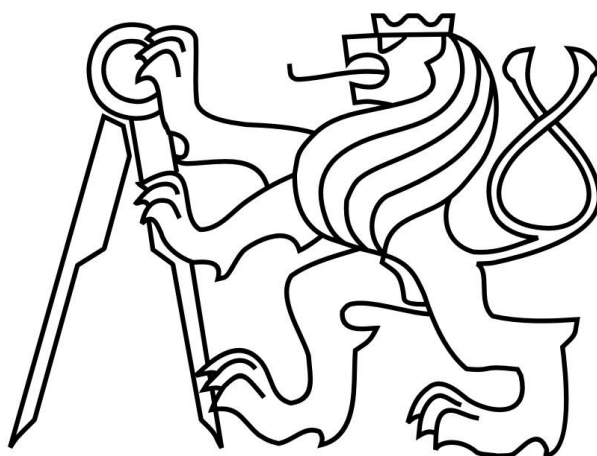


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2018

Bc. Jan Ševčík

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

**SPOLEHLIVOST PROKOVŮ U DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

**Autor:** Bc. Jan Ševčík

Praha 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ševčík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **399671**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Spolehlivost prokůvů u desek plošných spojů**

Název diplomové práce anglicky:

**Reliability of vias of printed circuit boards**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení a s deskami plošných spojů.
- 2) Uveďte typy chyb, které se mohou na deskách plošných spojů vyskytnout.
- 3) Připravte si sadu vzorků s ohledem na tloušťku prokóvu, které podrobíte tepelnému namáhání.
- 4) Výsledky experimentů s ohledem na poruchovost prokůvů vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice, 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

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: **20.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce zimního semestru 2018/2019**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

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

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(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 Metodickými pokynem o dodržení etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....  
Jan Ševčík

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za cenné rady a sestavení programu v LabVIEW. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Karlu Dušekovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a Ondřeji Rezekovi za asistenci při nastavování klimatické komory. Nakonec bych chtěl poděkovat Doře Talackové.

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá testování prokovů DPS (desky plošného spoje). Testování bylo prováděno pomocí cyklického teplotního namáhání, během kterého bylo prováděno kontinuální měření odporu prokovů. V teoretické části jsou popsány faktory, které mají vliv prokovy DPS a vady, jenž na nich mohou vzniknout. V experimentální části práce je uveden návrh testovacího vzorku DPS s prokovy, popis zapojení a měření experimentu. Nakonec zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

## Annotation

This diploma thesis deals with testing via PCB (printed circuit boards). Testing was performed using cyclic thermal stresses during which continuous resistance measurements were performed via. In the theoretical part, there are described the factors that influence the PCB and the defects that can occur on them. In the experimental part of the thesis is presented the design of a PCB test sample with vias, a description of the connection and the measurement of the experiment. Finally, processing and evaluating measured dat

## Obsah

Prohlášení .....	vii
Poděkování .....	viii
Anotace.....	1
Annotation.....	1
Úvod: .....	7
Materiály .....	9
Pájecí slitiny .....	9
Pájecí pasty.....	10
Vodivá složka .....	10
Tavidlo .....	11
Elektricky vodivá lepidla .....	11
Vodivá složka (filler).....	12
Deska plošného spoje (DPS) .....	13
Technologie Pájení.....	15
Teplotní profil .....	15
Pájení vlnou .....	16
Pájení přetavením.....	17
Pájení infračerveným zářením .....	17
Pájení horkým vzduchem .....	18
Pájení v parách .....	18
DPS.....	19
Materiály .....	19
Základní materiál .....	19
Nepájitvá maska.....	21
Technologie výroby .....	21
Návrh .....	21
Technologický rozbor.....	22

Vykreslení filmových matric .....	22
Expozice .....	22
Leptání .....	22
Registrační otvory.....	23
Laminace.....	23
Vrtání .....	24
Pokovení .....	25
Nepájivá maska.....	26
Povrchová úprava .....	26
Dokončení.....	27
Testování .....	27
Vady DPS.....	28
Špatné pokovení .....	28
Delaminace .....	29
Nedostatečná vrstva koloidu .....	30
Průhyb DPS .....	30
Experimentální část .....	31
Měření odporu .....	31
Čtyřsvorková metoda měření odporu .....	31
Miliohmmetr.....	32
Měření teploty.....	33
Klimatická komora .....	33
Vzorek.....	36
Základní materiál .....	37
Návrh .....	37
Měření .....	39
LabVIEW.....	40
Naměřené a vypočtené hodnoty.....	41



Výbrusy .....	49
Závěr .....	52
Citovaná literatura.....	53

## Úvod:

S postupným vývojem elektroniky se zvyšovala i složitost elektronických obvodů. Původní propojení jednotlivých komponentů pomocí drátových vodičů bylo obtížně proveditelné a komplikovalo sériovou výrobu. Tento problém byl vyřešen první DPS (deskou plošného spoje), která byla tvořena izolační destičkou, na níž byly natištěny vodivé cesty, které jsou v dnešní době spíše leptané. (1) Historicky označení DPS jako „tišťák“ se však dochovalo. Do doby, kdy jedno pouzdro obsahovalo jednu součástku, byla dostačující jednovrstvá DPS, avšak v 60. letech, s nástupem tranzistoru a později integrovaných obvodů, vzrostl i počet vývodů na pouzdro, a tím se zvýšila složitost a hustota vodivých cest natolik, že bylo zapotřebí zhotovit vícevrstvé DPS. Vlivem nárůstu další integrace a miniaturizace se i nadále zvyšoval počet vývodů na pouzdro a hustota součástek na DPS. Proto standartní vývodová technologie THT (through hole technology) s „klasickými“ vývodovými součástkami typu THD (through hole devices) přestala stačit a vznikla technologie SMT (surface mount technology) se součástkami SMD (surface mount device). Výhodou SMD oproti THD jsou menší rozměry a jejich možné umístění na obou stranách DPS přímo proti sobě. Absencí THD součástek nastal problém s propojením jednotlivých vrstev, což bylo vyřešeno prokovy (via), které se postupně zmenšovaly, protože většinou přenášely pouze signály, až se dostaly na technologický limit 0,05 mm (podle mě dostupné literatury). (2) Menším typem prokovů jsou takzvané microvia, které jsou vytvářeny pomocí laserové technologie. Dalším typem prokovů je slepý prokov (blind), používaný pro propojení vodivých cest, které jsou přímo nad ním. V okamžiku, kdy integrace dosáhla bodu, kdy obvod součástky nestačil pro umístění všech vývodů, vznikla technologie CSP (chip scale packages), kde jsou vývody umístěné přímo pod součástkou. Prokovy zde našly uplatnění jako jediná možnost pro vyvedení všech elektrických signálů, ale také se zde používají pro odvedení tepla z čipu. Větší velikosti prokovů nutných pro odvod tepla nestačily dalšímu zvyšování počtu vývodů, proto tuto metodu odvodu tepla lze použít pouze tam, kde není tak velká míra integrace, nebo nejsou kladeny nároky na rozměry pouzdra čipu. S CSP technologií přišla i nutnost nové technologie kontaktování součástek, jako jsou vodivá lepidla, nebo technologie *flip-chip*. Samotné kontaktování naprosto změnilo nároky na výrobu DPS a součástek od roku 2011, kdy byla schválena direktiva evropské komise rozšíření směrnice RoHS (The Restriction of Hazardous Substances Directive). RoHS směrnice omezuje v elektronice použití šesti látek a to: kadmium, olovo, rtuť, šestimocný chrom a polybromované difenylethy a bifenylly. Výjimku tvoří jen výrobky, které nelze vytvořit bez těchto látek. Jedná se zejména o akumulátory nebo např. lékařské a vojenské zařízení, kde nutnost spolehlivosti dalece překračuje ekologickou závadnost. Největší vliv na DPS měla tato směrnice omezením olova a nutnost přechodu na bezolovnaté pájky. Hlavní rozdíl mezi klasickou olovnatou pájkou 63Sn37Pb a například bezolovnatou pájkou 99,3Sn0,7Cu, je teplota tavení, která se zvýšila z 183 °C na 227 °C. Z toho vyplývají problémy se zvýšeným tepelným namáháním nejen kontaktovaných součástek, ale i samotné DPS, která mechanicky namáhána vlivem pnutí, které je způsobeno různou

teplotní roztažností jednotlivých vrstev DPS. Tím dochází ke snížení spolehlivosti zařízení, která jsou pájena bezolovnatou pájkou. To je také jeden z důvodů, proč se tato směrnice nevztahuje na lékařská a vojenská zařízení. Jako alternativa za bezolovnaté pájky se nabízejí vodivá lepidla, která se vytvrzují při teplotě 150 °C, nebo dokonce při pokojové teplotě, ale s tím souvisí delší doba vytvrzování a problémy s jejich skladováním (2). Celkově elektricky vodivá lepidla jsou více elastická než pájky a lépe snášejí tepelné namáhání. Tato lepidla, ale obsahují drahé kovy Ag (stříbro), nebo Au (zlato), a proto jsou poměrně drahá. Jako levnější varianty jsou lepidla obsahující Ni (nikl), nebo Cu (měď), ale u nich dochází k silné oxidaci, a tím i k horší elektrické vodivosti. Z výše uvedeného je pochopitelné, že nejrozšířenější způsob kontaktování součástek je bezolovnatými slitinami a lze tím pádem očekávat tepelné namáhání DPS. Tepelné namáhání lze očekávat nejen při výrobě, ale i vlivem následné aplikace, jako je například elektronika umístěná v blízkosti motoru. V této aplikaci se může teplota během desítek minut změnit i z -60 °C na 150 °C.

## Materiály

V této kapitole stručně popisují materiály využívané pro DPS, a materiály pro vytvoření spoje mezi DPS a součástkami. Jako v každé výrobě, tak i zde jsou kladeny kvalitativní nároky na jednotlivé materiály, přičemž míra kvality je omezena cenovou návratností. Parametry indukující kvalitu každého materiálu se liší převážně dle jejich aplikace.

Kvalita materiálu pro výrobu DPS se vyznačuje:

- dobrými elektrickými vlastnostmi,
- chemickou stálostí,
- odolností proti teplotním změnám,
- mechanickou pevností,
- ekologickou nezávadností.

## Pájecí slitiny

Pájecí slitiny nepředstavují jen prostředek pro elektrický spoj mezi DPS a součástkou, ale také mechanické upevnění a odvádění tepla ze součástky. Olověná pájka Sn63Pb37 byla zavedena, a tedy ověřenou pájecí slitinou, ale jak již bylo řečeno, z ekologických důvodů se v současné době používají (až na výjimky) bezolovnaté pájecí slitiny, které musí splňovat několik kritérií:

- musí být netoxické,
- cenově dostupné,
- vyrobitelné,
- dosahovat dobré smáčivosti,
- zaručovat dostatečnou spolehlivost spoje,
- dobrá elektrická vodivost,
- teplota tavení (co nejnižší, aby se minimalizovalo teplotní namáhání součástek a DPS),
- úzký teplotní profil plasticity (tedy okamžité tuhnutí, aby nedocházelo k vadám spoje).

Bezolovnaté pájky většinou obsahují vyšší podíl cínu ve slitině, a to vede ke zvýšení teploty tání a větší tendenci k oxidaci. Příměsí jako bizmut a indium se výrazně mění teplota tání slitiny, ale zároveň se zhoršuje smáčivost. Stříbro je v bezolovnatých pájkách užíváno pro zlepšení elektrických vlastností, ale jeho vysoká cena je značně omezujícím faktorem.

### Sn63Pb37:

Tato slitina je nejrozšířenější cín-olověnou pájkou, která byla směrnici RoSH zakázána. Její teplota tání je 183 °C, díky spolehlivosti se tato pájka stále používá v armádním a lékařském odvětví.

### Sn96,5Ag3Cu0,5:

Jedná se o ekologickou slitinu ze skupiny SAC (SnAgCu). Patří mezi nejčastější slitiny. Teplota tání této pájky se pohybuje mezi 217 až 220 °C. Výhodou je nízká cena, dobrá spolehlivost i při vyšších teplotách a menší náchylnost ke tvorbě intermetalických vrstev. Tato pájka se většinou využívá pro pájení vlnou, ale prodává se i ve formě pasty, pro pájení přetavením.

### SnAgBi:

Přidáním bismutu do pájky dojde ke snížení teploty tavení na 206 - 213 °C, má také dobrou spolehlivost a používá se hlavně pro pájení povrchových SMD součástek.

### SnZnBi:

Jedná se o slitinu s teplotou tání blízkou k teplotě tání eutektické olovené pájky, ale z důvodu přítomnosti zinku vysoce oxiduje a má tedy nízkou korozivní odolnost. Z těchto důvodů má krátkou skladovací dobu a vyžaduje vysoce agresivní tavidla, což vede k znečištění spojů.

## Pájecí pasty

Jedná se o velice mladou technologii ve srovnání s olovenou pájkou, která se stále vyvíjí. Hlavní použití pájecích past je u SMT technologie, kdy je pasta nanášena na DPS přes šablonu. Tím je docíleno, že pasta je nanášena pouze na místech, kde budou umístěny kontakty součástek a po přetavení vytvořen spoj. Ačkoliv SMD součástky lze pájet i standardní pájkou, tak kontaktování SMD součástek pomocí pájecích past je technologicky snazší. Některé součástky, jako jsou například BGA, lze kontaktovat výhradně pájecími pastami, nebo elektricky vodivými lepidly, která budou probrána později.

Samotná pájecí pasta je tvořena v 90 % (hmotnostních) vodivou složkou a z 10 % tavidlem. Vodivá složka je tvořena slitinovými kuličkami a je kladen důraz na jejich symetričnost. Parametry pájecích past jsou dány velikostí kuliček, dále smáčivostí a viskozitou, které jsou dány volbou tavidla. Protože slitiny zrn, používaných pro pájecí pasty, jsou totožné se slitinami používanými pro klasické bezolovnaté pájení, tak i zde je problém s oxidací, a proto je oxidace jedním z významných parametrů.

### Vodivá složka

Jak již bylo řečeno, jako vodivá složka se používají standardní bezolovnaté pájky, které již byly zmíněny. Dalším parametrem vodivé složky je tedy velikost kuliček, ty se dělí do několika kategorií, přičemž výběr kategorie pájecí pasty je dán velikostí pájecích plošek. Je tedy zřejmé, že čím menší je pájecí ploška, tím musí být menší velikost kuliček pájecí slitiny.

## Tavidlo

Základní funkce tavidel je:

- odstranění povrchových oxidů
- chránění před oxidací při zvýšené teplotě pájení
- napomáhání přenosu tepla
- zlepšování smáčivosti spojovaných povrchů

Tavidla používaná pro pájecí pasty jsou stejná jako u tekutých pájek, tedy kalafuna, přírodní, nebo syntetické pryskyřice a organické látky. Pájecí pasty lze rozlišovat na několik typů, jako jsou mírně aktivované pryskyřice, tavidla rozpustná ve vodě, nebo speciální tavidlo „no-celan“ (zbytky toho tavidla není nutno po pájení odstraňovat).

Protože tavidla nejsou schopna sama o sobě zajistit požadovanou hodnotu viskozity, jsou do pájecích past kromě rozpouštědel a aktivátorů přidávány materiály na úpravu viskozity. Další materiál, který je přidáván do pájecích past, jsou teplotní stabilizátory, ty zajišťují konstantní vlastnosti během přetavovacího procesu.

## Elektricky vodivá lepidla

Elektricky vodivá lepidla jsou další alternativou kontaktování SMD součástek a jejich použití je podobné jako u pájecích past. Je tedy žádoucí, aby se elektrické vlastnosti těchto lepidel co nejlépe přiblížily pájkám. Tyto elektrické vlastnosti jsou:

- minimální elektrický odpor
- nízká hladina šumu
- lineární VA charakteristika

Těchto kvalit však lepidla stále nedosahují, mimo jiné mají horší mechanické vlastnosti, horší klimatickou odolnost a cenově jsou vůči pájkám výrazně dražší, protože obsahují vzácné kovy. Dále lepidla neumožňují samovystředění součástek, jako je tomu u pájek, kdy vlivem povrchového napětí dojde k pootočení součástky do osy středů pájecích plošek. Proto se nabízí otázka, proč tyto lepidla vůbec používat a vyvíjet. Důvodů je hned několik, ale ten nejdůležitější je, že umožňují vytvoření elektricky vodivého spoje na DPS při nižší teplotě než bezolovnaté pájení, a to dokonce při pokojové teplotě. Tato vlastnost je nenahraditelná u některých tepelně citlivých součástek, jako jsou třeba displeje. Další výhodou je pružnost spoje, která umožňuje korigovat různou teplotní roztažnost DPS a součástky. Vodivá lepidla mohou také jsou vodivá pouze v jednom směru se nazývají anizotropní. Anizotropní lepidla se také označují jako z-tová a to pro svou schopnost vést elektrický proud pouze kolmo od součástky k DPS. Tato schopnost je velice důležitá, u již zmíněných displejů a také pro kontaktování součástek, jakou jsou čipy.

Elektricky vodivá lepidla jsou složena ze dvou základních částí: vazební složka (matrice), tedy pojivo, a vodivá složka (filler), tedy část vedoucí elektrický proud.

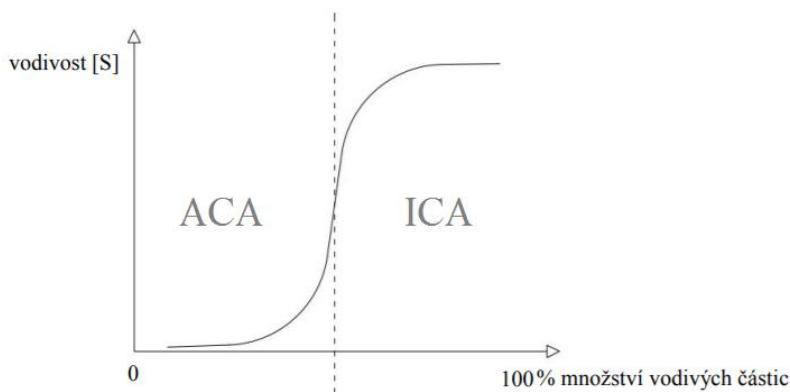
#### Vazební složka (matrice):

Jako matrice se používají pryskyřice, které se dělí na dva typy: termoplasty (s rostoucí teplotou se měknou) a reaktoplasty (s rostoucí teplotou dále vytvrzují až dosáhnou bodu, kdy se nemůžou dále vytvrzovat, tak degradují, a nakonec dochází ke zničení). Z hlediska stability a spolehlivosti adhezního spoje jsou výhodnější reaktoplasty. Naopak termoplasty jsou výhodnější z hlediska opravitelnosti, ale tento aspekt není často nutný, proto jsou více používány jako matrice spíše reaktoplasty. Vytvrzování matrice dochází při teplotě 100-180 °C několik jednotek až desítek minut, nebo při normální teplotě 24-48 hodin. Nejčastější pryskyřice jako pojivo je epoxidová, silikonová a polyamidová.

#### Vodivá složka (filler)

Koncentrace plnidla, tedy vodivé složky, se pohybuje 55–80 % (hmotnostních) u lepidel izotropních a 5–25 % (hmotnostních) u lepidel anizotropních. Nejčastější plnidlo je stříbro, ale používají se i další kovy, jako je zlato, paladium, nikl a měď, která se kvůli své oxidaci povrchově pokovuje stříbrem. Jsou i nekovová plnidla, jako je uhlík a pokovené plastové materiály.

