



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Pájení vlnou – studie procesních parametrů

Wave Soldering - Study of Process Parameters

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

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

Petr Beneš

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Beneš** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **492230**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pájení vlnou – studie procesních parametrů

Název bakalářské práce anglicky:

Wave Soldering - Study of Process Parameters

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologiemi pájení se zaměřením na technologii pájení vlnou
- 2) Připravte si sadu vzorků, které zapájíte vlnou a které bude dále analyzovat z pohledu procesních parametrů
- 3) Výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.09.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

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

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup a rady od samotného výběru tématu po finální odevzdání VŠKP. Poděkování za podporu si dále zaslouží všechny osoby blízké včetně přátel.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje problematice strojního pájení vlnou. Jsou zde popsány především chyby, které se u této metody pájení mohou vyskytnout, vliv průchozího průměru prokovení otvorů desek plošných spojů i parametrů samotného pájecího zařízení, zejména teplotního účinku slitiny. Nedílnou součástí je pak důkladná analýza použitých vzorků a následné posouzení, za jakých okolností dosáhneme optimálních podmínek k co možná největšímu zamezení chyb.

Klíčová slova

Pájení vlnou, chyby při pájení, prokovený otvor, teplota, optimalizace

Abstract

This bachelor thesis focuses on the problem of machine wave soldering. It particularly describes the defects that can occur in this method of soldering, the influence of the via holes of printed circuit boards and the parameters of the soldering machine itself, especially the thermal effect of the solder alloy. An integral part of this is a thorough analysis of the samples used and a subsequent appraisal of the circumstances under which optimal conditions can be achieved to avoid defects as much as possible.

Key words

Wave soldering, soldering defects, via, temperature, optimisation

Obsah

Seznam použitých zkratk	11
Úvod	12
Teoretická sekce	13
1 Desky plošných spojů	13
1.1 Povrchová úprava pájecích plošek	14
1.2 Návrh DPS	16
1.3 Výroba DPS	16
2 Typy součástek	18
2.1 Pouzdra součástek	18
3 Tavidla	21
3.1 Rozpouštědlem rozpustná tavidla	21
3.2 Vodou rozpustná tavidla	21
3.3 Bezoplachová tavidla	21
4 Pájecí slitiny	22
4.1 Pájení s olovem	22
4.2 Pájení bez olova	22
5 Pájení vlnou	24
5.1 Konstrukce a typy vln	25
5.2 Ochrana pájecí slitiny	26
5.2.1 Pájecí olej	26
5.2.2 Inertní plyn	26
5.2.3 Antioxidační přípravky	26
Praktická sekce	27
6 Pracoviště	27
7 Průběh experimentu	29
7.1 Vlastní pájení	29
7.2 Teplotní profil	30
7.3 Analýza vzorků	32
7.3.1 3D mikroskop	32
7.3.2 Konfokální mikroskop	36
7.3.3 Metalografický výbrus	37
7.4 Zhodnocení vzorků	38

Závěr	40
Seznam obrázků	41
Seznam tabulek	42
Seznam grafů	43
Seznam použité literatury	44
Přílohy	47
A Porovnání průměrů prokovení mědí	47

Seznam použitých zkratek

BGA	Ball grid array – typ pouzdra pro SMD
DIP	Dual in line package – typ pouzdra pro THD
DPS	Deska plošných spojů
ENIG	Electroless nickel immersion gold – povrchová úprava pájecí plochy
FP	Flat package – typ pouzdra pro SMD
FPP	Fine pitch package – typ pouzdra pro SMD
HAL	Hot air levelling – povrchová úprava pájecí plochy
IO	Integrovaný obvod
LCCC	Leadless ceramic chip carrier – typ pouzdra pro SMD
OSP	Organic solderability preservative – povrchová úprava pájecí plochy
PGA	Pin grid array – typ pouzdra
PLCC	Plastic leadless chip carrier – typ pouzdra pro SMD
RA	Rosin activated – středně aktivovaná kalafuna
RMA	Rosin mildly activated – lehce aktivovaná kalafuna
RSA	Rosin strongly activated – silně aktivovaná kalafuna
SIP	Single in line package – typ pouzdra pro THD
SMD	Surface-mount device – součástka pro povrchovou montáž
SMT	Surface-mount technology – technologie povrchové montáže
SOJ	Small outline J-lead – varianta pouzdra SOP pro SMD
SOP	Small outline package – typ pouzdra pro SMD
THD	Through-hole device – součástka pro klasickou montáž
THT	Through-hole technology – montáž vývodových součástek
ZIP	Zig-zag in line package – typ pouzdra pro THD

Úvod

Pájení hraje v elektrotechnice významnou a nenahraditelnou roli. Na kvalitu výsledného pájeného spoje a chybovost má vliv vícero faktorů, ať už jde o typ použité pájky, tavidlo, materiál desek plošných spojů, tak i samotná metoda pájení. Dnes se v praxi využívá většinou bezolovnaté pájení kvůli možným dopadům na zdraví člověka a dalších organismů (první restrikce v podobě poplatků za užívání takové metody se objevily již v 90. letech v USA), ačkoliv co se týká smáčivosti slitiny s olovem, tak ani po přidání stříbra pájka té olovnaté nedokáže v tomto ohledu konkurovat, navíc se slitina značně prodraží. Zinkové příměsi zase trpí korozí, tudíž se musí používat pouze v ochranné dusíkové atmosféře. Téměř vždy se tedy jedná o jistý kompromis a v současné době se omezení dotkla i odvětví, kde se ještě poměrně nedávno olovo tolerovalo (jsou jimi např. zdravotnictví nebo automobilový průmysl).¹

Jednou z bezolovnatých metod pro hromadnou výrobu je pájení vlnou. To umožňuje automatizovaně pájet součástky (THD i SMD) v různém zapouzdření s rozličnými vývody a také jednovrstvé či vícevrstvé desky plošných spojů (DPS). Výhody však s sebou nesou i nějaké neduhy ve formě vad spojů (kupříkladu můstky, krápníky, kuličky pájky či zbytky po tavidle aj.), jejichž snížení, a tím pádem zvýšení spolehlivosti, můžeme ovlivnit a zkorigovat mnoha způsoby. Nás bude především zajímat, jak se mění kvalita těchto spojů v závislosti na různém průměru prokovů a teplotě slitiny.

V teoretické sekci je tedy stručně nastíněna veškerá problematika týkající se (nejen) vlnového pájení, od DPS a jejich návrhu a výrobě, přes součástky, až po pájky a pájecí tavidla, jelikož všechny tyto aspekty přímo i nepřímo souvisí s požadavky a spokojeností zákazníků (maloodběratelů i velkých firem). Snahou o optimalizaci konkrétního technologického postupu předejdeme pozdějším zbytečným komplikacím, tím se rozumí stanovení si počátečních podmínek. Náprava chyb způsobených například jen nedůkladnou přípravou je, obzvláště v hromadné výrobě, nákladná a časově náročná, nehledě na fakt, že kvůli výrobní nedbalosti může někdy jít i o lidský život.

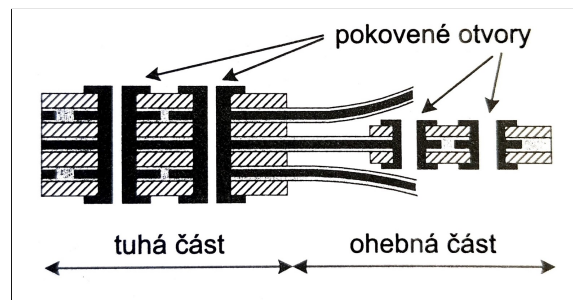
V části praktické si projdeme pracoviště, kompletní specifikace vyhotovených desek, analýzu vzorků, naměříme teplotní profily, a provedeme metalografický výbrus (destruktivní metoda sloužící k analýze vnitřní struktury spoje). Ve vyhodnocení v závěru práce budeme objektivně kritičtí, jinými slovy si popíšeme, co by šlo udělat lépe, protože ve spoustě případech i pouhá konzultace s výrobcí a dodavateli nám může hodně napovědět, čemu se vyvarovat.

¹Pakliže si to situace žádá, musí mít zákazník na použití olova patřičné povolení, i tak by ale měl počítat s množstevní hranicí, kterou nesmí překročit (stále existuje výjimka pro některé akumulátory a autobaterie, avšak i u těch dochází k útlumu a náhradě za bezolovnaté slitiny).

Teoretická sekce

1 Desky plošných spojů

Desky plošných spojů jsou základní stavební komponentou nejrůznějších elektronických zařízení. Existují v nespočetně provedeních, ať už se jedná o počet vrstev, který narůstal s postupem času vzhledem ke stoupající složitosti obvodů a zmenšování samotných desek, materiál a jeho tloušťku či povrch plošek. Dnes již navíc není problém vyrábět DPS jakýchkoliv tvarů. Pro některé aplikace, kde požadujeme větší flexibilitu, lze také kombinovat tuhý materiál s ohebným, viz obr. 1.1. V [4] je dodáno, že tuhé desky mohou být rovné (vyráběné lisováním za tepla) nebo tvarované (zhotovené lisováním či vystřikováním do tvarů). Co se týká ohebných spojů, ty žádné tuhé nosné části nemají (měděná fólie může být nanesena na jedné nebo na obou stranách).



Obrázek 1.1: Tuhé-ohebné spoje [4]

DPS se nejběžněji dělí podle počtu vrstev (jejich souhrn je i se standardními tloušťkami zmíněn v tabulce 1.1), jelikož jejich správnou konfigurací můžeme dosáhnout vhodných elektrických vlastností, které nám např. omezí přeslechy, elektromagnetické rušení, či zlepší přenos signálu vodivými cestami. U více než dvouvrstevných desek kromě signálních vrstev hrají svou roli vrstvy napájecí, jež výrazně snižují radiaci. Další vrstvou na horní a spodní straně DPS je tzv. nepájevá maska. Ta chrání před korozí, mechanickým poškozením a především pokrývá místa, jež se nepájí (tím redukuje vznik zkratů). V neposlední řadě pak snižuje i impedanci o cca 2–3 Ω , pokud bychom ale měli větší rozměr desky, účinek masky bude nižší. V [12] zmiňují, že se prokovení otvorů nechává nezamaskované z důvodu nižšího rizika dalších chyb, při pájení vlnou může naopak takovéto oboustranné maskování zabránit vyvěrání slitiny. Jako dielektrikum se používá skloepoxidový laminát označovaný FR4 (z anglického flame retardant neboli nehořlavá látka), což je univerzální kompozit s velice nízkým koeficientem tepelné roztažnosti odolný vůči vlhkosti, proto je vhodný i pro lodní systémy. Každý materiál má však určitá omezení, která se u FR4 týkají uplatnění ve vysokorychlostních aplikacích – vystavením vysokému teplu, napětí, nebo výkonu se totiž zhorší izolační

vlastnosti. Problém nastává i v případě desek s řízenou impedancí² (tolerance nejistoty dielektrické konstanty se pohybuje do 2 %, kdežto FR4 ji má až 10% – řečeno v [23]).

Tabulka 1.1: Přehled tloušťek vrstev DPS

Vrstva	Tloušťka (μm)
Filmy z fotoplotru	180
Nosný materiál	200–3200 (běžně 1500)
Plátování mědi	5, 9, 18 (běžně), 35, 70, 105
Prokov (palladium)	0, 1
Prokov (galvanická měď)	6–8
Fotorezist	38
Zesílení mědi	20
Leptuvzdorný rezist	12
Nepájivá maska	25

Jak jsme se dozvěděli výše, všechny vrstvy plní nějakou důležitou funkci, otázkou však zůstává, co se může kromě nepájivé masky vyskytnout na samotném povrchu desky, pojďme si to proto nyní rozebrat.

1.1 Povrchová úprava pájecích plošek

Povrchové ošetření DPS je vedle materiálu desky neméně zásadní záležitostí. Poněvadž nemusí být nepájivá maska vždy zcela účinným ochranným prvkem před korozí a mechanickým poškozením, používají se dodatečné úpravy povrchu, které zvyšující se požadavky na životnost a odolnost splní. Obecně nelze říci, jaká úprava má nejlepší vlastnosti, musíme se řídit především tím, pro jakou aplikaci produkt využijeme. K nejpodstatnějším elementům, které bychom měli zohlednit při výběru, spadá např. doba skladování (zachování pájitelnosti i po určité době), prostředí, ve kterém se bude produkt nacházet, nebo také zda se budou používat speciální technologie typu wire bonding.³ Jednotlivé modifikace povrchu desek se liší v tloušťce vrstvy uvedené v tabulce 1.1.1 a striktně podléhají směrnici o omezení nebezpečných látek (více v oddílu 4 o slitinách).

