

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Optimalizace procesů prototypové osazovací linky

DPS

Diplomová práce

květen 2021

Jméno a příjmení: Bc. Filip Grňák

Vedoucí práce: Ing. Karel Čermák, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grňák** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **465846**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace procesů prototypové osazovací linky DPS

Název diplomové práce anglicky:

Process Optimization of PCB Prototype Line

Pokyny pro vypracování:

1. U prototypové výrobní linky popište proces přípravy, osazování, zapékání a oplachu DPS.
2. Identifikujte potenciální rizika pro kvalitu osazených DPS.
3. Navrhněte/experimentálně ověřte možnosti zlepšení procesu.
4. Proveďte experiment se signifikantním počtem vzorků na ověření hypotézy.
5. Vyhodnoťte zlepšení a doporučte vhodná opatření pro minimalizaci chybovosti procesu.

Seznam doporučené literatury:

- K. Suganuma, Lead-free soldering in electronics. Marcel Dekker, Inc., 2004.
- ABEL, M. SMT technologie povrchové montáže. 1. vyd. Pardubice:Platan, 2000. 245 s. ISBN 80- 902733- 1- 9.
- Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Čermák, Ph.D., Robert Bosch, spol. s r. o.

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2021/2022

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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.

.....

datum a podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlu Čermákovi, Ph.D. za jeho odborné vedení této diplomové práce, mnoho dobrých rad a za jeho ochotu. Dále panu Bc. Josefu Kavkovi za jeho pomoc a ochotu podělit se o své cenné znalosti. V neposlední řadě také své rodině za to, že mi umožnila studovat a tedy tuto práci napsat.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesů prototypové osazovací linky desek plošných spojů (DPS), která se nachází ve firmě Robert Bosch, spol. s.r.o., České Budějovice. Výroba DPS se sestává z šesti procesů, kterými DPS musí během své výroby projít. Cílem této práce je jednotlivé procesy výroby popsat a analyzovat. Na základě tohoto identifikovat potenciální rizika pro kvalitu vyráběných DPS a jednotlivé procesy optimalizovat pro nový druh pájecí pasty tak, aby výsledné vyráběné desky byly co nejvyšší možné kvality.

Tato diplomová práce se skládá ze tří hlavních částí. První z těchto částí představuje úvod do problematiky výroby DPS. Je v ní rozebrán samotný proces pájení a důležité věci s ním související. Dále je zde rozebrána podstata kavitačního mytí DPS a základní informace pro návrh DPS. Druhá hlavní část je věnována samotné výrobní lince DPS. Jsou zde popsána jednotlivá zařízení osazovací linky a procesy, které v nich probíhají. Pro každé z těchto zařízení jsou zde také určena potenciální rizika, která by mohla vést k chybovosti výroby. Třetí hlavní část je částí experimentální. V této části jsou zaznamenány výsledky experimentů, které byly provedeny za účelem optimalizace procesů výroby. Také jsou zde popsány metody vyhodnocení těchto experimentů a experimentální desky, které byly pro tento účel navrhnuté a s nimiž se i pracovalo.

Klíčová slova

DPS, výroba DPS, optimalizace, potenciální rizika, SMT, pájení, pájecí pasta, sítotisk, osazovací automat, přetavovací pec, čištění DPS, kavitace

Abstract

This thesis deals with the optimization of the processes of the prototype assembly line of printed circuit boards (PCB) which is located in factory Robert Bosch, spol. s.r.o., České Budějovice. The PCB manufacturing process consists of six parts that the PCB must go through. The aim of this thesis is to describe and analyse each step of PCB production. Then on this base identify potential risks for the quality of manufactured PCBs and optimize each one process for the new type of solder paste for production of the highest quality PCB.

The thesis consists of three main parts. The first of them is an introduction to the issue of PCB production. It analyses the soldering process itself and important things related to it. The essence of cavitation cleaning and basic information about PCB designing are there discussed too. The second main part is devoted to the PCB assembly line. Each device of the prototype assembly line and processes that take place in them are described there. There are also described potential risks of each device that could lead to an error. The third main part is the experimental part. This part presents the results of experiments performed to optimize production processes. There are also describes methods for evaluating these experiments and experimental boards which have been designed for this purpose and which have been experimented too.

Key words

PCB, PCB production, optimization, potential risks, soldering paste, screen printing, assembly machine, soldering, reflow oven, PCB cleaning, SMT, cavitation

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	PROBLEMATIKA VÝROBY DPS.....	10
2.1	PÁJENÍ.....	10
2.1.1	Intermetalické vrstvy.....	10
2.1.2	Pájecí pasty.....	11
2.1.3	Pájky.....	12
2.1.4	Olověné pájky.....	13
2.1.5	Tavidla.....	13
2.1.6	Pájení přetavením.....	14
2.1.7	Pájecí profil.....	16
2.1.8	Smáčivost.....	17
2.2	NÁVRH ZÁKLADOVÉ DESKY.....	17
2.3	SOUČÁSTKY.....	18
2.3.1	THT.....	18
2.3.2	SMD.....	19
2.4	MYTÍ DPS.....	20
3	PROTOTYPOVÁ OSAZOVACÍ LINKA.....	23
3.1	MÍSTNOST OSAZOVACÍ LINKY.....	24
3.1.1	Potenciální rizika:.....	25
3.2	SÍTOTISK.....	25
3.2.1	Potenciální rizika:.....	29
3.3	OSAZOVACÍ AUTOMAT.....	30
3.3.1	Potenciální rizika:.....	34
3.4	PEC.....	36
3.4.1	Potenciální rizika:.....	40
3.5	MANUÁLNÍ DOOZAZENÍ A PŘIPÁJENÍ.....	41
3.5.1	Potenciální rizika.....	43
3.6	MYČKA DPS.....	44
3.6.1	Pracovní kapalina.....	47
3.6.2	Potenciální rizika.....	48
3.7	KONTROLA VYROBENÉ DPS.....	49
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	52
4.1	POPIS POUŽITÝCH METOD VYHODNOCOVÁNÍ.....	52
4.1.1	Metoda měření teploty.....	52
4.1.2	Metoda optického vyhodnocování.....	53
4.1.3	Metoda měření elektrických vlastností.....	54
4.1.4	Metoda měření mechanických vlastností.....	55

4.2	EXPERIMENTÁLNÍ DESKY	57
4.2.1	<i>Deska A</i>	57
4.2.2	<i>Deska B</i>	59
4.3	PÁJECÍ PASTA COBAR OT2 SN100C.....	59
4.4	VELIKOST OK V ŠABLONĚ	61
4.4.1	<i>Maximální velikost</i>	63
4.4.2	<i>Minimální velikost</i>	66
4.4.3	<i>Vliv přitlaku stěrky</i>	68
4.4.4	<i>Vliv rychlosti pohybu stěrky</i>	70
4.4.5	<i>Počet přejezdů stěrkou</i>	70
4.5	MINIMÁLNÍ VZDÁLENOST KONTAKTŮ.....	71
4.5.1	<i>Minimální vzdálenost při nanášení pasty</i>	72
4.5.2	<i>Minimální vzdálenost po přetavení</i>	76
4.6	BEZPEČNÁ DOBA OD NANESENÍ PASTY PO PŘETAVENÍ.....	76
4.7	NASTAVENÍ TEPLOTNÍHO PROFILU PECE.....	80
4.8	ROZLOŽENÍ TEPLoty V PECE	83
4.9	MINIMÁLNÍ VELIKOST SOUČÁSTEK.....	85
4.10	IDEÁLNÍ NASTAVENÍ MYCÍHO PROCESU	87
4.11	Vliv oplachu na kvalitu spoje	89
4.12	VÝMĚNA PRACOVNÍ KAPALINY	92
4.13	VYSUŠENÍ V PECE	93
5	ZÁVĚR	95
6	SEZNAMY OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	97
6.1	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
6.2	SEZNAM GRAFŮ	98
6.3	SEZNAM TABULEK	99
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	100
8	SEZNAM PŘÍLOH	102
9	PŘÍLOHY	103

1 Úvod

Smyslem této prototypové osazovací linky je vytvořit co možná nejkvalitnější propojení součástek se základovou deskou. Základová deska má součástky držet pohromadě a také tvoří jejich vodivé propojení, čímž součástky vytvářejí určitý funkční celek, který může plnit funkce, pro které byl navržen. U této linky se součástky k základové desce připevňují pájením. Jedním ze způsobů pájení je tisk pájecí pasty na základovou desku, na kterou se následně osadí součástky. Takto vytvořený spoj se následně ohřeje, čímž dojde k vodivému i mechanickému propojení jednotlivých částí. Právě tento způsob výroby je na této prototypové lince provozován. Výrobní linka, která má být v této práci optimalizovaná, je již nějakou dobu v provozu, ale protože vývoj postupuje neustále dopředu, tak i tato linka se vyvíjí. V době zadávání této práce se výrobní linka rozšířila o nové zařízení a to zařízení určené k mytí DPS. Také se původně používaný typ pájecí pasty ukázal být z určitých důvodů jako nadále nevyhovující a tak bylo nutné vybrat nový typ pájecí pasty, s níž se budou DPS vyrábět a pro kterou budou její procesy optimalizovány.

Jak je již ze zadání patrné, jedná se o výrobní linku prototypovou. Provoz takovéto linky má jiná specifika a je kladen důraz na jiné ohledy, než u hromadných výrobních linek. Na rozdíl od nich zde není hlavním cílem vyrobit co nejrychleji co největší počet DPS, a to za nejnižší cenu při zachování určité kvality. Vyrábí se zde jen malé série DPS, povětšinou do deseti kusů jednoho typu. Zatímco u hromadné výroby by se na prvních pár DPS dala jejich výroba optimalizovat a kontrolovat jejich kvalita, na takovéto lince po pár vyrobených kusech jejich produkce končí. Dalším specifikem prototypové linky je, že může být nutné DPS po jejich vyrobení upravit, například změnit součástku nebo ji odstranit, a tak je občas žádoucí DPS manuálně přepájet. Doba výroby zde nepředstavuje stěžejní parametr, samozřejmě že cílem je vyrobit desky co možná nejrychleji, aby se kapacita mohla věnovat něčemu jinému, ale ve své podstatě není důležité, jestli výroba deseti DPS bude trvat o hodinu méně nebo déle. Dalším specifikem prototypové výroby je, že se u ní počítá se ztrátou určitého množství součástek nebo i pájecí pasty. Jsou zde důležitější ohledy, než na DPS použít co nejmenší množství pájecí pasty a aby každá jedna součástka byla využita. Dále proces výroby u této linky není zcela automatizovaný, ale z velké části závisí na schopnostech operátora výroby, jako například obsluha sítotisku nebo v rámci mytí DPS oplach pracovní kapaliny. U takovýchto procesů nejdou jednotlivé parametry nastavit, a tedy nelze ani očekávat, že jejich výsledek bude identický. Kvalitní a svědomitá obsluha takovéto linky je tedy důležitou podmínkou pro kvalitní výrobu DPS. Dalo by se říci, že je zde důležitější kvalita než kvantita výroby, což v konečném důsledku znamená, že u prototypové linky je nejdůležitější, aby vyrobená DPS byla vyrobena správně a tedy i správně fungovala. Úkolem této práce je tedy popsat proces výroby DPS na této lince, identifikovat potenciální rizika, která by mohla způsobit chybu při výrobě, a optimalizovat jednotlivé procesy výroby tak, aby byly vyráběny kvalitní DPS.

2 Problematika výroby DPS

2.1 Pájení

Smyslem celé výrobní linky DPS je co nejkvalitnější vodivé připevnění součástek na základovou desku, toho se dosahuje pájením. Pájení je proces, při němž se spojují dvě kovové části pomocí dalšího přidaného materiálu. Při tomto procesu se roztaví a následně ztuhne nově přidaný materiál, který difunduje do materiálů, které jsou k sobě pájeny. Tím se k sobě dostanou dostatečně blízko povrchové atomy pájky a pájeného povrchu na to, aby po vychladnutí mohly vzniknout adhezní a kohezní síly, které je drží trvale u sebe. Takto se promísí povrchové atomy základního materiálu (spojovaných kovů) a atomy pájky. Tím vzniknou intermetalické vrstvy, které zařídí mechanické i elektricky vodivé propojení oněch materiálů. [1][15][24]

Výsledkem pájení je trvalé připevnění součástky na základní desku, přičemž součástka je s deskou propojena mechanicky i elektricky. Tento typ spojů je rozebratelný, pro rozebrání stačí pájecí slitinu opět zahřát, pájku odsát a součástku odebrat. K tomu můžeme použít speciální odsávačku nebo jen obyčejnou páječku s tím, že pájku na spoji necháme nebo odstraníme mechanicky. Pokud tedy dojde k nějaké chybě při výrobě DPS, není obtížné manuálně tuto chybu opravit. Obtížnost manuální opravy takovýchto chyb ovšem stoupá se zmenšujícími se rozměry součástek, se kterými se pracuje. K připájení součástek se u osazovacích linek používají pájecí pasty, u ručního pájení pájecí slitiny a tavidla. [1][15][24]

2.1.1 Intermetalické vrstvy

Tyto vrstvy jsou sloučeniny dvou a více odlišných kovových prvků. Vznikají na povrchu dvou spojovaných materiálů. Tyto sloučeniny vytváří adhezní vrstvu zajišťující elektricky vodivé i mechanické propojení těchto dvou materiálů. Vlastnosti tohoto propojení závisí na mikrostruktuře těchto vrstev, kterou ovlivňuje jak proces pájení, tak i následný proces stárnutí. S rostoucí tloušťkou této vrstvy roste i křehkost pájeného spoje, protože intermetalická vrstva není tak tvárná, jako samotná pájecí slitina. Naopak absence této vrstvy by způsobila, že by nedošlo k metalurgickému spojení povrchů. Vznik těchto vrstev závisí jak na druhu pájky a druhu základového materiálu, tak i na teplotě přetavení a času, po kterou teplota působí. Ideální intermetalická vrstva má mít tloušťku několika mikronů. [2][18]

Pokud se dva kovy nebo slitiny dostanou dostatečně blízko sobě, objeví se jejich vzájemná difuze do sebe. Pokud dojde k silné interakci těchto kovů, vznikne intermetalická vrstva. Intermetalická vrstva teoreticky vzniká, i když přiložíme dva kovy k sobě, například pájku a měděnou destičku, avšak vzniká velice pomalu. Zvýšením teploty dosáhneme zrychlení této reakce,

zejména pokud dosáhneme roztavení pájky. Prakticky tedy tato vrstva vzniká až po roztavení pájky. Když tedy roztavená pájka přijde do styku s ploškou, dojde k chemické reakci a vzniku intermetalické sloučeniny, která má nepravidelný tvar. Toto rozhraní dále působí jako bariéra pro další migraci kovů. [2][18]

2.1.2 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou homogenní směsi, obvykle složeny ze tří složek a to z tavidel, z částic pájky a z reologických modifikátorů. Tavidlo je dále tvořeno z rozpouštědla jako je například polyhydric alkohol a z pevné části, což jsou například přírodní pryskyřice, syntetické pryskyřice nebo různé aktivátory na bázi organických kyselin. [1][15][16][17][24]

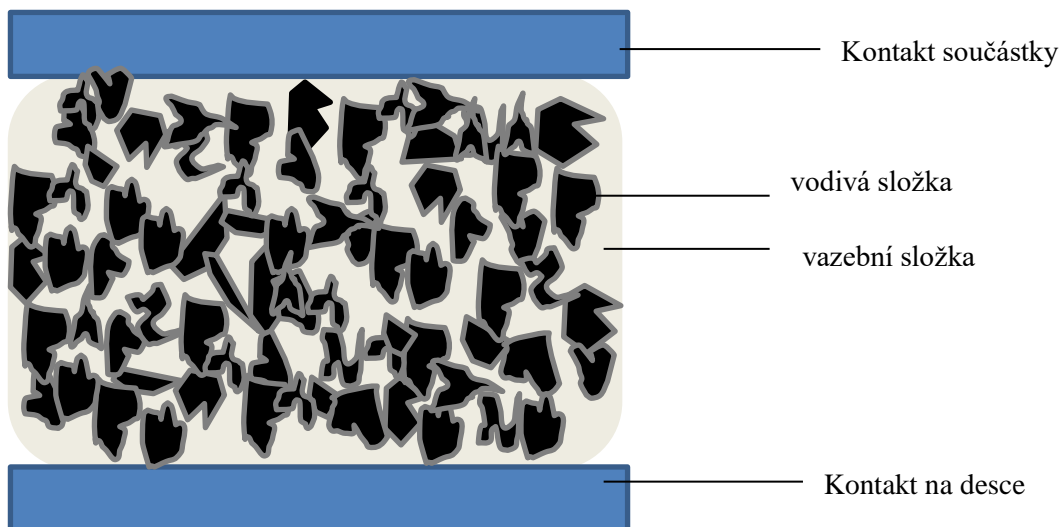
Částice pájky jsou spolu s tavidlem nejdůležitější složkou pájecí pasty. Mívají obvykle tvar kuliček nebo vloček a velikost od 5 do 150 mikrometrů. Tyto částice se vyrábí například pomocí atomizace pájecí slitiny, kdy je slitina roztavena a její kapky dopadávají v ochranné atmosféře na rychle rotující disk, který kapku rozstříkne směrem ke stěnám nádoby. Než tyto malé kapky dopadnou na stěny nádoby, ztuhnou a tak vzniknou částice pájky. Tyto částice se potom pomocí sítí třídí podle velikosti. Nejvíce používané slitiny jsou nyní pájky typu SnAg, SnCu a pájky obsahující bizmut. Tyto částičky pájecí slitiny zajišťují elektrickou vodivost, přesněji vytvoření elektricky vodivých cest. [1][15][16][17][24]

Druhou z těchto nejdůležitějších složek je tavidlo. Úkolem tavidla je hlavně podpořit a urychlit smáčení. Tavidlo dále odstraňuje oxidy a zlepšuje přenos tepla. Také na něm velice závisí chování pasty během tisku. Tavidlo je více než z poloviny tvořeno pryskyřicí s aktivátory, zbytek tvoří rozpouštědla. [1][15][16][17][24]

Třetí složkou pájecích past jsou reologické modifikátory, ty ovlivňují chování pasty během tisku a smáčení. Reologické modifikátory ovlivňují hlavně viskozitu a lepivost, ta zajišťuje udržení součástky na správném místě, dokud nedojde k přetavení pájecí pasty. Lepivost závisí na interakcích mezi jednotlivými složkami pasty. [1][15][16][17][24]

Všechny pájecí pasty fungují na stejném principu, ale různí výrobci vyrábí různé pasty s lehce odlišnými vlastnostmi. Každá pájecí pasta má tedy určité vlastnosti a od výrobce doporučený jiný postup na to, aby vytvořila kvalitní, popřípadě co nejlepší možný spoj. Bavíme-li se tedy o optimalizaci procesů osazovací linky, musíme na toto brát patřičný ohled. Některé procesy by změna typu pájecí pasty sice neovlivnila, ale pro jiné procesy může být typ pájecí slitiny kritický, jako například pro přetavení v peci. Pro každou pájecí pastu totiž existuje ideální teplotní profil, který zařídí správnou aktivaci tavidel, rozpuštění slitiny i vypaření ostatních složek pasty. [1][15][16][17][24]

Výhodou pájecí pasty je při pájení samo srovnávací efekt. Když je součástka při přiložení natočena o určitý úhel, síly působící v tavící se pájecí pastě ji při tavení přitáhnou na kontakty základové desky a tím ji srovnají. Tento efekt funguje jen do určitého úhlu natočení. Vzhledem k tomu, že osazení součástek není nikdy perfektní, je tato vlastnost velice výhodná. Na následujícím obrázku, obrázku č. 1 je znázorněno složení pájecí pasty. [1][15][16][17][24]



Obrázek 1: Struktura pájecí pasty

2.1.3 Pájky

Nejčastěji používané pájky jsou tvořeny dvěma nebo třemi základními kovy a některými dalšími přísadami. Ony další přísady představují mikro regulující přísady, ty jsou schopny silně ovlivňovat chování pájky, ale většinou jsou výrobcem tajeny, neboť představují určité know-how. Každá ze složek mění ve slitině její vlastnosti, jako jsou pevnost spoje, roztékavost či smáčivost pájecí slitiny. Dále jsou v pájecím drátu běžně obsažena tavidla v koncentraci přibližně jednoho až 3 procent. Význam tavidel při pájení je popsán v následujícím odstavci. Nejčastěji používanými materiály ve slitinách jsou cín, olovo, měď a stříbro. V současnosti je z ekologických důvodů snaha odpustit od používání pájecích slitin s olovem, neboť je to toxický těžký kov, který se kumuluje v organismech a tedy je zdraví škodlivý. Avšak olovnaté pájecí slitiny mají stále v mnohých ohledech lepší, nenahraditelné, vlastnosti, takže se mnohde stále používají a je jisté, že se ještě dlouho používat budou. [1][2]

Důležité parametry pájek i pájecích slitin:

- Teplota tání
- Smáčivost a roztékavost
- Elektrická vodivost
- Pevnost spojů

Zajímavou vlastností pájecích slitin je fakt, že některé slitiny mají nižší teplotu tání, než prvky, ze kterých jsou vyrobené. Například čisté olovo se roztaví při teplotě 328°C a cín při teplotě 232°C. Slitina Sn63Pb37 má však teplotu tání pouze 183°C. Tento jev je způsoben tím, že olovo a cín tvoří směs přesně v eutektickém poměru. V takovémto poměru začne směs z tekuté fáze přímo krystalizovat v eutektikum a krystalizuje až do plného ztuhnutí směsi. Ve směsi těchto dvou kovů tedy začne jedna složka krystalizovat a tím koncentrace obou složek dosáhne eutektické hodnoty. V tom okamžiku přestane teplota klesat a i druhá složka začne krystalizovat. Touto společnou krystalizací vzniká struktura zvaná eutektikum, která má právě teplotu tání nižší, než je teplota tání obou čistých složek. Tento jev nastává i v opačném případě, kdy je směs zahřívána a tak se roztaví i při nižší teplotě. [1][2]

2.1.4 Olověné pájky

Olovo je pro lidský organismus, stejně tak jako pro všechny jiné organismy, jedovaté, ukládá se v něm a nedá se odbourat. Organokovové sloučeniny jsou navíc jedny z nejedovatějších látek v přírodě. Z důvodu této nepříjemné vlastnosti olova, bylo roku 2003 všemi evropskými zeměmi přijato, že použití olova je v elektrotechnice s určitými výjimkami zakázáno. Tento zákon vstoupil v platnost v roce 2006. Možnosti používání olova v elektrických a elektronických zařízeních (EEZ) jsou v Evropské unii upraveny směrnicí 2011/65/EU, známou pod zkratkou RoHS (Restriction of hazardous substances). Ostatní země, jako Spojené státy americké, Čínská lidová republika či Jižní Korea, také přijaly podobné zákony omezující používání olova v elektrotechnice.[1][15]

V současnosti se proto používají až na určité výjimky bezolovnaté pájky, jedná se zejména o dvousložkové a tříložkové slitiny. Olovnaté pájky se používají pouze tam, kde jsou pro své vlastnosti nenahraditelné nebo jsou použity z bezpečnostních důvodů, neboť nejsou zaručeny dlouhodobé vlastnosti jejich náhrad. [1][15]

2.1.5 Tavidla

Tavidla jsou velice významnou součástí pájení. Jsou to nekovové chemické látky, které čistí místa určená k pájení, přesněji z nich odstraňují povlak oxidů a současně zabráňují novému vzniku těchto vrstev v průběhu pájení. Tavidla schopná odstraňovat vrstvy oxidů se nazývají aktivní tavidla. Na povrchu kovů se vždy vyskytuje určitá, byť mikroskopická, zoxidovaná vrstva bránící dobrému rozlití pájky. Při teplotách, při kterých se pájí, se okamžitě po zahřátí vytvoří tenká vrstva oxidů na povrchu pájené plochy. Po zahřátí na danou teplotu se oxiduje i samotná pájka a vzniká na ní struska. Tavidlo při pájení tyto problémy odstraňuje. Také dále zajišťují nebo zlepšují smáčení a roztékání roztavené pájky po pájeném místě. Za normálních teplot by tavidlo nemělo být moc aktivní, mělo by začít být aktivní až při teplotách odpovídajících teplotám pájení.

