologii výroby plošných spojů a jednotlivým materiálům využívaných při výrobě. Praktická část je soustředěna na způsob nanášení vodivých cest na různé materiály pomocí tisku a následného vyhodnocení elektrických a mechanických vlastností těchto vrstev.

## **Klíčová slova**

Vodivé vrstvy, DPS, nanášení vodivých vrstev, testování DPS, elektrické vlastnosti, tkaniny, flexibilní DPS, pokovování

## **Annotation**

Printed circuit board (PCB) design process is very complex. Usually comprises prototype design and small number of proof of concepts preparation. These are meant for testing and measurement purposes to optimise time of further model PCB production. For these prototypes, it is advisable to use manufacturing processes and technologies that enable the creation of a model circuit board in a reasonable amount of time. Theoretical part of thesis deals with PCB production technology and different materials used for massive production. Practical part focuses on application of conductive tracks methods (tracks applying) on different fundamental materials by printing and consequential electrical and mechanical properties evaluation of those layers.

## **Key words**

Conductive layers, PCB, application of conductive layers, PCB testing, electrical properties, fabrics, flexible PCB, electroplating

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>Teoretická část.....</b>	<b>9</b>
1. Pájené spoje.....	9
2. Deska plošných spojů (DPS) .....	10
3. Pájecí slitiny .....	15
4. Techniky pájení .....	18
5. Testy pájených spojů .....	22
6. Vodivé vrstvy .....	25
7. Tenké vrstvy.....	29
8. Galvanické pokovování .....	29
9. Spolehlivost a vady pájených spojů.....	31
<b>Praktická část .....</b>	<b>33</b>
10. Výroba testovacích DPS.....	33
11. Měření mechanických vlastností pájených spojů – zkouška stříhem .....	34
12. Měření elektrických vlastností vodivých cest a pájených spojů.....	35
13. Tisk vzorků.....	36
14. Osazování testovacích DPS .....	41
15. Elektrochemické pokovování .....	42
<b>Výsledky měření .....</b>	<b>47</b>
16. Tkaniny .....	47
17. Flexibilní substráty .....	48
18. Elektrické vlastnosti SMD vzorků .....	51
19. Mechanické vlastnosti SMD vzorků .....	55
<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>63</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>68</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>69</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>69</b>

<b>Přílohy</b> .....	<b>70</b>
----------------------	-----------



## Úvod

V současné době je technologie výroby plošných spojů na velice vysoké úrovni. Dnes běžně dostupné DPS (Deska plošných spojů) dosahují vynikajících parametrů, jak po elektrické, tak i po mechanické stránce. Jednotlivé vodivé spoje slouží ke spojování součástí připevněných na DPS. Nejčastěji jsou tvořeny měděnou vrstvou opatřenou ochrannými povlaky pro ochranu před korozí. V této práci se pokusím ověřit, zda je možné využít vodivé pasty s obsahem stříbra nanášené pomocí speciální 3D tiskárny, jako možnou náhradu běžných DPS. Dále se věnuji nanášení vodivých cest na flexibilní materiály. Konkrétně na tkaniny a flexibilní fólie. Tvorba vodivých cest na tkaniny je limitována maximální teplotou, kterou dokáže tkanina snést, tak aby nedošlo k degradaci materiálu. Je tedy nutné zvolit teplotně odolné tkaniny. Dále je třeba zohlednit značnou flexibilitu a ohebnost tkaniny, aby nedocházelo k popraskání vodivého spoje. Shodné teplotní omezení se vztahuje i na použité fólie.

## Teoretická část

V teoretické části práce se věnuji technologii a materiálům využívaných pro tvorbu desek plošných spojů a také technologickým možnostem při tvorbě vodivých cest na pružných a textilních materiálech.

### 1. Pájené spoje

Procesem pájení se nejčastěji označuje metalurgické spojení dvou kovů, při kterém dochází k nerozebíratelnému spojení dvou kovů. Při tomto procesu se taví pouze přídavný materiál označovaný jako pájecí slitina. Teplota tavení pájecí slitiny musí být vždy nižší, než je teplota tavení připojovaných kovů. Působením vysoké teploty se povrchové atomy pájecí slitiny dostávají do blízkého kontaktu s pájeným materiálem, a tím dochází k tvorbě adhezních a kohezních sil působících na atomy kovů. Souběžně s tímto procesem dochází k difuzi a rozpouštění prvků spojovaných kovů. Důsledkem vzájemné difuze atomů mezi základními materiály a pájecí slitinou je tvorba intermetalické vrstvy. Vytvoření této vrstvy má zásadní vliv na vznik pevné vazby mezi pájecí slitinou a kovem. Intermetalická vrstva má vliv také na smáčivost pájeného povrchu. [1]

Na základě platné normy ČSN EN ISO 4063 [2] a ČSN 05 0000 [3] se pájení dělí na tvrdé a měkké. Dělení procesů je rozděleno podle teploty, při které dochází k tavení pájecí slitiny. Pokud je teplota nižší než 450 °C, jedná se o pájení měkké. Pokud má pájecí slitina teplotu tání vyšší než 450 °C, jedná se o pájení tvrdé. Pájí se nejčastěji plamenem, indukčně, elektrickým obloukem, odporově. [4]

## 1.1. Předpoklady pájených spojů

Pro zajištění požadovaných vlastností pájených spojů je nezbytné zaručit mechanickou integritu spojů, která zahrnuje dostatečnou pevnost a tažnost spoje. Spoj musí zaopatřit elektrickou a tepelnou vodivost. Je tedy žádoucí, aby spoj měl co nejmenší přechodový odpor. V průběhu předpokládané životnosti spoje nesmí docházet k chemickým a jiným reakčním dějům, které by mohly ovlivnit mechanické a elektrické vlastnosti spoje. Je nutné, aby nedocházelo k oxidaci a korozi. Je očividné, že na pájený spoj v počítačových komponentech nebo v domácí elektronice, jsou kladeny jiné nároky než například pro řídicí jednotku spalovacích motorů. Pro každou aplikaci jsou důležité jiné vlastnosti. V některých případech je upřednostňována odolnost proti vibracím a mechanickému namáhání před jinými elektrickými parametry pájeného spoje. Pájecí slitina nesmí podle směrnice ROHS č. 2011/65/EU [5] obsahovat nebezpečné látky pro lidské zdraví a přírodu uvedené v seznamu této směrnice. Tato skutečnost značně ovlivňuje, snižuje, dostupnost materiálů a jejich následné kombinace, které lze využít pro tvorbu pájených spojů. Existují však definovaná odvětví, pro které platí výjimky z těchto směrnic. [6]

## 2. Deska plošných spojů (DPS)

V angličtině označované jako Printed Circuit Board (PCB) je elektroizolační podložka, na které jsou vytvořené elektricky vodivé cesty propojující jednotlivé pájecí body (anglicky pads). Na tyto plošky se pájením připevňují jednotlivé elektrické součástky. Tyto pájecí plošky musí zajistit i mechanické spojení součástky s deskou. DPS musí splňovat elektrické požadavky, zajistit odvod ztrátového tepla a odolávat klimatickým a chemickým mechanismům způsobující degradaci. V dnešní době je kladen důraz i na estetický vzhled. Na deskách se často nachází i označení jednotlivých součástek, vývodů i dalších doplňujících informací. Základními substráty jsou elektroizolační nosné podložky, nejčastěji vyrobené z dielektrického materiálu nebo z desky s izolovaným kovovým jádrem. [7] DPS se dají obecně rozdělit podle těchto kritérií. [1]

- Tuhost desky
  - Tuhé – rovné, tvarové
  - Ohebné
- Technologie tvorby vodivých vzorů
  - Aditivní – nanesení vodivého motivu na dielektrikum
  - Subtraktivní – odleptání izolačních mezer z celoplošné vodivé vrstvy na nosném dielektriku
  - Semiaditivní – kombinace předchozích variant
- Počet vrstev

- Jednovrstvé
- Dvouvrstvé
  - S pokovenými prostupy zajišťující propojení jednotlivých vrstev
  - S nepokovenými otvory
- Vícevrstvé

DPS mohou být navrhovány jak pro technologii vývodových součástek (Through Hole Technology, THT), tak i pro povrchovou montáž (Surface Mount Technology, SMT) nebo jejich kombinaci. Rozdíl je v připojovacích kontaktech pro jednotlivé součástky. SMD (Surface Mount Device) součástky mají vývody, které se pájí na jednotlivé pájecí plošky. THD (Through Hole Device) součástky mají drátové vývody, které se zasouvají do pokovených otvorů, a ty se následně spojují propájením z druhé strany.

## **2.1. Fyzikální předpoklady základních substrátů**

### **Elektrické vlastnosti**

Substrát musí být kvalitním izolantem pro zajištění vzájemné izolace jednotlivých vývodů součástek a vodivých cest. Za nejdůležitější vlastnosti se považuje hodnota povrchové a objemové rezistivity, dále pak elektrická pevnost. Pro vysokofrekvenční použití je nutné zohlednit velikost relativní permitivity a ztrátového činitele  $tg\delta$ . Součástí substrátů jsou i vodivé vrstvy. U nich je požadována co nejvyšší vodivost. Je nutné brát v úvahu vzájemnou indukčnost a kapacitu vodivých cest. [1, 8]

### **Tepelné vlastnosti**

Působení zvýšené teploty může ovlivnit spolehlivost a funkčnost elektrických součástek. Vlivem vysoké integrace součástek na malé ploše dochází k lokálnímu přehřívání, a proto je nutné již při návrhu uvažovat o způsobu chlazení. Tepelná vodivost substrátu je důležitý faktor ovlivňující odvod ztrátového tepla. Teplota, při které materiál přechází do sklovitého, měkčeného, deformovatelného stavu udává teplota skelného přechodu  $T_g$  (Glass Transition Temperature). Teplota rozkladu  $T_d$  (Decomposition Temperature) je teplota, při které dochází k chemickému rozkladu substrátu. Hodnota  $T_d$  udává maximální teplotu, na kterou je možno ohřát desku, tak aby nedošlo k nevratnému poškození. Koeficient teplotní roztažnosti CTE (Coefficient of Thermal Expansion) popisuje, jak se změní velikost při ohřátí o jeden stupeň. [8]

## **Chemické vlastnosti**

Chemická odolnost se nejčastěji posuzuje na základě odolnosti vůči dichlormethanu a absorpci vody. Dichlormethan se využívá jako rozpouštědlo a odstraňovač nátěrů. Absorpce vlhkosti uvádí o kolik se zvýší hmotnost materiálu v důsledku absorpce vody za kontrolovaných podmínek. [9]

## **Mechanické vlastnosti**

Mezi mechanické požadavky kladené na základní substráty patří rozměrová stálost, rovinnost povrchu, nehořlavost, pružnost, odolnost vůči otřesům a další. Zvláštní pozornost patří teplotní roztažnosti. V případě vývodových součástek (THD) je rozdílná teplotní roztažnost materiálů kompenzována pružnými vývody součástek a nedochází k tak výraznému pnutí v pájeném spoji. U součástek určených pro povrchovou montáž (SMD) nastává problém v rozdílné teplotní roztažnosti součástky a podkladu. Teplotní roztažnost základního substrátu je přibližně desetkrát větší než měděných vodičů a pokovených otvorů při teplotě pájení. Vlivem rozdílné roztažnosti jednotlivých materiálů dochází ke vzniku pnutí ve spojích mezi různými materiály. Takto vzniklé pnutí působí na spoj mezi součástkou a pájecí ploškou a vytváří zde značné síly, které mohou vést až ke vzniku mikrotrhlin. [1, 7]

## **2.2. Materiály používané pro výrobu základních substrátů**

Převážně využívané materiály, ze kterých jsou vyráběné běžně dostupné substráty, musí splňovat tepelné, elektrické, chemické a mechanické předpoklady. V současné době existuje nepřeberné množství různých substrátů a jejich rozdílných kombinací. Volba substrátu se provádí na základě předpokládané aplikace DPS a při výběru se zohledňují rozdílné mechanické, elektrické a chemické vlastnosti jednotlivých materiálů.

Základní materiál je nejčastěji tvořen dielektrikem, na kterém je jednostranně nebo oboustranně plátovaná vodivá folie. Dielektrikum má nejčastěji pryskyřicový základ a pro lepší mechanické vlastnosti je navíc vyztuženo několika vrstvami výztuže. Ta je převážně tvořena skelnou tkaninou nebo listy buničitého papíru. Substráty se dělí na základě vstupních surovin na organické, anorganické a kombinovanou bázi.[7] Nejčastější kombinace jsou v tabulce 1.

Tabulka 1 - Nejrozšířenější materiály využívané pro výrobu substrátů.

Pryskyřice	Výztuž	Označení	
fenol	papír	listy	FR-2, X, XP, XX, XXP, XXX, XPC
	bavlna	tkanina	C, CE, L, LE
	azbest	listy	A
		tkanina	AA
	sklo	vlákno	G-2
		tkanina	G-3
melanin	nylon	vlákna	N-1
	-	-	ES-1, ES-3
epoxid	sklo	tkanina	G-5, G-9
	papír	listy	FR-3
polyester	sklo	tkanina	G-10, G-11, FR-4, FR-5
	sklo	tkanina	FR-4, GPO-1, GPO-2
silikon	sklo	rohož	G-7

Převzato z [1]

Přidavná výztuž tvoří základní skelet výsledného laminátu a rozhoduje o mechanických vlastnostech, určuje rozměrovou stálost při teplotních výkyvech a ovlivňuje chemické a elektrické charakteristiky výsledné DPS. [7]

### Epoxidové substráty

Patří do skupiny organických substrátů, protože pryskyřice je organického původu. Vyrábějí se z bisfenolu A a ethylenchloridu. Nejvíce světově rozšířený je skloepoxidový substrát, který je označován jako FR4. U současných substrátů FR4 je teplota skelného přechodu  $T_g$  větší jak 150 °C, a proto je možné jej využívat pro většinu komerčních aplikací a také v automobilovém průmyslu. Díky své dobré rozměrové stálosti nedochází k ohýbání a kroucení základního materiálu při výrobě. Tento nežádoucí jev způsobuje problémy u osazovacích automatů. Výsledných vlastností se dosahuje pomocí vrstvení jednotlivých vrstev laminátů a skelné tkaniny.

Výroba spočívá v kontinuálním namáčení skelné tkaniny v pryskyřici. Po okapání a osušení je vzniklá deska válcována pro dosažení požadované tloušťky. Takto vzniklý meziprodukt je nazýván prepreg. Mezi takto vzniklé desky prepegu se vkládají izolační desky. Tento sendvič materiálů se následně lisuje za tepla. V další fázi se desky seříznou na běžné

rozměry. Tyto míry vycházejí nejčastěji z rozměrů vhodných pro další výrobní zařízení, aby byla zajištěna největší možná škálovatelnost výroby. [1, 10]

### **Fenolové substráty**

Mezi jejich hlavní výhody patří nízká cena a dostačující elektrická odolnost. Jako výztuž nejčastěji výrobci využívají papír. Nevýhodou fenolových substrátů je jejich značná navlhavost a malá odolnost vůči elektrickému oblouku. [1]

### **Kompozitové substráty**

CEM-1 je v současné době nejrozšířenější kompozitový substrát. Kompozitové substráty spojují přednosti skla a papíru. Jádrem substrátu CEM-1 je tvořeno epoxidem tvrzeného papíru. Na toto jádro je v dalším kroku z obou stran nanášena vrstva skloepoxidového prepegu. CEM-1 je využíván pro méně náročnou elektroniku. Další využívaný kompozitový materiál nese označení CEM-3. Ten má jádro tvořeno vrstvou netkaných skelných vláken, na které je oboustranně nanášeno skloepoxidové prepege. [1, 12]

### **Keramické a skleněné substráty**

Tyto substráty se využívají pro svoje specifické vlastnosti. Mezi výhody zcela jistě patří velice nízká relativní permitivita umožňující vysokofrekvenční aplikace. Koeficient tepelné roztažnosti je podobný keramickým součástkám, což snižuje vnitřní pnutí při tepelném namáhání. Keramické substráty dobře odvádějí teplo. Mezi nevýhody patří omezená velikost substrátů. Při mechanickém a tepelném rázu může dojít k praskání materiálu. Desky z keramických a skleněných substrátů mají značně limitovanou možnost oprav. Jedním z představitelů keramických substrátů je korundová keramika ( $Al_2O_3$ ). Jedná se o oxid hlinitý. Mezi jeho výhody patří chemická a teplotní odolnost. Je vynikající izolantem a tepelným vodičem. Vodivé vrstvy jsou nejčastěji tlustovrstvé o tloušťkách 5–20  $\mu m$  nanášené pomocí síťotisku. [1, 13]

### **Flexibilní substráty**

V oblasti ohebných, flexibilních, substrátů se jako dielektrické jádro nejčastěji využívá polyimid a polyester. Polyimidový substrát je využíván pro vysokoteplotní aplikace, protože je schopný snést vysoké teploty při wirebondingu, flip-chip montáži a pájení.

Princip výroby flexibilního DPS sestává z vytvoření vodivého motivu na základním flexibilním substrátu. Následuje překrytí pomocí krycí vrstvy (coverlay). Ta je nejčastěji tvořena ze stejného materiálu jako základní substrát, ale navíc obsahuje vhodné epoxidové nebo akrylové lepidlo. Tato krycí vrstva slouží jako ochrana křehkých vodivých cest a zároveň tvoří

dielektrickou vrstvu. V současné době je nejrozšířenější polyimidový substrát od firmy DuPont™ s názvem Pyralux® a Kapton®. Tržní konkurenci představuje Apical® AV od firmy Keneka a společnost Epoflex® s řadou MSC. Tyto materiály jsou nehořlavé, pevnost v tahu se pohybuje v hodnotách 22-40 kN·mm<sup>-2</sup>, modul pružnosti v tahu mají 330-890 kN·mm<sup>-2</sup>, prodloužení výrobce udává v rozmezí 22-115 %. Nejčastěji je možné se setkat s tloušťkou 25 a 50 μm a pro vysoce flexibilní aplikace se využívá tloušťka 12,5 μm.

Polyesterové folie neboli PET (polyethyltereftalát) se využívají pro svoji nízkou cenu, vynikajícím mechanickým vlastnostem při pokojové teplotě a minimální absorpci vody. Vyznačují se rozměrovou stálostí. Oproti tomu není možné je vystavovat tak vysokým teplotám, jako polyimidové materiály, a navíc jsou hořlavé. PET folie nelze využívat pro aplikace, kde je vyžadováno pájení.

Tenký sklovláknitý epoxidový materiál lze využít také jako flexibilní základní substrát. Tento substrát má nejčastěji tloušťku 200 μm a vlastnosti má takřka podobné jako standardní sklovláknité epoxidové substráty. Jedna z výhod je možnost využití běžných výrobních postupů, a tedy i stejné výrobní přístroje. Jejich flexibilita a cyklické ohýbání je však neporovnatelně horší ve srovnání s dříve uvedenými materiály. [14–17]

### 3. Pájecí slitiny

Aby bylo dosaženo pájeného spoje s žádanými vlastnostmi, hraje důležitou roli volba optimální pájecí slitiny, dodržení všech teplotních profilů a dalších technologických postupů. Pájecí slitiny se dají obecně rozdělit na pasty a dráty. Dráty se využívají pro ruční pájení pomocí horkého hrotu. Dráty mohou být plné nebo duté. Duté dráty obsahují tavidlo uvnitř dutiny.

Vlastnosti pájecích slitin záleží na jednotlivých složkách a na poměru atomů jednotlivých kovů. Změny mezi jednotlivými atomovými poměry vedou k značným rozdílům ve finálních vlastnostech pájecí slitiny, a tím i k ovlivnění konkrétního použití. Pomocí poměrů koncentrací kovů lze ovlivnit bod tání, tvrdost, pevnost v tahu atd. Při snaze vylepšit jednu vlastnost často dochází k zhoršení jiné. Nejsložitější je tedy dosáhnout optimálních vlastností všech parametrů tak, aby výsledná slitina byla vhodná pro zamýšlené použití. V současnosti jsou pájky tvořeny těžkými kovy s nízkou teplotou tavení. Mezi tyto kovy nejčastěji patří: cín (Sn), měď (Cu), stříbro (Ag), zinek (Zn), bismut (Bi). Je možné využít i další kovy, ale ty jsou buď příliš vzácné nebo cenné, či zdraví škodlivé. V převážné většině jsou pájky dvousložkové a třísložkové.

Pájka neobsahuje pouze požadované kovy, ale často i různé příměsi, které negativně ovlivňují výsledné vlastnosti. Nejčastěji je využívána kombinace cínu a dalšího kovu případně dalších přísad. Před zavedení RoHS byla nejrozšířenější kombinace cínu a olova v různých

poměrech. Poměr Sn63Pb37 dosahoval neoptimálnějších vlastností pro měkké pájení. Tato varianta má vynikající mechanické i elektrické parametry a nízký bod tání. [18]

Pájecí pasty jsou složeny z homogenní směsi práškové pájky a tavidla a různých modifikátorů a aditiv. Prášková pájka je často charakterizována velikostí jednotlivých částic a jejich tvarem. V převážné většině jsou částice ve tvaru kuliček o různých velikostech. Velikost částic je rozdělena do několika kategorií. Tyto kategorie jsou značeny písmenem T1 až T6.

Tavidlo, které slouží k odstraňování oxidů z pájeného povrchu a zabraňuje následným reakčně oxidačním dějům tvoří 10 až 15 % hmotnosti pájecí slitiny. Dále tavidlo napomáhá dosáhnout optimální smáčivosti povrchu, a tím zlepšuje roztékavost. Nezanedbatelnou roli plní i v přenosu tepla při procesu pájení. Sekundární vliv tavidla je nutné zohlednit i po dokončení procesu pájení z hlediska následného degradačního působení na výsledný spoj. Tavidlo může způsobit následné korozivní děje. Omytí těchto reziduálních zbytků je často nezbytné. Existují však i bezoplachová tavidla. [1]

V tabulce 2 jsou uvedeny nejvyužívanější bezolovnaté pájky a jejich přibližné body tání. Ty se mohou lehce lišit u jednotlivých výrobců, i když mají shodné označení.

*Tabulka 2 - Bezolovnaté pájky.*

<b>Skupina slitin</b>	<b>Procentuální obsazení [%]</b>	<b>Bod tání [°C]</b>
Sn-Cu	Sn-0,07Cu	227
Sn-Ag	Sn-3,5Ag	221
	Sn-5,0Ag	221
Sn-Ag-Cu (SAC)	Sn-3,0Ag-0,05Cu	217
	Sn-3,9Ag-0,6Cu	217
	Sn-4,0Ag-0,5Cu	217
Sn-Ag-Bi	Sn-1,0Ag-57Bi	137
	Sn-3,5Ag-1,0Bi	219
	Sn-2,0Ag-7,5Bi	191
Sn-Ag-Bi-Cu	Sn-2,5Ag-1,0Bi-0,5Cu	214
	Sn-2,0Ag-3,0Bi-0,75Cu	207
Sn-Bi	Sn-58Bi	137
Sn-Zn-Bi	Sn-8,0Sn-3,0Bi	191
Sn-Zn	Sn-9,0Zn	199

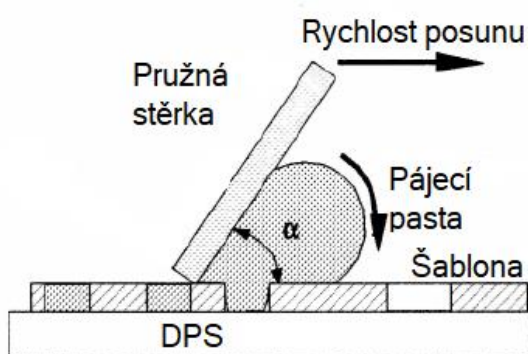
*Převzato z [18]*

### **3.1.1. Nanášení pájecích past**

Aplikace pájecích past se dá rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní metody patří šablonový tisk a v ojedinělých případech sítotisk přes síto. Využití jednotlivých metod nejčastěji záleží na velikosti série DPS, technologii a pořizovacích nákladech, případně údržby

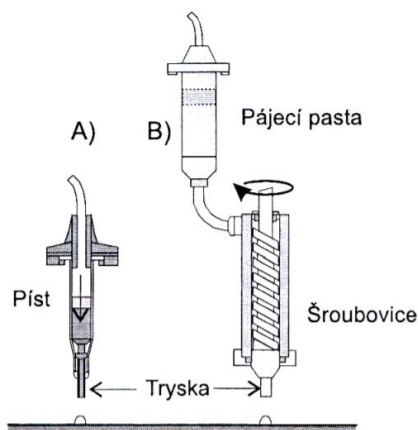


jednotlivých strojů. U kontaktních metod nanášení pájecích past je potřeba zhotovit speciální šablonu, která se přiloží na DPS. V místech, kde má dojít k nanesení pájecí pasty na pájecí plošku je v šabloně vytvořen otvor o přesných rozměrech. Z toho plyne požadavek na precizní vycentrování motivů šablony a desky plošných spojů, tak aby došlo k nanesení pájecí pasty na požadované pájecí plošky. Dávkování pasty je ovlivněno tloušťkou šablony. Pro velkosériovou výrobu se využívá šablon, protože nanášení je rychlé a zajišťují stálou opakovatelnost. Nevýhoda je v nutnosti vyrobiť šablony, síta, která je možné využít pouze pro konkrétní DPS. Nevýhoda sít je v jejich malé životnosti. Naopak šablony vytvořené ze speciálních materiálů s případnou povrchovou úpravou se vyznačují životností až desetitisíce cyklů. [7, 19]. Princip nanášení pájecí pasty pomocí šablony je znázorněn na Obr. 1.



