VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VÝROBA VÍCEVRSTVÝCH DESEK S PLOŠNÝMI SPOJI
PRODUCTION OF MULTILAYER PCB

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Ondřej Janda**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Jiří Starý, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Ondřej Janda ***ID:*** 183954
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Výroba vícevrstvých desek s plošnými spoji

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku výroby vícevrstvých desek s plošnými spoji bez mikropropojů.
Proveďte analýzu současného stavu, zpracujte Ishikawa diagram, vyznačte slabší místa procesu.
Testujte vliv vybraných materiálových, procesních a environmentálních faktorů na kvalitu procesu, zejména pokovených otvorů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 11.8.2020

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
Konzultant: Miroslav Černoch

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce seznamuje s problematikou výroby vícevrstvých desek plošných spojů. Teoretická část popisuje materiály používané pro výrobu vícevrstvých DPS a jejich vlastnosti. Současně se zaměřuje na proces lisování vícevrstvých DPS, druhy používaných lisů a jejich výhody a nevýhody. V praktické části je popsána metodologie a samotné testování DPS pro zjištění spolehlivosti vybraných elektrických parametrů. Testování je zaměřeno na tepelné zatížení při strojním pájení DPS a na tepelné zatížení v cílovém prostředí.

Klíčová slova

Deska plošných spojů, prepreg, substrát, laminace, spojování vrstev, pokovený otvor

Abstract

This master thesis introduces the problematics of multilayer printed circuit boards. Theoretical part is focused on materials used for production of multilayer PCB and their parameters. At the same time, it focuses on the pressing process of multi-layered PCB, the types of presses used and their advantages and disadvantages. Practical part describes the methodology and testing of the PCB to identify the reliability of chosen electrical parameters. Testing is aimed to simulate thermal stress during machine soldering and during thermal stress in the target environment.

Keywords

Printed circuit board, prepreg, substrate, lamination, bonding, plated through hole

Bibliografická citace:

JANDA, Ondřej. Výroba vícevrstvých desek s plošnými spoji. Brno, *2020, 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce* Ing. *Jiří Starý, Ph.D.*

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Výroba vícevrstvých desek s plošnými spoji“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem s plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **11. srpna 2020** ……

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantu diplomové práce panu Miroslavu Černochovi, jehož prostřednictvím došlo ke spolupráci s firmou ČeMeBo. Také děkuji Ing. Alexandru Otáhalovi za pomoc při cyklování DPS a prací s mikroskopem.

V Brně dne: **11. srpna 2020** ……

podpis autora

Obsah

1. Úvod....12
2. Vícevrstvé desky plošných spojů....13
2.1 Základní materiál....13
2.1.1 Základní materiál pro neohebné desky....13
2.1.2 Prepreg....14
2.1.3 Vlastnosti základních materiálů....15
2.2 Výroba vícevrstvých DPS....18
2.3 Laminace vícevrstvých DPS....18
2.3.1 Lis vícevrstvých DPS....20
2.3.2 Používané typy lisů....22
2.3.3 Laminační cyklus....23
2.4 Ishikawa diagram....26
3. Metodika testování elektrických vlastností DPS a dosažené výsledky....28
3.1 Použité přístroje a zařízení....31
3.2 Teplotní stárnutí DPS a změny odporu propojení....35
3.2.1 První cyklování se zkušebním měřením a pozorování termokamerou....36
3.2.2 Nastavení režimu pro cyklovací komoru....39
3.2.3 Měření a dosažené výsledky....40
3.3 Sledování vlivu hromadného pájení....48
3.3.1 Testování v přetavovací peci....48
3.3.2 Zkouška na odolnost VV DPS v roztavené pájce....56
3.4 Elektrický test....59
3.4.1 Prvková analýza povrchu po tepelném cyklování....60
3.5 Mikrovýbrus VV DPS a tloušťky pokovení otvoru....62
Závěr....65
Přílohy....70

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

DPS	…	Deska plošných spojů
FR	…	Flame retardant (samozhášivý materiál)

Symboly:

U	…	napětí	[V]
I	…	proud	[A]
R	…	odpor	[Ω]
Tg	…	teplota skelného přechodu	[°C]
ε_r	…	relativní permitivita	[-]
TCE	…	teplotní roztažnost	[ppm·K^{-1}]
α	…	teplotní součinitel odporu	[K^{-1}]
σ	…	konduktivita	[S·m·mm^{-2}]
ρ	…	rezistivita	[Ω·mm^2·m^{-1}]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schématická výroba základních materiálů[3] 14
Obr. 2-2 Chování amorfních a semikrystalických látek při měknutí a tavení [5].....16
Obr. 2-3 Postup výroby vícevrstvých DPS [1].....18
Obr. 2-4 Vrtání otvorů pro sesouhlasení desek při laminaci [1] 19
Obr. 2-5 Lay-up – sesouhlasení desek s proloženým prepregem a měděnou fólií [1] 19
Obr. 2-6 Schéma tlakového lisu[4].....20
Obr. 2-7 Schéma průřezu balíku DPS před laminací[12] 21
Obr. 2-8 Schéma autoklávu [14] 21
Obr. 2-9 Lisovací zařízení MLP25-M [16].....22
Obr. 2-10 HML LP-2000-V [17].....23
Obr. 2-11 Dvouetážový vysokoteplotní lis LP 100-2-VK s vakuovou komorou[18] 23
Obr. 2-12 Vliv teplotního gradientu na viskozitu epoxidu[4].....24
Obr. 2-13 Srovnání teploty, viskozity a tlaku při laminaci (přerušovaná čára popisuje dvoustupňový laminační cyklus)[4] 25
Obr. 2-14 Ishikawa diagram pro zobrazení vlivů na vznik defektu při výrobě DPS[20].....26
Obr. 3-1 Testovaná DPS č.1.....28
Obr. 3-2 Průřez testovanou DPS č.1.....29
Obr. 3-3 Přířez s testovanou DPS č.2 29
Obr. 3-4 Průřez testovanou DPS č.2.....30
Obr. 3-5 Přířez s testovanými DPS č.3A(levá) a DPS č.3B(pravá) 30
Obr. 3-6 Průřez testovanou DPS č.3.....31
Obr. 3-7 Sterilizátor Chirana.....31
Obr. 3-8 Multimetr Agilent 34401A.....32
Obr. 3-9 Termokamera FLIR 32
Obr. 3-10 Cyklovací komora CTS T-40/25 33
Obr. 3-11 Schéma průběžné pece DIMA SMRO-0180 [26] 34
Obr. 3-12 Pájecí lázeň Hakko FX-301B.....34

Obr. 3-13 Zařízení na broušení a leštění Saphir 530 35
Obr. 3-14 DPS č.2 s testovanými pokovenými otvory (strana A) 37
Obr. 3-15 DPS č.2 s připájenými vývody pro proudové svorky (strana B) 37
Obr. 3-16 Rozložení teplotního pole při zahřátí, teplota chladících plošek vpravo .. 38
Obr. 3-17 Rozložení teplotního pole při podchlazení pro DPS č.2 38
Obr. 3-18 Připojení měřících svorek k DPS uvnitř Teplotní skříně Friocell 55R 40
Obr. 3-19 Ukázka DPS č.2 s připájenými měděnými vývody 45
Obr. 3-20 Ukázka DPS č.2 s připájenými vývody a termočlánky 49
Obr. 3-21 Změřený teplotní profil pro DPS č.1. 50
Obr. 3-22 Změřený teplotní profil pro DPS č.2. 52
Obr. 3-23 Změřený teplotní profil pro DPS č.3B 54
Obr. 3-24 DPS po tepelném stárnutí (nahoře DPS č.3A a č.3B, dole DPS č.1) 60
Obr. 3-25 EDS povrchové vrstvy DPS č.3A 61
Obr. 3-26 Mikrovýbrus pro DPS č.1 před tepelným zatížením (vlevo) a po 600 cyklech (vpravo) 63
Obr. 3-27 Mikrovýbrus pro DPS č.1 po průchodu přetavovací pecí (vlevo) a po ponoření do pájecí lázně (vpravo) 63

Seznam grafů

Graf 1 Nastavený teplotní profil pro komoru CTS T-40/25 39
Graf 2 Reálný teplotní profil cyklovací komory 40
Graf 3 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2 během cyklování 41
Graf 4 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3A během cyklování 42
Graf 5 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B během cyklování 43
Graf 6 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1 s měděnými vývody během cyklování 44
Graf 7 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2 s měděnými vývody během cyklování 46
Graf 8 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B s měděnými vývody během cyklování 47
Graf 9 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1. po přetavení 51
Graf 10 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2. po přetavení 53
Graf 11 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B po přetavení.....55
Graf 12 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1. po ponoření do lázně 57
Graf 13 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2. po ponoření do lázně 58
Graf 14 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3. po ponoření do lázně 59

Seznam rovnic

Rovnice pro výpočet hodnoty odporu při změně teploty.....35

Seznam tabulek

Tab. 2-1 Vybrané vlastnosti 4 používaných typů materiálu FR4 [6][7][8][9].....17
Tab. 3-1 Tabulka konstant vybraných vodivých materiálů [31] 36
Tab. 3-2 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.2 41
Tab. 3-3 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3A 42
Tab. 3-4 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3B 42
Tab. 3-5 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.1 44
Tab. 3-6 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.2 45
Tab. 3-7 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3B 46
Tab. 3-8 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.1 51
Tab. 3-9 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.2 53
Tab. 3-10 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.3B.....55
Tab. 3-11 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.1 56
Tab. 3-12 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.2 57
Tab. 3-13 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.3A 58

1. ÚVOD

V dnešní době, kdy dochází k častějšímu používání moderní techniky ve všedním životě, se stále více setkáváme s deskami plošných spojů. Desky plošných spojů neboli DPS jsou používány na řízení, ovládání nebo kontrolování většiny elektrických a elektronických zařízení. Jednotlivé DPS přitom musí projít velkým množstvím procesních kroků, než je vůbec možné je osadit součástkami a sloučit s větším zařízením. S velkým množstvím firem na trhu zabývající se výrobou DPS není těžké si nechat desku vyrobit, problém spočívá s nároky na kvalitu. Miniaturizace se projevuje v celém technickém odvětví a u elektrotechnických součástek obzvláště. Snaha o zmenšení vodivých cest a součástek už dlouhou dobu nestačí, proto se přešlo k výrobě vícevrstvých DPS. S nástupem nových technologií jsme dnes schopni podle potřeby vytvořit DPS s 16 vrstvami i více. Současně dochází s používáním náročnějších druhů technologií ke tvorbě nových problémů.

V praxi platí, že čím více vrstev DPS tím musí být proces výroby přesnější a tím více je jednodušší vyrobit nekvalitní DPS. Proto se tato práce zaměřuje na proces výroby vícevrstvých DPS a možnosti jednotlivých částí procesů. Přesněji se práce bude zabývat výrobou vícevrstvých DPS se zaměřením na základní materiál, na proces jejich lisování a následné testování.

2. VÍCEVRSTVÉ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Konstrukce vícevrstvých desek plošných spojů, se může lišit, od relativně jednoduché až po vysoce složitou. První polovina teoretické části diplomové práce je zaměřena na vliv, složení a výrobu základních materiálů potřebných k výrobě vícevrstvých DPS se zaměřením na materiály používané firmou ČeMeBo. Druhá polovina popisuje procesy a zařízení související s laminací vícevrstvých DPS.

2.1 Základní materiál

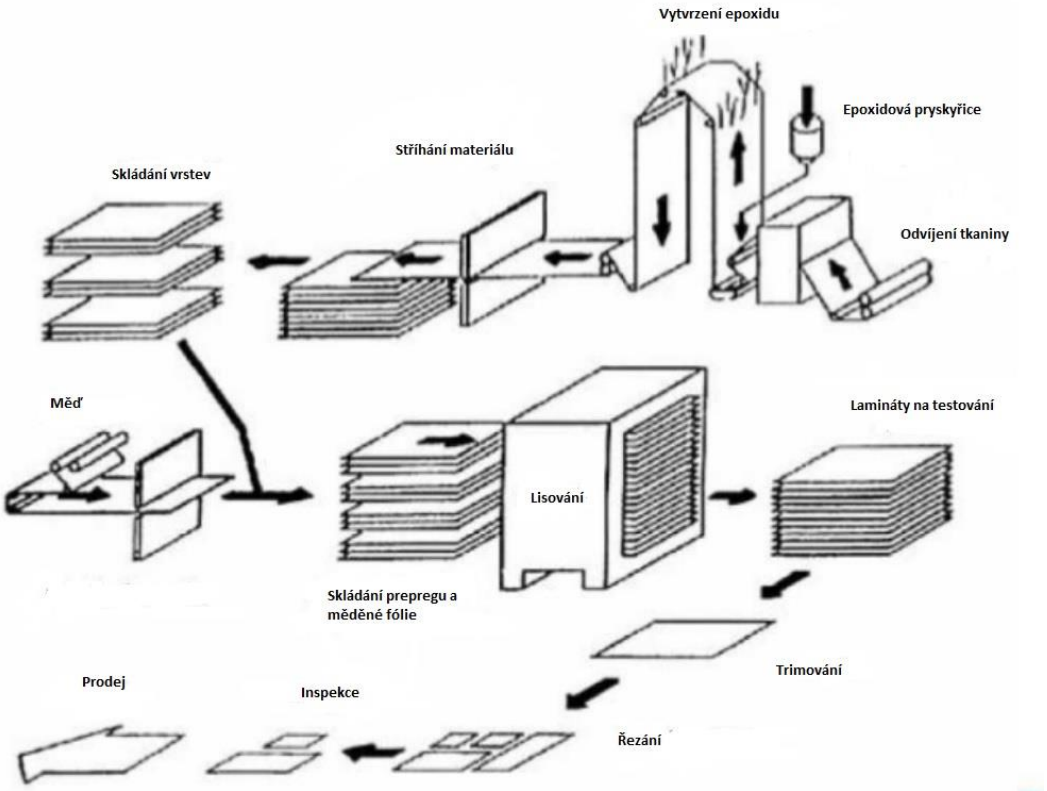
Základní materiál nebo také substrát se využívá jako jádro pro DPS. Využívá se dielektrický materiál s vodivou vrstvou nebo kovové jádro s izolací. Vlastnosti základního materiálu ovlivňují vlastnosti výsledné DPS. Jádro může být tuhé, pružné nebo kombinací těchto dvou typů a slouží jako nosič pro vodivý motiv, montáž elektrických součástek, pasivních součástek a dalších prvků. Materiály používané pro základní materiál můžeme rozdělit na organické, anorganické a kombinované.

2.1.1 Základní materiál pro neohebné desky

Mezi nejvíce rozšířené základní materiály patří organické materiály s nosnou částí na bázi laminátů. Důvodem jsou dobré vlastnosti, převážně mechanické, dielektrické a chemické. Oproti anorganickým materiálům jako například beryliová nebo korundová keramika jsou organické materiály mnohem odolnější vůči praskání při ohybu. Důležitým faktorem je i nízká cena. Substráty se skládají z výztuže, která zajišťuje mechanické vlastnosti, a pojiva, které slouží pro zvýšení chemické odolnosti. [1]

Výztuž se vyrábí z mechanicky odolných materiálů, aby poskytla pevné jádro pro budoucí DPS, který se doplní a vytvrdí pomocí různých druhů pryskyřic. Nejvíce používaný organický materiál pro DPS lze znát pod jménem FRx. Zkratka FR značící „Flame Retardant“, tedy se samozhášivým účinkem a číslo x popisuje typ. Mezi nejčastěji používané materiály můžeme zařadit 3 typy FR2, FR3 a především FR4. FR2 využívá vrstvený celulózový papír v kombinaci s fenolformaldehydovou pryskyřicí. Používá se pro málo náročné aplikace, hlavně jednovrstvé DPS. Výhoda spočívá v jednoduchém opracování, vrtání a velmi nízké ceně. Nevýhoda materiálu je vysoká navlhavost, nízká odolnost vůči elektrickému oblouku a celkově horší mechanická a teplotní odolnost. Další druh se nazývá FR3 a je kombinací epoxidové pryskyřice a vrstveného papíru. Epoxidová pryskyřice zlepšuje mechanické, elektrické a teplotní vlastnosti, proto FR3 nahrazuje FR2 u náročnějších aplikací. Mezi nejvíce používané základní substráty pro DPS patří FR4. Spojení epoxidové pryskyřice a skelné tkaniny, která nahrazuje tvrzený papír, poskytuje dobrou kombinaci mezi kvalitním substrátem a stále nízkou cenou, která je v porovnání s FR2 dvakrát větší. Materiál FR4 se hojně využívá v elektrotechnickém průmyslu pro výrobu vícevrstvých DPS a ve své podstatě plně nahradil používané materiály FR2 a FR3. Vlastnosti materiálu FR4 se velmi liší na základě používaného typu epoxidu. Materiál FR4 se více popíše v kapitole 2.1.3 po vysvětlení vlastností základních materiálů. [1][2]

Měděná vodivá vrstva se pak na substrátu vytváří pomocí elektrolytického nanášení na nerezových bubnech. Výhoda této metody je vysoká čistota mědi (až 99,5 %). Pro dobrou adhezi mezi izolačním materiálem a mědí je třeba povrch upravit pomocí anodické oxidace. Současně je nutné, aby výsledná vrstva měla dostatečnou elasticitu, jinak by docházelo k praskání spojů během prohýbání substrátu. Další možností je nanášení mědi pomocí laminace (viz. Obr. 2-1). [2]



Obr. 2-1 Schématická výroba základních materiálů[3]

Výroba tenkých substrátů používaných ve vícevrstvých deskách se zaměřuje na dosáhnutí nejvyšší stability za dostupnou cenu. Vlastnosti materiálu jsou ovlivněny poměrem skelné tkaniny a epoxidu. Tenká skelná tkanina se naimpregnuje epoxidem do formy tenkého laminátu. Epoxid v jádru určuje chemické vlastnosti a elasticitu výsledné DPS. Vyšší obsah skelné tkaniny zajišťuje lepší mechanickou pevnost a odolnost materiálu. S větší tloušťkou skelné tkaniny dochází při zpracování k menším změnám v rozměru laminátu. Pokud například použijeme jednu vrstvu laminátu s nižším obsahem epoxidu, dosáhneme větší stability rozměrů při zpracování, oproti dvou vrstvám laminátu s vyšším obsahem epoxidu. Současně větší obsah epoxidu zaručuje chemicky odolnější materiál. Z ekonomického hlediska je však doporučeno používat jednu vrstvu laminátu. [4]

2.1.2 Prepreg

Prepreg (často známý jako resin B) je ve své podstatě nevytvrzený základní materiál bez plátované mědi, podobný typu FR4, tedy kombinace skelné tkaniny a epoxidu. Hlavní rozdíl mezi resin B a základním materiálem je rozdíl ve stupni vytvrzení a v procentuálním složení epoxidu a skelné tkaniny. Kde u základního materiálu dosahuje

obsah epoxidu 40 % až 75 %, tak prepreg může mít až přes 90 %. Důvod podílového rozdílu epoxidu a skelné tkaniny u prepregů je kvůli jejich použití jako pojidla mezi jednotlivými vrstvami DPS, na rozdíl od základního materiálu, kde slouží epoxid převážně pro zlepšení chemické odolnosti a zvýšení pružnosti materiálu. Prepreg po vytvrzení přechází ze stavu resin B do stavu resin C. [1][4]

Skladování by mělo probíhat v uzavřených prostorách, nejlépe v zařízeních na to vybavené. Při teplotě <5 ℃ lze skladovat prepreg po dobu až 6 měsíců, s teplotou do 20 ℃ pouze 3 měsíce. Pokud dojde k vybalení prepregu z vakuové fólie, ve které se klasicky dodává, je třeba ho spotřebovat co nejdříve. Po vytažení z prostor se sníženou teplotou je třeba zabránit kondenzaci na povrchu. [4]

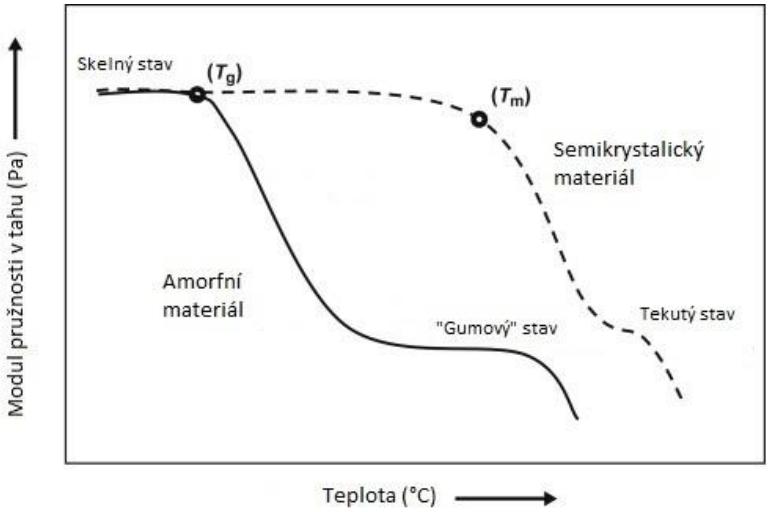
2.1.3 Vlastnosti základních materiálů

Hodnota skelného přechodu (glass transition temperature) také označována jako Tg, je hodnota teploty u termosetické pryskyřice k zesítění polymerů pomocí chemických vazeb. Odborněji to je teplota, při které se začíná pohybovat 30 až 50 uhlíkových řetězců. Když je okolní teplota pod hodnotou skelného přechodu jsou amorfní materiály tuhé. Plastické materiály s ohebným jádrem mají nižší hodnotu Tg, kdežto materiály s pevnější, tužší a neohebnější molekulární strukturou mají vyšší hodnotu skelného přechodu. Hodnota skelného přechodu pomáhá při volbě materiálu pro aplikace s nižší nebo vyšší pružností. [1][5]

Při překročení hodnoty Tg dojde ke změně v amorfních oblastech, k přechodu z tuhého stavu do pružnějšího, ohebnějšího stavu. Při této teplotě také dojde ke zvětšení mezery mezi molekulárními řetězci. Při překročení hodnoty Tg se změní u materiálu více parametrů jako TCE (koeficient teplotní roztažnosti), Youngův modul, tepelná kapacita nebo relativní permitivita. Na hodnotu Tg má vliv například vlhkost a u laminátu jako například FR4, pak záleží na použité epoxidové pryskyřici a na jejím procentuálním složení. [5]

Hodnotu Tg dokážeme určit pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) nebo pomocí termomechanické analýzy (TMA). Při diferenční skenovací kalorimetrii dochází ke sledování zahřívání dvou předmětů, kdy jeden předmět je testovaný vzorek a druhý je předmět se známými tepelnými vlastnostmi. Podle rozdílu v tepelném toku obou předmětů lze určit hodnotu Tg. Termomechanická analýza používá sondu na měření roztažnosti vzorku a podle změny strmosti křivky roztažnosti se určí přechod mezi stavy materiálu, tedy hodnota Tg.[5]

Další důležitý parametr u některých typů pojiv nebo základních materiálů bez výztuže je i teplota tavení (Tm), při jejímž překročení jsou krystalické oblasti v semikrystalickém materiálu tekuté. Při zahřátí nad teplotu Tg začínají semikrystalické polymery měknout, ale nejsou tekuté, dokud nedosáhnou teploty Tm. Obecně je teplota tavení pro semikrystalický polymer vyšší než hodnota Tg. V oblasti nad hodnotou Tg, ale pod Tm existuje „gumová oblast“, kdy může dojít k velkému roztáhnutí materiálu i při nízkém zatížení (viz Obr. 2-2). [5]



Obr. 2-2 Chování amorfních a semikrystalických látek při měknutí a tavení [5]

Polymery obsahují nerovnoměrně dlouhé délky řetězců, proto vyžadují rozdílné množství energie pro pohyb. Kvůli tomu není hodnota Tg nebo Tm pro amorfní a semikrystalické polymery jedna přesně určená hodnota, ale rozsah teplot, při kterých se všechny řetězce polymeru začnou pohybovat. [5]

K dalším důležitým parametrům, které se sledují při zkoumání a výběru materiálů jsou čas delaminace (td), teplota rozkladu (Td) a koeficient tepelné roztažnosti (TCE). Teplota rozkladu označuje hodnotu, při které začíná docházet k rozkladu makromolekulární struktury. Čas delaminace určuje dobu, za kterou při dané teplotě dojde k oddělení vrstev laminátu kvůli rozdělení pryskyřice, skleněných vláken nebo měděné fólie. Čas delaminace se určuje na základním materiálu bez Cu, při teplotách 260 °C nebo 288 °C. Tepelná roztažnost popisuje změnu rozměrů daného materiálu v lineární části teplotní závislosti. U anizotropních materiálů může docházet k rozdílné změně rozměrů při změně teploty v ose X, Y a Z. Hodnota TCE se udává v jednotkách ppm· °C. [1]

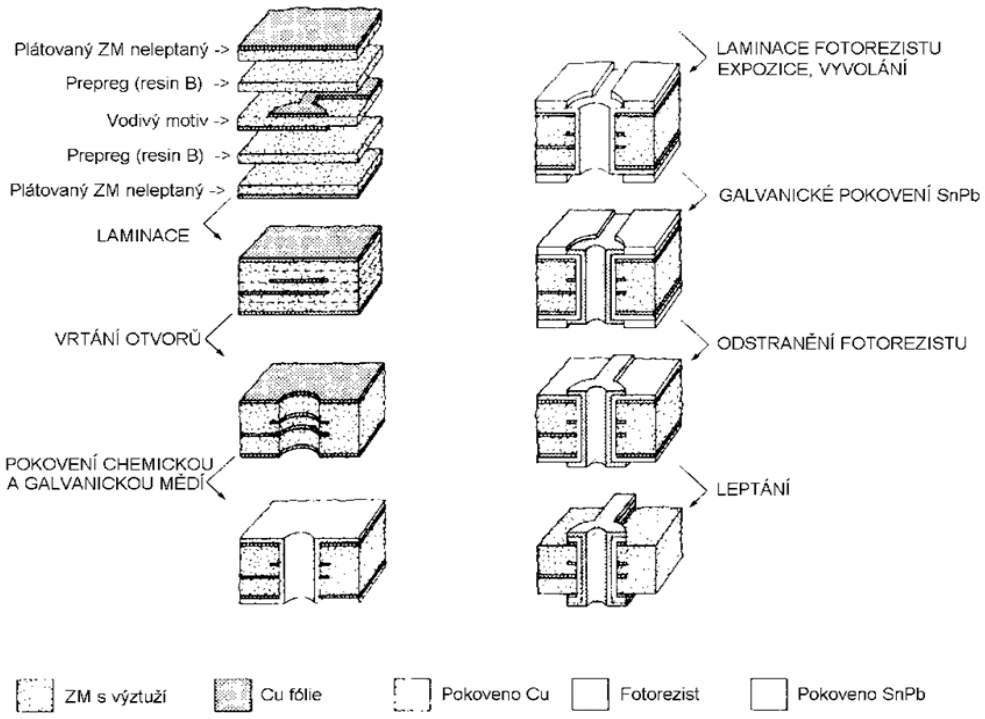
Materiál FR4, který je často používaný ve výrobě DPS se dělí na více druhů. Základní rozdíl je v použití různého druhu epoxidu a jeho množství. Epoxid má vliv na velké množství parametrů jako teplota skelného přechodu, čas do delaminace, hodnota TCE, atd. Na tabulce Tab. 2-1 lze vidět hodnoty těchto parametrů pro čtyři druhy materiálu FR4 od výrobce ISOLA. Pro srovnání se vybraly materiály DE 104, IS 400, IS 408 a IS 415, které jsou seřazeny od nejlevnějšího po nejdražší. S narůstající cenou dochází ke zlepšení tepelných vlastností. Pro schopnost materiálů zvládat bezolovnaté pájení se lze řídit podle normy ČSN EN 61249-2-40. Požadavkem pro bezolovnaté pájení je například, že CTE v ose Z (od 50 do 250 °C) musí být maximálně 3 %.

Tab. 2-1 Vybrané vlastnosti 4 používaných typů materiálu FR4 [6][7][8][9]

	DE 104	IS 400	IS 408	IS 415
Teplota skelného přechodu -Tg [°C]	135	150	180	200
Čas do odlaminace při 260 °C [min]	12	60	60	60
TCE v ose X, Y před Tg [ppm.°C^{-1}]	16/13	13	13	13
TCE v ose Z před Tg [ppm.°C^{-1}]	70	50	60	45
TCE v ose Z po Tg [ppm.°C^{-1}]	250	250	228	240
TCE v ose Z v % (50-250 °C)	4,2	3,3	3,5	2,8
Teplota rozkladu - Td [°C]	315	330	360	370
Hodnota permitivity [při 100 MHz]	4,46	4	4	3,69
Vhodnost pro bezolovnaté pájení podle normy ČSN EN 61249-2-40	NE	ANO	ANO	ANO

2.2 Výroba vícevrstvých DPS

Z důvodu zaměření diplomové práce především na vliv laminace na spolehlivost vybraných elektrických parametrů DPS dojde k přeskočení některých kroků ve výrobě jádra vícevrstvých DPS. Na Obr. 2-3 je vidět zjednodušená výroba vícevrstvých DPS. Vodivý motiv vytvořený před laminací se vytváří stejným způsobem jako je zobrazeno na obrázku.