K běžně dostupným ošetřením povrchu se řadí kupříkladu ENIG neboli imerzní zlato, u něhož se nejprve chemicky nanese nikl a poté velice slabá vrstva zlata, která chrání nikl před zoxidováním (lze narazit i na variantu ENEPIG, jež má navíc vrstvu palladia), HAL, kde se DPS smočí do roztavené pájky a horkým vzduchem (konkrétně vzduchovými noži) je poté vyrovnán povrch, nebo OSP, přírodní látka na vodní bázi. U poslední uvedené úpravy se jedná o velice tenký film v řádu desetin μm nanesený na měděný povrch (popsáno v [14]). Vysvětlení těchto zkratk se nachází na str. 11.

²Zajišťuje správné přenesení signálů u VF obvodů.

³Propojení integrovaného obvodu a jeho obalu pomocí tenkých drátků.

Setkat se lze i s dalšími typy, např. imerzním cínem či imerzním stříbrem, které je, díky svým vlastnostem a tenké nanesené vrstvě, snadno pájitelné. Bližší srovnání ukazují tabulky 1.1.1 a 1.1.2.

Tabulka 1.1.1: Přehled tloušťek povrchových úprav

Úprava	Tloušťka (μm)
ENIG	3–6 (nikl), 0,05–0,2 (zlato)
HAL	2–40
OSP	0,2–0,5
Imerzní cín	0,9–1,1
Imerzní stříbro	0,1

Tabulka 1.1.2: Výhody a nevýhody povrchových úprav

Úprava	Výhody	Nevýhody
ENIG	vhodný pro wire bonding a součástky s malou roztečí, doba skladování	může se objevit „black pad“ (koroze niklu), cena
HAL	skladovatelnost, cena	nehodný pro wire bonding, nerovinnost
OSP	cena, rovinnost (vhodný pro SMT), kombinovatelnost s jinými úpravami, ekologický	skladovatelnost, citlivá manipulace, špatný E-test
Imerzní cín	cena, rovinnost, vhodný pro součástky s malou roztečí	skladovatelnost, citlivá manipulace
Imerzní stříbro	pro vysokofrekvenční aplikace a malé rozteče, pájitelnost, rovinnost	nehodný pro wire bonding, citlivá manipulace, kratší skladovatelnost

1.2 Návrh DPS

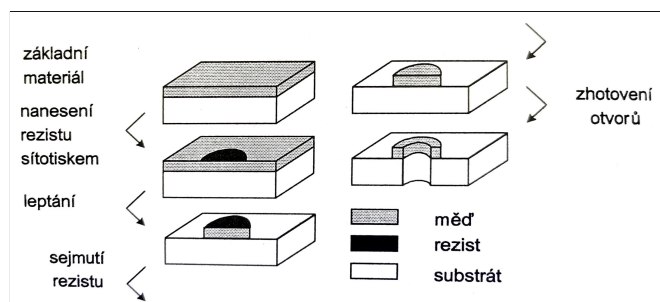
Při návrhu DPS se musíme řídit určitými pravidly, která zjednoduší a zefektivní následný výrobní proces. Díky možnosti hromadné výroby se elektrické obvody a DPS navrhují výhradně pomocí různých programů. Řada z nich je dostupná zdarma a plně postačuje většině požadavků, jelikož chybějící schematické značky některých specifických součástek v seznamu knihoven a jejich pouzdra si lze vytvořit manuálně.

U samotného navrhování bychom měli mít na zřeteli vyrobiteľnosť, tzn. brát v úvahu nejen počet vrstev a třídy přesnosti (průměr otvoru, velikost pájecích plošek aj.), ale i technologické možnosti daného výrobce. Dále je důležité správně nadefinovat pouzdra a rozmístění součástek na desce, které vyplývá z elektrické funkce obvodu. Mezi obecné zásady, jak je uvedeno v [7], patří umístování jednotlivých prvků od vyšší šířky pásma k nižší, oddělení dílčích bloků (napájení, oscilátor, digitální, analogový ad.) a minimalizace vzdáleností mezi nimi (snížíme tím proudové smyčky).

V okamžiku, kdy máme schéma i s DPS hotové, nám stačí z programu vygenerovat data, která následně zašleme zhotoviteli. Formátovat výsledný rozměr můžeme trojím způsobem podle požadované přesnosti. Nejpřesnější je ostříh na padacích nůžkách (v rozích desky se vyznačí ostříhové značky či vrtací otvory). Dalšími dvěma metodami jsou frézování a drážkování, přičemž pro obě platí stejný úzus (desku stačí v editoru jen orámovat – menší přesnost).

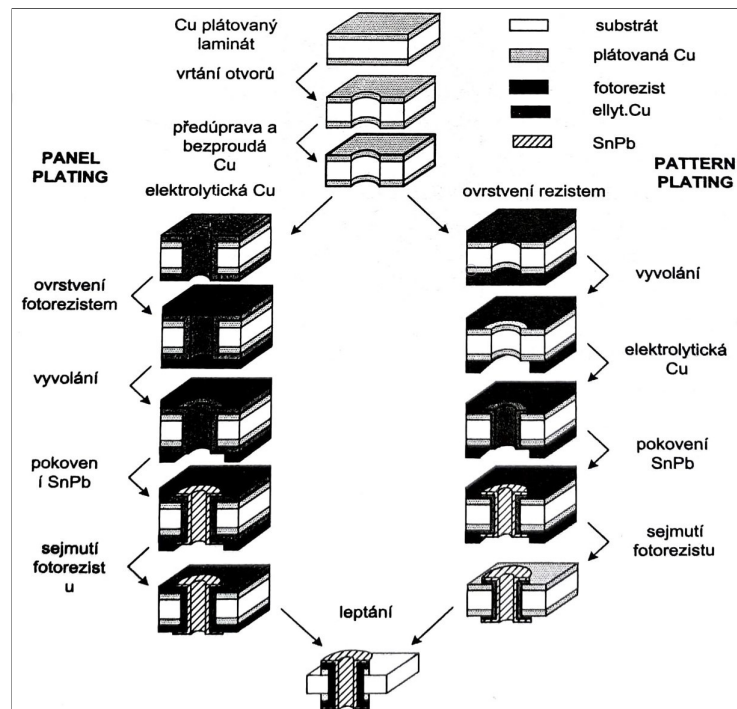
1.3 Výroba DPS

Od návrhu se přesuneme k výrobě DPS. Výrobní proces samotné desky závisí na počtu vrstev. Ke zbavení se oxidů se používá leptání, konkrétně chloridem železitým. Pro vytvoření přesných vodivých cest slouží sítotisk (leptuodolný rezist – např. text označující názvy a umístění součástek) či fotoprocес (vrstva fotorezistu nanesená zářením). Poté se znovu nechá deska vyleptat, aby se odstranila všechna přebytečná měď. Nakonec se rezistivní vrstva, pod kterou se nachází požadované motivy, opláchne.



Obrázek 1.3.1: Výroba DPS sítotiskem a leptáním [4]

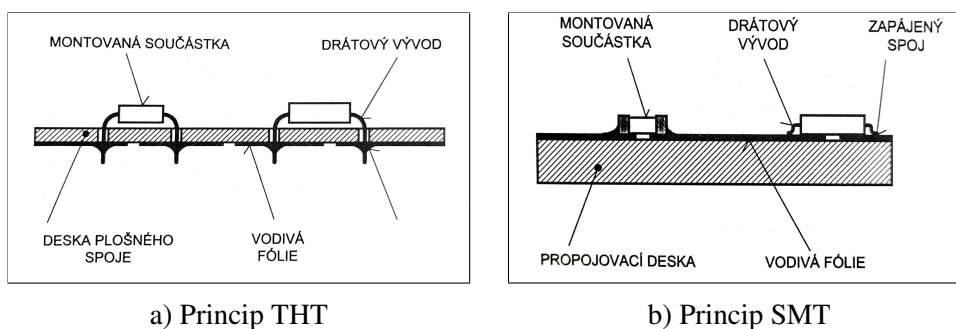
Postup na obr. 1.3.1 platí pro jednovrstvou a také dvouvrstvou DPS bez pokovení. Pokud je ale otázkou vodivé propojení obou stran, řešením jsou dvě vrstvy s pokovením. Vodivé cesty se u nich mohou zpracovat buď semiaditivní metodou (oboustranně plátovaný plošný spoj měděnou fólií) nebo aditivní (materiál bez měděné fólie – měď nanesená pouze na stěny otvorů a vodivé cesty). K pokovení se tedy váží další dva pojmy, a to panel plating a pattern plating. U panel platingu dochází k pokovení celé desky z obou stran včetně stěn otvorů, což je energeticky i ekonomicky náročnější varianta, jelikož se spotřebuje jak více mědi, tak leptadla. Nevznikne tu však znečištění od rezistu a celé pokovení je rovnoměrnější. Oproti tomu při pattern platingu jsou pokoveny jen vodivé cesty a zbytek desky je zamaskován. To je žádoucí z hlediska pozdějšího odstranění mědi leptáním, musíme si ale dát pozor na pokovení první vrstvy a rovnoměrnost nanesení. Náznorně je kompletní proces přiblížen na obr. 1.3.2, kde lze na površích jednoduše spatřit rozdíly mezi oběma metodami.



Obrázek 1.3.2: Porovnání panel a pattern platingu [4]

2 Typy součástek

Na dnešním trhu je nepřehledný počet druhů součástek a ještě větší množství pouzder. Záleží jen na tom, k jaké technologii se přikloníme. Zvolit si můžeme mezi klasickou montáží standardních vývodových součástek či součástkami pro povrchovou montáž (při využití obou stran se, pokud jde o těžší komponentu, či u vlnového pájení, musí tyto součástky na desku před zapájením přilepit speciálním lepidlem). Speciální kapitolou jsou pak integrované obvody. K těmto technologiím se váží čtyři základní pojmy, a to THT, THD, SMT a SMD, viz vysvětlivky na str. 11. Do příchodu SMT montáže v 80. letech se používala pouze THT. Její hlavní výhodou zmíněnou v [20] je oproti SMT větší rezistence vůči mechanickému namáhání, proto stále nachází uplatnění např. v letectvu a vojenství. Hojně se využívá i pro některé konektory a transformátory. THD součástky se navíc dají relativně snadno z DPS vyjmout, z tohoto důvodu jsou optimální pro různé testovací prototypy. Protože se ale musí do DPS vyvrtat otvory, stává se taková výroba náročnější. Součástky s vývody lze umístit jen na jednu stranu, což je velká nevýhoda u vícevrstvých desek, kde se při průchodu prvků všemi vrstvami může značně snížit kvalita plošného spoje. Toto řeší právě technologie SMT, která dovoluje využít obě strany DPS, a tak se samozřejmě (i vzhledem k menší velikosti součástek) zvýší počet komponent umístitelných na desku. Rozdíl mezi oběma druhy montáží blíže znázorňuje obr. 2.1. Provedení vývodů u obou technologií se různí (i s ohledem na konkrétní typ součástky) a uvedeme si je v části věnované pouzdrům.

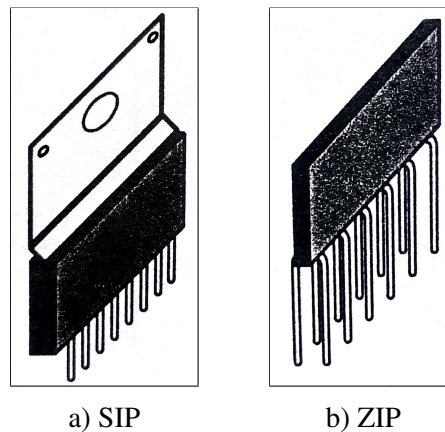


Obrázek 2.1: Srovnání technologií montáže [4]

2.1 Pouzdra součástek

Mezi podstatné funkce pouzdra se řadí především odvod tepla, rozvod elektrického signálu a zajištění mechanické pevnosti (spolehlivost součástek po čase). Samotná problematika pouzder je poměrně obsáhlá, proto si uvedeme jen jejich stručný přehled s důrazem především na čím dál více využívané integrované obvody. Naopak součástkami se široce známým vyvedením vodičů jako jsou rezistory, potenciometry, kapacitory, nebo tranzistory se zabývat nebudeme.