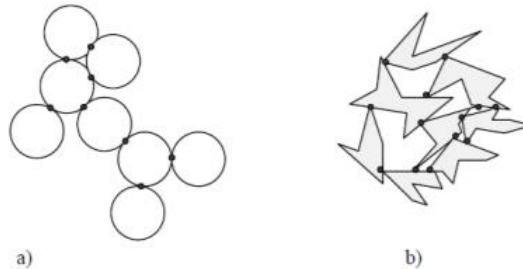
Vodivost lepidel, je dána koncentrací plnidla. Pokud koncentrace plnidla přesáhne perkolační práh, nastane prudký pokles odporu. Tato koncentrace je pro stříbro je to 55 % (hmotnostních) a pro pokovené částice 20 % (hmotnostních). Do překročení perkolačního prahu se jedná o anizotropní lepidla (ACA - Anisotropic Conductive Adhesives), po překročení se jedná o izotropní lepidla (ICA - Isotropic Conductive Adhesives).



Obrázek 1: Perkolační křivka (3)

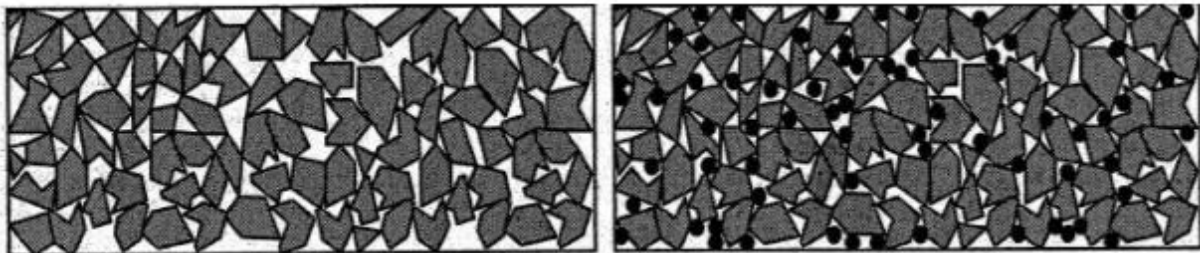
Různými modifikacemi příměsí lepidel se snažíme dosáhnout srovnatelných vlastností jako u pájeného spoje (elektrické, mechanické, tepelné, adheze a klimatická odolnost). Největší problém představuje elektrická vodivost. Snížení elektrického odporu je možné docílit tvarem částic, jako jsou stříbrné

šupinky, které jsou lepší než kuličky, protože jsou nabodovány na více místech a tvoří tak lepší vodivostní síť.



Obrázek 2: a) Kontaktní body mezi mikrokuličkami obsaženými v lepidle, b) kontaktní body mezi šupinkami (4)

Další možností je vmíchávání nanočástic, které v kombinaci se šupinkami způsobují nejen lepší elektrickou vodivost vlivem vyplnění mezer mezi šupinkami, a tím zhuštění vodivostní sítě, ale i mechanické vlastnosti toho kontaktu jsou lepší.



Obrázek 3: Elektricky vodivé lepidlo s příměsí minoritních vodivých nanočástic. (5)

Další zlepšení lze dosáhnout tvarem nanočástic, kde se jako nejlepší ukázaly tyčinky. Vmícháváním příměsí do lepidla můžeme také dosáhnout zlepšení i jiných vlastností, jako je například tepelná vodivost pomocí korundu nebo křemíku, nebo adheze přidáním částic  $\text{SiO}_2$  (oxid křemičitý). Musíme však brát na vědomí, že vodivá lepidla jsou od výrobce připravena tak, aby měla nejlepší viskozitu, proto přidáváme příměsí jen do jednotek hmotnostních procent. Jinak by mohlo dojít k aplikačním problémům, kdy množství pryskyřice bude nedostatečné a při mechanickém namáhání můžou vzniknout mikrotrhliny, které se budou rychle šířit. Řešením je tedy nahrazování části plnidla příměsí.

### Deska plošného spoje (DPS)

DPS je nosná základna, které slouží k mechanickému upevnění součástek a jejich elektrickému propojení. Tvar DPS se většinou odvíjí od prostorových dispozic budoucího zařízení. Při návrhu DPS je nutno skloubit žádané umístění součástek, rozměrové možnosti DPS a jejich elektrické propojení dle



schématu. Z těchto důvodů u většiny současných návrhů DPS je nutno se uchýlit k více vrstevným DPS. Jednotlivé vrstvy se pak mohou dělit na signální, napájecí a vrstvy GND (připojené k zemi), které slouží ke stínění signálů.

DPS se skládá ze dvou hlavních částí: z vodivé části a z části nosné. Vodivá část je tvořena fólií z čisté mědi o tloušťce 18 až 70  $\mu\text{m}$ . Jako nosná část jsou nejčastěji používány materiály FR-2 a FR-4 a slouží jako izolant. Zatímco u vodivé části byla důležitá pouze vodivost, u nosné části je parametrů více a výběr materiálu závisí na dané aplikaci.

FR-2 je bavlněný papír napuštěný fenolovou pryskyřicí. Tento materiál je levný a na mnoho aplikací dostačující, ale lze jej použít pro maximálně dvouvrstvé DPS.

FR-4 je tvořena skelnou tkaninou, která je napuštěna epoxidovou pryskyřicí. Tento materiál má lepší mechanickou odolnost než FR-2, ale na druhou stranu více opotřebovává vrtáky. Dále odolává vyšším teplotám než FR-2, a také se hodí pro vícevrstvé DPS.

Pro RF obvody jsou speciální materiály, které jsou na bázi hydrokarbon/keramického laminátu, s vysokou teplotní odolností.

Výroba DPS bude popsána v kapitole DPS, přesněji v podkapitole Technologie výroby.

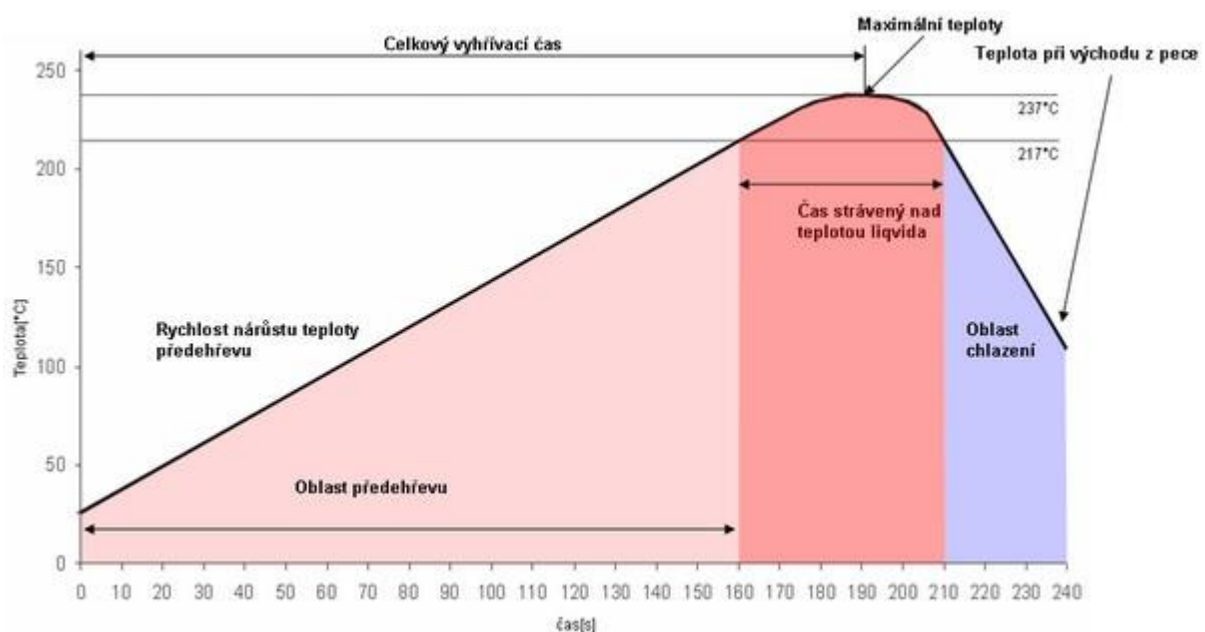
## Technologie Pájení

Pájení je metalurgické spojování dvou částí jiným materiálem s nižší teplotou tavení než materiál, který je spojován. Tyto materiály jsou skoro výhradně slitiny kovů a pájený spoj představuje nejen mechanické, ale i elektrické spojení těchto částí. Pájení se v elektrotechnickém průmyslu převážně používá ke kontaktování součástek na DPS a je označováno jako „měkké pájení“. Nejčastější výrobní postupy pájení v případě sériové výroby jsou dvě odlišné technologie: pájení vlnou a přetavením. Spolehlivost pájených spojů má významný vliv na jakost finálního výrobku, proto je celý tento proces automatizován, sledován a kontrolován. V současné době, i přes všechna opatření, 50 % všech poruch je způsobeno vadnými spoji.

### Teplotní profil

Sledování teploty v čase je pro proces pájení velice důležité, protože má velký vliv na jakost spoje a množství chyb na finálním výrobku. Důležitými úseky teplotního profilu jsou:

- předehřev DPS – zamezení teplotnímu šoku během pájení.
- pájení – tento úsek je reprezentován vystavením DPS vysokým teplotám, proto je žádoucí, aby tato doba byla co nejkratší, a tím bylo docíleno snížení tepelného namáhání DPS a součástek. Na druhou stranu teplota v tomto úseku musí být dostatečně vysoká, aby vznikla jistota vytvoření kvalitního spoje.
- Chladnutí – tento úsek snižuje tepelné namáhání, zároveň nesmí být příliš rychlé, aby nedocházelo ke vznikům prasklin.



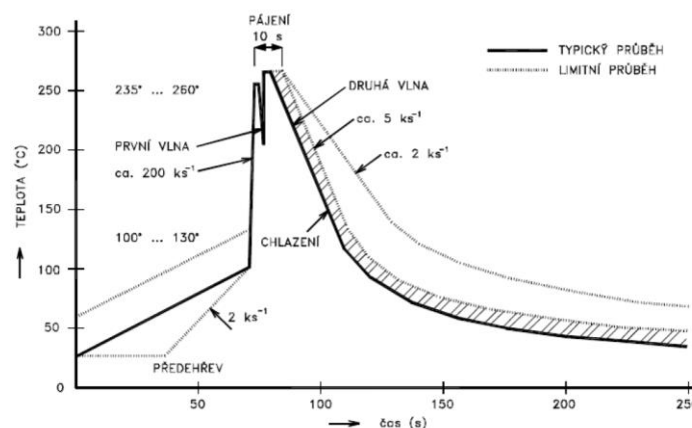
Obrázek 4: Lineární teplotní profil. (6)

Vhodný pájecí profil by měl být uveden v katalogu každé pájky, pájecí pasty, nebo elektricky vodivého lepidla. Nejdůležitějšími parametry jsou teplota oblasti teplotního vyrovnání, strmost profilu během přetavení, maximální teplota a čas strávený nad teplotou tavení. Výsledný teplotní profil dále musí odpovídat maximálním teplotám, kterou snesou použité materiály a součástky použité na daném DPS. Volbou vhodného teplotního profilu je tedy dosaženo vyšší jakosti a spolehlivosti, nejen vytvořeného spoje, ale výsledného zařízení.

## Pájení vlnou

Pájení vlnou je nestarší a nejpoužívanější technologií pro sériové kontaktování součástek využívající zcela kapalnou pájku, ze které je vytvořena vlna. Tato technologie byla vyvinuta pro součástky typu THD, které nejsou tolik náročné na přesné umístění a na svém místě drží díky otvorům. Součástky typu THD jsou umístěny na opačné straně DPS, než probíhá proces pájení, proto jsou méně tepelně namáhány. Jak již bylo řečeno, v současné době, až na několik výjimek, se používají SMD součástky. SMD součástky je možné rovněž pájet vlnou, nicméně musí být před procesem pájení na své místo přilepeny, aby nedošlo při pájení k jejich odpadnutí nebo posunutí. Další nevýhodou technologie pájení vlnou, je teplota samotné vlny, která je v přímém kontaktu s pouzdem SMD součástek a může překročit teplotní možnosti některých součástek. Proto není možné tuto technologii použít pro všechny součástky, a tedy při výrobě se tepelně citlivější součástky osazují jako poslední a je využita jiná technologie pájení.

Před samotným zapájením se nanese tavidlo, případně je možné provést ultrazvukové čištění kontaktů od oxidů. Důležitým krokem je postupný přehřev DPS, aby byl snížen tepelný šok v okamžiku kontaktu s vlnou taveniny, a tím bylo sníženo tepelné namáhání. Je žádoucí, aby doby styku DPS s vlnou bylo co nejkratší, toho docíleno dopravníkem, který DPS rychle přepraví přes vlnu, aby předala co nejméně tepla, ale zároveň dostatečně pomalu, aby byl vytvořen kvalitní spoj.



Obrázek 5: Teplotní profil pro pájení vlnou. (7)

Tato technologie je díky neustále roztavené pájce velice energeticky náročná, ale i přes své další nevýhody je stále hojně používána.

### Pájení přetavením

Pájení přetavením je proces používaný převážně pro SMT technologii, který využívá pájecí pasty a lepidel pro upevnění součástek během pájení. Na rozdíl od pájení vlnou je na DPS nejdříve nanesena pájka v podobě pájecí pasty a až poté jsou do ní umístěny součástky. Aby bylo docíleno nanesení pasty pouze na požadované plošky, je pasta nanášena nejčastěji přes šablonu. Šablony mohou být několika typů:

- **Chemické leptání:** šablona se vytváří odleptáváním z nerezového plechu. Části, které nemají být odleptány, jsou chráněny chemicky odolnou látkou. Tato látka je nanesena celoplošně na nerezový plech a vytvrzena UV zářením přes masku s motivem. Neosvícená část látky je odplavena a později jsou tato místa odleptána. Tato metoda vlivem leptání vytváří šikmé hrany, následkem toho je potom zatékání pasty, a proto není vhodná pro jemné motivy.
- **Laserové řezání:** šablona je vytvořena vyřezáním motivu do kovové desky pomocí laserového paprsku. Tato šablona je velice přesná, ale dražší než šablona vytvořená chemickým leptáním.
- **Galvanoplastické:** šablona je vytvořena pomocí nanášení niklu na fotoaktivní plastovou vrstvu pokovováním, která se mění působením světla na požadovaný obraz šablony. Fotoaktivní vrstva je odstraněna, když je dosažena tloušťka niklové vrstvy. Tato šablona se používá pro velmi jemné motivy a je levnější než metoda laserovým řezáním.

Další možností nanesení pasty pouze na požadovaná místa je sítotisk. Emulze je nanesena na tkaninu z nerezové oceli, nebo z polymerních materiálů, tak, aby vyplnila všechna oka. Tkanina s nanesenou emulzí se osvítil UV zářením přes masku s motivem. Tím dojde k vytvrzení osvícené části emulze a neosvícená část emulze se vyplaví vodou. Výsledná přesnost této šablony je dána velikostí ok tkaniny.

Proces přetavení můžeme dělit podle technologie primárních zdrojů tepla. Pro přetavení lze prakticky použít všechny způsoby zdrojů tepla, tedy:

- vedení (kondukce) – pájení kondenzací par
- proudění (konvekce) – pájení horkým vzduchem
- záření (radiace) – pájení infračerveným zářením a laserem

### Pájení infračerveným zářením

Tento způsob dodání tepla, byl pro svou vysokou účinnost z počátku nejrozšířenější. Samotné provedení bylo v podobě průběžné pece, kde byly umístěny infračervené zářiče nad a pod dopravním

pásem, a celá pec měla několik teplotních zón pro zajištění požadovaného teplotního profilu. Při pájení dochází k pohlcování tepla, které je ovšem závislé na vlastnostech povrchu tělesa. Lesklý materiál více odráží záření, než tmavý. To vede k nerovnoměrné distribuci tepla a značnému tepelnému přetěžování součástí.

### Pájení horkým vzduchem

Tento systém se opět využívá jako průběžná pec s několika zónami pro vytvoření požadovaného teplotního profilu. Horký vzduch je do komory dodáván několika tryskami rozmístěnými nahoře i dole pro rovnoměrné distribuování tepla. Výhodou této technologie je velmi dobrá rovnoměrnost distribuce tepla (rozdíly jen několik jednotek stupňů), a proto je v současné době nejpoužívanější.

Nevýhodou je nízká účinnost okolo 20-30 %.

### Pájení v parách

Z hlediska rovnoměrnosti distribuovaného tepla je tato technologie nejpřesnější. Tato technologie spočívá v umístění DPS do komory, na jejímž dně je kapalina. Tato kapalina je zahřívána na bod varu a další narůst teploty není možný. Teplota pájení je tedy přesně definována bodem varu kapaliny, čímž je zajištěna téměř konstantní teplota při pájení. Páry kapaliny stoupají a kondenzují na DPS. Míra kondenzace je dána tím, zda DPS byla či nebyla předehřáta (v praxi je možno vidět obojí). Kondenzované páry na DPS předávají své teplo a tím přetaví pájku. Tato technologie je zvláště výhodná pro bezolovnaté pájky, protože nasycené páry vytlačují ostatní lehčí plyny, jako je třeba kyslík. Tím je docíleno, že přetavení nastane v ochranné atmosféře, a je tedy zabráněno oxidaci. Tento způsob pájení je rychlý, efektivní a spolehlivý. Jeho nevýhodou je vysoká cena moderující kapaliny.

## DPS

Pojmem DPS rozumíme pevnou plochu, na které jsou mechanicky upevněny součástky a která zprostředkovává vodivé spojení mezi těmito součástkami. DPS existují i v ohebném provedení, ale jsou méně časté a testování prokovů bude probíhat u pevných DPS, proto nebudou dále rozebírány. Další dělení DPS je podle počtu vodivých vrstev. Tedy jedno, dvou a vícevrstvé. Je zřejmé, že pro použití prokovů je potřeba minimálně dvou vrstev a na tomto provedení bude i probíhat samotné měření. Vícevrstvé DPS si lze představit jako rozšířené dvouvrstvé, tedy vytváření sendviče. Nutnost použití vícevrstvé DPS je v současné době u drtivé většiny výrobku. Ta je dána požadavkem skloubit co nejmenší velikost, velké množství součástek a určité umístění některých z nich. Jednotlivé vrstvy DPS se dělí na signální, napájecí a GND (vrstva spojena se zemí). Vrstva GND souží jako stínění signálních vrstev a tím je eliminováno rušení.

## Materiály

### Základní materiál

V drtivé většině případů se jedná o laminát, který se skládá z výztuže a pojiva. Na tuto laminátovou desku je nanášena měď o požadované tloušťce a dále zpracovávána ve výrobě.

Výztuž, tvořící kostru výsledného laminátu, určuje nejen mechanické vlastnosti desky (tvrdost, ohebnost atp.), ale také elektrické (elektrická pevnost). Nejpoužívanější výztuž je skelná tkanina, pro svůj dobrý poměr cena a vlastnost, ale jsou používány i další materiály, jako tvrzený papír nebo různé druhy jiných vláken.