Obr. 2-3 Postup výroby vícevrstvých DPS [1]

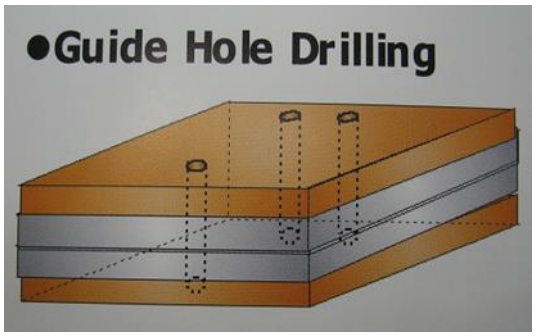
2.3 Laminace vícevrstvých DPS

Když dojde k vytvoření motivu na základním materiálu je dalším krokem laminace jednotlivých vrstev pro vytvoření vícevrstvé DPS. Před samotnou laminací je třeba celý přířez a další vrstvy, které budou součástí výsledné DPS, poskládat na sebe do jednoho paketu, tomuto procesu se říká lay-up. Pro vytvoření další vodivé vrstvy přířezu se používá měděná fólie podle požadované tloušťky měděné vrstvy. Mezi vrstvu základního materiálu s vodivým motivem a měděnou fólii se ještě vloží jedna nebo více vrstev prepregu. Počet vložených vrstev prepregu závisí na požadovaných parametrech, převážně na výsledné tloušťce vícevrstvé DPS. Jednotlivé vrstvy jsou podle potřeby naskládány ze spodní a vrchní části. [1]

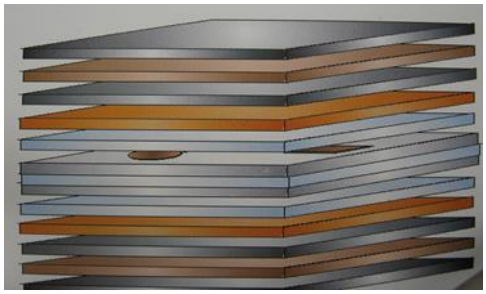
Po naskládání všech vrstev výsledné DPS dojde k oddělení od další DPS pomocí separátorů. Při nestejnoměrném rozložení mědi na jednotlivých vrstvách dochází k nerovnoměrnému rozložení tepla uvnitř DPS. Při vyšších počtech DPS ve výsledném balíku dojde ke špatnému prohřátí vrstev uprostřed balíku, pokud se nepoužijí

separátorové pláty. Výsledkem by bylo roztečení epoxidu v některých oblastech dříve než v jiných, což vede ke špatnému rozložení tloušťky, vzniku voidů, pórům, křivení a špatnému propojení vrstev uvnitř DPS. Současně může dojit k nerovnoměrnému rozložení tlaku, způsobené množstvím nerovnoměrně rozložených vrstev mědi v jednotlivých částech vícevrstvé DPS. V oblastech s menším množstvím měděné vrstvy dochází k horšímu nebo žádnému spojení prepregu a mědi z důvodu nižšího tlaku. Oddělení jednotlivých DPS pomocí separátorů současně zabraňuje k přenosu povrchových defektů z jedné sekce do druhé. Separátory se vyřezávají z nerezové oceli, která je zpracována a vytvrzena. Parametrově má pak separátor odolnost v tahové síle 1500 – 1700 N/mm^2 a tepelnou vodivost 30 W/m. V šířce nesmí být rozdíl větší než 0,03 mm, což znamená, že je třeba dbát o povrch separátorů. Aby se zabránilo znečištění separátoru epoxidem, odděluje separátor vrstva měděné fólie s větší velkostí než používané lamináty a prepregy. Pokud by došlo k vytečení epoxidu z paketu a jeho usazení na separátoru musí dojít k jeho odstranění pomocí mosazné stěrky a kapalného leštidla. Další možností je používání separátorů vytvořených z tvrdé hliníkové slitiny, litinových nebo hliníkových separátorů pokrytých mědí. Z ekonomického hlediska jsou nerezové separátory dražší na pořízení a vyžadují častou kontrolu povrchu, ale díky jejich velké odolnosti mohou být v provozu několik let. [4][10][11]

Další důležitou částí je přesné sesouhlasení vrstev. Pro zarovnání vrstev se v dnešní době často využívá kovových kolíků neboli pinů, které se vkládají do vyvrtaných otvorů. Při tvorbě přířezu dojde současně k vyvrtání minimálně dvou děr ve vnější části přířezu, aby nedošlo k provrtání výsledné DPS. Operátor poté při skládání usazuje jednotlivé vrstvy na piny. Vrtání a lay-up na Obr. 2-5 a Obr. 2-6.[4]



Obr. 2-4 Vrtání otvorů pro sesouhlasení desek při laminaci [1]



Obr. 2-5 Lay-up – sesouhlasení desek s proloženým prepregem a měděnou fólií [1]

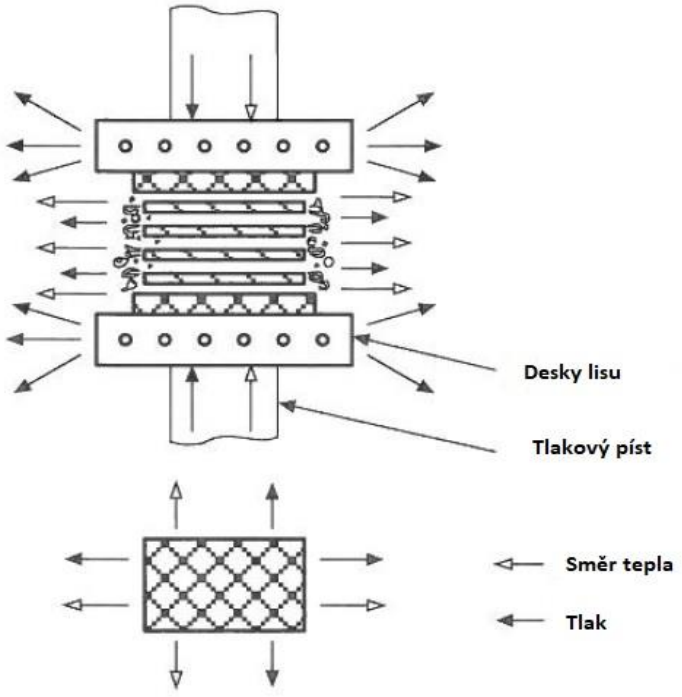
Samotný proces by měl probíhat v místnosti vyhrazené na lay-up. Prach, částice kovu nebo dalších materiálů, které se případně usadí mezi prepregem a měděnou fólií při procesu lay-up, mohou mít nepříznivý vliv na kvalitu. Jelikož prepreg vytváří statický

náboj a přitahuje prach, měl by operátor provádějící lay-up nosit bavlněné netřepící rukavice. Místnost by měla obsahovat klimatizaci, náhradní možností je využít kabinet pro lay-up s laminárním prouděním, který je z hlediska financí ekonomičtější. [4]

U vícevrstvých DPS, kde se využívá vyšší hustoty vodivých cest (HDI) a via pokovených otvorů obzvláště slepých, je nutnost využít pro zarovnání rentgenový přístroj. Klasické mechanické sesouhlasení nestačí, jelikož by docházelo k nepřesnosti a odchylkám vzniklým při lay-up procesu a následné laminaci vícevrstvé DPS v lisu.

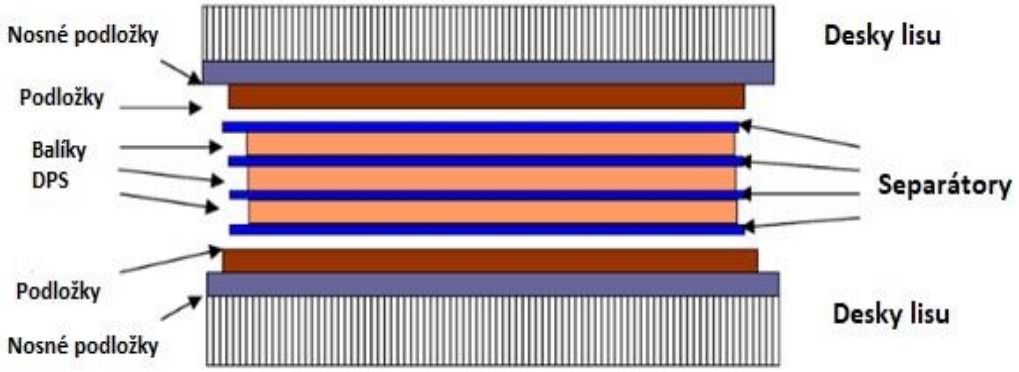
2.3.1 Lis vícevrstvých DPS

Po sesouhlasení více DPS do paketu dochází k vložení do lisu. Lis pro laminaci využívá teplo a tlak pro spojení všech vrstev uvnitř DPS. Existují tři základní typy lisů. Nejjednodušší lis používá hydraulický válec (píst), který vytváří tlak na tlakové podložky (viz Obr. 2-6). Podložky jsou současně zahřívány pomocí páry, oleje nebo elektricky. Součástí lisu může být i vakuová komora, která zabraňuje kyslíku a dalším reaktivním látkám v ovlivnění laminace. Rozdíl mezi jednotlivými způsoby ohřevu spočívá v distribuci tepla a rychlosti ohřevu média. Elektricky ohřívané lisy mají menší požadavky na prostor oproti lisům používajícím páru či olej. Tyto lisy zaberou značně více prostoru díky potřebě pro úložiště ohřívacího media, výměníku tepla, pump a potrubí na vedení plynu či oleje. Při dobrém nastavení a izolaci mohou elektrické lisy dosahovat přesnosti teploty ±3 °C uvnitř celého ohřívaného prostoru. Další výhoda elektrických lisů spočívá v jejich možnosti nastavení a kontrole teploty pro vrchní i spodní část lisu samostatně. Celková údržba elektrických lisů vyjde výsledně levněji než olejových. V dnešní době dochází k využívání páry jako media velmi málo. Oproti tomu olejové lisy jsou používány častěji. Obecně mají olejové lisy lepší tepelnou distribuci a při správné kontrole procesu a kvalitě řídícího systému můžou dosahovat teplot s přesností až na ±1,5 °C. [4][10][11]



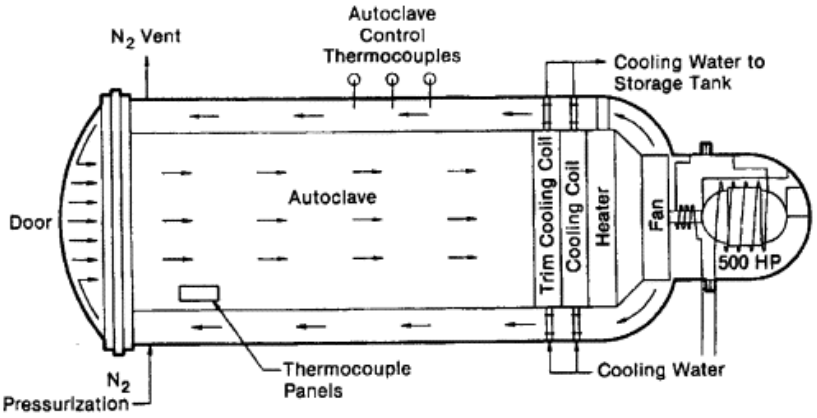
Obr. 2-6 Schéma tlakového lisu[4]

Mezi paketem a lisem se ještě nachází tlakové podložky (Obr. 2-7). Tyto podložky slouží k optimálnímu rozvodu tepla mezi deskami lisu a pakety DPS, aby teplotní gradient nepřesáhl povolenou hodnotu při zahřívání a chlazení. Další využití podložek spočívá v jejich schopnosti rozložit tlak na pakety, tak aby nedošlo k jejich poškození nebo ohybu separátorů. Nejlevnější materiál používaný na tlakové podložky je kraftový papír, lepenka vyrobená z buničiny pomocí procesu nazývaný Kraft. Buničina je vyrobena pomocí sulfátového procesu, čímž získává větší elasticitu a odolnost vůči roztrhnutí oproti klasickému papíru. Potřebná tloušťka papíru závisí na počtu paketů a vrstev DPS. Podle typu použitého lepidla při výrobě kraftového papíru může být nutné použít oddělovací film mezi krajními separátory a kraftovým papírem jinak může dojít k přilepení papíru k separátorům. Další možností je využití umělých podložek, například ze směsi PTFE a tkaniny nebo syntetické gumy a tkaniny. Výhody těchto směsí spočívají ve vyšším počtu cyklů, lepším rozvodu tepla pro laminaci a lepším rozložením tlaků. Jediná výhoda kraftového papíru spočívá v ceně, proto se dnes používá již jen zřídka.[10][12][13]



Obr. 2-7 Schéma průřezu balíku DPS před laminací[12]

Třetím typem lisu je autokláv (Obr. 2-8). Autokláv je izostatický vakuový lis, který využívá inertní plyn jako dusík nebo oxid uhličitý pro přenos tepla a tlaku. Vakuový autokláv sestává z tlakové komory s vakuem a vybavením na ohřívání a chlazení, řídícího systému, vozíku s přenosnou platformou pro pakety a tepelně izolovanou nádrží pro ukládání plynu. Jelikož autokláv nevyužívá klasické písty pro přenos tlakové síly, je třeba paket s jednotlivými vrstvami a separátory, vážící i okolo 35 kg, umístit dovnitř na platformě.[4][14][15]



Obr. 2-8 Schéma autoklávu [14]

Autokláv potřebuje dostatečnou tepelnou izolaci vnitřních stěn pro zabránění úniku tepla pomocí radiace. Ventilátor poskytuje potřebnou cirkulaci plynu ve vnitřní komoře. Největší výhoda autoklávu spočívá ve využití plynu pro přenos tlaku. To znamená, že tlak je přenášen izostaticky v celém autoklávu, takže je tlak ve všech místech paketu stejný. Kvůli tlaku, který působí i z boku, dochází ke snížení tekutosti epoxidu, jelikož tlak slouží jako bariéra. Díky kapilárnímu působení může nějaký epoxid ve stavu nízké viskozity začít proudit zpět přes měděný povrch skrz díry vyvrtané pro zacházení s přířezem. Tomuto jevu je nutno předcházet, proto je třeba správně nastavit hodnotu tlaku a zvolit dobrý typ prepregu. U standartního prepregu, by při správně zvoleném tlaku lisování nemělo docházet ke vzniku bublin nebo prázdných míst uvnitř laminátu (void). Teplota uvnitř autoklávu je také rozváděna jinak než v klasickém hydraulickém lisu. Jelikož se paket vkládá na pomocné platformě, dochází ke kontaktu ze spodu, což může limitovat výslednou výšku paketu.[4][14]

2.3.2 Používané typy lisů

Tato kapitola slouží pro lepší přehled typů zařízení, které se v dnešní době používají pro lisování laminátů výrobci DPS v České republice. Firma ČeMeBo s.r.o. se sídlem v Blansku, se kterou dochází ke spolupráci, používá k lisování lis MLP25-M od výrobce Cedatec (Obr. 2-9). Zařízení obsahuje vakuovou komoru. Teplota a tlak je možné kontrolovat pomocí dotykového panelu. Růst teploty je možný až do hodnoty 11 °C/min. [16]

Obr. 2-9 Lisovací zařízení MLP25-M [16]

Firma Gatema Holding s.r.o. se sídlem v Boskovicích, používá dva typy lisů. Prvním lisem je HML LP-2000-V (Obr. 2-10), dvouetážový list s vakuovou komorou. Druhý lis je HML LP-3000-V, třietážový lis s vakuovou komorou. Oba lisy jsou řízeny počítačem s kontrolou průběhu teplot a tlaků. [17]

Obr. 2-10 HML LP-2000-V [17]

Firma Pragoboard se sídlem v Praze používá lis HML LP100-2 V (Obr. 2-11), který dokáže zajistit kvalitní laminaci pro různé teplotní a tlakové křivky. Je to vysokotlaký, dvouetážový lis s vakuovou komorou a možností elektrického nahřátí ploten až do teploty 400 °C. Je vybaven nezávislou vysokoteplotní a chladící částí. Součástí zařízení je i vlastní skládací stanice. [18]

Obr. 2-11 Dvouetážový vysokoteplotní lis LP 100-2-VK s vakuovou komorou[18]

2.3.3 Laminační cyklus

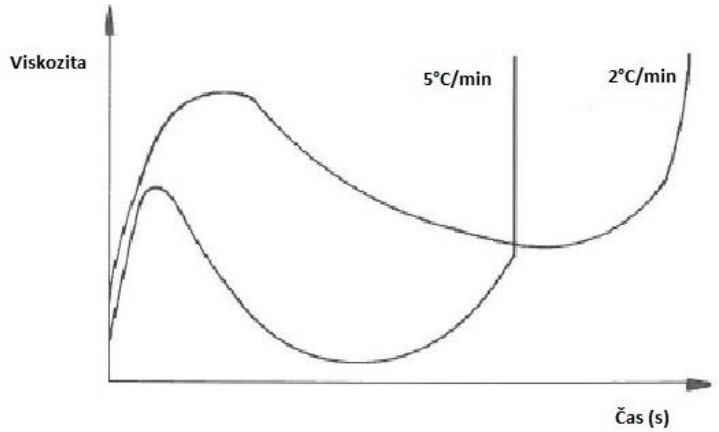
Každý výrobce vícevrstvých DPS se snaží vytvořit nejoptimálnější výrobní cyklus. Proto je třeba znát detailní informace o teplotních charakteristikách a rozložení teplot uvnitř všech vrstev DPS, tlakovými podložkami a separátory. Mezi další důležité parametry pro kvalitní laminační cyklus patří tekutost epoxidu a jeho obsah v prepregu, počet vrstev prepregů, rozložení vnitřních vrstev, tloušťka a rozložení vnitřních měděných vrstev. [4][12]

Například laminace uvnitř autoklávu se liší od ostatních lisů, převážně kvůli přenosu tepla pomocí inertního plynu. Cyklus může začínat pouze při pokojové teplotě, jelikož do komory autoklávu nelze vpustit žádný plyn, dokud není uzavřená. Současně je třeba hlídat zvyšující se tlak, který je způsobený množstvím plynu vpuštěným do komory, ale také teplotní expanzí plynu při zvyšující se teplotě. [4]

Při laminaci s využitím elektrických lisů, lze proces rozdělit na 5 základních kroků:

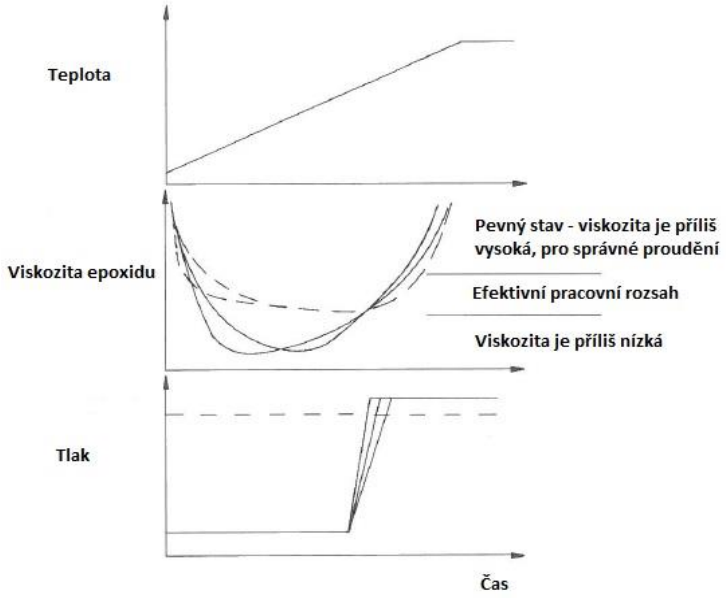
1. Umístění balíku DPS symetricky na desky lisu
2. Uzavření lisu a aplikování potřebného tlaku, který se udržuje po celý proces
3. Nárůst teploty uvnitř balíku s rychlostí 4-12 °C/min až do maximální potřebné teploty (±175 °C)
4. Chlazení, stále pod tlakem, minimálně po dobu 45 minut
5. Uvolnění tlaku a otevření lisu až teplota balíku klesne pod 40 °C

Celý proces se může lišit, záleží na typu použitých materiálů. V první fázi během aplikace nižšího tlaku dochází ke stlačení balíku DPS a uvolnění uzavřeného vzduchu mezi jednotlivými vrstvami prepregu, laminátů a mědí. Tento uvězněný vzduch je jeden z důvodů proč se v lisu používá nižší tlak, aby mohlo dojít k jeho vytažení ven. Poté dojde k absorbci vzduchu roztaveným epoxidem. Přibližně nad teplotou 55 °C se začne částečně zpolymerizovaný epoxid tavit. Se zvyšující se teplotou uvnitř lisu dojde ke snížení viskozity epoxidu. Během této fáze dochází k natlačení epoxidu do měděné vrstvy, která by měla být předem upravena pro lepší propojení vrstev. Nejčastější úprava mědi spočívá v použití mikroleptání, kdy dojde ke zvýšení nerovností a množství plochy v mědi pro lepší účinek epoxidu, při co nejnižším snížení samotné tloušťky měděné vrstvy. Následně dochází tedy k mechanickému propojení vytvrzeného epoxidu a kovu po zchlazení. Během procesu je třeba udržovat viskozitu epoxidu v efektivním pracovním rozsahu, aby se předešlo defektům ve výsledných DPS. Na tekutost epoxidu mají vliv 2 hlavní faktory. Teplotní závislost na tekutosti je exponenciální, což znamená, že malá odchylka od nastaveného teplotního cyklu může způsobit velké změny. Zvýšení teplotního gradientu při laminaci zkrátí okno, kdy je epoxid tekutý, ale také sníží minimální viskozitu epoxidu (Obr. 2-12). Ve výsledku to znamená lepší vyplnění všech oblastí okolo vodivých cest, ale také to může vést k problémům s tloušťkou vrstvy.[4][10]



Obr. 2-12 Vliv teplotního gradientu na viskozitu epoxidu[4]

Pro velkoplošné vícevrstvé desky je možné použít dvoustupňový laminační cyklus. Na začátku se aplikuje velmi malý tlak, přibližně 2-3 bary, aby došlo ke změknutí epoxidu. Poté dojde k nastavení plného tlaku, potřebného pro laminační proces. Díky nastavení malého tlaku na začátku procesu, dojde k působení menšího tlaku ve střihu na desky, během kritického zvýšení tepla. Porovnání teplot, viskozity a tlaku během stejné doby lze vidět na Obr. 2-13. [4]



Obr. 2-13 Srovnání teploty, viskozity a tlaku při laminaci (přerušovaná čára popisuje dvoustupňový laminační cyklus)[4]

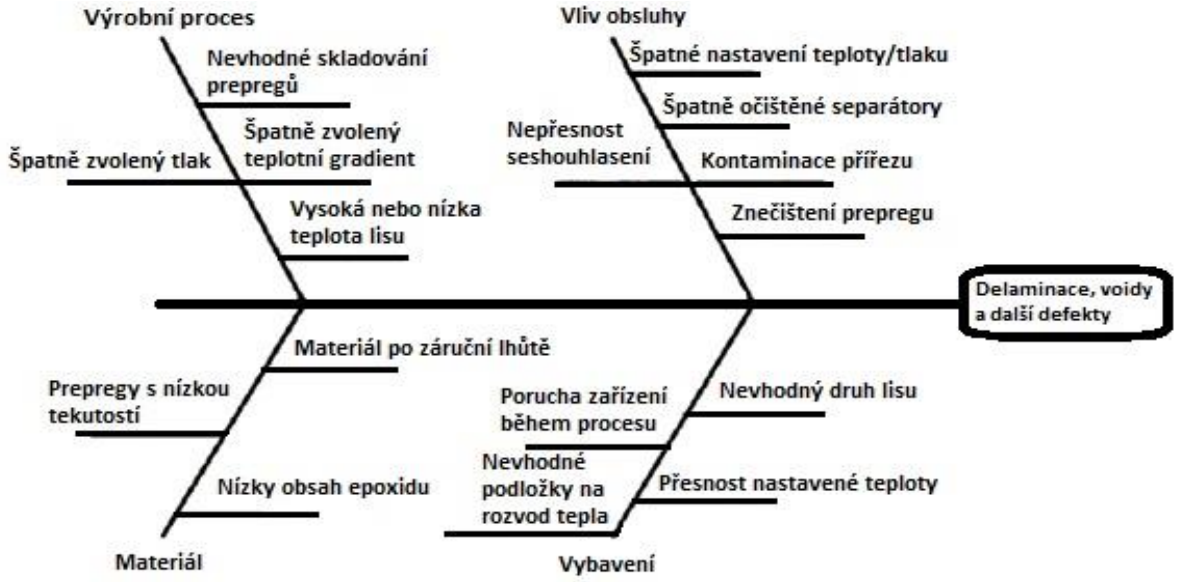
2.4 Ishikawa diagram

Jedna z možností, jak nalézt řešení a nejpravděpodobnější příčiny problému je pomocí Ishikawa diagramu. Diagram pochází od Kaora Ishikawy, který ho popsal. Někdy se dá také nazývat jako diagram rybí kosti, kvůli jeho vzhledu. Pro hledání kvality se v oboru často využívá právě tento diagram. Princip diagramu spočívá v kombinaci příčin a jejich přímých následků.[19]

Tvorba diagramu spočívá v rozvržení jednotlivých oblastí, kde se mohou nacházet vlivy působící na vznikly výrobek. Oblastí může být velké množství, ale základní dělení používá 6 hlavních zdrojů příčiny:

- Materiál
- Procesy
- Technologie
- Stroje
- Lidé
- Prostředí

V případě nevhodných vstupních materiálů, procesů i dalších vlivů ovlivňující vlastnosti výsledné DPS, může docházet u produktu k defektům jako delaminace nebo tvorba voidů (Obr. 2-14). [20]



Obr. 2-14 Ishikawa diagram pro zobrazení vlivů na vznik defektu při výrobě DPS[20]

Na výrobu vícevrstvých DPS se používá převážně jádro z materiálu FR4 IS400 od výrobce ISOLA. Výhoda IS400 spočívá ve zvýšené hodnotě skelného přechodu Tg 150 °C, která vede k větší odolnosti výsledné DPS proti zahřívání a celkové odolnosti vůči teplotním šokům. Materiál vydrží i při teplotě 260 °C po dobu 60 minut. Roztažnost v ose Z se pohybuje od 40 do 45 ppm/°C. Nejčastěji používaný typ je 7628 s obsahem epoxidu 46 % ± 3 % a viskozitou 38 ± 10 Pa.s. Tloušťka laminátu se volí podle rozměrů udávaných výrobcem a požadavky na výslednou DPS.[7][21]

Na propojení jednotlivých vrstev DPS lze použít prepreg 7628 s obsahem epoxidu 98 % ± 2 %. Prepreg 7628 obsahuje skelnou tkaninu s počtem vláken 44 na 32 na palec a tloušťkou vlákna 0,173 mm. Další používaný materiál je 1080 s obsahem epoxidu 99 %, počtem vláken 60 na 47 s tloušťkou vláken 0,064 mm. [7][21]

Pro kvalitní DPS je třeba zvolit vhodnou kombinaci materiálu. Rozhoduje se podle požadavků na výslednou DPS, například tloušťka a počet vrstev. Dalším důležitým faktorem je kompatibilita materiálů. V případě odběru materiálu od jednoho výrobce je třeba konzultovat tuto kompatibilitu přímo s výrobcem. Většinou platí pravidlo, že základní substrát lze kombinovat s prepregem od stejného výrobce.

Z pohledu procesů a strojů může vlastnosti DPS ovlivnit spoustu faktorů. Špatné sesouhlasení vrstev při lay-up procesu, nevhodně zvolený teplotní průběh při laminaci, nevhodný tlak, atd.

Každý zaměstnanec obsluhující zařízení by měl být řádně proškolen, aby nedocházelo ke zbytečným chybám při výrobě. Nedostatek znalostí může vést ke znečistění DPS, špatnému nastavení procesu, atd.

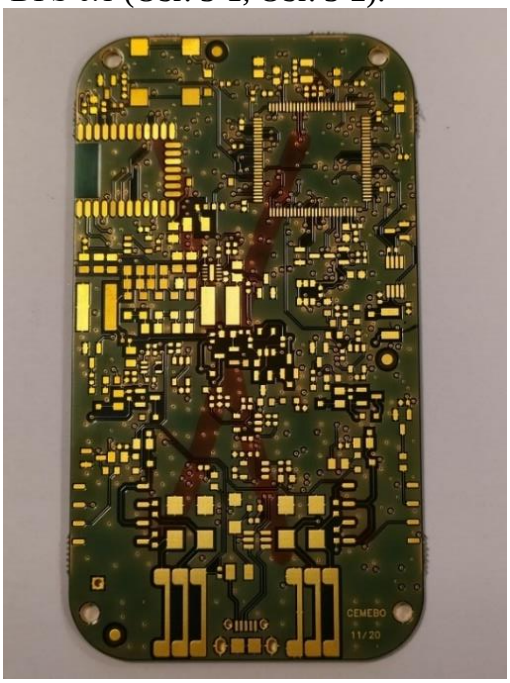
Prostředí má na výslednou kvalitu malý nebo žádný vliv. Většina fází procesu probíhá v oblastech s kontrolovaným prostředím. V případě lisování dochází k procesu ve vakuové atmosféře.