Nejrozšířenější tavidla jsou pryskyřičná. To jsou tavidla s kalafunou, jejichž základem je právě pryskyřice. [1][17][24]

Při výběru správného tavidla by měly být zohledněny tyto faktory

- Druh základní desky, na kterou se pájí
- Typ pájky, například, jestli je olovnatá či ne
- Technologie pájení a způsob nanášení tavidla
- Teplota tavení pájky
- Druh a tloušťka povrchových oxidů
- Odstranitelnost zbytků po pájení, případně způsob čištění

Základní úlohy tavidla v pájecí pastě jsou následující:

- Odstranění vrstvy oxidů na substrátu
- Ochrana proti oxidaci
- Snížení povrchového napětí pájky, aby se zlepšilo smáčení
- Pojit vodivé částičky pájky v pájecí pastě tak, aby se dala pájecí pasta dobře tisknout

Existují různé formy tavidel

- Pevné
- Kapalné
- Gel
- Pasta
- Prášek

Tavidla můžeme mít rozpustná v rozpouštědlech i ve vodě, to jsou například organické kyseliny. Výhodou těchto tavidel je, že proces jejich čištění je levnější. Je totiž žádoucí, aby po procesu výroby na DPS žádné tavidlo nezbylo stejně tak jako jakákoliv jiná nečistota, viz kapitola 3.6. [1][14][17][24]

2.1.6 Pájení přetavením

Připájet na desku stovky, mnohdy ještě víc, součástek ruční páječkou by bylo velice zdoluhavé, náročné a hlavně neekonomické. Proto vznikly způsoby, jak během co nejkratší časové doby na desku hromadně připájet co nejvíce součástek. Rozlišujeme dva základní způsoby takového pájení. Prvním z nich je pájení vlnou, kdy se součástky přilepí na desku, ta se otočí vzhůru nohama a protáhne se roztavenou pájkou. Tento způsob se používá zejména u hromadné výroby desek a je celkem jasné, že u naší prototypové linky výroby DPS není použit. U této

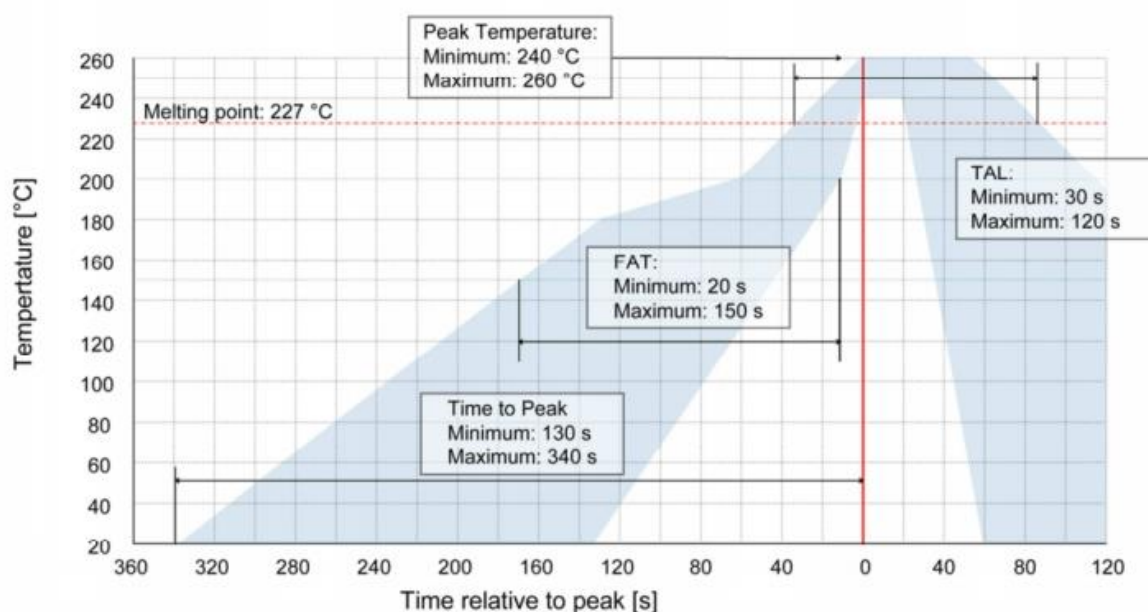
prototypové linky se tedy s výhodou využívá druhý způsob hromadného pájení a to pájení přetavením, takzvaně pájení REFLOW. Pájení přetavením funguje na opačném principu, než ruční pájení nebo pájení vlnou, kde se na pájené místo přivádí tekutá, roztavená, pájecí slitina. Pájecí slitina se zde nejprve nanese na plošky v podobě pájecí pasty, na kterou se osadí součástky. Pájecí pastě je následně dodána energie ve formě tepla, která způsobí její roztavení. Následným vychladnutím a ztuhnutím roztavené slitiny se součástka připevní k desce, vznikne spoj. K dodání potřebné energie k roztavení pájecí pasty lze využít všech možných způsobů přenosu tepla. To je pomocí vedení (přenos tepla přes tuhé látky), konvekci (přenos pomocí proudění plynných nebo kapalných látek) i radiaci (přenos tepelné energie elektromagnetickým vlněním). Výhodou pájení přetavením je, že je citlivější k součástkám, vysoká teplota na ně působí po kratší dobu, navíc při tomto způsobu pájení není třeba dodávat dodatečné lepidlo. Pájecí pasty mají totiž určité lepící vlastnosti, takže jsou po osazení schopny udržet součástku na daném místě a to i v okamžiku, kdy je deska vzhůru nohama, to se hodí při výrobě oboustranných DPS v sofistikovanějších pecích. [1][3][21]

Princip pájení vedením tepla se využívá u ručních páječů. Vedení tepla je zprostředkováno pomocí rozžhaveného hrotu, který je v přímém kontaktu s pájkou, čímž dojde k přenosu tepelné energie a pájka se roztaví. Pájecí hroty jsou vyráběny hlavně z mědi a pokryty vrstvou niklu. Měď se používá díky svým dobrým vlastnostem přenosu tepla a nikl slouží jako ochranná vrstva proti korozi. Tento způsob vedení tepla se využívá zejména při drobném pájení nebo při dodatečném osazování součástek a opravách, viz kapitola 3.5. [1][3][21]

Pájení prouděním se zase využívá hlavně v pecích, například v peci RO-06 použité v této osazovací lince. Nejčastěji využívaným plynným médiem k přenosu tepla je vzduch. Ohřev spojů probíhá tak, že nějaký tepelný zdroj ohřívá plynné médium a to předává svou tepelnou energii celé desce, tedy i pájecí pastě na ní. Aby tento způsob pájení byl účinný, jsou v peci zapotřebí větráky, které dovádí k DPS horký plyn a zajišťují rovnoměrné ohřívání desky. Kdyby deska nebyla ohřívána rovnoměrně, mohlo by se v extrémním případě stát, že by se část spojů přetavila a část ne. Reálně spíše hrozí, že by se pájecí pasta v určitých místech neohřála dostatečně a takto vzniklý spoj by neměl požadované vlastnosti. Tento způsob přenosu tepla se také využívá při opravách vyrobených DPS, kapitola 3.5. Například když je špatně připájený procesor k desce, uchytí se speciálním držákem, který ohraničuje pouze jeho oblast a zároveň na něj působí určitou silou směrem od desky. Na takto uchycený procesor se potom fouká z pájecí stanice horký vzduch, dokud se spoje neroztaví natolik, aby síla byla dostatečná na to, aby procesor odtrhla od základové desky. [1][3][21]

2.1.7 Pájecí profil

Jak bylo výše zmíněno, různé pájecí pasty mají různé vlastnosti, čemuž musí být práce s nimi přizpůsobena. Kritickým procesem pro pájecí pastu je proces jejího přetavení. Postup, jakým způsobem má být pájecí pasta přetavena, vždy přesně udává její výrobce a bývá uveden v jejím katalogovém listu v podobě pájecího profilu. Na následujícím obrázku je vidět pájecí profil pasty Cobar-SN100C-OT2, se kterou bude pracováno v experimentální části. V obrázku jsou uvedeny zkratky FAT a TAL, které znamenají flux activation time a temperature above liquid. Pájecí profil je tedy graf, ve kterém je vyneseno, jak má vypadat průběh teploty v čase během přetavování pájecí pasty. Profil není definován úplně přesně, ale představuje určité hranice, do kterých se průběh teploty musí vejít. Aby vznikl kvalitní spoj, musí být pec nastavena tak, aby její teplotní profil odpovídal pájecímu profilu pasty. V případě, že by průběh teploty během přetavení neodpovídal pájecímu profilu, by vznikl vadný spoj. [3][19]



Obrázek 2: pájecí profil pasty Cobar SN100C OT2

Každá pec má určitou konstrukci a tedy i určité vlastnosti, které limitují průběh teplotního profilu, kterého je v ní možné dosáhnout. Při výběru pájecí pasty je tedy vhodné zohlednit fakt, jestli pec, ve které bude pasta přetavena, je schopna dosáhnout požadovaného pájecího profilu pasty. U dražších a sofistikovanějších pecí lze pájecí profil lépe a přesněji tvarovat, zatímco u menších pecí může být vytváření odpovídajícího profilu dosti náročný úkol. [3][19]

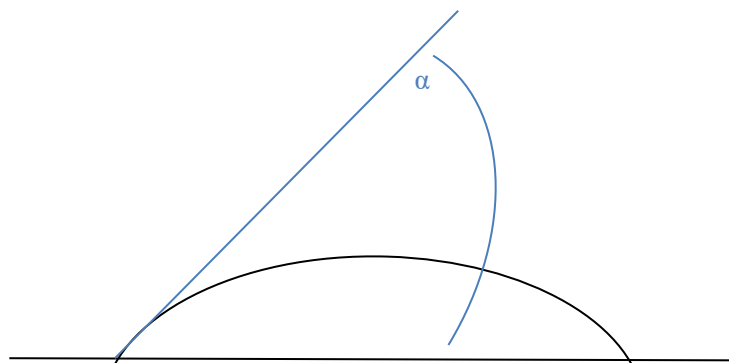
Pájecí profil se zpravidla skládá ze čtyř částí:

- Fáze přehřevu – v této fázi dochází k postupnému ohřívání součástek i desky, čímž se redukuje teplotní šok a tak zabráňuje poškození součástek. Tato fáze bývá časově nejnáročnější

- Fáze vyrovnávací – v této fázi se omezí nárůst teploty v peci, aby se všechny součástky a celá deska rovnoměrně prohřály. V této fázi také dochází k aktivaci tavidla.
- Fáze přetavení - v této fázi dochází k dosažení maximální teploty a roztavení slitiny obsažené v pájecí pastě. Tato fáze bývá obvykle nejkratší
- Fáze chlazení – v této fázi pájecí slitina tuhne a vytváří požadovaný spoj, celá deska i se součástkami chladne. I chladnutí musí probíhat dostatečně rychle, aby nedocházelo k nechtěným reakcím roztavené pájecí slitiny.

2.1.8 Smáčivost

Smáčivost je schopnost roztavené, tedy tekuté pájky, přilnout k povrchu základního materiálu. Uvnitř pájky se síly mezi částicemi vzájemně ruší, na povrchu roztavené pájky však na částice působí síly pouze jedním směrem, tím vzniká nerovnováha energie, která ovlivňuje tvar kapky pájky. Toto nazýváme povrchovým napětím. Povrchové napětí pájky určuje její smáčivost. Vhodným legováním pájky a optimálními podmínkami pájení, což zahrnuje teplotu a kvalitu pájených povrchů, dosáhneme snížení povrchového napětí a tím lepší přilnutí pájky k pájeným povrchům a tím tedy i kvalitnějšího spoje. Lepší smáčení zajišťují tavidla. Smáčivost určíme podle velikosti stykového úhlu, viz obrázek č. 3.[1][15][24]



Obrázek 3: Úhel smáčivosti

2.2 Návrh základové desky

Pro vznik kvalitní a správně fungující DPS je stěžejní už i její předvýrobní fáze, tedy její návrh. Deska musí být navržena s ohledem na možnosti a způsob její výroby. Navzdory tomu, že technologie výroby DPS je velmi pokročilá, stále naráží na určité limity, které nejdou překonat. Navíc je rozdíl, jestli jsou desky osazovány a přetavovány na velkých, plně automatizovaných linkách nebo na menších, méně sofistikovaných, na kterých se dají vyrábět sice stejně kvalitní, ale třeba méně sofistikované DPS. [1][3]

Návrhář by měl tedy zvážit, jaké součástky použije a jaké jsou jejich vlastnosti, aby například nedošlo k poškození součástky příliš vysokou teplotou. Na druhou stranu však musí projít dostatečně vysokou teplotou, která je nezbytná pro správné přetavení pájecí pasty. Použité součástky by měly také mít vhodné rozměry, aby nebyli příliš velké, ale hlavně příliš malé na to, aby se s nimi dalo pracovat. Také by měla být správně zvolena minimální šířka izolační mezery mezi vodivými cestami, vhodná šířka vodivé cesty i minimální průměr pokoveného otvoru. Rozmístění součástek je také velmi důležitý krok, jehož cílem je eliminovat rušivé napětí, vyzařování a zvýšení odolnosti vůči vnějšímu rušení. Také je třeba brát ohled na velikost plochy, na kterou je nanášena pájecí pasta nebo na minimální vzdálenost pájených ploch, viz kapitoly 4.4 a 4.5. [1][3]

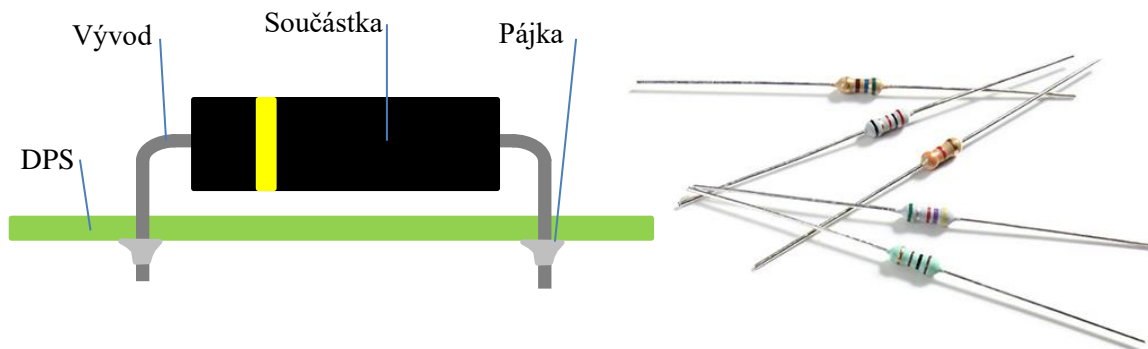
Fáze návrhu základové desky je tedy velmi důležitá a rozhodně by se neměla podceňovat, protože když už je deska špatně navržena, nedá se vyrobit správně fungující DPS, ani se takto vyrobená DPS nedá opravit.

2.3 Součástky

Základová deska slouží k tomu, aby se na ni fyzicky připevnily součástky. Tím tedy vznikají určité funkční celky, které plní požadovanou funkci. Základová deska dále slouží k tomu, aby vytvořila spojení uvnitř těchto funkčních celků, tedy obsahuje vodivé cesty vedoucí ke kontaktům součástek. Součástky samozřejmě můžeme dělit podle mnohých kritérií, například podle velikosti, nebo jestli jsou aktivní či pasivní. V rámci této práce je podstatné jejich rozdělení podle způsobu připevnění k základové desce. A právě v tomto ohledu rozlišujeme dva základní typy součástek a to SMD a THT.

2.3.1 THT

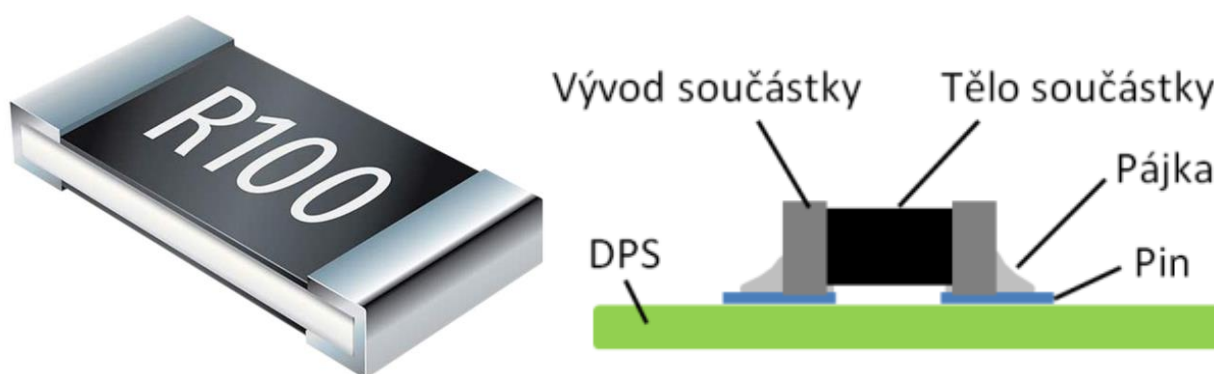
Zkratka THT vyjadřuje Through hole technology, volně přeloženo „Technologie skrz otvor“, z čehož plyne i princip připevnění součástky k základové desce. V desce je vyvrtán otvor, k němuž je dovedená vodivá cesta. Tímto otvorem je prostrčen vývod součástky, takže řekněme, že na horní straně desky je součástka a na spodní straně desky vývod součástky. Na spodní stranu desky se dá pájecí hmota a zahřeje páječkou, roztavená pájecí hmota zůstane na spodní straně desky, ale ideálně proteče i na horní stranu desky, čímž plně zaplní otvor a následně ztuhne. Takto je vytvořen vodivý spoj. THT součástky jsou tedy ty součástky, které jsou zakončeny relativně dlouhými vývody, viz následující obrázek. Na následujícím obrázku, obrázku č. 4, je znázorněno schéma připojené THT součástky a ukázka součástek THT.[1][3]



Obrázek 4: Součástky THT

2.3.2 SMD

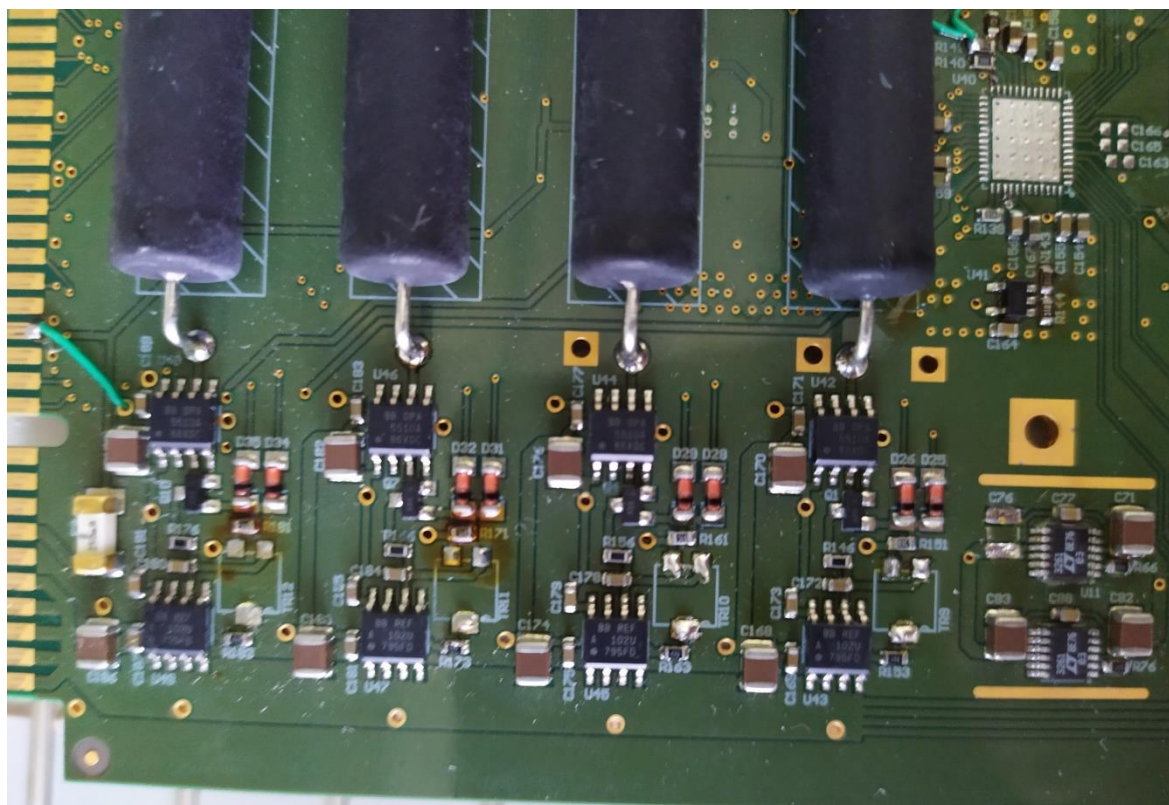
Druhým typem součástek jsou SMD součástky, SMD znamená surface mount device, volně přeloženo „povrchově připevněné zařízení“. I toto pojmenování je celkem všeříkající. Na povrchu základové desky jsou vytvořeny kontakty, které představují zakončení vodivých cest v desce. Na tyto kontakty se nanese pájecí hmota a na tu se položí součástka. Poté stačí kontakt nebo celou desku zahřát a vznikne spoj. Ukázka SMD součástky a schéma jejího připevnění je na následujícím obrázku.[1][3]



Obrázek 5: Součástky SMD

Výhodou těchto součástek tedy je, že na rozdíl od THT součástek zaberou jenom jednu stranu desky, zabírají menší prostor na povrchu desky a není nutné provrtávat desku naskrz, což je výhodou hlavně u vícevrstvých desek. Vícevrstvé desky jsou takové desky, které mají vodivé cesty ve více vrstvách nad sebou. V důsledku tohoto se tedy pomocí SMD součástek dají vytvářet desky menších rozměrů. Toto vede k tomu, že se v současnosti odpouští od THT součástek a pracuje se zejména s SMD součástkami. THT součástky se využívají hlavně jako konektory, protože technologie jejich připevnění k desce je poněkud robustnější. Ze stejného důvodu jsou i velké, těžké součástky typu THT. U naší prototypové linky se THT součástky doosazují ručně až po

automatizovaném osazení a připevnění SMD součástek. Na obrázku níže je vidět deska s oběma druhy součástek, SMD i THT.[1][3]



Obrázek 6: Deska osazená SMD i THT

2.4 Mytí DPS

Během výrobního procesu DPS zůstávají na desce nečistoty. Nečistoty se sestávají hlavně z organických nebo syntetických kalafun, kuliček pájky, kyselin, otisků prstů nebo třeba částech desek. Všechny tyto nečistoty jsou nežádoucí a postupem času by mohly vést k degradaci spojů na desce, narůstání krystalů mezi jednotlivými spoji, chemickým reakcím nebo například ony zmíněné kuličky pájky by mohly sklouznout mezi vývody procesoru a propojit je. Vzhledem k životnosti DPS a zaručení její kvality je tedy vhodné ji po výrobě od všech nečistot očistit. DPS se dá mýt pomocí velkého množství různých čisticích prostředků, například saponáty, uhlovodíkovými či benzínovými čisticími prostředky nebo glykoly. Každé rozpouštědlo má jiné vlastnosti. Mezi nejdůležitější parametry čisticího prostředku patří rozpustnost. Rozpustnost vyjadřuje schopnost rozpouštět nečistoty. Dalším velmi důležitým parametrem čisticích prostředků je povrchové napětí. Povrchové napětí obecně chceme co nejmenší. Souvisí to s rozměry součástek na DPS. Čím menší je povrchové napětí kapaliny, tím spíše kapalina pronikne do malých otvorů a dutinek na DPS. Čisticím médiem s menším povrchovým napětím lze tedy mýt DPS se součástkami menších rozměrů, protože takové médium se dostane do všech jejich miniaturních otvorů a zákoutí a dokáže je umýt. Povrchové

napětí kapaliny klesá s její rostoucí teplotou. Z tohoto důvodu se čisticí prostředky během procesu čištění udržují zahřáté.[9][11][20]