Pojivo musí mít velkou dielektrickou pevnost a zároveň malou relativní permeabilitu. Další požadované vlastnosti jsou tepelná a chemická odolnost. Pojivo se nejdříve musí teplotou vytvrdit, aby bylo pevné, proto se používají reaktoplastové pryskyřice, nebo termoplasty, které mají dobré mechanické vlastnosti po vytvrzení. Nejpoužívanější pojiva jsou epoxidové pryskyřice pro své tepelné, mechanické a chemické vlastnosti. Jejich nevýhodou je navlhavost, které lze předcházet kontrolováním vlhkosti a čistoty okolního prostředí, při výrobě desky. Do pryskyřice se dále přidávají aditiva, která ovlivňují její vlastnosti, jako je teplota skelného přechodu nebo součinitel teplotní roztažnosti.

Druhy základních materiálů používaných pro výrobu DPS jsou dány volbou pojiva a výztuže. Těchto druhů jsou desítky a jejich výběr závisí na použití konečného výrobku.

Požadavky, které jsou kladeny na základní materiál jsou:

- mechanická pevnost
- odvod tepla a kompenzování tepelné roztažnosti

- elektrické a izolační vlastnosti
- spolehlivost
- cenová dostupnost

Materiály se většinou charakterizují podle normy NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Typickým označením podle normy NEMA je již zmíněné FR (Fire Retardant). Další parametry jsou:

- samozhášivost (DPS se nesmí vznítit při překročení její proudové zatížitelnosti),
- schopnost DPS přenášet signály o vysokých kmitočtech (proto je nutné vědět v jakém frekvenčním pásmu bude zařízení fungovat),
- teplotní roztažnost (aby vlivem změny teploty nedocházelo k odtržení SMD součástek).

V současné době jsou nejpoužívanější základní materiály FR-2 a FR-4, přičemž FR-2 se používá výhradně na nenáročné aplikace a spíše jednovrstvé DPS. Drtivá většina aplikací je založena na materiálu FR-4. Mechanická výztuž FR-4 je tvořena ze spřádaného sklotextilu z vláken o průměru 10  $\mu\text{m}$ . Textilie se nejdříve impregnuje epoxidem, za pomoci rozpuštění pryskyřice v rozpouštědle a vsáknutím do tkaniny. Materiál v poloměkém stavu se jmenuje „prepreg“ (pre-impregnated). Jde o stav částečné vytrzenosti, ve kterém je snazší manipulace a řezání materiálu. Tento prepreg se využívá jako pojivá složky u sendvičů vícevrstvých DPS. FR-4 může být složen z několika vrstev prepregu, aby bylo docíleno požadované tloušťky, která se pohybuje v rozsahu 0,2 až 3,2 mm. FR-4 má díky sklotextilové výztuži vysokou mechanickou pevnost, nízkou hmotnost, dá se snadno vyrábět ve velkých sériích a je poměrně levný. Pryskyřice zajišťuje dobré dielektrické vlastnosti, pro všechny elektronické aplikace, s výjimkou VF aplikací. Výsledný kompozit FR-4 je velice odolný, až na působení kyselin a vysokých teplot. Nevýhoda FR-4, která je zvláště podstatná pro výrobce DPS, je vrtání FR-4. Díky tvrdosti skelné tkaniny dochází k rychlejšímu opotřebování vrtáku. Dále musí být vrtána při vysokých otáčkách, aby nedocházelo ke třepení a snížení kvality prokovů v těchto dírách. Vysokorychlostní vrtání vede vlivem tření ke vzniku tepla a tavení pryskyřice. Natavená pryskyřice se rozmazává po holé mědi, čímž brání v pokovení v pozdější fázi procesu. Aby se výrobci těmto problémům vyhnuli, musí investovat do drahého čištění. Nevýhodou FR-4 je, že tento materiál není rozměrově stálý a teplota skelného přechodu je mezi 120 °C a 160 °C. To vede k měknutí pryskyřice a deformaci DPS během procesu pájení. U FR-5 díky vyšší odolnosti proti teplotě k deformacím nedochází, ale je také výrazně dražší. Nakonec existuje i rozdílný koeficient roztažnosti u FR-4, mědi a součástek, který způsobuje deformaci DPS. Tato deformace nejčastěji vede ke zvlnění, nebo průhybu DPS, ale může způsobit praskliny a utržení součástek. Přes tyto všechny problémy je základní materiál FR-4 nejpoužívanější.

## Nepájivá maska

Je tenká vrstva laku na bázi polymeru, která se aplikuje na plochy DPS, kde chceme předejít budoucím nanesení cínu během pájení. Zajišťuje ochranu proti oxidaci a vytváření mostů. Mostem je myšleno vytvoření nežádoucího spojení dvou blízkých kontaktů během pájení, tedy zkratů.

Nepoužívanější materiály pro nepájivou masku je epoxidový lak, nebo (8).

## Technologie výroby

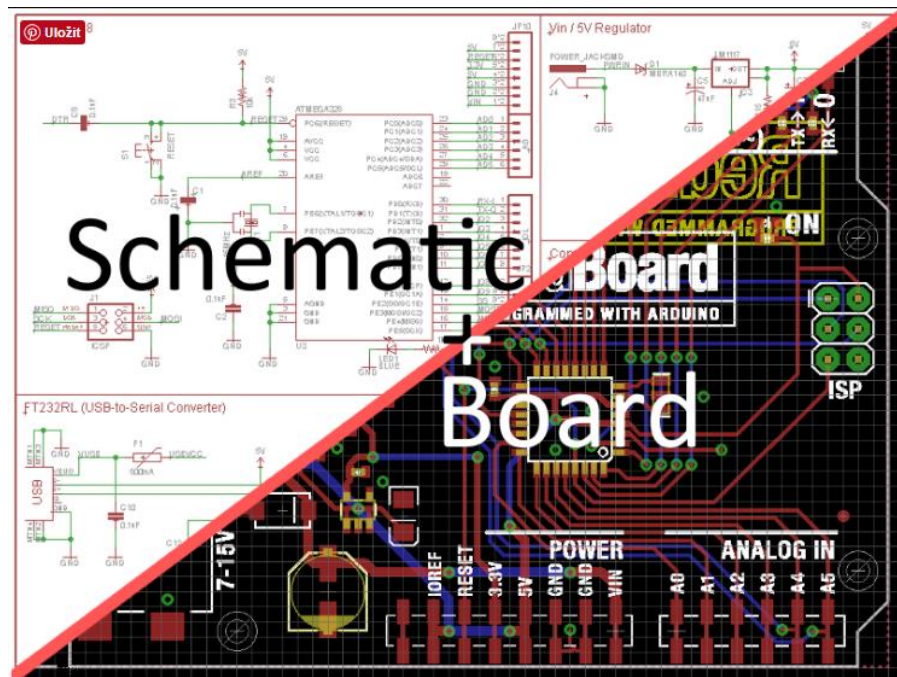
Pro výrobu DPS jsou používány tři výrobní postupy:

- subtraktivní: odstraňování přebytečné mědi
- aditivní: nanášení vodivých cest
- semi-aditivní: proces u kterého jsou použity oba předchozí postupy. Tedy odleptávání a dodávání materiálu v podobě galvanického pokovení.

V této kapitole bude popsán semiaditivní postup, který se používá pro výrobu vícevrstevných DPS prokovy.

## Návrh

Prvním krokem při výrobě DPS je její návrh v CAD programech. V těchto programech je nejdříve nakresleno schéma obvodu, ze kterého vychází návrh DPS. Výsledný návrh DPS je předán výrobcí ve speciální formátu dat, jako jsou Gerber, nebo RS274X.



Obrázek 6: Návrhové prostředí EAGLE (9)



## Technologický rozbor

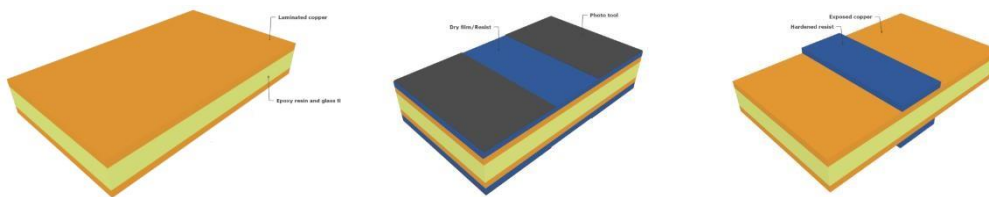
Před vlastní výrobou provede výrobce technologický rozbor zakázky a provede úpravu dat. Výrobce zkontroluje, jestli návrh odpovídá výrobním možnostem. Tyto kontroly jsou většinou prováděny automaticky. Kontroluje se šířka mezer mezi drahami, velikost a vzdálenosti mezi pady, nejmenší velikost otvorů apod. Po kontrole jsou vygenerována data pro všechny výrobní a testovací stroje.

## Vykreslení filmových matic

Filmová matrice se vykresluje na fotoplotru, který pomocí laseru vykreslí požadovaný motiv fotocitlivou fólií. Tato fólie se vyznačuje vysokou rozměrovou stálostí, což je nutné pro dosažení přesnosti přenosu motivu během expozice pod UV zářením. Při změně teploty o 25 K dochází ke změně 0,1 až 0,3 mm na metr délky. Samotný motiv je vykreslen s přesností 1 - 10  $\mu\text{m}$ .

## Expozice

Jádro (core) je tvořeno základním materiálem, například již zmíněným FR4 a naválcovaných měděných fólií. Tato fólie je z jedné strany hladká a z druhé zrnitá, za účelem lepšího přilnutí k základnímu materiálu během válcování. Tloušťka této měděné fólie je volena zákazníkem. Povrch je důkladně očištěn, aby vlivem nečistot během expozice nedošlo k vytvoření zkratu, nebo naopak nedošlo k nepropojení. Po očištění je na jádro nanášen fotorezist, který se vytvrzuje UV zářením a vzniká filmová matrice, která je negativem k požadovanému vzoru. Filmová matrice musí být velice přesně umístěna, aby byly všechny vrstvy přesně nad sebou. K tomuto účelu slouží dvouosý umístovací stůl a seřizovacích děr, kde je po vyvolání nevytvrzený fotorezist opláchnut a je možno vidět modrý pozitiv daného motivu.

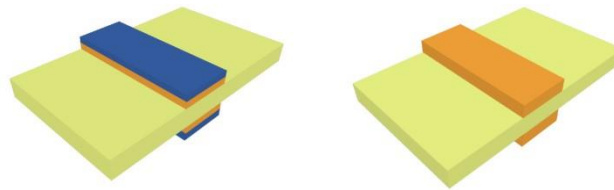


Obrázek 7: Postup vytváření ochranné masky. (10)

## Leptání

Odstranění nežádoucí mědi se při průmyslové výrobě nejčastěji provádí silným alkalickým roztokem (ale jsou i jiné roztoky, jako například  $\text{FeCl}_3$ ). Tento proces v závislosti na teplotě roztoku trvá 10 až 15 minut. Protože dochází k odstraňování mědi ve všech směrech, nejen v z-ové ose, je nutné celý proces pečlivě řídit. Následkem špatně zvolené délky času (příliš dlouhé) by bylo podleptání cest, a tím jejich zúžení, nebo v krajním případě oddělení od základního materiálu. Opačné následky špatně zvolené doby leptání (příliš krátké) je neodstranění veškeré přebytečné mědi, a tedy vytvoření možných zkratů.

Nakonec je v této části odstraněn modrý fotorezist, který chránil měď před odleptáním v místech daných motivem. Na základním materiálu je tedy nyní přesně nanesen pouze požadovaný měděný motiv. Výrobce poté kontroluje přesnost motivu a zda byl odstraněn veškerý fotorezist.



Obrázek 8: Leptání DPS a odstranění fotorezistu. (10)

### Registrační otvory

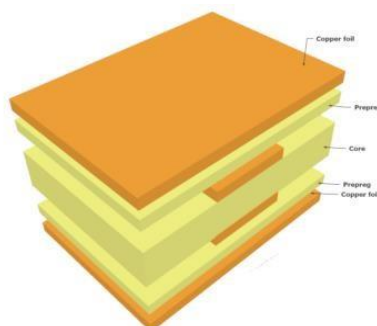
Aby u vícevrstevných DPS nedošlo k posunutí jádra DPS vůči vnějším vrstvám, jsou do jádra vyvrtány registrační otvory. Přesné umístění těchto otvorů je docíleno pomocí optického naskenování registračních křížků a podle nich jsou poté stanovena místa vrtání.

### Laminace

Aby bylo možné vytvořit vícevrstvé DPS, je nutné docílit kvalitního spojení jednotlivých vrstev. Za tímto účel se využívá procesu laminace. Na jádro DPS jsou nanášeny pláty prepregu a mědi. Tento sendvič je vložen do stohu a je dále lisován za tepla ve vakuu. Teplo je rovnoměrně dodáváno pomocí vyhřívaných desek lisu. Teplo je důležité proto, aby epoxid v prepregu dokonale roztekl a působením lisu zaplnil všechna volná místa. Vysoký tlak napomáhá epoxidu při zatékání do všech míst, a tím k vytlačení veškerého vzduchu. Tento proces je řízen počítačem, aby byl nárůst tlaku adekvátní nárůstu teploty.

Proces laminace je nevratný a probíhá za teploty okolo 185 °C a při tlaku 16 kg/cm<sup>2</sup>. (10)

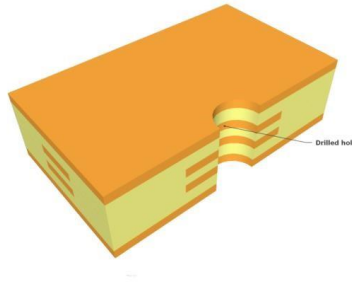
Po dokončení procesu laminace, je DPS vyjmuta ze stohu a dále na ní budou vytvořeny měděné motivy. Tento proces se opakuje, dokud není docíleno požadovaného množství vrstev.



Obrázek 9: Laminace DPS. (10)

## Vrtání

Deska musí být nejdříve dobře upnuta, aby nedošlo k jejímu posunu během vrtání. Nejprve použijeme rentgenové vrtačky k určení přesného místa na DPS ve vnitřních vrstvách. Stroj vyvrtá registrační otvory, aby byla zajištěna přesnost během dalšího vrtání. Při dalším vrtání jsou využívány vysokorychlostní vrtačky (30 – 300 tisíc ot./min), u těchto vrtaček bývají použita vzduchová ložiska. Vysokootáčkové vrtání je nutné pro docílení hladkých otvorů, a tedy vysoké kvality výsledných prokovů.



Obrázek 10: Vrtání DPS. (10)

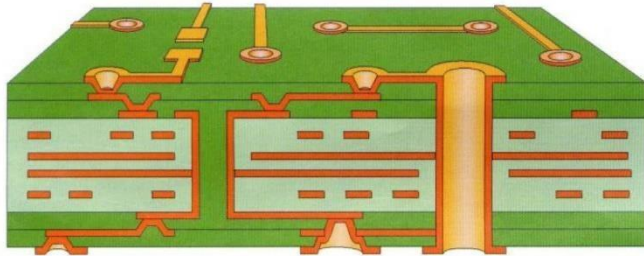
Celý proces je zcela automatizován, vrtačky jsou řízeny v souřadnicích XY a i vyměňování vrtáků je automatické podle požadované velikosti otvoru. I přes minimalizaci veškerých prodlev, je tento proces relativně pomalý, protože vrtání probíhá otvor po otvoru. Protože vrtání probíhá po jednotlivých otvorech, lze tento proces označit, za velice pomalý a doba, kterou trvá je proměnný podle množství děr.

Nyní byl popsán princip mechanického vrtání, ale pro výrobu DPS se používá i vrtání pomocí laseru. Výhodou vrtání pomocí laseru jsou menší otvory a otvory s větší přesností ( $\pm 25 \mu\text{m}$ ). Otvory s průměrem pod  $150 \mu\text{m}$  se označují jako microvia. Nevýhodou vrtání otvorů laseru, jsou vysoké nároky na pracovní prostředí (konkrétně u vlhkost, teplota nebo odsávání vzduchu) a výsledný otvor má kónický tvar. Otvor je nejširší na povrchu desky a postupně se zužuje směrem k začátku vrtání.

Otvory se dělí podle použití na součástkové a propojovací. Součástkové jsou určeny pro THD součástky a jejich pozdější zapájení do DPS. Propojovací jsou určeny k vytvoření prokovů, a tedy elektrického propojení jednotlivých vrstev DPS mezi sebou.

Propojovací otvory lze dělit na tři základní typy:

- slepé
- vnitřní (skryté)
- průchozí

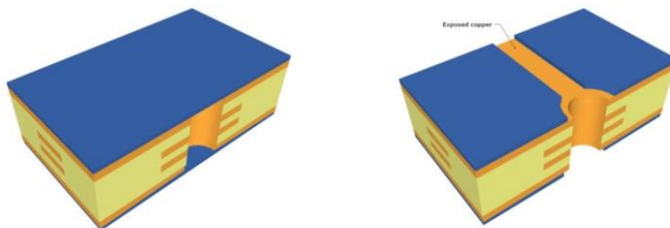


Obrázek 11: Typy kroků na DPS. (5)

### Pokovení

Základním procesem přidávání mědi je galvanické pokovení, ale protože stěny vyvrtaných otvorů jsou z elektricky nevodivé skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice, nelze zde provést nanesení mědi tímto způsobem, proto je prvotní vrstva mědi o tloušťce přibližně 1 mikron nanesena procesem chemického usazování (Tato vrstva se nazývá „koloid“). Usazována je pomocí kapaliny s vysokým obsahem grafitu, aby došlo k vytvoření tenkého vodivého povrchu. Správnost nanesení této vrstvy značně ovlivňuje budoucí pokovení, a tedy i kvalitu výsledného prokoku.

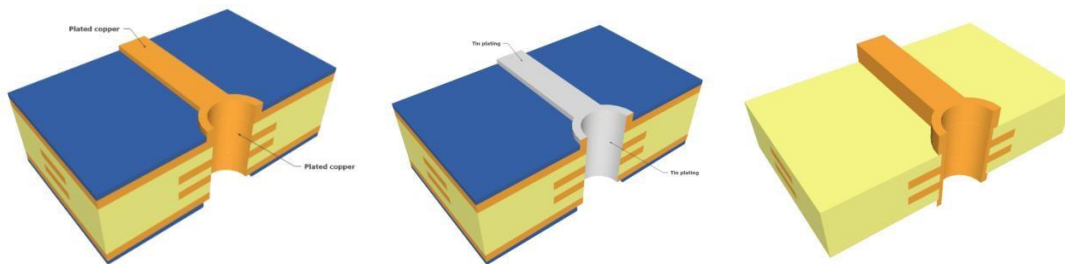
Následuje nanesení fotorezistu, který bude chránit místa, kde je nanesení mědi nežádoucí. Fotorezist je dále vystaven UV záření a opláchnut z ostatních míst, kde byl zakryt, a tedy nedošlo k jeho vytvrzení.