3. METODIKA TESTOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ DPS A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

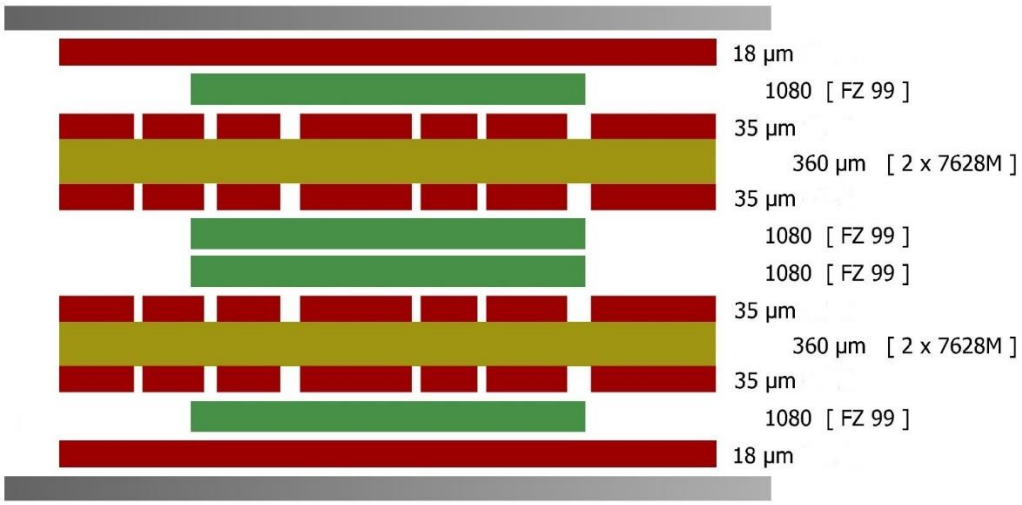
Principem testování je zjištění spolehlivosti vybraných elektrických parametrů u vícevrstvých DPS vyráběných firmou ČeMeBo. Testování se zaměřuje na spolehlivost propojení vícevrstvých DPS vyrobených s odlišnými počty vrstev a odlišným způsobem laminace. První krok bude změřit odpor vybraných částí vodivého motivu a pokovených otvorů. Z důvodu velmi nízkého odporu měděné vodivé vrstvy je třeba použít metodu čtyřbodového měření. Následně se využije tepelného cyklování, kdy dojde k opakovanému zahřátí a podchlazení DPS. Po několika cyklech se opět změří odpory pokovených otvorů a motivu. Tento postup se zvolil, aby se určila odolnost desky zvládat změnu tepelného zatížení. Dále se bude simulovat strojní pájení vlnou a přetavením. Na závěr se vybere vhodné místo na DPS pro vytvoření mikrovýbrusu a zhodnocení výsledků zátěžových testů.

Firma Čemebo poskytla pro testování větší počet přířezů se 3 různými typy DPS. DPS splňují normu IPC A 600-G, která popisuje podmínky pro přijatelnost desek plošných spojů.

První přířez obsahuje šestivrstvou DPS tvořenou dvěma jádry. Obě jádra obsahují materiál FR4 IS400 s tloušťkou mědi 35 µm ve vrstvě 2,3,4 a 5. Vrstva mědi 1 a 6 mají šířku 18 µm. Jádra jsou spojena pomocí dvou listů prepregu. Jako povrchová úprava byla použita metoda ENIG, tedy bezproudé pokrytí niklu na měděný povrch a poté nanesení zlata chemickou cestou. Celkem bylo obdrženo 10 kusů této DPS. Pro další použití bude tato DPS označována jako DPS č.1 (Obr. 3-1, Obr. 3-2).

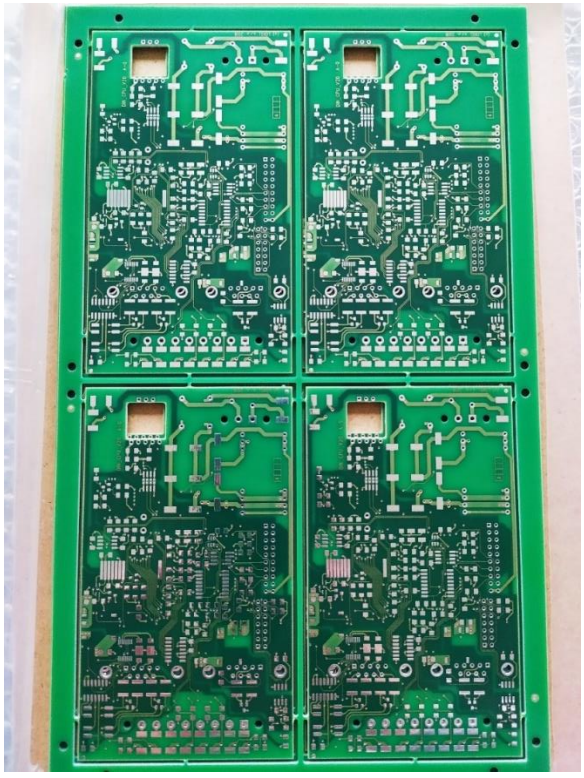


Obr. 3-1 Testovaná DPS č.1

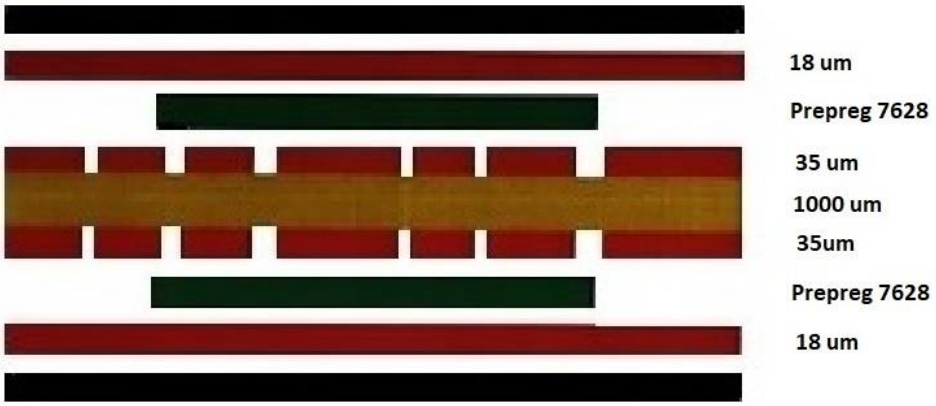


Obr. 3-2 Průřez testovanou DPS č.1

Ve druhém přířezu se nachází čtyřvrstvá DPS. Jádro přířezu č.2 je složeno z materiálu FR4 IS400, přesněji 6 vrstev materiálu 7628, s tloušťkou 1000 µm a obsahem epoxidu 50,6 %. Měď na povrchu jádra má tloušťku 35 µm, na vnějších vrstvách je měď silná 18 µm. Na propojení vnitřní a vnější vrstvy se použil jeden list prepregu 7628 s obsahem epoxidu 97 %. Celková tloušťka přířezu je 1,55 mm. Pro povrchovou úpravu byla na tento přířez použita bezolovnatá metoda HAL. Těchto DPS bylo poskytnuto celkem 8 kusů. Pro další práci si tento typ desky označíme jak DPS č.2 (Obr. 3-3, Obr. 3-4).



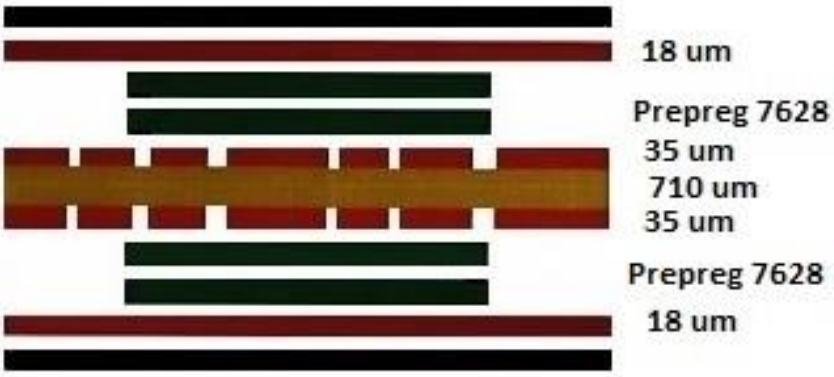
Obr. 3-3 Přířez s testovanou DPS č.2



Obr. 3-4 Průřez testovanou DPS č.2

Třetí přířez také obsahuje čtyřvrstvé DPS s jádrem z materiálu FR4 IS400, ale tvořené ze 4 vrstev s celkovou tloušťkou 710 µm, s tloušťkou nalaminované mědi 35 µm. Vnější vrstvy mědi mají tloušťku 18 µm. Pro spojení jádra a vnější mědi se použily 2 listy prepregu 7628 s obsahem epoxidu 98 %. Výsledná tloušťka přířezu je 1,63 mm. Tento přířez má povrchovou úpravu HAL. Na přířezu se nachází 2 druhy DPS, celkem bylo poskytnuto 8 kusů DPS od obou typů. Dále budou tyto DPS označovány jako DPS č.3A a č.3B (Obr. 3-5, Obr. 3-6).

Obr. 3-5 Přířez s testovanými DPS č.3A(levá) a DPS č.3B(pravá)



Obr. 3-6 Průřez testovanou DPS č.3

3.1 Použité přístroje a zařízení

V této kapitole jsou popsány všechny přístroje a vybavení použité při zpracování praktické části diplomové práce.

Sterilizátor Chirana

Pro zahřátí vícevrstvých DPS se použil horkovzdušný sterilizátor Chirana HS 62A (Obr. 3-7). Přístroj je určen ke sterilizaci materiálu pomocí horkého vzduchu s nucenou cirkulací. Kromě použití na zdravotnických pracovištích, může být přístroj použit i pro laboratorní účely, například jako sušárna nebo pec. Nastavitelný tepelný rozsah sterilizátoru je od 50 °C do 200 °C. V přístroji nesmí být sterilizovány nebo sušeny látky výbušné, hořlavé a agresivní.

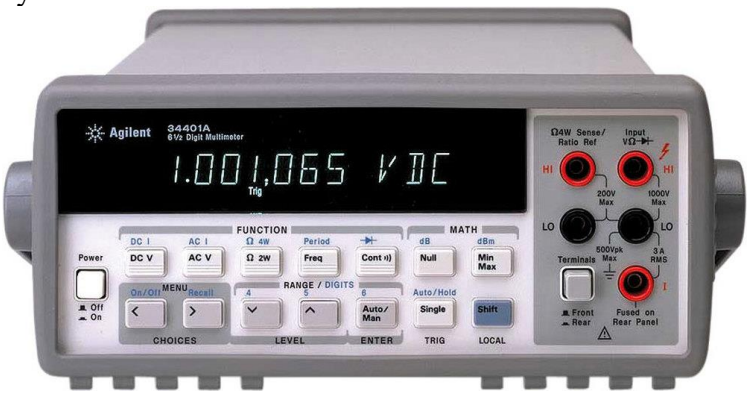
Obr. 3-7 Sterilizátor Chirana

Chladící box ELCOLD

Podchlazení DPS probíhalo v chladícím boxu ELCOLD DK-9500 HOBRO. Nejnižší nastavitelná teplota přístroje je -60 °C. Box je možné využít pro dlouhodobé uskladnění materiálu.

Multimetr Agilent 34401A

Pro měření odporu se použilo univerzálního multimetru Agilent 34401A (Obr. 3-8). Přístroj je vybaven displejem s rozlišením 6 ½ digitů s automaticky nastavovaným rozsahem. Multimetr má přímo zabudovanou funkci na měření nízkých odporu pomocí čtyřbodové metody.



Obr. 3-8 Multimetr Agilent 34401A

Termokamera FLIR I7

Rozložení teplotního pole na DPS se vyfotilo pomocí termokamery FLIR I7 (Obr. 3-10). Rozlišení detektoru je 140x140 a kamera má měřitelný rozsah teplot od - 40 °C až po +250 °C s citlivostí detektoru 0,10°C.[22]

Obr. 3-9 Termokamera FLIR

Cyklovací komora CTS T-40/25

Cyklovací komora CTS T-40/25 (Obr. 3-10) je klimatická komora řízená integrovaným mikroprocesorem. Teplotní rozsah komory je -40 °C až 180 °C, vnitřní objem je 25 litrů. Komoru lze ovládat pomocí panelu na komoře nebo přes připojený počítač pomocí rozhraní RS 232. Využívá teplotní senzor PT100. [23]

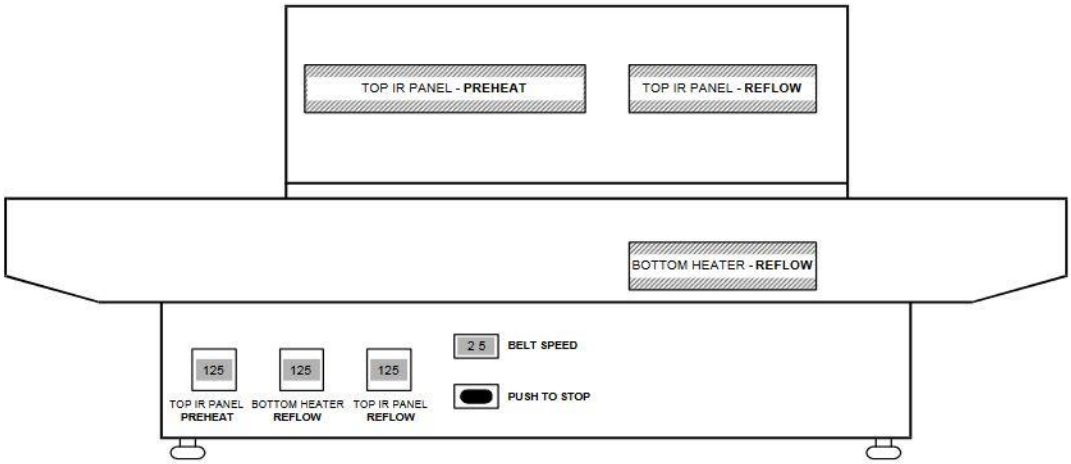
Obr. 3-10 Cyklovací komora CTS T-40/25

Biologický inkubátor FRIOCELL 55

Pro stabilizování hodnot odporů se využívalo inkubátoru FRIOCELL 55 ECO. Jedná se o biologický inkubátor sloužící k simulování přesných teplotních cyklů a redukci odpařování vzorků pro náročné a přesné testy. Je také vhodný pro proces kultivace vzorků. Na displeji zařízení lze nastavit až 9 různých programů, ve kterých je možné střídat nastavení teplot. Samotný teplotní rozsah začíná od 0 °C až do 100 °C. Vnitřní objem komory je 55 litrů. [24]

Průběžná pec DIMA SMRO-0180

Přetavovací pec výrobce DIMA je malá, průběžná pec, využívaná především pro laboratorní účely a výrobu prototypů. Pec má dvě ohřevné zóny. První slouží pro předehřev a využívá k ohřevu tři infrazářiče s výkonem 250 W. Druhá zóna slouží k přetavení pomocí třech infrazářičů v horní části pece a nepřímého odporového ohřevu ve spodní části pece. Chlazení probíhá pomocí ventilátoru umístěného na konci pece. Teploty nastavené na zařízení udávají hodnotu tepelných elementů, nikoliv hodnotu teploty v peci, viz schéma pece na Obr. 3-11. DPS jsou přepravovány pomocí pásového dopravníku, tvořeného tenkými pružinami, jejichž rychlost se dá regulovat.[25]



Obr. 3-11 Schéma průběžné pece DIMA SMRO-0180 [26]

Pájecí lázeň Hakko FX-301B

Pro simulaci pájení ve vlně se využilo pájecí lázně Hakko FX-301B (Obr. 3-12). Obsahuje kalíšek o velikosti 50x50x43,5 mm, který je pokryt speciální povrchovou úpravou proti přilnavosti roztavené pájky. Nastavitelná teplota se pohybuje od 200 °C až po 450 °C. [27]

Obr. 3-12 Pájecí lázeň Hakko FX-301B

Saphir 530

Pro broušení a leštění mikrovýbrusů se použilo zařízení Saphir 530 od firmy ATM. Zařízení používá otočnou hlavu Rubin 500 s 5 otvory na vzorky o průměru 200–250 mm. Na zařízení lze nastavit přítlak, rychlost otáčení, směr otáčení, sekvenční časování, centrální nebo singulární tlak a množství vody dodávané při broušení (Obr. 3-13). [28]

Obr. 3-13 Zařízení na broušení a leštění Saphir 530

3.2 Teplotní stárnutí DPS a změny odporu propojení

Při měření odporů pokovených otvorů je třeba využít čtyřbodovou metodu pro měření nízkých odporů. Měření nízkých odporů využívá přímou aplikaci Ohmova zákona. Elektrický odpor (R) je dán podílem přiloženého napětí (U) a protékajícího proudu (I). Jelikož se budou měřit velmi malé impedance, teoreticky v jednotkách mΩ, mělo by se vyhnout velkému proudovému zatížení. Se zvyšujícím se proudem, by mohlo být měření nepřesné z důvodu zvyšování teploty vzorku a přímo ovlivnit změřenou hodnotu odporu mědi. Jako ukázka poslouží příklad. U měděného drátu s odporem 10 Ω (hodnota teplotního součinitele mědi je $3{,}92 \cdot 10^{-3}$ na 1 K^{-1}), dojde při změně teploty ze 293,15 K na 353,15 K, ke zvýšení odporu na 12,325 Ω, tedy skoro o 24 % z tohoto důvodu je třeba použít velmi nízké měřící napětí a měření provádět za konstantních teplot.[30][31]

Hodnotu odporu při změně teploty lze vypočítat následující rovnicí [31]

$$R_\vartheta = R_{293,15} [1 + \alpha_{293,15} (\vartheta - \vartheta_{293,15})] \quad (1)$$

R_ϑ hodnota odporu při teplotě ϑ
$R_{293,15}$ hodnota odporu při teplotě 293,15 K
$\alpha_{293,15}$ teplotní součinitel, který udává relativní změnu odporu o 1 K
ϑ hodnota teploty v K

Pro srovnání parametrů vodivých materiálů lze nahlédnout do tabulky hodnot Tab. 3-1.

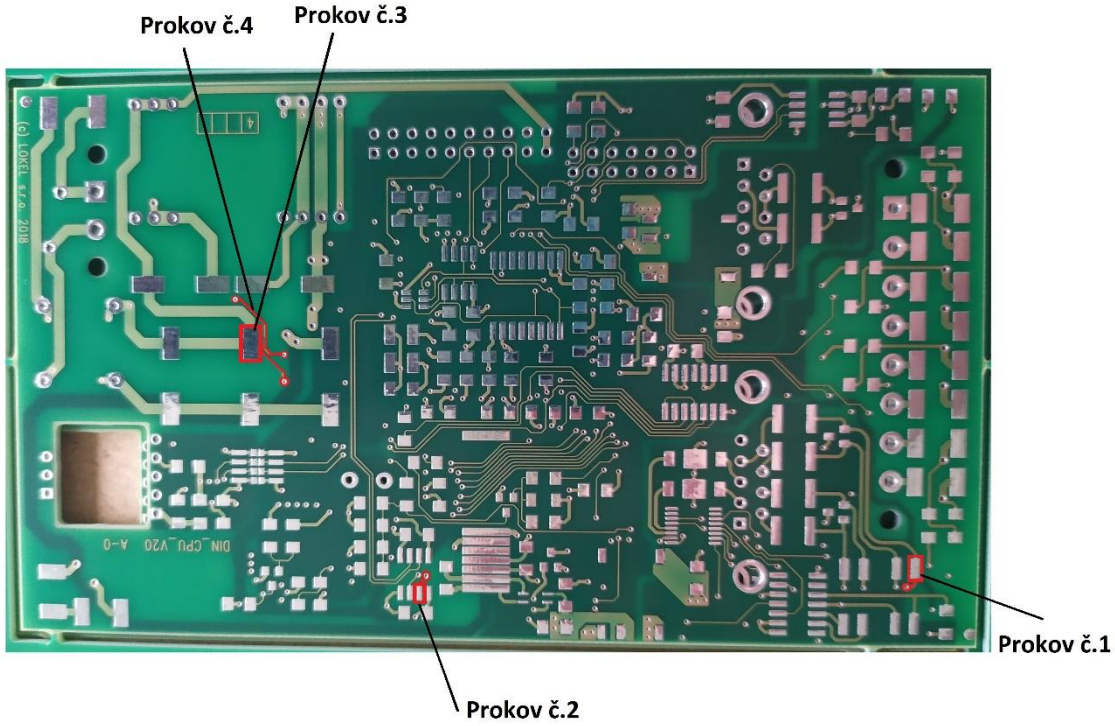
Tab. 3-1 Tabulka konstant vybraných vodivých materiálů [31]

Materiál	Rezistivita ρ_{20} ($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)	Konduktivita σ_{20} ($S \cdot m \cdot mm^{-2}$)	Teplotní součinitel odporu α_{20} (K^{-1})
Stříbro	0,0016	62,5	$3{,}80 \cdot 10^{-3}$
Měď	0,018	55,6	$3{,}92 \cdot 10^{-3}$
Zlato	0,023	43,5	$4{,}00 \cdot 10^{-3}$
Hliník	0,028	35,7	$3{,}77 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	0,05	20	$4{,}10 \cdot 10^{-3}$
Cín	0,1	10	$4{,}20 \cdot 10^{-3}$
Olovo	0,207	4,8	$4{,}20 \cdot 10^{-3}$
Manganin (84 % Cu, 4 % Ni, 12% Mn)	0,435	2,3	$0{,}02 \cdot 10^{-6}$
Konstantan (55 % Cu, 44 % Ni, 1 % Mn)	0,49	2,04	$0{,}04 \cdot 10^{-3}$

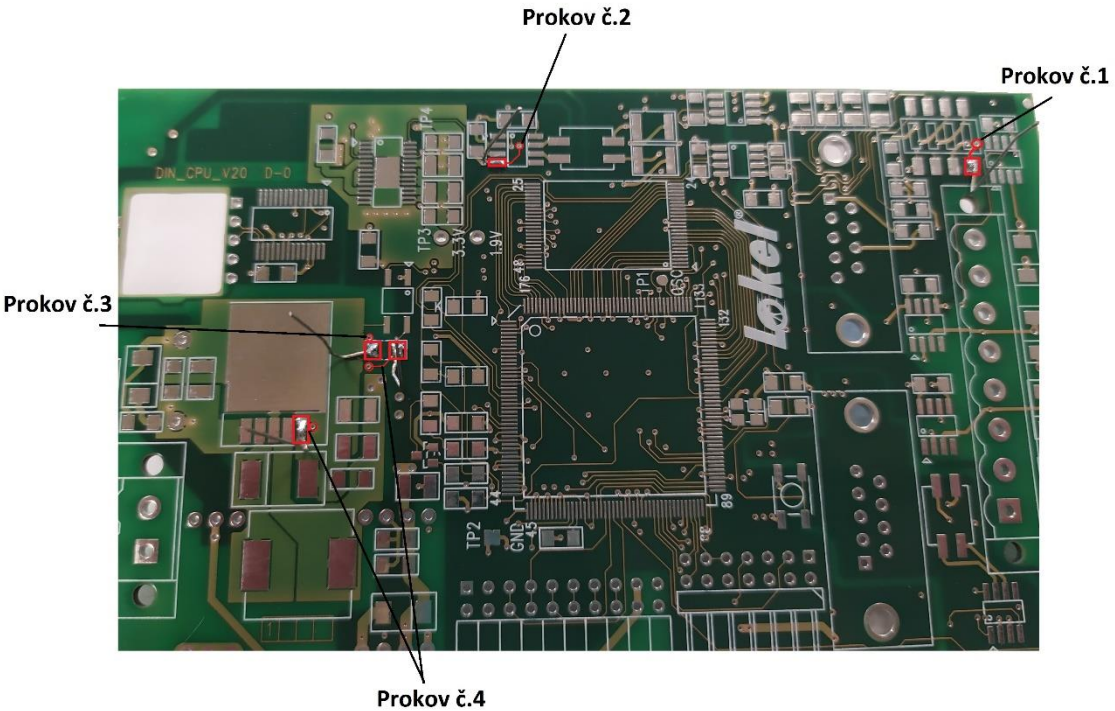
V praxi se použijí dva páry svorek, proudové a napěťové. Proudové svorky jsou připojeny na vzdálenější části vodiče a napěťovými svorkami měříme vzniklé napětí mezi proudovými. Z nastavené hodnoty proudu a změřené hodnoty napětí jednoduchým vztahem vypočítáme odpor.

3.2.1 První cyklování se zkušebním měřením a pozorování termokamerou

Samotné měření odporu pokovených otvorů a propojení na povrchu DPS nic neukazuje, proto se využije zátěžových testů. Pomocí ohřívací pece a chladícího boxu se simulovalo zatížení DPS. Pro tepelné cyklování se vybral jeden kus od každé DPS. Došlo k oddělení desek od přířezu pomocí kleštin a připájení vývodů na zvolené místa. Pájení vývodů proběhlo z důvodu lepšího připojení proudových svorek při měření odporů čtyřbodovou metodou. Při cyklickém zatížení došlo ke vložení vzorků do pece při 90 °C a posléze do chladícího boxu při -49 °C, v obou zařízeních se desky nechaly 15 minut ležet. Proces se zopakoval 10krát se změřením, zda nedošlo k přerušení zvolených pokovených otvorů a propojení při 4, 8 a 10 cyklu. Tyto zvolené parametry odpovídají standardizované normě JEDEC JESD22 A104C pro tepelné cyklování pro testovací stav N, -40 °C (+0, -10) až +85 °C (+10, -0) a režim „ponoření“ 4 (soak mode) tedy dobu při dané teplotě 15 minut. Po každém zahřátí a ochlazení se nechaly desky 6 minut temperovat při pokojové teplotě, aby nedošlo k příliš velké teplotní změně a popraskání, způsobené přechodem z extrémně nízké teploty do vysoké teploty a obráceně. Ukázku vybraných pokovených otvorů a vodivých cest lze vidět na Obr. 3-14 a Obr. 3-15.[29]



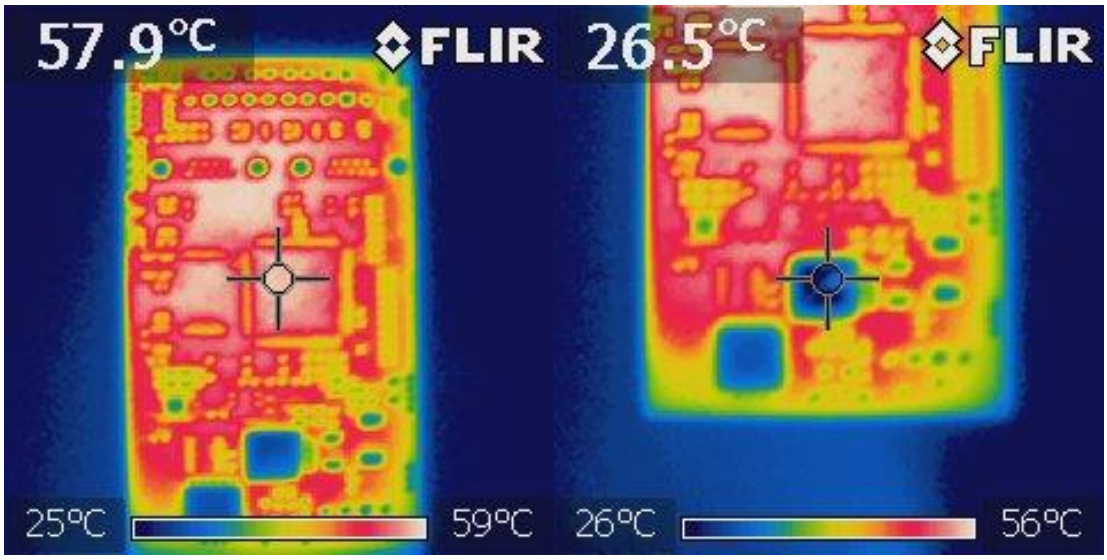
Obr. 3-14 DPS č.2 s testovanými pokovenými otvory (strana A)



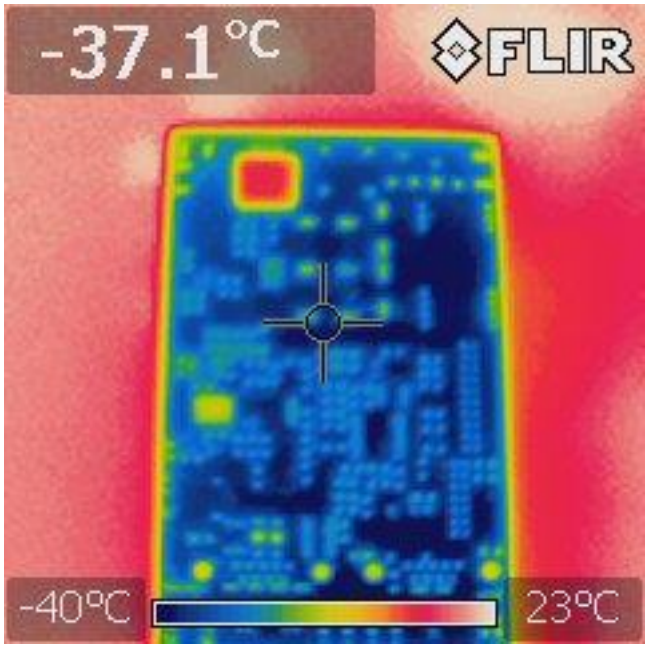
Obr. 3-15 DPS č.2 s připájenými vývody pro proudové svorky (strana B)

Z výsledků měření vyplynulo, že desky vydržely i přechod z nízké teploty -49 °C do teploty 90 °C. Ani u jednoho z pokovených otvorů nedošlo k přerušení i při změně celkové teploty o 139 °C.