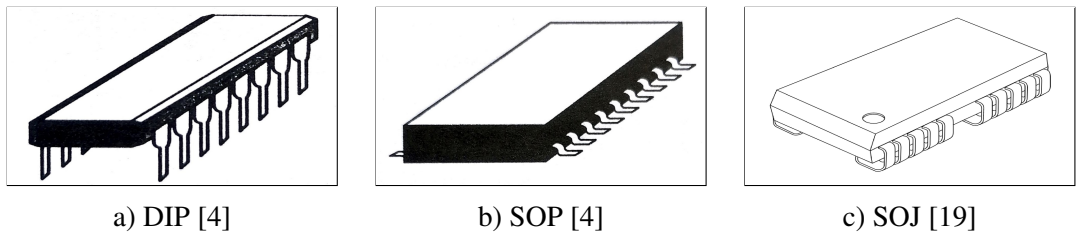
THD součástky mají nejčastěji pouzdra SIP (výškově orientovaná s běžnou roztečí 1,27 mm, může však být i dvojnásobná), DIP (zaměřené na šířku s vývody umístěnými na délku po obou stranách obdélníku) nebo ZIP (kombinace předchozích dvou pouzder, tedy oproti SIP se zde vývody nachází stejně jako u DIP po obou stranách). Pouzdra SIP a ZIP (na obr. 2.1.1) jsou plastová, oproti tomu DIP pouzdra se vyskytují i v keramickém provedení.



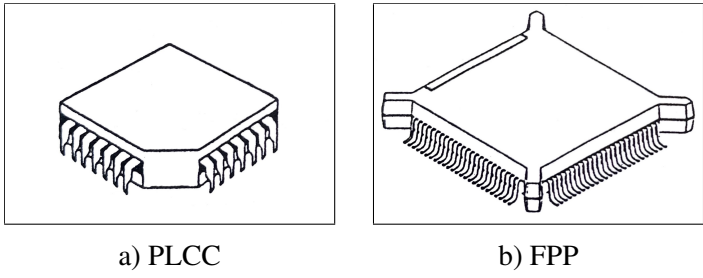
Obrázek 2.1.1: Porovnání výškových pouzder [4]

Všechny tři tyto typy však postupně začaly být nedostatečné z důvodu omezeného počtu vývodů (u DIP maximálně 64). Velké rozměry u takové součástky si vyžádaly daň v podobě vyšší ceny a také horších elektrických vlastností, proto se musela tato pouzdra nahradit jinými alternativami. Příkladem je PGA, čtvercové pouzdro s kolíkovými vývody, kterých tu není problém vměstnat přes více než 1000.

U SMD součástek existuje obdoba pouzder pro THT montáž. Je jím např. tzv. SOP pouzdro, které má více modifikací v závislosti na dané součástce. Na rozdíl od DIP se setkáme s vývody tvaru „racího křídla“, u SOJ varianty zase s „J“ tvarem (porovnání vývodů na obr. 2.1.2). Velice obvyklým použitím tohoto pouzdra je zapouzdrění tranzistorů, diod a integrovaných obvodů. Další etapou ve vývoji jsou PLCC (plastový obal) a LCCC (keramický obal) pouzdra, jež lze osadit až 124 vývody. Pokud požadujeme větší počet vývodů, sáhneme po pouzdře FPP (obr. 2.1.3b vedle PLCC protějšku), u něhož je menší rozteč (v řádu desetin mm) a samotné vývody mají velmi malou šířku (přibližně 0,2–0,3 mm). Jelikož v moderní elektronice chceme co možná nejmenší pouzdra, přišel na řadu typ FP (včetně podvarianty QFP – možno umístit několik set vývodů na všech stranách). Jedná se o ploché pouzdro podobné SOP (2.1.2b) typicky s „racími křídly“. Neopomeneme ani BGA pouzdra, na jejichž protějšek jsme narazili u pouzder pro THD, tedy PGA. Vývodů kulového tvaru tu může být téměř 2500 při minimálních rozměrech, tudíž právě proto jsou velmi oblíbená. Bližší pohled na další pouzdra a tvary vyvedení „nožiček“ jsou k nalezení v [9], [17] a [19], zkrácené názvy pak klasicky na str. 11.



Obrázek 2.1.2: Šířkově orientovaná pouzdra



Obrázek 2.1.3: Vylepšení rozmístění vývodů pro SMD [4]

3 Tavidla

Účel tavidla úzce souvisí s pájitelností a schopností smáčení. Používá se ještě před samotným zapájením součástek k desce, aby zlepšilo spolehlivost spoje. Dokáže výrazně zredukovat množství nečistot a oxidaci povrchu, avšak kvůli jeho negativním vlastnostem, které se mohou později projevit horší elektrickou vodivostí spojů či sníženou odolností vůči korozi, je doporučeno jej po pájení odstranit. Z podstaty věci mohou být tavidla rozpustná ve vodě nebo v rozpouštědle a vyskytující se ve všech skupenstvích – volba záleží na metodě pájení, vlastnostech pájecího přístroje nebo způsobu nanášení.

3.1 Rozpouštědlem rozpustná tavidla

V rozpouštědlech rozpustná tavidla jsou běžně známá, jelikož se jedná o borovicovou pryskyřici, tedy kalafunu. Do té se mohou přidávat aktivátory pro zlepšení schopnosti zbavení se silnějších vrstev oxidů. Podle množství přidané látky do čisté kalafuny (míry aktivace) se označují zkratkami RMA, RA a RSA (viz str. 11). Zbavit se někdy pryskyřice bývá obtížné, a tak se přišlo se syntézou, jež tento krok usnadní. Takto upravená tavidla se užívala u vlnového pájení.

3.2 Vodou rozpustná tavidla

Zde mluvíme o organických kyselinách silněji aktivovaných než pouhá kalafuna opět vhodných zejména pro roztavenou vlnu. Kvůli jejich korozivnímu charakteru by se nemělo zapomenout opláchnout je ihned po dokončení, sloučeniny se totiž skládají z halových prvků a různých solí.

3.3 Bezoplachová tavidla

Zjednodušení výroby s sebou přineslo i tento druh tavidel. Logicky nesmí oxidovat ani lepit povrch desky. Přesto, že obsahují výrazně menší procento organických kyselin, musíme být obezřetní na agresivní reaktanty. Pár článků i pramenů (např. [15]) doporučuje zlikvidovat tavidlo celé, poněvadž se ne všude ví jeho chování a prvotní výhody zefektivnění a zlevnění produkce paradoxně zanesly do metody větší zmatek. Právě proto se dnes výrobci uchylují k důkladnému očištění ve všech případech, počet vzniklých defektů podceněním oplachování totiž není malý.

4 Pájecí slitiny

Jak bylo naznačeno v úvodu, v mnoha aplikacích se uplatňují čistě bezolovnaté slitiny. Toto téma ale vyžaduje větší pozornost, abychom získali detailnější vhled. V převážné většině slitina obsahuje dva, případně tři kovy. Ať už hovoříme o olovnaté či bezolovnaté pájce, základ tvoří vždy cín díky jeho pozitivním vlastnostem na pevnost spojů. Z fyzikálního hlediska má každá pájka (s olovem i bez něho) tzv. bod tuhnutí (při ochlazování krystalizuje) a bod tání (při zahřívání se taví) a je na ni kladena celá řada nároků, z nichž pro obě platí, že musí splňovat dobrou smáčivost (přilnutí k povrchu), zaručit uspokojivou ochranu před oxidací ad. Nyní se zaobereme ostatními kovy přidanými do slitin olova i po jeho vynechání (jak si na tom stojí a zda dokáží být vůbec konkurenceschopné).

4.1 Pájení s olovem

Pokud je řeč o olovu, nejběžnější pájky mají okolo 60 % cínu (Sn) a 30–40 % olova (Pb). Optimální podmínky naplňuje slitina s označením Sn62Pb38 (často uváděn poměr 63 % a 37 %), též známá jako eutektická.⁴ Honba za vylepšením dalších nedostatků vedla k přidání třetího kovu, kterým mohla být měď, antimon (spoj lépe odolá mechanickému namáhání), bismut (zmatní povrch spoje) či stříbro (zmírní oxidaci). Kromě posledního zmíněného se ostatní až na výjimky téměř nepoužívají.

4.2 Pájení bez olova

Ve Spojených státech a některých asijských zemích přišli v posledním desetiletí minulého milénia s prvními vyhláškami a zákony ohledně používání olova. Týkaly se jak jeho recyklace, tak i uvalení daně na jeden kilogram. To samozřejmě zpočátku vyvolalo rozruch a obavy odborné i laické veřejnosti, a tak ještě došlo k mnoha úpravám, postupem času ale tato okleštění spíše narůstala. K nám do Evropy doputovaly směrnice později a aktuálně platí tzv. WEEE (nakládání s nebezpečným odpadem) a RoHS (úplný zákaz používání nebezpečných látek). Nejde tak o olovo samotné, nýbrž o celý „balík“ kovů (a nejen jich). Do výzkumu, jaké pájky budou dosahovat alespoň přibližné kvality těch bezolovnatých, se tak musely investovat nemalé finance a úsilí. Každý kov interagující s cínem má za cíl zlepšit nedostatky prvku samotného (v tabulce 4.2.1). Velkou oblibu získala slitina z rodiny SAC (smíchání cínu, stříbra a mědi v poměru 96,5 %, 3 % a 0,5 %), která přechází do kapalného skupenství při teplotě tavení 217 °C, čili o něco více než olovnatá pájka (183 °C). Dále se v hromadné výrobě

⁴Eutektikum je směs více látek, u kterých vzniknou krystaly společným zatuhnutím. Teplota takové směsi značí nejnižší teplotu tavení a bod přechodu do pevné struktury (jinak řečeno – tavicí teplota je shodná s teplotou tuhnutí).

užívá pájka bez stříbra obsahující 99,3 % cínu a 0,7 % mědi s nepatrným zastoupením niklu a eutektickou teplotou 227 °C nebo naopak bez mědi s o 6 °C nižším bodem tuhnutí (stříbro procentuálně tvoří 3,5 %). Zajímavým prvkem je pak nepochybně bismut (42 %), u kterého se dostáváme na zhruba 139 °C. Více se o něm a jiných slitinách lze dozvědět v [6].

I přes veškerou snahu o přizpůsobení se novým podmínkám a koupě nového vybavení se úplně všech neduhů zbavit stoprocentně nešlo. Ať pracujeme s jakoukoliv pájkou (obzvláště bez olova), budou nás provázet whiskery (ze zdroje [13]) – cínové „vousky“. U olovnatých slitin se whiskery netvoří v takové míře.

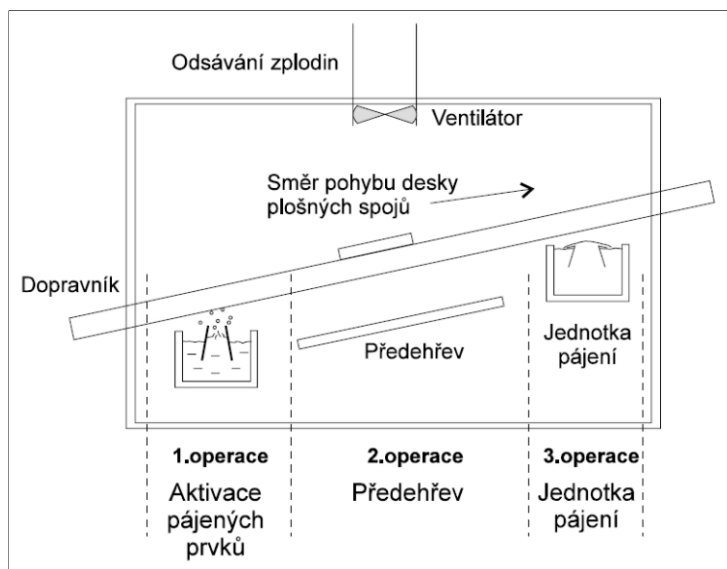
Tabulka 4.2.1: Přehled používaných kovů a jejich účinek

Prvek	Úloha ve slitině
Stříbro (Ag)	snížení eutektické teploty, zvýšení mechanické odolnosti
Měď (Cu)	podobně jako u stříbra (nižší teplota tavení a vyšší pevnost), zlepšení smáčivosti
Zinek (Zn)	nižší bod tavení, cena kvůli korozi se nedoporučuje pro vlnové pájení
Bismut (Bi)	s výrazným snížením tavicí teploty jde bohužel ruku v ruce i menší mechanická pevnost plusem je lepší smáčivost
Antimon (Sb)	zvýší odolnost, smáčivost však po přidání zůstane stejná
Nikl (Ni)	větší odolnost, ale při nadměrném množství může být spoj křehčí
Indium (In)	menší teplota tavení, lepší kujnost (mechanická poddajnost)

5 Pájení vlnou

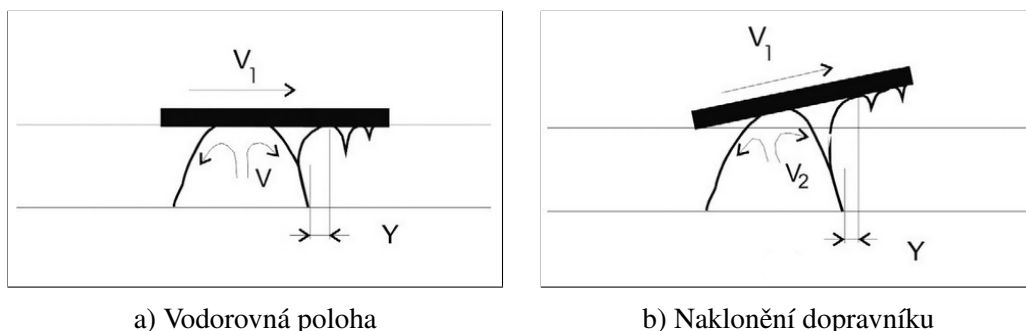
Historie pájení vlnou sahá již do 50. let minulého století, kdy společně s objevem tranzistoru a tlakem na velkovýrobu začaly být tehdejší používané metody již ne zcela dostatečné. Samotný proces se skládá ze tří základních úkonů, a to aktivace pájených prvků (nanesení tavidla), přehřevu pájené desky (menší teplotní šok pro součástky i DPS) a nakonec vlastního pájení (tzn. spojení kovů roztavenou pájecí slitinou), viz znázornění na obr. 5.1 níže.