Obrázek 12: Vytváření ochranné masky před pokovením. (10)

Dále k panelům, ve kterých jsou umístěny budoucí DPS, jsou připojeny svorky, aby bylo zajištěno dobré elektrické spojení. Samotné galvanické pokovení funguje na fyzikálním principu elektrolýzy a panel souží jako katoda. Celý proces je řízen počítačem, aby byla nanesena přesná tloušťka vrstvy mědi, která je úměrná době strávené v lázni. Důležitým aspektem, se kterým je nutné počítat je, že měď bude nanesena nejen na stěnu otvorů, ale i na jednotlivé cesty. Z toho vyplývá, že tloušťka naválcované fólie musí být tenčí o budoucí pokovení. Nakonec je na měď nanesena tenká vrstva cínu, která bude sloužit jako ochrana při dalších krocích, kdy je rozpuštěn a opláchnut fotorezist. Nežádoucí měď je pak odstraněna odleptáním silným alkalickým roztokem. A nakonec je odstraněna i ochranná vrstva cínu.

Na DPS je nyní pouze navržený měděný vzor.

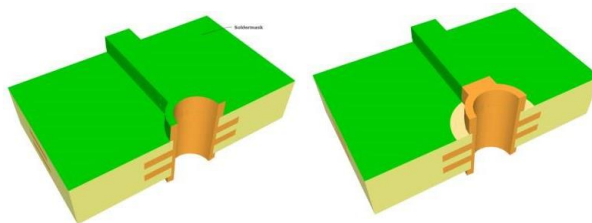


Obrázek 13: Pokovení a odstranění fotorezistu. (10)

### Nepájivá maska

Na celou DPS je rovnoměrně nanesen povlak inkoustové epoxidové masky. Tato maska má většinou typickou zelenou barvu pro DPS a slouží k ochraně během pájení, proto označení „nepájivá maska“.

Tento lak je vysoušen a později vytvrzen pod UV světlem. Místa, která budou později pájena, jsou zakryta pomocí přesně umístěného filmu, na kterém je natištěn požadovaný vzor.



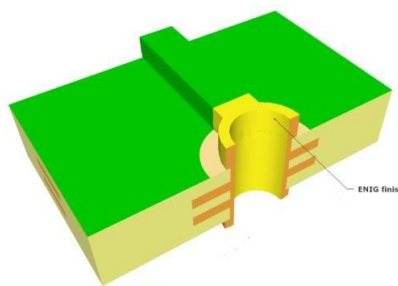
Obrázek 14: Nanášení nepájivé masky na DPS. (10)

Existuje i více způsobů nanášení nepájivé masky, jako je například sítotisk nebo laminování.

Nepájivá maska slouží hlavně jako izolační vrstva chránící elektrické spoje. Dále minimalizuje cínové můstky (elektrické zkratky) a slouží jako mechanická ochrana DPS před poškrábáním.

### Povrchová úprava

Jedná se o povrchovou úpravu měděných částí, které nejsou zakryty nepájivou maskou, a budou tedy později pájeny. Aby se zabránilo oxidaci mědi na povrchu, a tím komplikacím během budoucího pájení, je chemicky nanesena na tyto místa slabá vrstva zlata a niklu.



Obrázek 15: Povrchová úprava kontaktů na DPS. (10)

Jsou i další možnosti, ale jejich výběr je omezen nařízením RoHS o nepoužívání olova. Jednou z těchto možností je HAL. HAL (hot air leveling) je žárové nanášení bezolovnaté pájky, kdy jsou její přebytky odstraněny horkým vzduchem. Výhodou této metody je velmi dobrá pájitelnost, ale jedná se o energeticky náročný proces, během kterého dochází k tepelnému namáhání DPS.

### Dokončení

Mezi dokončovací kroky patří potisk (například tisk legendy, tvary součástek na DPS apod.), který slouží k lepší orientaci na DPS, nebo galvanické nanesení zlata na části DPS, které slouží jako plošný konektor. Výsledná DPS bývá většinou výrobcem i nedestruktivně testována. Protože se DPS vyrábí více kusů na jednom panelu, posledním krokem je tedy rozřezání panelu frézou na jednotlivé DPS a jejich následná expedice.

### Testování

Výrobce provádí testování na hotových kusech, v případě destruktivního testování se jedná o namátkovou činnost. Detailnější testování se často provádí v případě, že je do výroby zařazen nový proces, nebo došlo k jiné změně postupu, která by mohla mít dopad na kvalitu výroby.

Jako nedestruktivní metody jsou používány kapacitní a optické kontroly. Optickou metodou je kontrolována šířka cest, velikost padů a izolační vzdálenosti. Vstupní data jsou využita z CAD návrhu a je následně pozorováno jejich odchýlení od reálných výsledků. Kapacitní metodou se provádí měření tloušťky jednotlivých vrstev výsledného DPS.

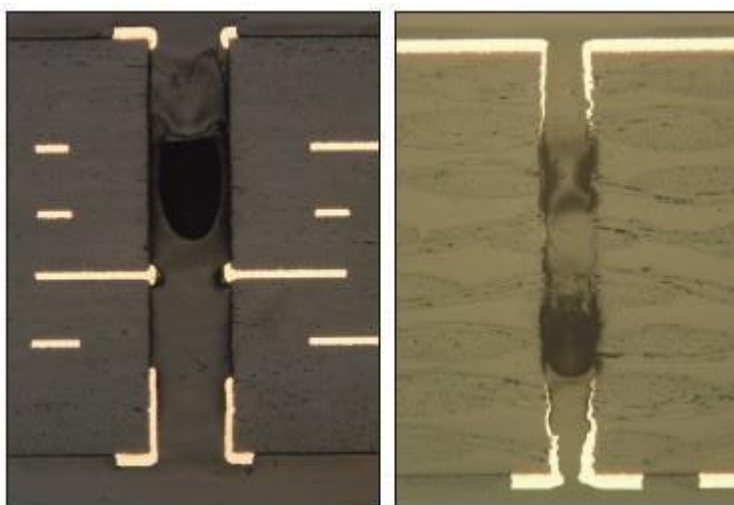
Destruktivní metoda kontroly je například kontrolní výbrus, kdy je zjišťována přesná tloušťka jednotlivých vrstev. Místo výbrusu se vybírá na základě předpokladu (nebo případné RTG inspekce) kde by mohl vzniknout problém s nakovením otvoru, nebo případně se zatékatelností.

## Vady DPS

Vad se v DPS může vyskytovat mnoho. Proto zde budou uvedeny jen ty, které ovlivňují prokovy. Většina vad DPS je způsobena technologickou nekázní při výrobě DPS. K dalším vadám dochází během pájení, tedy vady ve spojení DPS a součástek. Tyto vady zde nebudou dále rozebírány, protože nejsou předmětem této diplomové práce. Zásadnější jsou ovšem vady, které již v DPS byly, ale projeví se až po procesu pájení. Nebo vady způsobené nerespektováním technologických limitů dané DPS. Jak již bylo zmíněno výrobní vady DPS, jsou způsobené technologickou nekázní. S tím je možné se setkávat čím dál častěji, protože z finančních důvodů je výroba často přesunuta do Asie. Je tedy na výrobcích zařízení, aby kontrolovali kvalitu dodaných DPS. Problematické však zůstávají chyby, které se projeví, až během provozu zařízení.

### Špatné pokovení

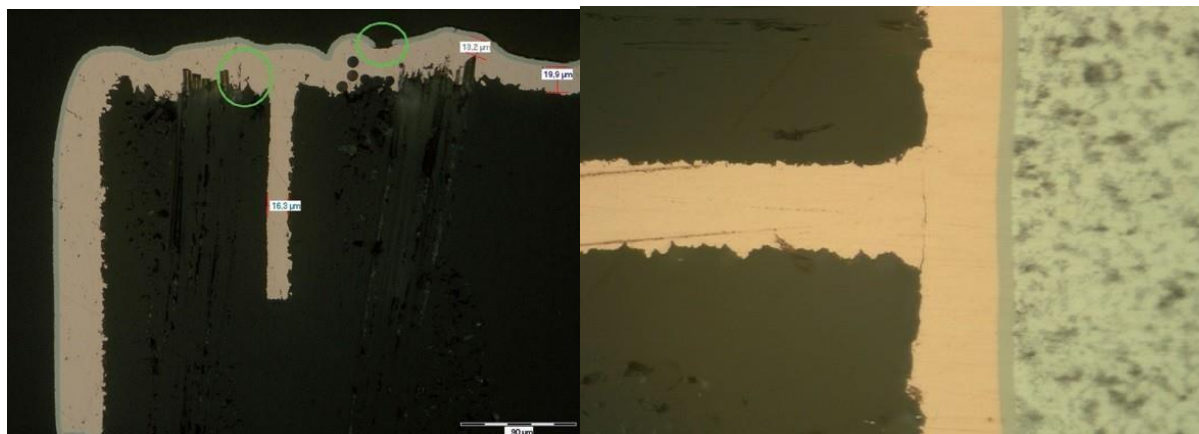
Relativně méně nebezpečné, jsou vady způsobené špatným provedením prokovení otvoru. Na tuto vadu lze snad odhalit při výstupní kontrole a do samotného výrobku se takto vadná DPS vůbec nedostane.



Obrázek 16: Foto výbrusu prokovu s nedostatečným pokovením. (11)

Podstatně hůře odhalitelné jsou vady, způsobené vrtáním otvoru. Aby výrobci nemuseli zastavovat výrobu kvůli výměně opotřebovaného vrtáku, často překračují jejich životnost. Dalším důvodem překračování životnosti vrtáku je jejich vysoká cena. Tento fakt má za následek vysoký pokles kvality vrtaného otvoru. Opotřebování vrtáku je projevováno tím, že není tak ostrý. To má za následek potrhání vláken na místě odvrtání a také to, že samotný otvor je vyvařen protlačováním, na místo vrtáním. Následkem je zvýšená drsnost povrchu a vlákna skelné tkaniny v samotném otvoru. To vede k vytvoření nehomogenního pokovení, a tedy vytvoření míst se slabou vrstvou pokovení. Dále měď může pronikat hlouběji do DPS a tím zhoršovat elektrické vlastnosti. Tyto vady se projeví až po nějaké době provozu

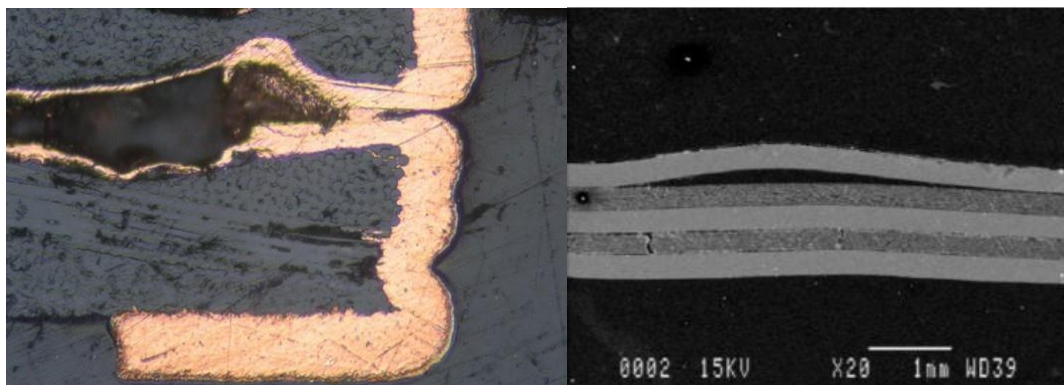
a pak jsou těžko odhalitelné. V zúžených místech prokovení dochází k praskání mědi (Barrel Crack) a tím pádem k přerušení vedení. Další velice nebezpečnou vadou je nedostatečné napojení vyloučené mědi v otvoru na vnitřní vrstvy vlivem chybné technologie. Důsledkem mohou být opět praskliny a přerušení vedení do vnitřních vrstev. Další praskliny mohou vznikat opět v napojení prokovení v otvoru a vnitřní vrstvy, přestože se na první pohled zdá vše v pořádku. Toto může způsobit buď nesprávná volba základního materiálu (vysoká roztažnost v ose Z) nebo nedodržení technologických předpisů při výrobě desek (nečistota).



Obrázek 17: Prokovení se skrytými vadami. (11)

## Delaminace

Delaminace se nazývá stav, kdy se oddělí sousední vrstvy DPS. Hlavní příčinou je dutina v základním materiálu, která obsahuje vlhkost. Vlivem nárůstu tepla působícího na DPS, se dutina začne rozpínat a tím způsobí separaci sousedních vrstev. Další příčinou je špatná volba základního materiálu, vzhledem k použité pájce. Proto například pro bezolovnaté pájení je třeba použít materiál s vyšší teplotní odolností. Základní materiál jako FR4 je hydrofobický a absorbuje vlhkost z atmosféry, proto je nutné DPS ihned po výrobě vakuově uzavřít. Delaminace vede k pnutí ose Z, a tedy k možnému utržení prokovů.



Obrázek 18: Foto delaminace. (11) (12)



### Nedostatečná vrstva koloidu

Koloidu je nanášen ve velice tenké vrstvě, pokud je nanesena příliš malá vrstva, to může vést k špatnému nanesení mědi, a tedy vznikne nekvalitní propojení. To by znamenalo zvýšení odporu v daném místě, což znamená vyšší teplotu, při průchodu proudu a možné přerušování toho spoje při jeho zatížení.



Obrázek 19: Foto vadného prokoku, vlivem koloidu. (11)

### Průhyb DPS

Chceme-li vytvořit desku plošných spojů, musí být i rozměrově přesná, avšak to se během tepelných procesů, jako je např. laminace, může změnit a deska se může prohnut, nebo dokonce ohýbat a kroutit. Nemusí se tak stát pouze během tepelných procesů, může se tak stát během dopravy desky. Aby se průhyb vlivem tepelných procesů eliminoval, je dobré navrhovat desku tak aby byla z obou stran symetrická, tedy například rozlitá měď na Top i Bottom vrstvě. Hlavní nebezpečí průhybu DPS spočívá v pnutí uvnitř DPS, které může vést k roztržení prokůvů.

## Experimentální část

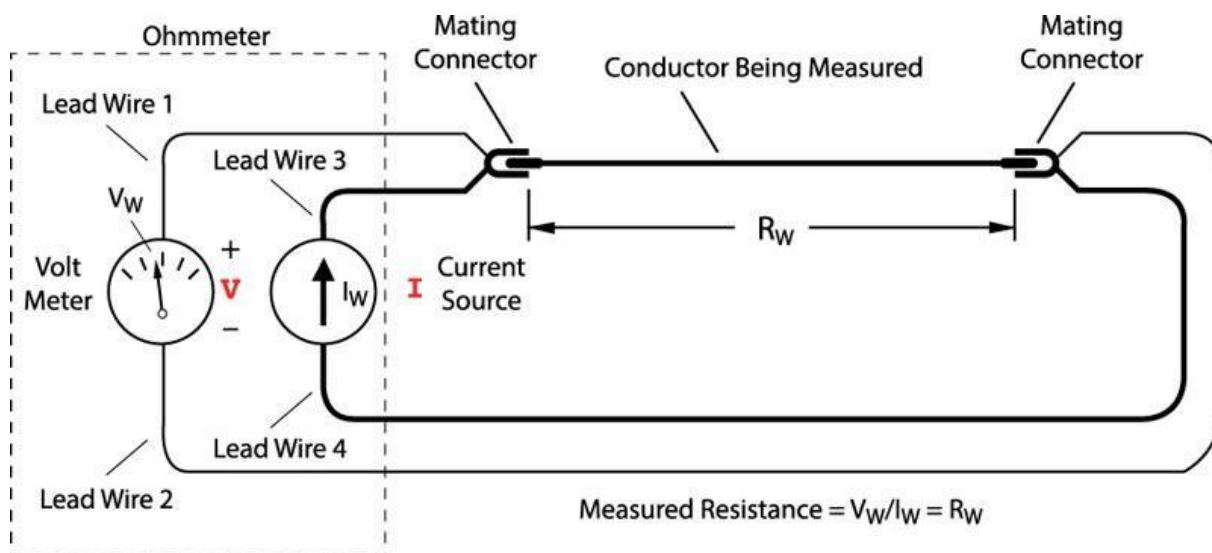
Tato část se bude zabývat testováním samotných prokůvů. Hledány budou vady, které vznikly při výrobě DPS a projeví se až po určité době provozu zařízení. Aby byly eliminovány vady, které by vznikly během procesu pájení, DPS bude vystaveno teplotám těsně nad hranicí skelného přechodu základního materiálu podobu jen několika minut. Testy budou probíhat cyklickou změnou teploty v kontrolovaném prostředí. Teplota se bude měnit od hodnoty hluboko pod bodem mrazu, až po hodnotu nad hranicí skelného přechodu základního materiálu. Touto cyklickou změnou teploty bude docíleno změn v rozměru v ose Z, a tím pnutí, které bude namáhat prokůvů. Měli projevit výrobní nedokonalosti těchto prokůvů. Lze očekávat, že vady budou velice ojedinělé, proto bude nutné testovat větší množství prokůvů najednou. Během cyklického testování bude sledováno jejich chování, za pomoci měření jejich odporu. Na závěr pro analýzu vad budou udělaný výbrusy.

### Měření odporu

Jak již bylo zmíněno, chování prokůvů bude sledováno pomocí měření jejich elektrického odporu. Prokův je vrstvou mědi o tloušťce několik desítek  $\mu\text{m}$ , je tedy zřejmé že se bude jednat o měření extrémně malých odporů. Aby bylo měření snáze proveditelné, bude probíhat měření několika desítek prokůvů najednou zapojených v sérii. Tím je docíleno většího odporu a vyšší pravděpodobnosti, že na vzorku bude alespoň jeden vadný prokův. Toto sériové zapojení prokůvů má nevýhodu v tom, že nebude zřejmé, zda sledujeme chování jednoho, či více prokůvů. Dále je nutné si uvědomit, že bude měřen elektrický odpor mědi v prostředí, kde se neustále mění teplota, a tedy i její elektrický odpor. Proto bude nutné znát průběh teploty DPS během celého měření. Z výše uvedeného je tedy zřejmé, že získání přesných hodnot je velice složité, ale protože chceme získat pouze povědomí o chování prokůvů, můžeme si dovolit vyšší míru nejistoty.

### Čtyřsvorková metoda měření odporu

Tato metoda bude využita jak pro měření prokůvů, tak k měření teploty. Protože vzdálenost měřících vodičů od vzorku v klimatické komoře k měřicím přístrojům přesahují délku 2 m, elektrický odpor těchto vodičů je větší než odpor prokůvů. Pro tyto případy se využívá čtyřsvorková zapojení, kdy proudovými svorky teče přesně známý proud a v napěťových svorkách zlomky mikroampér. Protože napěťovými svorkami neprochází téměř žádný proud nedochází k úbytku napětí a tím je zanedbán odpor měřících vodičů



Obrázek 20: Čtyřbodové zapojení. (13)

## Miliohmometr

Pro měření odporu prokůvů byl zvolen miliohmometr 4338B od firmy Hewlett Packard. Tento miliohmometr umožňuje měření odporů od  $10 \mu\Omega$  až  $10 \text{ k}\Omega$ , při hodnotách proudu testovacího signálu  $1 \mu\text{A}$  až  $10 \text{ mA}$ . Malé měřicí proudy jsou důležité, aby nedošlo k poškození prokovu vlivem jeho přetížení. Proto také nebylo zvoleno měření, pomocí měření úbytku napětí na prokovu, kdy by prokovy musel procházet konstantní proud o hodnotě několika jednotek ampér. Pracovní teplota miliohmometru je  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tento parametr není úplně nepodstatný, protože klimatická komora, ve které bude probíhat měření, svým provozem podstatně ovlivňuje teplotu v místnosti.