Pomocí termokamery byly současně vyfoceny snímky pro pozorování, jak dochází k rozložení teplotního pole během zahřívání a chlazení. Na snímcích lze vidět světlejší oblasti odhalených pájecích ploch. Současně se na DPS nachází i vodivá plocha přímo navržená, aby působila jako chladič, díky své velké ploše u ní dochází ke změně teploty na teplotu okolí velmi rychle. Při vložení do pokojové teploty po vytažení z chladícího zařízení, působí pokovená plocha zase k rychlejšímu ohřátí na teplotu okolí (viz Obr. 3-16, Obr. 3-17).



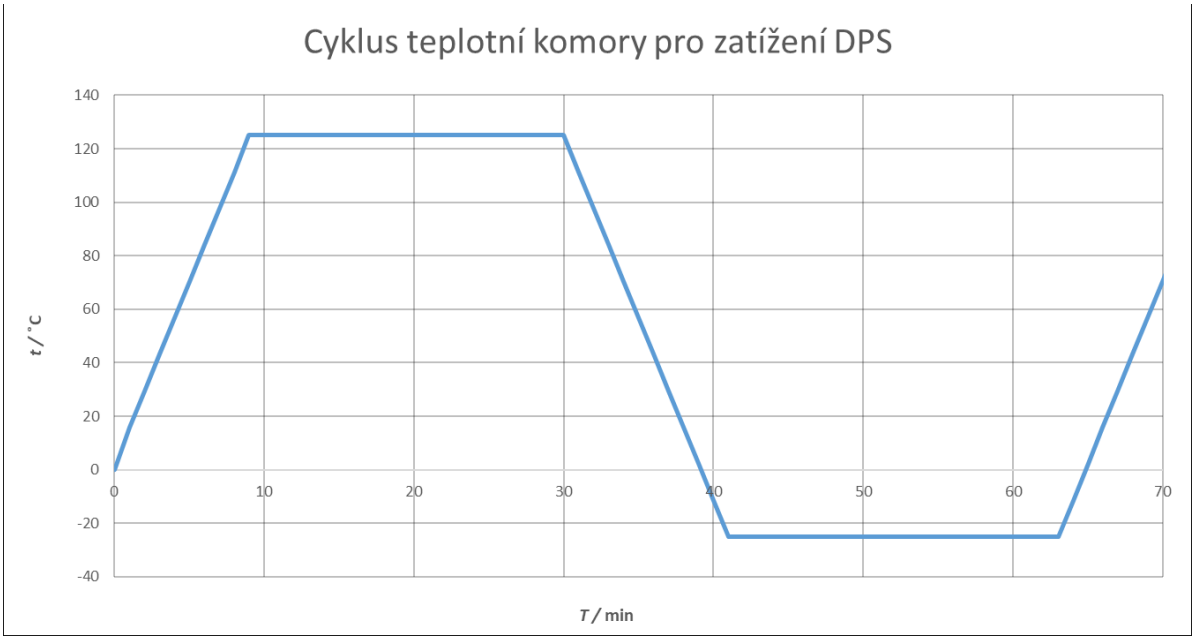
Obr. 3-16 Rozložení teplotního pole při zahřátí, teplota chladících plošek vpravo



Obr. 3-17 Rozložení teplotního pole při podchlazení pro DPS č.2

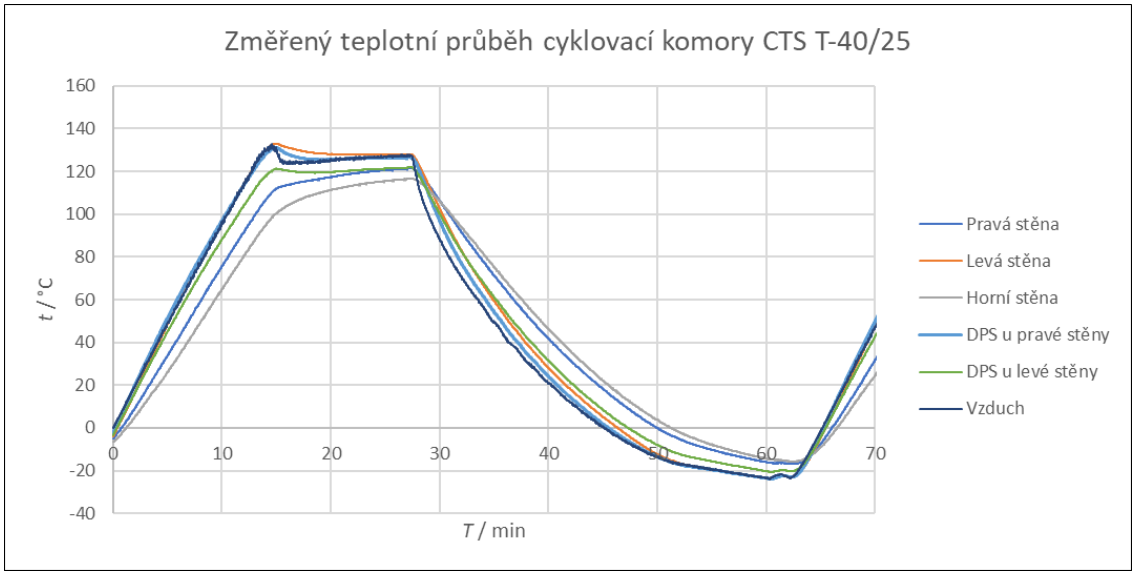
3.2.2 Nastavení režimu pro cyklovací komoru

Z měření bylo zjištěno, že DPS větší změnu teplot zvládnou, proto se přešlo k zatížení dlouhodobým cyklováním. V cyklovací komoře CTS T-40/25 byla nastavena vrchní teplota 125 °C a spodní teplota -25 °C, s dobou průběhu 65 minut na jeden cyklus (viz. Graf 1). Tento profil byl přednastaven předem, proto z technických důvodů nebylo možné nastavit jiný profil. Jelikož nejbližší podobné testovací podmínky normy JEDEC JESD22 A104C je stav K, 0 °C (+0, -10) až +125 °C (+15, -0) nedá se na tuto normu již odkazovat. Toto nastavení teplotního profilu ovšem odpovídá normě IPC 9701A, která je primárně navržena na testování kvality pájených povrchových spojů, ale pro tepelné stárnutí DPS postačí. Norma stanovuje maximální teplotu pro teplotní cyklus 25 °C pod teplotou Tg, čemuž přesně odpovídá teplota 125 °C. Na DPS, které prošly teplotní zátěží se napájelo větší množství vývodů pro změření odporu pokovených otvorů pomocí čtyřbodové metody. Hodnoty odporů se změřily před začátkem cyklování, po 100, 200 a 400 cyklech.



Graf 1 Nastavený teplotní profil pro komoru CTS T-40/25

Pro přesnější teplotního profil se do komory vložilo 6 termočlánků a komora se zapnula se stejným nastavením. První 3 články se pomocí kaptonové pásky připevnily na levou, pravou a horní stěnu komory. K pravé i levé stěně se přiložily zkušební DPS, aby se proudění uvnitř komory více blížilo reálnému cyklování, a na ty se přilepily další termočlánky. Poslední termočlánek se zavěsil do vzduchu, přibližně do středu komory (viz. Graf 2).



Graf 2 Reálný teplotní profil cyklovací komory

Ze změřených hodnot lze vidět, že reálný profil se od teoretického částečně liší. Důvodem je nestejnoměrné proudění uvnitř komory kvůli vloženým vzorkům. Nejméně přesná teplota oproti nastavené je na horní stěně komory, ale jelikož jsou desky umístěny při spodní části komory není tato odchylka problém. Doba zahřátí okolo 125 °C odpovídá přibližně času 15 minut, při podchlazení dojde k dosažení teploty pod -20 °C na 10 minut.

Měření hodnot odporů probíhalo v Teplotní skříni Friocell 55, při stabilní teplotě 40 °C, aby došlo k přesnějšímu měření hodnot. Při stabilní teplotě 40 °C, dojde k ustálení hodnot odporů a v uzavřené skříni nebude docházet k ovlivnění měření vnějším prostředím (viz Obr. 3-18).

Obr. 3-18 Připojení měřících svorek k DPS uvnitř Teplotní skříně Friocell 55R

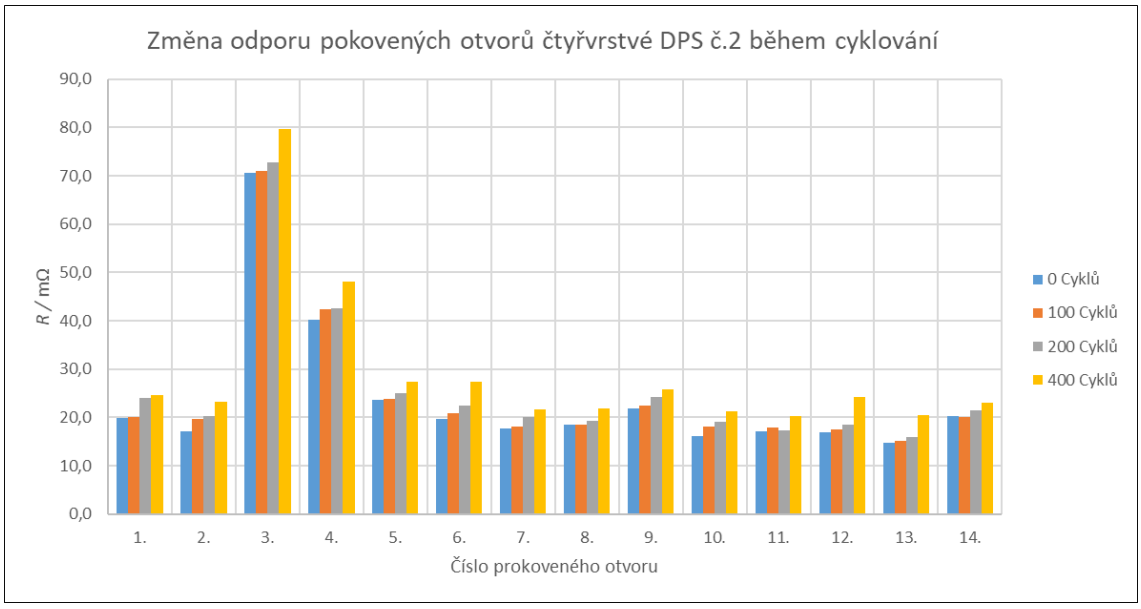
3.2.3 Měření a dosažené výsledky

DPS z předchozího cyklování se využily na další testování. Na DPS č.2 se připájelo celkem 28 vývodů, bude tedy možné testovat celkem 14 pokovených otvorů, 1 a 2 o velikosti 830 µm, 3 až 6 mají velikost 350 µm a 7 až 14 velikost 660 µm. Na DPS

č.3A se napájelo 14 vývodů (7 pokovených otvorů), otvory 2, 3 jsou nejmenší otvory na DPS, 350 µm. Otvory 4 a 5 byly velikosti 750 µm. Pokovený otvor číslo 1, 6 a 7 je elipsovitého tvaru a měl rozměr od jednoho kraje k druhému 950 µm a 1620 µm (viz Příloha 6 -). Na poslední DPS č.3B se připájelo 8 vývodů (4 pokovené otvory), 1 o velikosti 750 µm a 2 až 4 o průměru 350 µm. Rozměry pokovených otvorů se mírně liší, ve firmě ČeMeBo je nejmenší možný vyvrtaný a pokovený otvor o velikosti 200 µm, který má až do průměru 1500 µm toleranci ± 100 µm. Nad hodnotu 1500 µm je tolerance 150 µm. Změřené hodnoty při cyklování lze vidět v tabulkách Tab. 3-2, Tab. 3-3, Tab. 3-4 a grafech Graf 3,Graf 4 a Graf 5.

Tab. 3-2 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.2

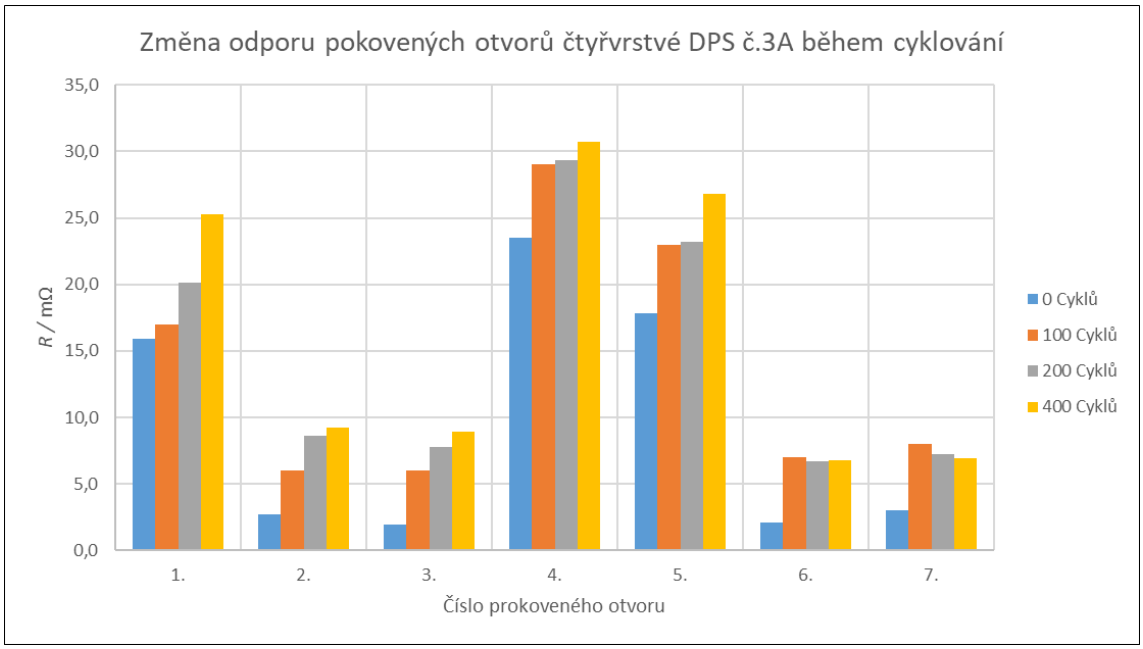
Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1.	**830**	19,8	20,1	1,5	24,1	21,7	24,7	24,7
2.	**830**	17,2	19,6	14,0	20,3	18,0	23,2	34,9
3.	**350**	70,6	70,9	0,4	72,8	3,1	79,6	12,7
4.	**350**	40,2	42,3	5,2	42,6	6,0	48,1	19,7
5.	**350**	23,6	23,9	1,3	25,0	5,9	27,4	16,1
6.	**350**	19,6	20,9	6,6	22,4	14,3	27,3	39,3
7.	**660**	17,7	18,1	2,3	20,1	13,6	21,7	22,6
8.	**660**	18,5	18,5	0,0	19,3	4,3	21,8	17,8
9.	**660**	21,9	22,4	2,3	24,2	10,5	25,8	17,8
10.	**660**	16,1	18,0	11,8	19,0	18,0	21,3	32,3
11.	**660**	17,1	17,8	4,1	17,4	1,8	20,3	18,7
12.	**660**	17,0	17,5	2,9	18,4	8,2	24,3	42,9
13.	**660**	14,8	15,1	2,0	15,9	7,4	20,4	37,8
14.	**660**	20,2	20,1	-0,5	21,5	6,4	23,0	13,9
							Průměr	**25,1**



Graf 3 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2 během cyklování

Tab. 3-3 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3A

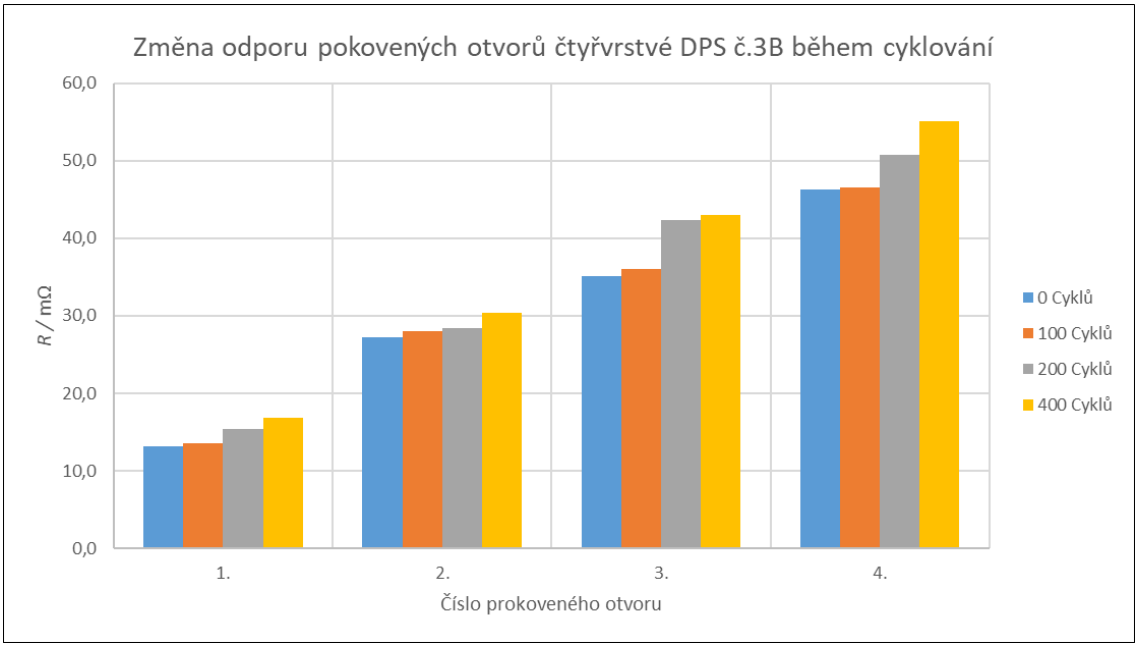
Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1. Elipsa	**1620x950**	15,9	17,0	6,9	20,1	26,4	25,3	59,1
2.	**350**	2,7	6,0	122,2	8,6	218,5	9,2	240,7
3.	**350**	1,9	6,0	215,8	7,8	310,5	8,9	368,4
4.	**750**	23,5	29,0	23,4	29,3	24,7	30,7	30,6
5.	**750**	17,8	23,0	29,2	23,2	30,3	26,8	50,6
6. Elipsa	**1620x950**	2,1	7,0	233,3	6,7	219,0	6,8	223,8
7. Elipsa	**1620x950**	3,0	8,0	166,7	7,2	140,0	6,9	130,0
							Průměr:	**157,6**



Graf 4 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3A během cyklování

Tab. 3-4 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3B

Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1.	**750**	13,1	13,5	3,1	15,4	17,6	16,9	29,0
2.	**350**	27,2	28,0	2,9	28,4	4,4	30,4	11,8
3.	**350**	35,1	36,0	2,6	42,4	20,8	43,0	22,5
4.	**350**	46,3	46,6	0,6	50,8	9,7	55,1	19,0
							Průměr:	**20,6**



Graf 5 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B během cyklování

Hodnoty odporů u DPS č.2 vzrostly přibližně o 25 %. Tato hodnota je podobná změřeným údajům z DPS č.3B, tedy 20,6 % nárůstu odporů. DPS č.3A měla průměrný nárůst odporu o 157 %. Tato hodnota mnohonásobně převyšuje výsledky druhých DPS. Při bližším pozorování je vidět, že hodnota narostla nejvíce u pokovených otvorů s velmi malým odporem, cca v řádu jednotek mΩ. Rozlišovací schopnost měřícího přístroje u takto malé hodnoty způsobuje příliš velkou odchylku i při měření čtyřbodovou metodou, proto nelze brát na údaje DPS č.3A zřetel. Z těchto důvodů se rozhodlo k měření otvorů s větší hodnotou odporu, pro přesnější údaje.

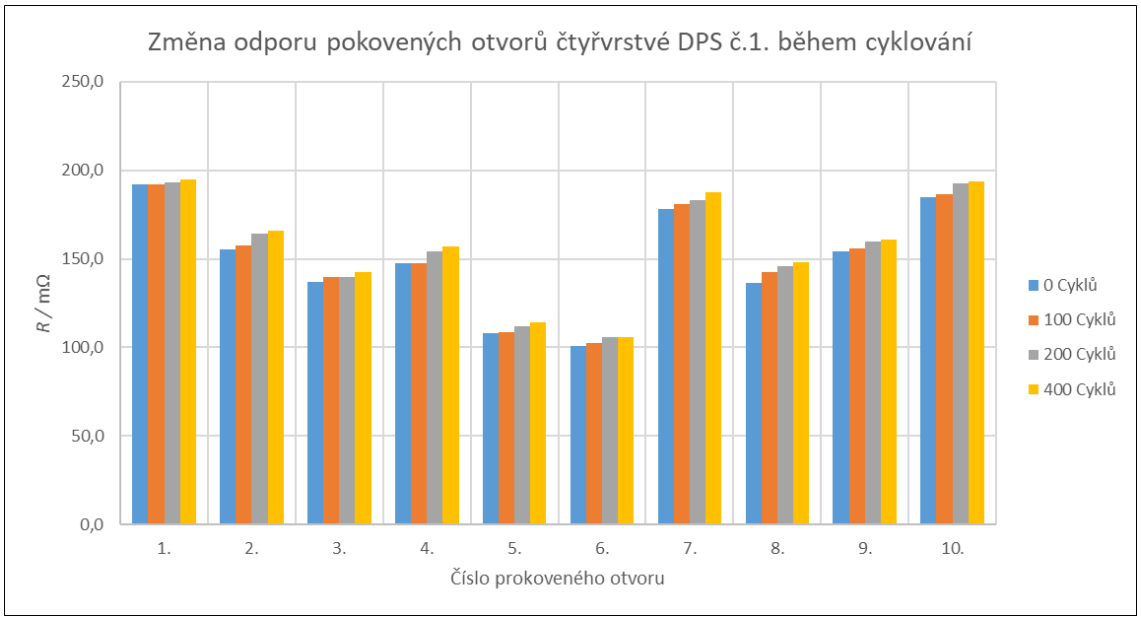
Místo krátkých vývodů se začal používat tenký, ohebný, měděný drát pokrytý krycí vrstvou polyuretanu. Došlo k odstranění krycí vrstvy na obou koncích drátu, pro pájení a pro připojení svorek. Malá tloušťka drátů umožní pájet na místo pro osazení SMD prvků na kontaktování nejmenších možných pokovení na DPS.

Na DPS č.1 bez předchozího tepelného zatížení se připájely na volné místa měděné kontakty, aby došlo ke spojení vrchní i spodní části DPS skrz pokovený otvor. Takto se připájelo celkem 20 vývodů, bude se tedy testovat 10 pokovených otvorů. Velikost jednotlivých pokovených otvorů činní 200 µm. Na nezatíženou DPS č.2 se také napájelo 20 vývodů na pokovené otvory s průměrem 350 µm. U posledního typu DPS č.3B se napájelo 16 vývodů, také na průměr 350 µm. U všech DPS se zaměřilo na nejmenší pokovené otvory. Změřené hodnoty lze vidět tabulkách Tab. 3-5, Tab. 3-6,

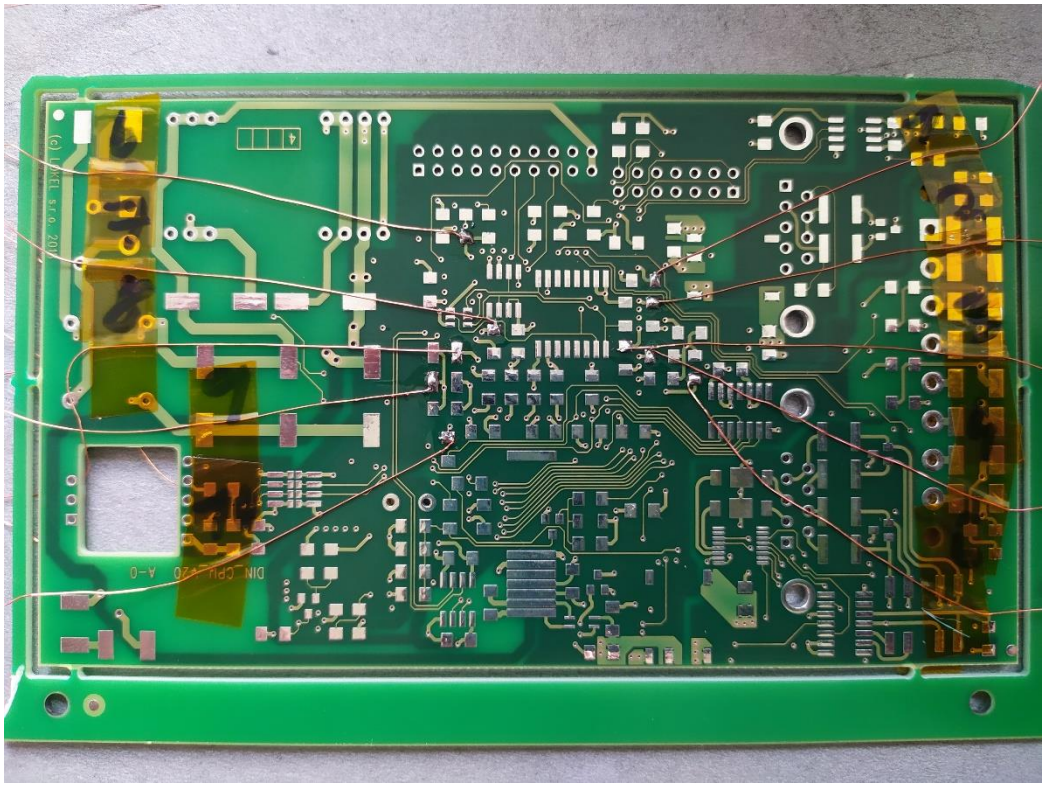
Tab. 3-7 a grafech Graf 6, Graf 7 a Graf 8. Na obrázku Obr. 3-19 lze vidět ukázku připájených vývodů.