Jakožto u každého druhu pájení se ani zde nevyhneme celé řadě slabín vedoucích ke kazům, jež lze přiřadit k dané metodě, k některým dalším však přispívají různé jiné aspekty. Důležité je zmínit, že označení defektů není jednotné a různí se zdroj od zdroje. Nejčastějšími problémy bývají můstky a krápníky, ale rovněž narazíme i na špatnou smáčivost v podobě nesmáčení a odsmačení, nadbytek slitiny v okolí otvorů nebo naopak jejich nedostatečného vyplnění, „kuličky“ pájky a spoustu jiných (přehledně zdokumentovaný výčet včetně opatření k nápravě má na svých stránkách v [22] původem kanadská společnost AIM zaměřující se na výrobu montážního materiálu pro pájení). Pro lepší představu, jak jednotlivé vady vypadají, použijeme vlastní snímky v analytické sekci, kde zároveň zdůrazníme možnosti fixace z praktického hlediska.



Obrázek 5.1: Proces vlnového pájení [1]

Na obrázku 5.1 pohlížíme na ideální podmínky procesu, kdy je dopravník nakloněn v rozmezí okolo 4–8°. Pokud tomu tak není (rozdíl přibližuje obr. 5.2), dojde k tzv. závoji, a tedy vzniku můstků nebo krápníků. Při vodorovné poloze totiž pájka nestihne stéct do vlny vlivem různé rychlosti dopravníku v_1 a rychlosti vlny v_2 . Problém náklonu souvisí s volbou tvaru a směru vlny, což si vzápětí více rozebereme.



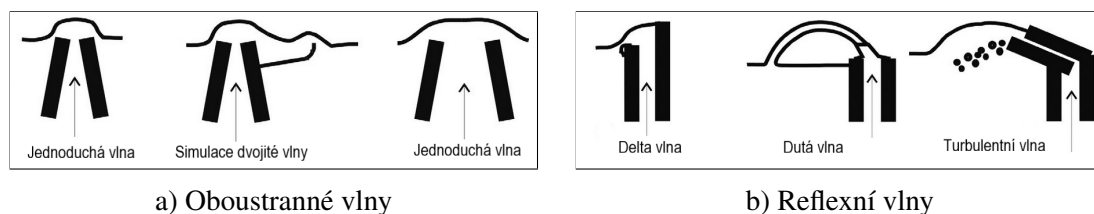
Obrázek 5.2: Omezení vzniku závoje úhlem náklonu [1]

5.1 Konstrukce a typy vln

Druhů pájecích vln na dnešním přesyceném trhu existuje mnoho, lze je ale rozdělit do dvou základních skupin. První takovou skupinou jsou vlny oboustranné (obr. 5.1.1a) vhodné zejména pro klasickou montáž THT, případně SMD součástky s větší roztečí vývodů. Nejčastěji používané modifikace jsou obě krajní, prostřední typ pak simuluje dvojitou vlnu vytvořenou jednou tryškou.

Reflexní neboli zpětné vlny na obr. 5.1.1b jsou druhou rozšířenou skupinou. Jelikož se pohybují proti směru pájené desky, významně snižují vznik přemostění, což umožňuje zmenšit úhel náklonu dopravníku. Zleva se zde nachází vlna delta, dutá a turbulentní, avšak jen s dutou vlnou lze pájet horizontálně se pohybující desky.⁵

V praxi se nicméně používá kombinace z obou výše uvedených skupin, aby bylo možné bez problému osazovat i součástky SMT montáže a hustě osazené DPS. U dvojitých vln je první úzká turbulentní pohybující se ve směru pohybu desky a zajišťující smáčivost povrchu a druhá laminární (široká) odstraňující přebytek pájky, minimalizuje tak počet vzniklých můstků a krápníků (viz [5]). Jistou nevýhodou při průchodu dvěma vlnami může být teplotní namáhání součástek (což vyřeší jejich vhodný výběr) a vyšší spotřeba slitiny a s tím spojená cena.



Obrázek 5.1.1: Porovnání skupin používaných typů vln [24]

⁵Vlna funguje na principu Bernoulliho zákona – na pozici součástky se zvýší rychlost. Vývody součástek se nemusí ohýbat, protože vlna je stahuje směrem dolů.

5.2 Ochrana pájecí slitiny

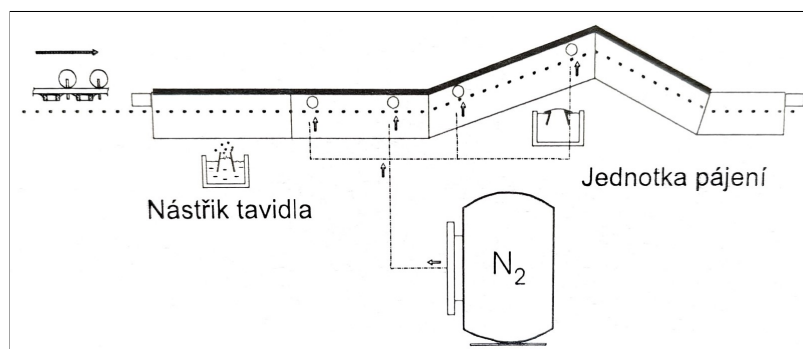
Abychom předešli zoxidování pájky, je potřeba ji adekvátně ochránit. Na to máme několik způsobů, z nichž nejužívanější dříve býval speciální olej, který se vléval přímo do vlny. Je nutné si uvědomit, že každé takovéto aditivum může být i na škodu a na slitinu mít nepříznivé účinky.

5.2.1 Pájecí olej

Jedná se o velice kontroverzní a z dnešního pohledu překonaný postup, který víceméně závisí na typu použitého přístroje. Každý výrobce definuje jiné podmínky pro použití oleje. Srovnáme si nyní výhody a nevýhody – pokud pájíme bez oleje, pak se nemusíme zbavovat nežádoucích zbytků ani odsávat zplodiny z oleje a hrozí nám menší riziko požáru, oxidací pájecí slitiny se však zvětšuje spotřeba pájky. V případě, že olej přece jen použijeme, snížíme vznik závoje. Olej ovšem není vhodný pro SMD součástky. Ve výsledku tedy záleží na požadavku na daný výrobek a dle toho postupovat.

5.2.2 Inertní plyn

Jedním z inertních plynů⁶ je dusík. Při jeho aplikaci zamezíme přístupu vzduchu, a tím i oxidaci slitiny. Zařízení pracující na bázi inertní atmosféry vyobrazené na obr. 5.2.2.1 zabírá ale mnohem více prostoru a je také náročnější na obsluhu. Nesmíme zapomenout, že i s inertním plynem můžeme narazit na průvodní jevy jako můstky a krápníky, tudíž volba vlny zde stále hraje nezanedbatelnou roli.



Obrázek 5.2.2.1: Pájecí linka s plynem [1]

5.2.3 Antioxidační přípravky

Podle [1] tyto přípravky redukuje ztrátu slitiny při pájení. Jde o alternativu ke krycímu oleji v lázni a inertnímu plynu. Mezi nejznámější produkty patří například Cleanox či český Deox. Slitina se přípravkem posype a poté se za pomoci speciální naběračky s otvory uvolní část dobré pájky. Takto lze zachránit nemalé množství slitiny.

⁶Látky za určitých okolností nepodléhající chemickým reakcím.

Praktická sekce

6 Pracoviště

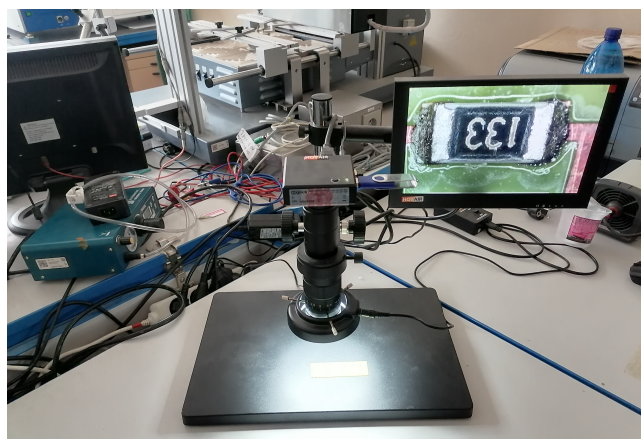
Naše pracoviště se skládá z dvou hlavních laboratoří. Jedná se konkrétně o prototypovou pracovnu (specifičtěji v [16]), kde se nalézají různé přístroje – od těch nejběžnějších (osciloskopy, multimetry nebo zdroje napětí) až po profesionální. Nejdůležitější pro nás je však stolní pájecí stanice Torch TB680 sloužící k pájení vlnou roztavené cínové slitiny. Přestože patří k levnějším na trhu, nabízí širokou paletu ovládacích prvků. Nastavitelnými parametry jsou výška vlny, čas přehřevu, rychlost pojezdu na dopravníku a teplota pájky. Zařízení navíc disponuje samostatnou tryskou pro nanesení tavidla. Detailnější rozbor celého procesu i s technickou dokumentací je dostupný např. na stránkách českého prodejce v [11].



Obrázek 6.1: Pájecí stanice Torch TB680

Na snímku 6.1 koukáme na automatizovanou stanici umístěnou v laboratoři školy. Bližší obrázky, na kterých je k zahlédnutí vlna a napěněné tavidlo i s deskami zachycenými na drážkách rámu dopravníku, si ukážeme záhy.

Druhou a stejně podstatnou částí pro analýzu a vyhodnocení výsledků pájení je laboratoř diagnostiky materiálů. Zde můžeme za pomoci elektronového, optického, či konfokálního mikroskopu zevrubně prostudovat vlastnosti jakýchkoliv vzorků, ať už z pohledu kvality nebo chyb. Pro naše účely jsme použili dva mikroskopy, a to 3D optický s kvalitní kamerou a velkým vlastním monitorem (více informací v [8]) a laserový konfokální Keyence VK-X1000 umožňující měřit bezkontaktně profil, drsnost a tloušťku s až 28 800násobným zvětšením, viz web katedry elektrotechnologie – [10]. Standardně je dodáván se speciálním softwarem, takže vše potřebné se nastavuje přímo na PC. Laser u něho za doprovodu bílého světla vyzařuje na studovaný předmět UV paprsek. Obr. 6.2 a 6.3 podrobněji ukazují obě zvětšovací zařízení.



Obrázek 6.2: 3D mikroskop



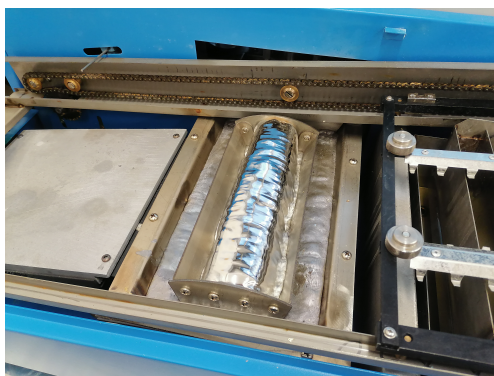
Obrázek 6.3: Konfokální mikroskop

7 Průběh experimentu

Pro samotný experiment bylo zapotřebí navrhnout testovací vzorky desek, k čemuž nám dopomohl volně dostupný software KiCad (řečeno v části 1.2 pojednávající o návrhu DPS). Zvolili jsme si, že budeme operovat se třemi průměry prokovení otvorů mědí (vyobrazené v příloze A) a jednotlivé velikosti prokovu necháme zapájet při třech teplotách slitiny – 250 °C, 275 °C a 300 °C, přičemž pro každou teplotu použijeme pět vzorků s jednou tloušťkou (celkový počet potřebných desek se tak vyšplhal na 45). Parametrově se jedná o dvouvrstvé vzorky o velikosti 6,5 × 4,2 cm, kde povrch je tvořen OSP a jako materiál desek posloužil standardní FR4. Všechny DPS jsme k vyhotovení zadali české firmě PRINTED, poté následoval pečlivý výběr součástek, abychom je mohli osadit.