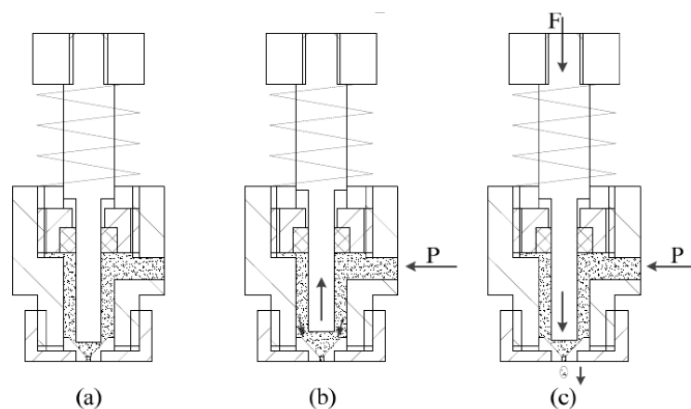
Obrázek 1 - Princip nanášení pájecí pasty pomocí šablony. Převzato z [20]

Bezkontaktní nanášení je založeno na principu dávkování pájecí pasty ručně popřípadě strojově (Obr. 2). Bezkontaktní dávkování se využívá především pro menší série, u kterých by výroba šablony byla neekonomická. Ruční nanášení se také využívá při opravách. Dávkování se provádí vytlačováním pájecí pasty z vhodného zásobníku, který má na konci dávkovací jehlu o malém průměru. Při strojovém nanášení se zásobník postupně pohybuje nad deskou plošných spojů a na pájecí plošky se následně vytlačí vhodné množství pájecí pasty. Tento proces je opakován pro všechny plošky. Při porovnání s kontaktním nanášením je proces nanášení pomalejší. U bezkontaktního nanášení je kladen požadavek na konstantní viskozitu pasty v průběhu nanášení, tak aby byla zachována homogenita nanesené vrstvy. [7, 19]



Obrázek 2 – Bezkontaktní dávkování pájecí pasty. Převzato z [21]

Jet Print je varianta bezkontaktního nanášení pájecích past. Tato metoda vychází z technologie tisku inkoustu na papír, která je již řadu let na vysoké úrovni. Princip spočívá v kmitech piezoelektrických aktořů, které ovládají jehlu (ventil) uzavírající trysku, přes kterou se pod značným tlakem vhání pájecí pasta. Množství nanesené pasty je řízeno dobou otevření trysky (Obr. 3). [22, 23]



Obrázek 3 - Princip metody Jet Print. Převzato z [23]

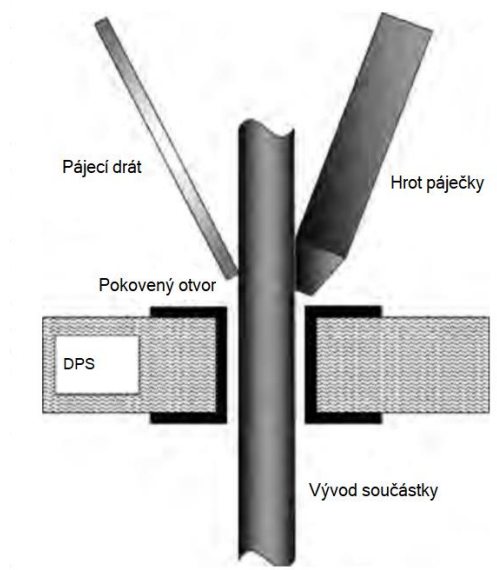
#### 4. Techniky pájení

Popis ideálního pájeného spoje je velice komplexní, ale dá se zjednodušit na pár základních předpokladů. Množství použité pájky by mělo být takové, aby obrys vývodu součástky byl zřetelný pod vrstvou pájky. Zároveň by měl zakrývat celou plochu pájecí plošky. Povrch by měl být lesklý, stříbrné barvy, spojitý, bez ostrých hran a výstupků. Okraje spoje by měly mít ostrý úhel smáčení odpovídající 15-20 °. [1]

Pájení je možné rozdělit na ruční, strojní a na základě toho rozdělit i jednotlivé využitelné metody.

## 4.1. Ruční pájení

V dnešní době se využívá při kusové a malosériové výrobě, pro kterou by bylo neekonomické nastavovat a seřizovat osazovací a výrobní automaty podobně jako linky. V důsledku miniaturizace součástek a pouzder není v některých případech možné ruční pájení ani provést. U těchto miniaturních součástek hrozí poškození vlivem příliš vysoké teploty, která se při ručním pájení složitěji ovládá a koriguje. Významnější využití nachází ruční pájení při opravách a výměnách jednotlivých komponent. [11] Ruční pájení se provádí nejčastěji pomocí hrotové páječky (Obr. 4). Prostřednictvím vyhřívaného hrotu se ohřívají pájené materiály a taví pájecí slitina. Ta se využívá nejčastěji ve formě drátku. Pod ruční pájení spadá také horkovzdušné pájení. Jak název napovídá, tak páječka je tvořena nejčastěji horkovzdušnou pistolí, která umožňuje regulovat rychlost a teplotu vyfukovaného vzduchu. Horkovzdušné pájení se využívá převážně pro osazování SMD komponent pomocí pájecí pasty.



Obrázek 4 - Detail ručního pájecího procesu. Převzato z [11]

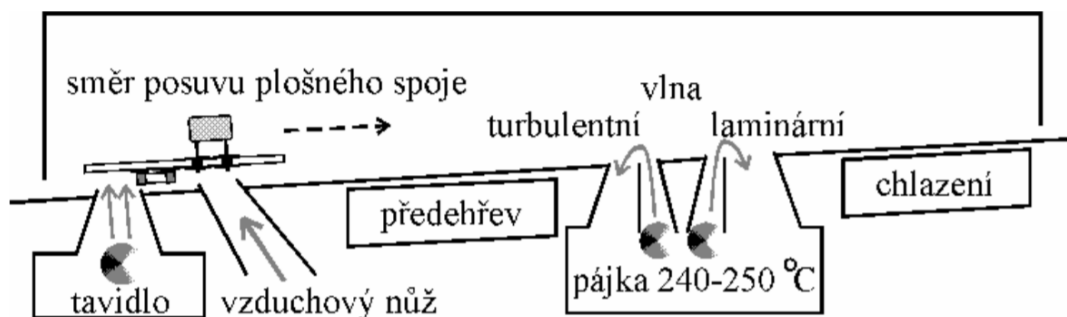
## 4.2. Strojní pájení

Strojní pájení se dá označit také za hromadné či automatické. Výrobní proces je téměř plně automatický, což do značné míry snižuje možnost vzniku chyb zapříčiněných lidským faktorem. Proces strojního pájení se skládá z několika dílčích operací, které se liší v závislosti na využití metodě pájení a na tom, zda se jedná o jednostrannou nebo oboustrannou desku plošných spojů.

### 4.2.1. Pájení vlnou

Je využíváno nejčastěji pro montáž THD součástek nebo pro mix THD a SMD součástek. Pájení vlnou se skládá ze třech základních operací. Na začátku je deska plošných spojů, do které

jsou vloženy THD součástky, SMD součástky jsou přilepeny pomocí speciálního lepidla. Proto je možné SMD součástky připájet, aniž by došlo k jejich odpadnutí. Takto připravená deska je založena na dopravníkovém pásu. Následující operace zahrnuje nanesení tavidla, které je v tekuté formě a nejčastěji je nanášeno nástřikem. Další krok zahrnuje předehřev celé desky na teplotu blízkou bodu tání využitě pájky. Tím dochází k odpařování rozpouštědla z tavidla. Po ohřátí desky následuje pájení pomocí vlny. Vlna je tvořena proudem pájky tak, aby se docílilo dostatečného smočení všech komponent a došlo k zapájení všech součástek. Samotná vlna má většinou dvě části nejprve turbulentní úsek a v těsné blízkosti za ním je laminární část. V těsné blízkosti za pájecí vlnou je pak provedeno odstranění nadbytečné pájky pomocí proudů horkého vzduchu. Nevýhoda výše popsané metody představuje riziko vzniku krápníků a možnost vytvoření nechtěných vodivých můstků mezi součástkami. Vodivý můstek je nežádoucí spojení dvou součástek nebo vodivých ploch či vývodů součástky, ke kterému dochází při procesu pájení. Další nevýhoda je v nutnosti přilepit SMD součástky k DPS před samotným procesem pájení. Grafické znázornění pájení pomocí vlny je na Obr. 5.[1, 7, 11, 24]



Obrázek 5 - Proces pájení vlnou. Převzato z: [25]

#### 4.2.2. Pájení přetavením – Reflow

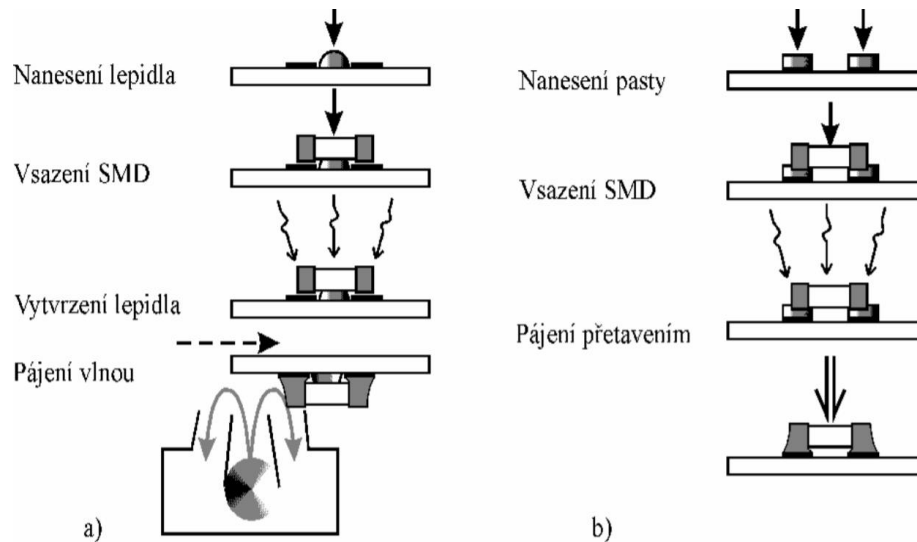
Pájení přetavením je v současné době jedna z nejvíce využívaných metod pájení při hromadné výrobě. Při použití metody reflow je možno dosáhnout maximální hustoty osazení na malé ploše bez velkého rizika vzniku vodivých můstků.

Nejprve je třeba na desku plošných spojů nanést pájecí pastu. Nanášení pájecí pasty je možné provést několika způsoby (viz. kapitola 3.1.1. *Nanášení pájecích past*). Následuje osazení jednotlivých komponent na příslušná místa s nanesenou pájecí pastou. Takto připravená DPS je vložena do pece. Ta může být průběžná – velkokapacitní nebo statická. V peci je deska ohřívána podle předem nastaveného teplotního profilu na požadované teploty. Tím dochází k připájení součástek k desce a následuje postupné ochlazování a poté krok čištění a kvalitativní kontrola. [26]

Ohřev v peci se provádí:

- infračerveným zářením
- horkým plynem
- ohřevem kondenzací par
- vedením tepla

Obr. 6 zobrazuje zjednodušený postup pájení SMD součástky pomocí vlny a přetavením.



Obrázek 6 – a) pájení vlnou, b) pájení přetavením. Převzato z [25]

### Pájení přetavením pomocí laseru

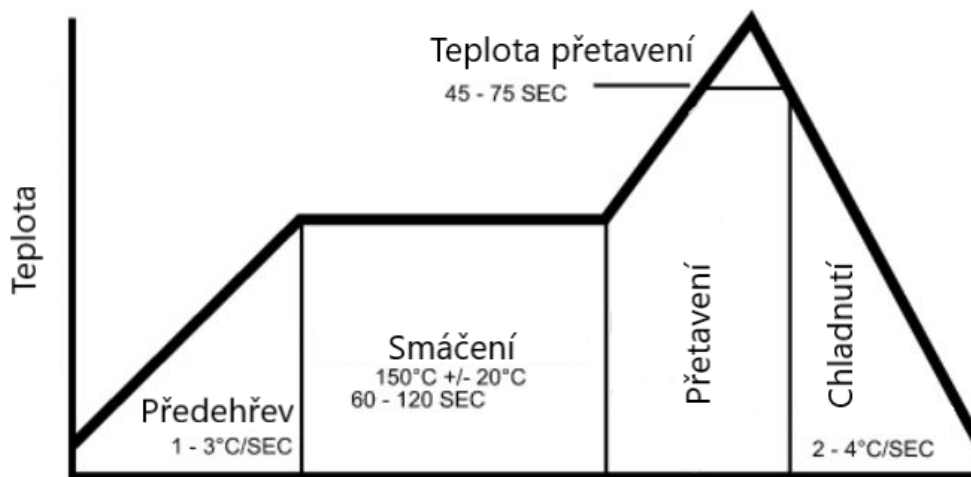
Tato metoda se využívá pro aplikace, kde jsou využity teplotně citlivé součástky, které by při jiné metodě mohly utrpět tepelné poškození. Nejprve je nanášena pájecí pasta, následuje osazení součástek. Místo toho, aby byla následně celá deska ohřívána na požadovanou teplotu, je pomocí zaměřeného laserového paprsku ohříván konkrétní bod s pájecí pastou. Tím dochází pouze k lokálnímu ohřevu a minimálnímu teplotnímu namáhání součástek. Nevýhoda metody je v poměrně pomalé rychlosti pájení, protože je pájen bod po bodu. To činí tuto metodu neefektivní v případě většího počtu pájených součástek. Další omezení představuje nemožnost zapájení součástek, které mají vývody pod pouzdem součástky, například pouzdro typu BGA. [26]

### 4.3. Teplotní profil

Hraje zásadní roli při tvorbě pájených spojů a určuje jejich výslednou kvalitu. Průběh teploty v čase při metodě reflow je většinou možno rozdělit do čtyř zón (Obr. 7). První zóna se nazývá přehřev. Zde je požadován mírný nárůst teploty až k teplotě, při které dochází k aktivaci tavidla a k odpařování rozpouštědla z pájecí pasty. V případě příliš vysoké teploty

v této zóně by došlo k odpaření nadměrného množství tavidla, což vede ke špatné smáčivosti a výsledný spoj nebude splňovat požadované parametry. Následuje zóna smáčení, kdy dochází k odpaření posledních zbytků rozpouštědla a k celkovému prohřátí celé desky na stejnou teplotu. Tavidlo, zde začíná redukovat oxidy na pájených površích, a tím dochází k optimalizaci smáčení ploch. Předposlední je zóna přetavení. Teplota by měla být přibližně o 20 °C vyšší, než je teplota tavení pájecí slitiny. Při této teplotě přechází pájecí pasta do tekuté podoby, a tím dochází ke vzniku povrchového napětí, které zapříčiňuje vzlínání tekuté pájky. Nadměrně vysoká teplota může vést také k tepelnému poškození pájené součástky. V případě, že doba trvání nebo teplota nebude dostatečná, nedojde k vytvoření pájeného spoje. Poslední zóna slouží k ochlazení. Zde by mělo dojít k pozvolnému vychladnutí součástky, aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí vlivem teplotních výkyvů.

Každý výrobce pájecích past má pro své výrobky v technickém listu uvedený vhodný rozsah teplot a časů pájecích profilů pro dosažení jím deklarovaných vlastností.



Obrázek 7 - Teplotní profil. Převzato z [27]

## 5. Testy pájených spojů

Pro ověřování vlastností pájených spojů jsou zavedeny platné normy, které stanovují přesné podmínky a podobu jednotlivých testů. To především za účelem snadného a objektivního srovnávání pájených spojů.

### 5.1. Mechanické namáhání

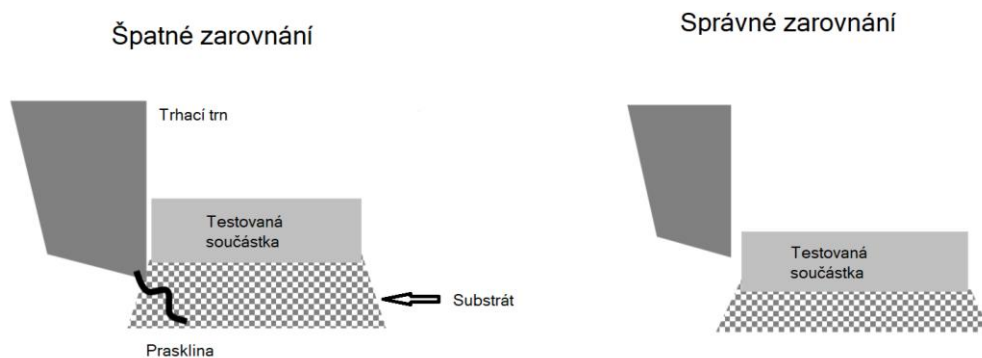
Mechanické vibrace a změna teplot způsobené provozním prostředím nejčastěji vedou k poškození pájeného spoje. Toto namáhání má nejčastěji cyklický charakter. Je dlouhodobé a pozvolné. Pro optimalizaci pájených spojů a zajištění požadované spolehlivosti výsledných

výrobků je žádoucí analyzovat mechanické vlastnosti pájených spojů. [28] Mechanické zkoušky pájených spojů se provádí pomocí zkoušky stříhem, tahem, krutem, ohybem, vibracemi atd. Zkoušky jsou ve všech případech destruktivního charakteru a je vhodné je vykonávat na zkušebních prototypch. [29]

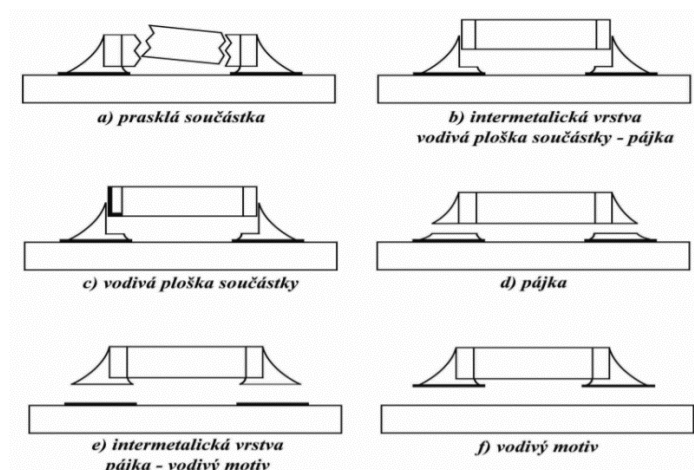
### 5.1.1. Zkouška stříhem

Je definována normou ČSN EN 62137–1–2 [30], jako zkouška pevnosti ve smyku. Tato metoda je použitelná pouze pro bezvývodové součástky tedy SMD. Touto metodou nelze hodnotit součástky s více vývody, flip-chip technologii a vývody typu gull wing (rackové křídlo). Tato norma je vhodná pro hodnocení životnosti pájeného spoje mezi vývodem součástky a ploškou na substrátu pomocí mechanického namáhání ve smyku. Zkouška se vyhodnocuje na základě síly, která je potřebná pro utrnutí součástky od substrátu. Pro dosažení adekvátních výsledků zkoušky je nutné zajistit správné zarovnání trhacího trnu se součástkou. Při špatném zarovnání může dojít k předčasnému popraskání pájky, a tím ovlivnit výsledky měření. [30, 31]

Rychlost posunu trhacího trnu je v normě uváděna v rozmezí 0,5 mm/min až 9 mm/min. Z tohoto rozmezí byla vybrána rychlost 1 mm/min. Posunem trnu vzrůstá síla působící na součástku, až dochází k porušení pájeného spoje a odtržení součástky od substrátu. V normě jsou také uvedeny možná místa destrukce spoje. Síla, při které došlo k odtržení součástky, se považuje za výslednou. Výška trhacího trnu oproti substrátu musí být taková, aby se opírala minimálně o  $\frac{3}{4}$  výšky testované součástky. Grafické znázornění tohoto požadavku je na Obr. 8. Možné odtržení součástky je vyobrazeno na Obr. 9 [30]



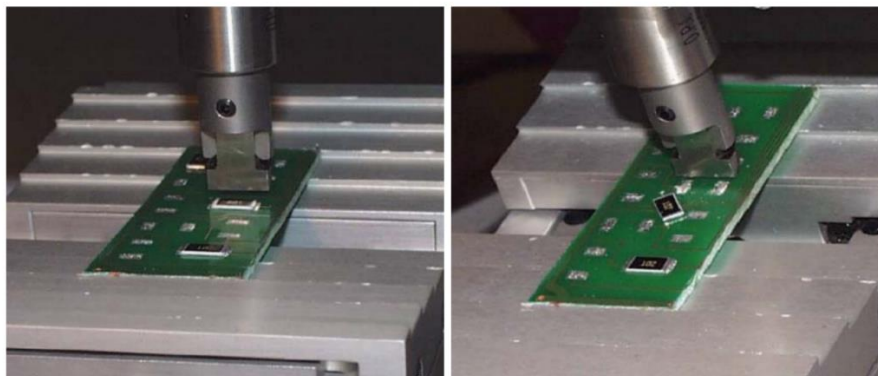
Obrázek 8 - Nastavení trhacího trnu. Převzato z [31]



Obrázek 9 – Možné odtržení součástky při testu stříhem. Převzato z [30]

### 5.1.2. Zkouška tahem

Zkouška tahem je podobná svým principem zkoušce stříhem popsané v kapitole 5.1.1, avšak zde síla nepůsobí ze strany, ale působí směrem kolmo od substrátu. Tato metoda testování je vhodná pouze pro SMD součástky. Pro zjištění síly je nutno upnout součástku do speciálních čelistí (Obr. 10). Práce s tímto speciálním přípravkem je kompilovaná a složitá. Zkouška stříhem je vhodná pro porovnání relativní síly různých druhů spojů a různých pájecích slitin. [32]



Obrázek 10 - Zkouška tahem. Převzato z [32]

### 5.1.3. Zkouška proti odtržení

Norma ČSN EN 62137–1–1 [33] popisuje metodiku této zkoušky. Jedná se o destruktivní metodu zkoušky. Na základě výsledků je možné vyhodnotit pevnost proti odtržení součástky pod úhlem 45 °.

## 5.2. Elektrické zkoušky

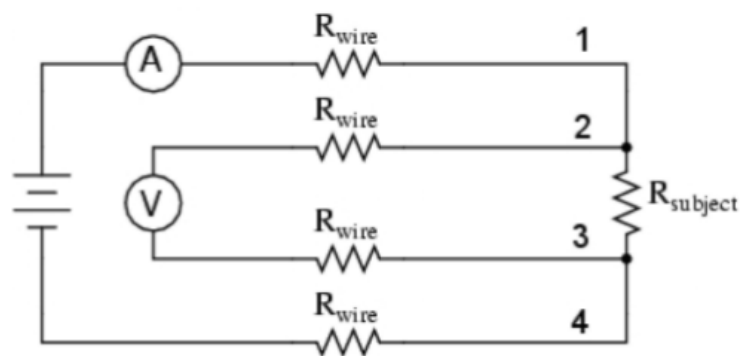
Posuzování pájených spojů z elektrického hlediska se provádí na základě hodnoty elektrického odporu. V některých případech se provádí testování vodivých cest a propojů pomocí



speciálních přípravků nebo přístrojů, které prostřednictvím kontaktovacích sond měří mezi určitými body, zda jsou mezi sebou vodivě propojené.