Existuje mnoho způsobů čištění DPS, například ostřikem nebo mícháním. Vzhledem k osazovací lince popisované v této práci se budeme dále zabývat ultrazvukovým čištěním, které je zde používáno. Při čištění ultrazvukem je využíváno ultrazvukové energie, která je zdrojem mikrovibrací v pracovní kapalině. Tyto mikrovibrace v pracovní kapalině vytváří velké množství drobných bublin, které generují velmi intenzivní čisticí efekt. Tento proces se nazývá kavitací. Výhodou tohoto typu čištění je, že čištění probíhá i ve velmi špatně dostupných místech, jako je pod připájenými součástkami, a i na velmi hustě osazených deskách.[9][23]

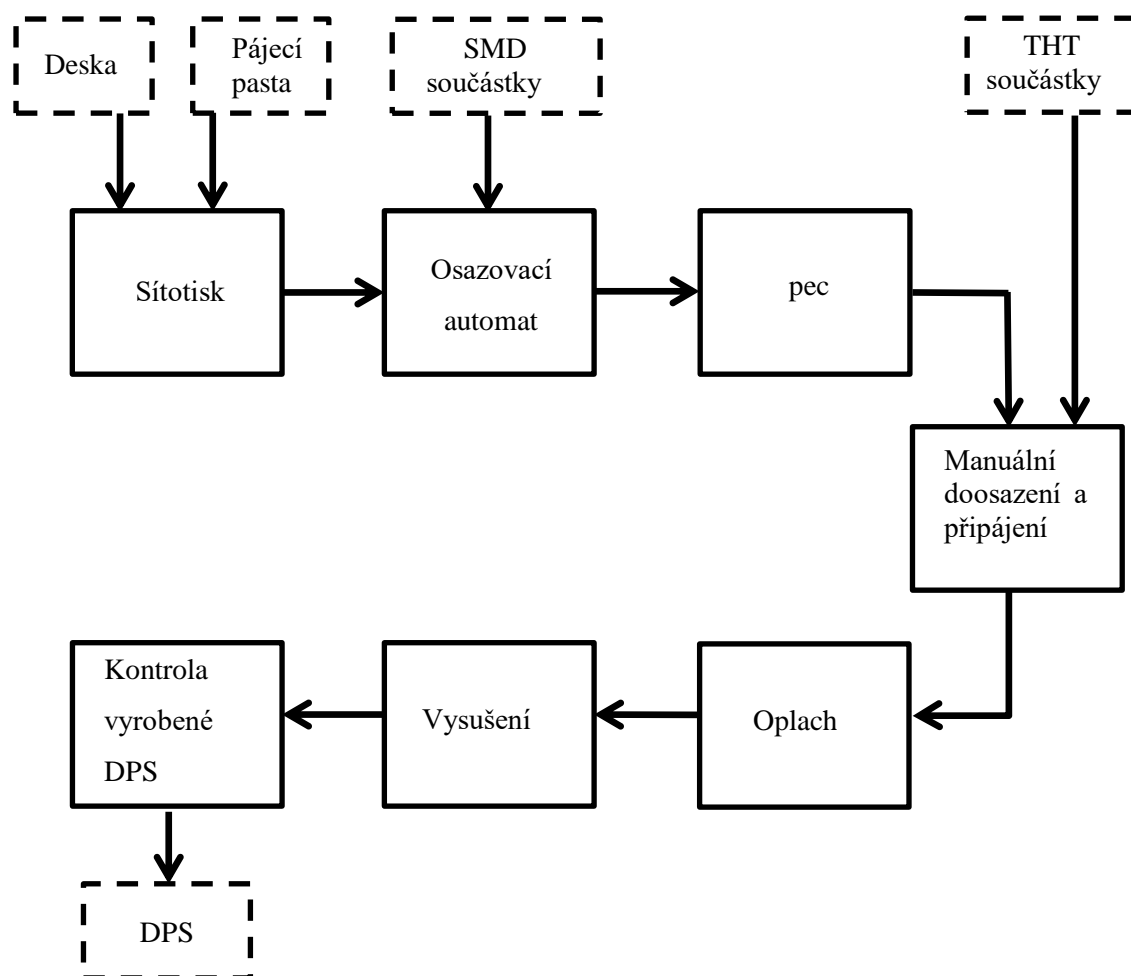
Kavitace je odvozena z latinského slova dutina. Popisuje jev, kdy se v kapalině za určitých podmínek vytváří bubliny vyplněné párou, směsí páry a plynu nebo vakuem. Takovéto bubliny vznikají v důsledku poklesu tlaku v kapalině způsobeném mikrovibracemi. Ke kavitaci dojde, poklesne-li lokální tlak v kapalině na hodnotu kavitačního tlaku, který odpovídá tlaku nasycených par kapaliny o určité teplotě. Po vymizení lokálního podtlaku v kapalině bubliny zkolabují (implodují) a dojde k prudké kondenzaci par za vzniku tlakové vlny. Při tom vzniká vysoce energetické proudění kapaliny, které odstraňuje částičky nečistot z povrchů, jakož i malých prohlubní a otvorů čištěných předmětů. Pokud tedy tyto bubliny zanikají v okolí nebo přímo na povrchu tělesa, způsobují jeho rozrušování, což se projevuje úbytkem materiálu. Toto se nazývá kavitační erozí. Pokud se kavitační eroze využije vhodným způsobem, lze ji označit jako kavitační čištění, kterého se využívá právě v ultrazvukové myčce, kde dochází k rozrušování nežádoucího materiálu na povrchu desek a jeho odstraňování z jejich povrchu. Je však nutno pamatovat, že kavitační eroze působí na cokoliv, co se v kapalině vyskytuje, tedy i na materiál, který odstranit nechceme a tak by při nevhodném použití kavitačního čištění mohlo dojít k poškození vyráběné DPS. Přece jen proces kavitace sám o sobě způsobuje například poškození masivních lodních šroubů.[9][23]

Ultrazvukové čištění může být prováděno pomocí různých frekvencí. Nízké frekvence ultrazvuku, kolem 20 kHz, se používají pro razantní čištění. To je vhodné pro čištění silně znečištěných povrchů, kde je nečistota velmi úporná. Toto je dáno tím, že nižší frekvence vytvoří větší bubliny a ty při své implozi silnější tlakové vlny. Standardně se k čištění používá frekvence 40 kHz. Tato frekvence je univerzální a tedy vhodná pro širokou škálu znečištění. Při vyšší frekvenci se tvoří větší počet menších bublinek. Ty jsou ideální pro intenzivní, ale zato šetrné čištění. Vyšší frekvence čištění, 120 až 180 kHz, se používá pro velmi šetrné čištění tam, kde je třeba čistit s ohledem na to, aby kavitace nepoškodila čištěný předmět, například nějaké velmi citlivé součástky. Při vyšší frekvenci totiž vznikají menší bubliny a ty svou implozí způsobí menší tlakové vlny.[9][23]

Proces kavitace ovlivňují parametry pracovní kapaliny, stejně tak jako množství rozpuštěného plynu v této kapalině. Přítomnost vzduchových bublinek v pracovní kapalině způsobuje podstatné zhoršení vzniku kavitace a tedy i pokles účinnosti čištění. Z tohoto důvodu je vhodné pracovní kapalinu před začátkem čištění odplynit. Za tímto účelem mnohé ultrazvukové myčky obsahují funkci „DEGAS“, která pracovní kapalinu odplyní. Ultrazvuk v tomto případě odstraní suspendované plynové bubliny z kapaliny a sníží tak hladinu rozpuštěného plynu pod přirozenou rovnovážnou úroveň. Pracovní kapalinu je vhodné odplynit zejména po aplikaci nové kapaliny do myčky, nebo pokud má být myčka použita po delší době.[9][23]

3 Prototypová osazovací linka

Osazovací linka, kterou se budu v této práci zabývat, je určena k výrobě menšího množství desek plošných spojů (DPS), které se dále používají ke konstrukci specifických zařízení ve vývojovém oddělení ve firmě Robert Bosch, České Budějovice. Nejedná se tedy o hromadnou výrobu velkých sérií DPS, ale o malosériovou. Tomuto faktu odpovídají i specifika jednotlivých zařízení, u nichž výrobci uvádí, že se jedná o zařízení vhodná k tomuto typu výroby. Osazovací linku tvoří jednotlivá zařízení rozmístěná po místnosti. Protože jednotlivé části osazovací linky nejsou nijak propojeny, potřebuje linka ke svému provozu obsluhu. Mezi jednotlivými kroky výroby DPS musí být desky manuálně přesouvány a každé zařízení je po vložení desky ručně spouštěno. Žádná automatizace výroby se zde tedy nevyskytuje. Níže na obrázku č. 7 je znázorněno schéma této osazovací linky.



Obrázek 7 Schéma prototypové osazovací linky

3.1 Místnost osazovací linky

Kvůli ochraně součástek před statickým nábojem, který by je mohl zničit, je místnost osazovací linky vybavena antistatickou podlahou. Antistatické podlahy jsou speciální podlahy, které mají dobrou elektrickou vodivost a jsou tedy vhodné do prostor, ve kterých je potřeba zabránit vzniku elektrostatických výbojů nebo kde je třeba elektrostatické náboje eliminovat. Podlaha je natřena speciálním nátěrem, který má dobré vodivostní vlastnosti, a je uzemněná. Na člověku, který se v místnosti pohybuje, se tak nemůže hromadit elektrický náboj, protože se z něho neustále odvádí. Podmínkou, aby toto správně fungovalo, je ovšem správná obuv. Obuv nesmí obsluhu linky izolovat od podlahy. Před vchodem do místnosti je k dispozici zařízení na testování obuvi, je vidět na obrázku č. 8. Pokud obuv nevyhovuje, je vhodné použít pásku, která je nad zařízením. Páska se jedním koncem vloží do boty a druhým připevní na podrážku boty, čímž je umožněn odvod náboje. Toto opatření je nezbytné, protože při kontaktu obsluhy se součástkami používanými při výrobě DPS by mohl na součástky působit elektrostatický výboj a ten by mohl součástku poškodit, což by mohlo způsobit špatně vyrobenou DPS. Vzhledem k uspořádání linky, musí obsluha neustále manipulovat s DPS a mnohdy i se součástkami samotnými, takže riziko by bylo vysoké.



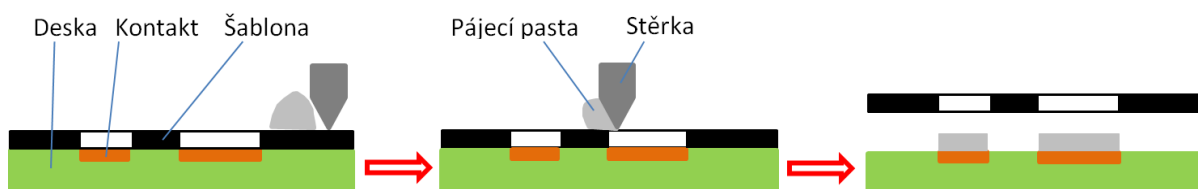
Obrázek 8: Testovací stanice

3.1.1 Potenciální rizika:

- Elektrostatický náboj – Pokud by nebyla k dispozici vhodná obuv, a tedy nebyl zajištěn odvod náboje, je nezbytné použít výše zmíněné pásky nebo před manipulací s deskou či součástkami zajistit odvod elektrostatického náboje jiným způsobem.

3.2 Sítotisk

Sítotisk slouží k nanesení pájecí pasty na kontakty základové desky, na které má být následně připájena součástka. Pájecí pasta se tak tedy dostane pouze tam, kde má být a to v požadovaném množství. Princip sítotisku je zobrazen na obrázku č. 9. V šabloně, jsou vytvořené otvory, kterými je pasta protlačena pomocí stěrky. Množství nanesené pasty závisí na velikosti otvoru v šabloně, který by měl mít stejné rozměry, jako kontakt na desce, a také na tloušťce šablony. Na obrázku č. 9 je vidět, že stěrka plně zaplní otvor v šabloně pájecí pastou. Čím je tloušťka šablony větší, tím větší množství pasty v ní zůstává, a tedy tím více pasty po odklopení je na desce nanášeno.[3][22]

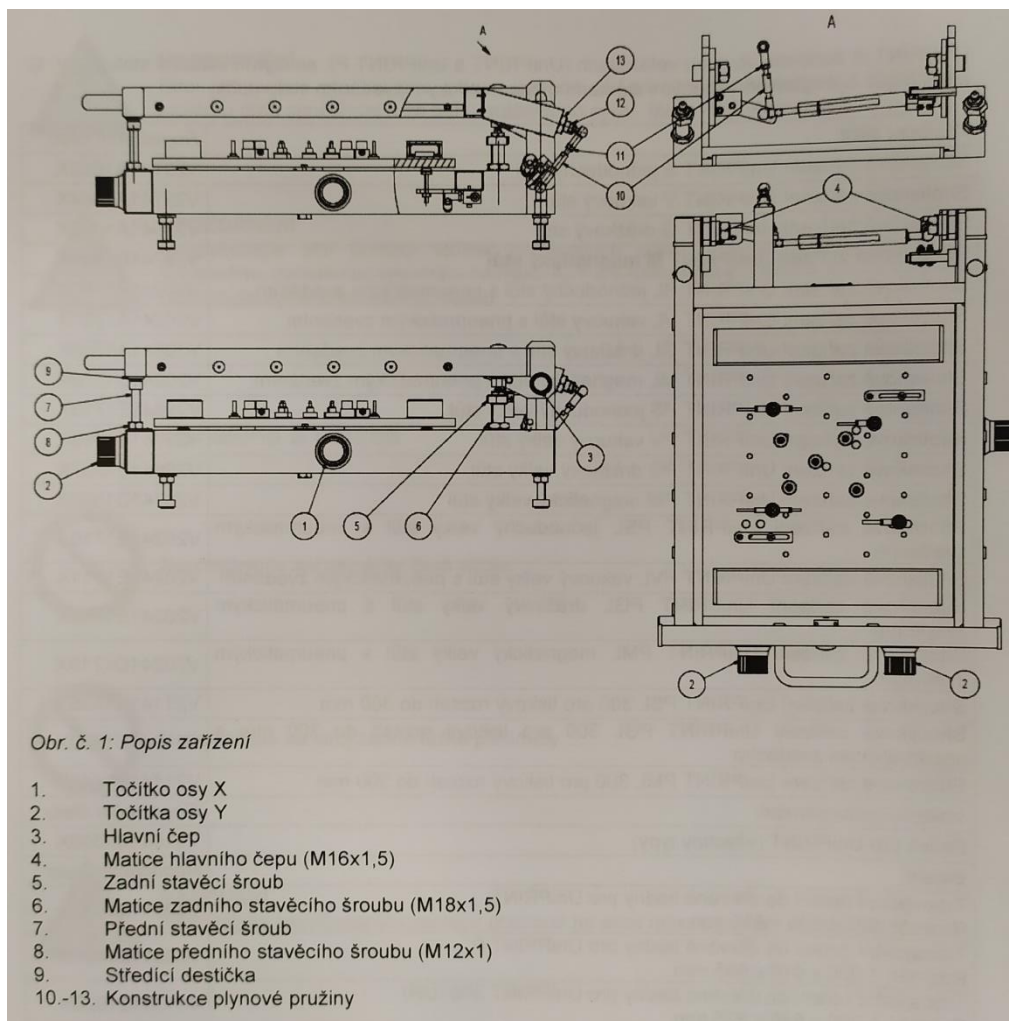


Obrázek 9: Princip sítotisku

Součástí této osazovací linky a tedy zařízení, se kterým v této práci pracuji a k němuž se vztahují závěry z praktické části je sítotisk Uniprint – M od firmy PBT Works. Maximální velikost DPS, se kterou se dá pracovat, je výrobcem uvedena jako 320 x 300 mm a maximální plocha tisku jako 290 x 265 mm. Uniprint – M je dále vybaven magnetickým stolem, systémem vedené stěrky, plynovou pružinou, vakuovými přísavkami a magnetickými lištami. Maximální výška potiskovaného předmětu je 42 mm a přítlak stěrky se může pohybovat v rozmezí 10 až 50 N. [7]

Při použití sítotisku se nejdříve na odklápěcí rám zařízení připevní šablona. Šablona je plechová fólie, ve které jsou vytvořeny otvory. Je nutné, aby byla šablona správně upevněna a následně dostatečně napjata tak, aby přesně přiléhala na základovou desku. Poté se pod šablonu nemůže dostat žádná pájecí pasta a nevznikají problémy se znečištěním desky nebo dokonce nežádoucím propojením kontaktů či součástek nanášenou pájecí pastou. Základová deska se do zařízení upevňuje na pohyblivou desku pomocí sady magnetického upínání DPS tak, aby po přiklopení šablony otvory v šabloně přiléhaly na kontakty základové desky. Po přiklopení horní části sítotisku se spustí přísávání, které přisaje desku, čímž se zajistí, že se deska nemůže pohnout.

Aby otvory v šabloně přesně odpovídaly kontaktům na základové desce, je možno pohyblivou desku sítotisku, na kterou je připevněna základová deska, vycentrovat v osách x, y a měnit úhel jejího natočení. K tomuto slouží tři korekční šrouby, jeden v ose x a dva v ose y. Korekce soutisku je v rozmezí ± 3 mm. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma sítotisku i s popisky. [7]



Obrázek 10: Schéma sítotisku s popisem [7]

Když jsou základová deska i šablona správně umístěny, nanese se na šablonu pájecí pasta v dostatečném množství po celé délce stěrky asi 2 až 3 cm za první otvory v šabloně. Dále se na šablonu přiklopí systém dvojité vedené ocelové stěrky. Stěrka má možnost samostatně nastavitelného přítlaku. Pohybem stěrky tam a zpět se pájecí pasta rovnoměrně protlačí do všech otvorů v šabloně a tím se dostane přesně na kontakty v určitém množství. Tloušťka nanesené vrstvy pájecí pasty odpovídá tloušťce šablony. [7]

Jak již bylo zmíněno, sítotisk obsahuje systém vedené stěrky, ten je navržen pro tisk tam a zpět střídáním pozic stěrek nahoru a dolů podle polohy rukojeti vedené stěrky. Směr tisku a polohy stěrek se mění tažením nebo tlačení stěrky. Systém vedené stěrky je také vybaven automatickou

brzdou, která v každé pozici fixuje hlavu stěrky. Brzda funguje kdykoliv obsluha postaví ovládací rukojeť do svislé polohy.

Úhel vedené stěrky je 60° , ten udává výrobce jako ideální. 60° ovšem představuje úhel bez zatížení, při tisku pod jmenovitou silou se konec stěrky prohýbá, praktický úhel při tisku je tedy přibližně 45° . Pokud je úhel příliš velký, znemožňuje dobré protlačení pájecí pasty přes masku. Naopak pokud je příliš malý, způsobuje protlačení pájecí pasty pod šablonu, tedy nečistý tisk, což může způsobit až zkratky kontaktů na desce při přetavení. Výhodou tohoto zařízení je, že je vybaven systémem vedené stěrky, který tento úhel jasně definuje a při samotném tisku se tak tato problematika nemusí nijak zohledňovat. Fakt, že je tento úhel jasně definovaný ovšem také znamená, že jej nelze změnit a tedy ani nijak přizpůsobit, optimalizovat. [7]

Stěrka musí zajistit pomalé valení pájecí pasty před sebou. Rychlost ovšem závisí na konzistenci použité pasty, která se může lišit podle stáří, teploty a dodavatele. Pokud je rychlost příliš velká, dojde k neúplnému vyplnění ok v šabloně. Na obrázku č. 11 je zachycen sítotisk s připevněnou šablonou. [7]



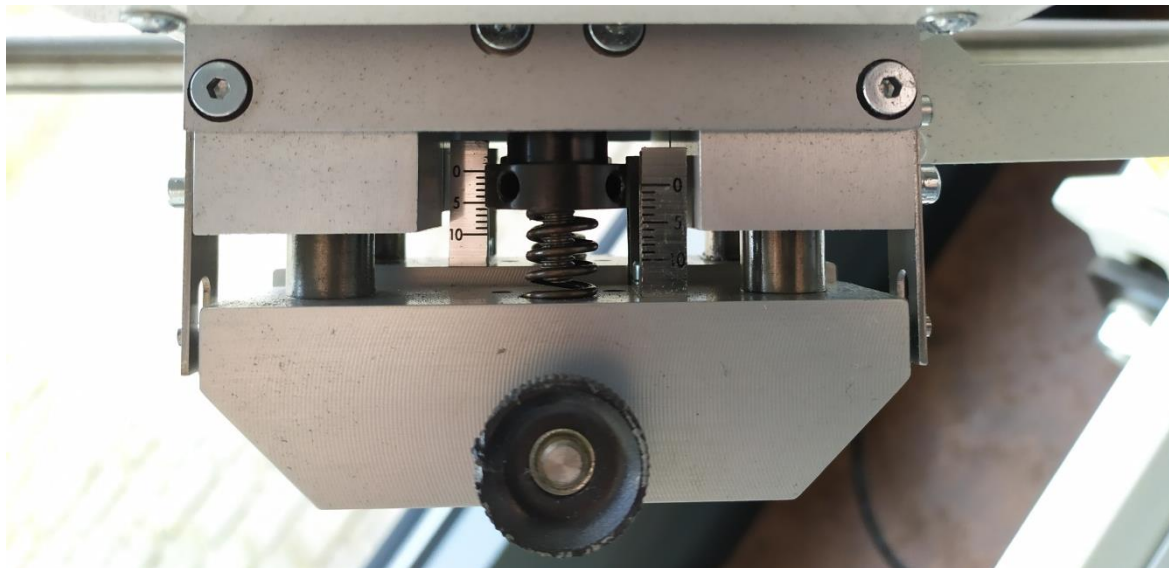
Obrázek 11: Sítotisk s napnutou šablonou

Nakonec se šablona odklopí vertikálním pohybem horního rámu směrem nahoru. V první fázi odklápění horního rámu se rám pohybuje kolmo nahoru, což zajistí, že nanesená pájecí pasta zůstane přesně tam, kam byla nanesena. V této fázi také stále fungují vakuové přísavky, které drží DPS připevněnou k dolní desce sítotisku. DPS se tak nemůže pohnout, ani nemůže dojít k tomu, že by DPS zůstala přilepena k šabloně a po odklopení by odpadla nebo by musela být manuálně

oddělena, což by s největší pravděpodobností znamenalo určité rozmazání natištěného vzoru pájecí pasty. Tímto tedy dojde k úspěšné a přesné separaci šablony od DPS. V druhé fázi odklápění se horní rám se šablonou již normálně odklopí, jak je vidět na obrázku č. 11. Když je rám zvednut do určité výšky, automaticky se vypne odsávání vzduchu, vakuové přísavky přestanou fungovat a je možné odebrat základovou desku s nanesenou pájecí pastou. Separace šablony směrem nahoru je omezena pneumatickým systémem. Tento systém zabraňuje rychlému odtržení horního rámu se šablonou od základové desky a zařídí relativně pomalé a hlavně plynulé odklopení horního rámu. Pasta musí mít určitý čas, aby mohla využít tixotropní charakter a aby mohla na hranách přejít do tekuté fáze.

Pokud se tiskne více desek za sebou, je potřeba po určitém množství desek šablonu očistit neboť zejména malé otvory v šabloně se ucpávají a tak se přes ně pasta protlačuje hůře. Šablona se dá snadno očistit proudem stlačeného vzduchu nebo utěrkou s technickým lihem. Je však třeba dát pozor, aby vlákna z utěrky nezůstaly uchyceny na šabloně a následně v natištěné pastě. Ideální je šablonu nejdříve profouknout stlačeným vzduchem, následně očistit utěrkou s lihem a nakonec opět očistit proudem stlačeného vzduchu.