Obrázek 21: Miliohmometr HP 4338B.

## Měření teploty

Pro měření teploty byl zvolen odporový teplotní senzor Pt100. Tento senzor teploty je určen pro aplikace, kde je vyžadována dlouhodobá stabilita, přesnost a odolnost proti vibracím. Jedná se o platinový vodič uložený ve sklokeramické desce s niklovými dráty. Označení PT100 označuje jeho nominální hodnotu 100  $\Omega$  při 0 °C a použitý platinový vodič.

Měřicí rozsah	-70 °C až 500 °C
Přesnost	Třída B ( $\pm 0,3$ °C při 0 °C)
Doba odezvy	12,7 s

Tabulka 1: Parametry teplotního senzoru Pt100

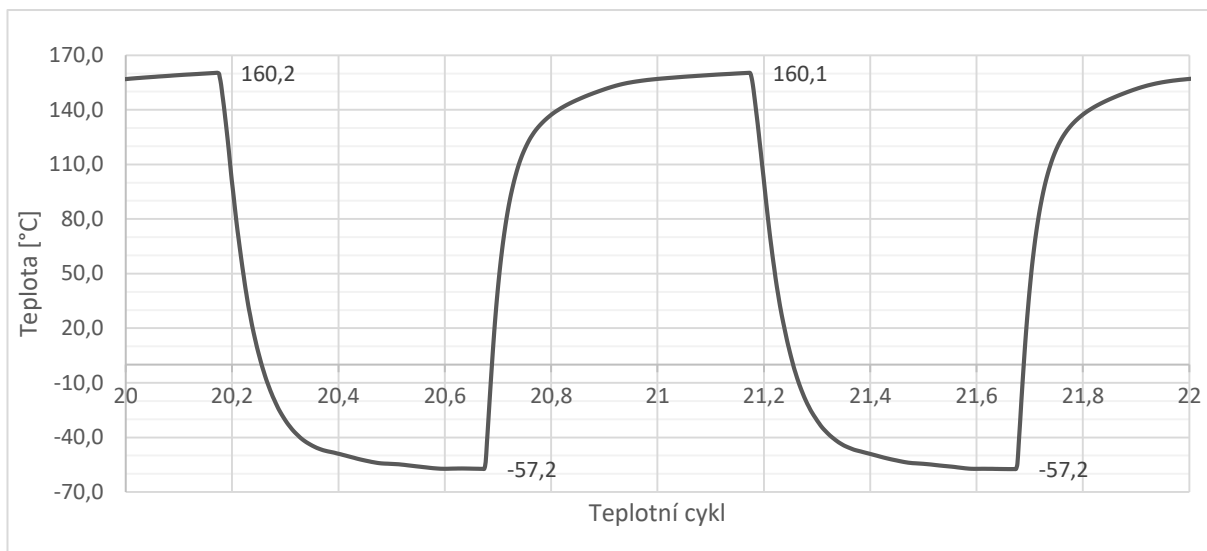


Obrázek 22: Teplotní senzor Pt100.

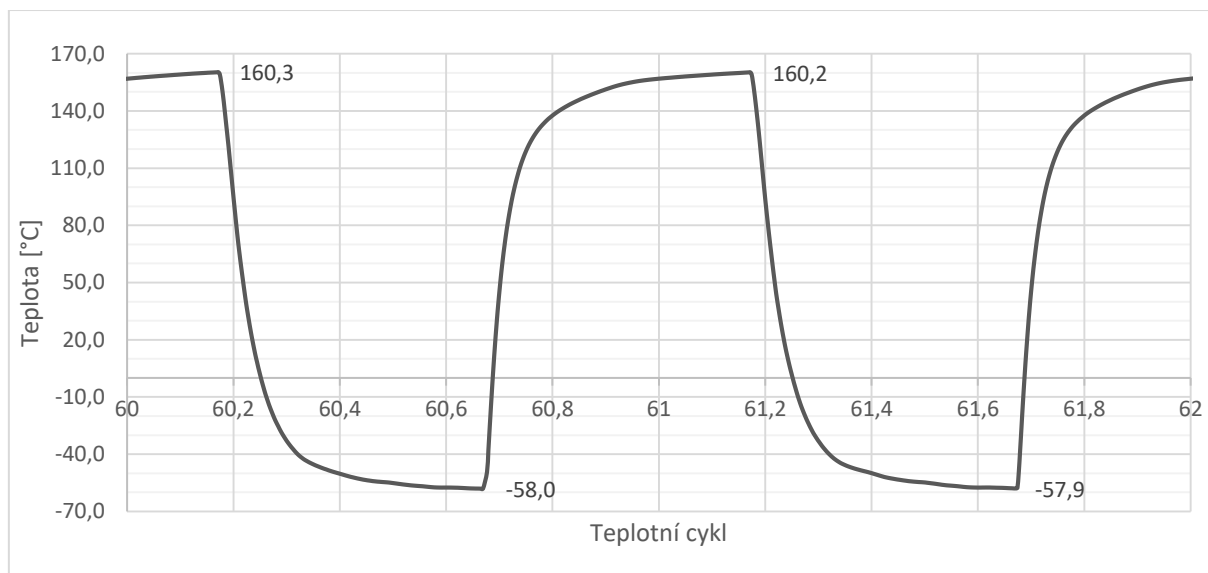
Senzor bude připájen na vzorek s prokvy a přilepen kaptonovou páskou, aby senzor snímal teplotu vzorku. Kaptonová páska je tepelně odolná samolepící páska s odolností do 280 °C. Tato páska je pružná, takže pokud se při lepení senzoru napíná, tak bude působit tlak mezi DPS vzorku a senzorem a tím je docíleno menšího tepelného odporu na přechodu mezi senzorem a DPS vzorku.

## Klimatická komora

Jedná se komoru s kontrolovaným prostředím. Tato komora je vybavena dvěma zónami. Ve spodní části komory se nachází studená zóna s extrémní chladem a v horní části horká zóna, která by se dala přirovnat k peci. Vzorek přejíždí mezi těmito dvěma sekcemi a tím dochází k velmi rychlé změně teploty vzorku, a tím je vystaven teplotnímu šoku. Pomocí programového vybavení komory, lze velice přesně nastavit teploty v jednotlivých zónách a dobu kterou v nich vzorek stráví. Tomuto nastavení se říká teplotní profil a je nutné podotknout, že vlivem tepelných kapacit vzorku a promísení vzduchu po přejezdu vzorku mezi zónami, nebude nastavená hodnota vždy odpovídat skutečné teplotě vzorku. Z tohoto důvodu byl na vzork umístěn teplotní senzor a profil nastaven tak aby vzorek byl vystaven teplotám. Použitá komora CTS TSS -70/66 umožňuje nastavení teploty +50 °C až +220 °C pro horkou část a -80 °C až +100 °C studenou část, s teplotním kolísáním  $\pm 1$  °C.

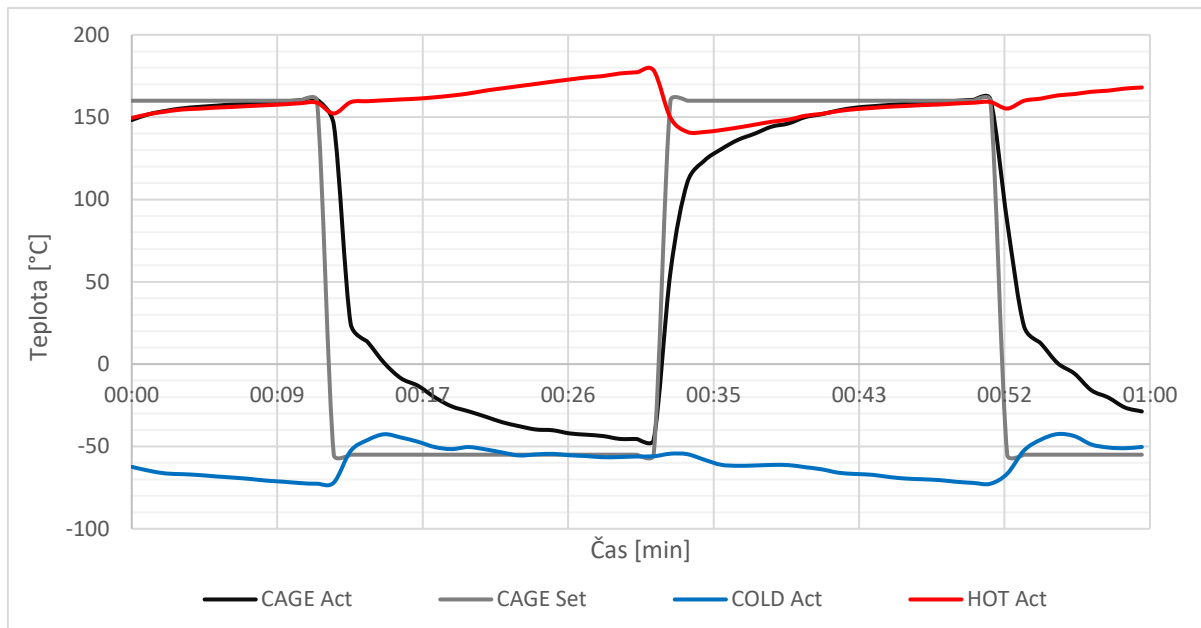


Graf 1: Naměřená teplota na senzoru Pt100 mezi cykly 20 a 22



Graf 2: Naměřená teplota na senzoru Pt100 mezi cykly 60 a 62

Z grafů 1 a 2, kde jsou zobrazeny i maximální hodnoty je patrné, že teplotní profil na vzorku je v průběhu celého měření stabilní.



Graf 3: Teplotní cyklus klimatické komory.

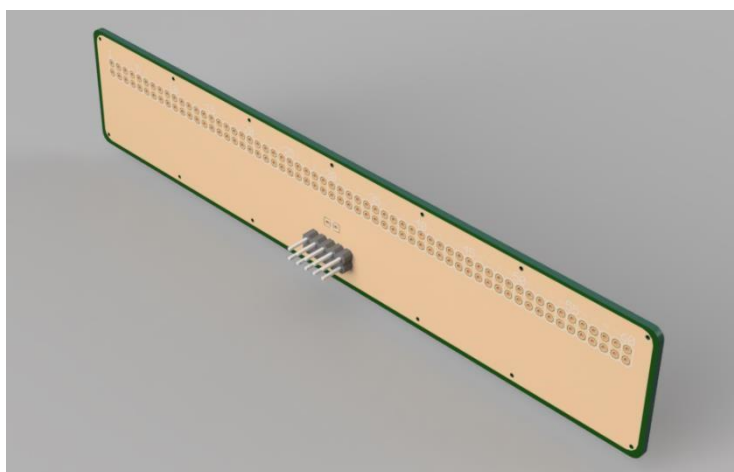
Na grafu 3 je zobrazen teplotní cyklus klus klimatické komory. V tom to profilu byla nastavena maximální teplota v horké zóně 160 °C, -55 °C ve studené zóně a délka cyklu byla 30 min. Klimatické komora je naprogramována tak, aby v okamžiku přechodu kontrolované zóny, byla v dané zóně byla vyšší, než je požadovaná hodnota. V okamžiku přechodu dochází k promísení vzduch, a tím poklesu hodnoty v dané zóně. Tyto navýšení hodnot zón zkracují dobu, než bude docíleno žádaných hodnot, a tím je možno regulovat strmost teplotního šoku. Dále tímto způsobem, lze docílit zkrácení teplotního cyklu, pokud nejsou kladeny přesné požadavky na strmost teplotního šoku.



Obrázek 23: Klimatická komora CTS TSS -70/66

### Vzorek

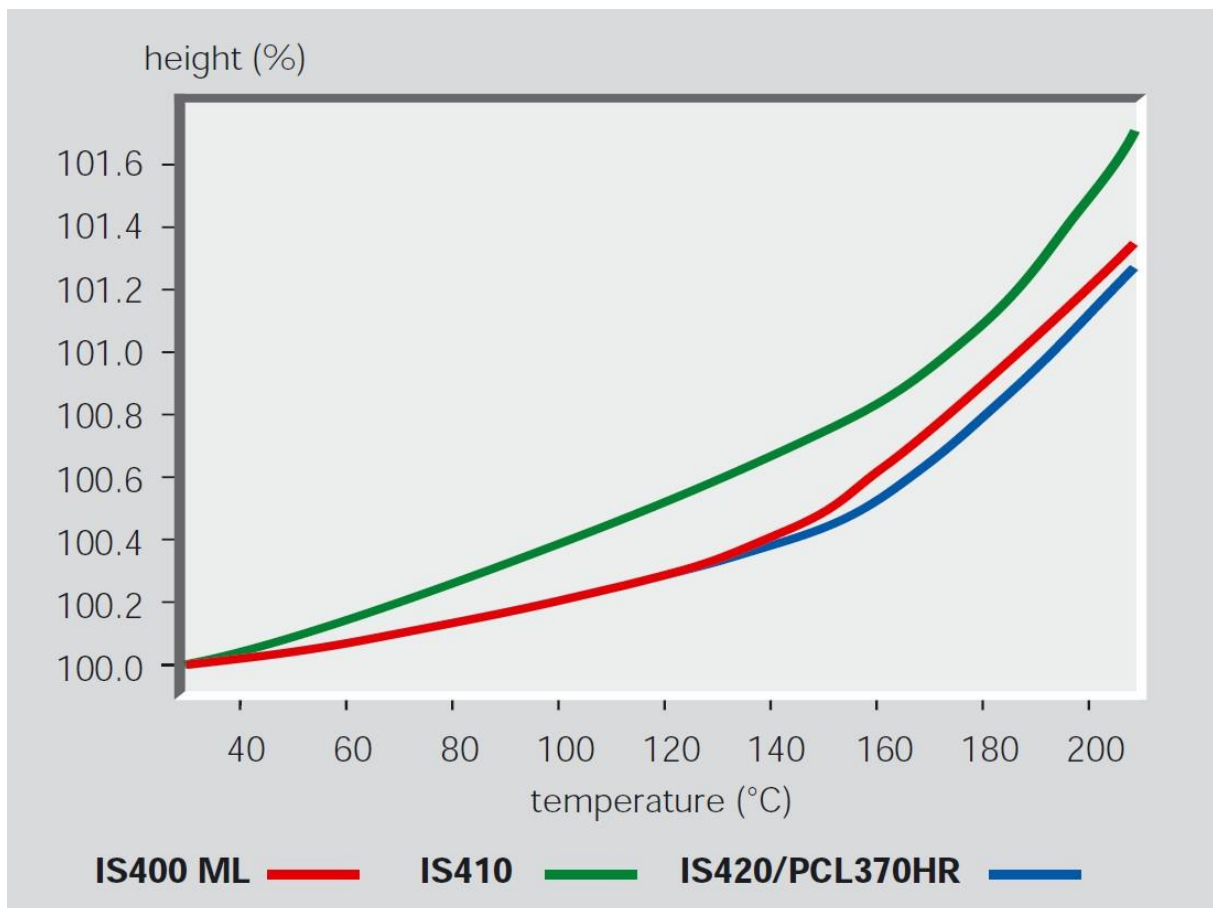
Vzorky DPS byly vyrobeny u firmy PragoBoard s.r.o. a to osm verzí navrženého vzoru. Jednotlivé verze vzorků se od sebe liší tloušťkou pokovené vrstvy (10, 20, 30 a 50  $\mu\text{m}$ ) a zda byly ošetřeny povrchovou úpravou HAL (Hot Air Leveling). Dále byla zvolena dvouvrstvá DPS, protože u více vrstevných DPS je předpokládáno podobné chování. Každý vzorek DPS obsahuje 60 prokovů, přičemž byly použity tři velikosti otvorů, takže 20 prokovů na každou velikost otvoru.



Obrázek 24: Testovací vzorek DPS s prokovy.

## Základní materiál

Jako základní materiál byla zvolena Isola IS400. Jedná se o materiál vyztužený skelným vláknem, který je určen pro vícevrstvé DPS s využitím v automobilovém průmyslu. Vyznačuje se tepelnou odolností, vysokou spolehlivostí s nízkou roztažností v ose Z. Teplota skelného přechodu pro Isola IS 400 je 150 °C. Další důležitý parametr je teplota, kdy dochází delaminaci. Ta je udána výrobcem jako doba, po kterou musí být základním materiál vystaven teplotě 260 °C. U Isola IS 400 je tento čas větší než 60 min. Je tedy zřejmé, že základní materiál cyklickým testováním v rozmezí teplot -60 °C až 160 °C nebude ohrožen. Jen pro zajímavost teplota, při které dochází k rozkladu tohoto materiálu je 330 °C. Podstatně důležitějším parametrem je tepelná roztažnost v ose Z, která je udávána 40 až 45 ppm/K. Z grafu uváděným výrobcem je patrné, že roztažnost v ose Z je v intervalu teplot 30 °C až 160 °C téměř lineární. Změny pod teplotou 30 °C nejsou uváděny.



Obrázek 25: Teplotní závislost základního materiálu Isola IS 400. (14)

## Návrh

Návrh vzorku byl proveden v programu EAGLE, jehož výstupem jsou gerber data, která složí jako výrobní podklady pro výrobce. Na DPS se nachází 60 testovaných prokůvů. Průměry otvorů, ve kterých byly vytvořeny testovací prokovev jsou 0,35 mm, 0,5 mm a 1 mm, vždy po 20 prokovevch. Ty byly

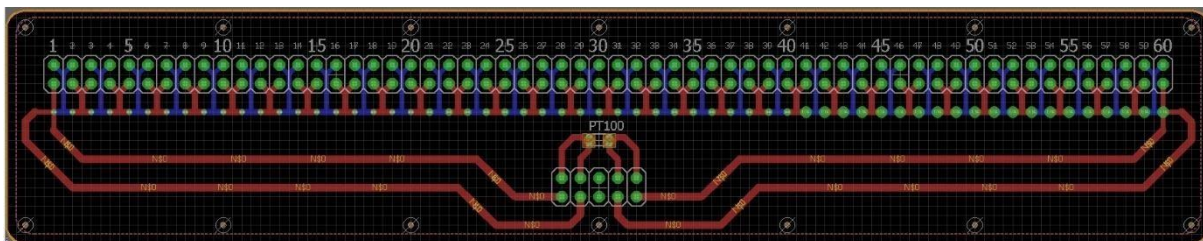


propojeny do série tak, že jsou sousední prokovy střídavě propojeny vrstvou Top a Bottom. Nad každý prokov byly vyvedeny dva pady (vývod DPS určen k připájení součástek), aby bylo možné po dokončení testování určit, které prokovy byly přerušeny. Pro snadnější identifikaci byly jednotlivé dvojice padů očíslovány.

číslování	Velikost otvoru [mm]
1 až 20	0,35
21 až 40	0,5
41 až 60	1

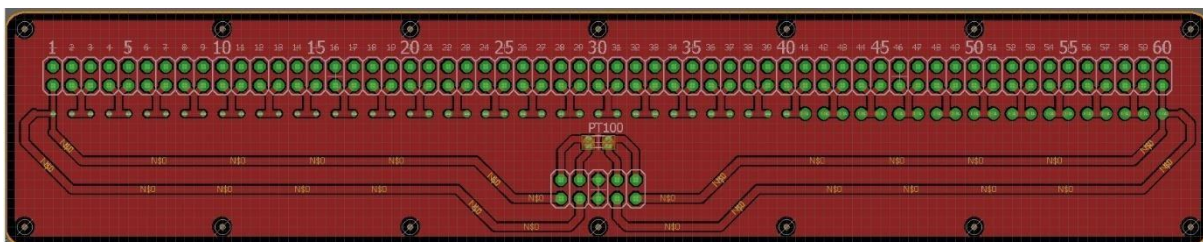
Tabulka 2: Tabulka číslování prokůvů.