Tab. 3-5 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.1

Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1.	**200**	192,1	192,3	0,1	193,3	0,6	194,9	1,5
2.	**200**	155,1	157,8	1,7	164,5	6,1	166,1	7,1
3.	**200**	136,9	139,6	2,0	139,7	2,0	142,6	4,2
4.	**200**	147,8	147,9	0,1	154,2	4,3	157,3	6,4
5.	**200**	108,0	108,4	0,4	111,9	3,6	114,1	5,6
6.	**200**	101,1	102,3	1,2	105,8	4,6	106,0	4,8
7.	**200**	178,1	181,0	1,6	183,4	3,0	187,9	5,5
8.	**200**	136,2	142,5	4,6	146,1	7,3	148,4	9,0
9.	**200**	154,4	156,1	1,1	159,8	3,5	161,2	4,4
10.	**200**	185,1	186,7	0,9	192,8	4,2	193,8	4,7
							Průměr:	**5,3**



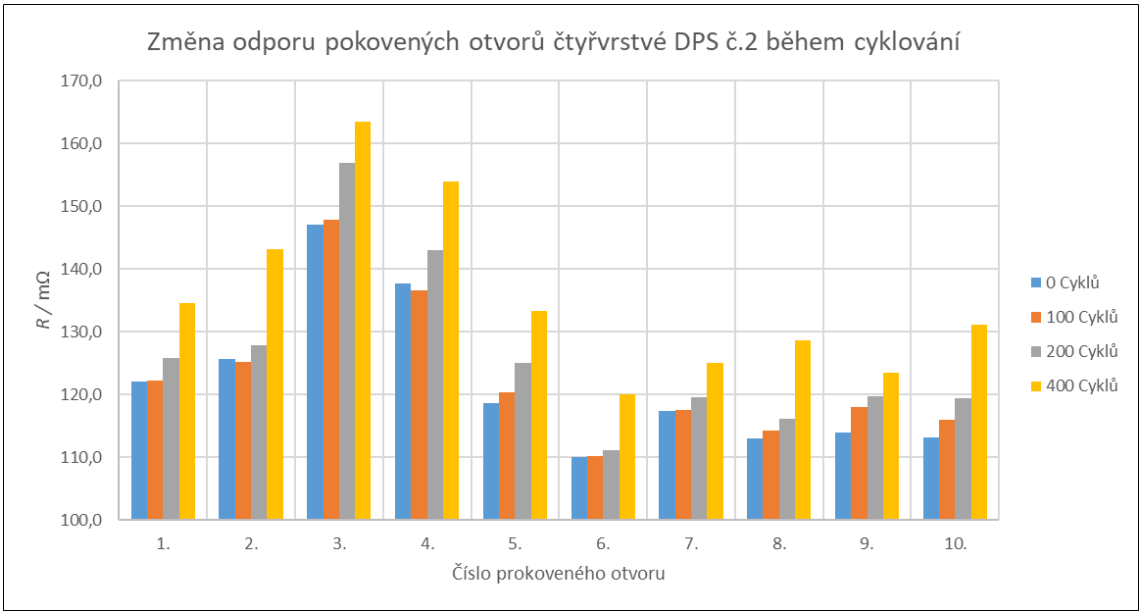
Graf 6 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1 s měděnými vývody během cyklování



Obr. 3-19 Ukázka DPS č.2 s připájenými měděnými vývody

Tab. 3-6 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.2

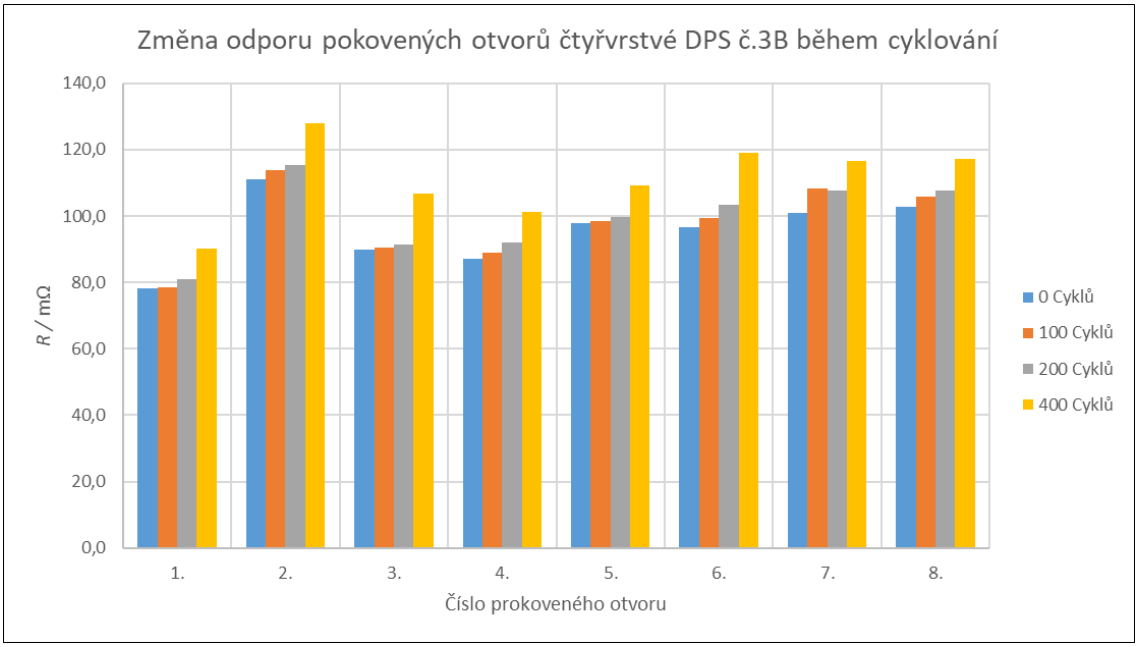
Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1.	**350**	122,0	122,2	0,2	125,8	3,1	134,5	10,2
2.	**350**	125,6	125,2	-0,3	127,8	1,8	143,1	13,9
3.	**350**	147,1	147,9	0,5	156,9	6,7	163,4	11,1
4.	**350**	137,7	136,6	-0,8	143,0	3,8	153,9	11,8
5.	**350**	118,7	120,3	1,3	125,1	5,4	133,3	12,3
6.	**350**	110,0	110,2	0,2	111,2	1,1	120,1	9,2
7.	**350**	117,4	117,5	0,1	119,5	1,8	125,1	6,6
8.	**350**	113,0	114,3	1,2	116,2	2,8	128,6	13,8
9.	**350**	114,0	118,0	3,5	119,8	5,1	123,4	8,2
10.	**350**	113,2	116,0	2,5	119,4	5,5	131,2	15,9
							Průměr:	**11,3**



Graf 7 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2 s měděnými vývody během cyklování

Tab. 3-7 Tabulka změřených hodnot odporu pokovených otvorů pro DPS č.3B

Prokovený otvor	Průměr [µm]	0 Cyklů R [mΩ]	100 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 100 cykly v %	200 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl R mezi 0 a 200 cykly v %	400 Cyklů R [mΩ]	Rozdíl mezi 0 a 400 cykly v %
1.	**350**	78,1	78,6	0,6	81,1	3,8	90,1	15,4
2.	**350**	111,0	113,8	2,5	115,5	4,1	127,8	15,1
3.	**350**	90,0	90,5	0,6	91,3	1,4	106,9	18,8
4.	**350**	87,0	88,9	2,2	92,1	5,9	101,3	16,4
5.	**350**	98,0	98,4	0,4	99,8	1,8	109,1	11,3
6.	**350**	96,6	99,3	2,8	103,5	7,1	119,0	23,2
7.	**350**	100,9	108,3	7,3	107,6	6,6	116,5	15,5
8.	**350**	102,8	105,9	3,0	107,8	4,9	117,3	14,1
							Průměr:	**16,2**



Graf 8 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B s měděnými vývody během cyklování

Ze všech měření, lze jasně vidět, že došlo k menší změně v celkovém odporu, před a po testování než v předchozím případě.

Pro zhodnocení výsledků tepelného stárnutí DPS se použilo srovnání s metodou IST (Interconnect Stress Test). Metoda IST využívá speciálně vyrobených kupónů z testovaných DPS. Provedení kupónu slouží k využití plošných spojů uvnitř DPS pro ohřev a zatížení. Kupón je navržen tak, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení tepla uvnitř DPS. Během testu IST se do plošných spojů přivede proud, kterým se DPS zahřeje až na potřebnou teplotu. Pro testování tepelného stárnutí se užívá hodnot do 150 °C pro otestování spolehlivosti. Pro simulaci pájení a osazování je možné DPS zahřát až na 230 °C až 260 °C. Výsledné změny odporů se vyhodnocují a ukazují na zatížení a degradaci DPS. Podle IPC standard se nesmí zvýšit hodnota odporu testovaných spojů o 10 % počáteční hodnoty, po překročení této hodnoty dochází k degradaci pokoveného otvoru. Při zvýšení odporu nad 10 % by mělo dojít k ukončení testování. Z technický důvodů nebylo možné přímo tuto metodu použít, místo ní se využilo klasického cyklování v tepelné komoře, při kterém docházelo k podobnému zahřívání testovaných DPS jako v případě testu IST. [31][33]

Při cyklování první série došlo u všech DPS (č.2 a č.3B) k velkému nárůstu již po prvních 100 cyklech. U DPS č.2 došlo k největšímu růstu odporu u otvoru číslo 2 a 10. Zvýšení odporu o více než 10 % jasně ukazuje na degradaci spoje, která dále pokračuje. Správně by mělo být měření zastaveno po překročení hodnoty růstu 10 %, ale pro více dat se pokračovalo až do 400 cyklů. Při měření po 200 cyklech došlo k překročení hodnot odporu o hraničních 10 % u dalších 4 odporů. Při 400 cyklech již došlo k překročení hodnoty u všech měřených odporů. U hodnot byl pravděpodobně zaznamenán zvětšený růst odporů z důvodu předchozího teplotní cyklování. Dalším vlivem na hodnotu odporu byla vytvořená vrstva oxidu na koncích připájených vývodů, které sloužily k připojení měřících svorek. Celková hodnota odporu byla 25,1 %, tedy o 4,5 % vetší růst než u DPS č.3B (20,6 %). DPS č.3B překročila 10 % růstu až při měření po 200 cyklech. Důvodem

však mohlo být menší množství testovaných otvorů oproti DPS č.2. Jak už bylo zmíněno, výsledky z prvního měření DPS č.3A budou zanedbány.

Při druhém cyklování se soustředilo na nejmenší možné pokovené otvory, u kterých by mělo teoreticky docházet k největšímu poškození z důvodu jejich náročnějšího technologického postupu výroby - vrtání a pokovení. Současně se pro přesnější měření mechanicky očistily kontakty od vrstvy oxidů před každým měření odporu. DPS č.2 překročila povolený nárůst odporu až po 400 cyklech, téměř u všech pokovených otvorů (7 z 10) a dopadla v testu lépe než DPS č.3B, u které také došlo k překročení 10 % až po 400 cyklech, ale u všech měřených pokovených otvorů. Další ukázkou lepší odolnosti snášet tepelnou zátěž byl menší celkový nárůst odporů DPS č.2 (11,3 %), který byl téměř o 5 % menší než u DPS č.3B (16,2 %). Šestivrstvá DPS č.1 zaznamenala jasně nejmenší tepelné stárnutí. Celková hodnota růstu byla 5,3 % a i při měření po 400 cyklech nedošlo k překročení hodnoty 10 % původního odporu. Největší nárůst odporu byl o cca 9 %, je tedy pravděpodobné, že při dalším cyklování by už tato hodnota byla překročena a DPS by překročila hodnotu stanovenou IPC normou.

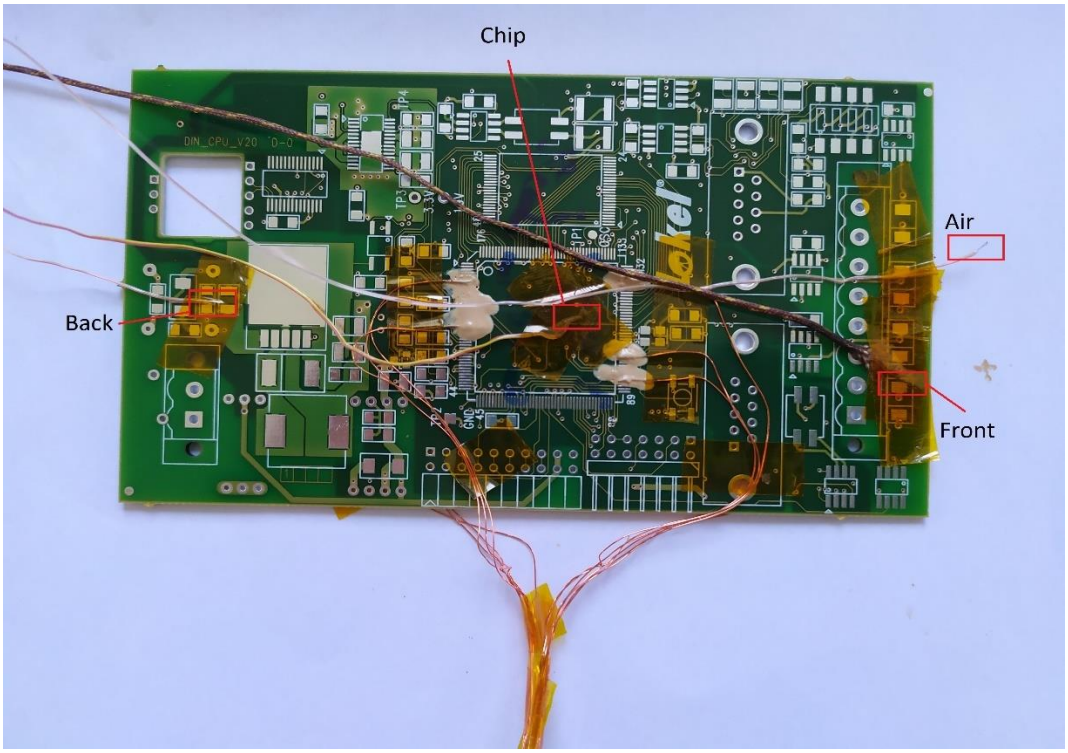
3.3 Sledování vlivu hromadného pájení

Dalším krokem bude sledování vlivu strojního pájení a osazení DPS, kdy dochází k největšímu teplotnímu šoku na DPS. Mezi dvě nejčastější metody strojního pájení se využívá přetavení v peci a pájení vlnou, proto se práce zaměřila na tyto dvě metody.

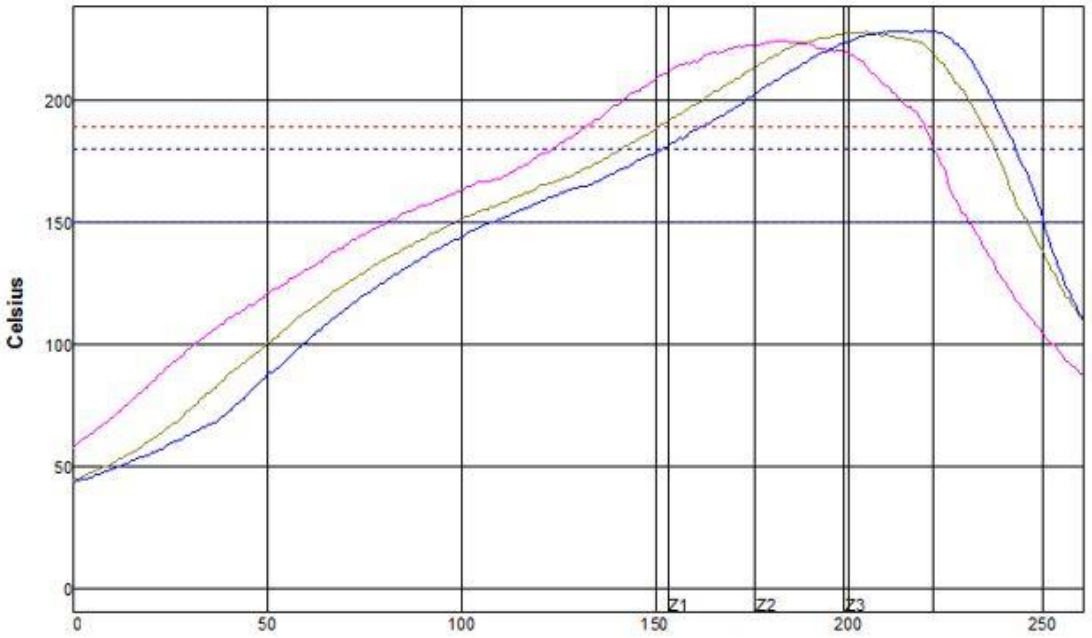
3.3.1 Testování v přetavovací peci

Rozhodlo se pro zjištění vlivu teplot při průchodu přetavovací pecí na DPS, přesněji vliv přetavovací teploty na pokovené otvory, jejich hodnotu odporu a na samotnou vnitřní strukturu DPS. Na šestivrstvé desce se zvolilo 10 pokovených otvorů a pro oba typy čtyřvrstvých DPS se vybralo 6 pokovených otvorů u každé DPS. Byly napájeny vývody a poté byly změřeny odpory otvorů čtyřbodovou metodou. Následně se pájené spoje zakryly pomocí snímatelné nepájivé masky a vložily do přetavovací pece. Nepájivá maska se použila, aby upevnila vývody pro měření odporu a zabránilo se pájce roztéct.

V horkovzdušné přetavovací peci DIMA se třemi nastavitelnými zónami se nastavily teploty 280 °C na ohřívacím zářiči v zóně pro předehřev, v zóně pro přetavení se nastavila teplota 272 °C na spodním odporovém ohřevu a 400 °C na horním zářiči. Toto nastavení odpovídá přetavovacímu profilu pro bezolovnaté pájení. Rychlost pásu se nastavila 10, při této rychlosti se přesune DPS po celé délce dopravníku (90 cm) za 6 minut a 20 sekund. K měření teplotního profilu v přetavovací peci se využily 4 termočlánky a profiloměru Slim KIC 2000. Termočlánky „front“ a „back“ se připevnily na přední a zadní část DPS, „chip“ se přilepil pomocí kaptonové pásky přibližně do středu DPS do oblasti určené pro osazení čipu. Poslední termočlánek „air“ se používá k určení hodnoty vzduchu pro zahájení a ukončení měření, proto se článek umístil přibližně centimetr před DPS po směru přepravníkového pásu (viz. Obr. 3-20). Na obrázku Obr. 3-21, Obr. 3-22, Obr. 3-23 je vidět teplotní profil DPS při průchodu pecí. Změřené hodnoty odporů a grafy hodnot lze vidět na Tab. 3-8, Tab. 3-9,Tab. 3-10, Graf 9, Graf 10, Graf 11.



Obr. 3-20 Ukázka DPS č.2 s připájenými vývody a termočlánky



PWI= 92%	Max Rising Slope		Soak Time 150-180C		Reflow Time /189C		Peak Temp	
front	1.44	-28%	42.55	-72%	87.66	92%	224.49	22%
back	1.46	-27%	44.13	-70%	78.67	62%	228.67	53%
chip	1.38	-31%	42.70	-72%	84.38	81%	228.01	48%
Delta	0.08		1.58		8.99		4.18	

Process Window:

Solder Paste: Easy Profile 256			
Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=2.0)	0	2.5	Degrees/Second
(Calculate Slope over 20 Seconds)			
Soak Time 150-180C	20	180	Seconds
Time Above Reflow - 189C	30	90	Seconds
Peak Temperature	208	235	Degrees Celsius

Description:

280, 272, 400, v=10

KIC ON BOARD

KIC
San Diego, CA USA

Profiled Using KIC 2000 Technology
Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

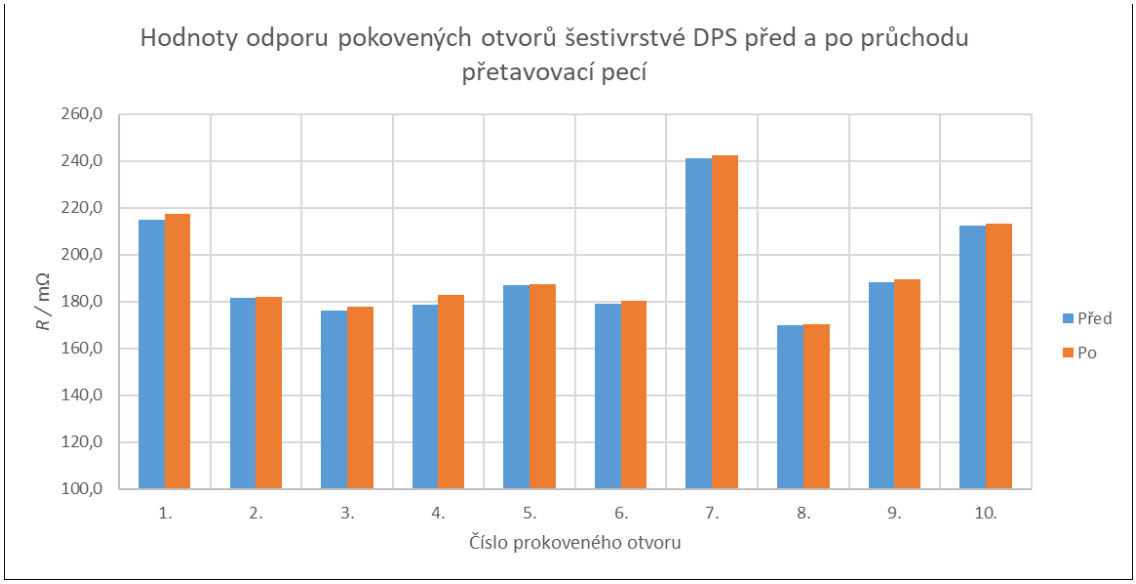
www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

KIC ON BOARD

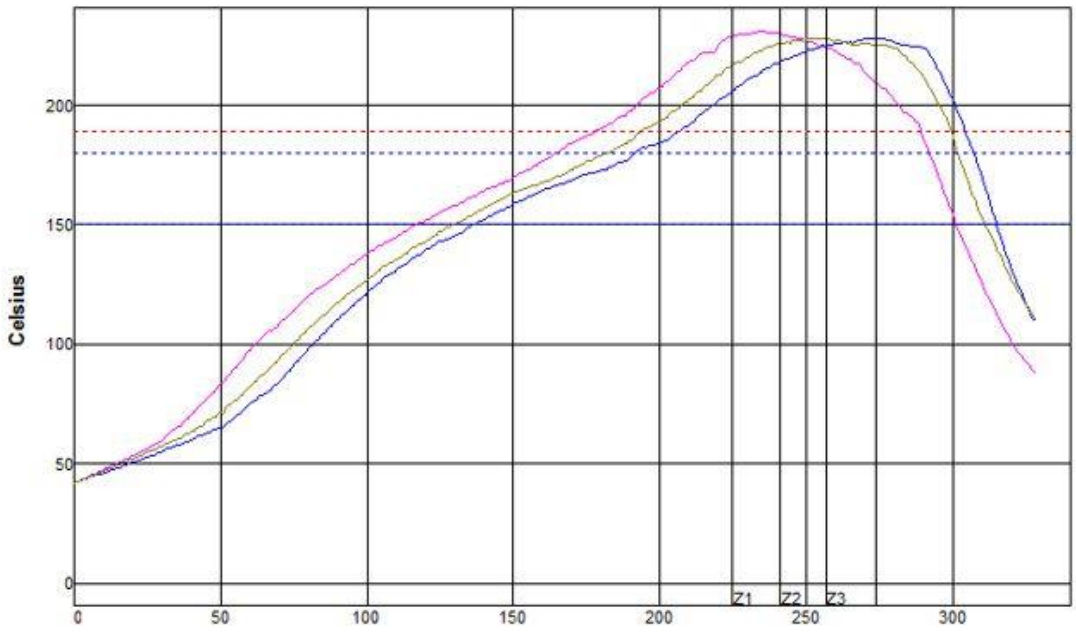
Obr. 3-21 Změřený teplotní profil pro DPS č.1.

Tab. 3-8 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.1

Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	215,0	217,4	1,1
2.	181,6	182,2	0,3
3.	176,2	177,9	1,0
4.	178,6	183,0	2,5
5.	186,9	187,5	0,3
6.	179,2	180,5	0,7
7.	241,1	242,6	0,6
8.	169,8	170,5	0,4
9.	188,3	189,7	0,7
10.	212,6	213,2	0,3
		Průměr	0,8



Graf 9 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1. po přetavení



PWI= 170%	Max Rising Slope		Soak Time 150-180C		Reflow Time /189C		Peak Temp	
front	1.36	-32%	48.19	-65%	111.08	170%	230.76	69%
back	1.32	-34%	55.29	-56%	97.64	125%	227.95	48%
chip	1.22	-39%	52.49	-59%	106.03	153%	227.84	47%
Delta	0.14		7.10		13.44		2.92	

Process Window:

Solder Paste: Easy Profile 256

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=2.0) (Calculate Slope over 20 Seconds)	0	2.5	Degrees/Second
Soak Time 150-180C	20	180	Seconds
Time Above Reflow - 189C	30	90	Seconds
Peak Temperature	208	235	Degrees Celsius

Description:

280, 272, 400, v=10

KIC
San Diego, CA USA

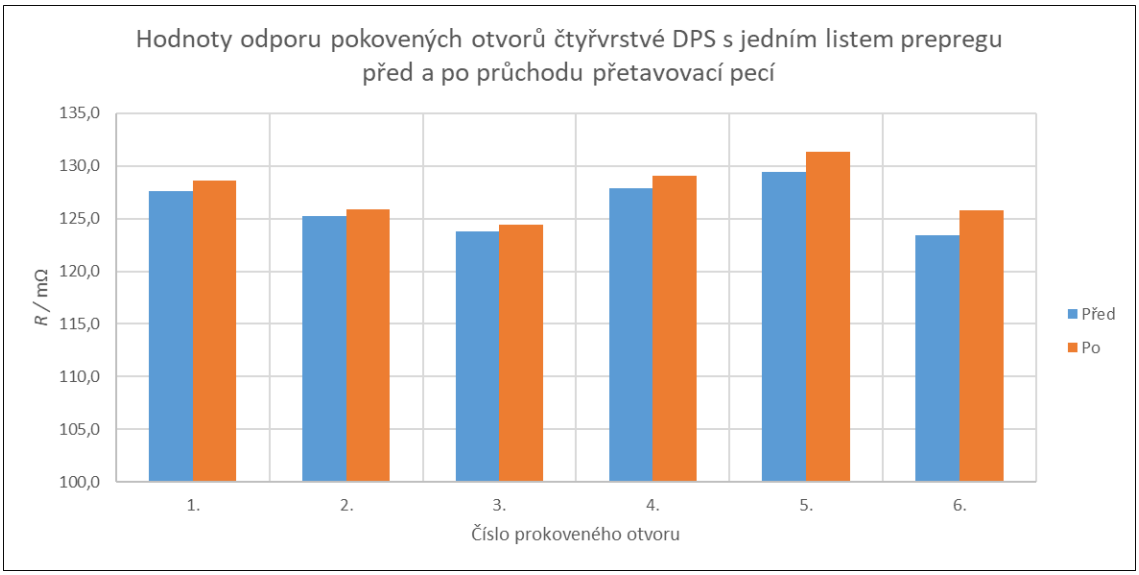
Profiled Using KIC 2000 Technology
Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

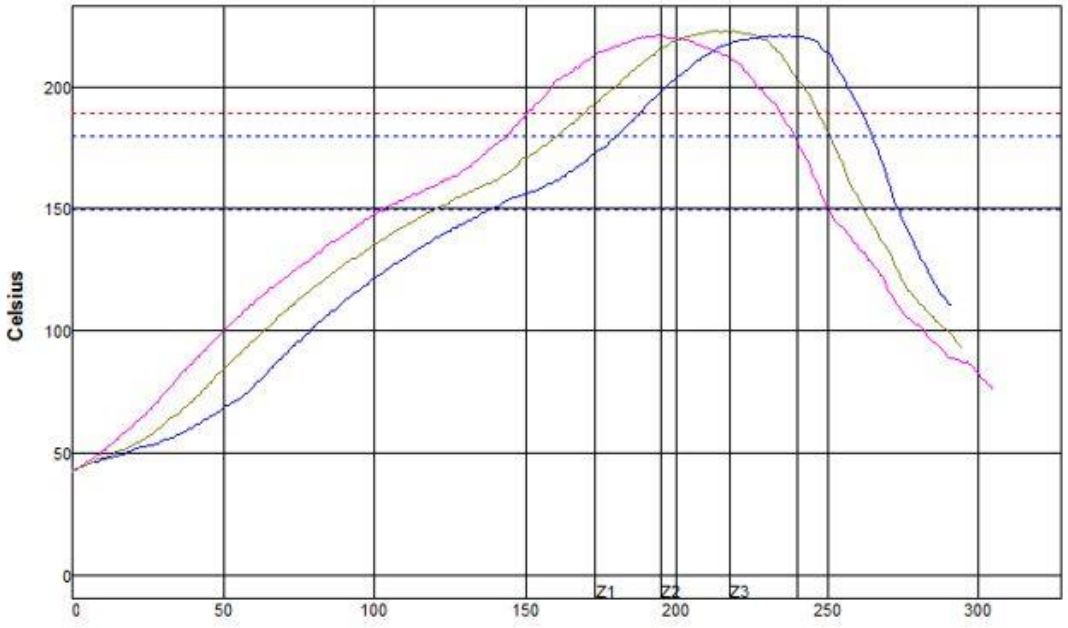
Obr. 3-22 Změřený teplotní profil pro DPS č.2.