7.1 Vlastní pájení

Po dodání objednaného materiálu a osazení jsme se již pustili do našeho pokusu. Jelikož zařízení pracuje pouze s jednoduchou vlnou, rozhodli jsme se pájet pouze THD součástky. Dá se očekávat, že chybovost vzhledem ke konfiguraci nebude nízká, protože se spoléháme na poměrně málo vstupních elementů. Počítáme s tím, že se změna teploty pájení pravděpodobně projeví problémy se smáčením a průměr prokovení bude mít vliv na množství pájky v místě spoje.



a) Nádoba s roztavenou slitinou



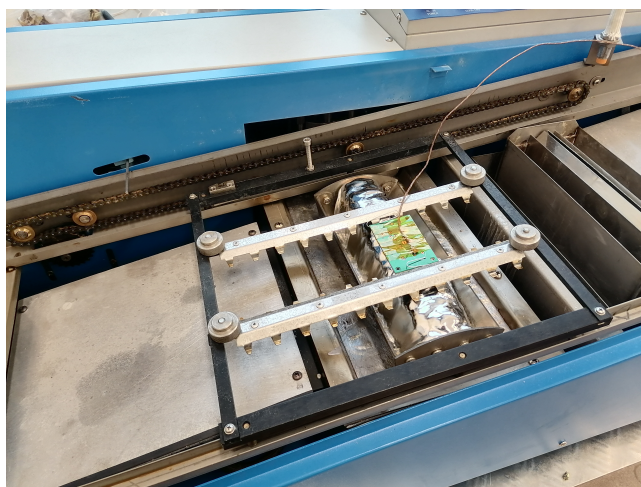
b) Desky projíždějící tavidlem

Obrázek 7.1.1: Automatizované fáze procesu

Obr. 7.1.1 ukazuje, jak průběh pájení vypadá. Na dopravník jsme kvůli jeho velikosti umístili vždy maximálně tři desky pro zachování dostatečných rozestupů. Jako tavidlo se použil vysoce kvalitní bezoplachový typ označený jako FX16, jenž byl prostřednictvím vzduchového čerpadla napěněn a následně tryskou nanesen. Následuje předehřívací oblast (čas předehřevu jsme nastavili na 10 s), do níž již dopravník zajíždí pod odklápěcí kryt až do oblasti se slitinovou nádobou, aby neunikalo teplo a zplodiny do okolí.

7.2 Teplotní profil

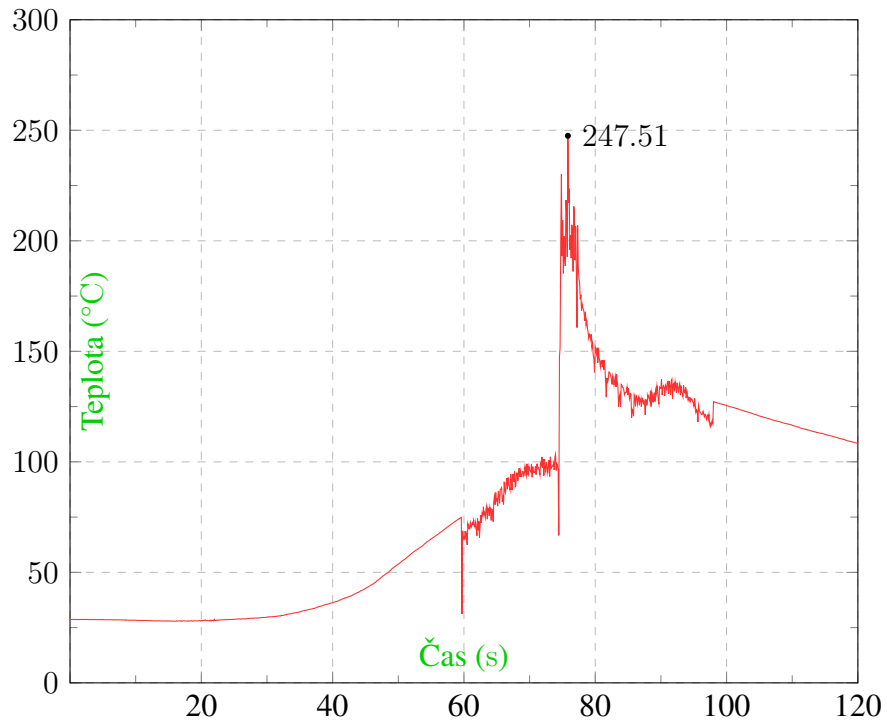
Teplotní profil neboli závislost teploty na času sehrává v procesu pájení signifikantní úlohu pro zajištění řádné funkcionality tavidla a následné kvality spojů. Je více než zřejmé, že nastavení přehřevu představuje alfu i omegu. K měření se užil termočlánek, který sestává ze dvou na konci spojených vodičů odlišných kovů, avšak izolovaných jak vnějším pláštěm, tak každý individuálně. Zafixování kontaktu s deskou obstarala lepicí páska a na opačném konci byl profilometrem připojeném k PC naměřen průběh (viz obr. 7.2.1).



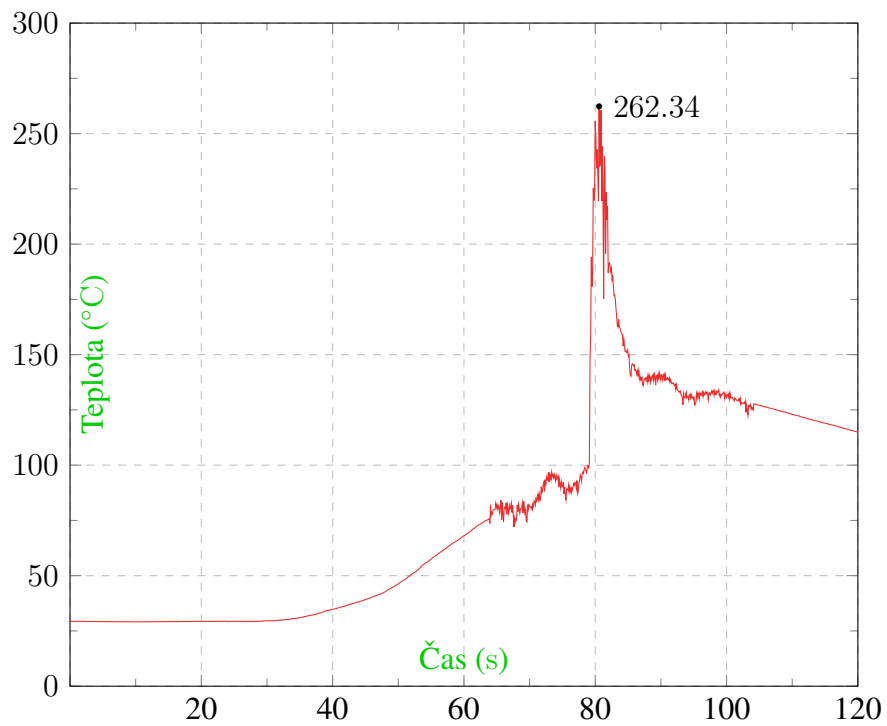
Obrázek 7.2.1: Měření teplotního profilu vlny

Samotný profil se skládá ze tří fází, a to přehřevu (odpaření těkavých látek z tavidla), ustálení s následným peakem (vrcholem) na teplotu slitiny a ochlazení. U grafů níže můžeme být svědky hned několika nepřesností. Nejvýraznějším reprezentantem je latentní teplo, které při tavení pájky způsobuje její pokles, poněvadž dojde k absorpci tohoto tepla, a naopak když slitina tuhne, tak cín v ní obsažený vyprodukuje extrémně vysokou energii, kdy defacto roztaví sám sebe (takovéto uvolnění tepla do okolí spoje přivodí nerovnoměrný ohřev a zároveň chladnutí DPS – kvůli tomu vznikne rozhraní mezi pevným a viskoelastickým materiálem desky a u některých pouzder vytvoření prasklin pod ploškami⁷). Studie provedená v [3] navíc doplňuje tento fakt o informaci, že latentní teplo může pozdržet tuhnutí sousedního spoje. V grafu 7.2.1 pro 250 °C jsou k vidění rovnou dva tyto náhlé úbytky teploty (během přehřívání a těsně před maximálním nárůstem), nejvíce nápadný prudký přírůstek při tuhnutí pak spatříme na grafu 7.2.3 pro 300 °C. Důvod, proč jsme nedosáhli ani u jednoho průběhu jmenovitého maxima a hodnoty se nám liší i o více jak 10 °C, lze patrně přiřadit nedostatečnému kmitočtu měřicího zařízení.

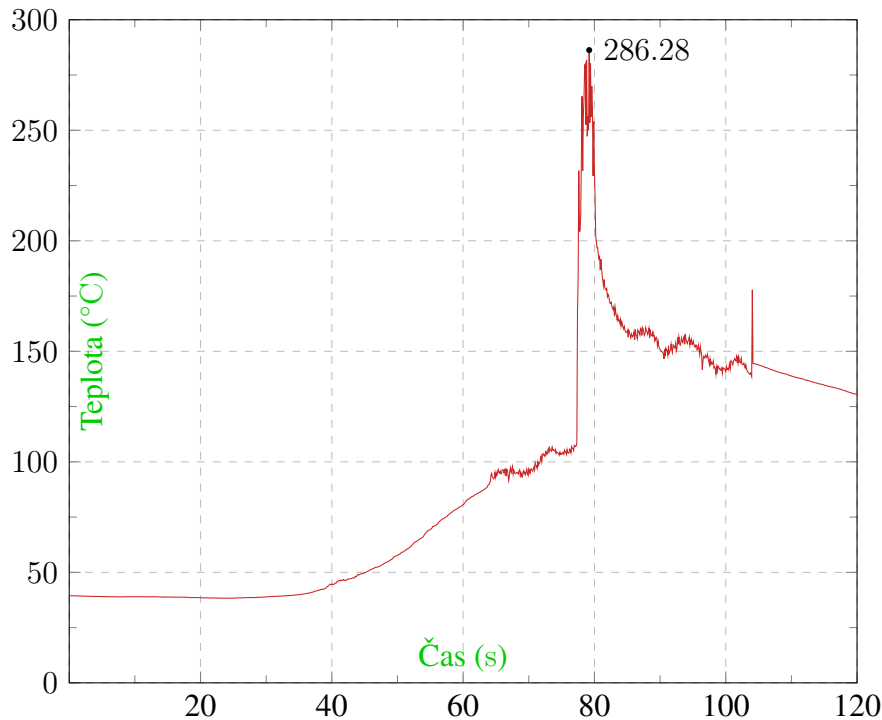
⁷Deska má do tzv. teploty skelného přechodu charakter pevné látky, pokud se překročí, změní se právě na zmíněnou viskoelastickou.



Graf 7.2.1: Teplotní profil pro 250 °C



Graf 7.2.2: Teplotní profil pro 275 °C



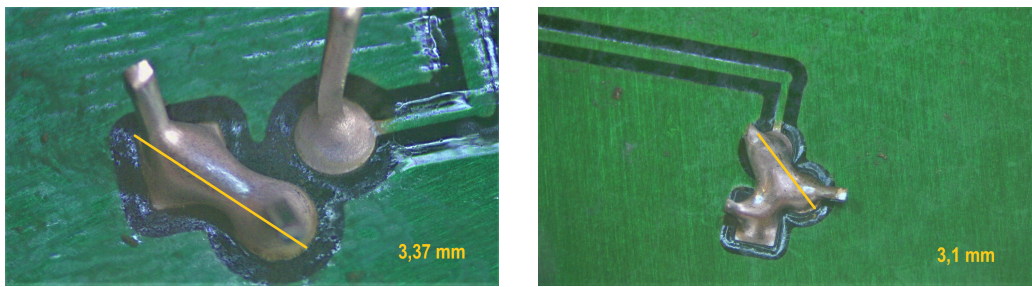
Graf 7.2.3: Teplotní profil pro 300 °C

7.3 Analýza vzorků

V tomto bodě docházíme ke gró celé práce. Na pár vybraných snímcích z mikroskopů si demonstrujeme konkrétní výskyt defektů, které zařadíme do kontextu s teoretickým výčtem. Začneme tedy s typickými chybami pro vlnu, zástupců všech ostatních artefaktů tu ale máme také požehnaně (napříč teplotou slitiny a tloušťkou vrstvy mědi v otvorech, proto není potřeba specifikovat, o jakou kombinaci teplota-prokovení jde). Ve spoustě případech se na obrázcích nachází více anomálií najednou. Po mikroskopii následují i obrázky výbrusu, abychom mohli odhalit chyby pod samotným povrchem struktury pájeného spoje. Ke všem fotografiím je navíc přidáno i měřítko pro lepší orientaci.