### 5.2.1. Měření elektrického odporu

Jelikož se měří elektrický odpor pájeného spoje, jenž by měl mít ze své podstaty co nejmenší odpor, a tedy největší vodivost, pohybují se hodnoty odporu v řádu  $10^{-5} \Omega$ , proto je nutné vzít v úvahu i parazitní odpory přívodních vodičů a měřících hrotů. V případě měření takto malé hodnoty odporu pomocí běžné dvouhrotové metody vznikne značná chyba. Z tohoto důvodu se pro měření velmi malých hodnot odporů využívá čtyřbodová metoda (Obr. 11). Její princip spočívá ve využití čtyř elektrod. Vnější dvě elektrody slouží k přivedení konstantního proudu a vnitřní elektrody slouží pro měření napětí. Výhoda čtyřbodové metody je tedy taková, že se při měření neuplatní odpor přívodu k proudovým kontaktům a ani jejich přechodový odpor. Odpor voltmetru je značně větší, než měřený odpor, což způsobí to, že skrz voltmetr neteče téměř žádný proud. Díky tomu, že proud skrz voltmetr je minimální oproti neznámému měřenému odporu, je možné zanedbat odpory přívodních kabelů k voltmetru. Ze změřených hodnot napětí a známých hodnot proudu je následně možno dopočítat měřený odpor. Odpor pájeného spoje je tvořen několika dílčími odpory. Konkrétně se jedná o odpor pájeného substrátu, odpor tvořený intermetalickou vrstvou mezi pájecí ploškou a pájkou, odporem samotné pájky, odporem intermetalické vrstvy mezi pájkou a vývodem součástky a odporem vývodu součástky. [34, 35]



Obrázek 11 - Schéma čtyřbodové metody. Převzato z [35]

## 6. Vodivé vrstvy

Pro vytváření vodivých cest jsou nejčastěji využívány tři postupy. Jedná se o aditivní, subtraktivní a semiaditivní metody. Subtraktivní metoda spočívá v odstranění přebytečné mědi (leptání, frézování). Aditivní, jak název napovídá je založena na nanesení vodivého motivu na základní substrát a semiaditivní je založená na kombinaci dvou předešlých metod.

V případě semiaditivní metody je nejprve na nosný substrát naplátovaná pomocí tlaku a teploty elektrolyticky vyloučená měděná folie. Po celoplošném naplátování měděné folie je

nanesen fotorezist, který se překryje filmem s vytvářeným motivem. Následuje osvětlení fotorezistu přes motiv. Po vyvolání je získán negativní motiv budoucích spojů. Provede se galvanické zesílení mědi a nanese se leptuvzdorný rezist (cín) na místech odkrytých fotorezistem. Následuje odstranění fotorezistu a je možné přikročit k leptání mědi. Při leptání může dojít k podleptání motivu a je žádoucí tomu předejít. Předposledním krokem je očištění zbytků leptadla a odstranění cínového rezistu. Na očištěnou desku se nanese fotocitlivá nepájivá maska, která se překryje filmem s odpovídajícím motivem. Po osvětlení a vymytí neexponovaných míst se provede teplotní vytvrzení.

Nejčastější tloušťky nanášených měděných folií jsou 18, 35, 70, až 350  $\mu\text{m}$ . Pro některé aplikace se využívají ultratenké měděné folie o tloušťkách 5-9  $\mu\text{m}$ .

Pro zajištění minimální rezistivity vodivých cest se využívá velmi čisté mědi, která má čistotu minimálně 99,85 %. Maximální adheze mezi měděnou vrstvou a základním substrátem se zajistí pomocí vložení tenké vrstvy z chromu nebo monelu. Využitá měď by měla mít dobrou tažnost, aby odolala rozměrovým změnám a nedocházelo ke vzniku trhlin. [7]

Šířka vodivé cesty ovlivňuje její rezistivitu a proudovou zatížitelnost. Při návrhu DPS je třeba vzít do úvahy již zmíněnou proudovou zátěž, umístění na desce, délku a tloušťku vodivých cest. [25, 36]

### Odpor vodivé vrstvy

Odpor vodiče  $R$  [ $\Omega$ ] se dá popsat vztahem

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w} \quad (1)$$

Kde  $\rho$  je měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],  $l$  je délka vodiče [m],  $S$  je průřez vodiče [ $\text{m}^2$ ],  $t$  je výška vodivé vrstvy [m],  $w$  je šířka vodivé vrstvy [m].

Měrný elektrický odpor představuje materiálovou konstantu a například pro měď činí  $\rho_{\text{Cu}}=17,8 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ , cín  $\rho_{\text{Sn}}=170 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ , stříbro  $\rho_{\text{Ag}}=16 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$  a zlato  $\rho_{\text{Au}}=24 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ . Teplotní závislost měrné elektrické rezistivity je přibližně 0,4 %/ $^{\circ}\text{C}$ . [25]

### Indukčnost plošného vodiče

Indukčnost  $L$  [H] se dá vypočítat pomocí vzorce.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot l \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{t+w} \right) + 0,5 + 0,2235 \cdot \left( \frac{t+w}{l} \right) \right] \quad (2)$$

Kde  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita daného materiálu [-]. [25]

## 6.1. Vodivé vrstvy na flexibilních materiálech

Ohebné obvody jsou formou tištěných spojů vytvořených na tenkých a flexibilních substrátech. To přináší možnost je ohýbat, a tím vytvořit zapojení, které by jinak nebylo proveditelné. Z tohoto důvodu mají flexibilní obvody značné výhody oproti klasickým neohebným DPS. Flexibilní obvody plní častěji funkci propojovací, než aby primárně sloužily pro montáž elektronických součástek.

Nosný prvek ohebných DPS je možné vytvořit z široké škály rozdílných materiálů, ale nejčastěji je využíváno polyimidové fólie (PI) nebo PET fólií. Vodivou vrstvu spoje tvoří převážně válcovaná žíhaná měděná folie (RA – Rolled Annealed Copper Foil). Pro zajištění všech požadovaných vlastností pružného obvodu je třeba přidat krycí vrstvu (Coverlay) a výstužné vrstvy (Stiffener layer). V tabulce 3 je uveden stručný souhrn využívaných materiálů, ze kterých jsou často vyráběny flexibilní plošné spoje. [14]

Tabulka 3 - Materiály využívané pro výrobu flexibilních DPS.

Aplikace	Materiál
<b>Základní substrát</b>	Polyimidové fólie (DuPont-Kapton K, E, EN, KJ; DuPont-Pyralux LF; Kaneka-Apical NP, FP; Ube-Upilex S; Epoflex MSC), kapalná polyimidová pryskyřice, PEN folie, LCP folie
<b>Vodivý materiál</b>	Ultra tenké měděné folie, nerezová fólie, naprášená měď, slitiny mědi
<b>Lamináty</b>	Bezlepidlové lamináty (litý typ, naprašovaný/pokovený typ, laminovaný typ)
<b>Krycí vrstva</b>	Photoimageable coverlay (PIC) (suchý, tekutý inkoustový typ)
<b>Přílnavá vrstva</b>	Tavná polyimidová fólie

*Převzato z [14]*

Na vodivé vrstvy je kladen požadavek na dynamickou flexibilitu a pružnost. Nejčastěji je možné se setkat s válcovanou žíhanou měděnou fólií. Pro vytvoření flexibilních vodivých cest byla vyvinuta elektricky nanášená měď s vysokou tažností (HD-ED). Jako levnější varianta je někdy využívána také tenká hliníková fólie. Pro mechanicky náročné aplikace je využíváno tenké nerezové fólie a různých slitin mědi. Slitina z niklu a chromu je využívána pro vodivé vrstvy ve flexibilních topných obvodech. Při ohýbání flexibilního spoje pod velkým rádiusem dochází na vnější straně k pnutí a na vnitřní straně ke kompresi. Takto vyvolané namáhání může vést až k popraskání vodivé vrstvy. Z tohoto důvodu je vhodné zajistit to, aby vodivá vrstva byla z obou stran obklopena, pokud možno stejným materiálem. Tím se docílí stejného rádiusu ohnutí pro oba směry. Pro dosažení většího rádiusu ohybu je vhodné vytvořit co nejtenčí profil flexibilního spoje. Tím dojde ke zmenšení rozdílných sil působících v místě ohybu. Pájení na ohybné

flexibilní spoje je limitováno velice křehkou intermetalickou vrstvou vytvořenou mezi vodivou vrstvou a pájkou. Tato vrstva snese pouze nepatrné ohyby, než dojde k jejímu porušení. Proto je nutné pájené součástky umístit mimo místo ohybu. V bodech určených pro pájení je vhodné dané místo plošně vyztužit. [14, 37]

## 6.2. E-Textilie

Inteligentní textilie se definují jako textilní výrobky z vláken, nití, příze spolu s tkanými, pletenými nebo netkanými textilními strukturami, které se dokážou interagovat s prostředím nebo člověkem. E-textilie vynikají svými specifickými vlastnostmi, které zahrnují vyspělé elektronické funkce, nízkou hmotnost, a flexibilitu. Dá se předpokládat, že v nadcházejících letech se začnou využívat E-textilie, které budou snímat důležité životní funkce jejich nositele, plnit funkci pohybových senzorů, sloužit k ohřevu, popřípadě ochlazování. Světelné a jiné vizuální aspekty E-textilii si zajisté rovněž najdou své uplatnění v blízké budoucnosti.

E-textilie je možné rozdělit do těchto skupin.

- Pasivní – jsou schopné pouze interakce s okolím na základě základních senzorů.
- Aktivní – reaktivní snímání podmětů z okolí. Dokážou plnit funkci akčních prvků.
- Velmi chytré – detekují, reagují a přizpůsobují se okolnímu prostředí.

Po E-textiliích je požadováno, aby byly pratelné, omyvatelné, prodyšné a zdravotně nezávadné. Nejčastěji je těchto požadavků docíleno pomocí běžných textilií a látek, do kterých jsou všity nebo vpleteny vhodné vodiče. Jinou cestou je vytvoření E-textilie ze speciálních nití, které již obsahují vodiče či jiné elektricky vodivé materiály. Tyto vodiče následně slouží pro napájení a přenos dat, popřípadě jako pasivní nebo aktivní senzory. Největší problém představuje zajištění napájení a vytvoření takových vodivých cest, které budou schopné být dlouhodobě vystaveny otřesům, vlhkosti, teplotě, agresivnímu potu, ohýbání, natahování, praní atd. [38–40]

### 6.2.1. Tkaniny

Jako tkanina je označován plochý textilní útvar, který vzniká provázáním dvou soustav nití se vzájemnou vazbou. Vazné body vznikají překřížením nití v pravém úhlu. Vazba tkaniny představuje systém, kterým jsou nitě (konstrukční prvky) vzájemně provázány. U tkanin se vyhodnocují nejčastěji tyto parametry. [41]

- Plošná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
- Tloušťka [m]
- Jemnost nitě [tex]
- Objemová měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

## 7. Tenké vrstvy

Jedná se o amorfni, polykrystalické nebo monokrystalické struktury, které byly vytvořeny řízeným nanášením materiálu ve vakuu. Tyto metody se nazývají naprašování a napařování. Za tenké vrstvy lze považovat materiály, které mají tloušťku v rozmezí desítek nanometrů až několik mikrometrů. Následkem je, že pro tyto vrstvy neplatí tytéž fyzikální konstanty jako u objemových materiálů. Tenké vrstvy se pro své specifické vlastnosti používají v elektronickém a strojírenském průmyslu, energetice a v neposlední řadě jako dekorativní vrstvy. Tenké vrstvy se využívají jako otěruvzdorné povlaky u vrtáků a jiných řezných nástrojů.

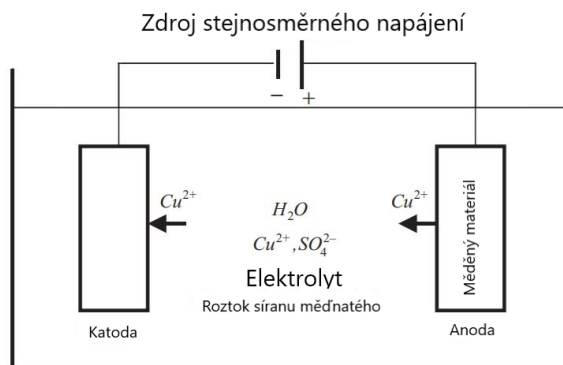
Často je možné se setkat s optickými povlaky upravující antireflexní či jiné optické vlastnosti čoček a průhledných substrátů. V elektrotechnice se využívají pro realizaci většiny polovodičových součástek a obvodů. Pro svoje vlastnosti si tenké vrstvy našly uplatnění i ve fotovoltaických panelech. Zde slouží k vytvoření průhledné vodivé vrstvy ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ) umožňující sběr elektronů z celého povrchu článku. Odporové transparentní tenké vrstvy je možné použít pro vyhřívání transparentních substrátů pomocí Joulova tepla nebo pro svod elektrostatického náboje z transparentních vrstev. [42, 43]

### 7.1. Elektrické vlastnosti tenkých vrstev

Z pohledu elektrické vodivosti lze tenké vrstvy rozdělit na dielektrické, odporové, polovodivé, vodivé a supravodivé. [42] Vodivost kovových tenkých vrstev je závislá na jejich tloušťce. Pro tloušťky do 150 nm platí Sondheimerův vztah. V těchto tloušťkách jsou částice náhodně rozptýleny na povrchu substrátu a elektrická vodivost je nelineární v závislosti na tloušťce. Nad 150 nm je možné elektrickou vodivost popsat Ohmovým zákonem. [44]

## 8. Galvanické pokovování

Někdy také označované jako elektrochemické pokovování je proces, při kterém dochází k tvorbě jednotného homogenního přilnavého povlaku nejčastěji z kovu nebo různých slitin na povrchu vodivého materiálu. Galvanické pokovování se využívá za účelem vytvoření dekorativního a ochranného povlaku nebo za účelem zvýšení specifických vlastností pokovovaného povrchu. Pod galvanické pokovování patří: mědění, zinkování, chromování, niklování, cínování, zlacení a stříbření. V elektrotechnickém průmyslu se mědění využívá pro zvýšení vodivé vrstvy a pro vytvoření vodivých povlaků. Pokovovaný materiál musí mít elektricky vodivý povrch, aby bylo možno zajistit průchod elektrického proudu. Galvanické pokovování je založeno na elektrolytickém článku. Ten je složen z anody, katody, zdroje stejnosměrného proudu a elektrolytu (Obr. 12). [45]



Obrázek 12 - Princip galvanického pokovení. Převzato z [46]

Katoda je tvořena materiálem, na kterém dochází k pokovení. Anoda může být dvojího typu. Rozpouštěná, někdy také označovaná jako obětovaná nebo trvalá (inertní). Rozpouštěná anoda je tvořena kovem například mědí, která má být nanesena na katodu. Inertní anoda může být z platiny nebo uhlíku a slouží pouze pro uzavření elektrického obvodu a nedochází k jejímu rozpouštění. Elektrolyt je tvořen roztokem kovových solí, tedy iontových sloučenin, v nichž je kov v oxidické formě vázán jako kation (kladný iont) s příslušným aniontem (záporný iont). Tyto soli jsou tvořeny ze stejného materiálu jako anoda a nejčastěji jsou rozpustné ve vodě. V případě mědění se elektrolytické roztoky vytváří alkalickými kyanidovými lázněmi  $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CN})$  nebo kyselými lázněmi  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (modrá skalice) s příměsí kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), která zvyšuje vodivost roztoku, a to umožňuje pracovat s vyšší proudovou hustotou. [46]

### Katodická a anodická reakce

Připojením stejnosměrného proudu na katodu a anodu ponořených do elektrolytu dojde ke štěpení elektrolytického roztoku kovových solí na jednotlivé kladně a záporně nabitě ionty. Ty mají kladný ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) nebo záporný ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) náboj. Na záporné elektrodě (katodě) jsou vylučovány kationty a na kladné elektrodě (anodě) jsou naopak vylučovány anionty. Vyloučením aniontů na kladné elektrodě dochází k jejich oxidaci a vyloučením kationtů na katodě dochází k jejich redukci. Kationt se pomocí migrace pohybuje až na hranici katodické difuzní vrstvy. Ta je tvořena na rozhraní mezi elektrolytem a katodou. Přes tuto vrstvu se kationt pohybuje pomocí difuze, která je popsána pomocí Fickových zákonů. Dále proběhne chemická reakce a kationt v podobě komplexní sloučeniny putuje k anodě. Zde dochází k redukci z iontového stavu a proběhne povrchová difuze. [46, 47]

### Faradayův zákon elektrolýzy

V roce 1834 M. Faraday (1791-1867) objevil závislost mezi množstvím vyloučeného materiálu  $m$  [g] na elektrodě a velikostí elektrického náboje. „Množství vyloučené látky účinkem elektrického proudu je přímo úměrné velikosti elektrického náboje prošlého elektrolytem.“[48]

$$m = A_e \cdot I \cdot t \quad (3)$$

Kde  $m$  je množství látky vyloučené vlivem průchodu proudu [g],  $A_e$  je elektrochemický ekvivalent, tj. množství látky vyloučené nábojem 1 coulomb = 1 ampér protékající za 1 sekundu [ $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$ ],  $I$  je elektrický proud [A],  $t$  je čas [s].

Hmotnost naneseného materiálu na anodu se dá určit také ze vztahu.

$$m = \frac{M \cdot Q}{F \cdot z} = \frac{M}{F \cdot z} \cdot \int I dt \quad (4)$$

Kde  $M$  je molární hmotnost materiálu anody [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ],  $Q$  je elektrický náboj prošlý anodou [C],  $F$  je Faradayova konstanta  $96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $z$  je valenční číslo iontů materiálu na anodě.

Druhý Faradayův zákon stanovuje elektrochemický ekvivalent „množství různých látek vyloučených na elektrodách průchodem stejnosměrného elektrického náboje je v poměru svých ekvivalentů.“[48]

$$A_e = \frac{\alpha}{F \cdot v} \quad (5)$$

Kde  $\alpha$  je hmotnost kilomolů (pro měď  $\alpha = 63,57 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ),  $n$  je mocnost kovového kationtu v lázni.

Spojení obou Faradayových zákonů

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \rightarrow t = \frac{M \cdot I}{n \cdot F \cdot m} \quad (6)$$

Tloušťka  $h$  [m] nanesené vrstvy na anodu se určí podle vztahu.

$$h = \frac{m}{\delta \cdot A} = \frac{M}{F \cdot z \cdot \rho \cdot A} \cdot \int I dt \quad (7)$$

Kde  $\rho$  je hustota kovu [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $A$  je plocha nanesené vrstvy [ $\text{m}^2$ ].

## 9. Spolehlivost a vady pájených spojů

Při výrobě a provozu je deska plošných spojů i samotné pájené spoje vystaveny velkému množství faktorů a vlivů, které mohou vést k poškození či znehodnocení DPS nebo pájeného spoje. Nejčastěji se jedná o elektrické, mechanické a tepelné namáhání. Provozní podmínky, kterým je výsledný produkt vystaven mohou ovlivnit životnost a funkčnost výrobku. Již při samotném návrhu DPS je nutné brát tyto všechny faktory v úvahu a přizpůsobit jim návrh DPS, tak aby došlo k jejich minimalizaci.

Značný vliv na kvalitu a jakost výsledného pájeného spoje má také použitý materiál nosného substrátu a jeho povrchová úprava. Kvalitu spoje ovlivňuje použitá pájecí slitina s daným tavidlem. V neposlední řadě také záleží na zvoleném procesu pájení a jeho parametrech. Při volbě metody pájení je nutné zohlednit použité součástky na dané DPS a podle toho volit příslušnou metodu pájení. Nastavený teplotní profil pájecího procesu a samotná teplota přetavení výrazně ovlivňují výslednou kvalitu pájeného spoje. Nevhodné nastavení teplotního profilu

může způsobit vyšší výskyt voidů (dutin), zvednutí součástek z pájecích ploch (tombstoning), nedostatečné přetavení pájky, či rozstříknutí tavidla. V nejhorším případě může dojít k tepelnému poškození samotných součástek umístěných na DPS. [49, 50]

Složení pájecí pasty určuje, při jakých teplotách dochází k tání a tuhnutí. Má také vliv na viskozitu, která ovlivňuje proces nanášení na pájecí plošky. Tavidlo, které je ve většině případů součástí pájecí pasty a při ručním pájení se přidává manuálně či je již v duté trubičce, ovlivňuje výsledné vlastnosti spoje. Tavidla mají různé aktivační teploty a je nutné přizpůsobit výběr tavidla teplotám potřebných pro daný proces. Při dlouhém skladování pájecích past může docházet k vytěkání aktivních složek tavidel a snižuje se tak jejich účinnost.

Nevhodné podmínky při skladování mohou mít za následek zvýšený výskyt nečistot na povrchu DPS. Tyto nečistoty mohou způsobit elektrické zkraty či nevhodně ovlivnit chlazení jednotlivých součástek. [49–51]

Vady na DPS mohou nastat vlivem pochybení při osazovacím procesu. Jedna z možných příčin vedoucí k chybě je špatné množství přidané pájecí slitiny, či pájecí pasty. V případě pájecí pasty je žádoucí, aby byla symetricky rozložena na celé pájecí plošce. Také aby měla správnou výšku a byla vycentrována s pájecí ploškou. Je nezbytné proto šablonu pro tisk precizně umístit na osazovanou desku. Ucpání či zašpinění šablony může mít za následek to, že pasta není na danou pájecí plošku vůbec nanášena nebo je jí málo. Další chyby mohou vzniknout při umístění součástek. Ty mohou být umístěny na špatnou pozici nebo být vůči pájecí plošce vyosené. U některých součástek záleží také na správné orientaci, například u diod. Tyto chyby jsou pro výsledné DPS zásadní a je vhodné je proto minimalizovat. Za tímto účelem jsou do výrobního procesu vloženy mezioperační kontroly. Tyto kontroly jsou často prováděny pomocí speciálních kamer a vyhodnocovacích algoritmů. Cílem je zamezení toho, aby prošla vadná DPS celým procesem osazování a pájení, a nakonec vyšlo najevo, že již při první operaci došlo k chybě a následně všechny další kroky byly zbytečné a neekonomické.



## Praktická část

Praktická část této práce byla věnována vytváření, měření, vyhodnocení elektrických a mechanických vlastností zhotovených vodivých vrstev a pájených spojů na testovacích vzorcích. Vodivé motivy byly vytvořeny na rozdílných základních substrátech a z různých vodivých past nanesených pomocí multifunkční tiskárny obvodů Voltera V-One (Voltera, Kanada) [52]. Tato multifunkční tiskárna díky svojí konstrukci a principu umožňuje vytvoření prototypové desky plošných spojů v rámci desítek minut. Voltera V-One má pracovní plochu o rozměrech 128 mm x 116 mm, což do značné míry omezuje její využití. Voltera V-One je schopna vytvořit vodivé spoje a pájecí plošky na vložený základní substrát z nahraného Gerber souboru (.gbr), a to včetně vyvrtání otvorů pro vkládání THD komponentů.

Otvory jsou vytvářeny pomocí speciální vrtací hlavy, která se dodatečně připojuje k tiskárně. Vodivé cesty jsou nanášeny pomocí dávkovače, z kterého je mechanicky vytlačována výrobcem dodávaná speciální vodivá pasta (Voltera, Kanada). Tato pasta se následně musí zapéct při stanovené teplotě po daný čas. Na zapečenou pastu je možné již přímo pájet SMD součástky. Předností tiskárny je možnost nanášení pájecí pasty na vytvořené DPS, ale také je možné nanášet pájecí pastu na DPS vyrobené konvekčními metodami. Integrovaná vyhřívaná podložka umožňuje vytvrzení nanesené vodivé pasty a také následné zapájení SMD součástek pomocí metody reflow. Tyto vlastnosti umožňují využít Volteru V-One pro vytváření prototypových a zkušebních DPS v řádu desítek minut na pracovním stole s minimálními náklady.

Další kapitola praktické části se věnuje možnostem vytváření vodivých vrstev na pružných a flexibilních materiálech. Byly zkoumány možnosti a perspektivita tvorby vodivých vrstev na tkaniny a flexibilní substráty pomocí pružných vytvrzovacích past nanášených pomocí tiskárny Voltera V-One.