Řetězec takto sériově zapojených prokůvů je zakončen čtyřvodičovým napojením, a tím je snížena délka vodivých cest na vzorku, které se budou projevat v rámci měření na minimálně. Na vzorku jsou dále umístěny pady pro připájení teplotní senzoru Pt100, které jsou taky čtyřvodičově připojeny. Jako poslední je na vzorku DPS umístěn 10-pinový konektor, sloužící k připojení měřících kabelů.

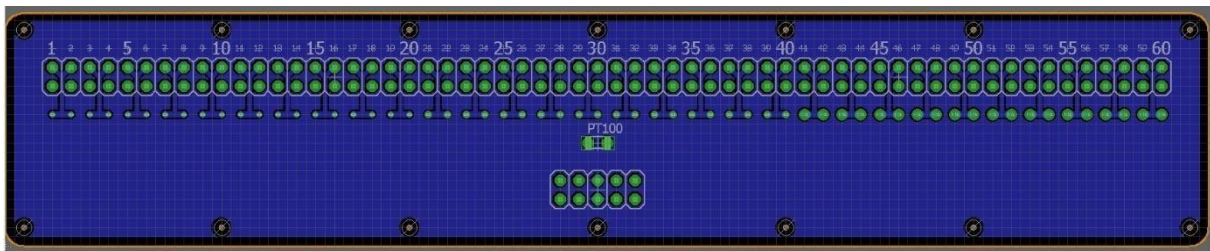


Obrázek 26: Návrh vzorku v prostředí EAGLE layout.

Na vrstvě Top i Bottom byla tzv. rozlita měď. Tím bylo docíleno stínění proti rušení, ale hlavně symetrické roztažnosti obou vrstev a tím zabráněno průhybu DPS.



Obrázek 27: Návrh vrstvy Top.



Obrázek 28: Návrh vrstvy Bottom.

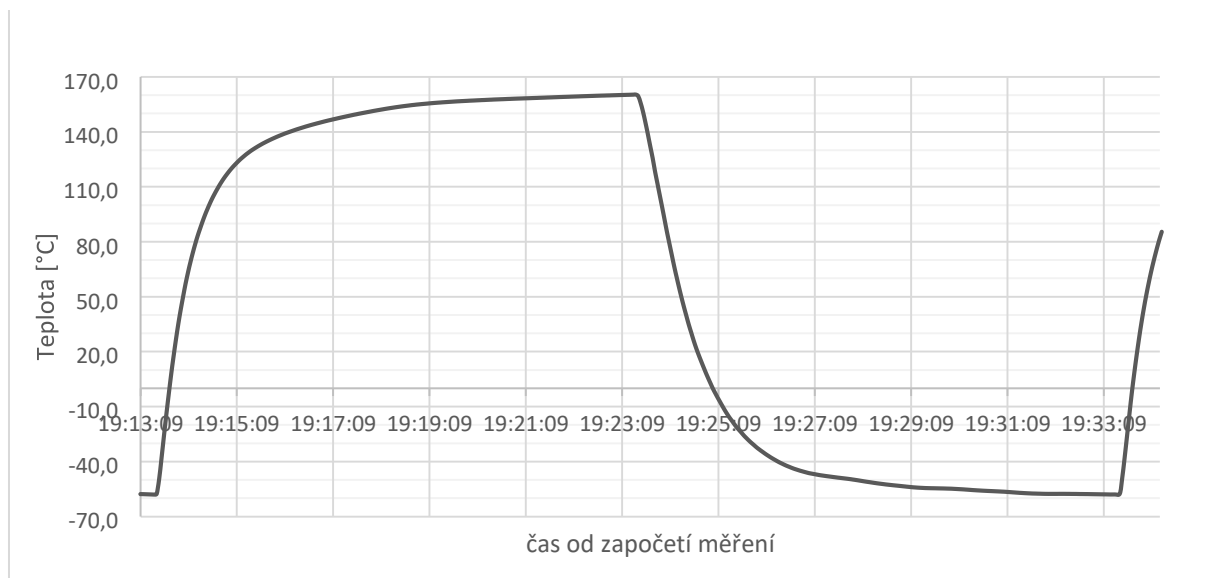
Rozměry vzorku jsou  $160 \times 31,5$  mm.

## Měření

Aby se měření nemuselo opakovat pro každý typ vzorku bylo měření prováděno na více vzorcích na jednou. Protože byl k dispozici pouze jeden miliohmometr bylo nutné jednotlivé vzorky přepínat. Přepínání vzorku bylo vyřešeno pomocí modulů s relé, které byly umístěny nad klimatickou komorou. Elektrické odpory, které připojením modulů vzniknou můžeme zanedbat, protože je zachováno čtyřvodičové zapojení. Jednotlivé vzorky DPS jsou téměř identické a předpokládáme homogenní teploty v testovacím prostředí, proto byl teplotní senzor umístěn pouze na jeden vzorek.

Teploty vzorku byly měřeny v podobě odporu pomocí multimetru. Hodnoty z miliohmometru a multimetru byly zaznamenávány pomocí programu LabView do počítače. Program Labview dále řídil přepínání prostřednictvím platformy Arduino Nano, které bylo připojeno přes USB port k počítači. Arduino posílalo řídicí signály do přepínacích modulů a tím zajišťovalo připojení žádaného vzorku v daný okamžik k miliohmmetru. Aby bylo sníženo rušení na vedení mezi vzorkem a miliohmmetrem, byla použita kroucená dvoulinka, která byla stíněna kovovým opletem připojeným k zemi. Mezi přepínacím modulem a vzorkem jsou použity silikonové kabely, které mají výrobcem udávanou teplotní odolnost do  $180$  °C. Typický teplotní profil je 1000 cyklů v teplotním rozmezí  $-40$  °C až  $140$  °C.

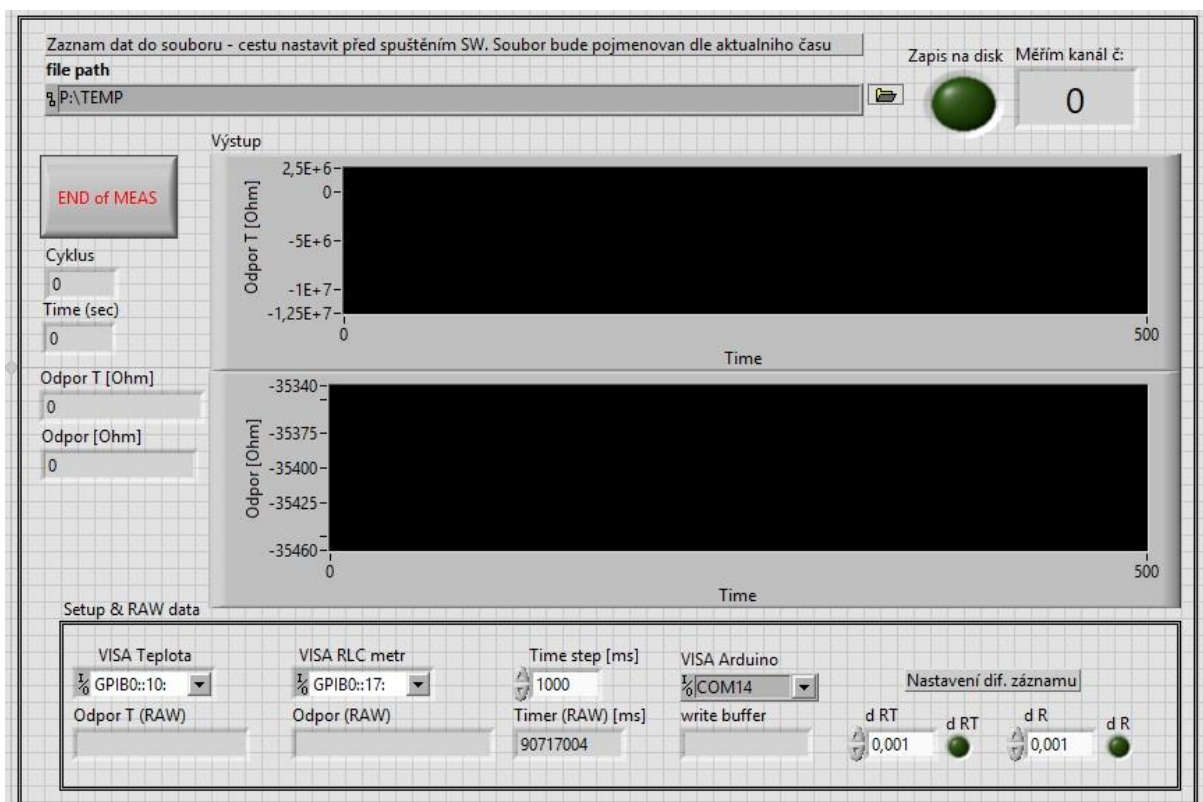
Protože jsme chtěli, aby se vady prokovů projevíly do 100 cyklů, teplotní profil byl upraven na  $-60$  °C a  $160$  °C. Tím je docíleno většího teplotního šoku a větší šance, že se vady projeví. Zároveň tyto teploty nejsou nijak destruktivní. Celý teplotní cyklus trvá 20 min a doba změny mezi maximálními hodnotami je 10 min. Nevětší změna teploty nastane v okamžiku, kdy vzorek DPS přejede ze studené zóny do horké, nebo naopak. Během jedné minuty změní teplota vzorku o  $140$  °C, což způsobí změnu rozměru v ose Z o 5600 až 6300 ppm to je o 0,56 až 0,63 %.



Graf 4: Naměřený teplotní profil na vzorku.

## LabVIEW

Bylo použito pro zapisování hodnot z miliohmometru, teplotního senzoru a přepínání vzorků DPS byl použit program od firmy National Instruments. LabView je graficky programovatelné prostředí, kde pomocí předprogramovaných bloků s určitými funkcemi a jejich pospojováním, sestavíte požadovaný program. Pro účel tohoto měření program v LabView sestavil **Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.**, kterému bych tímto ještě jednou rád poděkoval. Tento program zprostředkovává komunikaci mezi počítačem měřícím přístroji a přepínáním. Tyto porty jsou označeny názvem VISA. Důležitým parametrem je čas, po který bude miliohmometr měřit a průměrovat získané hodnoty. Tento parametr se nastavuje v poli Time step a při našem měření byl nastaven na 3000 ms. Posledním důležitým parametrem, který je před zahájením měření nutno nastavit je  $\Delta R$  a  $\Delta RT$ . Tyto delty udávají, jaká musí nastat změna hodnoty odporu u senzoru teploty, nebo miliohmometru, aby hodnota byla zapsána.  $\Delta R$  byla nastavena 0,001  $\Omega$  a  $\Delta RT$  1  $\Omega$ . Aktuální hodnoty odporu a čas od započetí měření je možné sledovat u polí po levé straně. V horním pravém rohu se zobrazuje aktuálně měřený kanál a kontrolka, zda se zapisuje na disk (zelené kolečko). Jako poslední jsou zde dva grafy pro zobrazování neměřených odporů z teplotního senzoru a miliohmometru.



Obrázek 29: Ovládací rozhraní programu v LabVIEW.

## Naměřené a vypočtené hodnoty

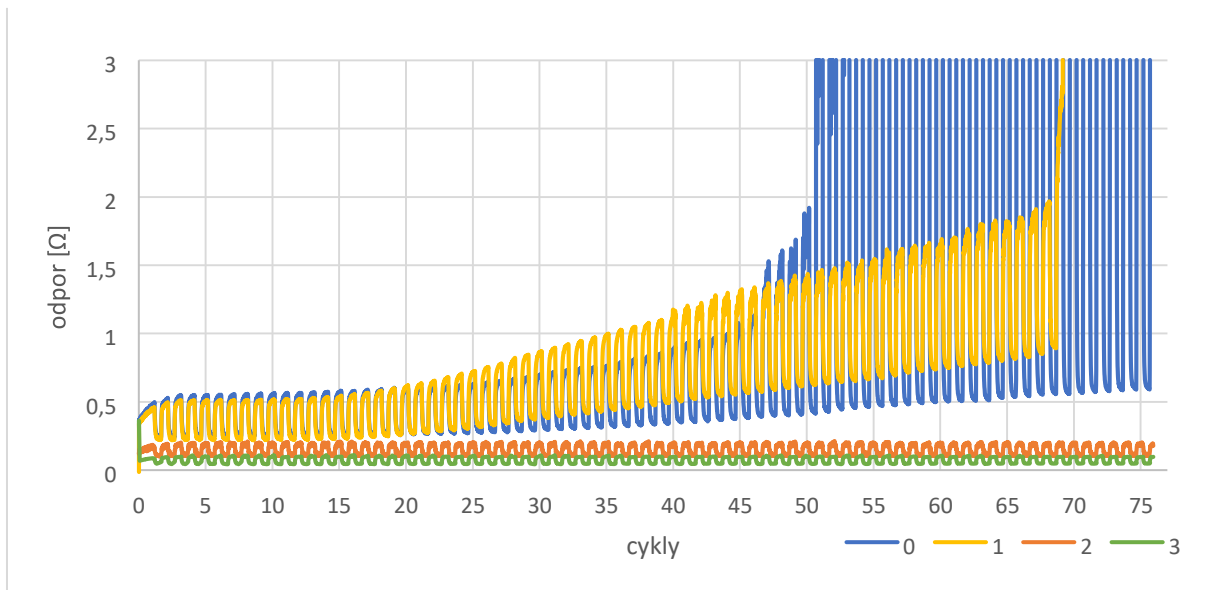
Měření na vzorcích DPS s prokovy proběhlo dvakrát. Během prvního měření byla data ztracena, proto bylo možné provést pouze vodivostní test, kdy byl nalezen jeden vadný prokov na vzorku s tloušťkou pokovení 20  $\mu\text{m}$  a HAL povrchnou úpravou a dva vadné prokovy na vzorku s pokovením 10  $\mu\text{m}$  bez povrchové úpravy. Z těchto vzorku byly zhotoveny výbrusy, které budou vidět níže. Vzorky byly tedy vyměněny za nové. V druhém měření, ze kterého jsou naměřená data byl kontinuálně sledován odpor na vzorcích:

Vzorek č.	HAL	Pokovení [ $\mu\text{m}$ ]
0	Ano	10
1	Ne	10
2	Ano	50
3	Ne	50

Tabulka 3: Tloušťka pokovení testovaných vzorků.

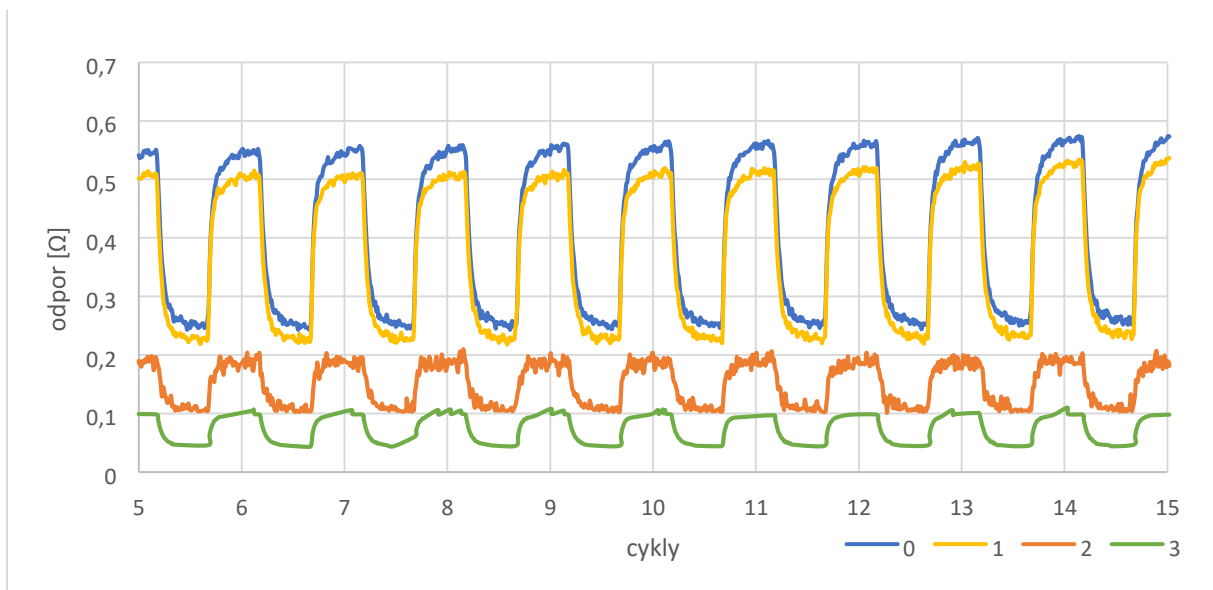
Do klimatické komory byly vloženy vzorky s pokovením 20 a 30  $\mu\text{m}$  s povrchové úpravy HAL i bez ní. A dále pak vzorky, které obstály v prvních 100 cyklech. Záznam dat z druhého kola měření je neúplný, protože po 76 cyklu bylo měření z technických důvodů ukončeno. (1) Klimatická komora pokračovala v

naprogramovaném procesu, takže vzorky byly vystaveny 100 cyklům, a tedy vzorky z předešlého kola 200 cyklům.



Graf 5: Naměřené hodnoty.

V tomto grafu jsou zobrazeny průběhy vzorku, které byly kontinuálně sledovány. Tento graf bude později zobrazen podrobněji, ale již nyní je patrné, že odpory vzorků 0 a 1 rostou. Dále je patrné, že hodnota odporu vzorku 0 po 50. cyklu přesahuje rozsah grafu. Tyto hodnoty zde nejsou zobrazeny, ale dají se reprezentovat jako nekonečný odpor. Hodnota odporu vzorku 0, však v nekonečnu nezůstává, ale periodicky se vrací. U vzorku 1 však nastala jiná situace, někde kolem 68 cyklu odpor stoupl k nekonečnu a zůstal tam. Lze již nyní říci, že na vzorcích 0 a 1 se projeví vady prokovů.



Graf 6: Naměřené hodnoty mezi 5. a 15. cyklem.

Pokud zobrazíme pouze několik prvních cyklů, je patrné, že měřený odpor je teplotně závislý a opisuje teplotní profil klimatické komory.

Aby bylo možné data dále analyzovat je nutné tuto teplotní závislost odstranit. Za tím účelem byl využit vztah odporu při zvýšené teplotě.

$$R_{\vartheta} = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\vartheta - \vartheta_{20})]$$

$R_{\vartheta}$  Naměřená hodnota odporu, při teplotě  $\vartheta$ . Tyto hodnoty známé z teplotního senzoru Pt100, kdy byly přepočítány z odporu na  $^{\circ}\text{C}$

$R_{20}$  Odpor při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ , tuto hodnotu budeme vypočítávat, abychom eliminovali teplotní závislost naměřených hodnot.

$\alpha_{20}$  Teplotní součinitel, udávající relativní změnu odporu při změně teploty o jeden stupeň Celsia. U mědi je tato hodnota  $0,92 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$

Pro výpočet teploty  $\vartheta$  z naměřeného odporu z teplotního senzoru, byl použit vzorec pro Pt100.