7.3.1 3D mikroskop

Pokud nám vznikne některý z můstků jako na obr. 7.3.1.1, dochází ke zkratu. Zapříčiněno to je vzdáleností vývodů od sebe (výrazněji náchylnější k tomuto jevu jsou samozřejmě SMD součástky), což samo o sobě nespraví odlišná teplota pájky ani průměr prokovů. Hodně může napomocet větší množství tavidla, případně jiné složení s vyšším obsahem pevných látek. Odladit by se mělo i zkrácení „nožiček“ komponent, výška vlny a rychlost desek na dopravníku.

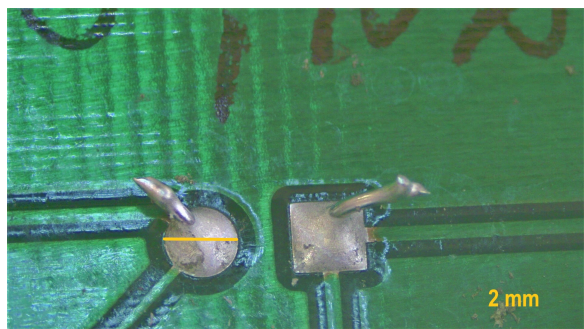


a) Jednoduchý můstek

b) Hromadný můstek

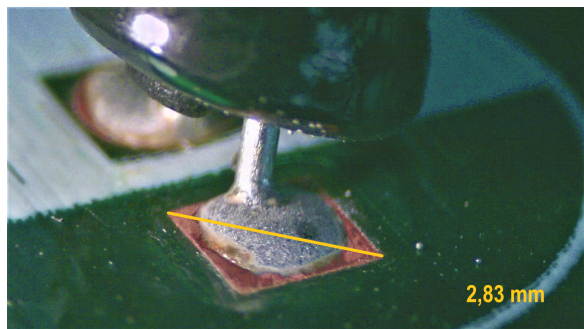
Obrázek 7.3.1.1: Můstky

Krápník ve tvaru vlaječky či špičky ve vyobrazení 7.3.1.2 je jedním z příznaků nadbytku pájky, který opět souvisí se špatným nanesením tavidla. Jiným důvodem může být pomalejší pohyb taveniny v bodě výstupu než rychlost desek. Svou roli sehrává i teplota přehřevu a výška a rovnoměrnost vlny. Při odštípnutí vývodu způsobem, kdy zůstane zkroucený nebo zbytečně dlouhý (stejně jako u můstku), rovněž zvyšujeme přítomnost těchto špiček.



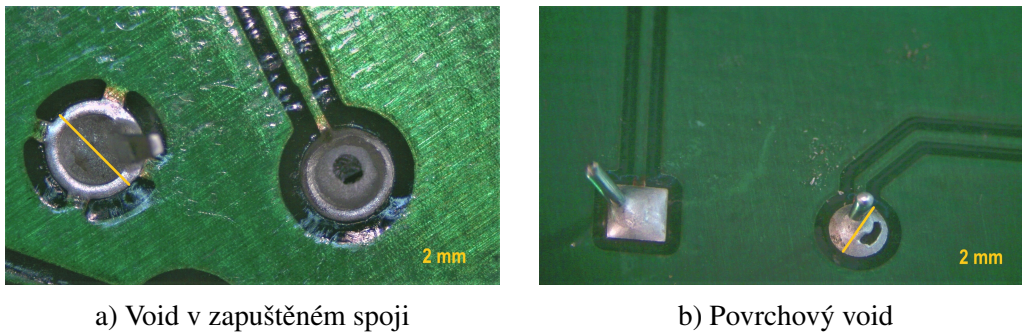
Obrázek 7.3.1.2: Krápník

Miniaturní kuličky slitiny v 7.3.1.3 se opět objeví při nesprávné teplotě (popřípadě času) přehřevu. Dále můžeme napravit výšku hladiny vlny a teplotu taveniny, která, když je příliš vysoká, zapříčiňuje riziko jejího „rozprsknutí“ při návratu (tzv. zpětný rozstřík). Pokud problém setrvává, musí se snížit rychlost pohybu dopravníku. Hůře se ovlivňuje vlhkost v místnosti, jež se přenáší do tavidla a kontaminuje ho.



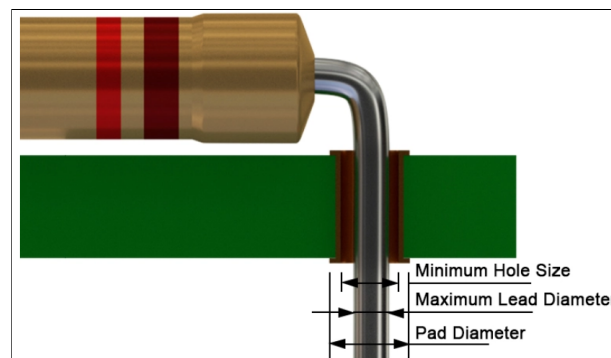
Obrázek 7.3.1.3: Kuličky pájky

Voidy na snímku 7.3.1.4 níže jsou komplikovanější problematika na pouhý stručný rozbor a jejich tvar a velikost se liší podle součástky a pouzdra, nicméně se jedná o nevodivá místa způsobující zvýšené tepelné namáhání desek plošných spojů. Nízká předehřívací teplota způsobí, že se neodpaří všechny tavidlové rozpustné látky, větším množstvím tavidla k jeho odplynění také nedojde, proto by se pokovení ve stěnách otvoru (průchodkách) mělo pohybovat minimálně okolo 25 μm [21]. K odstranění vlhkosti z desky se používá speciální metoda vysušování DPS, avšak spíše pomůže zvýšit zmíněnou vrstvu mědi.



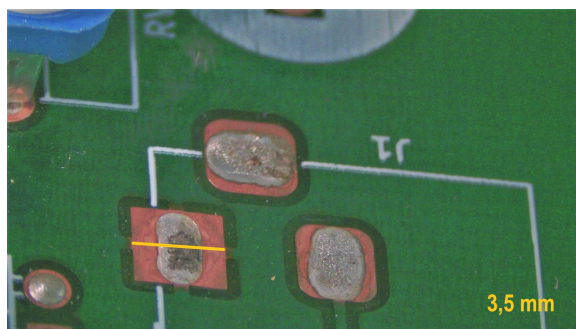
Obrázek 7.3.1.4: Voidy

Na obrázku 7.3.1.4a si lze povšimnout, že se void nalézá v propadlém spoji (mohou však být téměř kdekoliv – o tom dále u výbrusů v sekci 7.3.3). Ty jsou taktéž způsobené odplyněním, což je úkaz, kdy se při pájení zachytí vlhkost v desce a u otvorů se zahřeje tak silně, že se promění v páru. Stejně jako u voidů tak potřebujeme mít tloušťku průchodky alespoň 25 μm . Důležitým faktorem je i poměr šířky vývodu a otvoru značený jako hole-to-lead ratio (výrazně širší otvor přivodí „potopení“ slitiny její vlastní hmotností).



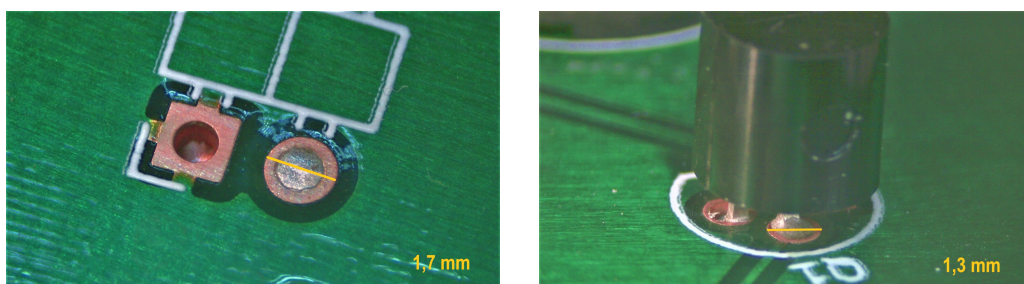
Obrázek 7.3.1.5: Hole-to-lead ratio [18]

Dalším zástupcem na následující straně (obr. 7.3.1.6) je znečištění spojů tavidlem. To spojujeme s nastavením parametrů – předehřevu a rychlosti dopravníku (dobou expozice tavidla a vlně), proto bychom se předem měli domluvit s dodavatelem tavidla, co si zrovna daný typ a složení žádá.



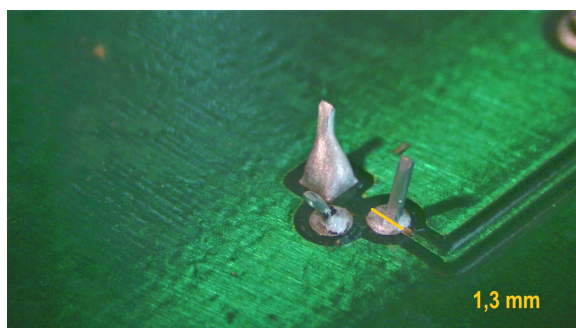
Obrázek 7.3.1.6: Zbytky po tavidle

Neúplně zapájené otvory na snímku 7.3.1.7 značí problém se smáčením, tedy mohlo se nanést málo tavidla nebo nesprávně přednastavit přehřívací teplota (horní strana vzorku musí mít alespoň 100–110 °C). Někdy se DPS nesmočí vůbec, což pravděpodobně znamená i to, že v místě nevyplnění měla malou výšku. Kromě toho je na tomto a některých předchozích vyobrazeních ukázáno, že povrch plošek není kompletně pokryt pájecí slitinou. Svou roli zde hraje tloušťka povlaku mědi.



Obrázek 7.3.1.7: Nevyplněné spoje

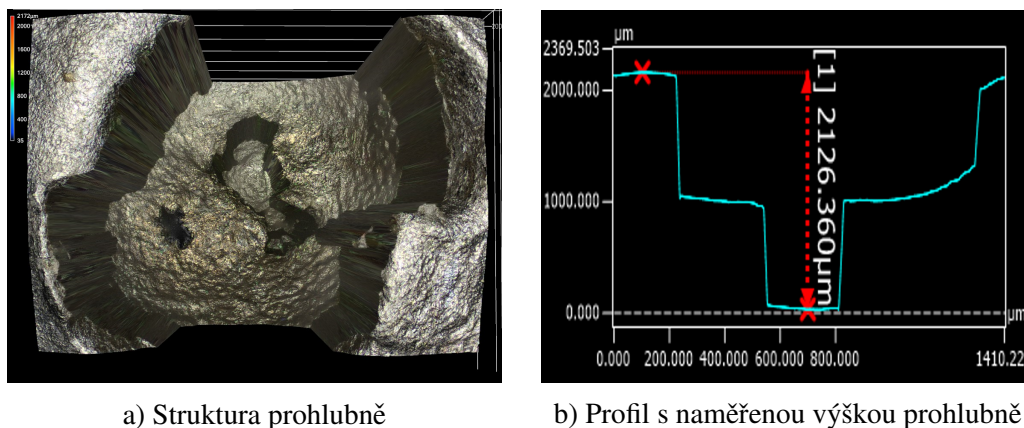
Nadbytek pájky spatříme, pakliže máme nízkou teplotu slitiny, přehřevu, nebo se tavidla nenanese příliš. Deska mohla právě tak z vlny vystoupit moc rychle či pod chybným úhlem.



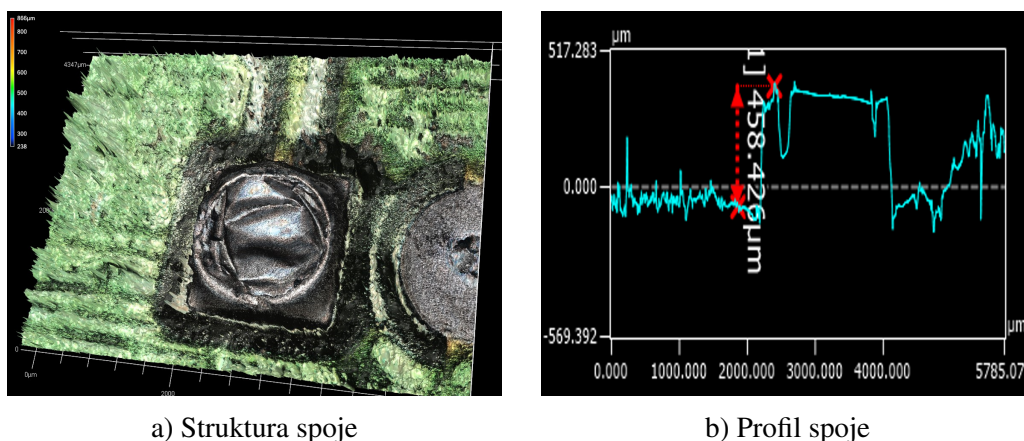
Obrázek 7.3.1.8: Přebytečná slitina

7.3.2 Konfokální mikroskop

Pod konfokálním mikroskopem jsme mohli sledovat povrchovou strukturu spojů i desek a velikost prohlubní a jiných vad. Funkcemi nabitý program značně usnadnil práci s analýzou, jelikož se dá např. nasnímat větší část desky a pak jen pomocí prokliknutí zaměřit na místo, které nás zajímá (s tím souvisí i schopnost spojení více snímků do jednoho finálního – funkce stitching). Dále nám umožňuje narovnat DPS vůči referenci, abychom měli při měření co nejpřesnější profil, pokud vzorek nelze vložit na plochu zařízení zcela rovně. Samozřejmostí je nastavení měřicího rozsahu ostření, množství dopadajícího světla, přepínání mezi laserem a optikou či rozlišením výsledného snímku. Náležitě naměřený profil lze exportovat do tabulky v Excelu, ve které je kromě grafu i obrázek ve 2D a 3D pohledu, viz níže.