Šířka stěrky by měla být minimálně o 10 mm větší, než šířka tištěného motivu, avšak neměla by být příliš široká, aby nedošlo k ohýbání jejich ostří. Vedená stěrka má nastavitelný přítlak od 10 do 50 N. Správný tlak se projeví dokonale čistou šablonou za stěrku, menší tlak nechává pájecí pastu na šabloně po přejetí stěrky a širší vrstvu pájecí pasty na kontaktu. Příliš velký tlak zase způsobí vyhrabování pájecí pasty z ok v šabloně. Každá ze stěrek má svůj vlastní, nastavitelný, mechanismus přítlaku. Sílu působící na stěrku, tedy její přítlak, můžeme nastavit na obou stranách hlavy vedené stěrky. Na obrázku č. 12 je vidět systém nastavení přítlaku stěrky i se stupnicí přítlaku. Na stěrce je nastaven takový přítlak, který na stupnici ukazuje dolní hrana otáčivého kotouče. [7]



Obrázek 12: Nastavení přítlaku vedené stěrky sítotisku

3.2.1 Potenciální rizika:

- **Kvalita pájecí pasty.** Problémy by mohly vzniknout v důsledku použití nekvalitní nebo zejména již moc staré pasty. Pájecí pasty postupem času degradují. Rychlost jejich degradace je ovlivněna například způsobem jejich skladování, či délkou jejich expozice mimo vhodné skladovací podmínky. U degradovaných past hrozí, například, že budou vyschlé reologické modifikátory, což by v ohledu sítotisku způsobilo špatné protlačování pasty do otvorů šablony.
- **Množství nanesené pasty.** Šablona může být částečně ucpaná nebo může být nastaven špatný přítlak na stěrku, což by způsobilo nanesení nevhodného množství pasty.
- **Aplikace pasty na šablonu.** Pasta musí být do sítotisku, na šablonu, aplikována v dostatečném množství a to po celé délce šablony. V době aplikace pasty musí pasta dosahovat pokojové teploty. Pájecí pasty se totiž většinou skladují v chladicích zařízeních.
- **Velikost ok v šabloně,** respektive kontaktů na desce. Otvory v šabloně by mohly být příliš velké nebo příliš malé na to, aby do nich byla pájecí pasta správně protlačena. Této problematice je věnována kapitola 4.4.
- **Minimální vzdálenost ok v šabloně.** Pokud by byly oka v šabloně, respektive kontakty na desce, příliš blízko k sobě, mohlo by dojít k jejich propojení pájecí pastou. To by následně po přetavení vedlo ke zkratu na desce. Této problematice je věnována kapitola 4.5.
- **Nedostatečné napnutí šablony.** Šablona musí být dostatečně napnuta, což se dá ověřit zatlačením prstem na místě vzoru. Pokud je šablona správně napnuta, neměla by se téměř vůbec prohnout. Dalším znakem špatně napnuté šablony je, že když se po ní přejezdí stěrku, vydává určitý zvuk, charakteristický pro zvlnění plechu. Pokud se pájecí pasta dostane pod šablonu nebo se základová deska k šabloně přilepí, znamená to, že je šablona málo napnutá a měla by se napnout více. Ideální stav napnutí šablony je, když utahovací šroub již nejde více dotáhnout. Při použití rozumné manuální síly by nemělo dojít k deformaci šablony. Náchylné na deformaci jsou zejména okraje šablony uzpůsobené k uchycení do sítotisku.
- **Rychlost odklápění šablony.** Rychlost odklopení je omezena plynovou pružinou na horním rámu, která zabraňuje nějakému rychlému škrbnutí a odtržení šablony od desky. Stejně tak jako u pohybu stěrky je vhodné horní rám zvedat spíše pomaleji, než rychleji.
- **Špatně uchycená DPS** ke spodní desce sítotisku. Je možné pájecí pastu tisknout i bez aktivních vakuových přísavek, ale pro zajištění kvality a jistoty je lepší, aby byly vakuové přísavky při tisku aktivní. Také je vhodné, zejména pokud se pracuje s deskami větších rozměrů, podložit desky nejen přísavkami, ale i podstavci k tomu určenými. To zajistí, že se deska pod šablonou nijak neprohýbá a přesně doléhá na šablonu.
- **Nastavení horního rámu.** Změnit výšku horního rámu je nutné, když se má tisknout na desku jiné tloušťky. Pokud by se tak neučinilo, nemusela by šablona doléhat na desku a tak by se pod ní tisknutá pasta snadno protlačila. V opačném případě by se naopak šablona po přiklopení

víka o příliš tlustý substrát prohnula, což by zavinilo ten samý efekt. Nastavení výšky horního rámu je relativně složitý úkon, pro který je nutné sejmout plynovou pružinu. Výrobce udává, že pokud měníme výšku pouze v řádu desetin mm, není nutno pro změnu výšky plynovou pružinu sejmout. Vzhledem k tomu, že pro nastavení výšky zde nejsou žádná točítka ani páčky, ale musí se sítotisk rozebírat a povolovat šrouby, mohlo by se na změnu výšky snadno zapomenout. Vzhledem k tomu, že toto nastavení je relativně složité a vyžaduje následné seřízení, je ideální to při návrhu zohlednit a navrhovat desky o stejné nebo podobné tloušťce, aby se tento úkon nemusel například kvůli každému typu desky provádět.

- **Špatný úhel vedení stěrky.** Tento sítotisk má vedenou stěrku, u které toto nehrozí.
- **Správné nastavení přitlaku stěrky.** Možnost měnit přitlak stěrky umožňuje používat stěrky různých délek, a tak je možné pro různé šablony použít stěrky ideálních délek. Přitlak stěrky se nastavuje podle její délky. Je třeba se tedy ujistit, že přitlak odpovídá dané stěrce. Popřípadě podle vzoru, jaký chceme tisknout na desku je vhodné přitlak upravit. Viz kapitola 4.4.3.
- **Rychlost pohybu stěrky.** Vedenou stěrkou se hýbe ručně, pohybovat s ní je tedy možné libovolnou rychlostí. Například u pájecí pasty Cobar OT2 SN100C, pro kterou tuto linku v této práci optimalizují, je uvedená ideální rychlost tisku na 25 až 100 mm/s. Takovéto rychlosti pohybu stěrky snad už kvůli odporu vedené stěrky ani není možno na tomto zařízení dosáhnout. Tato hodnota je udávána pro plně automatizované sítotiskové zařízení. Ze zkušeností z výroby experimentálních vzorků doporučuji spíše pomalý, nežli rychlý pohyb stěrkou, při němž se dosáhne lepšího protlačení pasty do ok v šabloně.

3.3 Osazovací automat

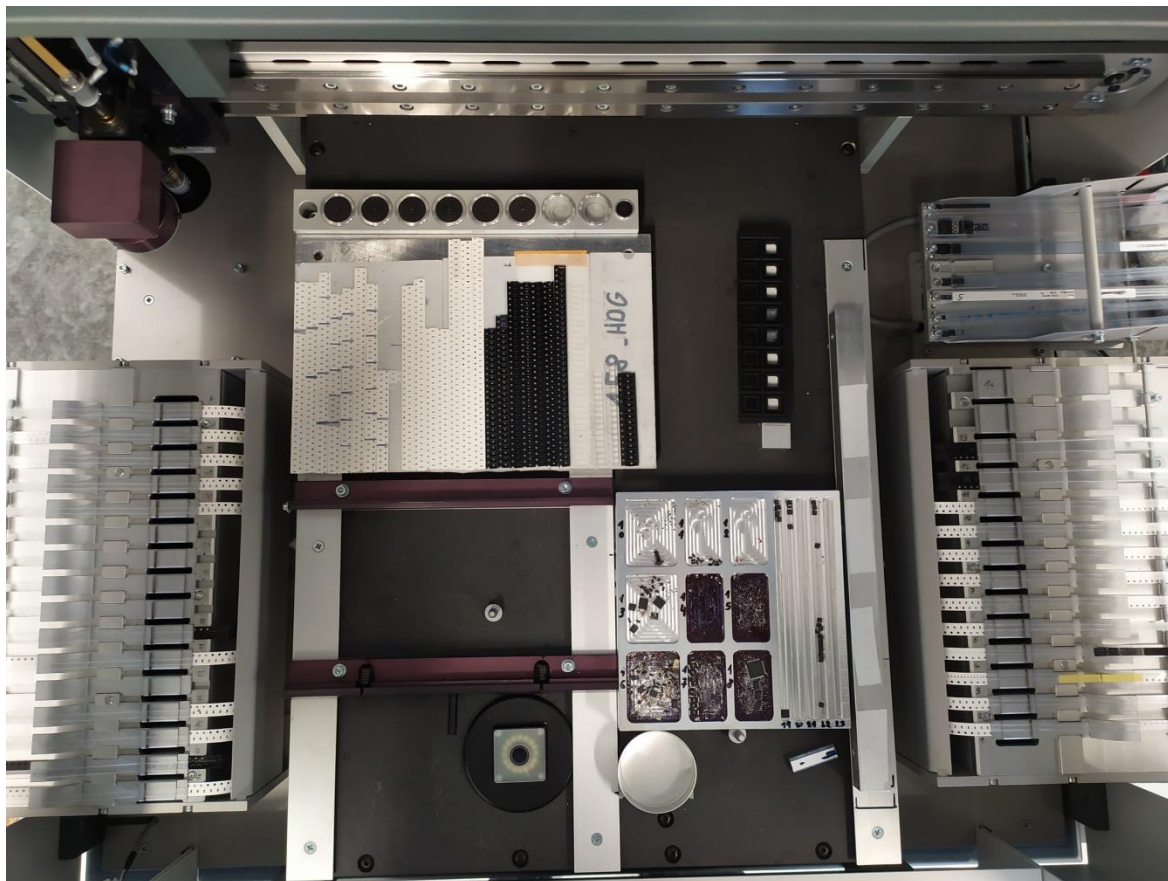
Ze sítotisku se základová deska s nanesenou pájecí pastou přesune do osazovacího automatu. Osazovací automat je zařízení určené k tomu, aby na kontakt, na němž je nanesena pájecí pasta, přesně umístil elektronickou součástku. Pozice, na které mají být součástky umístěny, se automatu přesně definují během sestavování osazovací procedury. Součástka se na pájecí pastu přichytí a je možné s deskou dále manipulovat, avšak musí se opatrně, aby nedošlo k posunu součástky nebo jejímu odpadnutí z desky.

Jedná se o stolní osazovací automat M10V od firmy Mechatronika. Výrobce udává, že tento automat je vhodný pro prototypové a malosériové osazování SMD součástek. Maximální velikost osazované desky je 300 x 400 mm. Maximální hodinový výkon je až 1500 součástek za hodinu. Rozlišení pojezdu 5 μm a natáčení součástek po 0,045°. Nejmenší osaditelné součástky jsou typu 0201 a největší mohou mít rozměry 40 x 40 mm. Dále výrobce uvádí, že v nouzovém případě se dají osazovat i součástky typu 01005. Minimální velikost součástek je dána velikostí vakuových trysek, ale i rozlišovací schopností vizualizačního systému osazovacího automatu.

Automat se ovládá klávesnicí a myší přes LCD displej. Ten je nainstalovaný na pohyblivém rameni na pravé straně automatu. Řídicí systém pracuje pod operačním systémem Windows. [8]

Tento osazovací automat je vybaven páskovými podavači součástek, podavači pro součástky v tyčích a je schopný odebírat a středit sypané součástky z malých kontejnerů. Je tedy schopen pracovat s jakkoliv balenými součástkami. Pásky se součástkami mohou být také umístěny v pracovní komoře osazovacího automatu, avšak musí být řádně upevněny. U pásky se součástkami umístěnými v pracovní komoře automatu se při sestavování osazovací procedury zaměří pomocí teach-in režimu první a poslední součástka na pásce. Protože pásky mají standardizované rozměry, čímž je přesně definována vzdálenost mezi součástkami, a jsou zaměřeny krajní součástky v pásce, je dána přímka, ve které jsou součástky umístěny. Stačí tedy už jen zadat krok odebrání, tím automat zná polohu všech součástek na pásce. Druhou možností je navinout pásku se součástkami na páskový podavač. Tyto podavače jsou připevněny na bocích osazovacího automatu mimo pracovní komoru. Páskový podavač se vždy po odebrání součástky otočí o definovaný krok, takže se posune i páska. Výsledkem je, že se nová součástka posune na místo odebrané součástky. Při sestavování procedury tedy stačí nastavit v automatu jednu pozici, na kterou se neustále posouvají další součástky. Určitou komplikací je, že postupným odvíjením pásky z otáčivého kotouče se páska na kotouči více a více utahuje, takže je nutné kotoučem čas od času trochu pootočit ve směru odvíjení pásky, aby nedošlo k jeho zablokování a tím i přerušení procesu osazování. Součástky v tyčích se umísťují do vibračního podavače umístěného na pravé části automatu, také mimo pracovní komoru. Tyče se umísťují šikmo tak, že konec tyče je výše, než její začátek. Součástky působením gravitační síly sklouzávají směrem dolů na začátek tyče, po odebrání součástky se tedy na její pozici dostane součástka nová. Tyče jsou umístěny ve vibračních podavačích proto, že gravitační síla sama o sobě nestačí k tomu, aby se součástka sama rozpochovala a dostala se na místo již odebrané součástky. Odebírané součástky musí být pro správné uchycení vakuovou pinzetou vodorovně, tomu napomáhají právě ony vibrace tím, že součástky do této polohy dostanou. Při sestavování procedury se opět zaměří první součástka z tyče, na jejíž místo se přesouvají další součástky a automat pro daný typ součástky tedy vždy sáhne na to samé místo. Ani tento systém ovšem není stoprocentní, je tedy třeba, aby obsluha občas tyče se součástkami zkontrolovala. Stává se totiž občas, že horní součástka najede na součástku pod ní a tím se tyč ucpe, což zaviní, že se součástky nedostanou na místo odebrání. Většinou pro uvolnění tyče stačí podavačem trochu více otřást, občas se ale musí tyč úplně vyjmout a součástky uvolnit. Poslední možností odběru součástek je odebírání volně sypaných součástek z kontejnerů. Při sestavování procedury se vyznačí oblast, ve které se mají součástky vyskytovat, při osazování potom horní kamera umístěná na osazovací hlavě tuto oblast snímá a vyhodnocuje výskyt součástek a automaticky odebírá první součástku, kterou najde. Kontejnery se součástkami musí být umístěny v pracovní komoře osazovacího automatu. Navzdory tomu že automat má odebírat volně sypané

součástky a součástku si umí vycentrovat z jakékoliv polohy, nedokáže součástku otočit vzhůru nohama, je tedy třeba zajistit, aby volně sypané součástky byly opravdu vrchem nahoru. Na následujícím obrázku je znázorněna pracovní komora osazovacího automatu. Po stranách jsou páskové podavače, v pravém horním rohu vibrační podavač a v levém horním rohu rameno s kamerou, vedle něho je umístěno 6 trysek různých velikostí. [8]



Obrázek 13: Pracovní komora osazovacího automatu

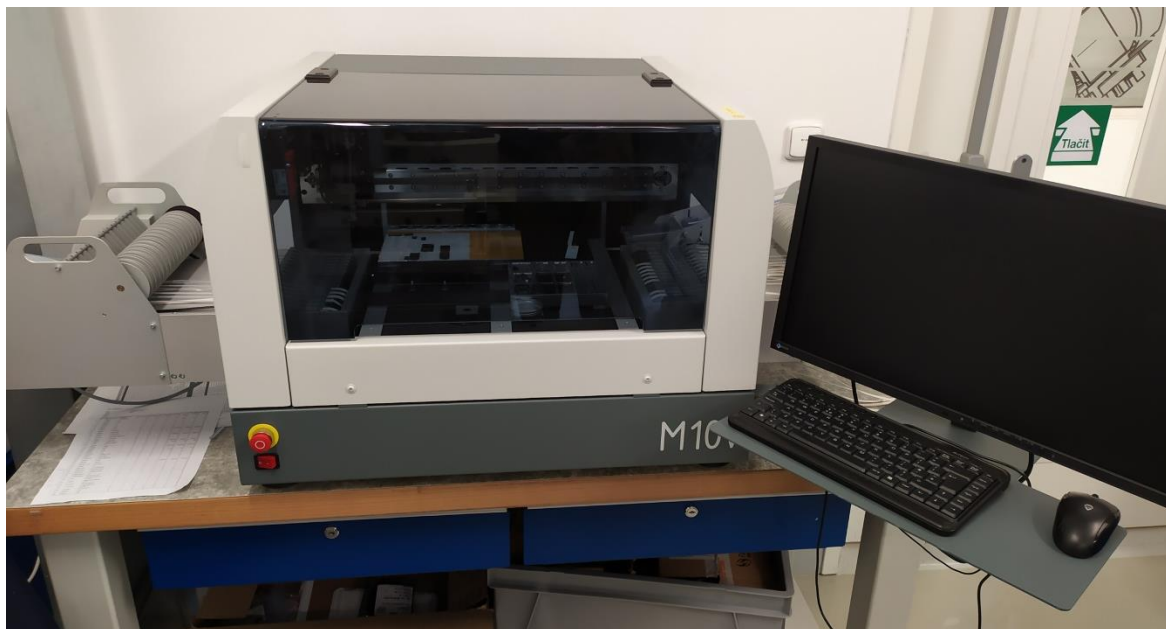
Pro dosažení nejvyšší možné osazovací přesnosti je potřeba přesně zaměřit a vycentrovat osazované součástky i osazovanou desku DPS. Za tímto účelem je automat vybaven vestavěným vizualizačním systémem. Ten obsahuje dvě kamery. Jedna je umístěna na pohyblivé osazovací hlavě s pohledem ze shora na součástky, druhá kamera je umístěna staticky v pracovní komoře a zajišťuje pohled na součástku zdola. Horní kamera slouží k zaměřování osazované DPS, zaměřování součástek v zásobnících a kontejnerech a k možnosti prohlížení a kontroly osazení DPS. Spodní kamera má jako hlavní funkci konečné vycentrování již nasátých součástek na vakuové trysce. Tato metoda vycentrování má nevýhodu v tom, že se součástka nemůže centrovat v čase, kdy je přenášena od místa vyzvednutí k místu osazení. Součástka tedy musí být prvně přenesena nad spodní kameru, kde je vyfocena, vyhodnocena a popřípadě vycentrována. Poté je přesunuta nad místo osazení. Tento mezikrok zpomaluje proces osazování, avšak vzhledem k tomu, že se jedná o prototypovou výrobní linku DPS, tak délka doby osazování není zásadním kritériem na osazovací

zařízení. Spodní kamera je tedy pro správné vycentrování součástky nezbytná. Horní kamera sice přesně zjistí polohu součástky, ale při nasávání součástky vakuovou tryskou dochází k takzvanému úskoku součástky, což znamená, že vlivem sání má součástka sklon k určitému pohybu mimo svou polohu. Dalším problémem při centrování součástky horní kamerou by bylo, že pokud by ji vakuová jehla neuchytila přesně na středu, došlo by při rotaci s ní ke vzniku nepřesnosti. Z těchto důvodů je tedy přítomnost druhé, spodní, kamery u osazovacího automatu nezbytná. U spodní i horní kamery je přítomno přisvětlení v podobě několika LED zdrojů, neboť osvětlení má velký vliv na kvalitu, přesnost a spolehlivost zpracování snímků, ideální stav v tomto ohledu by byl, kdyby tyto LED zdroje byly jediným zdrojem světla v místnosti. Vizualizační systém osazovacího automatu je dále schopen automaticky zaměřovat DPS, podle kontrolních bodů, které se umísťují do rohů desek. Další schopností vizualizačního systému je detekce za pomoci předlohy. Tato schopnost je využívána k určení, jestli automat pracuje se správnou součástkou. Součástka je během sestavování procedury nafocena a tento snímek je použit jako vzor, se kterým je každá další součástka stejného typu porovnávána. Na pouzdře jsou zjištěny hlavní znaky, jako například tvar celého pouzdra, rozměry nebo množství kontaktů. Tyto znaky ze vzorového snímku a snímku pořízeného při osazování jsou porovnávány. Pokud automat vyhodnotí, že se jedná o špatnou součástku nebo je součástka zdeformována, odhodí ji na předem určené místo a pokračuje dále v osazování. V takovémto případě, nebo pokud součástka není vůbec uchycena, se osazení na danou pozici opakuje ještě dvakrát. Po třetím neúspěšném pokusu se osazování přerušuje a objeví se chybová hláška. Tímto je zaručeno, že součástky jsou na konci procesu opravdu na DPS umístěny. Automat tedy takto posuzuje správnost osazovaných součástek, avšak tato kontrola není stoprocentní, neboť některé odlišné součástky, zejména ty jednodušší, jako odpory, mají stejná pouzdra a dají se rozlišit například jen nápísem na horní straně součástky. [8]

Automat osazuje součástky přesně podle programu, který je do něj nahrán. Dále automat disponuje automatickým výměníkem trysek, kdy na různě velké součástky používá různě velké trysky, aby je co nejlépe uchytily a následně co nejpřesněji umístil. Volba trysky probíhá během tvorby osazovací procedury dle typu součástky. Tryska se vybírá tak, aby pokryla co největší povrch odebírané součástky, ale zároveň nesmí součástku nijak přesahovat, aby nedošlo ke ztrátě podtlaku, který součástku udržuje přichycenou. Uchycení funguje na principu vakuové jehly. Při přiložení na součástku je součástka pomocí podtlaku přisána a po umístění na požadované místo je podtlak zrušen a součástka tím upuštěna.

Před začátkem osazování se musí provést příprava. Do zásobníků se vloží součástky a do programu se zapíše jejich množství, automat si poté pamatuje jejich množství, což je dobré například když před začátkem osazování nahlásí nedostatek součástek, čímž nevznikne nutnost doplňovat součástky v průběhu osazování a tím osazování přerušovat. Osazovací procedura se skládá z jednotlivých operačních kroků. Můžeme ji sestavovat metodou učení se, tzv. teach-in

s pomocí snímací kamery nebo volitelně pomocí konverze dat z CAD souboru. Dále se upevní deska. Nakonec se musí zavřít kryt. V automatu je totiž pojistka, která brání zapnutí automatu, dokud se tak nestane. To je z důvodu bezpečnosti práce, ale i kvůli tomu, aby nedošlo k poškození ramene, které se při osazování pohybuje vysokou rychlostí a nárazem by mohlo být poškozeno. Když je kryt zavřený, lze spustit osazování. Následně by automat měl bez přerušení osadit desku součástkami a ta by se měla přemístit do pece. Na následujícím obrázku je osazovací automat vyfocen.