Tab. 3-9 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.2

Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	127,6	128,6	0,8
2.	125,2	125,9	0,6
3.	123,8	124,4	0,5
4.	127,9	129,1	0,9
5.	129,4	131,3	1,5
6.	123,4	125,8	1,9
		Průměr	1,0



Graf 10 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2. po přetavení



PWI= 78%	Max Rising Slope		Soak Time 150-180C		Reflow Time /189C		Peak Temp	
front	1.35	-32%	40.40	-74%	83.49	78%	221.28	-2%
back	1.23	-38%	41.86	-73%	73.62	45%	220.96	-4%
chip	1.25	-38%	40.08	-75%	77.69	59%	223.13	12%
Delta	0.12		1.78		9.87		2.17	

Process Window:

Solder Paste: Easy Profile 256

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=2.0) (Calculate Slope over 20 Seconds)	0	2.5	Degrees/Second
Soak Time 150-180C	20	180	Seconds
Time Above Reflow - 189C	30	90	Seconds
Peak Temperature	208	235	Degrees Celsius

Description:

280, 272, 400, v=10

KIC ON BOARD

KIC
San Diego, CA USA

Profiled Using KIC 2000 Technology
Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

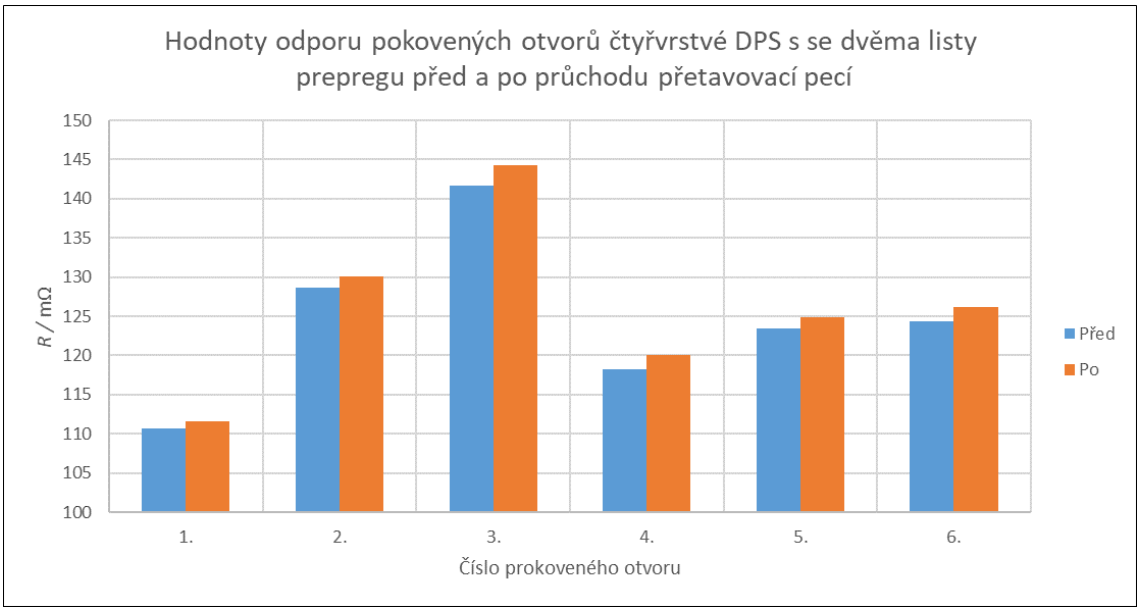
www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

KIC ON BOARD

Obr. 3-23 Změřený teplotní profil pro DPS č.3B

Tab. 3-10 Hodnoty odporů před a po průchodu přetavovací pecí pro DPS č.3B

Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	110,7	111,6	0,8
2.	128,7	130,1	1,1
3.	141,7	144,3	1,8
4.	118,2	120,1	1,6
5.	123,4	124,9	1,2
6.	124,3	126,2	1,5
		Průměr	1,3



Graf 11 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3B po přetavení

Výsledné hodnoty průměrového rozdílu odporů jsou velmi malé v porovnání s hodnotami změřenými při tepelném cyklování. Ovšem je třeba brát v potaz, že DPS sice prošly přetavovacím procesem při teplotě pro bezolovnaté pájení, ale pouze jednou. V porovnání s cyklováním, kdy DPS prošly menší tepelnou zátěží, ale 400 cykly.

Současně lze vidět malé rozdíly teplot mezi profily DPS na termočláncích, které byly způsobeny rozdílnou velikostí DPS a jejich stavbou. Jedná se pouze o malé hodnoty, které by neměli mít měřitelný vliv na změnu odporu. Při porovnání průměrných hodnot mezi jednotlivým typem DPS můžeme sledovat, že v případě šestivrstvé DPS č.1, dochází k nejmenší změně odporu 0,8 %. Druhá nejmenší změna je pozorovatelná u DPS č.2 1,0 % a jako třetí skončila DPS č.3B s 1,3 %. Ani v jednom případě nedošlo k překročení odporu 10 % a nepřekročily povolenou standardu IPC. Další zhodnocení výsledků bude pomocí mikrovýbrusu.

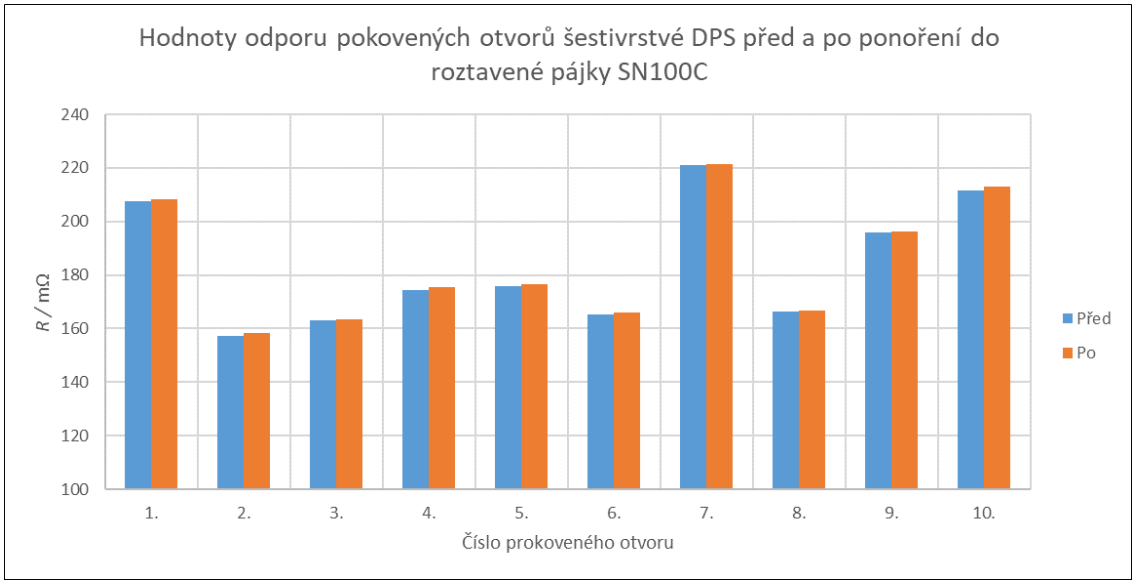
3.3.2 Zkouška na odolnost VV DPS v roztavené pájce

Mezi další nejklasičtější metody pájení součástek na DPS patří pájení vlnou, proto došlo k zatížení DPS při simulování pájení vlnou. Byla použita pájecí lázeň s roztavenou pájkou SN100C (t_t = 227 °C), která je v průmyslu nejčastěji používána pro bezolovnaté pájení. Opět se bude sledovat, jak vliv na pokovené otvory, tak na strukturu DPS. Došlo tedy k připájení vývodů na stejná místa, jako v případě testu při průchodu přetavovací pecí, aby mohlo dojít k porovnání výsledků z obou zatížení mezi sebou. V tomto případě bylo třeba zakrýt nepájivou maskou připájené kontakty pro měření odporu i pokovené otvory, aby nedošlo k zanesení roztavenou pájkou.

Z kilového množství pájky SN100C bylo pomocí pilky na železo odřezáno přibližně 0,750 g, aby došlo k zaplnění pájecí lázně Hakko FX-301B. Na zařízení byla nastavena teplota 260 °C, tedy teplota při klasickém strojním pájení vlnou. Jednotlivé DPS byly následně ponořeny do lázně tak, aby došlo k ponoření i měřených pokovených otvorů. Samotná doba ponoru byla 10 sekund. Tato hodnota byla zvolena, protože odpovídá normě IPC-TM-650 zkouška 2.6.8E pro testování teplotního zatížení pokovených otvorů. Nastavená teplota pájecí lázně 260 °C odpovídá testovací podmínce B, 260 °C ± 5 °C [500 °F ± 9 °F]. Změřené hodnoty a grafy lze vidět na Tab. 3-11, Tab. 3-12, Tab. 3-13, Graf 12, Graf 13, Graf 14.

Tab. 3-11 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.1

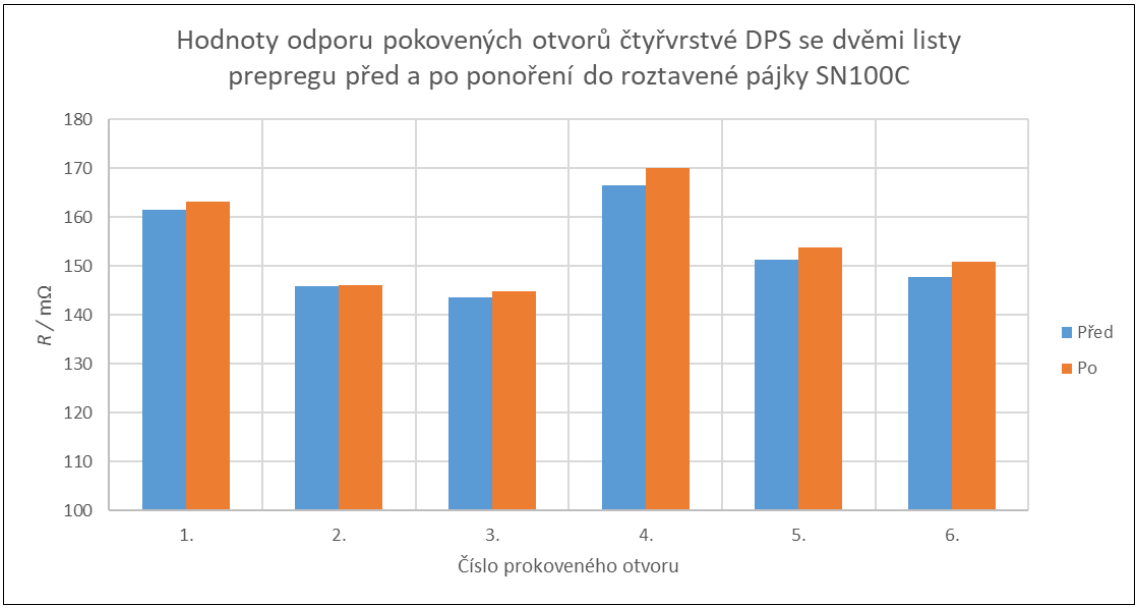
Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	207,4	208,1	0,3
2.	157,2	158,5	0,8
3.	163,1	163,5	0,2
4.	174,3	175,4	0,6
5.	175,7	176,5	0,5
6.	165,3	165,9	0,4
7.	221,1	221,3	0,1
8.	166,3	166,8	0,3
9.	195,8	196,4	0,3
10.	211,6	213,0	0,7
		Průměr	0,4



Graf 12 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.1. po ponoření do lázně

Tab. 3-12 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.2

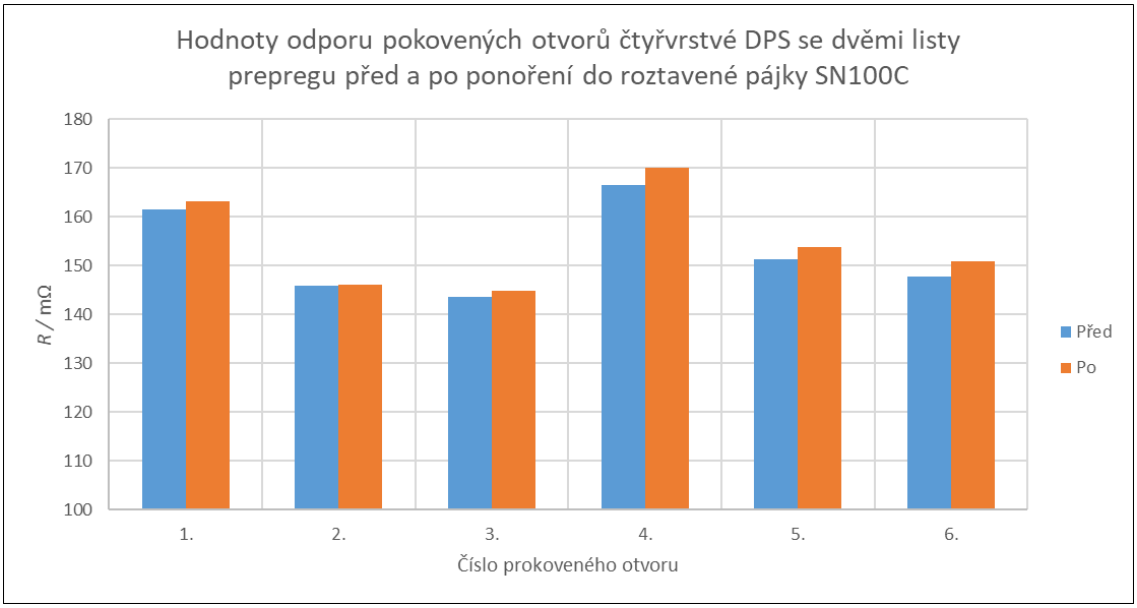
Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	121,0	121,5	0,4
2.	116,3	118,4	1,8
3.	120,6	121,1	0,4
4.	118,0	125,4	6,3
5.	129,4	130,2	0,6
6.	121,4	123,0	1,3
		Průměr	1,8



Graf 13 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.2. po ponoření do lázně

Tab. 3-13 Hodnoty odporů před a po ponoření do pájecí lázně pro DPS č.3A

Prokovený otvor	Před	Po	
	R / mΩ		Rozdíl v %
1.	161,6	163,2	1,0
2.	145,8	146,2	0,3
3.	143,7	144,8	0,8
4.	166,6	170,0	2,0
5.	151,4	153,8	1,6
6.	147,7	150,9	2,2
		Průměr	1,3



Graf 14 Změna odporu pokovených otvorů DPS č.3. po ponoření do lázně

I po ponoření celé DPS do roztavené pájky na dobu 10 sekund nedošlo ani jednou k překročení standardy IPC. Šestivrstvá DPS č.1 zaznamenala o polovinu menší zátěž než v případě průchodu přetavovací pecí. U DPS č.2 došlo k 0,8 % nárůstu oproti průchodu přetavovací pecí. DPS č.3A se hodnotou změny přibližuje velmi blízko ke změně při přetavení DPS č.3B. Změny hodnot odporu byly minimální, proto je třeba využít mikrovýbrusu pro přesnější zjištění vlivu teplotní zátěže na DPS.

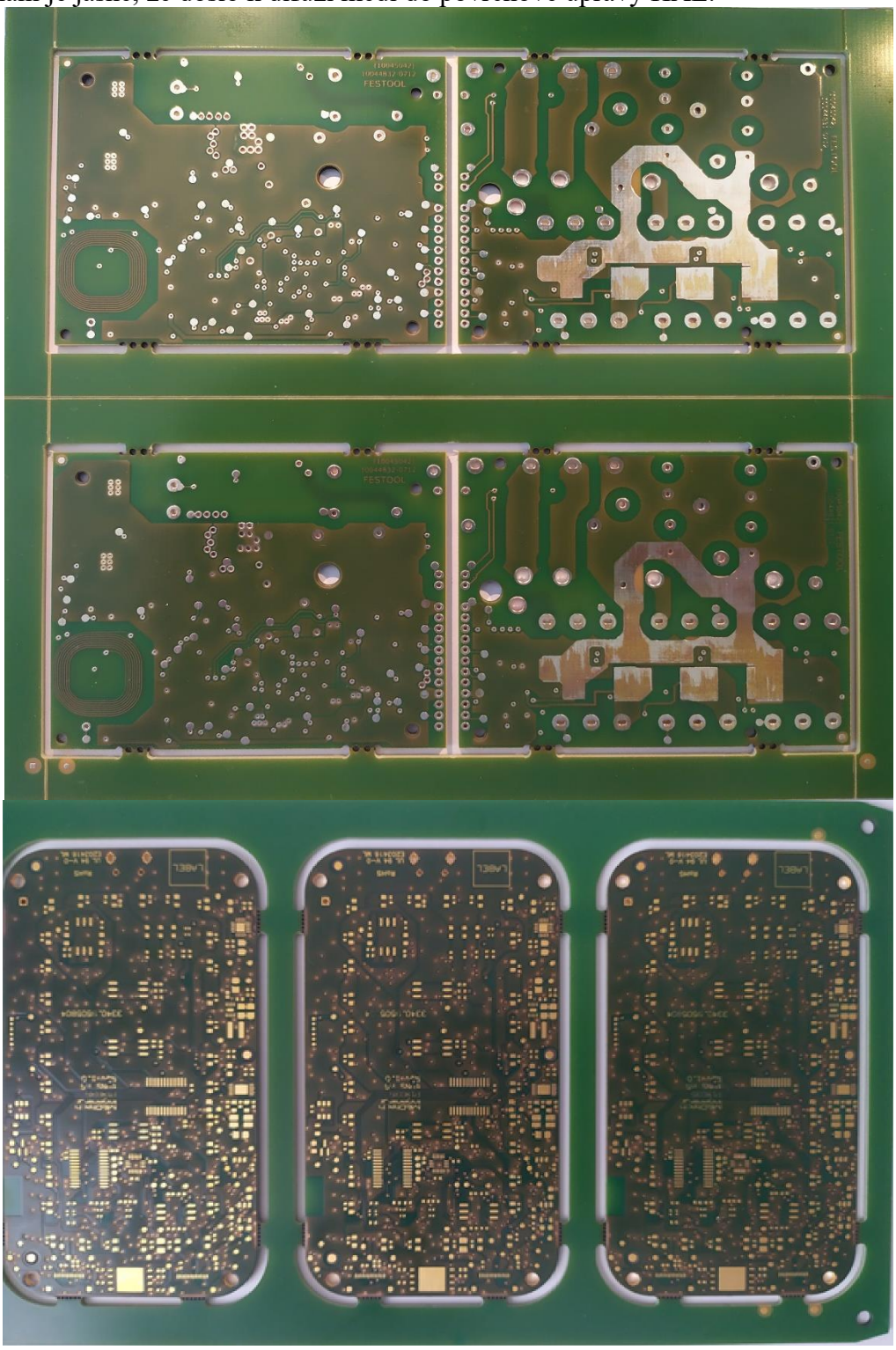
3.4 Elektrický test

Každá DPS prochází během a po výrobě různými kontrolami kvality, mezi tyto testy patří testování elektrického propojení vodivých spojů celé DPS. Výsledkem takovéhoto testování pak bývá jednoduché „Pass“ tedy DPS prošla, je vodivá a funkční nebo „Fail“, kdy došlo ke špatnému pokovení otvorů, přerušení spoje nebo jiné poruše. Firma ČeMeBo využívá zařízení ATG A5 Neo. Zařízení A5 Neo používá celkem 8 jehlových sond (4 nahoře, 4 dole), které souběžně měří vodivost propojení DPS. Pro správné testování je třeba celé schéma vodivých cest a pokovených spojů DPS. Zařízení využívá 4 kamery (rozlišení 13 µm/pixel) pro rychlé optické skenování vrchní a spodní části DPS. [35]

Část DPS byla vložena do cyklovací komory CTS T-40/25 při stejném teplotním profilu jako v případě předešlého cyklování (viz Graf 1), teda -25 °C až 125 °C. Pro toto cyklování bylo vybráno 5 kusů DPS č.1, 2 kusy DPS č.2, 2 kusy DPS č.3A a 2 kusy DPS č.3B. Po ukončení 600 cyklů se DPS přivezly do firmy ČeMeBo, kde byly následně otestovány na zařízení ATG A5 Neo. Všechny DPS testem vodivosti prošly a byly tím pádem funkční i po zvládnutí 600 teplotních cyklů.

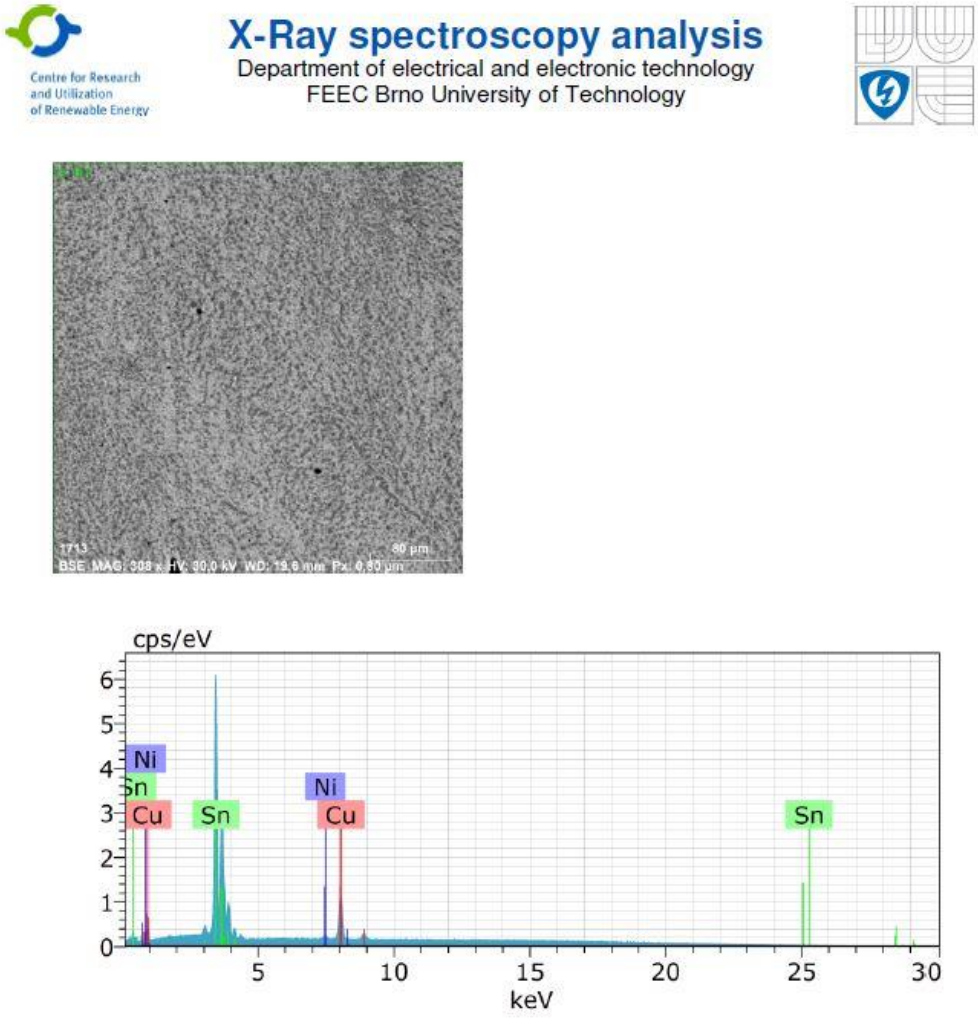
3.4.1 Prvková analýza povrchu po tepelném cyklování

U všech DPS došlo už od prvního pohledu k tepelnému namáhání materiálu. Permanentní nepájivá maska částečně ztmavla (Obr. 3-24). Fotky jasně ukazují, že došlo k většímu zbarvení bezolovnaté povrchové úpravy HAL na DPS č.3A. Při zběžném zkoumání je jasné, že došlo k difúzi mědi do povrchové úpravy HAL.



Obr. 3-24 DPS po tepelném stárnutí (nahoře DPS č.3A a č.3B, dole DPS č.1)

Důvodem mohla být chyba ve výrobním procesu, přesněji v procesu nanášení povrchové úpravy. Pravděpodobnějším důvodem, ale bylo nerovnoměrné proudění tepla v cyklovací komoře CTS T-40/25, jelikož na DPS č.3B nedošlo k tak silné změně. Společně s testovanými DPS byly v komoře umístěny ještě další vzorky, které mohly cirkulaci vzduchu a tepla ovlivnit. Pro zjištění množství mědi, která se difúzí dostala do povrchu, se využilo energiově disperzní spektroskopie (EDS) v enviromentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu (ESEM). Z výsledků lze jasně vidět, že povrchová vrstva tvořená převážně cínem 85,61 % a stopovým množstvím niklu 0,95 %, také obsahuje i velké množství mědi 13,44 % (Obr. 3-25).



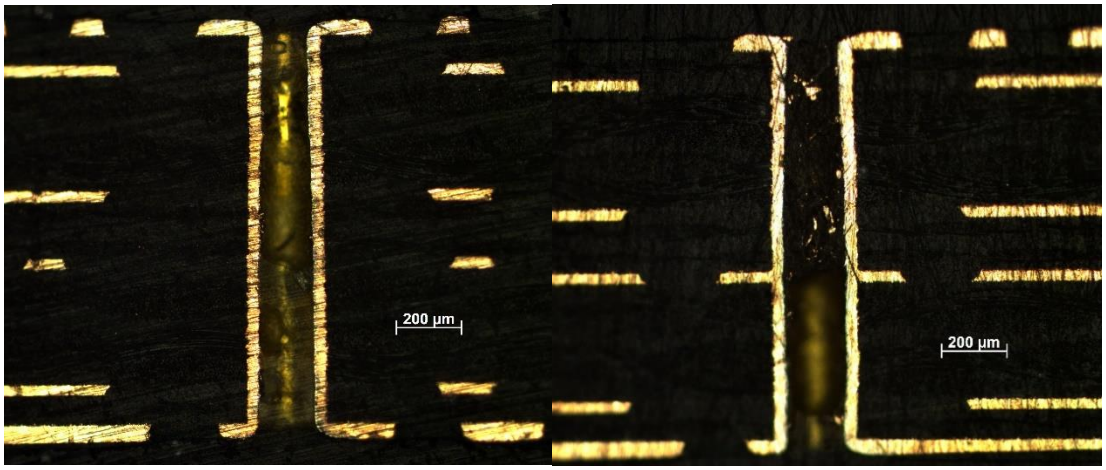
Obr. 3-25 EDS povrchové vrstvy DPS č.3A

3.5 Mikrovýbrus VV DPS a tloušťky pokovení otvoru

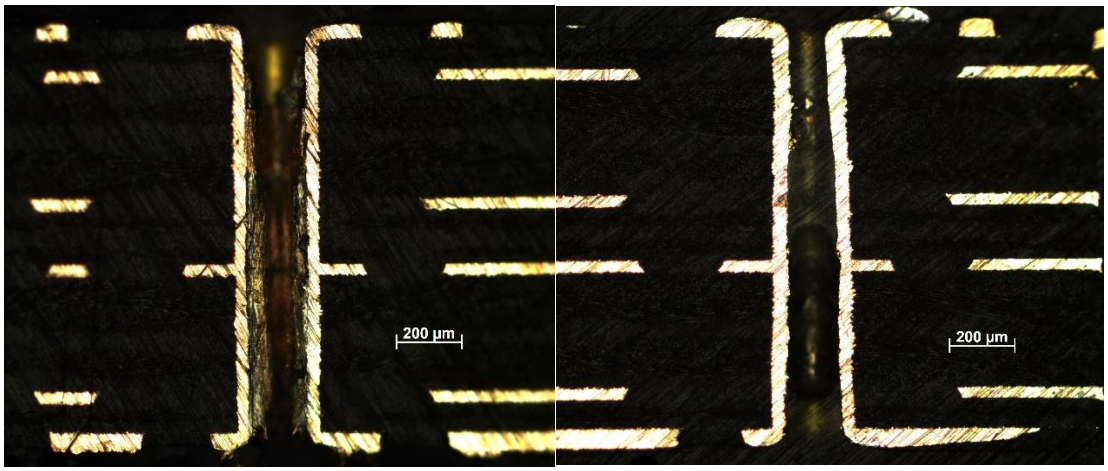
Sledování výsledků lze kromě měření parametrů DPS provést také pomocí vytvoření metalografického mikrovýbrusu vnitřní struktury. Mikrovýbrus slouží k pozorování kvality vrtání děr, kartáčování, kvality pokovení, napojení vnitřních vrstev na pokovení, tloušťky nepájivé vrstvy, pokovení nebo prepregu. Parametrů, které lze pozorovat je nepřeberné množství. Současně se však dá pozorovat i poruchy vzniklé zatížením a testováním DPS jako delaminace vnitřních vrstev prepregu a měděné fólie, přerušení vodivých vrstev, prasknutí vytvořené uvnitř pokoveného otvoru. Při výrobě mikrovýbrusu je důležité správně zvolit zkoumané místo z důvodu velikosti sledované plochy. Nejčastější volba bývá otvor vytvořený ve středu desky, s nejmenším možným průměrem. Tvorba mikrovýbrusu se dá rozdělit na několik kroků. Po vybrání místa dojde k vyříznutí daného místa pomocí elektrické nebo jiné pilky, případně pomocí frézování. S využitím brusného papíru nebo kotouče se vzorek zabrousí těsně pod sledovaný otvor. Pro přesné sledování je potřeba získat úhel 90° mezi broušenou plochou a stěnami vzorku, jelikož při jakékoliv nepřesnosti dojde k odchylce a deformaci měření. Následně upevníme vzorek do klipsny a vložíme ho do nádobky připravené na zalévání. Zalévací hmotu tvoří buď akrylátové nebo epoxidové pryskyřice. Oba materiály mají svoji výhodu i nevýhodu. Akrylátová pryskyřice má rychlejší dobu tvrdnutí, přibližně okolo 30 minut, proto se využívá, pokud potřebujeme výsledky v krátké době. Nevýhodou akrylátu je horší zatékání do menších otvorů. Naproti tomu má epoxidová pryskyřice lepší tekutost, ale jeho doba tvrdnutí se pohybuje až okolo 24 hodin. Po zatvrdnutí brousíme kotoučem o zrnitosti 180 a pokračujeme s postupně větší zrnitostí. Důležité je abychom sledovaný pokovený otvor nepřebrousili. Při sledování nepojení vnitřních vrstev se hodí využít leštění diamantovou pastu, ke sledování například tloušťky galvanické vrstvy stačí klasické broušení brusnými papíry.[36]

Při vytváření vzorků z testovaných DPS se využilo elektrické pilky pro nařezání vzorků. K obroušení vzorku nahrubo se využilo brusného papíru 180. Poté se vzorek vložil kolmo do kalíšku o vnitřní velikosti 300 mm. K zalití vzorku se použilo pryskyřice pro zalévání za studena KEM 30. Zalévací hmota se skládá ze dvou hlavních složek zalévací hmoty a tvrdidla, které se míchají v poměru 2:1 (prášek ku kapalině). K vytvrzení stačí přibližně hodina.