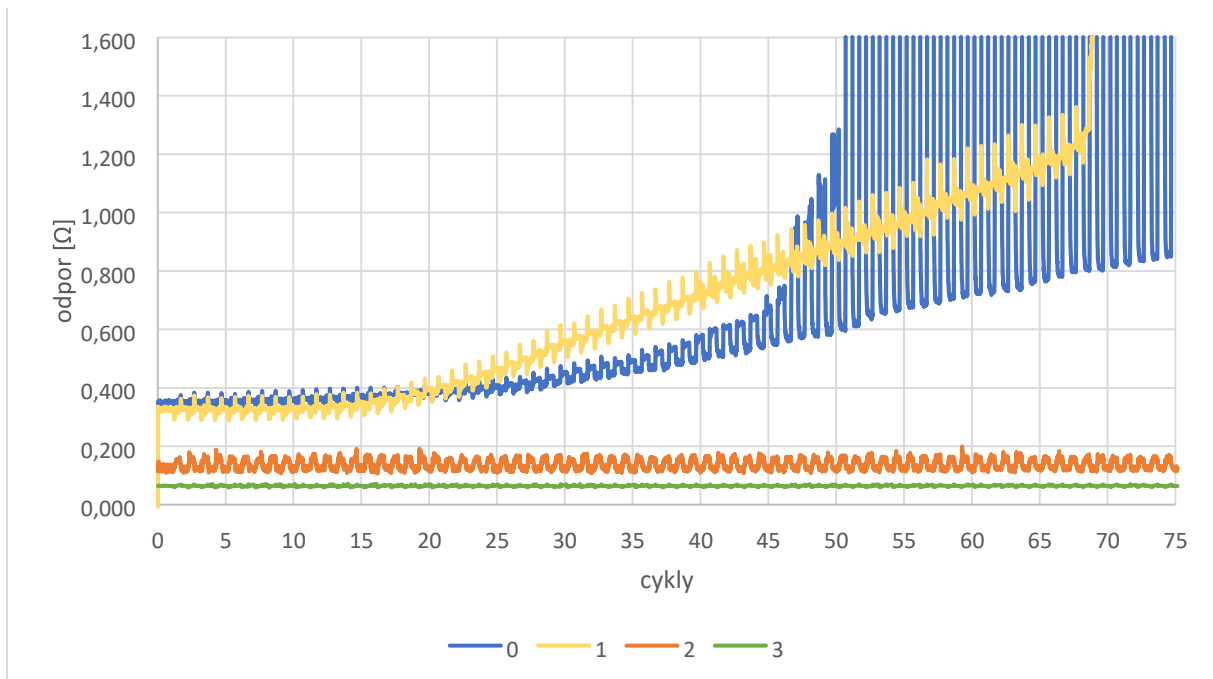
$$\vartheta = \frac{\sqrt{A^2 - 4 \cdot B \cdot \left(1 - \frac{R}{100}\right)}}{2 \cdot B} \quad (15)$$

$R$  Naměřená hodnota odporu na teplotním senzoru.

$A$  katalogová hodnota  $3,908 \cdot 10^{-3}$  (15)

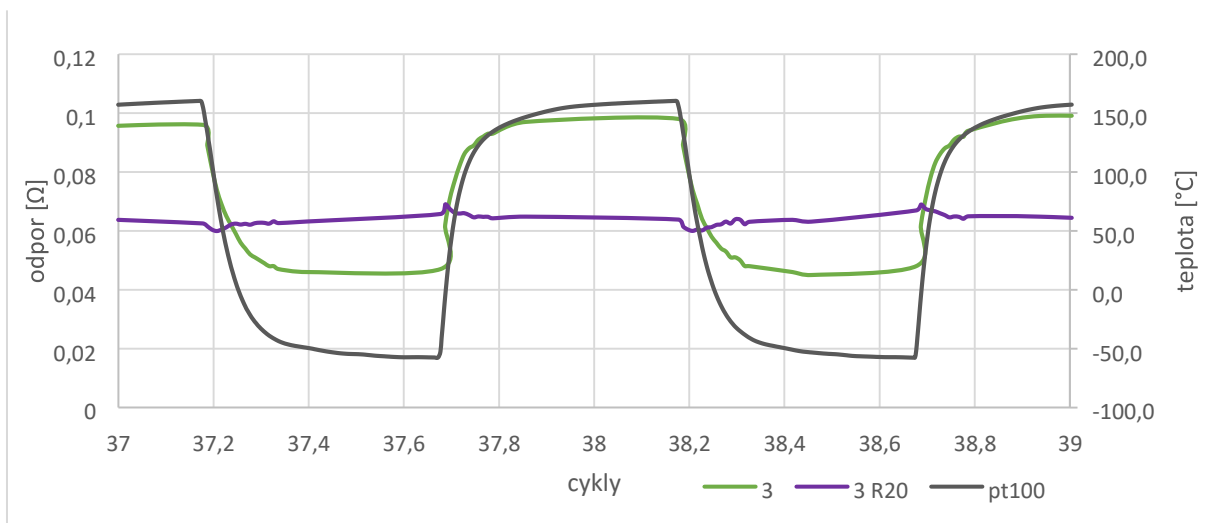
$B$  katalogová hodnota  $-5,8 \cdot 10^{-7}$  (15)

Že výpočet teploty z neměřeného odporu je správný, bylo zjištěno pomocí známého bodu  $0^{\circ}\text{C}$ , kdy odpor Pt100 je  $100 \Omega$ . Poté byly prověřeny další náhodné body v celém rozsahu naměřených hodnot a porovnány s tabulkou pro teplotní senzor Pt100.



Graf 7: Naměřená data po eliminaci teplotní závislosti.

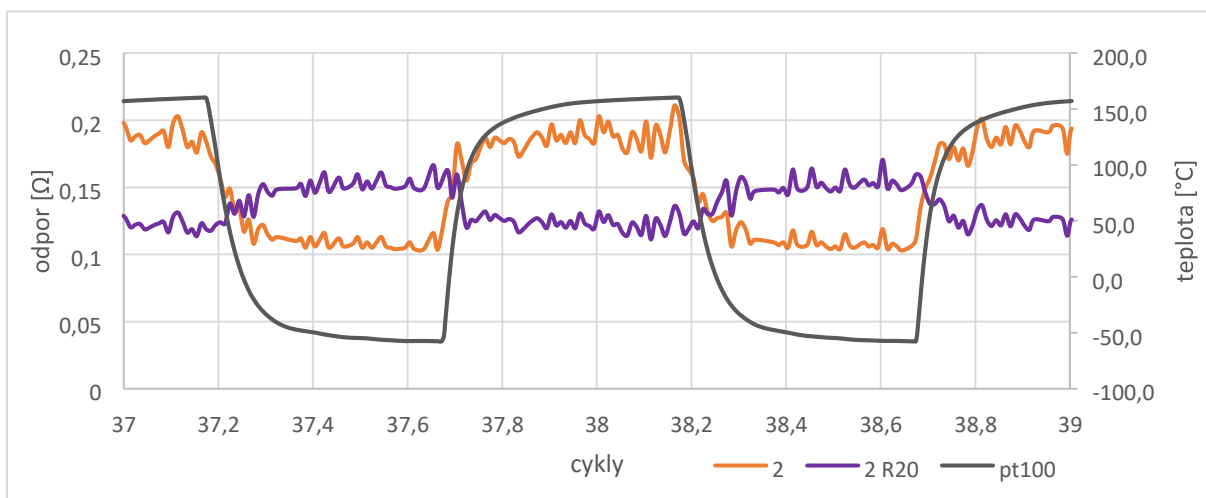
Po eliminaci teplotní závislosti je na grafu 7 vidět, že odpor vzorku 2 a 3 se prakticky nemění. Odpor vzorku 1 od 20. cyklu lineárně stoupá do 68. cyklu, kdy je měřící obvod přerušen. U vzorku 0 je do 40. cyklu narůst odporu pozvolněji. Poté se hodnoty odporu začínají rozcházet, až do 50. cyklu, kde dosahují nekonečného odporu a periodicky se opět snižují. Na jednotlivé vzorky se nyní podíváme podrobněji.



Graf 8: Naměřená a vypočtená data vzorku 3 mezi 37. a 39. cyklem.

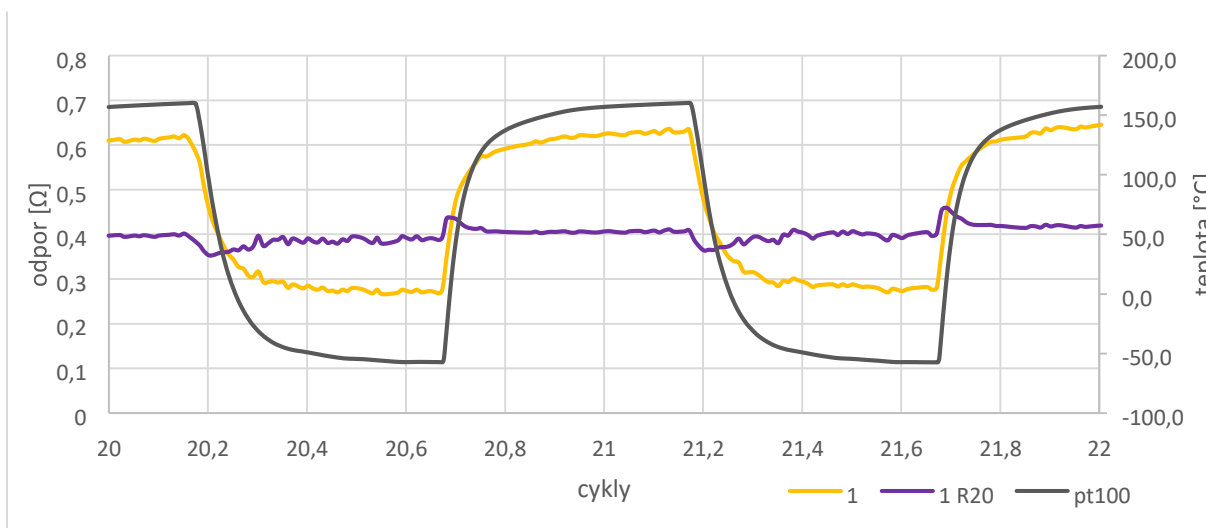
Na grafu 8 je vidět vybraném úseku grafu 7 pro vzorek 3, jak naměřená (zelená) data opisují data z teplotního senzoru. Po eliminaci teplotní závislosti mědi je vidět, že hodnoty (fialové) jsou stálé, až na určité píky. Tyto píky se vyskytují v době nejstrmější změny teploty a jejich vznik je způsoben přechodovým odporem mezi senzorem a vzorkem a vlivem tepelné kapacity keramického tělíska, ze

kterého je senzor vyroben. Že se jedná o přechodový odpor senzoru, a nikoliv o změnu odporu měřených prokůvů lze říci zcela určitě. Protože kdyby se jednalo o změnu odporu vlivem pnutí v ose Z, tento odpor by nepoklesl v okamžiku, když kdy se zmírní nárůst, nebo pokles teploty.



Graf 9: Naměřená a vypočtená data vzorku 2 mezi 37. a 39. cyklem.

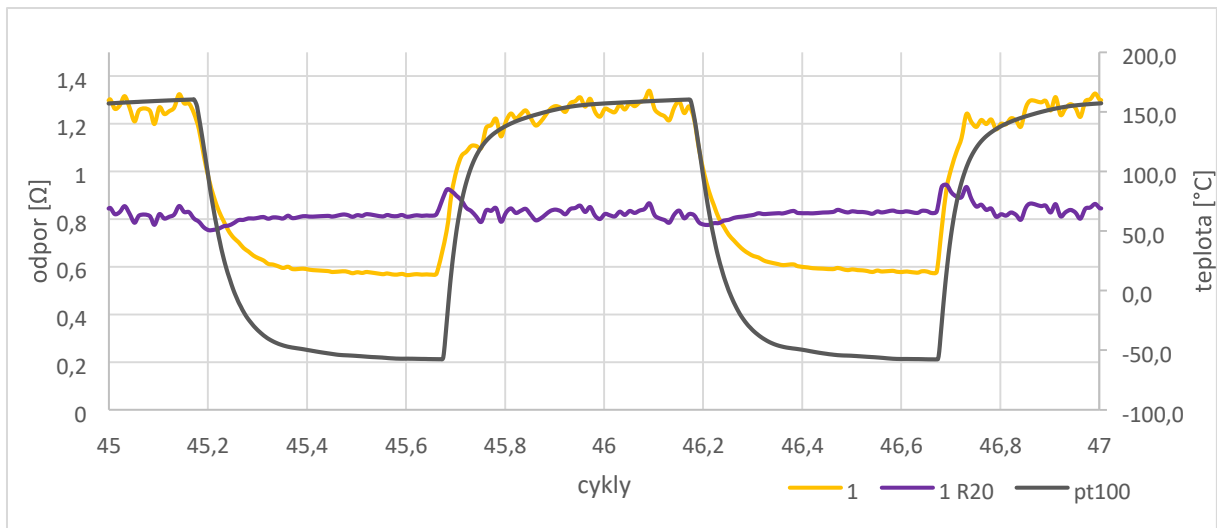
Na grafu 19 je vidět, že již naměřené hodnoty byly silně zarušeny, proto eliminace teplotní závislosti dopadla zcela neúspěšně, a proto nelze z toho vzorku usuzovat žádné závěry. Tato chyba byla pravděpodobně způsobena špatným spojem mezi vzorkem a kabelem, nebo k uzemnění kontaktů, při dotyku s nerezovým košem uvnitř komory, kde byly vzorky umístěny.



Graf 10: Naměřená a vypočtená data vzorku 1 mezi 20. a 22. cyklem.

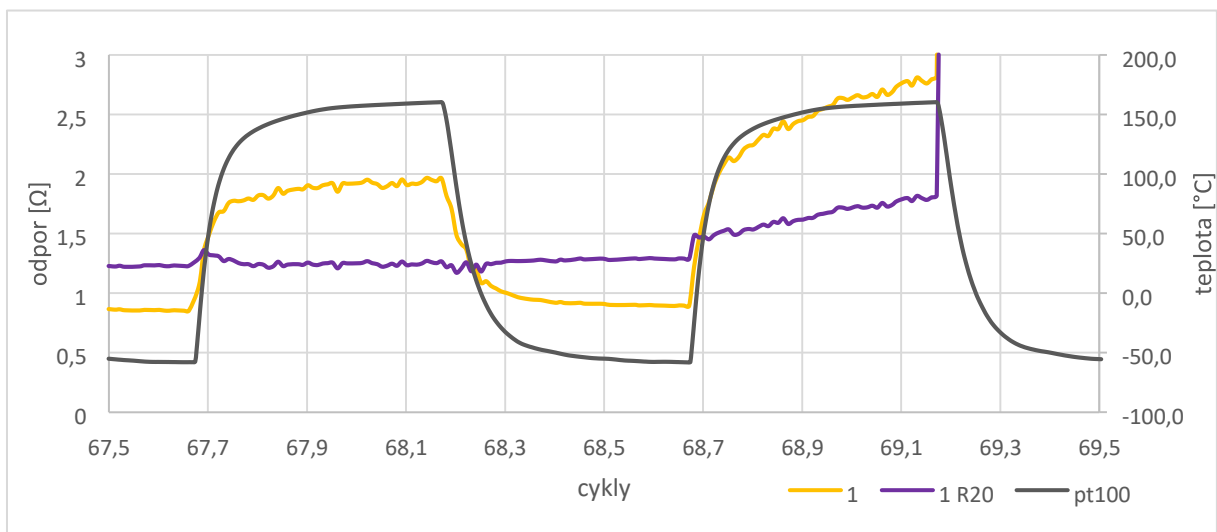
Na grafu 10 ze vzorku 1 jsou opět patrné píky, způsobené přechodovým odporem teplotního senzoru. Poté je zde vidět určité rušení, jehož původ nelze zcela určit, ale eliminace teplotní závislosti, zde byla poměrně účinná. Lez i vypořozovat mírný nárůst odporu mezi 20. a 22. cyklem.





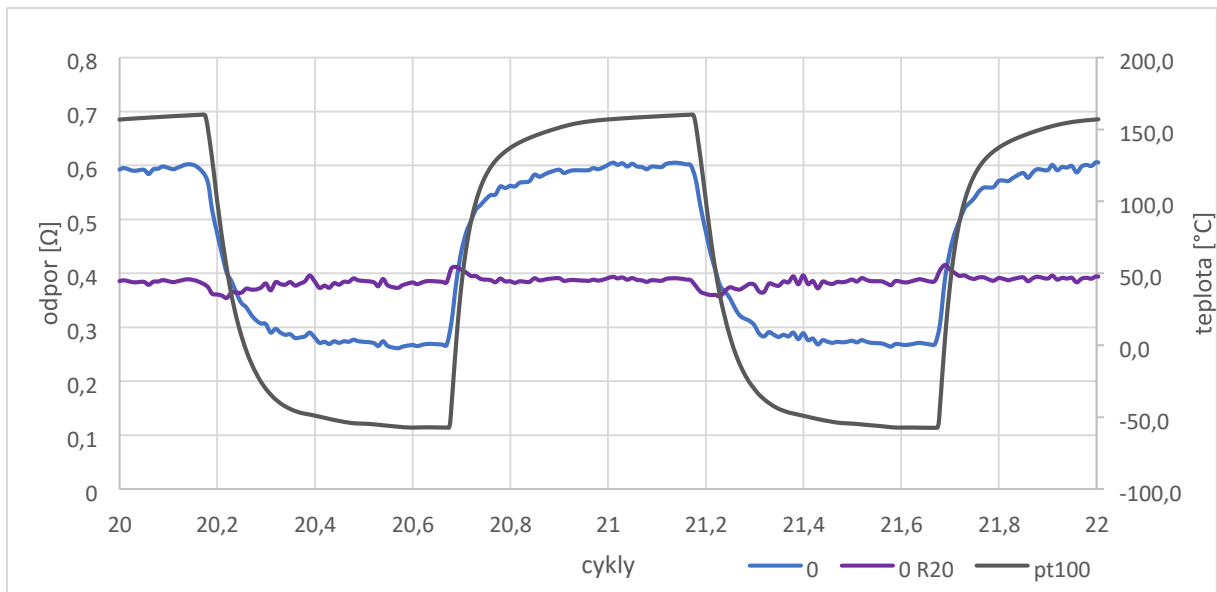
Graf 11: Naměřená a vypočtená data vzorku 1 mezi 45. a 47. cyklem.

Na grafu 11 je možné vidět, že zarušení při teplotách nad 130 °C je větší než na minulém grafu a lze tedy usuzovat, že je způsobeno pnutím v ose Z. Odpor po eliminaci teplotní závislosti stoupl od 22. cyklu na dvojnásobek. Lze usuzovat, že se jedná o projevy vadného prokovu.