Obrázek 14: Osazovací automat

3.3.1 Potenciální rizika:

- **Volba vhodné trysky.** Při použití trysky příliš malých rozměrů by součástka mohla odpadnout v důsledku nedostatečné síly na ni působící. Na druhou stranu v případě použití příliš velké trysky by součástka nemusela být vůbec uchycena nebo by taktéž z ramene odpadla.
- **Osazení součástky se špatnou polaritou.** Tento problém plyne z výše zmíněného způsobu kontroly uchycení součástky. U symetrických součástek s určenou polaritou, jako jsou například LED diody nebo procesory je nutné jejich polaritu respektovat. Osazení se špatnou polaritou hrozí například u LED součástek, u kterých je polarita velmi důležitá, protože proud jimi může téct jen jedním směrem. Pokud ji tedy zapojíme naopak, nemůže svítit. Polarita bývá vyznačena malou tečkou, popřípadě malým výstupem, na pouzdrů součástky. Takovouto drobnost automat není schopný rozpoznat a tedy jejich polaritu určit. Všechny součástky s určenou polaritou se tedy musí před osazováním seřadit a to všechny stejně a správně. Určitá obtíž se navíc skrývá v tom, že polarita bývá vyznačena obvykle na spodní straně součástky, takže po osazení již není možné jejich polaritu vizuálně

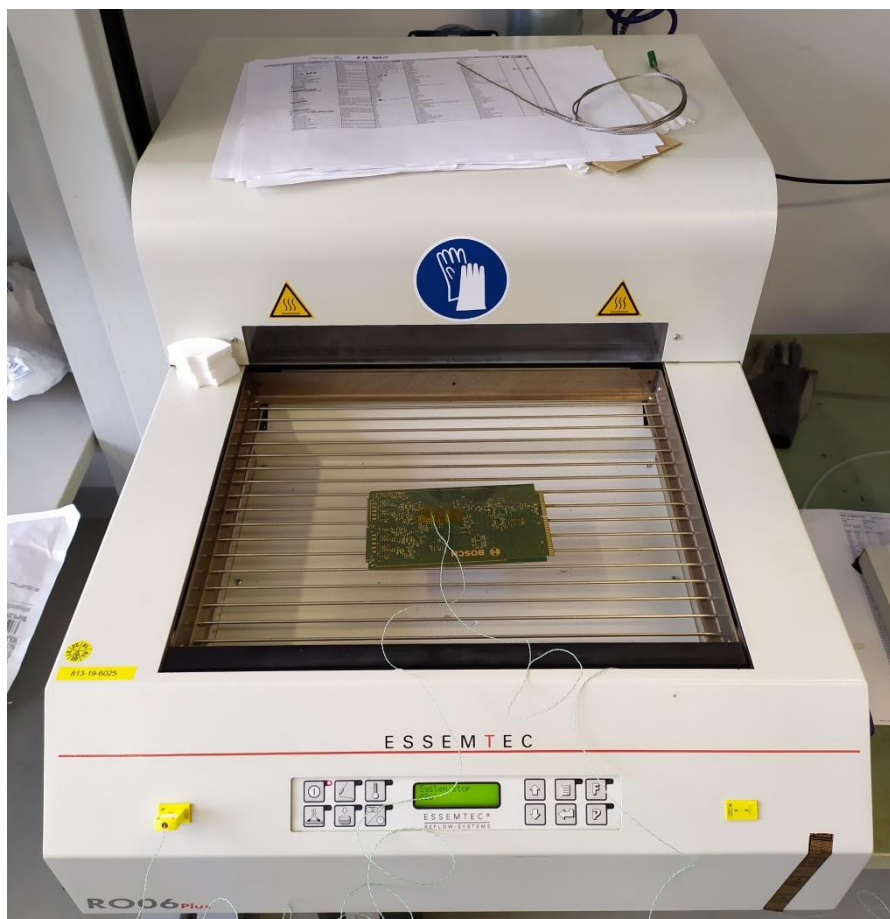
zkontrolovat. Z tohoto důvodu je vhodné polaritu před osazením opravdu dobře zkontrolovat.

- **Osazení špatnou součástkou.** Příčina tohoto problému opět plyne ze způsobu kontroly součástky. Dvě různé součástky totiž mohou mít stejný typ pouzdra a tak se tedy liší pouze nápisem na horní straně pouzdra. V takovémto případě je automat nemůže rozeznat a poznat chybu. Stejný typ pouzdra mívají zpravidla konstrukčně jednodušší součástky, jako jsou například kondenzátory nebo odpory. Tento typ poruchy představuje chybu obsluhy, způsobenou umístěním špatné součástky do zásobníku.
- **Neosazení součástky.** Neuchopení součástky tryskou není díky kontrole pomocí spodní kamery možné. Hrozí však riziko, že součástka je uchopena a přenesena nad kameru, která toto zkontroluje, ale při přesunu osazovací hlavy nad místo umístění se součástka uvolní. Toto může být způsobeno špatným uchopením součástky, kdy podtlak trysky nepůsobí dostatečnou silou na to, aby součástku při pohybu udržel, a projeví se to až po kontrole kamerou. Druhou možností vzniku tohoto problému může být, že při přenášení součástka narazí do nějaké překážky, v důsledku čehož od trysky upadne. Toto hrozí spíše u větších součástek, které kvůli své velikosti sahají blíže ke spodní části pracovní komory, a tedy mají větší šanci kolize s předmětem, který se zde nachází. Tento stav nastal například, když automat vyhodnotil jedno relé jako nevyhovující a odhodil ho na místo určené pro špatné součástky, relé bylo ovšem dostatečně vysoké na to, aby při přemísťování shodilo další, již vyhovující relé. Takovýmto chybám lze zamezit vhodným rozmístěním předmětů a zásobníků v pracovní komoře. Také je vhodné nechat součástky osazovat od nejmenších po největší, takže tam ze začátku velké součástky „nepřekážejí“
- **Nepřesné umístění součástky.** Součástka je umístěna mimo svou pozici. Toto je nejspíše problém nastavení pozice, kam se má součástka osadit, pokud se něco takového stane, je vhodné umístění součástky v programu přenastavit. Občas se také stává, že jsou součástky trochu vychýleny či natočeny. Z tohoto důvodu je vhodné vždy po osazení desku zkontrolovat a například pinzetou případné vychýlené součástky srovnat. Pokud by se tak neučilo, srovnání po přetavení pasty by bylo podstatně složitější.
- **Špatné upuštění součástky.** Automat upustí součástku moc brzy, nepřimáčkne ji tedy. Riziko hrozí v tom, že při následné manipulaci s deskou může dojít k posunu součástky mimo požadovanou pozici. Může nastat buď v důsledku špatného uchycení součástky, nebo v důsledku toho, že byla v knihovně součástek špatně udána výška součástky. Ta je v knihovně nastavena defaultně a je tedy nutno ji vždy zkontrolovat a nastavit dle katalogového listu. Další příčinou by mohlo být prohnutí desky v důsledku toho, že je podepřena držáky jen po stranách. Je tedy vhodné ji podepřít nástavci k tomu určenými i uprostřed.

- **Použití zaschlé pasty.** Součástka se dostatečně „nepřilepí“ k pájecí pastě, neboť je už vyschlá. Problém je, že drží na svém místě, ale jen do okamžiku, než se začne s DPS manipulovat, v tom okamžiku se velice snadno posune mimo kontakt s pájecí pastou. Není problém ani tak ve staré pastě jako v tom, že by se deska s nanesenou pastou nechala delší dobou někde ležet a pájecí pasta by během té doby vyschla.
- **Špatné umístění desky.** Osazovací automat by sice osazoval na správné souřadnice, nicméně ve výsledku by byly součástky umístěny na špatné pozice na desce. Toto by nastalo, kdyby byla deska otočena o 180°, kontrolní body jsou totiž v protilehlých rozích.
- **Nastavení vibračního podavače.** Vibrační podavač je jeden, ale lze do něj umístit několik tyčí s různými součástkami. Pokud se součástky v podavači špatně posouvají, lze změnit parametry vibrační podavače jako doba vibrací či síla vibrací. Velké součástky by pro správné posouvání mohly vyžadovat větší výkon a delší dobu. Pokud by nastavení podavače nebylo ideální, nehrozí chybné osazení součástky na desku, jen častější přerušení osazovacího procesu, popřípadě ztráta součástky. Pokud by podavač nefungoval správně, je vhodné v něm nechat jen součástky podobné velikosti. Pokud jsou tyto součástky větších rozměrů, pak nastavit větší výkon nebo delší dobu. Ostatní součástky lze z tyče umístit na odebírací desku v automatu.

3.4 Pec

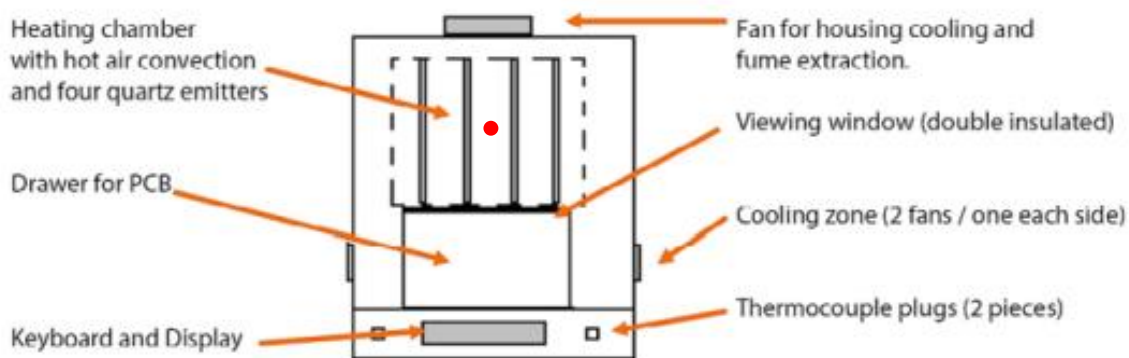
Po osazení součástkami obsluha přemístí desku plošných spojů z osazovacího automatu do pece. DPS osazená součástkami musí být přemístěna opatrně, aby nedošlo k posunutí nebo odpadnutí součástky z desky. Výhodou je, že součástka je v podstatě pomocí pájecí pasty přilepena k DPS, takže je možno s deskou opatrně manipulovat, avšak neopatrným zásahem na povrch desky nebo neopatrným odložením by se součástky mohly vychýlit ze své původní pozice. Deska by tedy měla být uchopena mimo oblasti osazené součástkami, ideálně za hrany desky a bez rychlých, trhavých pohybů opatrně přemístěna a uložena na rošt pece. V peci dojde v důsledku vysoké teploty k roztavení pájecí slitiny, pájka se stává tekutou a dojde k jejímu přilnutí jak k povrchu základového materiálu (kontaktům na desce), tak i ke kontaktům součástky. Schopnost roztavené pájky přilnout k povrchu kontaktu vyjadřujeme pomocí smáčivosti, viz kapitola 2.1.5. Na následující obrázku je pec vyfocena. V pojízdném dopravníku je vidět deska, na kterou je připevněn termočlánek zapojený do pro něj určeného vstupu.



Obrázek 15: Pec RO06Plus

U naší prototypové osazovací linky DPS se používá pec RO-06 Plus od výrobce ESSEMTEC. Tato pec byla vyvinuta pro malosériové a prototypové výrobní linky výroby DPS. Výrobce uvádí, že maximální teplota, které pec může dosáhnout je 300° C. Pec obsahuje jednu topnou a jednu chladicí zónu. Topná zóna je vybavena velkoobjemovým horkovzdušným systémem vytvářejícím vertikální laminární proudění vzduchu. Toto je fyzikálně ideální proudění vzduchu pro zajištění velkého přenosu tepla ze vzduchu na součástku, avšak bez rizika posunutí součástek, zejména těch malých mimo jejich pozici. Pod topnou zónou jsou umístěny pokovené topné tyče a recirkulační vzduchové ventilátory. Ty vyfukují zahřátý vzduch směrem k horní části topné komory a dále do bočních kanálů, kde je proudění vzduchu narovnáno a ze shora vháněno do topné zóny. Zdrojem tepla v peci jsou čtyři křemenné zářiče, což zabezpečuje přesný teplotní profil a rychlý náběh teploty během přetavení. Rozložení křemenných tyčí v topné zóně je na obrázku č. 16, na kterém je také znázorněno schéma pece i s popisky. Topná zóna obsahuje všechny pájecí procesy v jedné komoře:

- Activation zone – předeheřtí DPS a aktivace tavidla, nedochází k degradaci náhlou, skokovou změnou teploty
- Soaking zone – dodatečné ohřívání desky a aktivace tavidla
- Soldering zone – dosažení maximální požadované hodnoty a roztavení pájecí pasty [5]



Obrázek 16: Rozložení křemenných tyčí v topné zóně [5]

Proces přetavení pájecí pasty má následující podobu. Po nastavení vhodného pájecího procesu se pec začne nahřívat na základní teplotu. Po dosažení této teploty zazní signál a rozsvítí se kontrolka na ovládacím panelu. Kdykoliv od tohoto okamžiku lze spustit program. Program se spustí zmáčknutím tlačítka, přičemž roštový dopravník se zasune do pece. Tím však teplota v peci o určitou hodnotu poklesne, například při nastavených 225° C na 220°C. Nicméně deska má pokojovou teplotu, takže se okamžitě začne rychle zahřívat a než dosáhne této teploty, je pec zahřáta již na teplotu vyšší. V okamžiku úplného zasunutí dopravníku všechna topná tělesa totiž začnou topit na maximální výkon, než dosáhnou teploty předeheřtí. Tato teplota se v peci udržuje po dobu předeheřtí. Poté teplota opět narůstá na teplotu přetavení, na níž se drží po dobu přetavení. Když tato doba uplyne, topná tělesa se vypnou a spustí se větrák v zadní části topné zóny, který z pece odvádí horký vzduch, zároveň je do pece přiváděn studený vzduch z okolí. Po dosažení teploty otevření dopravník vyjede z pece do chladicí zóny. V tomto okamžiku jsou dopravník i desky na něm horké a tak je před další manipulací s nimi nutno je zchladit. Po stranách chladicí zóny jsou umístěny dva větráky, které nasávají vzduch pokojové teploty z okolí a tlačí ho pod dopravník, ten stoupá na horu přes desky a tak je chladí. Po vyjetí dopravníku se topná zóna chladí na základní teplotu. Když této teploty dosáhne, je možné pájecí program opět spustit.

V paměti pece je místo pro 35 programů. Prvních 15 programů představuje volně definovatelné programy, dalších 20 programů je předdefinovaných. Programy 16 až 25 představují předdefinované programy pro pájení a posledních 10 programů je určeno pro vytvrzení lepidel. Vzhledem k povaze PCB, parametrům pájecí pasty a dalším ohledům se ideální profily pro přetavení různých desek mohou značně lišit. Musí být tedy provedena nezbytná měření a nastaven správný program, aby byly desky přetavovány ideálním pájecím profilem pro každý proces pájení. [5]

Teplotní profil v peci je definován těmito šesti hodnotami, které se dají v peci nastavit.

Jedná se o:

- Základní teplotu – teplota, na kterou je pec předehřáta
- Teplotu předehřátí – mezikrok mezi základní a maximální teplotou, umožňuje aktivaci tavidla a zabraňuje teplotnímu šoku
- Dobu předehřátí – určuje, jak dlouho se bude teplota předehřátí držet na určité hodnotě
- Teplotu přetavení – určuje maximální teplotu, které se během procesu přetavení dosáhne.
- Dobu přetavení – určuje, po jakou dobu je v peci udržována maximální nastavená teplota
- Teplotu otevření – teplota, při níž dojde k vysunutí dopravníku s deskami z topné do chladicí zóny

Pájecí profil lze tedy nastavit pomocí těchto hodnot, přičemž strmost a rychlost nárůstu teploty je nastavena prvními třemi hodnotami a teplota a délka přetavení dalšími dvěma hodnotami. Pokud se dosáhne dané teploty, na které má teplota v peci setrvat, zářiče se vypnou a při určitém poklesu teploty opět sepnou. Teplota tedy takto neustále kmitá kolem dané hodnoty, než nastane čas změny. Na následujícím obrázku je znázorněno deset předdefinovaných pájecích profilů uložených v peci.

Operating of the Oven



Standard Pastes

Prog #	Base Temp [°C]	Preheat/Soak Temp [°C]	Preheat/Soak Time [s]	Reflow Temp [°C]	Reflow Time [s]	Cooling Temp [°C]
21	120	140	100	170	15	140
22	120	140	100	180	15	140
23	140	190	20	220	5	200
24	140	190	25	220	8	200
25	150	190	20	220	5	190
26	150	190	20	225	5	190
27	140	200	15	220	5	200
28	140	200	20	220	8	190
29	180	190	10	220	5	170
30	180	190	20	220	5	170

Note: If the oven is set to °Fahrenheit (°F), the indicated temperatures are automatically switched to Fahrenheit.

Tabulka 1: Předdefinované programy [5]

Teplota v peci je měřena pomocí termočlánku, který je umístěn přibližně v úrovni křemenných trubic uprostřed pece. Na předchozím schématu znázorněno červenou tečkou. Z tohoto způsobu měření teploty plyne i problematika nastavení vhodné teploty v peci. Křemenné tyče jsou totiž nejspíše zářivé zdroje, takže zatímco v peci je nastavena určitá teplota a vzduch jí dosahuje, teplota na deskách v ní umístěných se může od nastavené hodnoty dosti lišit. Například pokud v peci nastavíme maximální teplotu 240°C a necháme ji na desku působit určitou dobu (± 60 s), může skutečná teplota na desce dosahovat i 260°C. Obecně se tedy dá říci, že teplota ukazovaná pecí je spíše menší, než ta skutečná na desce. Teplotu nastavovanou a zobrazovanou pecí je tedy nutno brát jako orientační hodnotu. Z tohoto důvodu jsou na peci umístěny dva vstupy pro termočlánky, které lze připevnit k deskám a tak měřit skutečnou teplotu na jejich povrchu, na kterou se zahřejí. Moderní, bezolovnaté pasty jsou, co se týče pájecího profilu, mnohem náročnější, takže odchýlit se od požadovaného teplotního profilu by mohlo snadno vést ke vzniku vadných spojů. Při optimalizaci teplotního profilu je tedy nutno pracovat se skutečnou teplotou na desce, nikoliv s teplotou zadanou na obrazovce.

Proces přetavení silně závisí na typu použité pájecí slitiny. Pro každý typ pájky je tedy třeba nastavit ideální profil přetavení. Zároveň však musí být brán ohled i na součástky, které se tímto způsobem připevňují k desce. Příliš vysoká teplota nebo vysoká teplota působící po velmi dlouhou dobu by mohla způsobit špatnou funkci připevňovaných součástek nebo jejich úplné zničení. [2][19]

3.4.1 Potenciální rizika:

- **Volba správného programu.** Zvolením špatného programu by došlo k přetavení pájecí pasty nevhodným teplotním profilem, což by nejspíše způsobilo vznik špatného vodivého spoje. Obsluha by se měla ujistit, že zadaný program je opravdu zapnut, ne pouze zobrazen, zatímco běží program jiný.
- **Maximální teplota.** Do pece s nastavenou určitou maximální teplotou jsou vloženy součástky, na které tato teplota po určitou dobu působí. Součástky však nemusí být pro takto vysokou teplotu zkonstruovány. V takovémto případě by mohlo dojít k jejich zničení, popřípadě poškození. Tato problematika se musí zohlednit již při návrhu desky. Řešením je buď použít jinou součástku, jiný typ pájecí pasty na celou desku nebo součástku manuálně připájet až po přetavení v peci.
- **Správné umístění desky do pece.** Desky jsou umístěny na dopravník roštového typu, který s nimi popojíždí. Je tedy nutné zejména desky malých rozměrů na dopravník umístit tak, aby jím při jeho pohybu nepropadly. Dále je nutno umístit desku do pece tak, aby reálná teplota v peci odpovídala co nejvíce ideálnímu teplotnímu profilu, viz kapitola 4.8.

- **Porucha topné tyče.** Topná tělesa jsou typu žárovky. V halogenové atmosféře je křemenné vlákno, kterým protéká elektrický proud a vzniká tak teplo. Stejně tak jako u žárovky může topné těleso přestat fungovat. V takovém to případě by pec přišla o část topného výkonu, teplotní profil v ní by měl při stejných nastavených parametrech jinou podobu a teplota v peci by nebyla rovnoměrně rozložena. Navíc by při poruše topného tělesa a následném používání pece mohlo dojít k jejímu poškození. Topná tělesa nejsou umístěna viditelně a tak je vhodné po zapnutí pece zkontrolovat, jestli opravdu všechna fungují.
- **Vhodná teplota otevření.** Pokud by dopravník začal z pece vyjíždět, když je teplota pájecí pasty vyšší, než teplota roztavení, bude pájecí pata v okamžiku pohybu stále v kapalném skupenství. Síly způsobené pohybem dopravníku by tak mohly způsobit vychýlení součástek z jejich pozice. V okamžiku vyjetí dopravníku tedy musí být reálná teplota na desce nižší, než teplota tání pájecí pasty.

3.5 Manuální doosazení a připájení

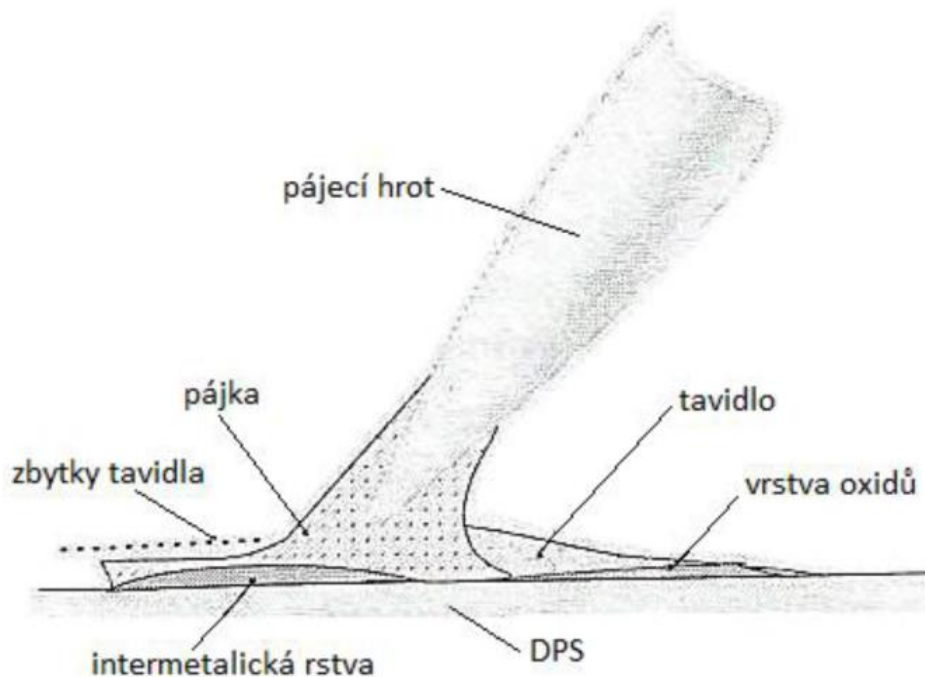
Jak již bylo zmíněno, z různých důvodů a limitů jednotlivých zařízení, ne všechny prvky mohou být výše popsaným procesem připevněny k desce. Jedná se zejména o THT součástky, s nimiž technologie této linky není schopna pracovat. THT součástky představují zejména různé konektory, u nichž je potřeba, aby byly k desce připevněny opravdu pevně. Jejich kontakty se prosunou skrz desky a z druhé strany se k ní připájí, viz kapitola 2.3.1.

Takovýto způsob připevnění mohou v určitých případech vyžadovat i SMD součástky, například pokud by na ně teplota v peci byla příliš vysoká, může na ně být použit jiný typ pájecí pasty, která k přetavení vyžaduje nižší teplotu. Jiným případem by mohlo být, že SMD součástka by nesnesla oplach a tak se manuálně doosadí a připájí až po opláchnutí desky. Z tohoto plyne, že krok, doosazení a připájení součástek, nemusí nastat mezi zapečením desky a jejím oplachem, avšak v této fázi je to nejvíce vhodné. Proces připájení SMD součástek k desce formou sítotisku s následným osazením a přetavením je relativně čistý proces. Oproti němu zanechává ruční připájení součástky desku mnohem více znečištěnou. Znečištění způsobuje zejména tavidlo, které je na kontakt nutno dodat. Z tohoto hlediska je tedy důležité desku doosadit před procesem čištění, pokud je to možné.

Nyní trochu předbím, ale další krok je oplach a po něm následuje kontrola vyrobené DPS. Pokud se při kontrole DPS zjistí chyba, je nutno ji opravit. K tomuto se používá stejné pracoviště, jako k manuálnímu doosazení a ve své podstatě se jedná o to samé. Postup je roztavit pájecí pastu a připájenou součástku buď srovnat nebo nahradit jinou, která je taktéž manuálně doosazena a připájena.