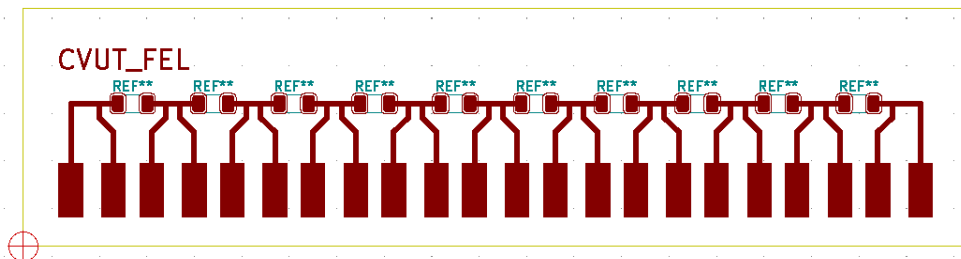
## 10. Výroba testovacích DPS

Pro stanovení mechanických a elektrických vlastností vytvořených vodivých vrstev pomocí tiskárny Voltera V-One a pájených spojů bylo nutné navrhnout testovací destičky s vhodným vodivým motivem. Tyto testovací destičky musí umožňovat stanovení elektrického odporu pájených spojů pomocí čtyřbodové metody. Motiv a velikost destiček bylo nutné také přizpůsobit dostupnému přípravku sloužícímu pro upevnění a následné stanovení mechanických vlastností pomocí zkoušky stříhem pájených spojů. Aby bylo možné změřená data považovat za spolehlivá, je vhodné na testovací destičku umístit nejméně 10 pájecích plošek. Z provedených měření bylo následně možné určit aritmetické průměry a směrodatné odchylky měřených hodnot.

Pro návrh DPS jsem využil volně dostupný program KiCad pod licencí open source. V tomto programu bylo vytvořeno několik návrhů desek plošných spojů splňující dříve uvedené

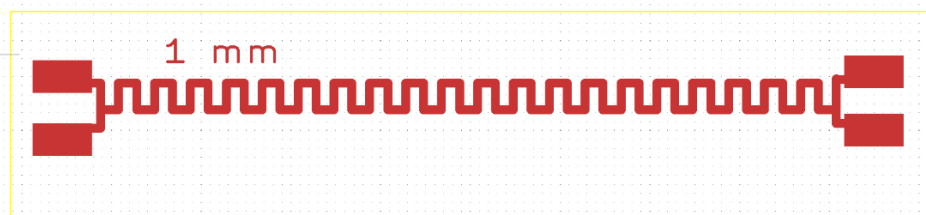
předpoklady. Jako součástky pro hodnocení pájitelnosti vodivých cest byly zvoleny nulové rezistory s pouzdrům 1206 (3,2 mm x 1,6 mm). Pájecí plošky byly vybrány z dostupné knihovny v programu KiCad pro daný rozměr pouzdra.

Vytvořený motiv byl následně vytištěn na základní substráty o rozměrech 100 mm x 25 mm v případě FR4 a pro vzorky z korundové keramiky měly destičky rozměr 50 mm x 25 mm. Šířka destiček byla zvolena na základě rozměrů přípravku pro měření mechanických vlastností. Na Obr. 13 je zobrazen návrh DPS pro FR4 v programu KiCad.



Obrázek 13 - Návrh nepružné DPS v programu KiCad.

Pro určení vlastností a případného potenciálu vytvořených vodivých vrstev na flexibilních materiálech a tkaninách byl navrhnut meandrový tvar vodiče, který má na obou koncích dvě plošky umožňující změřit odpor vodivé vrstvy pomocí čtyřbodové metody. Šířka vodivé cesty byla zvolena 0,5 mm a 1 mm. Na Obr. 14 je zobrazen tento návrh v programu KiCad.



Obrázek 14 - Návrh flexibilní DPS v programu KiCad.

## 11. Měření mechanických vlastností pájených spojů – zkouška stříhem

Mechanická zkouška pájených spojů byla prováděna pomocí trhačky Deform 02/15 (Pemar s.r.o., Česká republika) (Obr. 15) a přípravku pro upnutí DPS. K trhačce byl připojen počítač pro její ovládání a odečítání naměřených hodnot. Trhačka byla nastavena tak, aby její posun v ose Z byl jeden milimetr za minutu.

Měřený vzorek DPS byl nejdříve upnut do přípravku (viz. kapitola 5.1.1.). Po upnutí vzorku byla následně provedena mechanická zkouška stříhem. Program průběžně ukládá naměřené hodnoty síly a posunu čelistí do textového dokumentu.



Obrázek 15 - Trhačka Deform použitá pro vyhotovení zkoušky stříhem.

## 12. Měření elektrických vlastností vodivých cest a pájených spojů

Pro minimalizování parazitních vlivů při měření malých hodnot elektrického odporu pájených spojů byla využita čtyřbodová metoda. To bylo možné, protože motiv testovacích DPS byl za tímto účelem uzpůsoben a každý vývod od měřené součástky měl dvě měřicí plošky, na které bylo následně možné připojit měřicí hroty přístroje. Pro měření byl využit přístroj MM2030 (Kust Elektronik GmbH, Německo) a přípravek pro snadné a rychlé připojování měřeného vzorku (Obr. 16). Pro měření elektrického odporu u flexibilních vzorků s vodivým meandrem bylo nutné zhotovit měřicí kabel, který umožňuje čtyřbodové připojení pomocí krokodýlových svorek. U flexibilních materiálů byl měřen vliv ohnutí v daných poloměrech na hodnotu elektrického odporu.



Obrázek 16 - Přístroj MM2030 pro měření malých odporů.

## 13. Tisk vzorků

Vzorky byly tištěny na základní materiály ze třech vodivých past (inkoustů). Z toho dvě pasty jsou určeny pro neohebné substráty a jedna je určena pro flexibilní substráty. Tyto pasty jsou tvořeny organickou směsí s obsahem stříbra, které zajišťuje vodivost. Využité pasty jsou uvedeny v tabulce 4. Přesné složení past není možné dohledat, ale lze předpokládat, že označení představuje pouze výrobní šarži s doporučenou dobou použití. U práce s pastami je však patrný rozdíl v konzistenci a lehce odlišné barvě.

Tabulka 4 - Použité vodivé pasty.

Typ	Označení	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení [min]	Datum spotřeby
Conductor 2	NiftyNaga	190	30	14.12.2021
Conductor 2	OrdinaryOgre	190	30	11.05.2022
Flex Conductor 2	BossyBass	170	30	05.11.2022

Vzorky na neohebných substrátech byly vytvářeny z past s označením NiftyNaga a OrdinaryOgre. Flexibilní substráty a tkaniny byly potištěny pomocí pasty BossyBass. Výrobce udává plošný odpor past typu Conductor 2 je  $2,05 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  pro vrstvu  $50 \text{ }\mu\text{m}$  a měrný odpor je  $1,265 \cdot 10^{-17} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$  určený čtyřbodovou metodou. Plošný odpor pasty Flex Conductor 2 je  $3,29 \text{ m}\Omega/\text{sq}$  pro vrstvu  $45 \text{ }\mu\text{m}$  a měrný elektrický odpor je  $1,3 \cdot 10^{-17} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$ .

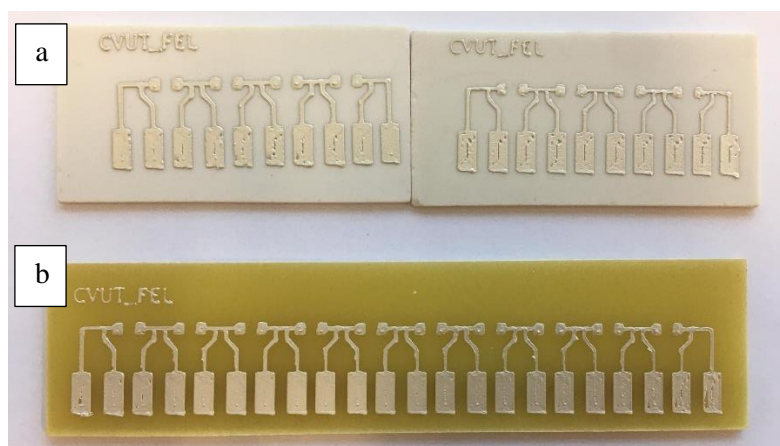
Uvedené pasty dodávané výrobcem by se daly nahradit i jinými alternativami, například pastou s názvem ESL 9695-G s obsahem Ag a Pd, popřípadě pastou ESL 9912-KFL pouze se stříbrem (ESL Electrosience, USA).

### 13.1. Příprava neohebných DPS

Pro měření vlastností neohebných DPS vyrobených na tiskárně Voltera V-One byly zvoleny dva materiály. Konkrétně se jednalo o epoxidový sklolaminát FR4 o tloušťce  $1,5 \text{ mm}$ . Druhým materiálem byla korundová keramika o tloušťce  $1 \text{ mm}$ . Zpočátku bylo nutné FR4 desku nařezat na menší destičky o rozměrech  $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  a poté pomocí pilníku začistit okraje. Destičky z korundu měly již z výroby rozměry  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ . Bylo tedy zapotřebí upravit testovací motiv. Upravený motiv má na jedné korundové destičce 4 pájecí plošky pro SMD odpory s pouzdrem 1206. Z tohoto důvodu bylo nutné provádět měření vždy na dvou identických korundových destičkách.

Destičky, jak z materiálu FR4, tak korundové keramiky, byly vždy před vložením do tiskárny očištěny a odmaštěny pomocí izopropylalkoholu.

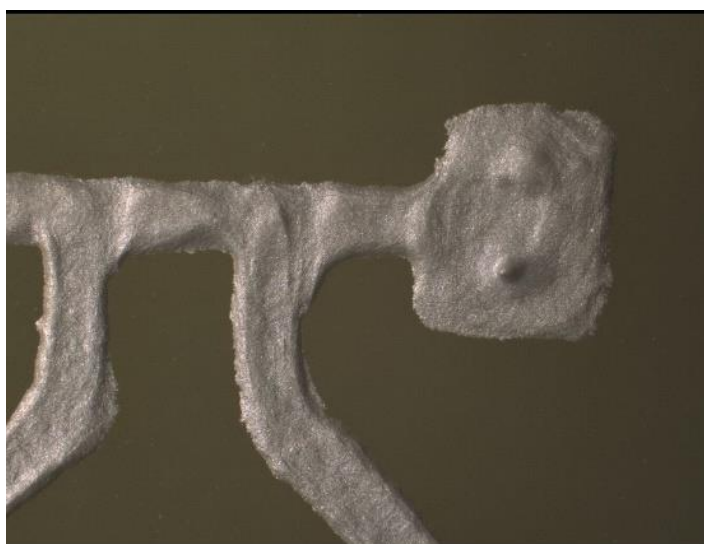
Na Obr. 17 jsou vzorky FR4 a korundových destiček s vytvořeným vodivým motivem před procesem pájení nulových odporů.



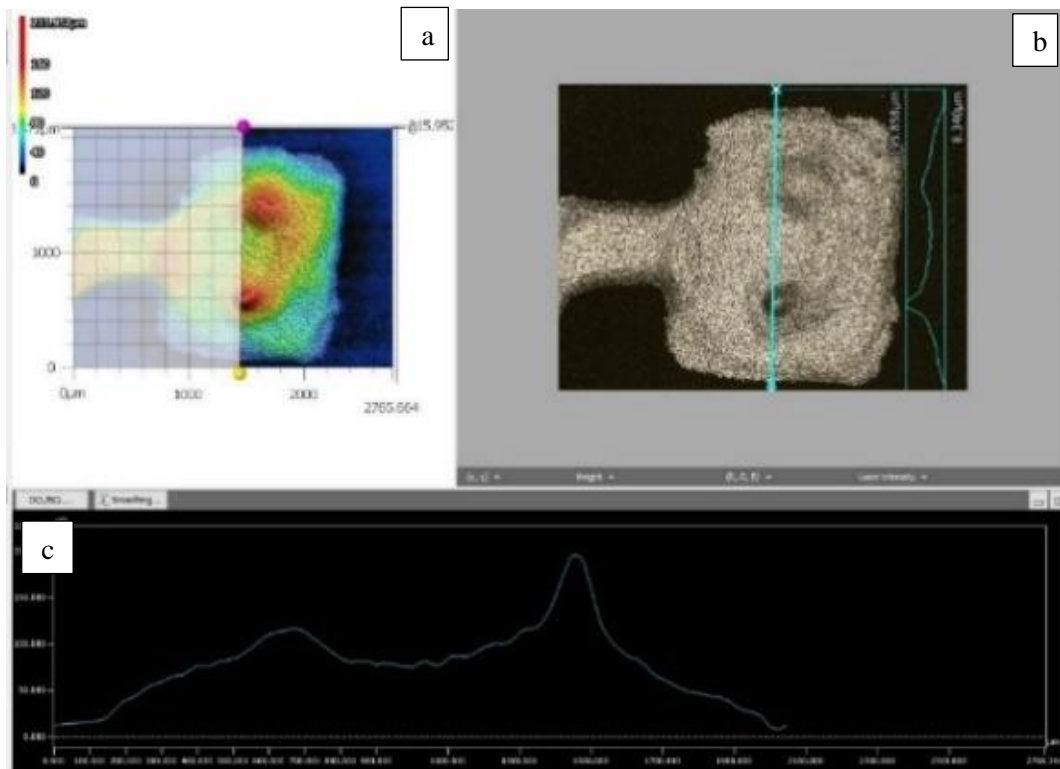
Obrázek 17 - Vzorek testovací destičky z FR4 a korundové keramiky před osazením.  
a) korundová keramika, b) epoxidový sklolaminát FR4

Takto vyhotovené zapečené vzorky bylo nutné na základě doporučení výrobce tiskárny lehce přebrousit pomocí jemného brusného papíru. Pro zbrúšení byl využit brusný papír o zrnitosti P1000 (Smirdex, Řecko). Přebroušení bylo nutné z důvodů minimalizování nerovností vzniklých při oddalování tiskové hlavy při přesunu na novou pozici. Rovinnost povrchu před zabroušením je patrná na následujících Obr. 18 a 19 pořízených na konfokálním mikroskopu (Keyence, Belgie) typu VK-X1000 se zvětšením 20x.

Pro ideální mechanické a elektrické vlastnosti pájeného spoje je žádoucí, aby vztyčné plochy kontaktu měly co nejkonzistentnější a rovinnou plochu.



Obrázek 18 - Nerovnosti pájecích plošek před zbrúšením.



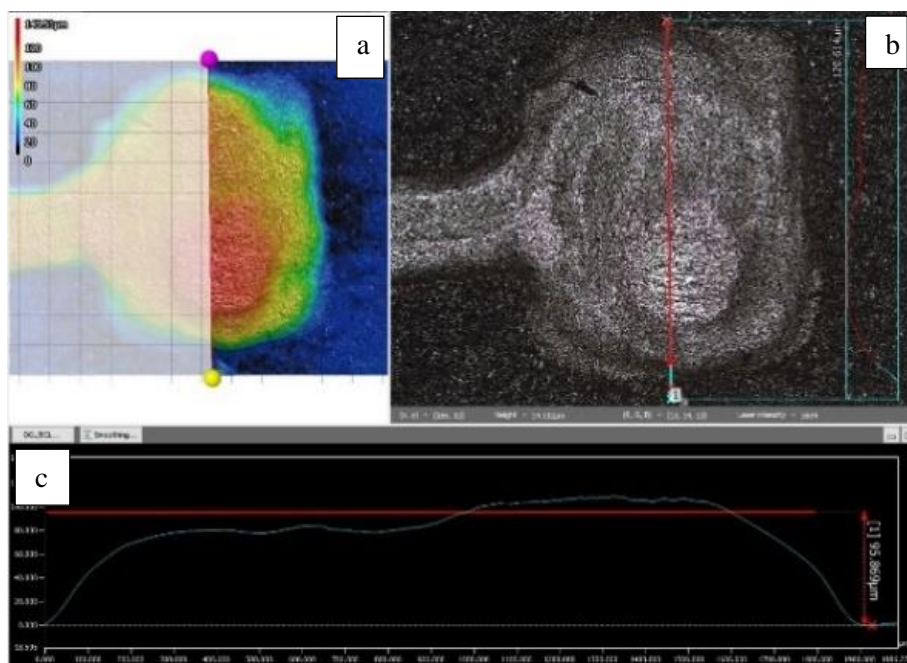
Obrázek 19 - Detail a rovinnost povrchu pájecí plošky před zbrúšením.

a) Výšková analýza pájecí plošky z konfokálního mikroskopu, b) detail plošky a nastavení místa pro měření výškového profilu (modrá linka), c) grafické znázornění výškového profilu.

Rovinnost pájeného povrchu má vliv na smáčivost a roztékání roztavené pájky po povrchu, jak ve své práci uvádí Novák T [53]. Při broušení povrchu je nutné dosáhnout optima mezi odstraněním velkých výstupků a přílišného odstranění materiálu. Na Obr. 20 a 21 je detail pájecí plošky po zabroušení.



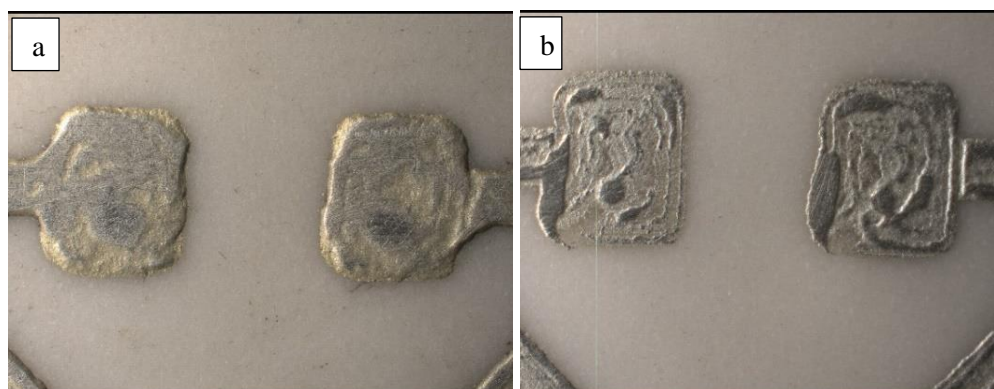
Obrázek 20 - Detail pájecí plošky po zabroušení.



Obrázek 21 - Detail a rovinnost povrchu pájecí plošky po zbrošení.

a) Výšková analýza pájecí plošky z konfokálního mikroskopu, b) detail plošky a nastavení místa pro měření výškového profilu (červená linka), c) grafické znázornění výškového profilu.

Z Obr. 20 a 21 je patrné, že obroušením došlo ke sražení nejvyšších nerovností a celkový profil nanesené vrstvy je pravidelnější. Kvalita vodivé vrstvy je značně závislá na nastavených parametrech tisku a na podmínkách okolí. V průběhu tisku je možné měnit výšku hrotu nad povrchem a také množství vytlačované pasty. Vlivem měnicích se vlastností vytlačované pasty (konzistence) bylo nezbytné v průběhu tisku lehce upravovat tyto dva parametry zejména množství vytlačované pasty. Drobnými úpravami těchto parametrů bylo docíleno vyhovující kvality všech vzorků. Nicméně byl patrný značný rozdíl v kvalitě dvou po sobě tisknutých vzorků, přestože bylo zachováno téměř totožné nastavení. Na Obr. 22 a 23 je zachycen vzorek s vysokou kvalitou a následující vzorek, který byl tisknutý vzápětí, ale jeho kvalita byla nesrovnatelná. Tyto nekvalitní vzorky bylo nutné z měření vyřadit, aby nedošlo k ovlivnění výsledků.



Obrázek 22, 23 - Pájecí plošky s a) vysokou kvalitou, b) nedostatečnou kvalitou.

## 13.2. Příprava flexibilních DPS

Vzhledem k vysokým teplotám potřebným u procesu pájení a vytvrzování vodivé pasty je výběr flexibilních materiálů, vhodných pro tvorbu pružných DPS, značně limitován. Pasta, ze které je tvořen vodivý motiv se po nanesení musí vytvrdit v peci. Výrobce doporučuje teploty v rozsahu 160 °C až 210 °C po dobu 15–40 min. Tato skutečnost do značné míry limituje využitelné flexibilní materiály a textilie.

Pro měření flexibilních substrátů byla zvolena polyamidová fólie Epoflex SSC 17/25 (MSC Polymer, Německo) o celkové tloušťce 57 μm. Tato fólie má z jedné strany celoplošně aplikovanou adhezni vrstvu tloušťky 15 μm a druhá strana je opatřena elektricky vodivým měděným povlakem tloušťky 17 μm. Tato fólie je schopna snést dlouhodobě teploty až 220 °C. Dále byla zvolena neměkčená PVC fólie Durofol (MYPLAST s.r.o., Česká republika) o tloušťce 0,4 mm. Tisk vodivých motivů byl prováděn na nevodivé straně polyamidové fólie. Měď na druhé straně byla ponechána pro zajištění tuhosti fólie. Oba druhy fólií byly před tiskem očištěny a zbaveny mastnoty izopropylalkoholem. Fólie byly přilepeny na rovnou podložku pomocí kaptonové lepicí pásky pro ulehčení manipulace při přenášení do pece, kde probíhalo vytvrzení.

### 13.2.1. Tkaniny

Z již dříve popsaných důvodů bylo nezbytné zvolit takové tkaniny, které snesou dlouhodobé vystavení vysokým teplotám. Tento předpoklad splňují tkaniny vyrobené z Nomexového a Kevlarového vlákna. Nomex® a Kevlar® jsou meta-aramidové vlákna, která mají značnou odolnost proti vysokým teplotám. Obě tyto hmoty byly vyvinuty společností DuPont™, USA a jsou schopné odolat teplotám až 370 °C. Vlákna jsou navíc odolná proti organickým chemikáliím a bělidlům. Z těchto tkanin se vyrábí ochranné oděvy pro hasiče nebo vojenské uniformy. Kevlarové vlákna jsou také využívána pro výrobu balistických ochranných a kabelů. Tyto tkaniny jsou často doplněny i o jiný druh vláken upravující výsledné vlastnosti. Pro měření byly využity tkaniny uvedené v tabulce 5. Tyto tkaniny byly dodány firmou Encetex s.r.o., Česká republika.

Tabulka 5 - Tkaniny využití pro flexibilní DPS.

Obchodní označení	Barva	Gramáž [g·m <sup>-2</sup> ]	Tkaniny	Poměr tkanin	Popis	Jemnost nitě T <sub>t</sub> [tex]
BV 65.89023	Modrá	145	Nomex/Kevlar	95/5	-	35
BV 130.89016	Červená	180	Nomex/Kevlar	95/5	-	36
BV 80.89016	Oranžová	215	NomexComfort/Kevlar/Sc	94/5/1	Antistatické vlákno s uhlíkem	30
BV 111.89111	Černá	265	Nomex/Kevlar/Metal	94/5/1	Antistatické s kovovým vláknem	50



Jeden z důležitých parametrů uváděných u tkanin představuje jejich jemnost. Jemnost tkaniny  $T_t$  [tex] je dána jemností jednotlivých použitých nití. Jemnost nitě je udávána vztahem

$$T_t = \frac{m}{l} \quad (8)$$

Kde  $m$  je hmotnost nitě [g] a  $l$  je délka nitě [km].

Jemnost tkaniny limituje možnosti nanášení vodivých vrstev. Čím je povrch tkaniny jemnější, tím nanášená vodivá vrstva lépe kopíruje povrch tkaniny a vytvářený motiv je kompaktnější a nedochází k přerušení vodivé vrstvy. U tkanin, které mají velkou hrubost, bylo nanášení vodivého motivu komplikováno značnými výškovými rozdíly mezi jednotlivými nitěmi. Kvůli tomu dochází k častějšímu výskytu přerušení a vodivá vrstva byla více náchylná ke zlomení a praskání.

## 14. Osazování testovacích DPS

Vytištěné a zabroušené vzorky byly osazovány rezistory o jmenovité hodnotě  $0 \Omega$  v pouzdře 1206. Pájení SMD součástek bylo provedeno pěti pájecími pastami. Jednalo se o pájecí pastu dodanou jako originální příslušenství k tiskárně Voltera z materiálu Sn42Bi57Ag<sub>0,4</sub> s firemním označením UppityUla. Tato pasta má zrna o velikosti T4. Další dvě pájecí pasty byly zvoleny tak, aby byly co nejvíce podobné svým složením pastě dodávané výrobcem. Tyto pasty se dají označit za nízkoteplotní. Konkrétně se jednalo o pájecí pastu Sn42Bi57Ag1 s označením NC273LT (AIM Products LLC, Kanada). Další využitá nízkoteplotní pasta byla od výrobce Amtech s.r.o., Česká republika s označením NC-31, se složením Sn42Bi58 s tavidlem ROL0 kalafunového typu. Tato pasta má zrna o velikosti T3. Obě nízkoteplotní pasty jsou bezoplachové. Za zástupce pájecích past s vyšší teplotou přetavení byla zvolena pasta SAC305 s produktovým označením REL61 M8 od výrobce AIM Products LLC. Pasta M8 má zrna o velikosti T4 a je bezoplachová. Pátým typem použité pájecí pasty byla olovnatá pájka se složením Sn63Pb37 od výrobce SMIC, Čína.

Pájecí pasty byly nanášeny pomocí ručního pneumatického bezkontaktního dávkovače. Tento pneumatický dávkovač umožňoval precizně řídit množství nanášené pájecí pasty. Osazení rezistorů bylo provedeno pomocí vakuové pinzety.