Obrázek 7.3.2.1: Prohlubeň s voidem z Excelu



Obrázek 7.3.2.2: Křehký spoj z naměřených dat

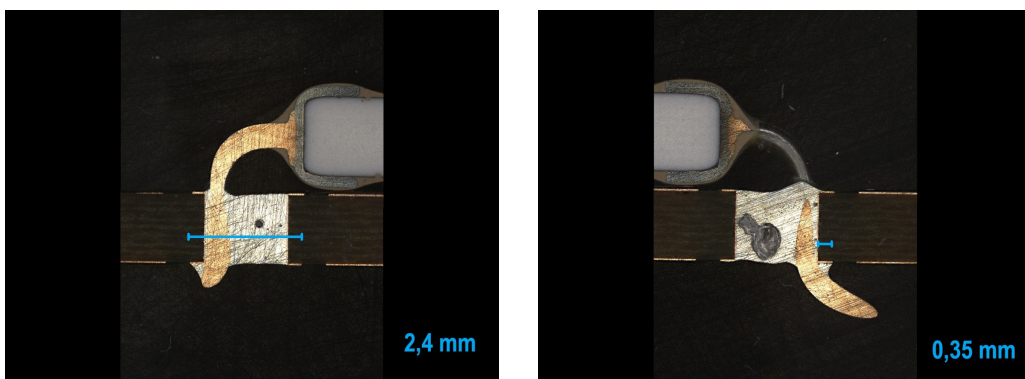
Fotografie 7.3.2.1 a 7.3.2.2 detailně odkrývají možnost strukturálního přiblížení konfokálního mikroskopu. Měřili jsme s 2, 5 a 10násobným přiblížením, jelikož některé spoje bylo potřeba vidět při větším zvětšení. Po celou dobu jsme museli dbát na to, abychom neměli snímek moc podexponovaný či přexponovaný, jinak zařízení není

schopno zpracovat celý povrch a část dat pak zcela chybí. Dále nesmíme zapomenout na rozsah přístroje, kdy může dojít k fyzické kolizi, na což nás software upozorní. Nezbyvá než vzorek oddálit a opětovně nastavit rozpětí se správným zaostřením.

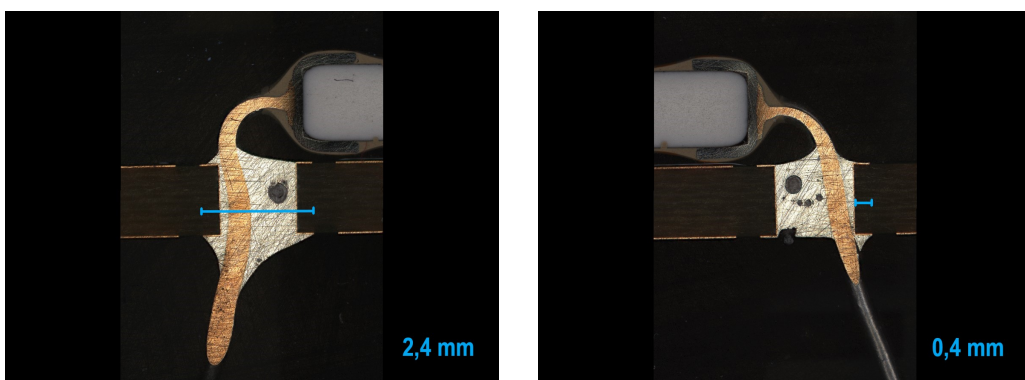
7.3.3 Metalografický výbrus

Metalografický (přesněji materiálografický) výbrus či mikrovýbrus se provádí za účelem kontroly kvality vnitřní struktury různých materiálů, proto se nejedná pouze o metalografii. Pomocí tohoto procesu tedy zjistíme to, co se nachází pod povrchem a není jednoduše viditelné mikroskopem. Jelikož je tato metoda nenávratná, musí se při řezání dodržet pár zásad, jako třeba rychlost kotouče a dostatek chlazení (chladiivo by mělo mít antikorozivní složení).

Pro demonstraci byl zvolen výbrus rezistoru u vzorků všech třech průměrů prokovu zapájených při teplotě 250 °C. Spatřujeme na nich makrovoidy⁸ pod povrchem uvnitř pájeného spoje a na obrázku 7.3.3 vlevo ulomený kousek vývodu, na jehož konci se nachází špička pájky. Rovněž se v okolí vývodů vyskytuje větší množství slitiny.

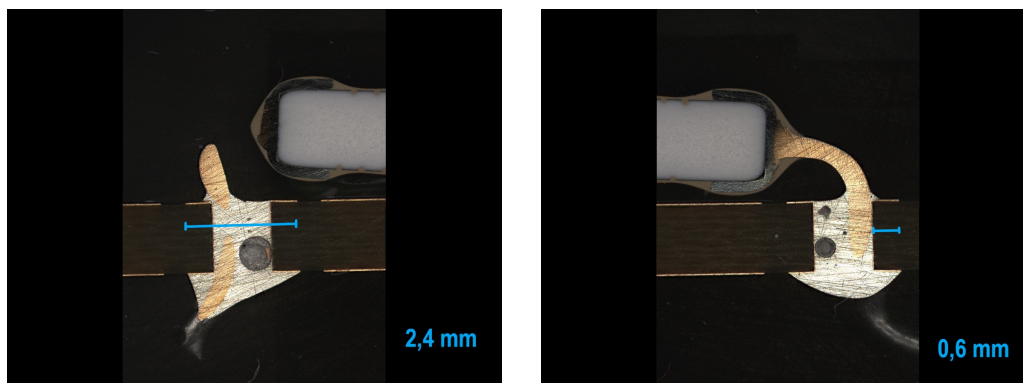


Obrázek 7.3.3.1: Výbrus u nejmenšího prokovu



Obrázek 7.3.3.2: Výbrus u středního prokovu

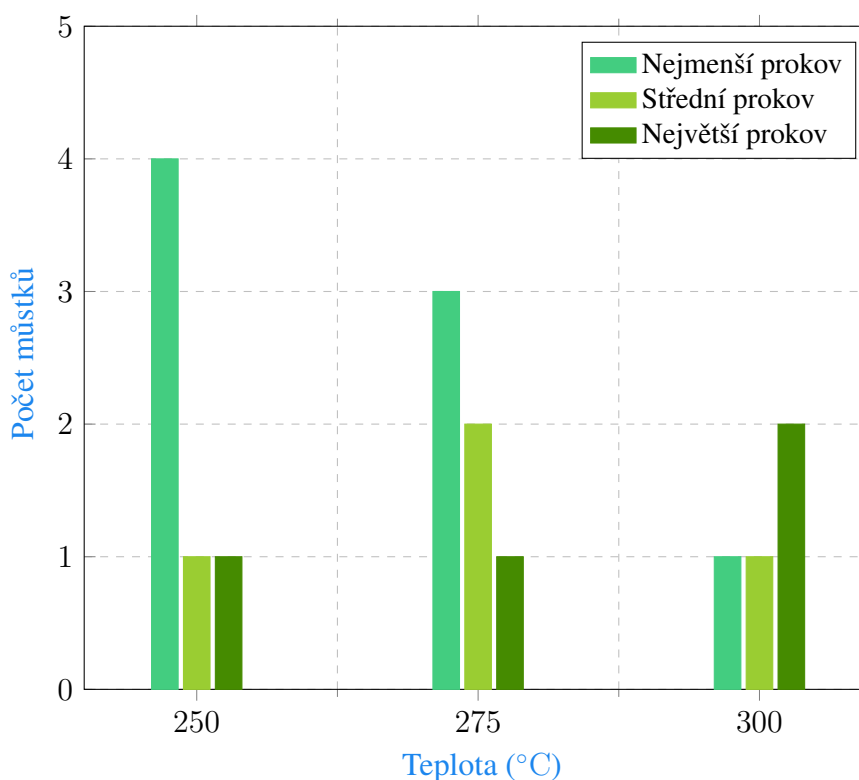
⁸Tento druh voidů se vyskytuje ve spojích nejčastěji a jak je řečeno v [2], může se nacházet téměř kdekoliv.



Obrázek 7.3.3.3: Výbrus u největšího prokovu

7.4 Zhodnocení vzorků

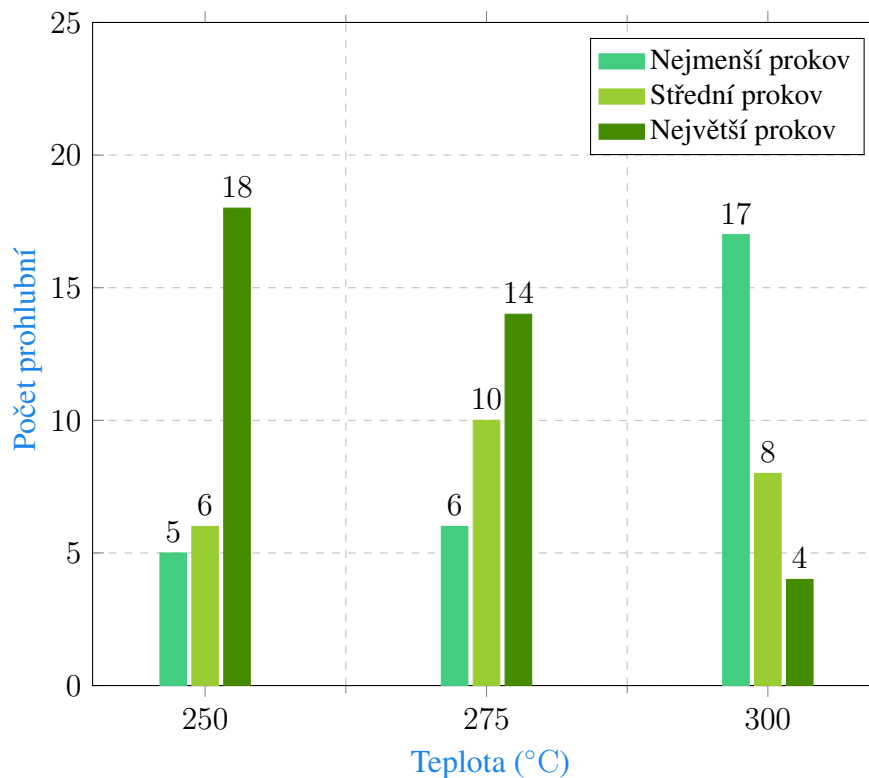
K celkovému vyhodnocení provedené analýzy lze říci pouze to, že se chybných spojů nacházelo na daný počet 45 kusů desek poměrně hodně. K tomu, aby šlo vůbec dojít k nějakému závěru, je skutečně nutné učinit postup popsany v podsekcí 7.3. Na druhou stranu by nebylo na škodu použít pro každý prokov a teplotu pájení víc než jen pět vzorků pro přesnější odhad, avšak i s tímto jsme nějakých poznatků dosáhli.



Graf 7.4.1: Počet můstků v závislosti na teplotě a prokovu

Na grafu 7.4.1 spatřujeme, že s rostoucí teplotou u otvorů s malým průměrem prokovu klesal počet přemostění, což se shoduje se seznamem původců této vady (nízká teplota způsobí vyšší viskozitu pájecí slitiny a nadbytečná pájka mezi sousedícími spoji tak nesteče). Při 250 °C jsme měli dokonce 80 % desek vadných, což je naprosto neakceptovatelné. Samozřejmě se s vyššími teplotami zintenzivní výskyt jiných chyb, jako jsou např. kuličky.