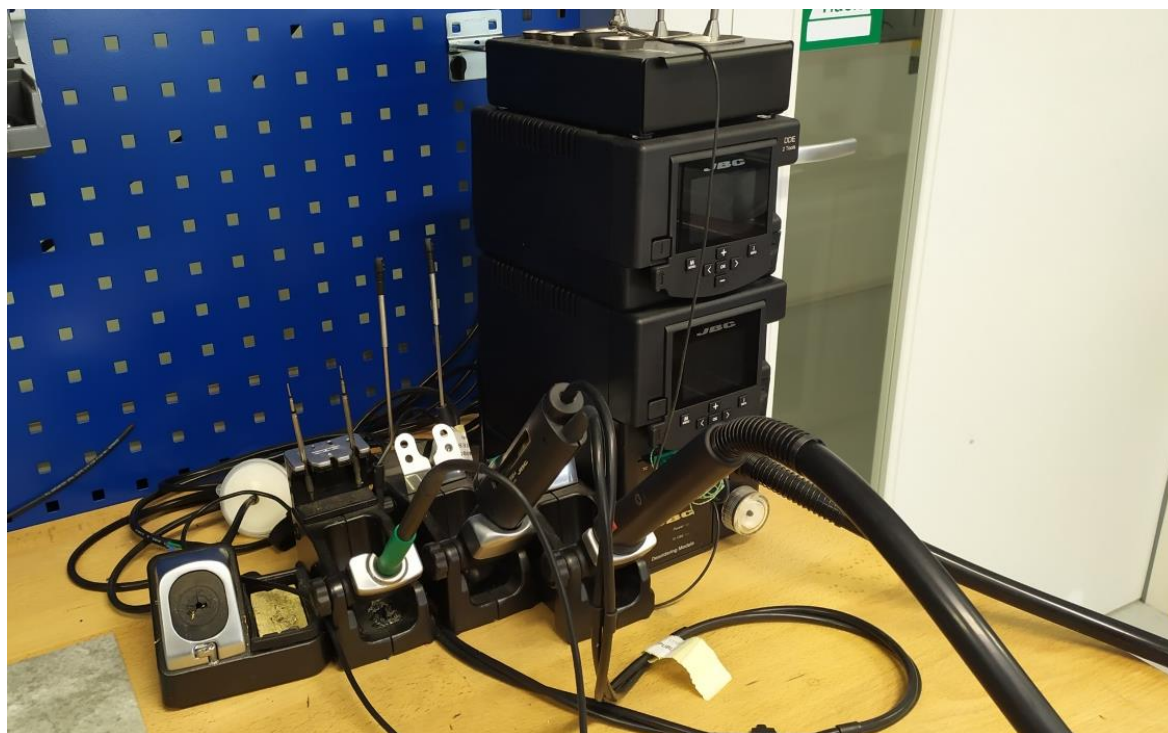
Základem správného ručního pájení je použití kvalitních pájek a kvalitních nástrojů, k tomu určených. Také je důležité tento úkon provádět na vhodném pracovišti. Takové pracoviště by mělo být dobře osvětleno, opatřeno antistatickou ochranou a mělo by být dostatečně odvětrané, aby byly odstraněny výpary z tavidla. Prvním krokem při pájení je umístění pájené součástky na místo, kam má být připájena. Je důležité, aby součástka byla ve správné poloze a nepřipevnila se nějakým způsobem křivě. Dále se o suchou drátěnku očistí pájecí hrot a roztaví se na něm nepatrné množství pájky. Toto pomáhá k lepšímu přenosu tepla z pájedla do spoje. Dále se hrot přiloží na kontakt se součástkou, aby se oboje prohřálo. Chvilí na to se na spoj přiloží pájka v podobě trubičkového drátu vyplněného tavidlem. Před tímto krokem je možné na spoj aplikovat dodatečné množství tavidla například pomocí stříkačky, tavidlo totiž usnadní proces pájení. Po přiložení pájecího drátu se pájka roztaví a přichytí se na kontakt i vývod součástky, tím vznikne spoj. Pájka se musí roztéct po celém spoji, aby mohlo začít působit tavidlo. Do spoje je nutno aplikovat dostatečné množství pájky, avšak ne moc, aby pájka nepřetekla kolem. Po pár vteřinách se pájedlo i pájecí drát oddálí a spoj se nechá ztuhnout. Ve výsledném spoji by pájka měla dokonale obalit vývod součástky včetně celého kontaktu a měla by mít konkávní neboli prohnuté zaoblení. Pokud je pájky aplikováno příliš velké množství, má spoj zaoblení konvexní neboli vyduté. Spoj by měl být dále na pohled lesklý. Pokud by byl matný či zrnitý, vytvořil se studený spoj, což je problém. Pájení pomocí pájecí stanice je zachyceno na obrázku č. 17 a postup pájení je následující:

- Zajištění čistoty všech pájených povrchů i pájedla.
- Zajištění součástky, nesmí se během pájení pohnout.
- Přiložení pájedla ke spoji a chvíli na to pájecího drátu.
- Oddálení pájedla a ztuhnutí spoje [21][12]



Obrázek 17: Manuální pájení [21]

Na obrázku č. 18 je vidět pájecí stanice určená k manuálnímu připájení součástek a opravám pájených spojů. Jedná se o pájecí stanici od firmy JBC. Je vybavena pájecí jednotkou s pájecím perem a s různými hroty, horkovzdušnou jednotkou určenou k foukání horkého vzduchu a odsávací jednotkou určenou k odstranění pájky z desky. Stanice taktéž obsahuje pájecí kleště. Tato pájecí stanice je vybavena funkcemi jako je "sleep mód", hibernace, ukazatel výkonu, nastavení offsetu a dalšími. Všechny funkce jsou přehledně zobrazeny na grafických displejích, na nichž lze i přesně nastavit teplotu, na kterou bude pájecí hrot ohřát. Stanice je také vybavena nástavci určenými k odstranění připájených procesorů k desce. Nástavec se přichytí k procesoru a působí na něj silou směrem od desky, zatímco se na procesor fouká horký vzduch. Když se všechna pájka, která jej drží na desce, roztaví, procesor se od desky sám oddělí. Tato stanice je umístěna na pracovišti vybaveném odsáváním výparů.



Obrázek 18: Pájecí stanice JBC

3.5.1 Potenciální rizika

- **Čistota.** Nečistoty a mastnoty na pájecích ploškách a vývodech součástek znemožňují vznik dobrého pájeného spoje. Je tedy vhodné před pájením zkontrolovat, jestli je povrch čistý a to povrch jak desek, tak i vývody součástek. Nečistoty se dá zbavit otřením povrchu rozpouštědlem. Je vhodné očistit i zoxidované povrchy, například drátové vývody. Očistit je důležité i pájecí hrot. Ten se totiž brzy znečistí zbytky tavidla a zoxidovanými zbytky pájky, které je nutno odstranit. Pájecí hrot je tedy třeba během pájení pravidelně otírat, aby byl neustále čistý a docházelo tak k dobrému přestupu tepla z hrotu na desku. Za tímto účelem je odkládací stojánek opatřen miskou pro suchou drátěnku a navlhčenou houbičku.

- **Výběr vhodného hrotu.** Volba správného pájecího hrotu je důležitá vzhledem ke kvalitě a efektivnosti pájení či odpájení. Aby došlo k dobrému přenesení tepla z hrotu na spoj, měl by být hrot co možná největší. Hrot by měl tedy být přibližně stejně velký, jako pájený spoj. Kromě velikosti pájecího hrotu však záleží také na jeho tvaru. Různé tvary pájecích hrotů jsou vhodné pro různé součástky a různé typy oprav. Pomocí nevhodného hrotu bude vytvořit kvalitní spoj mnohem náročnější.
- **Studený spoj.** Studený spoj vzniká v důsledku příliš dlouhého působení pájecího hrotu na pájku nebo toho, že během chladnutí spoje dojde k jeho posunutí. V případě vzniku takového spoje je nejjednodušším řešením pájku odstranit a spoj vytvořit znovu. Studené spoje mohou způsobovat absolutní přerušování obvodu, nepravidelné přerušování obvodu, vysoký odpor, případně i hluk. Je proto nezbytné zajistit, aby zbytečně nevznikaly.
- **Doba pájení.** Pájecí hrot by měl být na spoj přiložen přibližně 1,5 až 3 sekundy. Příliš dlouhý účinek tepla způsobí odpaření tavidla, pájka zoxiduje a vznikne výše zmíněný studený spoj.
- **Teplota pájení.** Teplota pájení závisí na typu použité pájecí slitiny. Vhodná teplota je uvedena v katalogovém listu pájky.
- **Množství pájky.** Nedostatečné množství pájky ve spoji by způsobilo špatné mechanické, popřípadě i elektrické vlastnosti spoje. Příliš mnoho pájky by mělo podobné účinky.

3.6 Myčka DPS

Myčka DPS slouží k odstranění nežádoucích zbytků po procesu pájení z DPS. Během celého procesu výroby DPS na desce zůstávají nežádoucí zbytky. Například při ručním připájení konektorů se používá tavidlo, které slouží ke snazšímu vytvoření kvalitnějšího spoje. Nicméně po připájení součástky část tavidla zůstává na DPS, kde postupem času stárne a chemicky reaguje. Hned po připájení součástky se tedy tavidlo na desce stává nežádoucím a je vhodné jej v zájmu životnosti a spolehlivosti DPS z ní odstranit. Dalším případem je, že šablona se při sítotisku pořádně nevyčistí, například při tvorbě více desek za sebou. Na spodní straně šablony potom zůstává určité množství pájecí pasty, které je okem těžko postřehnutelné. Při přetavení se tato pájecí pasta také přetaví a vytvoří malé kuličky, které zůstávají na DPS. Když se tyto kuličky například dostanou mezi nožičky procesorů nebo jiných součástek, mohou je vyzkratovat a tím způsobit poruchu. Jako třetí a poslední příklad bych uvedl, že když na DPS zůstanou zbytky přetavené pájecí pasty, časem vytváří soli, z těch se dále vytváří vodivé krystalky, které mohou taktéž způsobovat zkratky nebo nějaké další chemické reakce. Z těchto i jiných důvodů je tedy vhodné nově vyrobenou, osazenou a přetavenou DPS umýt. Tím se DPS očistí a dá se tak předejít

různým potížím, které by mohly v důsledku nežádoucích zbytků z výroby DPS na ní zůstat a následně způsobit poruchu.

Tato myčka je novou součástí této prototypové osazovací linky, a tak se teprve zprovožňuje a zavádí do provozu. Myčka jako taková byla navržena a sestavena v rámci tohoto oddělení, přičemž její základní součást, ultrazvuková myčka, byla zakoupena. Myčka se sestává z pracovní komory a technické části pod ní, která obsahuje přívod a odvod kapalin a elektrické rozvody. V pracovní komoře jsou umístěna dvě umyvadla, ultrazvuková myčka, osvětlení a ve vrchní části digestoř, která je určena k odvodu výparů z pracovní kapaliny. Na následujícím obrázku je tato myčka DPS vyfocena. Vpravo v pracovní komoře je umístěna ultrazvuková myčka, v níž je pracovní kapalina, uprostřed je umyvadlo s přívodem pitné vody a vlevo umyvadlo s přívodem vody demineralizované. V levém zadním rohu pracovní komory je vidět pistole s přivedeným dusíkem.



Obrázek 19: Myčka DPS

Základní součástí této myčky je tedy ultrazvuková myčka. Jedná se o Stolní myčku UC10D27W od firmy S PoweR product s.r.o. Nominální hodnota ultrazvukové frekvence je 40 kHz a maximální výkon 500 W. Objem vany je 27 l a její efektivní rozměry 483x278x180 mm. Protože plyn rozpuštěný v kapalině výrazně snižuje účinnost čištění, je ultrazvuková myčka také vybavena funkcí „DEGAS“, která z pracovní kapaliny odstraňuje plyn. V této myčce lze nastavit tři parametry mycího procesu a to:

- Teplota pracovní kapaliny v °C
- Doba trvání mycího procesu v minutách
- Výkon myčky v procentech z maximálního výkonu [6]

Samotné mytí osazené a přetavené DPS probíhá v pěti krocích. V prvním kroku se DPS vkládá do ultrazvukové myčky s pracovní kapalinou. V druhém kroku se umývá v umyvadle, do kterého je přivedena normální pitná voda a ve třetím kroku se omývá v umyvadle, do kterého je přivedena voda demineralizovaná. Ve čtvrtém kroku je deska sušena stlačeným dusíkem a v posledním, pátém, kroku je deska sušena pomocí pece.

První částí myčky je tedy ultrazvuková myčka. Základem ultrazvukové myčky je ultrazvukový měnič, který je připevněn ke dnu čistící vany. Tento ultrazvukový měnič je zdrojem mechanicko-akustické energie, která se dnem přenáší do čistící kapaliny a vytváří v ní ultrazvukové pole. Důsledkem měnění se akustického tlaku, přetlaku a podtlaku, dochází v kapalině ke kavitaci, viz kapitola 2.4. Ta narušuje vazbu mezi povrchem čištěné DPS a nežádoucími zbytky z výroby. Protože ke kavitaci dochází v celém objemu čistící kapaliny, probíhá intenzivní čištění i v těžko přístupných místech na desce, jako jsou rohy a dutinky, které by se klasickým způsobem velmi těžko čistily. [6]

Po očištění zbytků z DPS zůstávají na desce zbytky pracovní kapaliny z ultrazvukové myčky. Tuto kapalinu je nutné z desky očistit. K tomu se v první fázi použije oplach pitnou vodou. Umytá DPS se vyndá z myčky a opláchně se v pitné vodě. To je možné udělat dvěma způsoby. První možností je napustit umyvadlo vodou a DPS do něj postupně ponořit. Druhou možností je opláchnout DS pod proudem tekoucí vody, ideálně ne moc silný proud, ale ani ne moc malý. Možnost s tekoucí vodou je vhodná pokud se myje jen pár DPS a možnost s plným umyvadlem je vhodná pokud se myje větší množství DPS vzhledem k menšímu množství spotřebované vody. Ideální je ovšem aplikovat možnosti obě, tedy prvně vykoupat v lázni vody a následně opláchnout proudem vody. DPS je také vhodné oplachovat teplou vodou. Teplá voda je více aktivní, než studená a lépe pracovní kapalinu očistí.

Oplach DPS pitnou vodou ovšem není ideální, protože pitná voda není úplně čistá. Je v ní rozpuštěno určité množství nečistot, solí, různých minerálů a obsahuje chlór. Tyto příměsi by

mohly krystalizovat nebo by v důsledku jejich přítomnosti mohlo docházet ke korozi a vzniku chemických sloučenin. Toto by vedlo k nefunkčnosti DPS stejně tak, jako když například mobil spadne do řeky a následně přestane fungovat. Pitná voda z prvního umyvadla se tedy musí opláchnout demineralizovanou vodou, která tyto nečistoty z DPS odstraní. Tím, že je voda demineralizovaná, žádné tyto příměsi neobsahuje. Proč se tedy DPS pitnou vodou vůbec oplachují? Důvodem je, že demineralizovaná voda je podstatně dražší a méně dostupná a tak je výhodné pomocí pitné vody omýt z DPS pracovní kapalinu, k čemuž je potřebné větší množství vody, a následně pomocí menšího množství demineralizované vody umýt zbytky pitné vody z DPS. Vzhledem k úspoře je vhodné DPS umýt pod slabším proudem demineralizované vody, než touto vodou napouštět plné umyvadlo.

Po mytí DPS v druhém umyvadle máme mokrou DPS a je vhodné z ní odstranit zbytek demineralizované vody, tedy ji vysušit. Prvním krokem k jejímu vysušení je ofouknout desku stlačeným plynem. Nabízí se možnost ofouknout DPS stlačeným vzduchem, avšak ve vzduchu mohou být nečistoty jako například olej z kompresoru, takže by se na desku nečistoty opět dostaly a samotné mytí by tak bylo kontraproduktivní. Je tedy lepší DPS ofouknout stlačeným dusíkem, který je navíc inertní a tak s ničím na jejím povrchu nebude chemicky reagovat.

Posledním krokem je vysušení desky v peci. Po ofoukání větších kapek demineralizované vody z DPS, zůstává deska vlhká. Tato vlhkost se dá odstranit pomocí pece. DPS se tedy opět vloží do pece, která je ovšem nastavena na jiný teplotní profil, který nedosahuje zdaleka tak vysokých teplot, jako při přetavení pájecí pasty. Pájka se tak ani zdaleka nepřiblíží své teplotě tání, ale teplota je dostatečně vysoká na to, aby se z desky vysušila veškerá vlhkost. Po vyndání DPS z pece je tedy DPS čistá a suchá.

3.6.1 Pracovní kapalina

K čištění DPS je jako pracovní kapalina výrobcem ultrazvukové myčky doporučen HYDRON SE 220. Jedná se o jednofázový čisticí prostředek na vodní bázi speciálně vyvinutý pro použití v ponořovacích nádržích, jako je právě ultrazvuková myčka. Je to defluxní činidlo určené pro polovodičovou elektroniku. Tento roztok by měl s pomocí ultrazvukové myčky spolehlivě odstraňovat zbytky po pájení ze všech druhů polovodičové elektroniky, montážního rámečku, výkonových modulů, led, flip čipů a dalších. Jeho katalogový list je uveden v přílohách této práce.

Vlastnosti tohoto čisticího prostředku:

- Jednosložkový roztok – roztok se nemusí nijak připravovat, stačí ho jen zředit na pracovní koncentraci, je tedy snadné ho používat
- Založen na vodní bázi - je tedy rozpustný ve vodě

- pH neutrální – je kompatibilní s používanými materiály, součástkami, matricemi, nehrozí žádné poškození nebo pasivace čipů

HYDRON SE 220 by měl být do ultrazvukové myčky aplikován v koncentraci 20 až 25%. Ideální čistící schopnosti takovýto roztok dosahuje při teplotách 40 až 60°C. Na tuto teplotu by tedy měl být před zahájením procesu čištění ohřát. Čistící vlastnosti této kapaliny jsou silně ovlivněny množstvím rozpuštěného plynu v ní, je proto nutné jí před použitím odplynit. HYDRON SE 220 je určen pouze pro čištění bezolovnatých pájek.



Obrázek 20: Mycí kapalina HYDRON SE 220

3.6.2 Potenciální rizika

- **Volba správného programu.** Je nutné pracovat se správnými parametry čistícího procesu, aby byl tento proces úspěšný.
- **Oplach pracovních kapalin.** HYDRON SSE 220 i pitná voda musí být z DPS dostatečně pečlivě opláchnuty. V opačném případě by jejich zbytky mohly způsobit komplikace.
- **Použití nevhodné součástky.** Ne všechny součástky jsou schopné proces mytí vydržet. Kapalina by se mohla například dostat do uzavřeného pouzdra součástky, ze kterého by se následně už nedala vysušit. Kapalina by tak mohla zůstat uvnitř součástky a způsobit její poruchu.

- **Naplnění ultrazvukové myčky.** Myčka nesmí být zapínána, pokud je její vana prázdná nebo nedostatečně naplněná. Pokud by se tak stalo, hrozí její poškození. Vana ovšem také nesmí být přeplněna, doporučená výška hladiny je v rozmezí 2 až 5 cm od horního okraje vany. Používáním myčky pracovní kapaliny v ní ubývá.
- **Hořlavé kapaliny.** Ultrazvuková myčka je zdrojem tepla a během provozu se zahřívá. Některé její části, které jsou v přímém kontaktu s pracovní kapalinou, by se tak mohly během procesu mytí ohřát na vysokou teplotu. Z důvodu bezpečnosti tak výrobce zakazuje používat pracovní kapaliny s teplotou vzplanutí nižší 250 °C, aby nedošlo k explozi. Kapalina HYDRON SE 220 toto kritérium splňuje.

3.7 Kontrola vyrobené DPS

Posledním krokem při výrobě DPS je kontrola jejich kvality. Teoreticky by při dodržení všech postupů měly na konci výrobního procesu DPS vznikat dokonalé, bezchybné DPS. Ve skutečnosti tomu ovšem může být trochu jinak. Navzdory tomu, jak jsou zařízení v této osazovací lince pokročilá a dovedená co nejvíce k dokonalosti, nelze nikdy vyloučit možnost výskytu chyby. A takováto chyba by případně mohla vést až k tomu, že by vyrobená DPS nefungovala správně. Vzhledem k tomu, že se nejedná o žádnou hromadnou výrobu, ale maximálně o malosériovou, a k tomu, že podstatná část výroby není automatizovaná, ale je velmi ovlivněna operátorem, je výskyt chyby reálný. Je podstatně snazší a efektivnější odhalit chybu na vyrobené DPS dříve, než opustí výrobu a bude použita v nějakém zařízení.

Kontrolovat každou jednu připájenou součástku by bylo sice ideální, ale také komplikované a hlavně velice časově náročné. Něco takového se tudíž neprovozuje. Je proto vhodné si určit kritická místa na DPS, kde se s větší pravděpodobností může nějaká chyba vyskytnout nebo kde se dříve již nějaký problém vyskytl, a těm při kontrole věnovat pozornost. Například víme, že osazovačka osazuje procesor s velkým počtem malých nožiček občas trochu nepřesně, vývody sice dosedají na kontakty, ale ne úplně přesně. Hrozí tak, že by vývody nemusely doléhat na kontakty vůbec nebo by je mohly propojit a tím i vyzkratovat. Při kontrole je tedy vhodné se na takovýto procesor podívat a ujistit se, že je připájen správně. Ještě lepší ovšem je v takovémto případě procesor zkontrolovat dříve, než je vložen do pece, když s ním jde snadno manipulovat a například ho pinzetou trochu srovnat, ale chyba může nastat kdykoliv během výrobního procesu. Další vhodná místa ke kontrole jsou ta, která jsou pro správnou funkci DPS klíčová. DPS je osazena velkým množstvím součástek, ale některé součástky jsou pro správnou funkci důležitější, než jiné. Je tedy vhodné při kontrole zkontrolovat také klíčová místa DPS. Například to, že na desce je připevněný deseti ohmový odpor namísto sto ohmového není zdaleka takový problém, jako když se procesor natočí o 90° jinak a tak tedy vůbec nefunguje.

Jak bylo již dříve zmíněno, tato osazovací linka není automatická, což znamená, že na začátku výroby jsou vloženy vstupy a pak se až na konci výrobního procesu odebere hotová DPS. Linka potřebuje obsluhu, která po jednotlivých krocích manipuluje s DPS a obsluhuje jednotlivé přístroje. I kdyby tedy byla funkce přístrojů stoprocentně správná a naprosto bezchybná, objevuje se tu v podstatné míře i lidský faktor. A právě lidský faktor zpravidla způsobuje většinu vzniklých chyb.

Vzhledem k výše uvedenému a k tomu, že se jedná o linku určenou pro výrobu prototypů a malých sérií, tedy že se pokaždé vyrábí něco jiného, něco nového, je kontrola vyrobených DPS určitě vhodná. Kontrola vyrobené DPS nemusí nastat až na konci výrobního procesu, ale může být prováděna kdykoliv během výroby, pokud například nastane nějaké podezření nebo je to z nějakého důvodu vhodné. Průběžná kontrola může být efektivnější, avšak je také náročnější. V případě, že se zjistí výskyt nějaké chyby, je nutno tuto chybu opravit. To je nejnárodnější provést pomocí ruční pájecí stanice. Jedná se o využití stejného zařízení jako při manuálním doosazení a připájení, viz kapitola 3.5.



Obrázek 21: Lupa

Jedním ze základních způsobů kontroly vyrobených DPS je optická kontrola. Optickou kontrolu je možno provádět buď pouhým okem, nebo pomocí přístrojů. Optická kontrola okem je úplný základ, kdy se může na první pohled zjistit, že je něco špatně. Ať už jsou někde prázdné kontakty bez součástek nebo jsou součástky odsunuty někam jinam. Zkontrolovat tímto způsobem nějaké větší součástky je také velice snadné. Další možností optické kontroly je kontrola pomocí lupy, respektive mikroskopu, kdy člověk vidí věci zvětšené, tedy více do detailu. Toto je určitě vhodné u malých součástek, se kterými se kvůli jejich miniaturním rozměrům hůře manipuluje, a

mají malé vývody, které mají přesně dosedat na malé kontakty. Za tímto účelem je u osazovací linky umístěna lupa s prosvětlovací diodou, pomocí níž se dá snadno zkontrolovat kvalita vyrobené DPS. Lupa je vyfocena na obrázku č. 21.