Po zatvrdnutí se vzorek vložil do brousící hlavy Saphir 530. Při broušení se podle potřeby měnila velikost tlaku na vzorek a doba broušení. Výsledné vzorky se na závěr podrobily pozorování v optickém mikroskopu. Mikrovýbrus se udělal pro všechny DPS č.1, č.2 a č.3, pro DPS bez jakéhokoliv zatížení, se zatížením po 600 cyklech, po průchodu přetavovací pecí a po ponoření do pájecí lázně, celkem tedy 12 vzorků.



Obr. 3-26 Mikrovýbrus pro DPS č.1 před tepelným zatížením (vlevo) a po 600 cyklech (vpravo)



Obr. 3-27 Mikrovýbrus pro DPS č.1 po průchodu přetavovací pecí (vlevo) a po ponoření do pájecí lázně (vpravo)

Tloušťka galvanické mědi na stěnách pokoveného otvoru u šestivrstvé DPS č.1 se pohybuje od 29,57 µm do 37,13 µm a je v souladu se standardními doporučenými tloušťkami pokovení podle normy IPC-6012B. Norma IPC-6012B se zaměřuje na specifikaci způsobilosti a funkčnost neohebných DPS. Maximální změřené posunutí v osách X a Y, ke kterému dochází při sesouhlasení vrstev je 35 µm. Tato hodnota naprosto vyhovuje běžným aplikacím.

Pro čtyřvrstvé DPS se pohybuje tloušťka galvanické mědi u pokovených otvorů od 17,19 do 21,32 µm. Tato hodnota je lehce pod hranicí limitu, který má být minimálně 18 µm pro nejužší místo v pokoveném otvoru pro normu IPC-6012B. Jak lze vidět na Obr. 3-26 a Obr. 3-27, nedošlo u šestivrstvé DPS k žádným pozorovatelným změnám. Z toho lze usoudit, že degradace, která způsobila změnu odporu byla pořád dostatečně malá, než aby způsobila nějaké viditelné poškození. Průchod přetavovací pecí a ponoření do roztavené pájky, také nezpůsobilo viditelné poškození struktury. Stejně dopadlo i pozorování DPS č.2 a DPS č.3 (viz příloha). [37]

Pro vznik delaminace, odchlípnutí nebo naprasknutí vnitřní struktury je potřeba větší zatížení, tedy opakované ponoření do pájky nebo průchod pecí. Podle praktického výzkumu odolnosti pokovených otvorů a struktury DPS tvořeného laminátem FR4 [34]

dochází k takovéto degradaci po zatížení okolo 6 přetavovacími procesy. Takováto zátěž je však už nadprůměrná a k vícenásobnému strojnímu pájení celé DPS nedochází v takové míře.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala výrobou vícevrstvých DPS. V teoretické části byla uvedena rešerše na materiály používané při výrobě, jejich proces výroby, složení a využití. Další část se zaměřila na technologickou část výroby DPS, převážně na proces a zařízení potřebné při laminaci. Proces laminace lze rozdělit na vrstvení a sesouhlasení jednotlivých vrstev výsledné DPS a na samotný laminační proces.

V praktické části je popsáno testování DPS poskytnutých firmou ČeMeBo. Zkoušky se zaměřují převážně na vliv změn teplot, které simulují stárnutí DPS. Změny teploty mají vliv jak na vodivost pokovených otvorů a cest, ale také na samotnou strukturu DPS. Velká teplotní změna může u tenčích materiálů vést k prasknutí. Prvním krokem bylo testování odolnosti DPS vůči teplotním změnám, kdy se pomocí pece a chladícího zařízení měnila okolní teplota DPS o 139 °C za krátkou dobu 6 minut. Tímto cyklem se nechaly DPS projít celkem 10krát. Tímto procesem se vyzkoušelo měření velmi nízkých odporů pomocí čtyřbodové metody a odolnost pokovených otvorů vůči prasknutí.

Dalším krokem bylo připájení většího množství vývodů, které prošly přechozí teplotní zátěží, pro přesnější měření změny odporů pokovených otvorů. Desky se nechaly cyklovat a po 0, 100, 200 a 400 cyklech došlo ke změření odporu. Výsledné hodnoty se měřily podle standardy IPC, kdy při zvýšení odporu o 10 % dojde k zastavení testu. U DPS č.2 došlo ke zvýšení odporu již po prvních 100 cyklech, u DPS č.3B až po 200 cyklech. Důvodem mohlo být nedostatečné množství vzorků pro porovnání DPS č.2 a DPS č.3B, jelikož hodnoty z DPS č.3A byly neprůkazné, proto se s tepelným stárnutím pokračovalo.

V dalším tepelném cyklování se vybraly pouze otvory o nejmenší možné velikost na DPS. Pro šestivrstvou DPS se tedy testovalo pouze otvory o 200 μm a na čtyřvrstvých DPS se testoval otvor 350 μm. Výsledné hodnoty byly přesnější díky očištění měděných vývodů od oxidů vzniklých při cyklování před každým měřením odporu. V měření došlo k překročení hodnoty 10 % až po 400 cyklech, a to u obou DPS č.2 a č.3B. Současně vyšlo, že DPS č.2 byla odolnější vůči teplotnímu cyklování, z 10 testovaných pokovených otvorů na DPS, 3 stále splňovaly standardu IPC i po 400 cyklech. Oproti tomu u DPS č.3B po 400 cyklech neprošly všechny. Rozdíl mezi DPS spočívá v použitém množství listů prepregu. U DPS č.2 mohla být větší odolnost způsobena větší stabilitou vnitřních vrstev. Naopak u DPS č.3B mohlo dojít k nedokonalému propojení většího množství listů prepregu, to mohlo vést k menší stabilitě DPS a ve výsledku k rychlejší degradaci pokovených otvorů. Dalším faktorem, který mohl hrát roli je rozdílná tloušťka vnitřního jádra, které je u DPS č.2 tvořeno 6 listy prepregu, místo 4 listů u DPS č.3B. Větší tloušťka jádra a menší množství epoxidu dodává DPS lepší pevnost a ta má za následek větší odolnost. Při samotném zahřátí dochází u DPS s větším jádrem k menšímu pnutí a námaze pokovených otvorů. Při sníženém množství epoxidu je zase třeba hlídat, zda dojde ke správnému propojení všech vrstev během výrobního procesu. Šestivrstvá DPS odolala nejlépe, ale je pravděpodobné, že při dalším cyklování, by také přesáhla hranici 10 %.

Pro otestování vlivu pájení přetavením se zvolil teplotní profil pro bezolovnatou pájku. Na DPS se připájely vývody a pokryly snímatelnou nepájivou maskou. Všechny tři DPS se nechaly projít přes přetavovací pec. Stejný proces se provedl i pro simulaci strojního pájení, kde se DPS ponořily na 10 sekund do bezolovnaté pájky SN100C

s teplotou 260 °C podle normy IPC-TM-650. Výsledkem byla jen malá změna odporu u všech testovaných DPS.

Dále se rozhodlo pro využití testovacího zařízení pro funkčnost DPS používaným ve firmě ČeMeBo. Zbylé DPS byly vloženy do cyklovací komory na stejný teplotní profil jako předtím, ale byly zatíženy po dobu 600 cyklů. Následně byly DPS odvezeny do firmy, kde se otestovalo jejich vodivé propojení na zařízení ATG A5 Neo. Všechny DPS testem prošly a byly tedy plně funkční, ale došlo ke zbarvení povrchu. Nepájivá maska, povrchová úprava i samotný základní materiál částečně změnily barvu. Pro DPS č.1 byly změny nejmenší, povrchová úprava ENIG pouze lehce ztmavla. V porovnání s DPS č.2, č.3A a B, kdy částečně došlo i k difúzi mědi do povrchu, převážně u DPS č.3B, kde hodnota mědi dosahovala až 13,4 %. Důvodem byla samozřejmě větší odolnost povrchové úpravy ENIG oproti bezolovnaté HAL.

Pro porovnání vnitřní struktury DPS se rozhodlo pro použití mikrovýbrusu pro lepší porovnání změn uvnitř DPS. Výbrus byl vytvořen z DPS bez teplotní zátěže, z tepelně cyklované DPS a z DPS po průchodu přetavovací pecí i po ponoření v lázni s roztavenou pájkou. Pozorování pod optickým mikroskopem, ale ukázalo, že i přes změřenou degradaci nevznikly žádné větší poškození vnitřní struktury. Pro lepší sledování vzniku prasklin a delaminace by bylo třeba zatížit DPS nad rámec klasických podmínek, ke kterým dochází při klasickém strojním pájení a využití DPS v cílovém prostředí. Shrnutí testů DPS od firmy ČeMeBo prokázalo, že čtyřvrstvé a šestivrstvé DPS vydrží základní i náročnější zatížení a dovedou stále plnit funkci. Základním zatížením DPS se rozumí část osazovacího procesu, kdy dochází k teplotnímu šoku při zahřátí až na teplotu potřebnou pro bezolovnaté pájení. Náročnější zatížení pak znamená vystavení DPS 600 cyklům při teplotě od 125 °C do -25 °C, která simuluje zatížení při provozu DPS.

Literatura

[1] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M.: Montážní a propojovací technologie. Brno: 2014.

[2] SZENDIUCH, Ivan. Mikroelektronické montážní technologie. Brno: VUTIUM, 1997. ISBN 80-214-0901-0.

[3] PCB Manufacture [Online]. Slideshare, 2015 - [cit. 2019-12-16]. Dostupné z https://www.slideshare.net/clementksang/pcb-manufacturing-52259456

[4] HUSCHKA, M., HAGGE, J., MATHER, J.C., ROSS, M.W.: A Comprehensive Guide to the Design and Manufacture of Printed Board Assemblies – Volume 2.

[5] SHRIVASTAVA, A., Introduction to Plastics Engineering, [Online]. Reasearch Gate, 2018 – [cit. 2020-8-1]. Dostupné z https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/glass-transition-temperature

[6] DE 104 [Online]. Isola GmbH - [cit. 2020-8-6]. Dostupné z http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/DE104-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-0317.pdf

[7] Isola 400 [Online]. Isola GmbH – [cit. 2019-12-10]. Dostupné z https://www.isola-group.com/wp-content/uploads/data-sheets/is400.pdf

[8] FR 408 [Online]. Isola GmbH – [cit. 2020-8-6]. Dostupné z https://www.isola-group.com/wp-content/uploads/data-sheets/fr408.pdf

[9] IS 415 [Online]. Isola GmbH – [cit. 2020-8-6]. Dostupné z http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/IS415-laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-0317.pdf

[10] TRINE, R., Multilayer Lamination Methods For PTFE-Based PCBs [Online]. TACONIC, 2005 - [cit. 2019-12-10]. Dostupné z http://www.taconic-add.com/

[11] BROWNE, J., Picking Materials For Multilayer PCBs [Online]. Reasearch Gate, 2011 – [cit. 2019-12-10]. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/296765271_Picking_Materials_For_Multilayer_PCBs?fbclid=IwAR1EIVrxHBn2g1mpqg2TI0X0-nJWItCSOZDZb_v32Kj0-Zb185ocH0aUR0E

[12] PCB Fusion and Lamination Technology Process [Online]. RAYMING PCB and Assembly [cit. 2019-12-10]. Dostupné z https://www.raypcb.com/pcb-fusion-and-lamination-technology-process/

[13] YAM, Kit L. The Wiley encyclopedia of packaging technology. 3rd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-08704-6.

[14] CAMPBELL, F., C., Autoclave [Online]. Science Direct. 2004 - [cit. 2019-12-10] Dostupné z https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/autoclave

[15] CAMPBELL, F., C., Autoclave pressure [Online]. Science Direct. 2004 - [cit. 2019-12-10] Dostupné z https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/autoclave-pressure

[16] MLP-25M [Online]. Cedatec - [cit. 2020-8-6]. Dostupné z https://www.cedatec.it/mlp-25m/

[17] Lisování vícevrstvých DPS [Online]. Gatema PCB – [cit. 2020-8-6]. Dostupné z https://www.gatemapcb.cz/technologie?detail=lisovani-vicevrstvych-dps_6
[18] Lisování [Online]. Prago Board – [cit. 2020-8-6]. Dostupné z http://www.pragoboard.cz/lisovani
[19] STŘELEC J., Ishikawa diagram [Online]. Vlastní cesta, 2012 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z https://www.vlastnicesta.cz/metody/ishikawa-diagram-1/
[20] KOTHANDAPANI, T., Cause and Effect diagram to find the defect in PCB [Online]. Research Gate, 2004 - [cit. 2019-12-10]. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/267378941_ENHANCEMENT_OF_QUALITY_OF_THE_PROCESSES_USING_STATISTICAL_TOOLS-A_REVIEW
[21] Laminate and Prepreg Manufacturing [Online]. Isola GmbH, 2019 – [cit. 2019-12-10]. Dostupné na https://www.isola-group.com/wp-content/uploads/Understanding-Laminate-Prepreg-Manufacturing.pdf
[22] Termovizní kamera FLIR I7 [Online]. Termogram, 2011 - [cit. 2019-12-17]. Dostupné z http://www.termogram.cz/termovizni-kamera-flir-i7
[23] JANSA, V. Teplotní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů.Brno: Vysoké učení technické v Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..
[24] Biologický inkubátor Friocell 55 ECO [Online]. Ilabo, 2020 - [cit. 2020-8-1]. Dostupné z https://www.ilabo.cz/firmy/bmt/inkubatory-klimaticke-komory/biologicky-inkubator-chlazeny-friocell/friocell-55-eco/
[25] STRUČOVSKÝ, A., Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE. Brno: Vysoké učení technické vBrně, Fakulta elektrotechnikya komunikačních technologií. Ústavelektrotechnologie, 2013. 62s., 5s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
[26] MALOUŠEK a spol.Teplotní profil průběžné pece. Praha: 2007.
[27] Pájecí lázeň Hakko FX-301 [Online]. Hakko, [cit. 2020-8-1]. Dostupné z Bhttps://www.hakko.cz/eshop/product/pajeci-lazen-hakko-fx-301b/
[28] Grinding and polishing machine Saphir 530 [Online]. ATM, 2014 - [cit. 2020-8-1]. Dostupné z http://www.metalco.cz/user/upload/PDF%20soubory/Bro%C5%BEury/Brusky%20%20le%C5%A1ti%C4%8Dky/Saphir%20530_EN.pdf
[29] JEDEC Standard JESD22-A104C: Temperature Cycling. Jedec Solid State Technology Association. Arlington: 2005.
[30] SZENDIUCH, I., Buršík, M.: Mikroelektronika a technologie součástek, Měření vrstvového odporu. Brno: 2008.
[31] Teplotní závislost odporu kovových vodičů [Online]. Odborné časopisy, Elektro, 2008 - [cit. 2019-12-17]. Dostupné z http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36489.pdf
[32] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL, [Online]. 2011 - [cit. 2020-8-4] Dostupné z https://www.ipc.org/TM/2.6.8E.pdf

[33] KLAUZ, M., IST umožňuje prokázat kvalitu vyrobené holé DPS, [Online]. DPS Elektronika od A do Z, 2019 - [cit. 2020-8-4]. https://www.dps-az.cz/vyroba/id:58368/ist-umoznuje-prokazat-kvalitu-vyrobene-hole-dps

[34] SMETANA J., BIRCH, B., Reliability Testing of PWB Plated Through Holes in Air-to-Air Thermal Cycling and Interconnect Stress Testing after Pb-free Reflow Preconditioning [Online]. Science Direct. 2011 - [cit. 2020-8-4] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/284162727_Reliability_Testing_of_PWB_Plated_Through_Holes_in_Air-to-Air_Thermal_Cycling_and_Interconnect_Stress_Testing_after_Pb-free_Reflow_Preconditioning

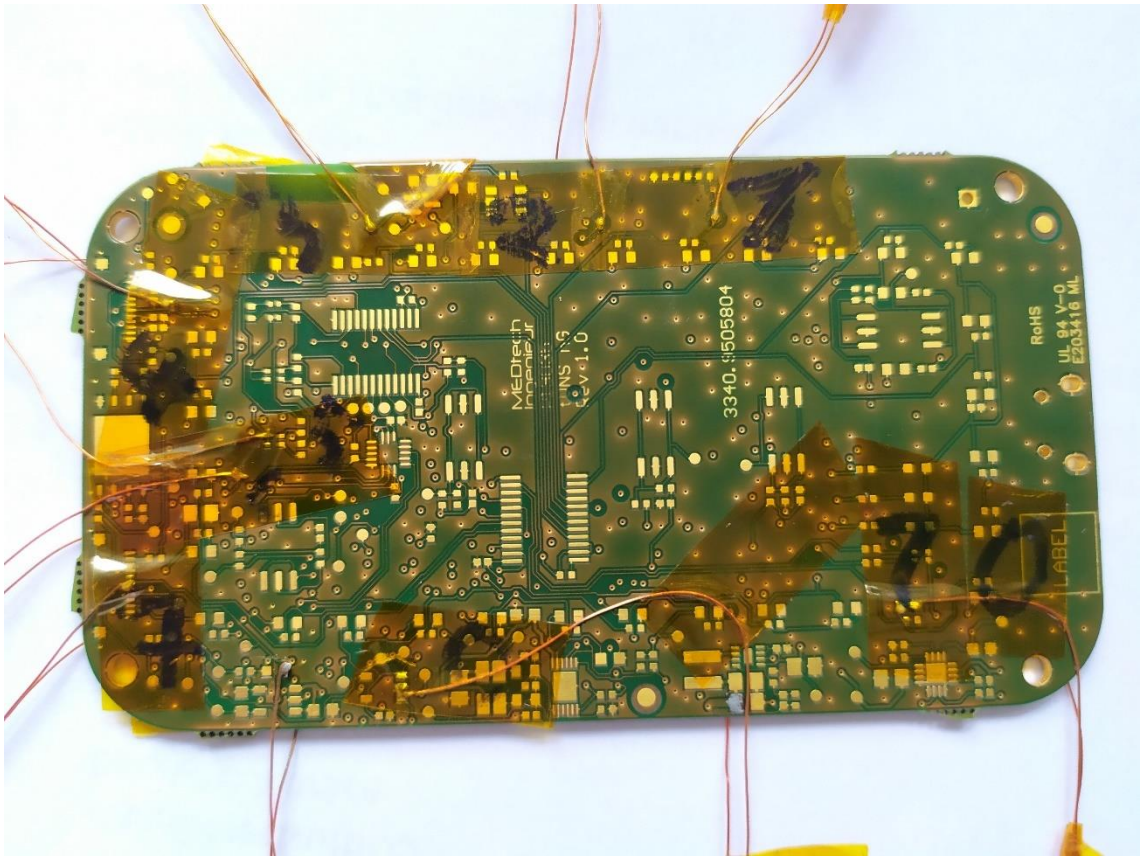
[35] ATG – Luther and Maelzer, A5 Neo Flying Probe Test Systém For Rigid and Flexible Boards [Online]. ATG – LM, 2018 - [cit. 2020-8-4]. Dostupné z https://atg-lm.com/A5Neo

[36] TOBOLA, M., Metalografický výbrus DPS: inspekční a vývojová metoda [Online]. DPS Elektronika od A do Z, 2011 - [cit. 2020-8-4]. Dostupné z https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6203/metalograficky-vybrus-dps-inspekcni-a-vyvojova-metoda

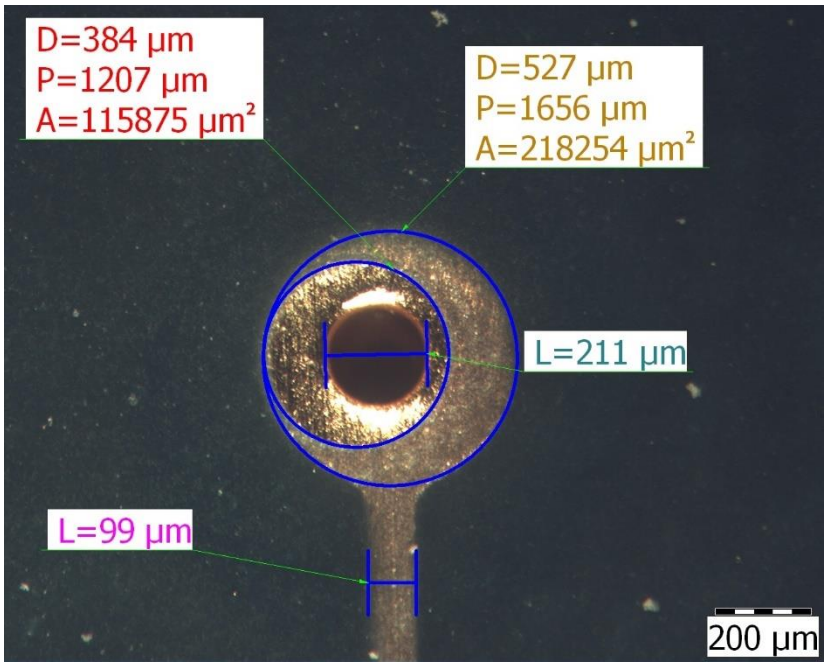
[37] IPC-6012B Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards [Online]. 2006 - [cit. 2020-8-4] Dostupné z https://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/6012B-Amendment-1(12-06).pdf

PŘÍLOHY

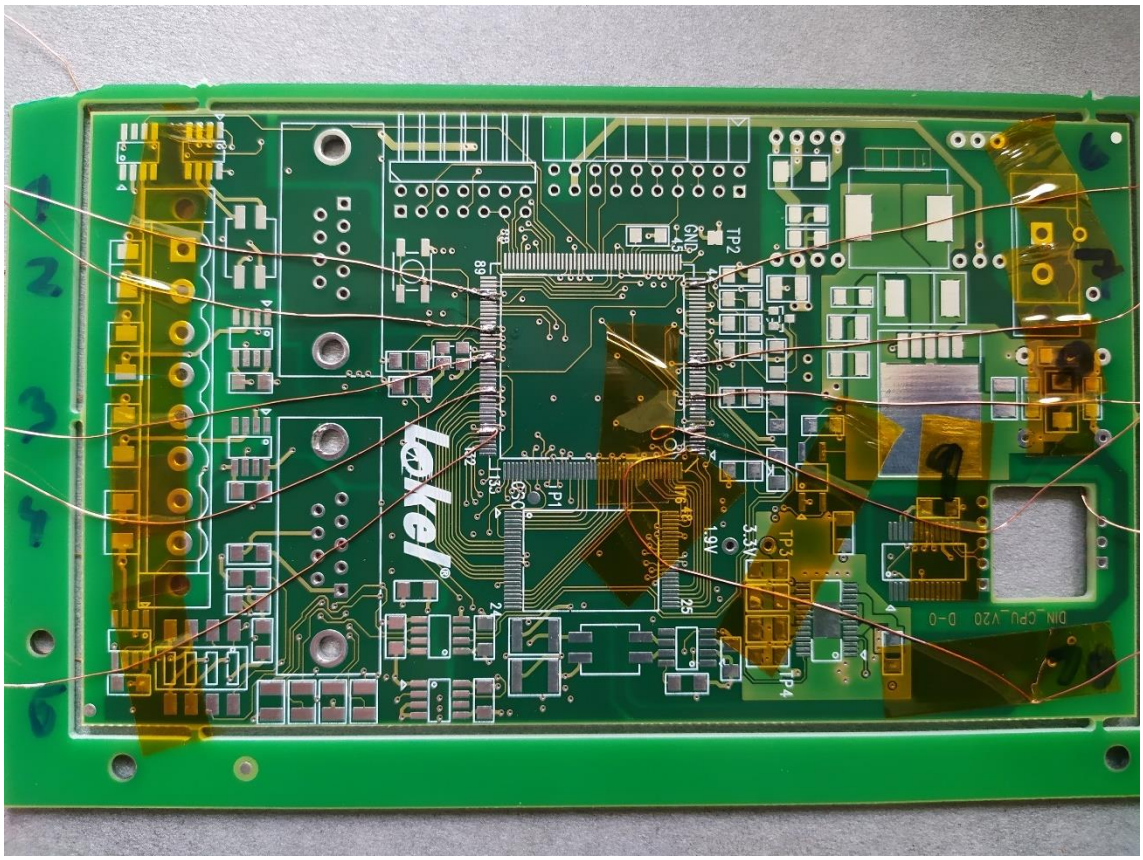
Příloha 1 - DPS č.1 s připájenými vývody



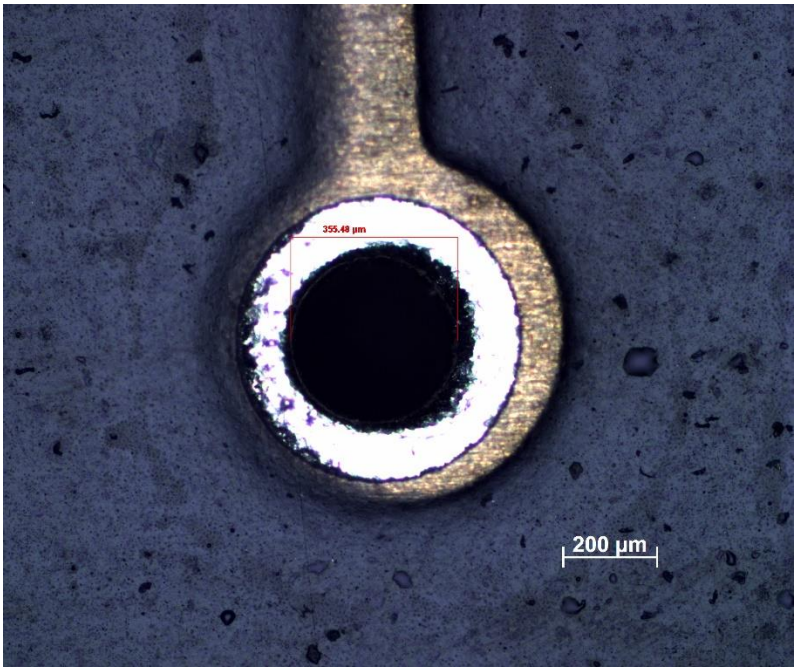
Příloha 2 - DPS č.1 pokovený otvor



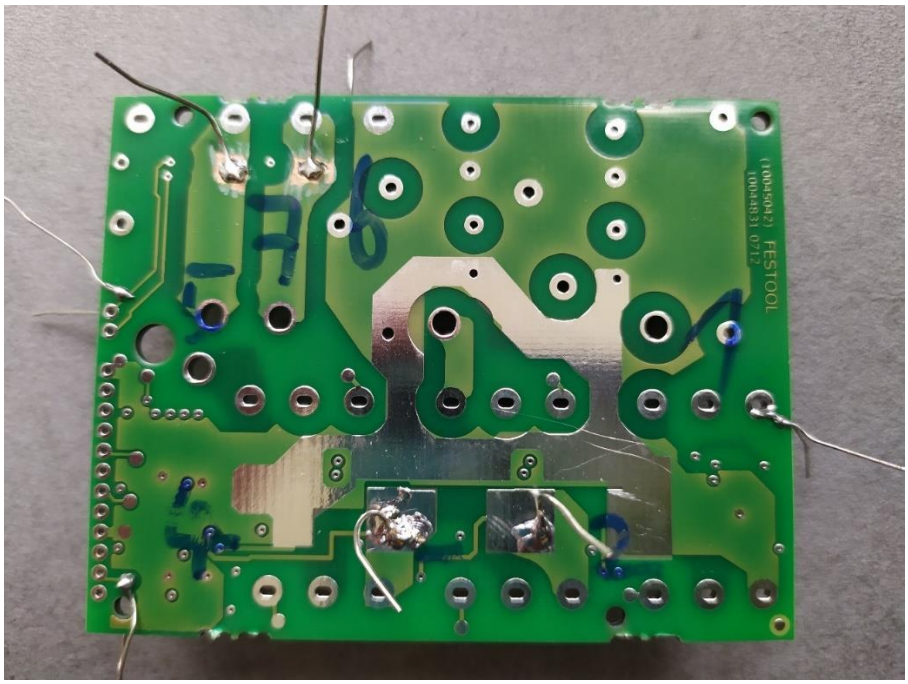
Příloha 3 - DPS č.2 s připájenými vývody