Pájení bylo provedeno na reflow peci Mistral 260 (Spidé, Holandsko). Ta umožňuje nastavení celkem tří teplotních zón pájení a rychlost posunu pájeného DPS skrz pec. Teplotní profily pro jednotlivé pájky byly zvoleny na základě profilů uváděných v technických listech a následně ověřeny pomocí profilometru, zda je pec dokáže dostatečně napodobit. V tabulce 6 jsou uvedeny teploty jednotlivých zón v peci Mistral 260 a rychlost pásového dopravníku pro zvolené pájecí pasty. V tabulce 7 jsou uvedeny dohledatelné parametry použitých pájecích past. Naměřený teplotní profil v peci Mistral 260 využitý pro pájecí pastu Sn42Bi57Ag<sub>0,4</sub> je v příloze

č. 1. Teplotní profil použitý pro pastu Sn42Bi57Ag1 je v příloze č. 2. Příloha č. 3, 4 a 5 zachycuje teplotní profil pro pastu Sn42Bi58, M8 SAC305 a Sn63Pb37.

*Tabulka 6 - Teplotní profily pájení.*

Pájecí pasta	Zóna 1 [°C]	Zóna 2 [°C]	Zóna 3 [°C]	Rychlost posunu [cm/min]
<b>Sn42Bi57Ag0,4</b>	75	120	180	15
<b>Sn42Bi57Ag1</b>	75	120	180	18
<b>Sn42Bi58</b>	100	100	185	15
<b>M8 SAC305</b>	180	180	235	22
<b>Sn63Pb37</b>	140	180	205	18

*Tabulka 7 - Parametry použitých pájecích past.*

Pájecí pasta	Tavidlo	Velikost částic	Obsah tavidla [%] (hmotnostní)
<b>Sn42Bi57Ag0,4</b>	-	T4	-
<b>Sn42Bi57Ag1</b>	ROL0	T4	11,5
<b>Sn42Bi58</b>	ROL0	T3	-
<b>M8 SAC305</b>	REL1	T4	-
<b>Sn63Pb37</b>	ROL0	T5	10

Tavidlo typu ROL0 je po zapájení chemicky neaktivní, nekorozivní, není elektricky vodivé a neobsahuje žádné halogenidy (<0.05 % hmotnostních). Jedná o se tavidlo z přírodní pryskyřice. Tavidlo typu ROL1 je podobné, avšak je zde rozdíl v obsahu halogenidů (<0.5 % hmotnostních).

Tavidlo REL1 je tvořeno syntetickou pryskyřicí s obsahem halogenidů (<0.5 % hmotnostních). Přesné složení pájecích past a použitých tavidel je téměř nedohledatelné, protože se jedná převážně o výrobní tajemství. [54, 55]

## 15. Elektrochemické pokovování

Na připravené vzorky byly připájeny rezistory o jmenovité hodnotě  $R = 0 \Omega$  pomocí uvedených pájecích past z tabulky 6. Po zapájení SMD součástek, ale vyvstal problém ohledně smáčivosti pájecích ploch. Špatná, téměř až nulová smáčivost nastala u pájek, které neobsahují stříbro. Na Obr. 24 je testovací destička, která byla zapájena pájecí pastou M8 SAC305. Je patrné, že u žádného rezistoru nedošlo k vytvoření spoje s pájecí ploškou. Veškerá nanosená pájecí pasta se uchytila na vývodech součástek.



Obrázek 24 - Špatná smáčivost pájecích ploch.

Tento jev byl patrně způsoben specifickým složením vodivých past, z kterých byla vytvořena vodivá vrstva. Pro ověření toho, že problém není v pájecích pastách nebo použitém teplotním profilu, byly pájecí pasty a dané teplotní profily ozkoušeny na DPS s měděnými pájecími ploškami bez povrchové úpravy. Na měděných DPS došlo k dokonalému smáčení u všech použitých pájecích past. Tím byl potvrzen předpoklad toho, že vodivé pasty využívané v tiskárně Voltera V-One neumožňují aplikovat pájecí pasty, které neobsahují podíl stříbra.

Jedna z možností, díky které by bylo možné využít i pájecí pasty bez obsahu stříbra představuje nanesení další vrstvy vhodného vodivého materiálu na povrch vytvořené vodivé vrstvy. Je příhodné využít takovou metodu nanášení, která zachová rychlost a efektivnost vytváření prototypových DPS a není k ní zapotřebí drahého a specifického laboratorního vybavení. Další předpoklad pro případnou metodu vyvstal z požadavku škálovatelnosti a nezávislosti na konkrétním návrhu DPS. Po zvážení dostupných možností vyšlo nejlépe elektrochemické poměďování vytvořeného vodivého motivu. Pro elektrochemické měďení byly vytvořeny dva rozdílné kyselé elektrolyty. Složení použitých elektrolytů je uvedeno v tabulce 8.

Složení 1. elektrolytu vychází z výsledků publikace autorů Nguyen a spol. 2015 [45]. Mezi jeho výhody patří snadná dostupnost všech potřebných chemikálií. Složení 2. elektrolytu bylo převzato z článku popisující výrobu dvouvrstvého DPS [56]. Tento elektrolyt navíc obsahuje Polyethylenglykol (PEG), který podle Wei-Ping Dow a spol. 2005 [57] zlepšuje inhibiční vlastnosti pokovovací lázně. Toto aditivum také plní funkci supresoru, který snižuje povrchové napětí elektrolytu. PEG redukuje tvorbu dendritů. Plní také funkci zpomalovače, díky kterému dochází k lepšímu a postupnému vyplnění nerovností a otvorů. Tím je docíleno výsledné struktury bez vnitřních dutin, a tedy povrchu s lepší výslednou rovinností. Na základě zveřejněných výsledků v článku Wei-Ping Dow a spol. 2005 byl použit PEG o molární hmotnosti 6000 g/mol.

Tabulka 8 - Chemické složení elektrolytů č. 1 a 2.

Chemické složky	Množství [g·l <sup>-1</sup> ]
<b>Elektrolyt č. 1</b>	
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	63,84
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98,07
HCl	137 μl·l <sup>-1</sup>
Destilovaná voda	1 l
<b>Elektrolyt č.2</b>	
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	200
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60
Polyethylenglykol (PEG)	1
Leptací roztok FeCl <sub>3</sub>	10 kapek
Destilovaná voda	750 ml

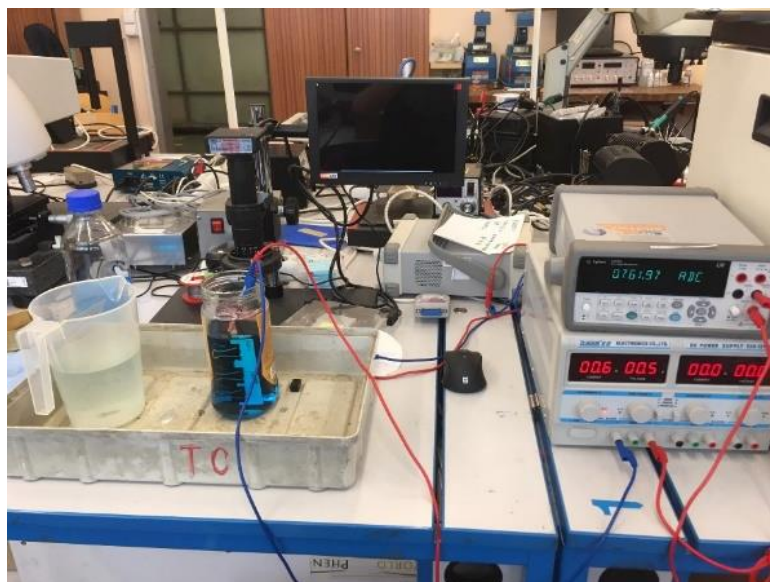
Popsaný elektrolyt byl nalit do skleněné nádoby kam se následně vložila měděná destička, která plnila funkci obětované elektrody (Obr. 25). Na tuto elektrodu byl připojený kladný pól stejnosměrného zdroje napětí. Záporný pól zdroje byl připevněn na pokovovaný vzorek s připraveným vodivým motivem plnící funkci katody.

Při elektrochemickém pokovování dochází k nežádoucí tvorbě dendritů. Dendrity způsobují nehomogenitu a pórovitost vytvářeného měděného povrchu. Jako příčina růstu dendritů bývá uváděna příliš vysoká proudová hustota nebo přítomnost nežádoucí příměsi a nečistot v elektrolytu. Omezení tvorby dendritů je možno dosáhnout vložení anody do kapsy z porézního materiálu, který slouží jako filtr. Další variantou, jak omezit tvorbu dendritů je úprava proudové hustoty, při které probíhá pokovovací proces. Často je využíváno omezení růstu dendritů pomocí aditiv přidávaných do elektrolytů. [58]

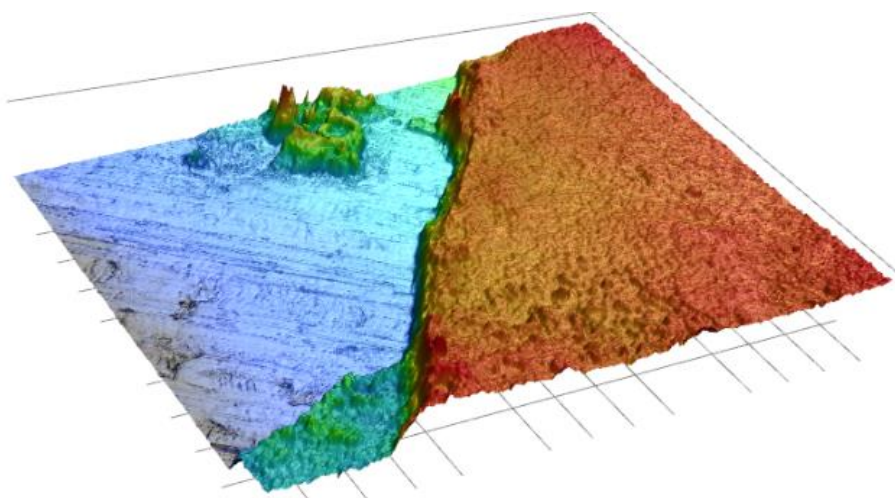
Pro určení vhodné proudové hustoty pokovovacího procesu je nutná znalost celkové pokovované plochy katody ponořené v elektrolytu. U DPS z materiálu FR4 je pokovovaná plocha 4,8 cm<sup>2</sup>. DPS vytvořené na korundové keramice má plochu 2,08 cm<sup>2</sup>. Jednotlivé vodivé motivy bylo nutné vodivě propojit, aby probíhal proces pokovování celé desky současně. Z tohoto důvodu byl využit měděný plíšek vhodně propojující všechny vytištěné plošky. Po připojení plochy kovového plíšku a svorek, který elektricky spojoval jednotlivé vytištěné plošky, byla výsledná plocha 24,8 cm<sup>2</sup>. Plocha přívodních svorek byla zanedbatelná. Proudová hustota pro elektrolyt č. 1 byla zvolena  $j = 30 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , což odpovídá výslednému proudu 0,75 A pro FR4 a pro vzorky z korundové keramiky 0,66 A. Tato hodnota proudové hustoty byla stanovena na základě několika zkoušek pro proudové hustoty v rozmezí 10 až 30 mA·cm<sup>-2</sup>.

Nanesený povrch byl vyhodnocován pomocí konfokálního mikroskopu VK-X1000. Pro elektrolyt č. 2 byla zvolena proudová hustota  $25 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

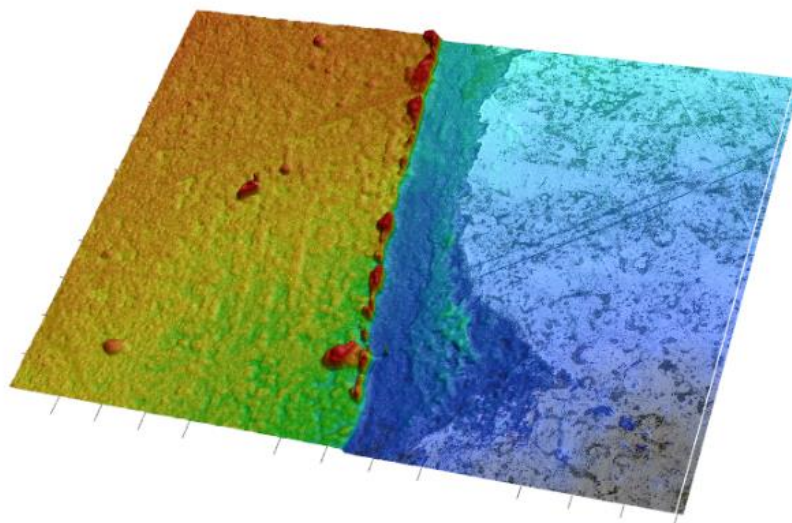
Na Obr. 25 je zapojení pokovovacího experimentu a Obr. 26 a 27 dokumentuje 50x zvětšený detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č. 1 při proudové hustotě  $30 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  a 20x zvětšený detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č. 2 při proudové hustotě  $25 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  pořízený konfokálním mikroskopem. Na základě pozorování pod mikroskopem byla zvolena optimální proudová hustota pro elektrolyt č. 1 a 2. Doba pokovování byla pro oba elektrolyty zvolena na 20 min.



Obrázek 25 - Pokovovací experiment.

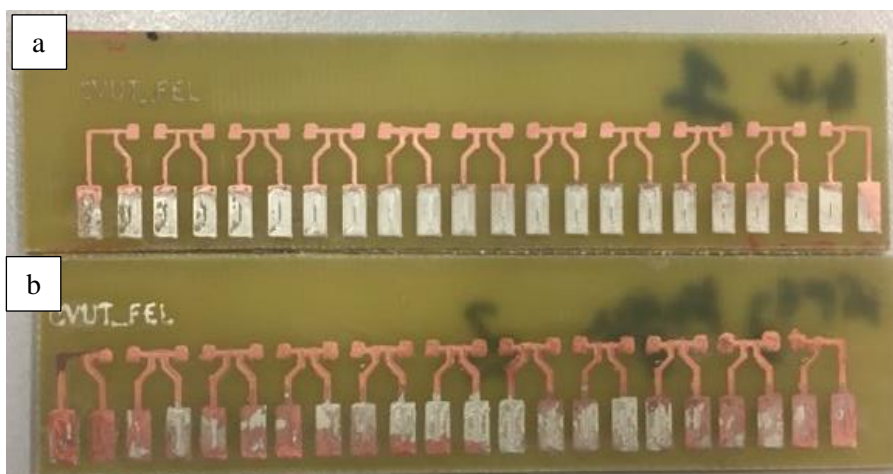


Obrázek 26 - Detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č.1.



Obrázek 27 - Detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č. 2.

Na Obr. 28 jsou porovnány vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 1 (horní vzorek) a pomocí elektrolytu č. 2 (dolní vzorek). Vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 1 mají vyšší lesk a jsou světlejší.

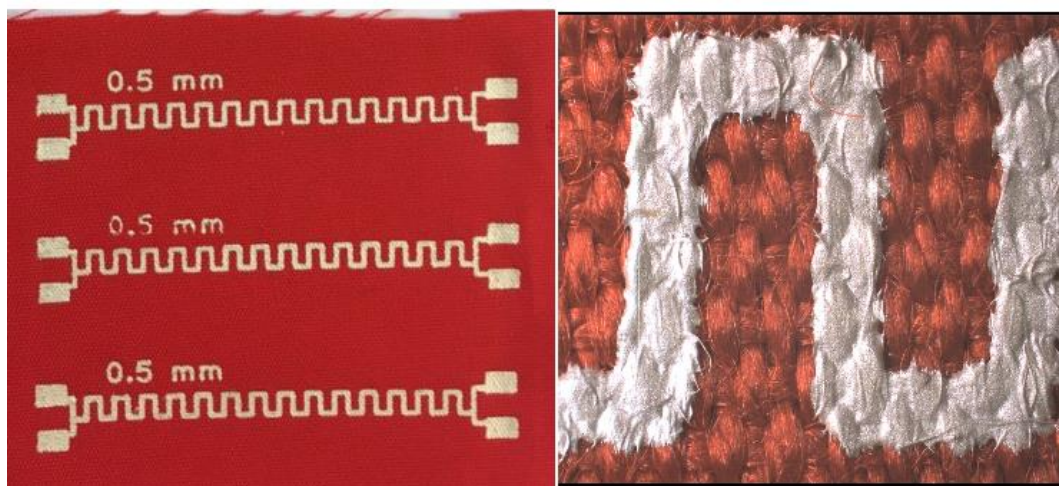


Obrázek 28 - Porovnání pokovených povrchů.  
a) vzorek pokoven elektrolytem č. 1, b) vzorek pokoven elektrolytem č. 2.

## Výsledky měření

### 16. Tkaniny

Na tkaniny uvedené v tabulce 5 byl vytištěn vodivý motiv pomocí flexibilního inkoustu (pasty) s označením BossyBass. Následně proběhlo vytvrzení pasty v peci po dobu 30 min při teplotě 170 °C. Na Obr. 29 jsou tři vytištěné vzorky na tkaninu s označením BV 130.89016 se šířkou vodivé vrstvy 0,5 mm. V pravé části Obr. 29 je detail pořízen na mikroskopu se zvětšením 10x.



Obrázek 29 – Vytištěný vzorek na tkaninu s označením BV 130.89016.

Při samotném tisku vzorku a následném měření vyšlo najevo, že nejlepší výsledků bylo dosaženo na jemné tkanině, která je tvořená z jemných nití. Z testovaných tkanin je nejjemnější BV 80.89016 s jemností  $T_1$  o hodnotě 30 tex. Odpor vytvořené vodivé vrstvy záleží především na výšce a homogenitě vodivé vrstvy. Při tisku je sice možné upravit výšku hrotu nad povrchem, ale v místě křížení nití je vždy výstupek, a to má za následek řadu problémů. Je nutné nastavit výšku hrotu tak, aby i v nejvyšším místě došlo k vytvoření dostatečné vodivé vrstvy. Naopak v prohlubních je vrstva několikanásobně větší. U hrubších tkanin docházelo v místech s nejvyššími výškovými rozdíly k tvorbě mezer a štěrbin, které oslabovaly a zhoršovaly výsledné vlastnosti vodivé vrstvy. Tento výškový rozdíl bylo nutné kompenzovat zvětšením množství vytlačované pasty v průběhu nanášení. Z experimentů vyšlo najevo, že je výhodné využít hrot o větším průměru, což ale snižuje minimální rozlišení výsledného motivu. Tyto skutečnosti značně komplikují vytvoření vodivé vrstvy o přesně daných rozměrech a bylo tedy téměř nemožné vyrobit dva shodné vzorky.

Při ohybech a natahování vzorku vytvořeného na tkanině dochází ke změně odporu vodivé vrstvy v řádu setin  $\Omega$  vlivem současného natahování a stlačování. Při značných ohybech dochází k velkým objemovým změnám, což způsobuje vznik mikroprasklin a trhlin. Jelikož jsou

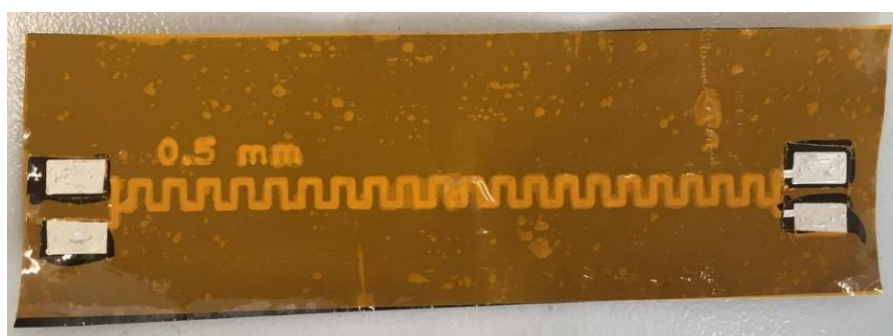
tkaniny ze své podstaty pružné a snadno ohebné dochází k tvorbě mikroprasklin i v případě citlivé manipulace a měření odporu je téměř nemožné, popřípadě nerelevantní (Obr. 30). Tedy nelze přesně určit příčinu změn hodnot elektrického odporu. Z tohoto důvodu nebylo možné provést podrobnější měření a experimenty. Z prvotních měření a výroby vzorku plyne závěr, že vytváření vodivých cest na tkaniny je pomocí tisku možný. Je však nutné nalézt specifické aplikace, kde nebude docházet k takovému mechanickému namáhání nebo bude zajištěna dodatečná mechanická výztuha, která zamezí nadměrnému mechanickému namáhání a ohýbání. Další možností je použití více elastické vodivé pasty.



Obrázek 30 - Mikropraskliny na textilu.

## 17. Flexibilní substráty

Pomocí flexibilní pasty s označením BossyBass byly vytištěné motivy vytvořené pro měření flexibilních substrátů. Na Obr. 31 je vytvořený vzorek na polyamidové fólii Epoflex, který byl následně opatřen krycí vrstvou. Tisk na tuto fólii byl bez značných problémů z pohledu rovinnosti povrchu a bylo tedy možné vytvořit několik shodných vzorků. Při měření změn odporu vodivého motivu vlivem mechanického namáhání vyvstal shodný problém jako u vzorků na tkaninách. Použitá fólie Epoflex se příliš snadno ohýbala a již po několika neúmyslných ohybech došlo k popraskání motivu a nebylo možné provést přesnější měření. Z tohoto důvodu nebylo provedeno důkladné měření vzorků vytištěných na polyamidové fólii Epoflex. Tento problém by se dal vyřešit využitím tlustší polyamidové fólie nebo do struktury vzorku přidat vyztužovací vrstvu, která by zlepšila výsledné mechanické vlastnosti vzorku.



Obrázek 31 – Vzorek vytvořený na polyamidovou fólii Epoflex.



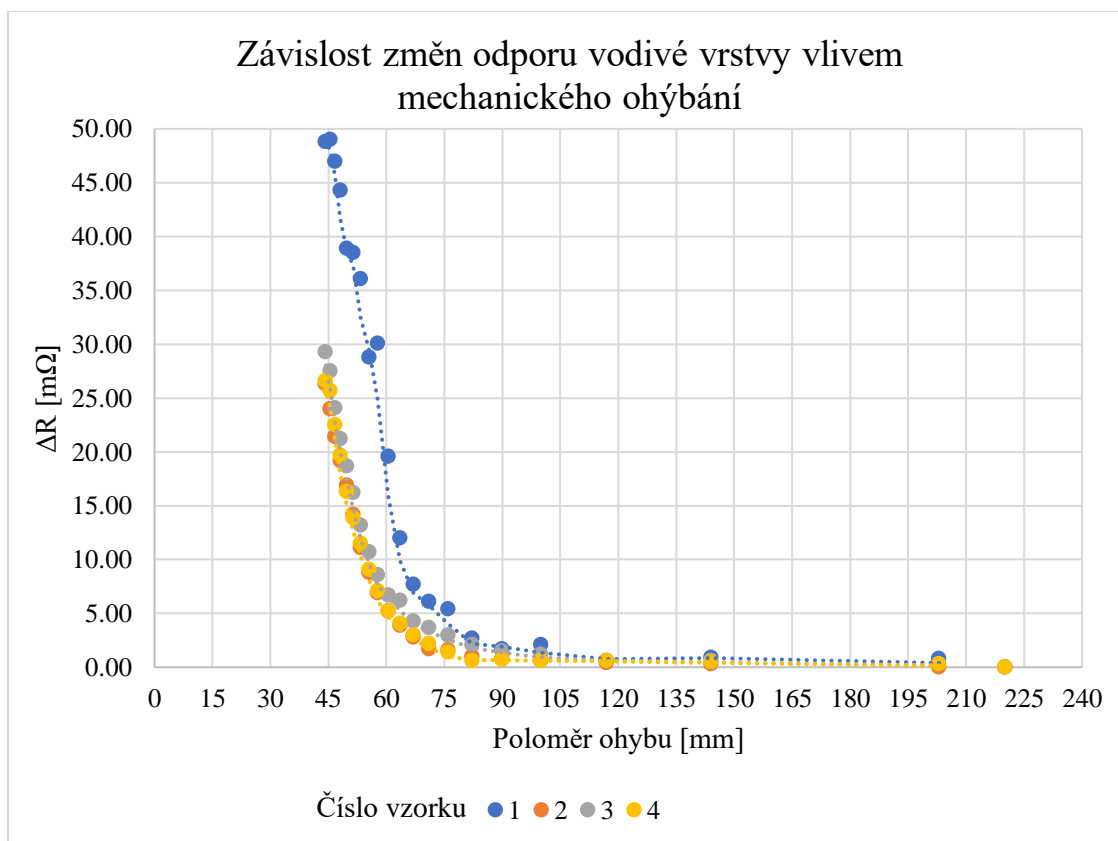
Další sada testovacích vzorků byla vytvořena na PVC fóliích o tloušťce 0,4 mm pomocí pružné pasty BossyBass (Obr. 32). Na rozdíl od předchozích vzorků bylo na PVC možné provést detailní měření, jelikož je dostatečně tuhé, ale zároveň se dá snadno a opakovaně ohýbat pod stejnými poloměry.