Kromě optické kontroly existují i jiné způsoby kontroly vyrobené DPS. Jedná se například o kontrolu správné funkce jednotlivých částí DPS, kdy je DPS napájena a dá se tak ověřit její správná funkčnost. Takovéto způsoby kontroly jsou ovšem mnohem náročnější a pro každý typ desky odlišné. Optická kontrola představuje tedy, co se kontroly kvality vyrobené DPS týče, úplný základ.

4 Experimentální část

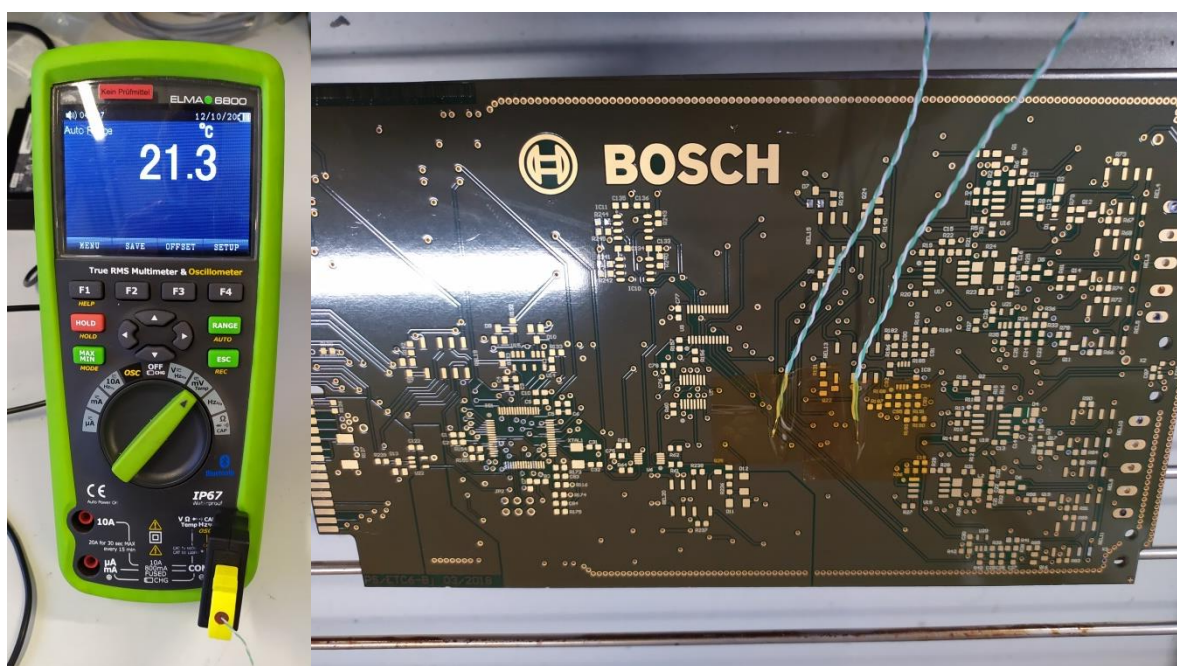
Úkolem této práce je optimalizovat prototypovou osazovací linku. Za tímto účelem bylo provedeno několik měření a pokusů. Tyto pokusy jsou uvedeny a popsány i se svými výsledky v této části práce.

4.1 Popis použitých metod vyhodnocování

V následujících podkapitolách jsou uvedena zařízení, pomocí nichž byly měřeny a vyhodnocovány jednotlivé experimenty. Také je zde uvedeno, jak byla tato zařízení použita.

4.1.1 Metoda měření teploty

Pro optimalizaci procesu přetavení pájecí pasty v peci bylo nutné měřit okamžitou teplotu na povrchu desky. K tomuto měření teploty byl použit multimetr s oscilometrem ELMA 6800. Tento multimetr má mnoho funkcí, z nichž byla využita ta na měření teploty. Na vstupy multimetru byl připojen adaptér na termočlávkovou sondu, do něž se ona sonda zapojila. Zapojení je možno vidět na levé části obrázku č. 22. Termočlávková sonda byla přilepena pomocí tepelně odolné kaptonové lepicí pásky na povrch desky, takže sonda měřila přímo teplotu na povrchu desky. Tato lepicí páska má odolat teplotě až 300 °C, což je plně dostačující vzhledem k maximální povolené přetavovací teplotě pájecí pasty Cobar OT2 SN100C 260 °C. Realizace tohoto připojení je vidět v pravé části obrázku níže.



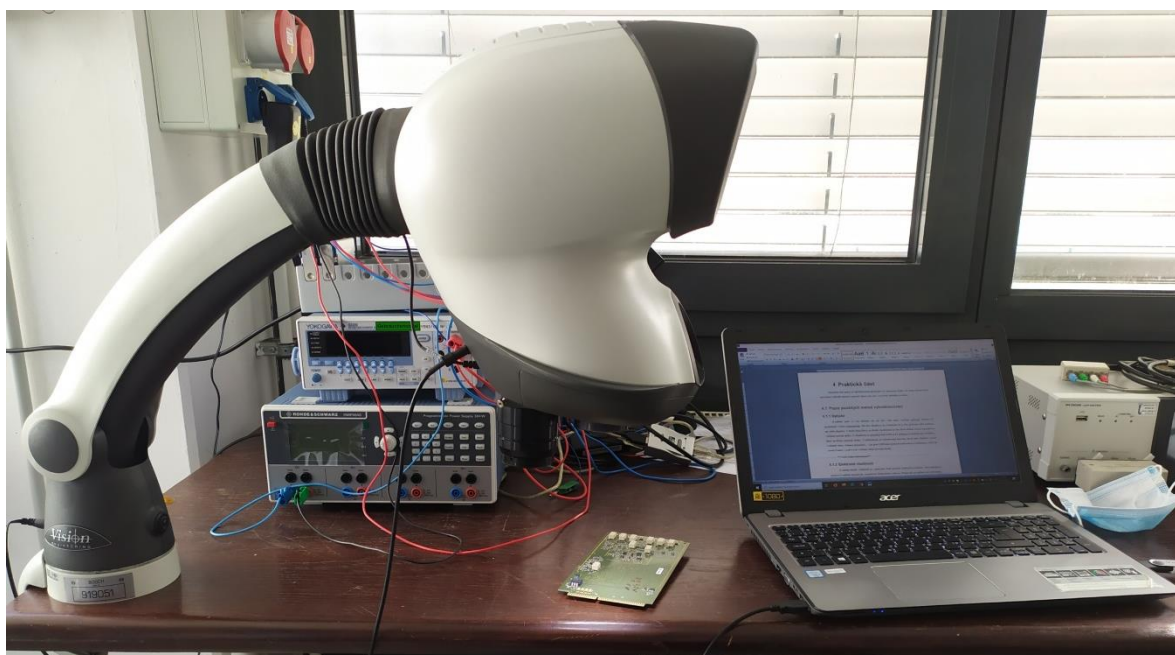
Obrázek 22: Multimetr ELMA 6800

Jak je z obrázku vidět, k desce byla připevněna ještě druhá termočláňková sonda, která byla zapojena do odpovídajícího vstupu pece. Teplota byla tedy měřena dvěma různými zařízeními, jejichž naměřené hodnoty se shodovaly. Tím bylo možno ověřit správnost měřených údajů. Vzhledem k tomu, že na obrazovce pece nebylo možné zobrazovat více údajů najednou, bylo pohodlnější mít na obrazovce pece zobrazené jiné parametry a teplotu odečítat z multimetru. Bylo ovšem kdykoliv možné si teplotu měřenou pomocí pece zobrazit a zkontrolovat.

Teplota je pomocí obou zařízení měřena s přesností na desetinu °C, což je plně dostačující přesnost, neboť hraniční parametry uvedené výrobcem pro pájecí pastu jsou udávány v celých stupních C.

4.1.2 Metoda optického vyhodnocování

K optické kontrole, například jestli je vše udělané správně a nevyskytuje se žádná chyba, byl v této práci využit mikroskop Mantis od společnosti Vision Engineering. Toto zařízení má dva objektivy, jejichž zvětšení je čtyř a desetinásobné, přičemž pro větší zvětšení je určen větší objektiv. V horní části hlavy je okulár, do kterého se lze dívat oběma očima a pozorovat zvětšený povrch desky. U objektivu je umístěno led světlo s 24 LED diodami, produkujícími intenzitu osvětlení 11 000 Lux, které osvětluje pozorovaný objekt. V mikroskopu je zabudovaná kamera, která přes objektiv snímá zvětšený obraz.



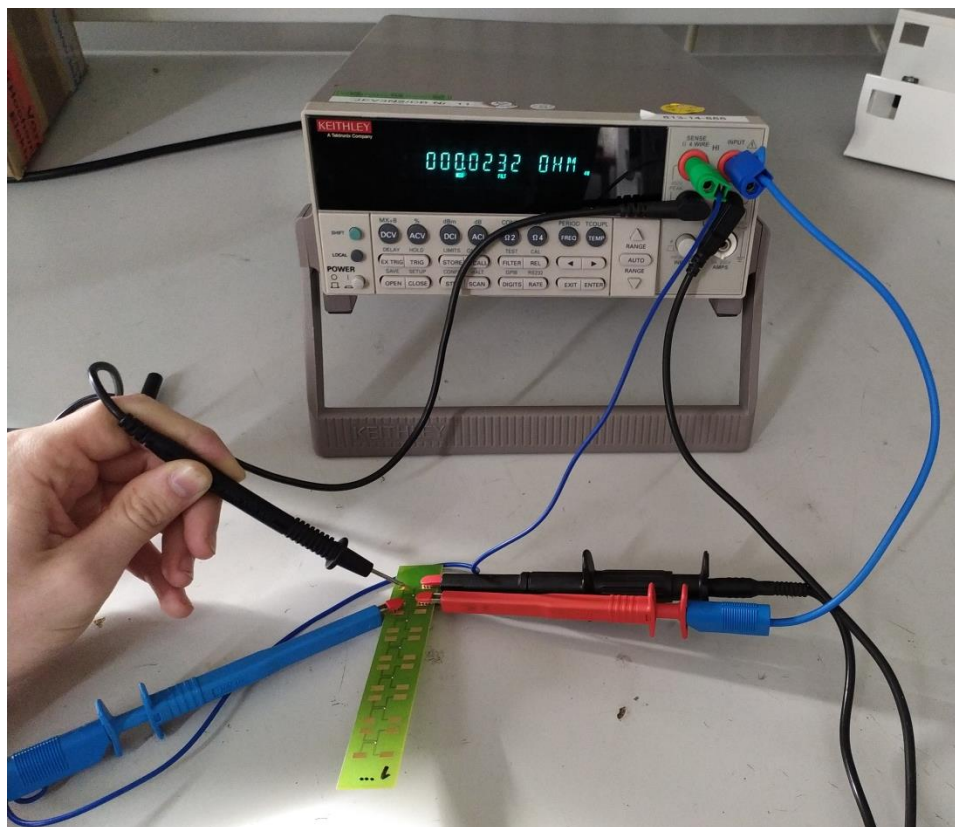
Obrázek 23: Mikroskop MANTIS

Tento mikroskop lze pomocí USB kabelu propojit s počítačem a pomocí programu uEye Cockpit vidět výstup kamery a pořizovat zvětšený obraz povrchu desky. Pomocí ovladačů v programu lze ovládat parametry zobrazení, jako například jas či kontrast, takže pomocí

připojeného počítače lze daný objekt pozorovat v lepší kvalitě. Zaostření se realizuje pouze pohybem hlavy mikroskopu blíž nebo dál od pozorovaného objektu. Toto zařízení také umožňuje pořizovat snímky viděného obrazu. Takto pořízené snímky budou uvedeny dále v této práci. Mikroskop Mantis propojený s počítačem je vidět na obrázku č. 23.

4.1.3 Metoda měření elektrických vlastností

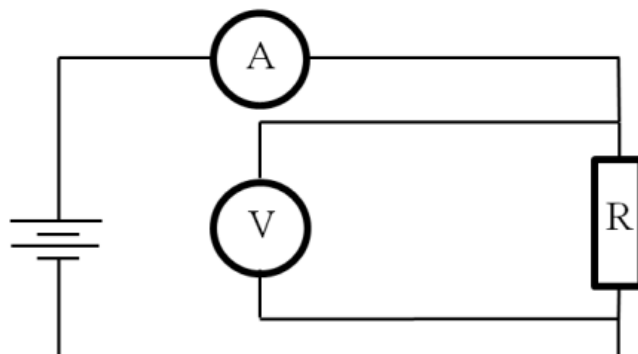
Z elektrických vlastností vodivých spojů je v této práci důležitý odpor vodivého spoje mezi kontaktem součástky a kontaktem na desce. K měření tohoto odporu je v práci využita čtyř bodová metoda. Princip této metody je takový, že se měří odpor pomocí 4 hrotů. Dva hroty jsou napěťové a dva hroty jsou proudové. Pomocí hrotů se tedy získají hodnoty napětí a proudu, ze kterých se následně určí velikost odporu. Výhodou čtyřbodové metody oproti klasickému měření pomocí dvou hrotů je vyšší přesnost, možnost měřit menší odpory a fakt, že změřený odpor neobsahuje odpory přívodních cest. Změřená hodnota odporu se skládá ze tří částí a to vlastního odporu součástky a odporů dvou vodivých spojů. Schéma čtyřbodové metody je na obrázku č. 25, R je měřený odpor, A ampérmetr a V voltmetr. V práci se bude měřit odpor nulových odporů, avšak i tyto součástky určitý odpor mají a nejsou tedy úplně nulové.



Obrázek 24: KEITHLEY 2000 MULTIMETR

K měření odporu bylo využito multimetru Model 2000 od firmy Keithley. Odpor je měřen s přesností na $0,0001 \Omega$, přičemž při měření číslo udávající hodnotu posledního řádu překmitávalo,

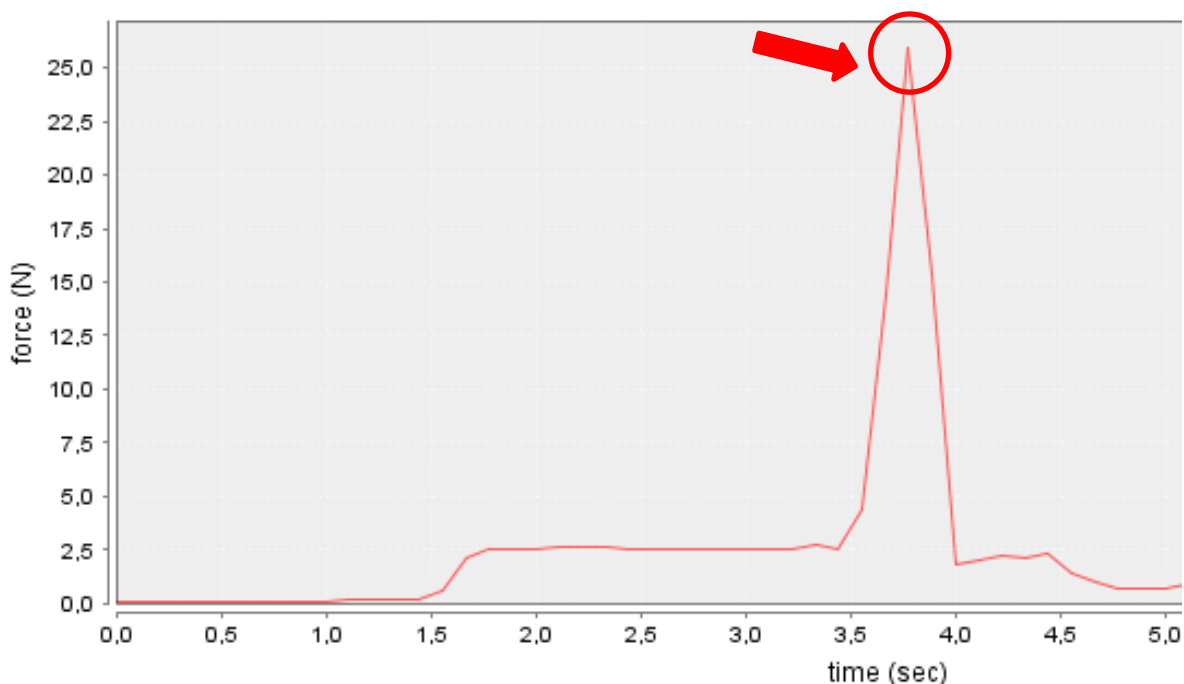
tak se tedy přesnost měření dá určit jako $0,001 \Omega$. Vzhledem k tomu, že v této práci jde o to určit, jak se hodnota odporu změní během určitého procesu, je tato přesnost dostačující.



Obrázek 25: čtyřbodová metoda

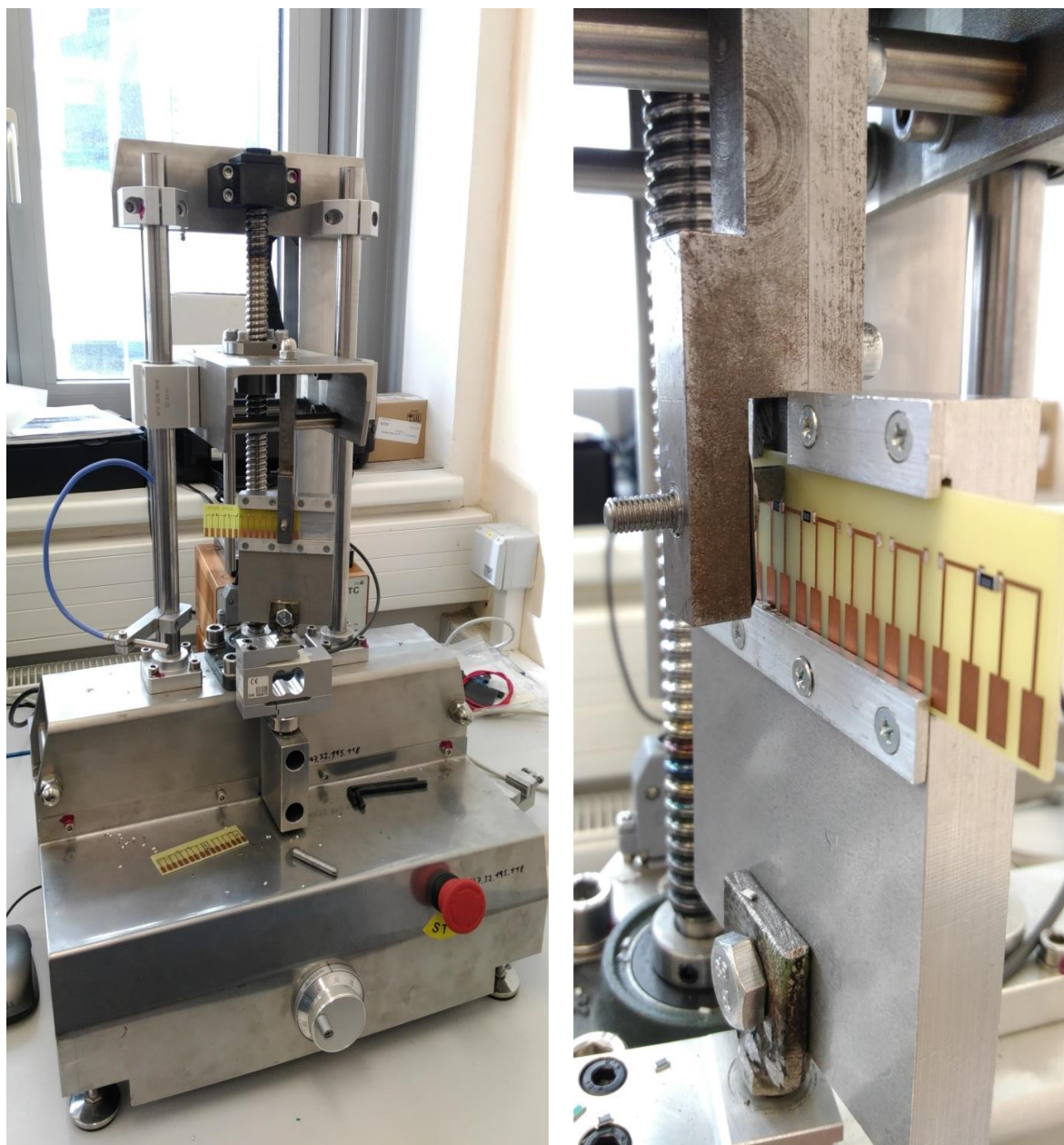
4.1.4 Metoda měření mechanických vlastností

K měření mechanických vlastností je v experimentální části této práce použita trhačka, kterou můžeme vidět na obrázku č. 27. Tato trhačka lineárně zvyšuje sílu, kterou působí na odpor, do té doby, než jej odtrhne od desky. Pomocí ní tedy měříme maximální sílu, jež vzorek vydrží. Trhačka je propojena s počítačem, na němž se zobrazuje průběh velikosti síly v závislosti na čase, takovýto průběh můžeme vidět na obrázku č. 26. Pro větší přesnost odečtení velikosti maximální síly se tento průběh zapisuje do textového souboru jako množina čísel. Díky tomu je možno určit hodnotu maximální působící síly s přesností na $0,0001 \text{ N}$. Toto měření je na rozdíl od jiných měření destruktivní a po změření vlastností vzorku se již na tomto vzorku nedá nic víc měřit. Na obrázku č. 26 je vidět výše zmíněný průběh síly v závislosti na čase při odtrhávání odporu od základnové desky. K odtržení nulového odporu došlo v červeně zakroužkovaném bodě.



Obrázek 26: Průběh síly při měření mechanických vlastností spoje

V pravé části obrázku č. 27 je vyfocen detail hlavy trhačky. Tvoří ji pevně uchycené čelisti, do nichž se zasune vzorek a pohyblivá horní část, na níž je zub, jenž se zachytí o odpor a nakonec jej utrhne.



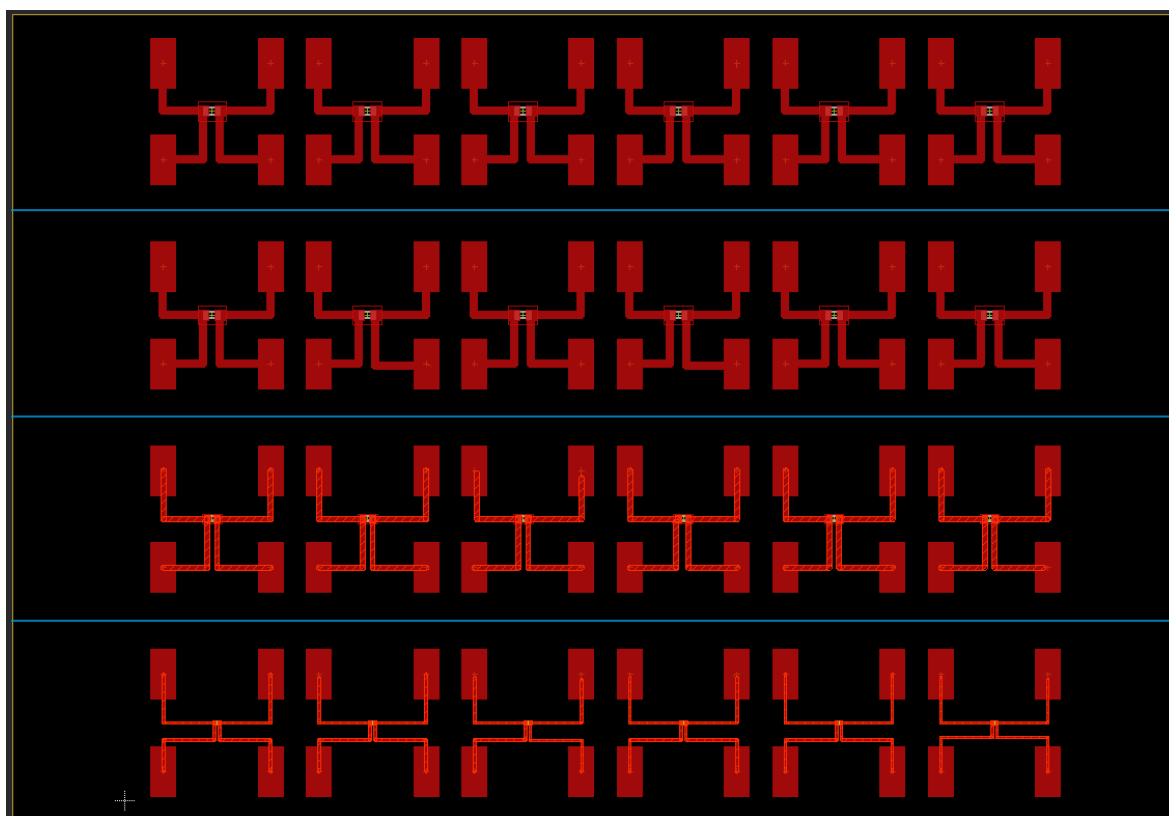
Obrázek 27: Trhačka

4.2 Experimentální desky

Aby bylo možno pokusy provádět, musely být navrženy experimentální desky, se kterými se mohlo experimentovat. Za tímto účelem byly navrženy dvě rozdílné desky, které jsou dále rozděleny V-drážkami na menší segmenty, takže se po osazení dají snadno ručně rozlámat na menší destičky. Toto je výhodné, protože se s jednotlivými segmenty dá dále pracovat samostatně. Jedná se o jednovrstvé desky, které se budou osazovat pouze z horní strany. Byly navrženy v programu EAGLE a vyrobeny společností PragoBoard s.r.o.