Velice zajímavým úkazem se stal překvapivě vysoký počet různě velkých prohlubnin. Zde jsme totiž narazili na nepřímou úměru – nejsilněji prokovené otvory s nárůstem teploty těmito propadlinami trpěly méně a naopak (vzorky s nejtenčí vrstvou mědi vykazovaly kazovost nejvyšší). Z toho lze usoudit, že teplota je podstatným faktorem ovlivňujícím kvalitu spojů. Výsledek by také dopadl úplně jinak, pokud bychom nepájeli holá místa bez součástek. Konkrétní četnost znázorňuje graf 7.4.2.



Graf 7.4.2: Počet prohlubní v závislosti na teplotě a prokovu

Experiment by si celkově zasloužil zopakovat, ať už ho provést s více deskami či jinými komponentami (obzvláště i s SMD). Do budoucna by nepochybně pomohlo pohrát si s dobou předehřevu, množstvím tavidla a výškou vlny, protože se jedná o parametry, které zůstaly neměnné. Teprve po pečlivém prověření, co funguje nejlépe, dokážeme chyby eliminovat a s jistotou sdělit potřebný výrobní postup pro danou aplikaci, aby již k vadám nedocházelo.

Závěr

V teoretickém okénku jsme se seznámili s většinou aspektů ovlivňující kvalitu spojů s důrazem na pájení vlnou. Především z hlediska pájek není současný stav plně uspokojující, poněvadž se po zavedení bezolovnaté technologie rapidně snížila spolehlivost spojů, a proto nyní stojíme na rozcestí, v němž se všichni primárně budou snažit o získání nižší teploty tání, než má slitina čistého cínu a olova, čili jinak řečeno půjde o nalezení vhodných příměsí, a to zejména začlenění nanočástic do tzv. nanokompozitních pájek. Brzy se tak v tomto směru očekává výraznější průlom.

V praktické části jsem rozebral pracoviště a navrhl experimentální desky, které po zapájení byly analyzovány z pohledu dvou parametrů – teploty slitiny a průměru prokovení otvorů DPS. Co vše taková analýza obnáší, jsem demonstroval na použitých snímcích z provedené mikroskopie a následně kontrolního výbrusu, tím se tak pokryla kompletní diagnostika spojů, tedy jejich vnější i vnitřní struktury. Vlastnoručně sestavené sloupcové grafy ve zhodnocení pak znázorňují výskyt vybraných defektů s jednotlivými počty pro každý průměr vrstvy mědi u dané teploty. Grafické pojetí dopomohlo k jasnějšímu úsudku a přesvědčení se, že v některých ohledech bylo docíleno shody s teoretickým základem.

Práce by se dala vhodně rozšířit, a to nejlépe formou navázání spolupráce s nějakou technologickou firmou, která disponuje mnohonásobně dražším vybavením pro tzv. selektivní pájení (poslední trend vlnové technologie). Vzájemné porovnání výsledků z obou prací by dle mého názoru mohlo být přínosné.

Seznam obrázků

1.1	Tuhé-ohebné spoje	13
1.3.1	Výroba DPS sítotiskem a leptáním	16
1.3.2	Porovnání panel a pattern platingu	17
2.1	Srovnání technologií montáže	18
2.1.1	Porovnání výškových pouzder	19
2.1.2	Šířkově orientovaná pouzdra	20
2.1.3	Vylepšení rozmístění vývodů pro SMD	20
5.1	Proces vlnového pájení	24
5.2	Omezení vzniku závoje úhlem náklonu	25
5.1.1	Porovnání skupin používaných typů vln	25
5.2.2.1	Pájecí linka s plynem	26
6.1	Pájecí stanice Torch TB680	27
6.2	3D mikroskop	28
6.3	Konfokální mikroskop	28
7.1.1	Automatizované fáze procesu	29
7.2.1	Měření teplotního profilu vlny	30
7.3.1.1	Můstky	33
7.3.1.2	Krápník	33
7.3.1.3	Kuličky pájky	33
7.3.1.4	Voidy	34
7.3.1.5	Hole-to-lead ratio	34
7.3.1.6	Zbytky po tavidle	35
7.3.1.7	Nevyplněné spoje	35
7.3.1.8	Přebytečná slitina	35
7.3.2.1	Prohlubeň s voidem z Excelu	36
7.3.2.2	Křehký spoj z naměřených dat	36
7.3.3.1	Výbrus u nejmenšího prokovu	37
7.3.3.2	Výbrus u středního prokovu	37
7.3.3.3	Výbrus u největšího prokovu	38

Seznam tabulek

1.1	Přehled tloušťek vrstev DPS	14
1.1.1	Přehled tloušťek povrchových úprav	15
1.1.2	Výhody a nevýhody povrchových úprav	15
4.2.1	Přehled používaných kovů a jejich účinek	23

Seznam grafů

7.2.1	Teplotní profil pro 250 °C	31
7.2.2	Teplotní profil pro 275 °C	31
7.2.3	Teplotní profil pro 300 °C	32
7.4.1	Počet můstků v závislosti na teplotě a prokovu	38
7.4.2	Počet prohlubní v závislosti na teplotě a prokovu	39

Seznam použité literatury

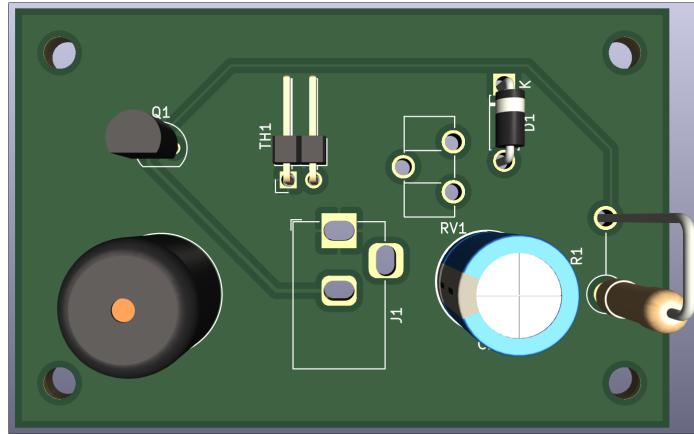
- [1] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [2] ASPANDIAR, Raiyo. Voids in solder joints. *Surface Mount Technology Association Journal*, 2018. [online]. [cit. 21. 4. 2023]. Dostupné z: <https://smtnet.com/library/files/upload/Voids-in-Solder-Joints.pdf>
- [3] DUŠEK, Karel, et al. *Released of Latent Heat from Solder Joints to Surrounding During Solidification of Solder Alloy-Experimental Study*. In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2019. p. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2019.8810199>
- [4] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: používání aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [5] PIETRIKOVÁ, Alena, Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [6] PUTTLITZ, Karl J.; STALTER, Kathleen A. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. CRC Press, 2004, 1048 s. <https://doi.org/10.1201/9780203021484>
- [7] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [8] 3D SMART mikroskop ALL-IN-ONE 1080p s měřením a bezdrátovou myší. HotAir.cz - vše pro pájení, dávkování, balení a servis [online]. [cit. 13. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/mikroskopy/s-kamerou/3d-smart-mikroskop-all-in-one-1080p-s-merenim-a-bezdratovou-mysi.html>
- [9] How to Choose the Right Adapter [online]. [cit. 18. 3. 2023]. Dostupné z: <http://perso.ensta-paris.fr/~tbernard/Rech/caladiom/packages/packages.html>

- [10] Laboratoř diagnostiky materiálů - Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze [online]. Copyright © 2018 Department of Electrotechnology, FEE, CTU in Prague [cit. 12. 3. 2023]. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/laborator-diagnostiky-materialu/>
- [11] Letovací strojní vlna TORCH TB680. HotAir.cz - vše pro pájení, dávkování, balení a servis [online]. [cit. 10. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pajeni/pajeci-vlny/stolni-pajeci-stanice-pro-letovani-vlnou-tyt-tb680.html>
- [12] Maskovat, nebo nemaskovat prokovy? | Aktuálně na DPS [online]. Copyright © 2023 DPS Elektronika od A do Z. [cit. 21. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:29223/maskovat-nebo-nemaskovat-prokovy>
- [13] Olovnaté a bezolovnaté pájky | KONDIK.cz. KONDIK.cz | Plně nabitý sortiment elektrosoučástek [online]. [cit. 19. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.kondik.cz/blog/-olovnata-a-bezolovnata-pajka/>
- [14] Povrchové úpravy desek plošných spojů. Aktuálně na DPS [online]. Copyright © 2023 DPS Elektronika od A do Z. [cit. 16. 2. 2023]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/z-aktualniho-vydani-povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>
- [15] Proč čistit desky i při použití bezoplachové pájecí pasty. Aktuálně na DPS [online]. Copyright © 2023 DPS Elektronika od A do Z. [cit. 20. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:72194/proc-cistit-desky-i-pri-pouziti-bezoplachove-pajeci-pasty>
- [16] Prototypové pracoviště - Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze [online]. Copyright © 2018 Department of Electrotechnology, FEE, CTU in Prague [cit. 13. 3. 2023]. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/prototypove-pracoviste/>
- [17] Přehled pouzder součástek - SMD | Vývoj.HW.cz. Vývoj.HW.cz | Profesionální elektronika [online]. Copyright © 1997 [cit. 18. 3. 2023]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/prehled-pouzder-soucastek-smd.html>
- [18] Standards for PTH Hole and Pad Diameter sizes [online]. [cit. 11. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.eeweb.com/standards-for-pth-hole-and-pad-diameter-sizes/>

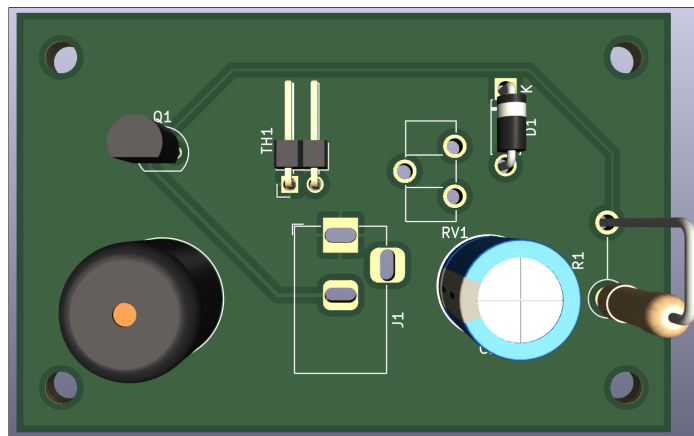
- [19] SVG integrated circuits | [cit. 18. 3. 2023]. Dostupný pod licencí Creative Commons na: https://commons.wikimedia.org/wiki/SVG_integrated_circuits
- [20] Through Hole vs Surface Mount: Which Should You Use? – PCB Design & Engineering Services. PCB Design & Engineering Services – Freedom CAD Services, Inc. [online]. Copyright © 2003 [cit. 16. 2. 2023]. Dostupné z: <https://www.freedomcad.com/2018/07/26/through-hole-vs-surface-mount-which-should-you-use/>
- [21] Wave Soldering Defects - Through-Hole and Surface Mount PCB Assembly. Manufacturing That Eliminates Risk and Improves Reliability | Epec [online]. Copyright © 2023 Copyright Epec, [cit. 1. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/>
- [22] Wave Soldering Troubleshooting Guide | AIM's Practical Solutions [online]. [cit. 1. 4. 2023]. Dostupné z: https://aimsolder.com/sites/default/files/documents/wave_ts.pdf
- [23] Why FR4 Material is Commonly Used in PCB Fabrication? | Sierra Circuits. Sierra Circuits [online]. Copyright © 2023 Sierra Circuits, All Rights Reserved. [cit. 17. 2. 2023]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/why-fr4-material-in-pcb-fabrication/>
- [24] Základní typy pájecích vln. Aktuálně na DPS [online]. Copyright © 2023 DPS Elektronika od A do Z. [cit. 30. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5318/zakladni-typy-pajecich-vln>

Přílohy

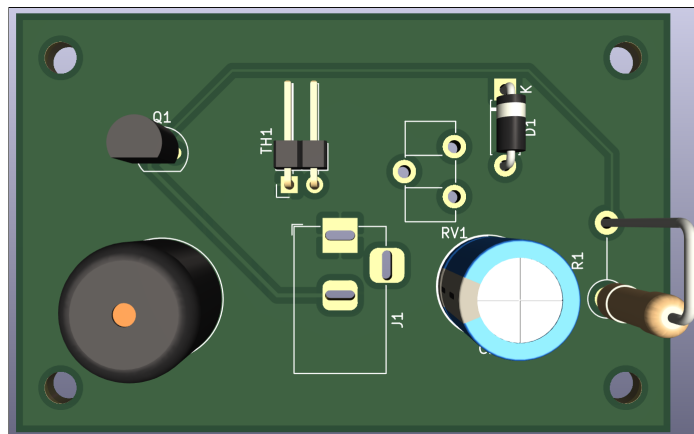
A Porovnání průměrů prokovení mědí



a) Nejmenší tloušťka



b) Střední tloušťka



c) Největší tloušťka