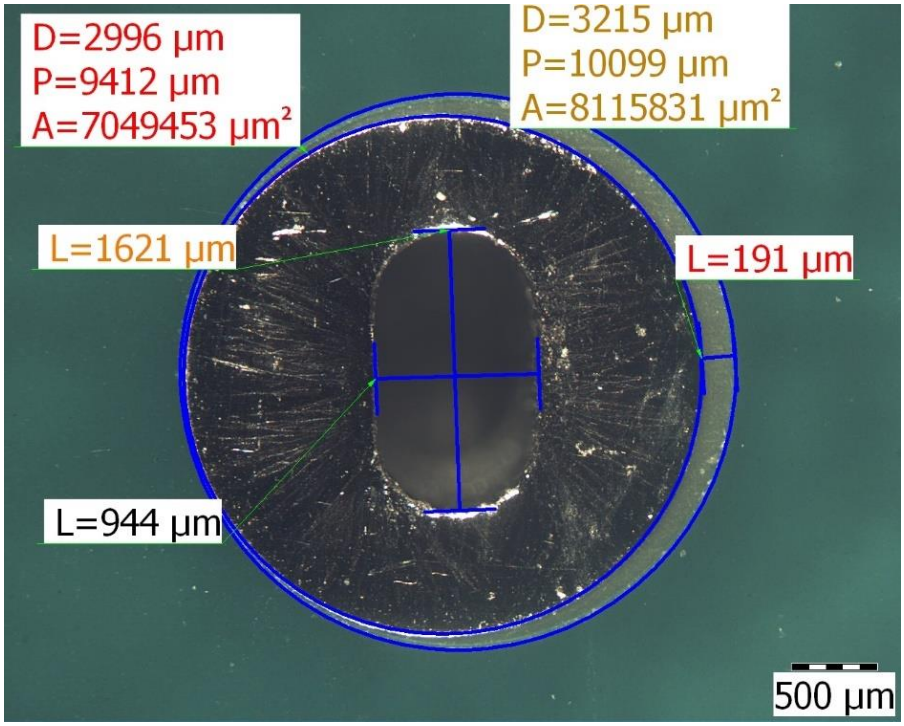
Příloha 4 - DPS č.2 pokovený otvor



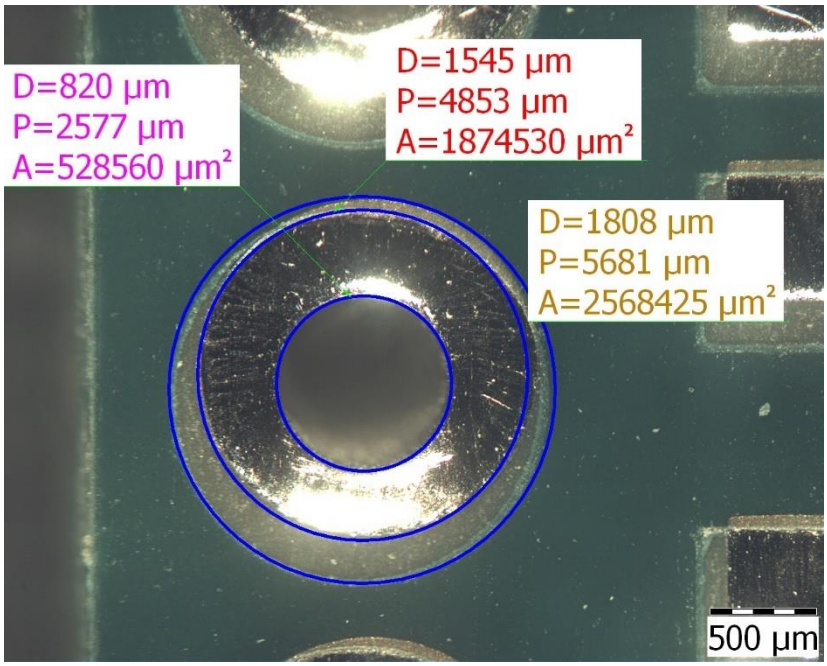
Příloha 5 - DPS č.3A s připájenými vývody



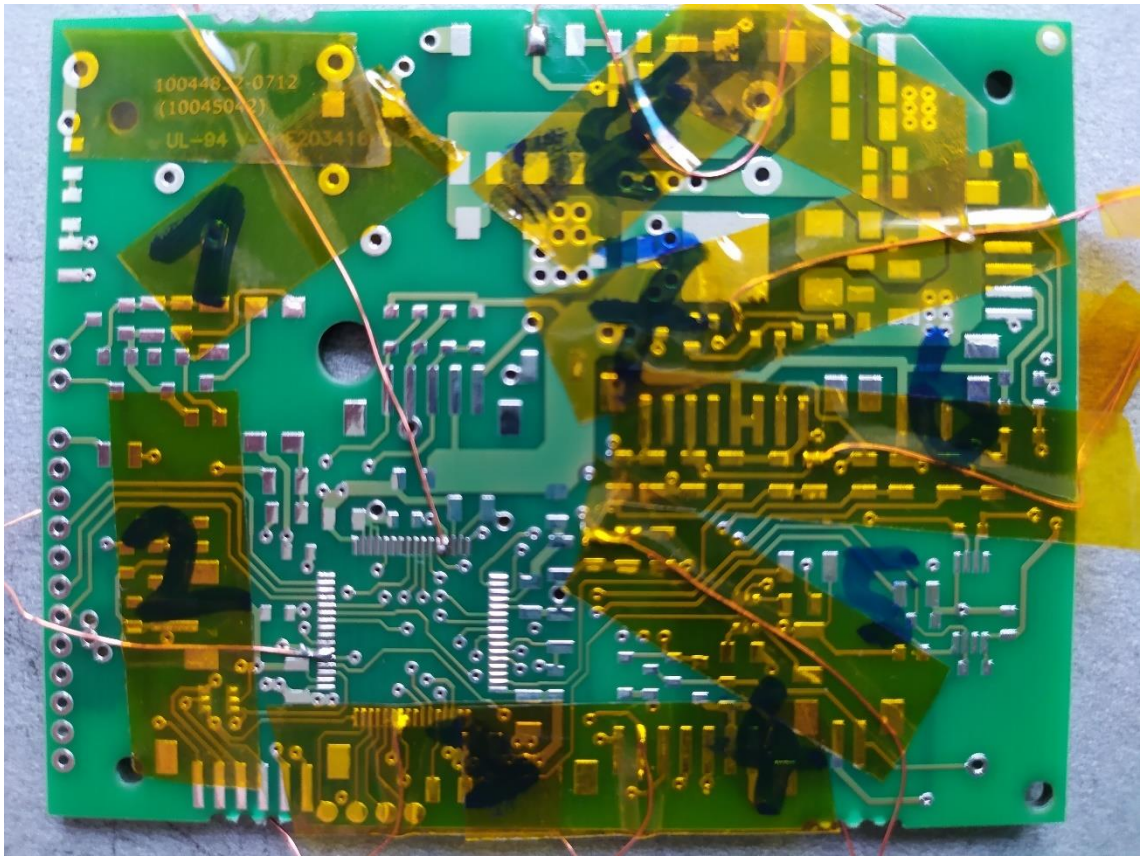
Příloha 6 - DPS č.3A elipsovitý pokovený otvor



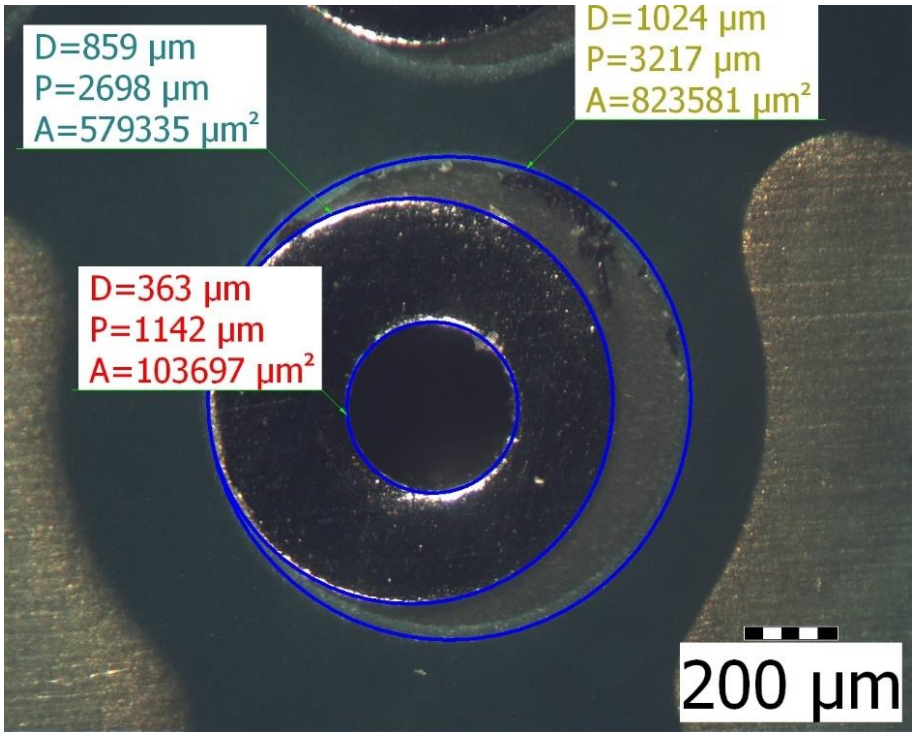
Příloha 7 - DPS č.3A pokovený otvor



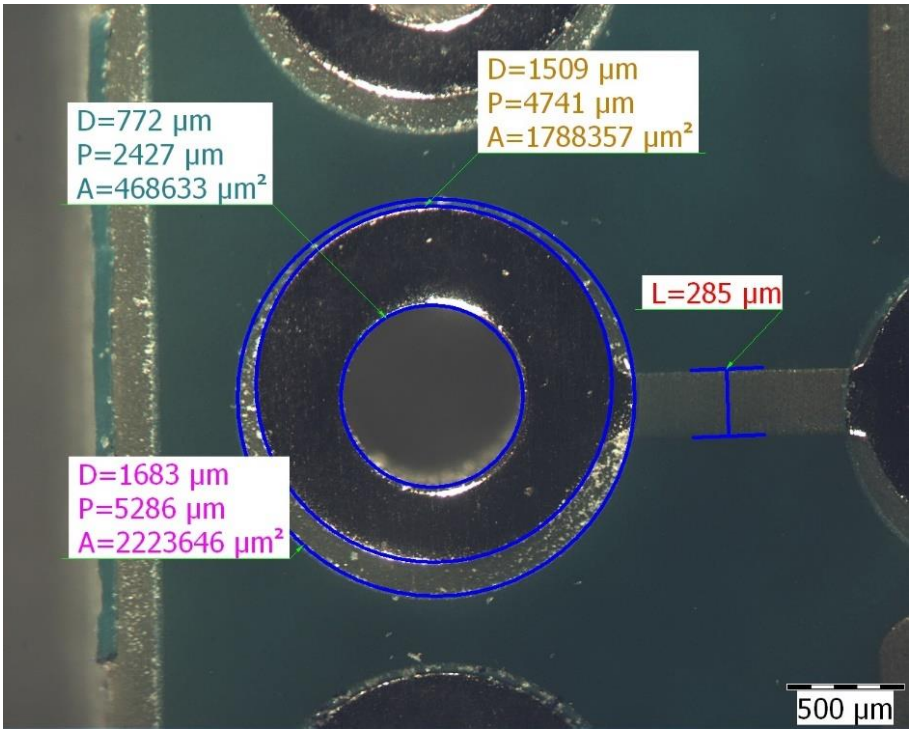
Příloha 8 - DPS č.3B s připájenými vývody



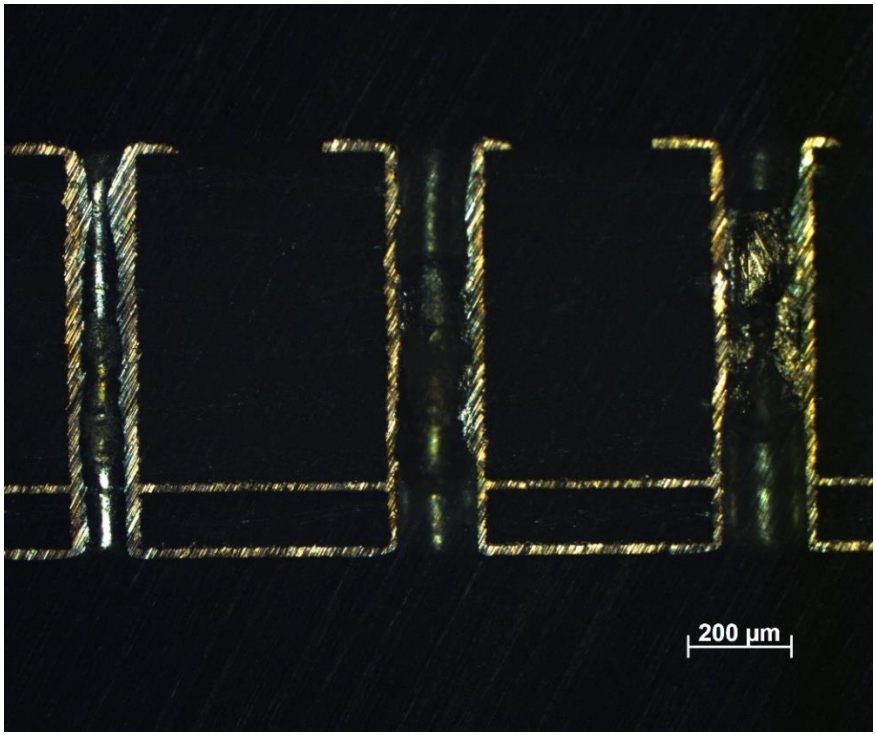
Příloha 9 - DPS č.3B pokovený otvor č.1



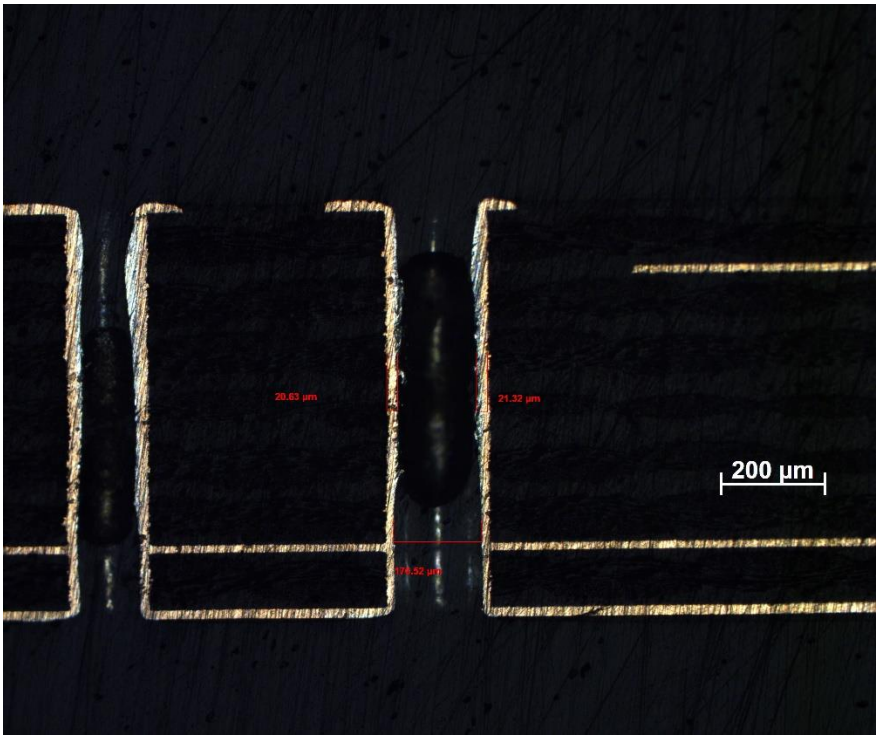
Příloha 10 - DPS č.3B pokovený otvor č.2



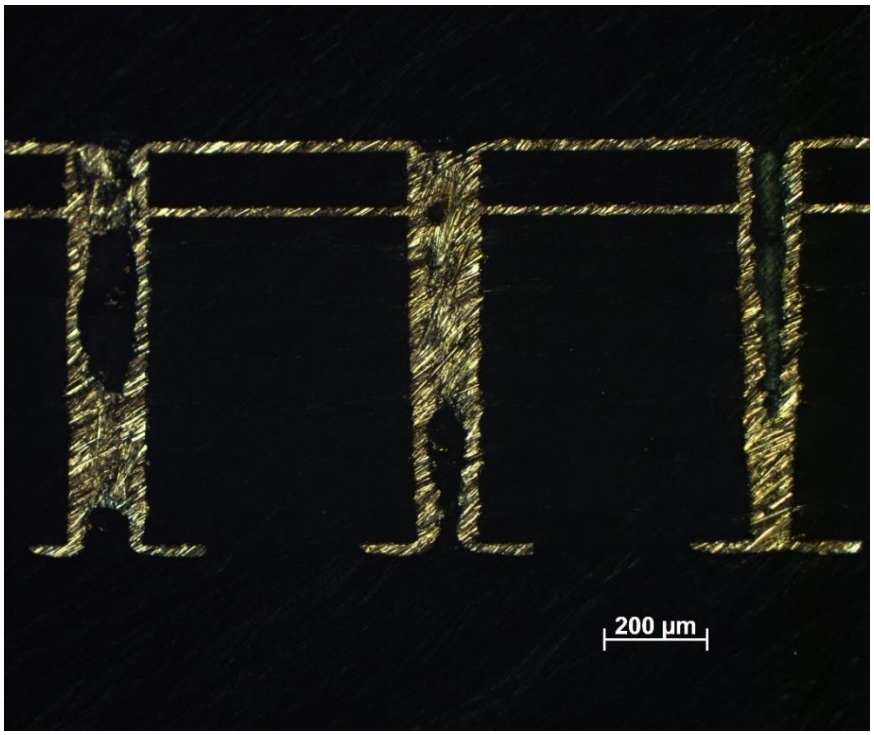
Příloha 11 - DPS č.2 mikrovýbrus bez tepelného zatížení



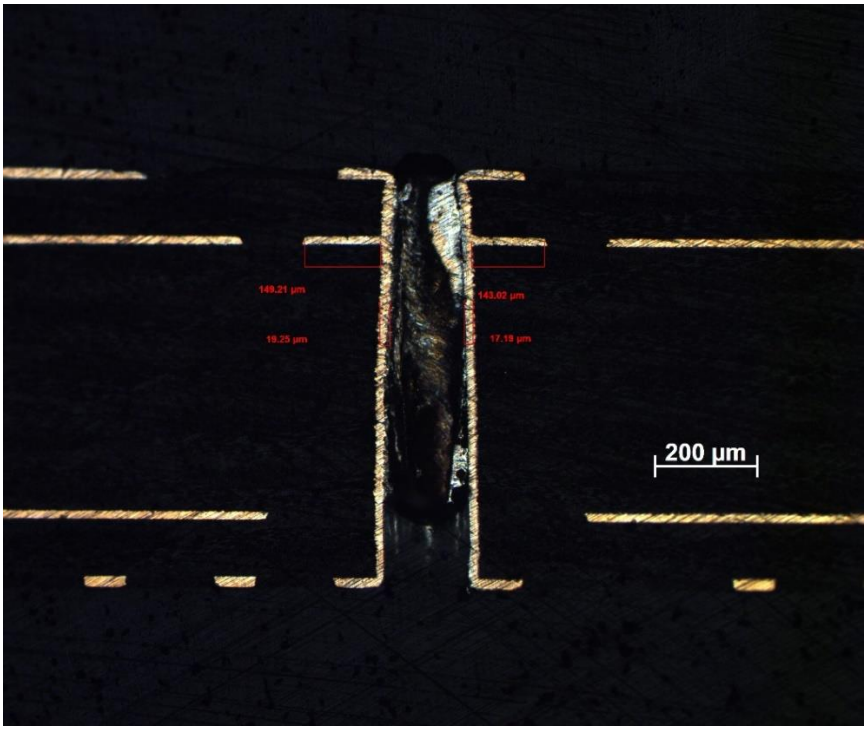
Příloha 12 - DPS č.2 mikrovýbrus po 600 cyklech



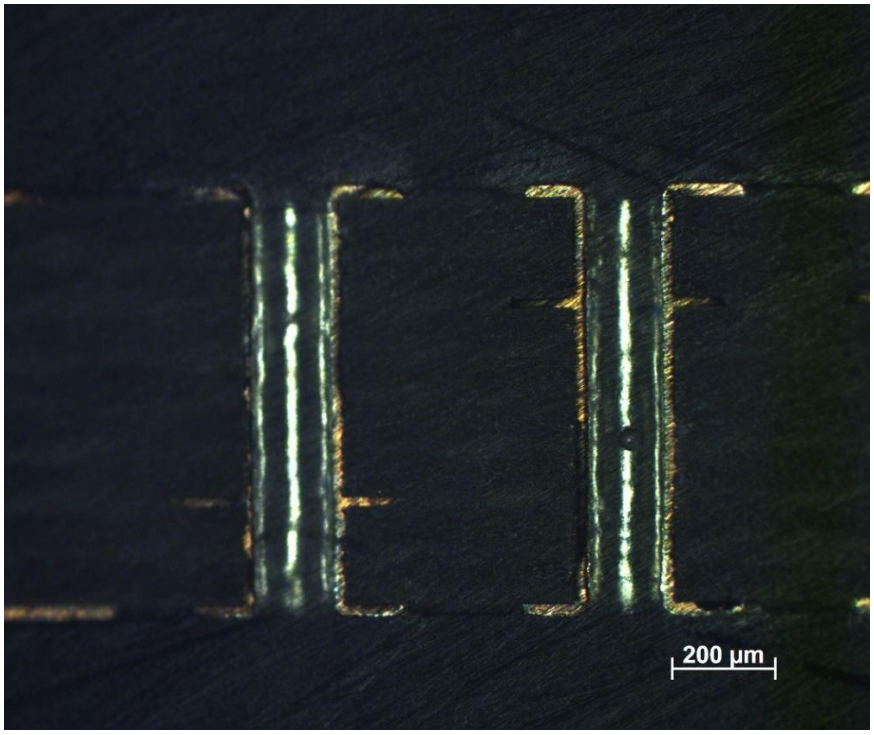
Příloha 13 - DPS č.2 po průchodu přetavovací pecí



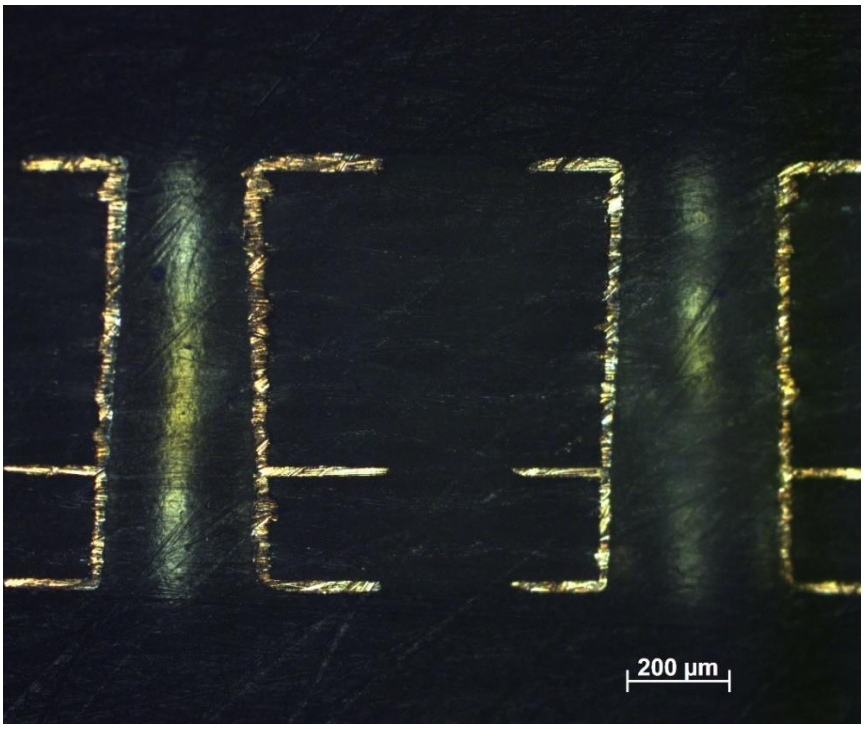
Příloha 14 - DPS č.2 po ponoření do roztavené pájky



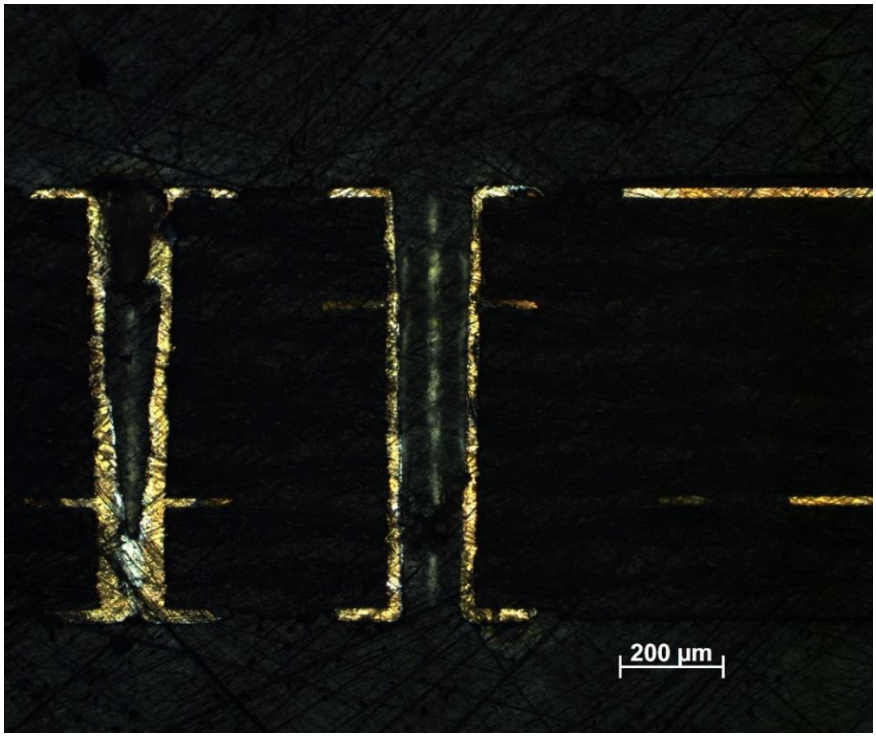
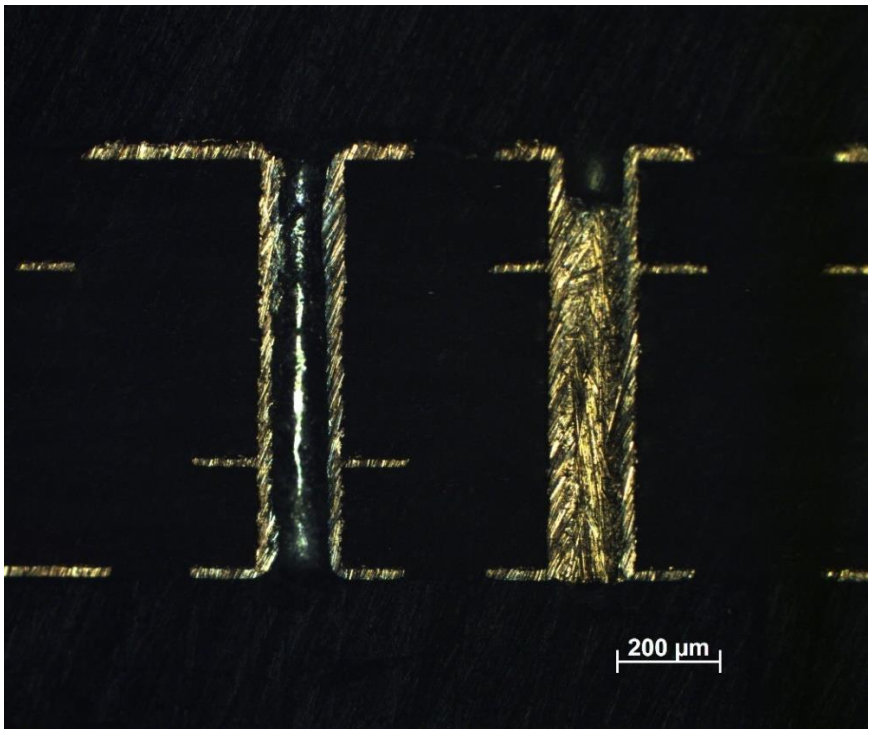
Příloha 15 - DPS č.3 mikrovýbrus bez tepelného zatížení



Příloha 16 - DPS č.3 mikrovýbrus po 600 cyklech



Příloha 17 - DPS č.3 mikrovýbrus po 600 cyklech



Příloha 18 - DPS č.3 po průchodu přetavovací pecí