Obrázek 32 - Vzorek vytvořený na PVC fólii.

Celkem byly vytvořeny 4 vzorky se shodným motivem. Vyhodnocení závislosti změny elektrického odporu vodivých vrstev na mechanickém namáhání bylo provedeno ohýbáním vzorků pod danými poloměry. Byla vyhodnocována změna odporu vzorku v daném ohybu vůči nedeformovanému stavu po předcházejícím ohybu. Měření bylo provedeno na trhačce Deform, do které byly připevněny čelisti umožňující upnutí plochých vzorků. Vzorek byl připojen k přístroji MM2030 umožňující čtyřvodičové měření malých odporů. Následně byly čelisti posouvány po jednom milimetru směrem k sobě, a tím bylo dosaženo ohýbání vzorku pod danými poloměry 203 mm až 44 mm. Vzorek byl ohýbán tak, že docházelo k natahování motivu. Při ohýbání ve směru, při kterém byl motiv natahován, hodnoty odporu s rostoucím poloměrem ohybu rostly. Naopak při ohýbání v opačném směru (stlačování motivu) hodnota odporu klesala. Po ohybu nastalo mírné ustalování hodnot elektrického odporu. Z tohoto důvodu byly údaje vždy odečítány po 15 s, aby došlo k ustálení hodnot.

Na Obr. 33 je zobrazen vliv mechanického namáhání na odpor vodivé vrstvy vytvořené na PVC fólii. Vzorek č. 1 má průměrnou výšku vodivé vrstvy 36,5  $\mu\text{m}$  a měl odpor 838  $\text{m}\Omega$  ve výchozím stavu. Vzorky č. 2–4 byly tištěny v jiný den, a proto mají lehce odlišnou výšku vrstvy. Konkrétně 90  $\mu\text{m}$ , 82  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  mají vzorky č. 2, 3 a 4. Odpor vzorku č. 2 ve výchozím stavu byl 323  $\text{m}\Omega$ , vzorek číslo č. 3 měl odpor 360  $\text{m}\Omega$  a vzorek č. 4 měl hodnotu 394  $\text{m}\Omega$ .



Obrázek 33 – Závislost odporu vodivé vrstvy na ohybu, PVC fólie.

Z graficky znázorněných hodnot na Obr. 33 vyplývá, že elektrický odpor vodivé vrstvy byl téměř neměnný při ohybech do poloměru 90 mm. Při ohnutí vzorku v poloměrech větších než 90 mm dochází k značnému nárůstu odporu. Při ohybech s poloměry 60 mm až 45 mm má nárůst téměř lineární charakter. Pokud byl vzorek ohnutý pod poloměrem větším jak 40 mm, tak docházelo k praskání a odlupování vodivého motivu od PVC fólie. V případě záměru použít vzorek jako tenzometr či snímač deformace je výhodné zvolit aplikace s poloměrem ohybu v rozmezí 60 až 45 mm. Pro menší poloměry by bylo vyhodnocování příliš nepřesné.

Po dokončení měření byl pro zajímavost jeden ze vzorků opětovně zahřát na teplotu 170 °C po dobu 4 min. Ohřevem došlo k poklesu elektrického odporu vrstvy na hodnotu 633 mΩ z hodnoty 887 mΩ. Z tohoto experimentu lze učinit závěr o schopnosti opětovné regenerace vzorků. Další měření těchto regeneračních vlastností nebylo dále zkoumáno. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 6.

## 18. Elektrické vlastnosti SMD vzorků

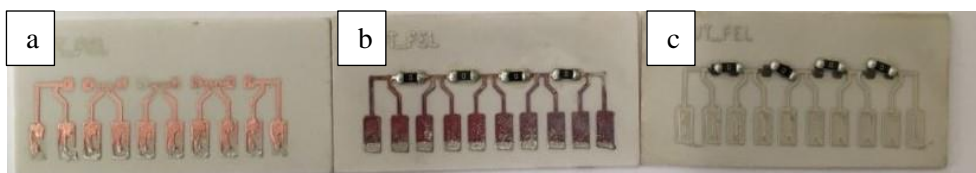
Elektrické vlastnosti vzorků vytištěných na korundové keramice a FR4 byly hodnoceny na základě velikosti elektrického odporu vytvořených pájených spojů. Pro pájení byly zvoleny rezistory se jmenovitým odporem  $R = 0 \Omega$  s pouzdrem 1206. Před pájením bylo provedeno ověřovací měření odporu několika vybraných rezistorů a vyšlo najevo, že jejich průměrná hodnota odporu je  $19,5 \text{ m}\Omega$ . Tato hodnota byla následně odečtena od naměřených hodnot. Pomocí toho bylo možné přímo určit odpor dvou pájených spojů (součástka má dva vývody) a samotné vodivé cesty. Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky z 10 pájených spojů na DPS v případě FR4 a 8 pájených spojů v případě korundové keramiky (2 DPS po 4 kusech) jsou zobrazeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Odpor pájených spojů – nepokovených.

Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	Odpor spoje [ $\text{m}\Omega$ ]
<b>FR4</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	$13,95 \pm 1,03$
		Sn42Bi57Ag1	$12,55 \pm 1,30$
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	$17,31 \pm 3,83$
		Sn42Bi57Ag1	$15,03 \pm 2,21$
<b>Korundová keramika</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	$24,70 \pm 2,66$
		Sn42Bi57Ag1	$19,67 \pm 2,45$
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	$24,74 \pm 3,67$
		Sn42Bi57Ag1	$20,54 \pm 1,67$

Pro pájení byly využity pouze dvě pájecí pasty z důvodu nesmáčivosti vytvrzených vodivých past s dalšími třemi použitými pájecími pastami bez obsahu stříbra. Z naměřených dat (tabulka 9) je patrné, že všechny testované varianty jsou vhodné pro tvorbu prototypových desek plošných spojů. Průměrný odpor všech pájených spojů na substrátu FR4 byl  $17,7 \text{ m}\Omega$ . Vzorky vytvořené na korundové keramice měly průměrný odpor  $22,4 \text{ m}\Omega$ . Dále je z výsledků patrná vyšší hodnota odporu pájených spojů vyhotovených na korundové keramice. Jedno z pravděpodobných vysvětlení tohoto jevu je případná rozdílná teplota na povrchu vzorků při pájení, která mohla vzniknout odlišnou tepelnou vodivostí korundové keramiky s porovnáním se substrátem FR4.

Za účelem využití širšího spektra pájecích past byla nanesena další měděná vrstva pomocí elektrochemického poměďování. Příznivý vliv poměďovaného povrchu vzorku pro smáčivost pájecí pasty M8 SAC305 je zobrazen na Obr. 34.



Obrázek 34 - Vliv pokovení povrchu na smáčivost pájecích past.

a) Vzorek poměděný pomocí elektrolytu č.1, b) zapájený vzorek pomocí pájecí pasty M8 SAC305, c) nepokovený vzorek pájený pomocí pájecí pasty M8 SAC305.

Vzorek poměděný pomocí elektrolytu č.1 nesplňoval požadavky na kvalitu, ale bylo ho možné využít pro testování poměďovací lázně. U vzorku zapájeného pomocí pájecí pasty M8 SAC305 došlo vlivem vysoké teploty k oxidaci povrchu a jeho zhnědnutí (Obr. 34 b). Na Obr. 34 c) je vzorek, který nebyl pokoven a byl také pájen pomocí pájecí pasty M8 SAC305. Je patrné, že u tohoto vzorku nedošlo k vytvoření pájeného spoje a povrch pájecích plošek zčernal. Všechna pájecí pasta se přichytila na vývodech SMD součástek. Průměrné hodnoty elektrického odporu a směrodatné odchylky z 10 pájených spojů v případě substrátu FR4 a 8 pájených spojů u korundové keramiky pokovených vzorků pomocí elektrolytu č. 1 jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 - Odpor pájených spojů – pokoveným elektrolytem č. 1.

Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	Odpor spoje [mΩ]
<b>FR4 pokoven elektrolytem č. 1</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	6,94 ± 0,43
		Sn42Bi57Ag1	6,33 ± 0,57
		Sn42Bi58	6,02 ± 0,70
		M8 SAC305	5,97 ± 0,31
		Sn63Pb37	4,84 ± 0,74
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	5,93 ± 1,00
		Sn42Bi57Ag1	6,23 ± 0,96
		Sn42Bi58	4,25 ± 0,60
		M8 SAC305	3,36 ± 1,72
		Sn63Pb37	8,08 ± 1,43
<b>Korundová keramika pokoven elektrolytem č. 1</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	8,11 ± 0,42
		Sn42Bi57Ag1	6,92 ± 0,83
		Sn42Bi58	5,58 ± 0,74
		M8 SAC305	4,70 ± 0,88
		Sn63Pb37	4,71 ± 0,84
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	6,13 ± 0,79
		Sn42Bi57Ag1	6,04 ± 0,64
		Sn42Bi58	6,77 ± 0,94
		M8 SAC305	3,93 ± 0,96
		Sn63Pb37	7,27 ± 1,42

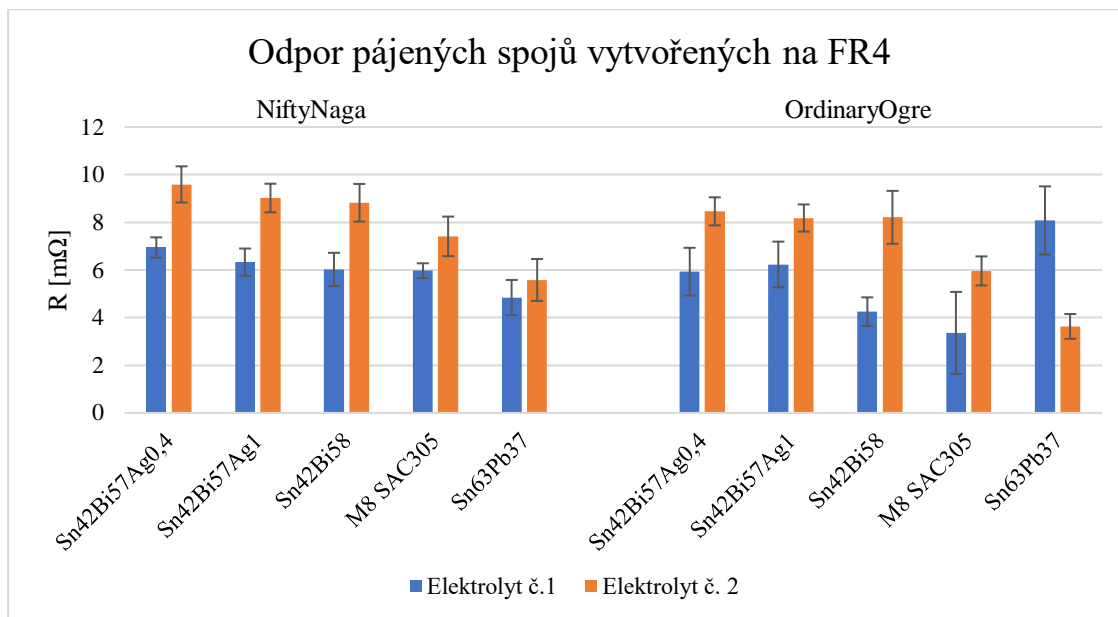
Jak již bylo zmíněno, tak po aplikaci další vodivé vrstvy mědi nanesené pomocí elektrochemického pokovovacího procesu je možné na vytvořený motiv pájet pomocí širšího spektra pájecích past bez významných problémů se smáčivostí. Z výsledků je patrné, že pokovením došlo ke značnému poklesu elektrického odporu pájených spojů. Konkrétně u vzorků z pasty NiftyNaga vytvořených na substrátu FR4 pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag1 došlo vlivem pokovení v elektrolytu č. 1 k poklesu odporu pájeného spoje z hodnoty  $12,55 \pm 1,3 \text{ m}\Omega$  na hodnotu  $6,33 \pm 0,57 \text{ m}\Omega$ . Což znamená, že pokovení povrchu vedlo ke snížení odporu spoje o 49,6 %.

V tabulce 11 jsou vyhodnocená data z měření odporů pájených spojů u vzorků pokovených elektrolytem č. 2.

Tabulka 11 - Odpor pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 2.

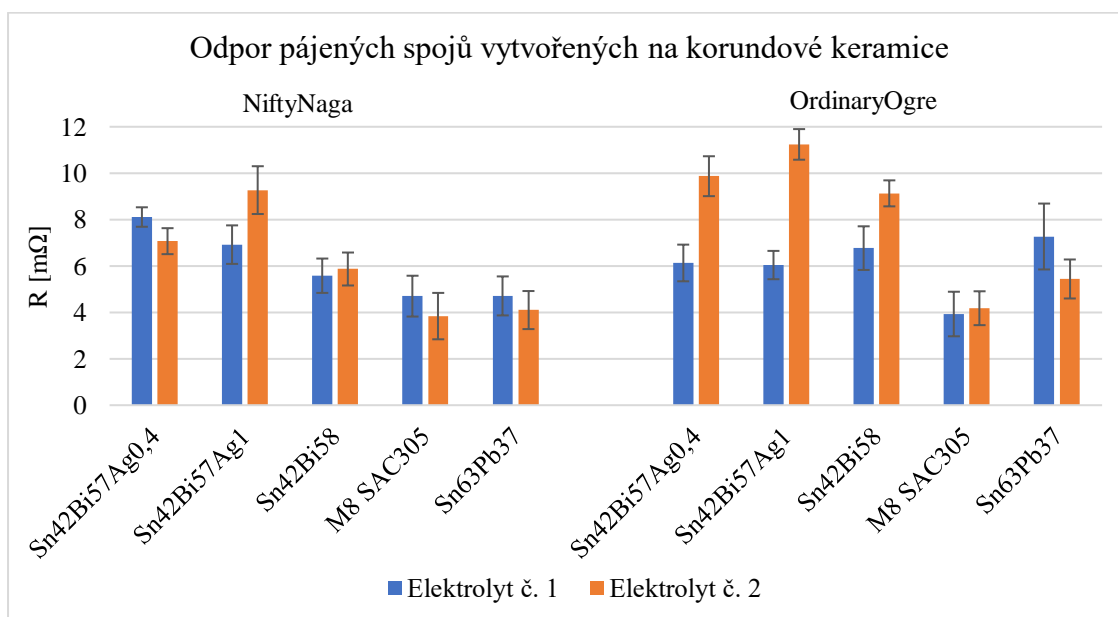
Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	Odpor spoje [ $\text{m}\Omega$ ]
<b>FR4 pokoveno elektrolytem č. 2</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	$9,59 \pm 0,76$
		Sn42Bi57Ag1	$9,02 \pm 0,60$
		Sn42Bi58	$8,82 \pm 0,79$
		M8 SAC305	$7,41 \pm 0,83$
		Sn63Pb37	$5,85 \pm 0,88$
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	$8,46 \pm 0,59$
		Sn42Bi57Ag1	$8,18 \pm 0,57$
		Sn42Bi58	$8,21 \pm 1,11$
		M8 SAC305	$5,96 \pm 0,61$
		Sn63Pb37	$3,63 \pm 0,52$
<b>Korundová keramika pokoveno elektrolytem č. 2</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	$7,07 \pm 0,56$
		Sn42Bi57Ag1	$9,27 \pm 1,03$
		Sn42Bi58	$5,87 \pm 0,71$
		M8 SAC305	$3,84 \pm 1,00$
		Sn63Pb37	$4,10 \pm 0,82$
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	$9,87 \pm 0,86$
		Sn42Bi57Ag1	$11,24 \pm 0,66$
		Sn42Bi58	$9,13 \pm 0,56$
		M8 SAC305	$4,18 \pm 0,73$
		Sn63Pb37	$5,44 \pm 0,84$

Po pokovení vzorků pomocí elektrolytu č. 2 došlo také ke snížení odporu pájených spojů jako v případě elektrolytu č. 1. Grafické porovnání výsledků mezi elektrolytem č. 1 a 2 je uvedeno na Obr. 35 pro substrát FR4 a pro korundovou keramiku na Obr. 36.



Obrázek 35 - Odpor pájených spojů na substrátu FR4.

Z Obr. 35 vyplívá, že lepších výsledků, tedy menšího odporu, dosahovaly vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 1. Nejvyšší hodnotu odporu měly vzorky zapájené pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag0,4.



Obrázek 36 - Odpor pájených spojů na korundové keramice.

Odpor pájených spojů na korundové keramice dosáhl podobných hodnot jako v případě substrátu FR4. Také došlo ke značnému snížení odporu spojů. Je však patrné, že na odpor pájeného spoje u vzorků vytvořených z vodivé pasty OrdinaryOgre má vliv použitý elektrolyt. U vzorků vytvořených z vodivé pasty NiftyNaga je tento vliv minimální.

Průměrná hodnota odporu všech vzorků vytvořených na substrátu FR4 a pokovených pomocí elektrolytu č. 1 je 5,8 mΩ. Vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 2 mají průměrný odpor 7,5 mΩ. V případě korundové keramiky mají vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 1 průměrný odpor 6,0 mΩ. U elektrolytu č. 2 vychází průměrná hodnota odporu spoje 7,0 mΩ.

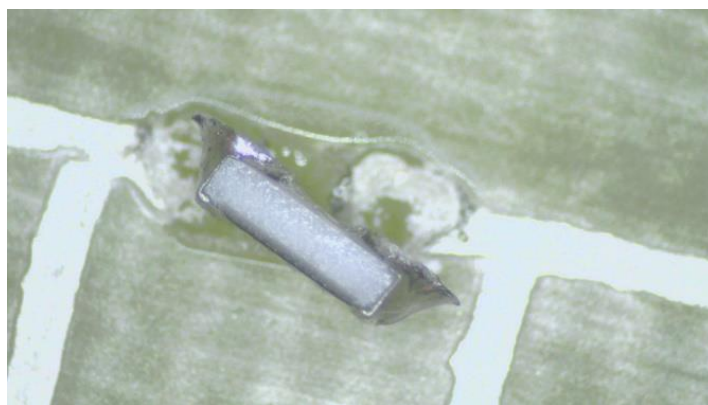
## 19. Mechanické vlastnosti SMD vzorků

Mechanické vlastnosti vytvořených vzorků byly vyhodnocovány na základě zkoušky stříhem na trhačce Deform 02/2015 a k tomu zhotoveném přípravku. Vytvořený vzorek byl vložen do přípravku pro provádění zkoušky stříhem. Po zahájení testu trhačka posouvala trhací hrot rychlostí 1 mm/min a působila tak silou na připájený SMD rezistor. Ze získaných dat byla vyhledána maximální dosažená síla, při které nastalo odtržení rezistoru od substrátu. Z těchto hodnot byl následně stanoven průměr a směrodatná odchylka – tabulka 12.

Tabulka 12 - Mechanická odolnost pájených spojů – nepokovených.

Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	F <sub>max</sub> [N]
<b>FR4</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	17,0 ± 3,4
		Sn42Bi57Ag1	23,3 ± 5,0
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	24,6 ± 4,7
		Sn42Bi57Ag1	38,3 ± 3,8
<b>Korundová keramika</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	24,0 ± 3,1
		Sn42Bi57Ag1	28,7 ± 4,8
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	32,9 ± 5,0
		Sn42Bi57Ag1	12,7 ± 3,2

Z naměřených dat vyplývá, že nejhorší mechanické vlastnosti měl vzorek vytištěný z pasty OrdinaryOgre na korundové keramice zapájený pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag1. Nejlepší mechanické vlastnosti má naopak vzorek vyrobený na substrátu FR4 pomocí vodivé pasty OrdinaryOgre zapájený pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag1. Při působení síly přibližně do velikosti 30 N docházelo často k odtržení součástky na intermetalické vrstvě (Obr. 37). Při větších působících silách docházelo k odtrhnutí vodivé vrstvy od substrátu. Průměrná hodnota síly určené pomocí zkoušky stříhem potřebné k odtržení SMD rezistorů od substrátu FR4 byla 25,8 N. U korundové keramiky byla průměrná hodnota síly 21 N.



Obrázek 37 - Detail odtržení rezistoru v intermetalické vrstvě.

U vzorků, které byly opatřeny měděným povrchem, došlo ke zvýšení mechanické odolnosti pájených spojů měřené prostřednictvím zkoušky stříhem.

Tabulka 13 - Mechanická odolnost pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 1.

Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	$F_{\max}$ [N]
<b>FR4 pokovené elektrolytem č. 1</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	84,9 ± 7,2
		Sn42Bi57Ag1	81,4 ± 6,3
		Sn42Bi58	87,6 ± 8,6
		M8 SAC305	68,4 ± 8,3
		Sn63Pb37	74,0 ± 5,5
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	64,2 ± 4,7
		Sn42Bi57Ag1	45,7 ± 7,3
		Sn42Bi58	69,2 ± 8,5
		M8 SAC305	48,5 ± 5,8
		Sn63Pb37	40,9 ± 5,3
<b>Korundová keramika pokovené elektrolytem č. 1</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	42,5 ± 4,0
		Sn42Bi57Ag1	37,1 ± 8,8
		Sn42Bi58	46,5 ± 5,9
		M8 SAC305	37,7 ± 8,0
		Sn63Pb37	46,2 ± 9,7
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	41,4 ± 7,3
		Sn42Bi57Ag1	53,0 ± 8,9
		Sn42Bi58	32,8 ± 5,5
		M8 SAC305	35,4 ± 9,4
		Sn63Pb37	35,6 ± 9,5



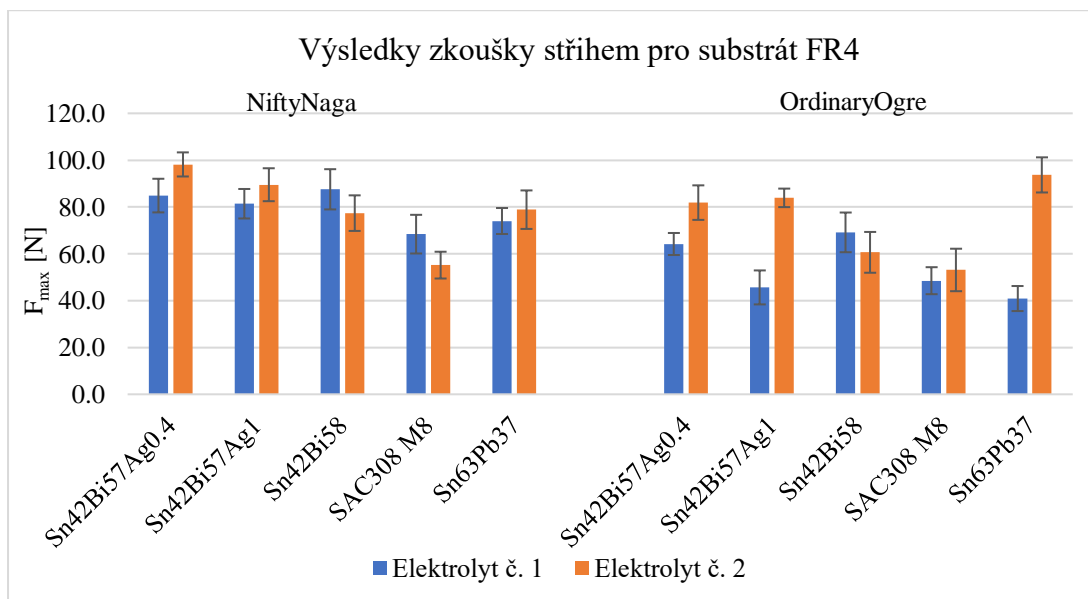
Z výsledků naměřených na pokovených vzorcích pomocí elektrolytu č. 1 je patrné, že došlo ke značnému zlepšení mechanických vlastností spojů oproti nepokoveným vzorkům. Například u kombinace vodivé pasty NiftyNaga a pájecí pasty Sn42Bi57Ag0,4 na substrátu FR4 došlo k nárůstu průměrné síly potřebné k odtržení vzorku z hodnot  $17,0 \pm 3,4$  N na hodnotu  $84,9 \pm 7,2$  N. Navíc po pokovení bylo možné využít všech pět zvolených pájecích past a bylo s nimi dosaženo slibných výsledků. Nejhorších výsledků bylo dosaženo v případě kombinace pájecí pasty Sn63Pb37 a vodivé pasty OrdinaryOgre na substrátu FR4. Dále je patrné, že vyšší odolnosti proti odtržení dosahují vzorky vytvořené na substrátu FR4. Průměrná hodnota potřebná k odtržení vzorků vytvořených na korundové keramice je 40,08 N. Oproti tomu průměrná síla potřebná k odtržení součástek ze substrátu FR4 je 66,5 N.