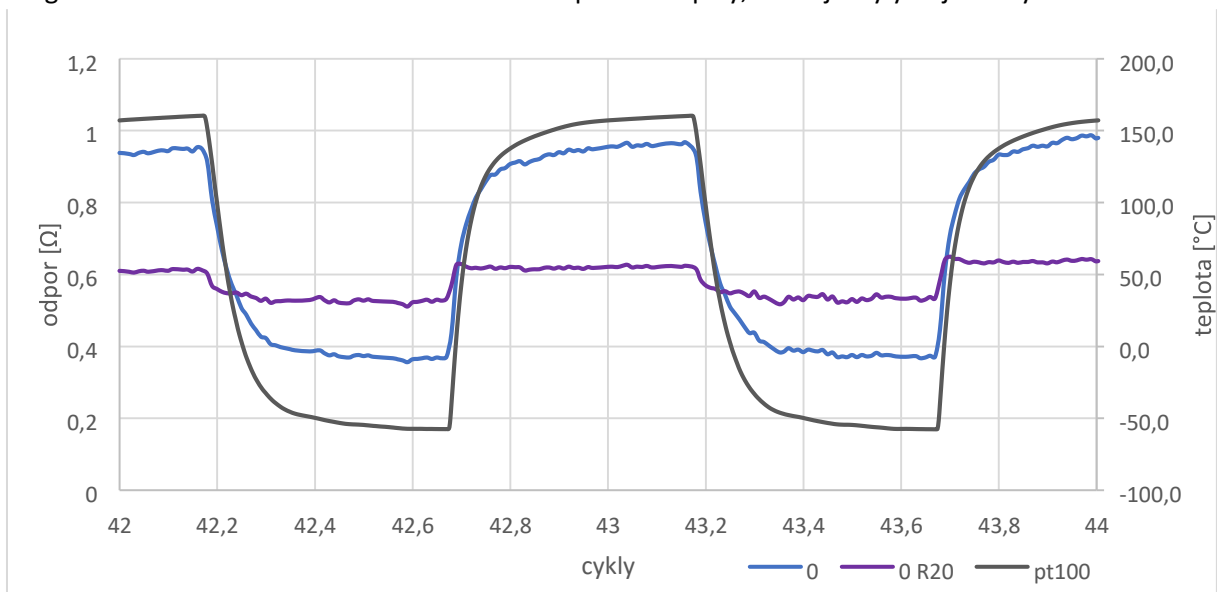
Graf 12: Naměřená a vypočtená data vzorku 1 mezi 67,5. a 69,5. cyklem.

Na grafu 12 je zachyceno přerušení prokovu na vzorku 1. Již při nárůstu teploty v 68. cyklu je vidět enormní nárůst odporu, který skokově změnil svou hodnotu k nekonečnu, v okamžiku, kdy vzorky přejdou do studené zóny a tím rychle klesne teplota vzorku. Po vyjmutí vzorků z klimatické komory, byly u vzorku 1 nalezeny tři vadné prokovy s čísly 3, 5 a 35. Nelze tedy říci o který pokov se jednalo.



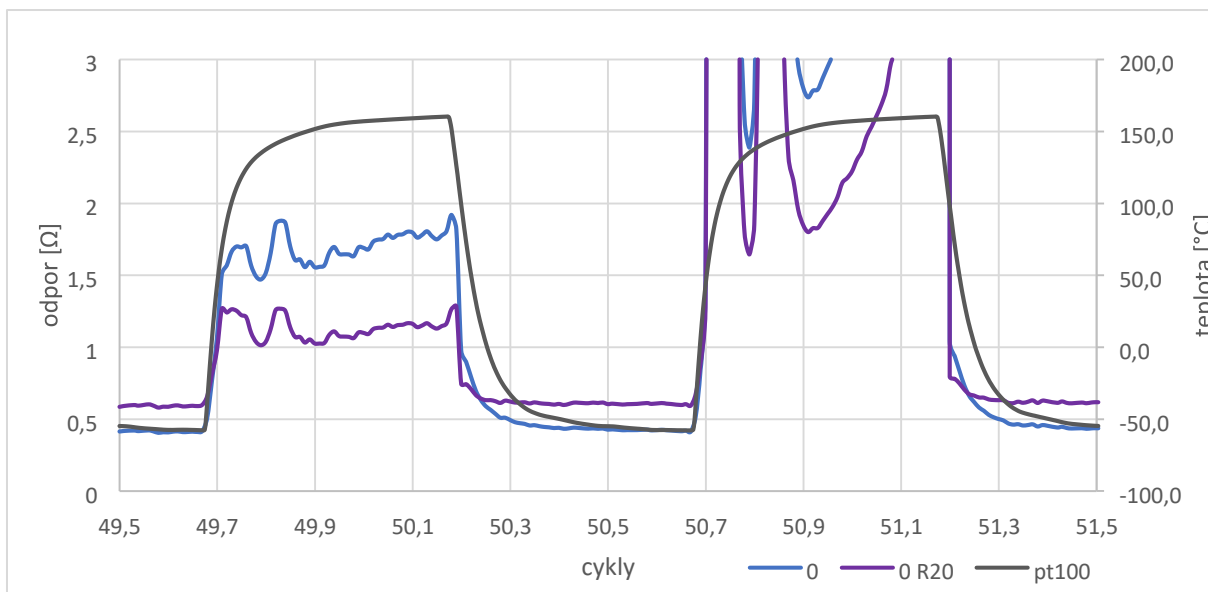
Graf 13: Naměřená a vypočtená data vzorku 0 mezi 20. a 22. cyklem.

Na grafu 13 lze vidět malé zarušení neznámého původu a píky, které již byly objasněny.



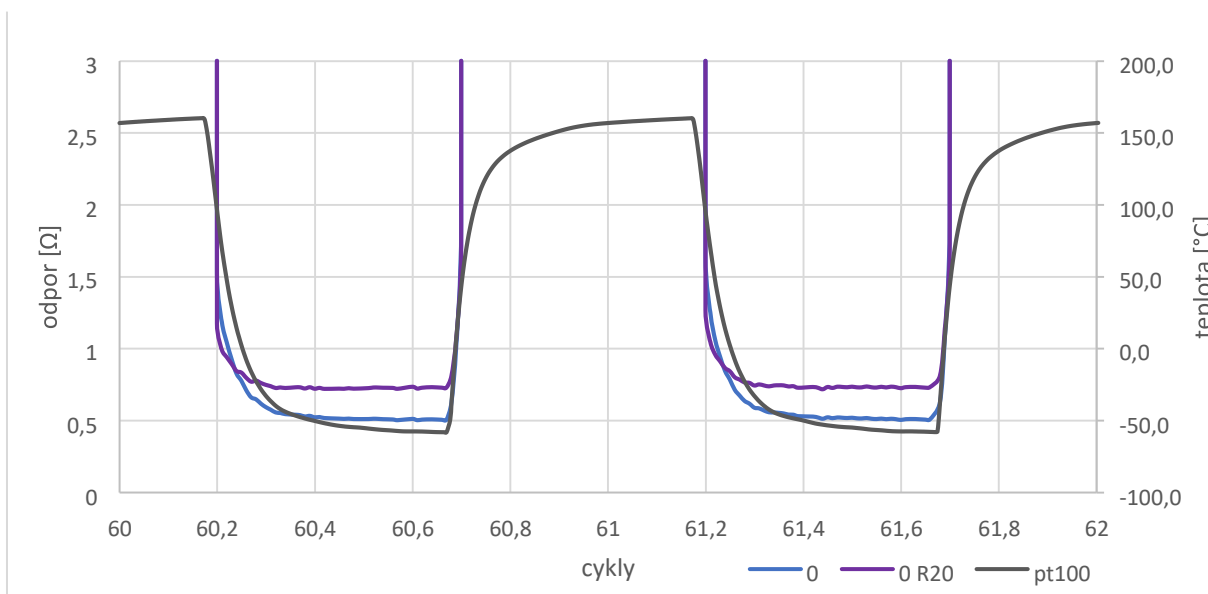
Graf 14: Naměřená a vypočtená data vzorku 0 mezi 42. a 44. cyklem.

Na grafu 14 je vidět že odpor od 22. cyklu stoupl asi o třetinu, což je menší nárůst než u vzorku 1. Patrnější však jsou zde na rozdíl od vzorku 1 rozdíly mezi studenou a horkou zónou. Lze tedy předpoklad, že je zde nějaká vada prokovu, která se projevuje vlivem pnutí v ose Z.



Graf 15: Naměřená a vypočtená data vzorku 0 mezi 49,5. a 51,5. cyklem.

Na grafu 15 je vidět již silné zarušení, které je pravděpodobně způsobeno vadou v prorkovu. V 50. cyklu odpor začne kolísat k nekonečnu, ale zase rychle klesá, a nelze tedy s určitostí říci jestli je prokov přetržen, nebo ne.



Graf 16: Naměřená a vypočtená data vzorku 0 mezi 60. a 62. cyklem.

Nyní lze zcela jistě říci, že je prokov utržen, protože se odpor skokově mění na nekonečný a zpět, podle teplotního profilu. Tento vzorek byl po vyjmutí z klimatické komory změřen (vodivostní test) a nebyly na něm nalezeny vady. Poté vzorek byl vložen na vyhřívanou plotýnku a postupně zvyšována teplota. Při teplotě cca 80 °C byly odhaleny dva přerušené prokovy s čísly 6 a 17. Jedná se tedy o vadu, která se může projevat za určitých klimatických podmínek, a tím se stává velice nebezpečnou.

## Výbrusy

Ze vzorků testovaných v prvním kole byly udělány výbrusy a vyfoceny pod mikroskopem. Pomocí vodivostního testu byly určeny vadné prokovy, ze kterých byly následně výbrusy zhotovovány. Protože během prvního kola měření nebyla zaznamenána data, nelze určit, v jakém okamžiku došlo k přerušení prokovu a jak se prokov během přerušení choval.

Vodivostním testem byly nalezeny dva přerušené prokovy. První na vzorku s pokovením o tloušťce 10  $\mu\text{m}$  a druhý na vzorku s pokovením o tloušťce 20  $\mu\text{m}$  a povrchovou úpravou HAL.



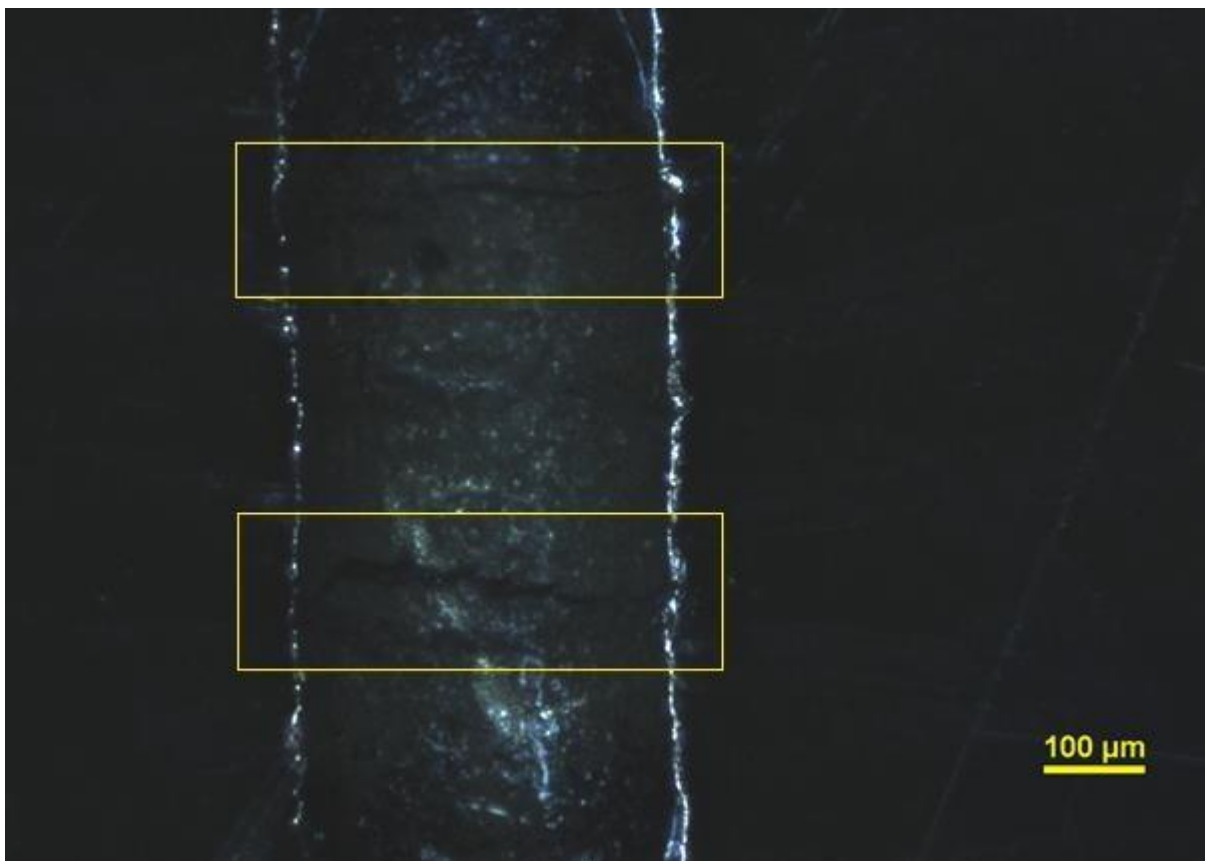
Obrázek 30: Foto výbrusu prokovu z prvního kola měření.

Na obrázku 30 je možné vidět fotografii vzorku s pokovením o tloušťce 20  $\mu\text{m}$  a povrchovou úpravou HAL. Je patrné, že přerušení vzniklo na propojení mezi prokovem a horní vrstvou. Tato vada pravděpodobně vznikla tím, že v daném pokovu se špatně nanesl koloid. To vedlo k tomu, že během pokovení se vytvořilo nedokonalé propojení, které se vlivem cyklického namáhání v ose Z přerušilo.



*Obrázek 31:Foto výbrusu prokovu z prvního kola měření.*

Na obrázku 31 je fotografie prvního ze dvou přerušovaných prokovů na vzorku s pokovením o tloušťce 10  $\mu\text{m}$ . Je patrné, že povrch prokovu je značně nerovnoměrný. Tyto nerovnosti pravděpodobně vznikly během procesu vrtání DPS. Projevily se i v pokovení, kde v některých místech je menší vrstva mědi, a tedy rizikové místo. Na pravé straně prokovu jsou rozpoznatelná hned dvě místa, kde byl pokov přerušen. To však nelze říci o straně levé, kde vlivem špatného nasvícení nelze určit místo, kde byl prokov přerušen.



Obrázek 32: Foto výbrusu prokovu z prvního kola měření.

Na obrázku 32 je fotografie druhého z přerušovaných prokůvů na vzorku s pokovením o tloušťce 10 μm. Stejně jako u předešlého prokovu jsou zde patrné nerovnosti v pokovení. Tyto nerovnosti jsou menší než u předešlého prokovu, ale stále zcela patrné. Vlivem špatného nasvícení je i zde obtížné určit místo přerušení, ale byla zde lépe rozlita pryskyřice během výroby výbrusu. Proto jsou rozpoznatelné praskliny na zadní stěně prokovu, a tím lze určit nepravděpodobnější místa přerušení.

## Závěr

Podle zpracovaných dat ze vzorku 0 je patné, že na prokovech se mohou vyskytnout vady, jejichž projevy nebudou jednoznačné, ale budou ovlivněny okolní teplotou. Během testování prokovy nebyly zatíženy a lze předpokládat, že by došlo k přerušení prokovu po určité době provozu, podle velikosti proudu, který by prokov přenášel. Z výbrusů vzorku s pokovením 10  $\mu\text{m}$  bez povrchové úpravy HAL jsou patrné nerovnosti povrchu prokovu, která je pravděpodobně způsobena při procesu vrtání. Z výbrusu vzorku s pokovením 20  $\mu\text{m}$  a povrchovou HAL je patrné, že stěny prokovu jsou zcela rovné. Zde pravděpodobně nastala vada při nanášení koloidu, a tím vytvoření nedokonalého napojení. Lze tedy předpokládat, že následky výrobních vad způsobené během procesu vrtání, lze eliminovat povrchovou úpravou HAL nebo větší vrstvou nanesené mědi.

V prvním kole měření se pomocí vodivostního testu našly na 480 prokovech tři chyby. V druhém kole měření byly vodivostním testem na vzorku 1 odhaleny tři přerušené prokovy a dva přerušené prokovy na vzorku 0 po zvýšení jeho teploty na 80 °C. Dále na vzorku s pokovením 30  $\mu\text{m}$  a povrchovou úpravou HAL byly vodivostním testem odhaleny dva přerušené prokovy, ale tento vzorek byl vystaven 200 cyklům. U vzorků s pokovením 50  $\mu\text{m}$  nebyly odhaleny žádné vady ani po 200 cyklech. Dále během kontinuálního měření se tyto prokovy chovaly stále stejně a jejich odpor byl konstantní. Lze tedy předpokládat, že pokud prokovy budou mít dostatečně tlustou pokovení, dojde ke zvýšení odolnosti a spolehlivosti daného prokovu. Otázkou zůstává, jak by se takto vyztužené prokovy projevovali v případě čtyř nebo více vrstevných DPS.

## Citovaná literatura

1. **prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.** dps-az.cz. [Online] 2010. <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:4644/z-historie-plosnych-spoju>.
2. **ABEL M., CIMBUREK V.** *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice : ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.
3. **POŘÍZEK, Michal.** Elektricky vodivá lepidla. *Diplomová práce*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016. Sv. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
4. **PLAČEK, Martin.** Sledování vybraných vlastností elektricky vodivých lepidel. *Bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2010. Sv. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
5. **Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.** *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. Košice : Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010. ISBN: 978-80-553-0447-2.
6. **Moderní technologie elektronických obvodů a systémů, Laboratorní cvičení – Pájení.** [Online] [Citace:14.10.2017.] [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/proj/2011/LN05\\_Lab3\\_P%C3%A1jen%C3%AD\\_trh%C3%A1n%C3%AD.doc](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/proj/2011/LN05_Lab3_P%C3%A1jen%C3%AD_trh%C3%A1n%C3%AD.doc).
7. **Veselý, Petr.** Risk analýza pájení čipů. *Bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2015. Sv. Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.
8. **Solder mask.** *wikipedia.org*. [Online] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solder\\_mask](https://en.wikipedia.org/wiki/Solder_mask).
9. **Obrazek z webu.** [Online] <https://www.didq.nl/pcb-design.php>.
10. **Výrobce DPS.** [Online] <https://www.eurocircuits.com>.
11. **Jan Šebesta, CUBE CZ.** dps-az.cz. [Online] <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6272/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-2>.
12. **Foto z webu.** [Online] [https://www.researchgate.net/publication/241312634\\_Delamination\\_buckling\\_of\\_fibre-metal\\_laminates](https://www.researchgate.net/publication/241312634_Delamination_buckling_of_fibre-metal_laminates).
13. **Camiresearch.** 4 wire testing. [Online] <https://www.camiresearch.com/Campaigns/Web-Articles/4-wire-testing.html>.
14. **Pragoboard.** [Online] <http://www.pcb.cz/specifikace>.



15. **Pt100 datasheet.** [Online] <http://www.datasheetspdf.com/pdf/900325/Baumer/Pt100/1>.
16. **MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.:** *Montáž v elektrotechnice,* . Praha : ČVUT , 2001.
17. **Ing. Josef Košťál.** eel.cz. *Teplotní závislost odporu na kovových vodičů.* [Online] 2008.
18. **Isola IS400.** [Online] [www.isola-groupe.com](http://www.isola-groupe.com).