V tabulce 14 jsou vyhodnocená data ze zkoušky stříhem provedená na vzorcích pokovených pomocí elektrolytu č. 2.

Tabulka 14 - Mechanická odolnost pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 2.

Substrát	Vodivá pasta	Pájecí pasta	F <sub>max</sub> [N]
<b>FR4 pokoveno elektrolytem č. 2</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	98,2 ± 5,1
		Sn42Bi57Ag1	89,5 ± 7,0
		Sn42Bi58	77,4 ± 7,6
		M8 SAC305	55,2 ± 5,7
		Sn63Pb37	78,9 ± 8,2
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	81,9 ± 7,4
		Sn42Bi57Ag1	83,9 ± 4,0
		Sn42Bi58	60,6 ± 8,7
		M8 SAC305	53,1 ± 9,1
		Sn63Pb37	93,7 ± 7,5
<b>Korundová keramika pokoveno elektrolytem č. 2</b>	NiftyNaga	Sn42Bi57Ag0,4	34,6 ± 7,8
		Sn42Bi57Ag1	40,8 ± 6,3
		Sn42Bi58	44,4 ± 9,9
		M8 SAC305	48,8 ± 9,4
		Sn63Pb37	51,2 ± 9,1
	OrdinaryOgre	Sn42Bi57Ag0,4	43,5 ± 5,6
		Sn42Bi57Ag1	36,9 ± 3,5
		Sn42Bi58	54,9 ± 6,6
		M8 SAC305	40,9 ± 8,4
		Sn63Pb37	49,1 ± 3,8

U vzorků, na které byla nanesena měděná vrstva pomocí elektrolytu č. 2, došlo stejně jako v případě elektrolytu č. 1 k nárůstu potřebné síly k odtržení součástky od substrátu. Nejmenší odolnost proti odtržení dosáhla kombinace OrdinaryOgre a pájecí pasty M8 SAC305 na substrátu FR4. Přesněji průměrné hodnoty  $53,1 \pm 9,1$  N. Podobně nízké hodnoty bylo dosaženo také v případě kombinace pasty NiftyNaga a pájecí pasty M8 SAC305. Je možné konstatovat, že pokovené vzorky dosahovali porovnatelných mechanických vlastností, jako DPS vytvořených konvenčními metodami. Marko R. [59] ve své bakalářské práci uvádí, že průměrná síla potřebná k odtržení součástky určená pomocí zkoušky stříhem je  $53,4 \pm 8,8$  N u vzorků pájených pomocí pájecí pasty Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305) na substrát FR4 bez povrchové úpravy. Grafické znázornění zpracovaných maximálních sil potřebných k odtržení rezistorů je uvedeno na Obr. 38.

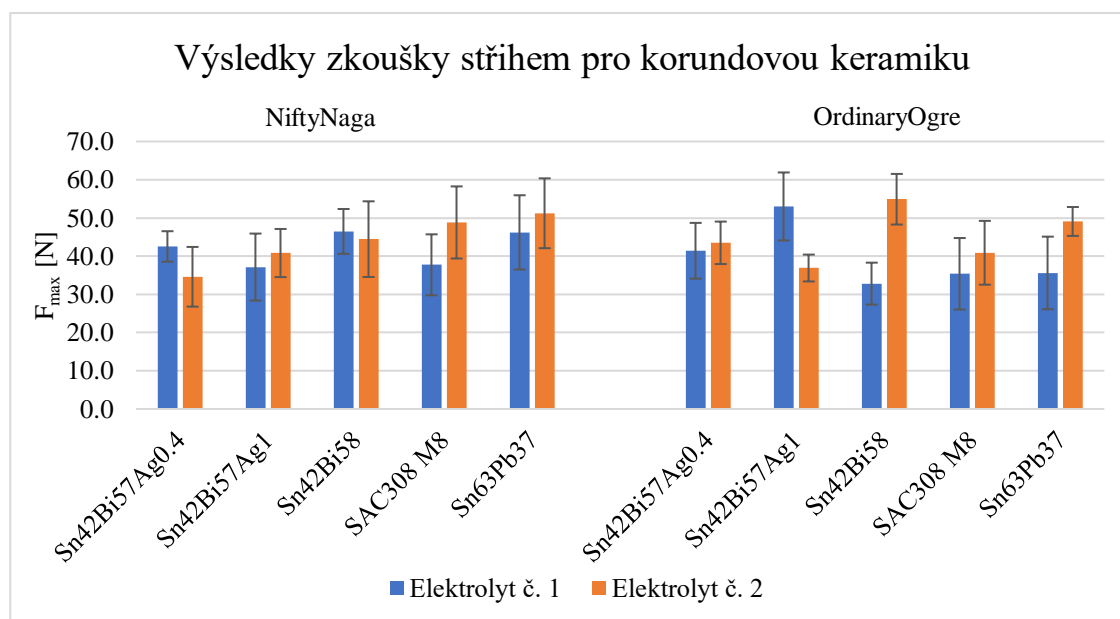


Obrázek 38 - Průměrné síly potřebné k odtržení rezistorů od substrátu FR4.

Z Obr. 38 je zjevné, že vzorky s měděnou vrstvou vytvořené pomocí elektrolytu č. 2 měly téměř ve všech případech vyšší průměrnou odolnost proti síle působící ve smyku. Při určení průměrné síly potřebné k odtržení součástek připájených pomocí testovaných pájecích past od substrátu FR4 vychází průměrná síla  $77,0$  N v případě elektrolytu č. 2. Pokovené vzorky v elektrolytu č. 1 mají průměrnou hodnotu síly  $66,5$  N. Při použití elektrolytu č. 2 byla průměrná síla nutná k odtržení součástek od korundové keramiky  $44,5$  N. Průměrná síla potřebná k odtržení

vzorků pokovených pomocí elektrolytu č. 1 byla 40,8 N. Největší rozdíl nastal u vzorku vytvořeného pomocí vodivé pasty OrdinaryOgre a pájecí pasty Sn63Pb37.

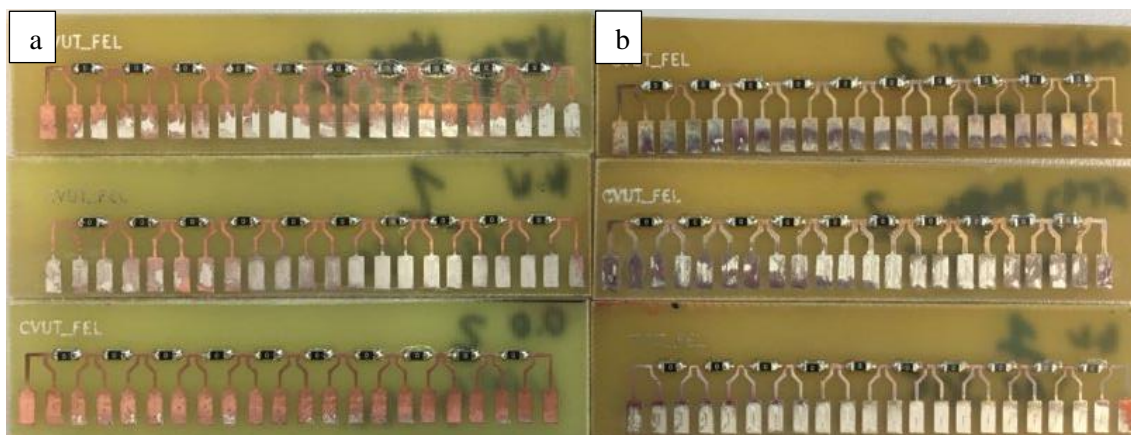
Pájené spoje vytvořené na korundové keramice dosahovaly nižší mechanické odolnosti proti smykové síle s porovnáním se vzorky na materiálu FR4.



Obrázek 39 - Průměrné síly potřebné k odtržení rezistorů od korundové keramiky.

Většina výsledků byla zatížená větší směrodatnou odchylkou. Vzorky pokovené pomocí elektrolytu č. 1 vykazovaly větší variační koeficient naměřených hodnot, který byl průměrně 19,2 %, zatímco variační koeficient pro elektrolyt č. 2 byl 16 %. U korundové keramiky docházelo nejčastěji k odtržení vodivého motivu od substrátu, a tedy smyková síla vyšla u většiny pájecích past podobně, a to v rozmezí 40 až 50 N.

U vzorků vytvořených pomocí pájecí pasty M8 SAC305 je patrný vliv vysoké teploty v případě substrátu FR4 (Obr. 40). V levé části Obr. 40 a) jsou vyhotoveny vzorky pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag1 a v pravé části pomocí pasty M8 SAC305 (Obr. 40 b). Je zřejmé, že vzorky pájené při nižší teplotě přetavení 180 °C v případě Sn42Bi57Ag1 vs 235 °C u pasty M8 SAC305 má za následek změnu barvy měděné vrstvy, tak i samotného substrátu, který lehce zhnědl.



Obrázek 40 - Porovnání vzorků pájených pomocí různých pájecích past.  
a) vzorky vyhotoveny pomocí pájecí pasty Sn42Bi57Ag1, b) vzorky vyhotoveny pomocí pájecí pasty M8 SAC305.

## Závěr

V teoretické části práce byly popsány základní materiály využívané pro výrobu desek plošných spojů a stručně vypsány dnes nejvíce rozšířené varianty základních substrátů. Dále byly uvedeny zásadní procesy a metody používané pro nanášení pájecích past a objasněny techniky pájení. Byla zde představena kapitola popisující testování pájených spojů na základě platných norem pro stanovení mechanické spolehlivosti pájených spojů. Byly také popsány vodivé vrstvy vytvářené na neohebných a flexibilních základních substrátech. Galvanické pokovování se často využívá při výrobě desek plošných spojů, a proto je mu také věnována samostatná kapitola v teoretické části práce. Poslední část je věnována kapitole o spolehlivosti a vadách pájených spojů.

Praktická část práce je zaměřena na nanášení vodivých vrstev na neohebné a flexibilní základní substráty pomocí tiskárny Voltera V-One. K tomu byly využity výrobcem dodávané vodivé pasty. V první fázi byly vytisknuty vodivé motivy na vhodné tkaniny, které snesou dlouhodobé vystavení vysokým teplotám. U všech tkanin však nastal problém již při samotném tisku a následně i při manipulaci s hotovými vzorky. Vlivem nadměrných nechtěných ohybů došlo záhy k popraskání vodivé vrstvy a nebylo možné provést podrobnější měření. Z pokusů vyšlo najevo, že by teoreticky bylo možné vytvářet vodivé vrstvy pomocí tisku na tkaniny a textilie, které jsou velice jemné a zároveň jsou i tuhé a nedovolí ohnutí v příliš velikých poloměrech.

Pomocí stejné flexibilní vodivé pasty byly vytvořeny vzorky na PVC fólii. Využitá fólie byla dostatečně tuhá a vodivý motiv měl dostatečnou přilnavost a bylo možné určit vliv ohnutí vzorku na odpor vodivého motivu. Z Obr. 33 je patrné, že změna elektrického odporu při malých poloměrech ohybu je minimální. Při ohybech nad poloměr 90 mm byl odpor již značně závislý na poloměru ohnutí.

Pomocí dvou různých vodivých past byly vytištěny vodivé motivy na dva základní substráty. Konkrétně na substrát FR4 a korundovou keramiku. Na tyto vzorky byly následně pomocí pěti různých pájecích past připájeny nulové SMD rezistory. Avšak pájecí pasty bez obsahu stříbra nebylo možné použít z důvodu minimální smáčivosti s vodivým motivem. Tento problém byl vyřešen pomocí nanášení další vodivé vrstvy mědi na vytištěný motiv. Měděná vrstva byla nanášena pomocí elektrochemického pokovování. K pokovování byly využity dva kyselé elektrolyty o obdobném složení. U vzorků, které byly pokoveny mědí, bylo již možno využít všechny zvolené pájecí pasty. Navíc u pokovených vzorků došlo k výraznému snížení odporu pájených spojů. Průměrná hodnota všech pájených spojů vytvořených na materiálu FR4 před pokovením byla 17,7 mΩ. Po pokovení klesla průměrná hodnota elektrického odporu spojů na 5,8 mΩ v případě elektrolytu č. 1 a u elektrolytu č. 2 na hodnotu 7,5 mΩ.

Pokovení mělo také zásadní vliv na mechanickou odolnost pájených spojů proti odtržení stanovované pomocí zkoušky stříhem. Před pokovením byla průměrná síla potřebná k odtržení SMD rezistorů od substrátu FR4 25,8 N. Po pokovení vzorků vzrostla průměrná síla potřebná k odtržení na 77,0 N (elektrolyt č. 2) a 66,5 N (elektrolyt č. 1). Z těchto výsledků lze stanovit závěr, že pokovením vytištěných vodivých motivů pomocí mědi dojde k výraznému zlepšení elektrických i mechanických vlastností pájených spojů a tím i celé desky plošných spojů. U některých DPS může být problém při elektrochemickém pokovování. A to takový, že je nutné připojit všechny vodivé plochy na záporný pól zdroje. Tento problém by se dal však obejít pomocí chemického pokovování. Zde není potřeba žádná aparatura pouze vhodný roztok. Nevýhodu však představuje pomalá vylučovací rychlost.

## Citovaná literatura

- [1] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž V Elektronice*. B.m.: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Český normalizační institut, 201-08-01. Třídící znak 050011
- [3] ČSN 05 0000. *Zváranie. Zváranie kovov. Základné pojmy*. Praha: Český normalizační institut, 1987-12-01. Třídící znak 050000
- [4] *Základní pojmy a terminologie ve svařování, pájení, tepelném dělení, tepelném zpracování a lepení* [online]. [vid. 2021-10-17]. Dostupné z: <http://atz.cz/?p=840>
- [5] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. In Úřední věstník, L 174, 1.7.2011, s. 88. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2>. nedatováno.
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Pájenní a bezolovnaté pájky* [online]. [vid. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10192933-Pajeni-a-bezolovnate-pajky-doc-ing-ivan-szendiuch-csc.html>
- [7] STARÝ, Jiří, Josef ŠANDERA a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, 2000. ISBN 80-214-1499-5.
- [8] *PCB Substrates: Knowing Your PCB Dielectric Materials / Sierra Circuits* [online]. [vid. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/pcb-substrates-knowing-dielectric-materials-properties/>
- [9] MINGES, Merrill L. a ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. *Electronic materials handbook*. B.m.: ASM International, 1989. ISBN 978-0871702852.
- [10] KELLEY, Edward J. Base material components. In: Jr CLYDE F. COOMBS, ed. *Printed Circuits Handbook* [online]. 6. vyd. B.m.: Mc Graw hill, 2010, s. 139–163. ISBN 0954-0911. Dostupné z: [https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde\\_Coombs\\_Printed\\_Circuits\\_Handbook-ElectroVolt.ir\\_.pdf](https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde_Coombs_Printed_Circuits_Handbook-ElectroVolt.ir_.pdf)
- [11] VIANCO, Paul T. Assembly processes. In: Jr CLYDE F. COOMBS, ed. *Printed Circuits Handbook* [online]. 6. vyd. B.m.: Mc Graw hill, 2010 [vid. 2021-10-31], s. 905–969. ISBN 0954-0911. Dostupné z: [https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde\\_Coombs\\_Printed\\_Circuits\\_Handbook-ElectroVolt.ir\\_.pdf](https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde_Coombs_Printed_Circuits_Handbook-ElectroVolt.ir_.pdf)
- [12] *Why Is Cem-1 PCB Material still Popular in the Circuit Board Market ? - Printed Circuit Board Manufacturing & PCB Assembly - RayMing* [online]. [vid. 2021-12-09].

- Dostupné z: <https://www.raypcb.com/why-is-cem-1-pcb-material-still-popular-in-the-circuit-board-market/>
- [13] *Keramické plošné spoje – ELCERAM* [online]. [vid. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.elceram.cz/plosne-spoje-a-senzory/>
- [14] K. NUMAKURA, Dominique. Flexible circuit applications and materials. In: Jr CLYDE F. COOMBS, ed. *Printed Circuits Handbook* [online]. 6. vyd. B.m.: Mc Graw hill, 2010, s. 1463–1484. ISBN 0954-0911. Dostupné z: [https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde\\_Coombs\\_Printed\\_Circuits\\_Handbook-ElectroVolt.ir\\_.pdf](https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde_Coombs_Printed_Circuits_Handbook-ElectroVolt.ir_.pdf)
- [15] *APICAL® Polyimide AV – Kaneka* [online]. [vid. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://apicalfilm.com/apical-polyimide-av/>
- [16] *DuPont™ Kapton® polyimide films* [online]. [vid. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/electronic-materials/kapton-polyimide-film.html>
- [17] *DuPont™ Pyralux® LF, Acrylic-Based Copper-Clad Laminate* [online]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/products/ei-transformation/documents/EI-10117-Pyralux-LF-CCL-Data-Sheet.pdf>
- [18] FREEDMAN, Gary M. Soldering materials and matallurgy. In: Jr CLYDE F. COOMBS, ed. *Printed Circuits Handbook* [online]. 6. vyd. B.m.: Mc Graw hill, 2010, s. 1037–1056. ISBN 0954-0911. Dostupné z: [https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde\\_Coombs\\_Printed\\_Circuits\\_Handbook-ElectroVolt.ir\\_.pdf](https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde_Coombs_Printed_Circuits_Handbook-ElectroVolt.ir_.pdf)
- [19] ABEL, Martin. *SMT - technologie povrchové montáže*. B.m.: Platan, 2000. ISBN 80-902733-1-9.
- [20] HE, Dongling. a N. N. EKERE. Study of solder paste flow inside a sealed printing head. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2000, 142–146 [vid. 2021-11-21]. ISSN 0-7803-5908-9. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2000.853136
- [21] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [22] *Solder Paste Jet Printing Solution I Essemtec AG* [online]. [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://essemtec.com/en/products/dispensing/solder-paste-jet-printing/>
- [23] GU, Shoudong, Xiaoyang JIAO, Jianfang LIU, Zhigang YANG, Hai JIANG a Qingqing LV. Design and experiment of a solder paste jetting system driven by a piezoelectric stack. *Micromachines* [online]. 2016, 7(7) [vid. 2021-11-21]. ISSN 2072666X. Dostupné z: doi:10.3390/MI7070112
- [24] LIUKKONEN, Mika, Elina HAVIA, Hannu LEINONEN a Yrjö HILTUNEN. Quality-oriented optimization of wave soldering process by using self-organizing maps. *Applied*



- Soft Computing* [online]. 2011, **11**(1), 214–220. ISSN 1568-4946. Dostupné z: doi:10.1016/J.ASOC.2009.11.011
- [25] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. B.m.: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02193-9.
- [26] *Pájení v elektrotechnice* [online]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod\\_resource/content/1/Pajeni.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf)
- [27] *Pájení přetavením - ACG Cooler International Limited* [online]. 5. březen 2018 [vid. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://cz.acgcoolers.com/info/reflow-soldering-25715157.html>
- [28] SOPER, A., G. POZZA, M. IGNAT a G. PARAT. Mechanical response of solder joints in flip-chip type structures. *Microelectronics Reliability* [online]. 1997, **37**(10–11), 1783–1786. ISSN 0026-2714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(97)00159-5
- [29] DUŠEK, Miloš a Christopher HUNT. *Crack Detection Methods For Lead-free Solder Joints - NPL ...* [online]. 2004 [vid. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/27031330/crack-detection-methods-for-lead-free-solder-joints-npl->
- [30] ČSN EN 62137-1-2 *Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-2: Zkouška pevnosti ve smyku*. Praha: Český normalizační institut, 2008-01-01. Třídící znak 359391. nedatováno.
- [31] MCENTEGGART, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics. *Instron Limited* [online]. nedatováno [vid. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/-/media/literature-library/whitepapers/2005/02/roleofmicromechanicaltestinginmicroelectronicspdf.pdf>
- [32] WICKHAM, Martin, Jaspal NOTTAY a Christopher HUNT. A Review of Mechanical Test Method Standards for Lead-Free Solders. *National Physical Laboratory* [online]. 2001, **69**, 9–10 [vid. 2021-11-17]. ISSN 1473 2734. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2123/1/matc69.pdf>
- [33] ČSN EN 62137-1-1 *Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení*. Praha: Český normalizační institut, 2008-02-01. Třídící znak 359391
- [34] PIETRIKOVÁ, Alena a Juraj ĎURIŠIN. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vyd. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Techickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [35] HÁJEK, Michal. *Elektrická rezistivita* [online]. [vid. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.mff.cuni.cz/cs/kfm/experimentalni-vybaveni/elektricka-rezistivita>
- [36] *PCB Track Width and Track Resistance – Importance, Calculation, and Design Tips*

- [online]. [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://pcbdesignworld.com/article/pcb-track-width-and-track-resistance-importance-calculation-and-design-tips>
- [37] *How to Avoid Trace Fracturing on Flexible Circuits | All Flex* [online]. 28. únor 2020 [vid. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.allflexinc.com/blog/how-to-avoid-trace-fracturing-on-flexible-circuits/>
- [38] CHEN, Yuxin, Zhirong DENG, Ri OUYANG, Renhao ZHENG, Zhiqiang JIANG, Hua BAI a Hao XUE. 3D printed stretchable smart fibers and textiles for self-powered e-skin. *Nano Energy* [online]. 2021, **84**, 105866. ISSN 2211-2855. Dostupné z: doi:10.1016/J.NANOEN.2021.105866
- [39] TANG, Zhenhua, Dijie YAO, Songcheng HU, Donghe DU, Wanshuai SHAO, Baoshan TANG, Jing Min FAN, Xin Gui TANG a Ju GAO. Highly conductive, washable and super-hydrophobic wearable carbon nanotubes e-textile for vacuum pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2020, **303**, 111710. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/J.SNA.2019.111710
- [40] VISWANATHAN, Sorna Mugi. E-Textile and its Applications. 2019, **9**, 20174–20176.
- [41] STANĚK, J. *Nauka o textilních materiálech: určeno pro posl. 2. roč. fak. textilní. Vlastnosti dělkových a plošných textilií* [online]. B.m.: Vysoká škola strojní a textilní, 1988. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=qI16twAACAAJ>
- [42] KOBLÍŽEK, Vilém. *Vytváření tenkých vrstev ve vakuu [návod k laboratorní úloze]* [online]. Dostupné z: <https://adoc.pub/vytvaeni-tenkych-vrstev-ve-vakuu.html>
- [43] LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. *Elektro* [online]. 2003, **07**. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- [44] W. F. YAHYA DOAA W. F. YAHYA, Doaa. *Mechanické a elektrické vlastnosti tenkých kovových vrstev nanášených vakuovým napařováním* [online]. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/51837>
- [45] LE, Nguyen Ngan, Thi Cam HUE PHAN, Anh Duy LE, Thi My DUNG DANG a Mau Chien DANG. Optimization of copper electroplating process applied for microfabrication on flexible polyethylene terephthalate substrate. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* [online]. 2015, **6**(3), 035007. ISSN 2043-6262. Dostupné z: doi:10.1088/2043-6262/6/3/035007
- [46] LOU, H.H. a Yinlun HUANG. *Electroplating* [online]. New York: Taylor and Francis, 2006 [vid. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.623.7808&rep=rep1&type=pdf>
- [47] GARAY, Jan. *Návrh galvanické linky pro kontinuální elektrochemické pokovení drátu*

- povlaky Fe a Ni* [online]. B.m., 2010. VŠB - Technická univerzita Ostrava - Diplomová práce. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/8984032.pdf>
- [48] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy* [online]. B.m.: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 9788070826683. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=LA1nYgEACAAJ>
- [49] KULHAVÝ, Jan. *Dutiny v pájených spojkách* [online]. B.m., 2019. České vysoké učení technické - Diplomová práce. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82544/F3-DP-2019-Kulhavy-Jan-Diplomova\\_prace\\_Kulhavy.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82544/F3-DP-2019-Kulhavy-Jan-Diplomova_prace_Kulhavy.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [50] JURÁK, Karel a Zuzana NEJEZCHLEBOVÁ. *Vady pájených spojků – Terminologie* [online]. [vid. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:22901/vady-pajenych-spoju-terminologie>
- [51] SMT Troubleshooting Guide AIM's Practical Solutions. nedatováno, 1–38.
- [52] *PCB Printer / Voltera* [online]. [vid. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/product/pcb-printer>
- [53] NOVÁK, Tomáš. *Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji* [online]. B.m., 2012. Západočeská univerzita v Plzni - Disertační práce. Dostupné z: <https://adoc.pub/queue/zapadoeska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-diser.html>
- [54] VIVARI, John. *Evertiq - Flux Type Selection* [online]. [vid. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://evertiq.com/news/16783>
- [55] *Alpha označování tavidel* [online]. [vid. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.ermeg.cz/download/brands-documents/alpha/oznacovani-tavidel.pdf>
- [56] HYDROGENTIME. *Process 01, an open source 2 layer PCB process* [online]. 2021 [vid. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/180422-process-01-an-open-source-2-layer-pcb-process>
- [57] DOW, Wei-Ping, Ming-Yao YEN, Wen-Bing LIN a Shih-Wei HO. Influence of Molecular Weight of Polyethylene Glycol on Microvia Filling by Copper Electroplating. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2005, **152**(11), C769. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.2052019
- [58] HAN, Ji-Hyung, Edwin KHOO, Peng BAI a Martin Z BAZANT. *Over-limiting Current and Control of Dendritic Growth by Surface Conduction in Nanopores* [online]. 2014 [vid. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1408/1408.4202.pdf>
- [59] MARKO, Roman. *Mechanické vlastnosti spájkovaných spojov* [online]. Praha, 2020 [vid. 2022-05-16]. České vysoké učení technické v Praze - Bakalářská práce. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86107/F3-BP-2020-Marko-Roman-mechanicke\\_vlastnosti\\_spajkovanych\\_spojov.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86107/F3-BP-2020-Marko-Roman-mechanicke_vlastnosti_spajkovanych_spojov.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip nanášení pájecí pasty pomocí šablony. Převzato z [20] .....	17
Obrázek 2 – Bezkontaktní dávkování pájecí pasty. Převzato z [21] .....	18
Obrázek 3 - Princip metody Jet Print. Převzato z [23].....	18
Obrázek 4 - Detail ručního pájecího procesu. Převzato z [11].....	19
Obrázek 5 - Proces pájení vlnou. Převzato z: [25].....	20
Obrázek 6 – a) pájení vlnou, b) pájení přetavením. Převzato z [25] .....	21
Obrázek 7 - Teplotní profil. Převzato z [27].....	22
Obrázek 8 - Nastavení trhacího trnu. Převzato z [31].....	23
Obrázek 9 – Možné odtržení součástky při testu stříhem. Převzato z [30] .....	24
Obrázek 10 - Zkouška tahem. Převzato z [32].....	24
Obrázek 11 - Schéma čtyřbodové metody. Převzato z [35].....	25
Obrázek 12 - Princip galvanického pokovení. Převzato z [46].....	30
Obrázek 13 - Návrh nepružné DPS v programu KiCad.....	34
Obrázek 14 - Návrh flexibilní DPS v programu KiCad.....	34
Obrázek 15 - Trhačka Deform použitá pro vyhotovení zkoušky stříhem. ....	35
Obrázek 16 - Přístroj MM2030 pro měření malých odporů.....	35
Obrázek 17 - Vzorek testovací destičky z FR4 a korundové keramiky před osazením.	37
Obrázek 18 - Nerovnosti pájecích plošek před zbroušením.....	37
Obrázek 19 - Detail a rovinnost povrchu pájecí plošky před zbroušením.....	38
Obrázek 20 - Detail pájecí plošky po zabroušení. ....	38
Obrázek 21 - Detail a rovinnost povrchu pájecí plošky po zbroušení.....	39
Obrázek 22, 23 - Pájecí plošky a) s vysokou kvalitou, b) nedostatečnou kvalitou.....	39
Obrázek 24 - Špatná smáčivost pájecích ploch.....	43
Obrázek 25 - Pokovovací experiment.....	45
Obrázek 26 - Detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č.1.....	45
Obrázek 27 - Detail pokoveného povrchu pomocí elektrolytu č. 2.....	46
Obrázek 28 - Porovnání pokovených povrchů.....	46
Obrázek 29 – Vytištěný vzorek na tkaninu s označením BV 130.89016.....	47
Obrázek 30 - Mikropraskliny na textilu.....	48
Obrázek 31 – Vzorek vytvořený na polyamidovou fólii Epoflex. ....	48
Obrázek 32 - Vzorek vytvořený na PVC fólii. ....	49
Obrázek 33 – Závislost odporu vodivé vrstvy na ohybu, PVC fólie.....	50
Obrázek 34 - Vliv pokovení povrchu na smáčivost pájecích past. ....	52

Obrázek 35 - Odpor pájených spojů na substrátu FR4.....	54
Obrázek 36 - Odpor pájených spojů na korundové keramice. ....	54
Obrázek 37 - Detail odtržení rezistoru v intermetalické vrstvě.....	56
Obrázek 38 - Průměrné síly potřebné k odtržení rezistorů od substrátu FR4. ....	58
Obrázek 39 - Průměrné síly potřebné k odtržení rezistorů od korundové keramiky. ...	59
Obrázek 40 - Porovnání vzorků pájených pomocí různých pájecích past. ....	60

## Seznam tabulek

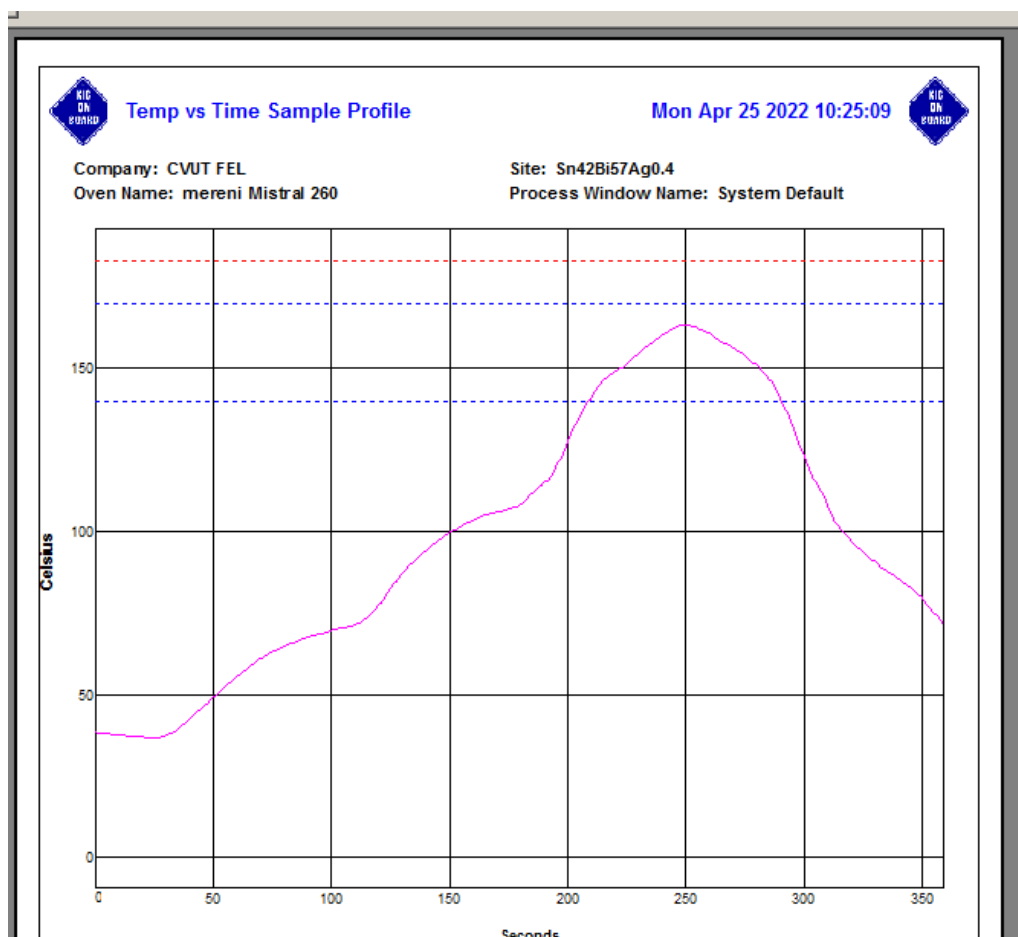
Tabulka 1 - Nejrozšířenější materiály využívané pro výrobu substrátů. ....	13
Tabulka 2 - Bezolovnaté pájky.....	16
Tabulka 3 - Materiály využívané pro výrobu flexibilních DPS. ....	27
Tabulka 4 - Použité vodivé pasty.....	36
Tabulka 5 - Tkaniny využívané pro flexibilní DPS.....	40
Tabulka 6 - Teplotní profily pájení.....	42
Tabulka 7 - Parametry použitých pájecích past. ....	42
Tabulka 8 - Chemické složení elektrolytů č. 1 a 2.....	44
Tabulka 9 - Odpor pájených spojů – nepokovených.....	51
Tabulka 10 - Odpor pájených spojů – pokoveným elektrolytem č. 1.....	52
Tabulka 11 - Odpor pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 2. ....	53
Tabulka 12 - Mechanická odolnost pájených spojů – nepokovených. ....	55
Tabulka 13 - Mechanická odolnost pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 1. .	56
Tabulka 14 - Mechanická odolnost pájených spojů – pokovených elektrolytem č. 2. .	57

## Seznam příloh

Příloha 1 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi57Ag0,4.....	70
Příloha 2 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi57Ag1.....	71
Příloha 3 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi58. ....	72
Příloha 4 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn63Pb37.....	73
Příloha 5 - Teplotní profil použitý pro pájku M8 SAC305. ....	74
Příloha 6 - Naměřená data – PVC fólie. ....	75

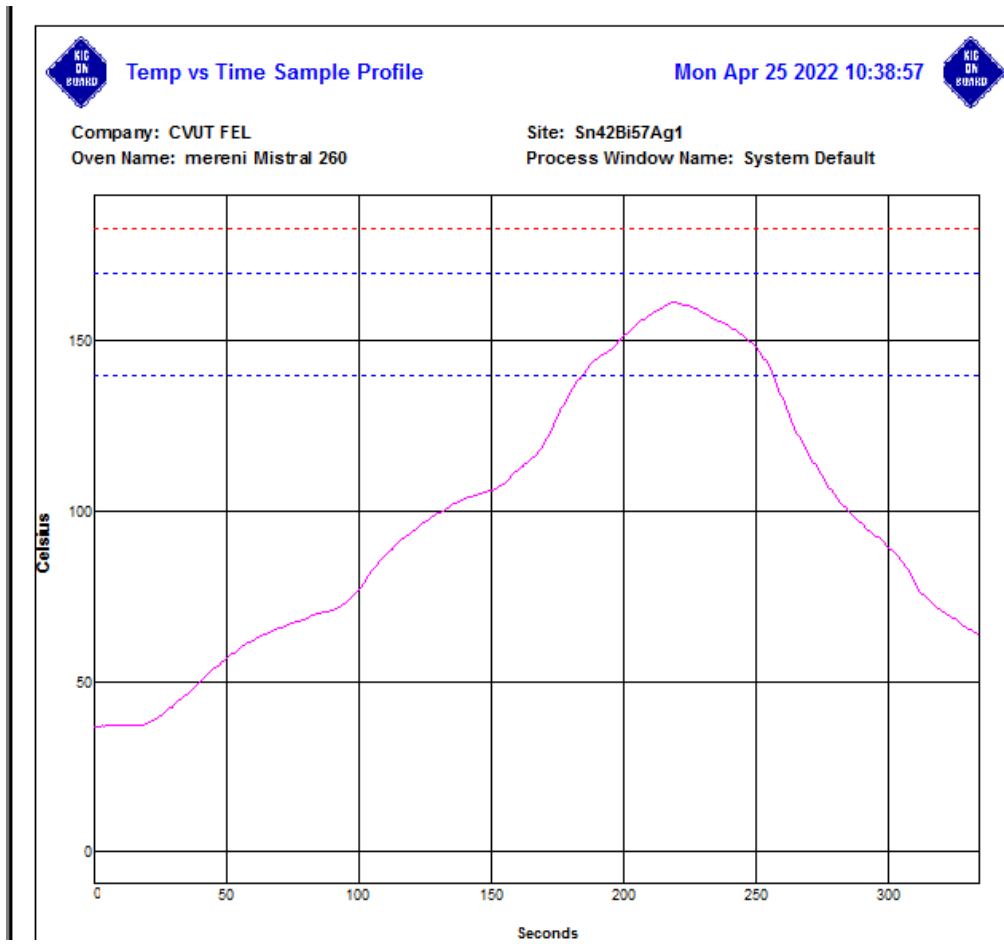
# Přílohy

## Příloha č. 1



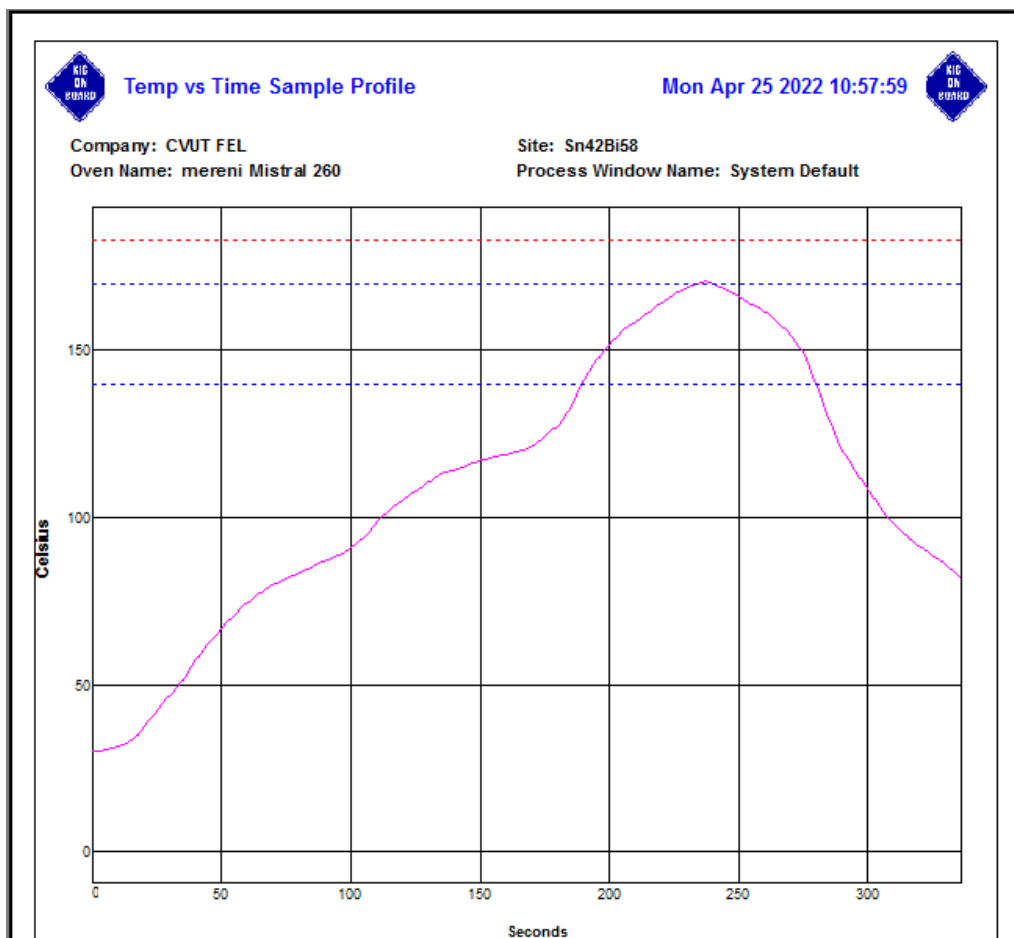
Příloha 1 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi57Ag0,4.

## Příloha č.2



*Příloha 2 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi57Ag1.*

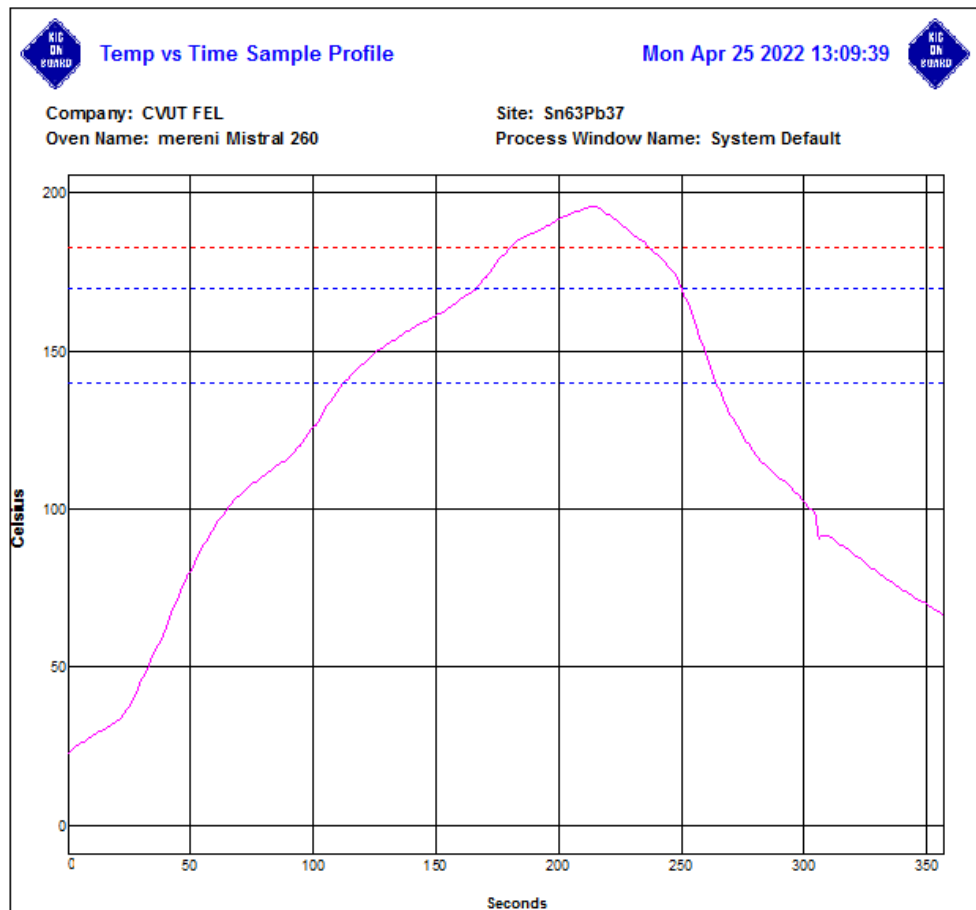
### Příloha č. 3



*Příloha 3 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn42Bi58.*

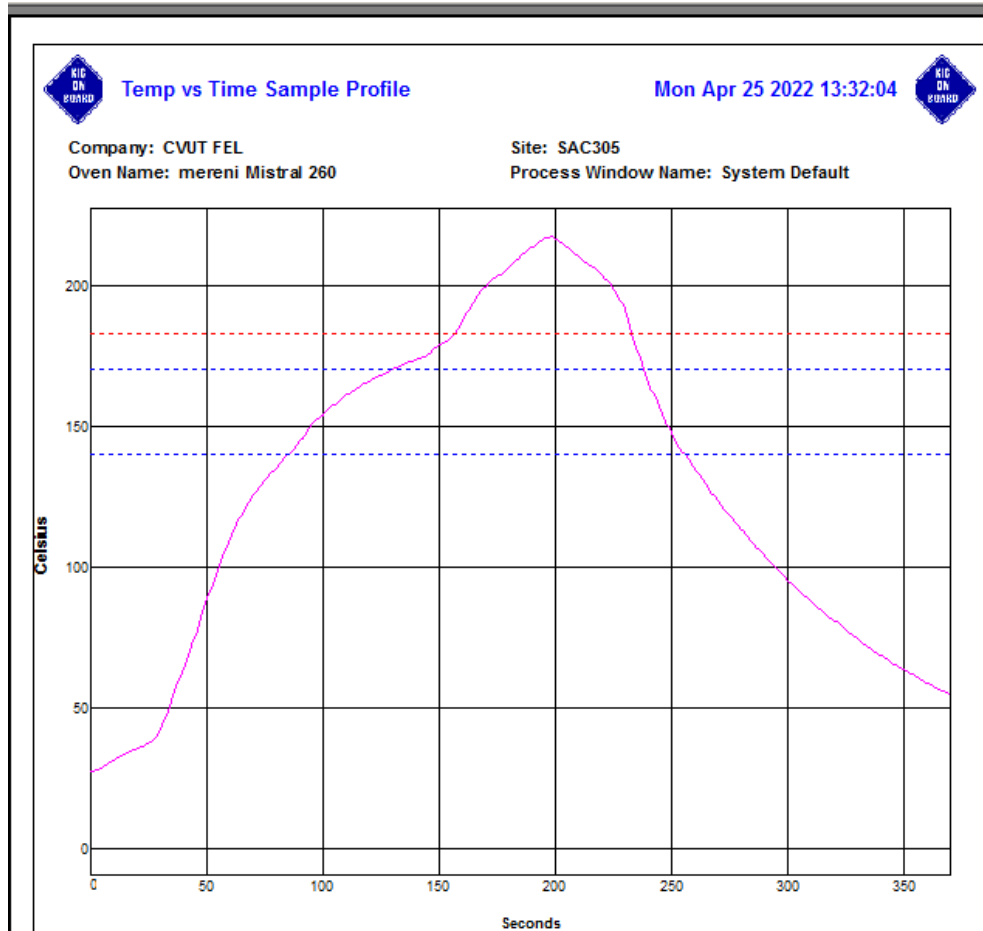


## Příloha č. 4



*Příloha 4 - Teplotní profil použitý pro pájku Sn63Pb37.*

## Příloha č. 5



*Příloha 5 - Teplotní profil použitý pro pájku M8 SAC305.*

## Příloha č. 6

vzorek č.	posunutí čelistí [mm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	poloměr [mm]	-	203.0	144.0	117.0	100.0	89.9	82.2	76.0	71.0	67.0	63.5	60.5	57.7	55.5	53.3	51.4	49.7	48.1	46.7	45.4	44.2
1	R [mQ] při ohybu	838.1	838.9	839.3	840	842.4	843.3	845.7	858.4	860.7	867.7	873.8	895.4	910.1	920.3	927.6	933.6	937.3	943	950	956	965
	R [mQ] bez ohybu	838.1	838.1	838.4	839.4	840.3	841.6	843	853	854.6	860	861.8	875.8	880	891.5	891.5	895.1	898.4	898.7	903	907	916.2
	$\Delta R$ [mQ]	0	0.8	0.9	0.6	2.1	1.7	2.7	5.4	6.1	7.7	12	19.6	30.1	28.8	36.1	38.5	38.9	44.3	47	49	48.8
2	R [mQ] při ohybu	322.5	322.5	322.8	323	323.3	323.5	323.8	324.7	325.3	326.6	328.1	329.8	331.9	334.2	336.5	340.6	344.1	347.8	351.3	354.5	357.7
	R [mQ] bez ohybu	322.5	322.5	322.6	322.7	322.8	322.8	322.8	323.1	323.6	323.8	324.2	324.6	325.4	325.4	325.4	326.4	327.2	328.6	329.9	330.5	331.4
	$\Delta R$ [mQ]	0	0	0.3	0.4	0.6	0.8	1	1.6	1.7	2.8	3.9	5.2	6.9	8.8	11.1	14.2	16.9	19.2	21.4	24	26.3
3	R [mQ] při ohybu	359.8	360.4	360.9	360.9	361.4	362	362.8	364.2	365.4	367.1	369.2	371.4	373.7	376.1	378.7	381.6	384.2	387.7	391.3	395.4	398.8
	R [mQ] bez ohybu	359.8	360.1	360.3	360.3	360.2	360.5	360.7	361.2	361.7	362.8	363	364.7	365.1	365.4	365.4	365.5	365.5	366.5	367.2	367.9	369.5
	$\Delta R$ [mQ]	0	0.3	0.6	0.6	1.2	1.5	2.1	3	3.7	4.3	6.2	6.7	8.6	10.7	13.2	16.2	18.7	21.2	24.1	27.5	29.3
4	R [mQ] při ohybu	393.9	394.2	394.1	394.2	394.3	394.9	395.1	396.1	397.2	398.3	399.9	401.5	403.6	406.2	408.9	412	414.8	418.9	422.3	425.3	427.9
	R [mQ] bez ohybu	393.9	393.9	393.6	393.6	393.7	394.2	394.5	394.7	395	395.3	395.8	396.3	396.5	397.1	397.4	398.1	398.5	399.2	399.8	399.6	401.3
	$\Delta R$ [mQ]	0	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	1.4	2.2	3	4.1	5.2	7.1	9.1	11.5	13.9	16.3	19.7	22.5	25.7	26.6

Příloha 6 - Naměřená data – PVC fólie.