Jedná se tedy o jednovrstvé desky vyrobené z materiálu Isola DE104- Tg 135°C, 1,6 mm. Vodivé cesty jsou vytvořeny z mědi o tloušťce 18 μm. Na deskách je zelená, nepáživá maska. Finální úprava ENIG. Desky byly drážkovány a jejich obrys byl frézován. Byla provedena AOI.

4.2.1 Deska A



Obrázek 28: Deska A

Na obrázku č. 28 je znázorněna první experimentální deska, DESKA A. Tato deska je rozdělena na čtyři jednotlivé segmenty. Na desce je vždy umístěn odpor, ze kterého vedou čtyři vývody do čtyř pinů. Toto uspořádání je zvoleno proto, aby odpor mohl být měřen čtyřbodovou metodou, viz kapitola 4.1.3. Jak je možno vidět, deska je navržena pro tři různé velikosti odporů. Pokusy budou prováděny na odporech typu 0603, 0402 a 0201. Velikost 0603 byla zvolena proto, že se na této prototypové osazovací lince standardně a nejvíce používá. Velikost 0201 je nejmenší

možná velikost součástky, se kterou je doporučeno na této osazovací lince pracovat. Součástka o velikosti 0402 byla zvolena jako mezistupeň pro předchozí dvě součástky. Jak se postupně technologie vyvíjí, tak se i používají čím dále menší součástky, proto můžeme říci, že součástky velikosti 0603 jsou v hromadné výrobě už více méně zastaralé, protože jsou moc velké. Protože se však jedná o prototypovou osazovací linku, je vhodné zde pracovat se součástkami větších rozměrů, protože se s nimi dá lépe manuálně pracovat, když je například potřeba něco opravit. Takže je vhodné linku optimalizovat pro součástky 0603 i menší. Dále se na připevnění menší součástky použije méně pájecí pasty, což znamená, že je hůře připevněná, takže pokud se v nějakém procesu výroby DPS nachází nějaká chyba, bude se to na menších součástkách dít lépe pozorovat. K návrhu desky je ještě vhodné podotknout, že destičky vzniklé rozlámáním desky se dají vložit do trhačky, viz kapitola 4.1.4.

Pro vysvětlení a uvedení přesných rozměrů použitých odporů je zde následující tabulka. Bavíme-li se o odporu 0603, tak číslo 0603 odpovídá prvnímu sloupci tabulky. Při návrhu desky byly použity odpory z knihovny programu EAGLE, takže kontaktům odporů byly automaticky přiděleny plošky na desce o odpovídající velikosti.



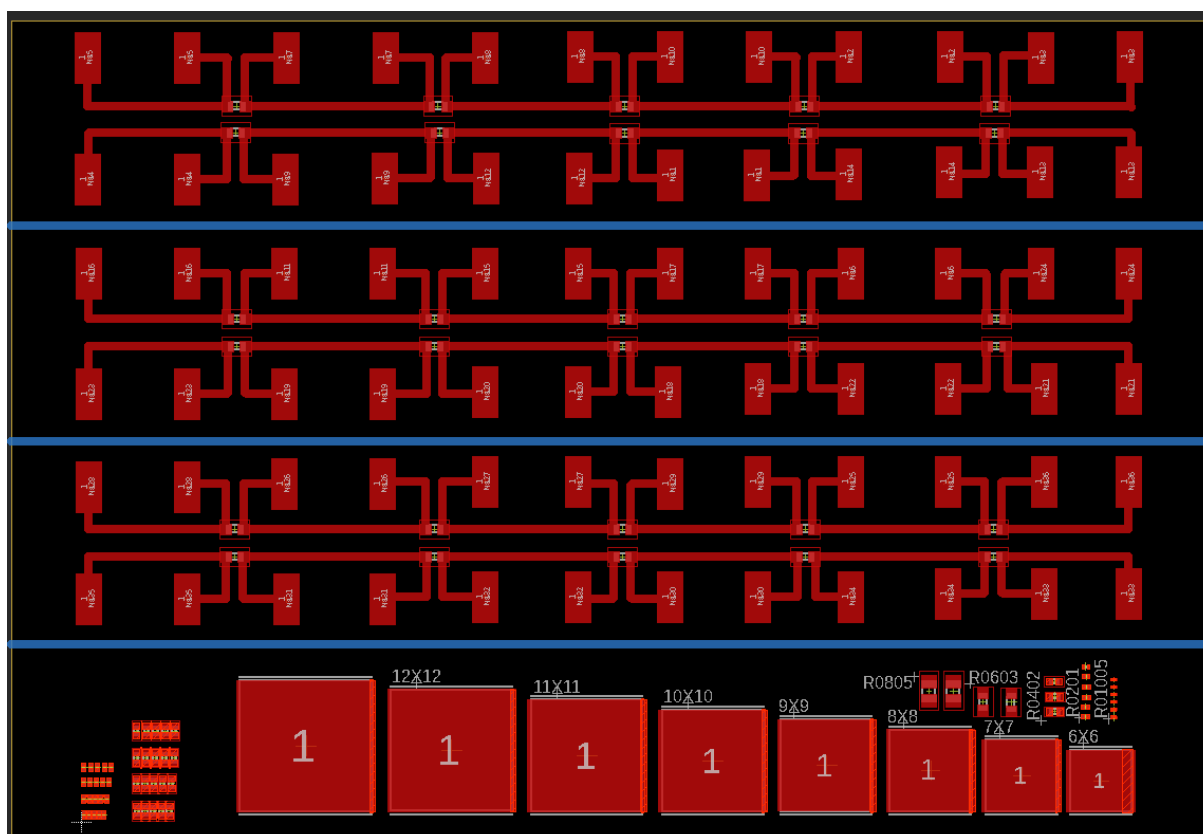
Code		Length (l)		Width (w)		Height (h)		Power
Imperial	Metric	inch	mm	inch	mm	inch	mm	Watt
0201	0603	0.024	0.6	0.012	0.3	0.01	0.25	1/20 (0.05)
0402	1005	0.04	1.0	0.02	0.5	0.014	0.35	1/16 (0.062)
0603	1608	0.06	1.55	0.03	0.85	0.018	0.45	1/10 (0.10)
0805	2012	0.08	2.0	0.05	1.2	0.018	0.45	1/8 (0.125)
1206	3216	0.12	3.2	0.06	1.6	0.022	0.55	1/4 (0.25)

Tabulka 2: Pouzdra SMD součástek [13]

4.2.2 Deska B

Druhý typ desek, DESKA B, je zobrazen na následujícím obrázku, obrázku č. 29. Tato deska se také skládá ze čtyř segmentů, které se získají rozlámaním desky. Dolní část desky slouží k pokusům na sítotisku, přesněji ke zjištění, jaké nejmenší a jaké největší plošky se dají potisknout. Spodní část je také navržena k tomu, aby se zjistila, jak moc blízko k sobě je vhodné součástky umisťovat. Horní tři části desky jsou identické a jsou navrženy k pokusům s oplachem. Jsou na nich navrženy pouze odpory velikosti 0603, neboť se zde jedná o oplach nečistot, které budou mezi odpory a na velikosti odporů tedy moc nezáleží. Z každého odporu opět vedou čtyři vodivé cesty kvůli čtyřbodové metodě a jednotlivé destičky jsou opět přizpůsobeny pokusům s trhačkou, dají se tedy použít i na jiné pokusy, než jen na pokusy s oplachem.

Přesné rozměry desek a vzdáleností na nich budou uvedeny v kapitolách odpovídajících jednotlivým pokusům.



Obrázek 29: Deska B

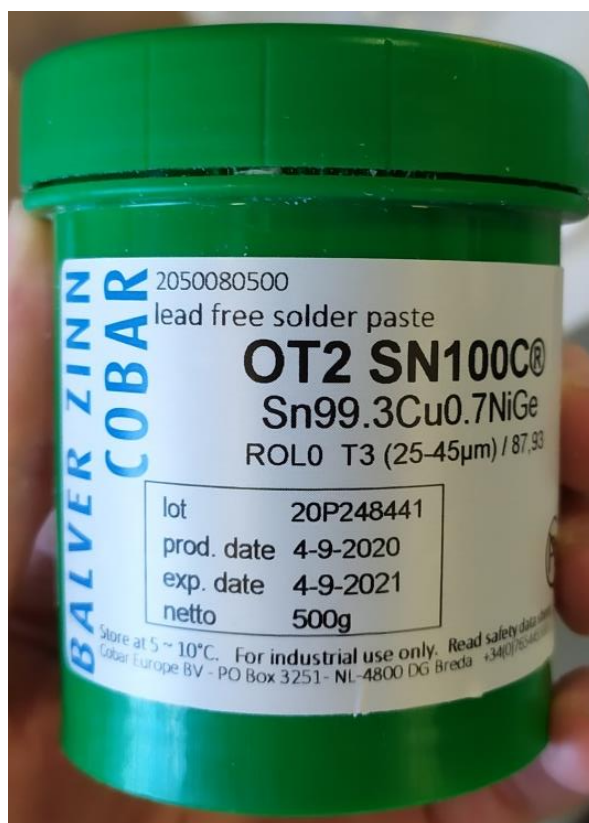
4.3 Pájecí pasta Cobar OT2 SN100C

V této práci pracuji s tímto typem pájecí pasty. Procesy osazovací linky jsou optimalizovány právě pro tuto bezolovnatou pájecí pastu Cobar OT2 SN100C. Její katalogový list je uveden v přílohách této práce.

Různé pájecí pasty mají různé parametry a vyžadují jiné nastavení výrobních procesů, je proto nutné pro každou pájecí pastu optimalizovat procesy. Například pro olovnatou a bezolovnatou pájecí pastu se procesy přetavení a oplachu diametrálně liší, avšak i mezi bezolovnatými pastami jsou velké rozdíly. Olovnaté pájecí pasty mají lepší vlastnosti, dá se s nimi lépe pracovat a obecně vytváří kvalitnější vodivý spoj, avšak vzhledem ke směrnici ROHS bylo nezbytné zvolit pastu bezolovnatou, viz kapitola 2.1.4.

Pro výrobu DPS na této lince jsem tedy vybral jako ideální pájecí pastu, pastu Cobar OT2 SN100C. Tato pasta byla vybrána z několika důvodů. Jednak ji vyrábí a dodává ověřený a spolehlivý výrobce, čímž by měla být zaručena její kvalita. Dále se jedná o cenově přijatelnou a výhodnou pájecí pastu. Nepatří mezi nejlevnější, ale ani mezi nejdražší varianty. Její cena se pohybuje přibližně ve středu cen pájecích past. Vzhledem k tomu, že se jedná o malosériovou výrobní linku, nemusí být upřednostňována kvantita před kvalitou a tak cena nemusí představovat nejdůležitější parametr. Výběr pájecí pasty byl, vzhledem k nedostatku mých zkušeností, konzultován s odborníky z PBT works. Ti mi doporučili více past, přičemž tato byla jedna z nich.

Výrobce této pájecí pasty je firma Balver Zinn Cobar. Pasta neobsahuje halogenidy ani olovo, je založena na bázi mědi a cínu. Složení pasty je 99,3% cín (Sn), 0,7% mědi (Cu), 0,05% niklu (Ni) a 0,005% germania (Ge). Hranice tání a tuhnutí pasty je 227 °C. Obal této pájecí pasty je na obrázku č. 30.



Obrázek 30: Pájecí pasta Cobar SN100C OT2

Výrobce udává, že pájecí pasta Cobar OT2 SN100C je charakteristická těmito vlastnostmi:

- Snadná čistitelnost zbytků tavidla po pájení.
- Zrnitost prášku odpovídá IPC třídě 3 (25 – 45 μm), což umožňuje tisknout jemné kontury QFP součástek s roztečí do 0,5 mm.
- Tato pasta má dlouhou otevřenou dobu na šabloně a je proto vhodná nejen pro velké, ale také pro malé odběratele.
- Pasta je charakteristická velmi dobrou roztékavostí pájky po ploškách, eliminací tzv. tombstoning efektu. Tento efekt znamená, že je SMD součástka, například rezistor, připájen pouze na jedné straně.
- Pasta je charakteristická dostatečnou aktivitou tavidla, která eliminuje „Head-in-Pillow“ efekt při pájení BGA součástek a tzv. graping efekt u malých čipových součástek 0201, kde se nanáší jen velmi malé množství pasty.

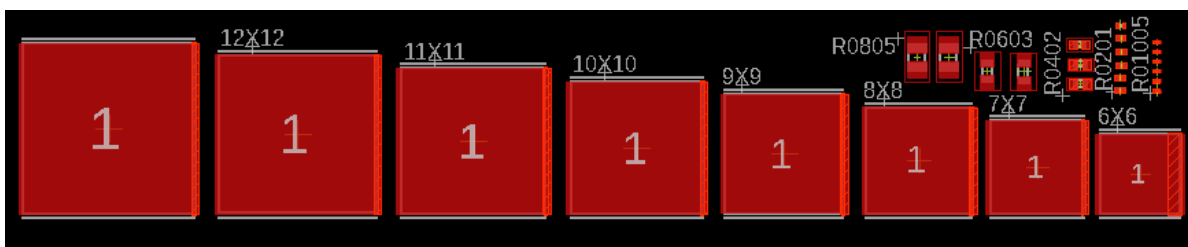
4.4 Velikost ok v šabloně

Tato kapitola se zabývá maximální a minimální možnou velikostí otvorů v šabloně, tedy aby otvor neboli oko v šabloně nebylo příliš velké nebo naopak příliš malé na to, aby na něj byla správně nanесena pájecí pasta. Vhodná velikost ok v šabloně závisí na typu pájecí pasty i na způsobu nanášení pasty, v našem případě na sítotisku. Tato kapitola navazuje na kapitolu 3.2 z teoretické části této práce. Správné nanесení pasty na šablonu ovlivňuje hned několik parametrů sítotisku a to

- rychlost pohybu stěrky
- úhel, pod kterým je stěrka vedena
- přítlak stěrky
- počet přejezdů stěrkou přes šablonu.

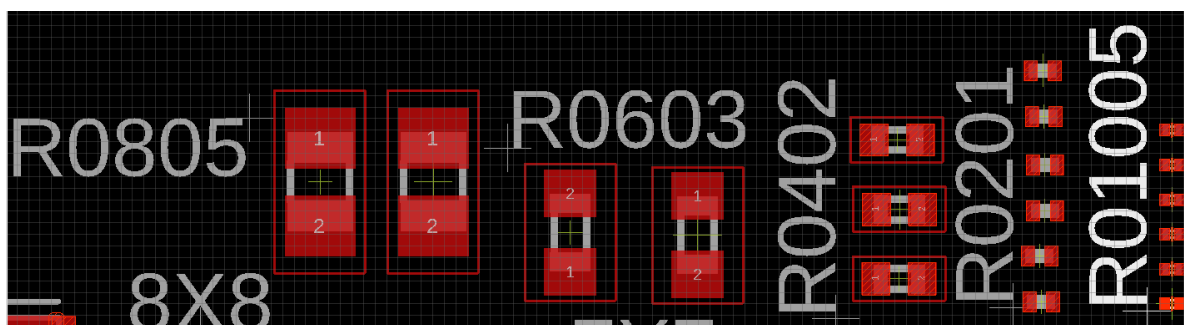
Jak bylo uvedeno v kapitole 3.2, úhel, pod kterým je stěrka vedena, je na tomto sítotisku jasně definovaný. Ostatní tři parametry jsou rozebrány níže v této kapitole.

K optimalizaci velikosti ok v šabloně byl použit spodní segment experimentální desky B. Na obrázku č. 31 je znázorněn tento segment i s rozměry. Pro zjištění maximální vhodné velikosti oka v šabloně je určeno dolních 8 čtvercových plošek. Nejmenší z nich, v pravém dolním rohu, označená jako 6x6, má délku hrany 6 mm. Ploška 7x7 představuje čtverec o hraně 7 mm a tak dále. Největší, ta neoznačená ploška je čtverec o délce strany 13 mm.



Obrázek 31: Část experimentální desky B určená k optimalizaci velikosti ok v šabloně

Pro zjištění minimální vhodné velikosti oka v šabloně jsou určeny kontakty vpravo nahoře tohoto segmentu. Jejich umístění je vidět na obrázku výše a jejich detail je na obrázku č. 32. Tyto plošky odpovídají kontaktům odporů, respektive SMD součástek, určeným pro pouzdra součástek velikosti například 0201. Jakým pouzdrům součástky odpovídají je znázorněno na desce. V následující tabulce č. 3 jsou uvedeny rozměry jednoho kontaktu (červeného obdélníku) pro každou použitou velikost pouzdra.



Obrázek 32: Detail pravého rohu obrázku č. 31

Typ součástky	01005	0201	0402	0603	0805
Délka pinu [mm]	0,25	0,44	0,687	1,125	1,155
Šířka pinu [mm]	0,188	0,27	0,625	1	1,5

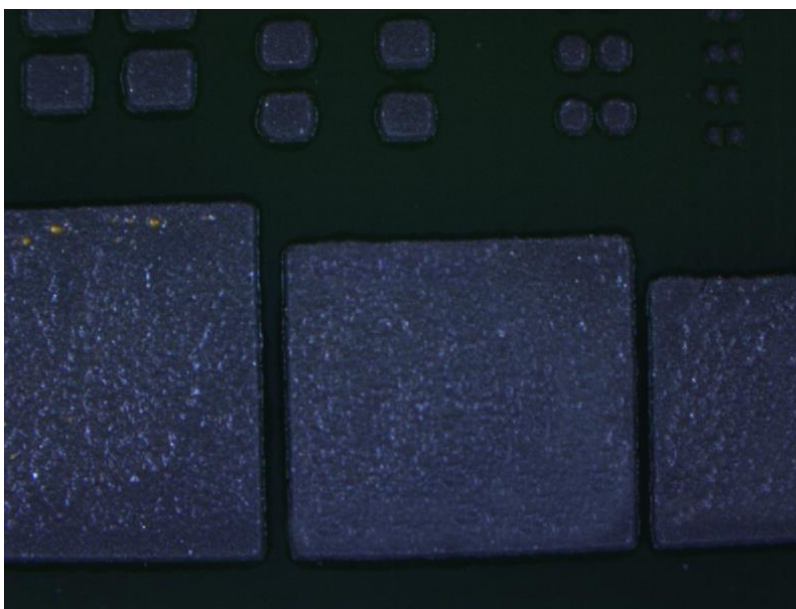
Tabulka 3: Rozměry kontaktů na desce

Správně natisknutá pasta je tehdy, pokud je nanášena rovnoměrně na plochu celého kontaktu a to v dostatečném množství, takže ho celý zakrývá. Kontakt tedy nemá být vidět a pod pastou ani neprosvítat. Na fotce kontaktu s nanášenou pastou by tedy neměla být vůbec vidět zlatá barva kontaktu, v opačném případě je pájecí pasty nanášeno málo. Podle tohoto kritéria se tedy vyhodnocuje, jestli je pasta nanášena správně. Správnost nanášení souvisí s velikostí ok v šabloně, viz teoretická část.

Případ, že se na kontakt nanese více pájecí pasty, než by se nanést mělo, nastat nemůže. Stěrka, která správně přiléhá na šablonu, totiž stáhne přebytečné množství pájecí pasty pryč z kontaktu a tak na něm nemůže zůstat více pasty, než množství pasty, odpovídající souvislé vrstvě na celém povrchu kontaktu o hloubce odpovídající hloubce šablony.

4.4.1 Maximální velikost

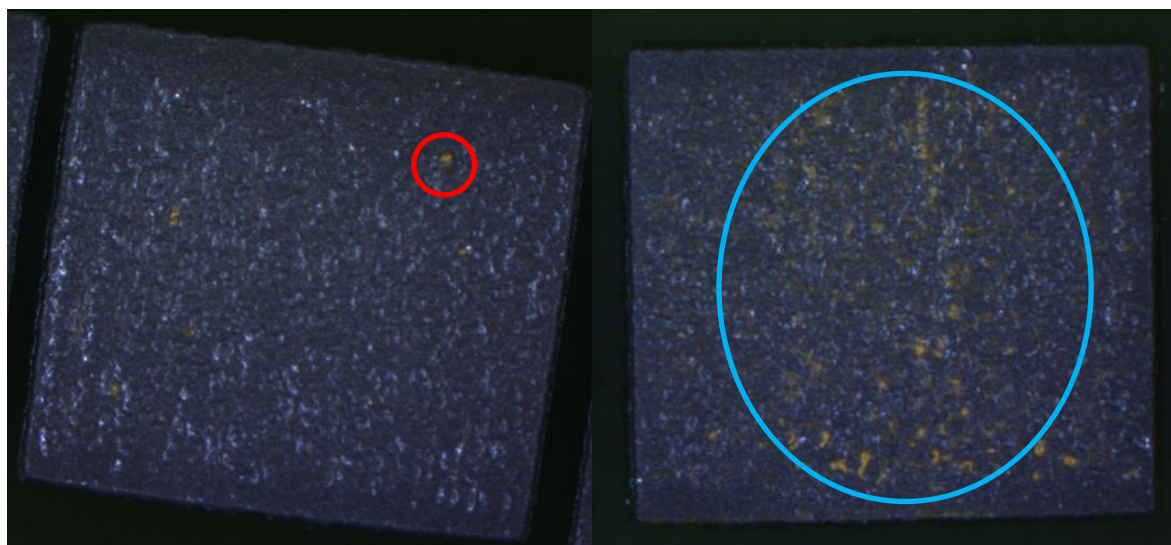
Nanesení nedostatečného množství pájecí pasty neznamená, že nevznikne vodivý spoj, ale že jeho vlastnosti budou z principu horší a tím spíše by tedy mohly vzniknout nějaké problémy, jako přehřívání kontaktu v důsledku špatné vodivé cesty, odpadnutí součástky v důsledku špatného mechanického spojení nebo nárůst odporu vodivé cesty vedoucí k úbytku napětí. Problém tedy je, že chyba tímto způsobená by nejspíše nešla odhalit hned po vyrobení desky, ale projevila by se až po určité době používání. Správně nanesená pájecí pasta v dostatečném množství je vidět níže na obrázku č. 33 na kontaktu o rozměrech 7x7 mm, to je ten uprostřed dole a částečně i na kontaktu o rozměrech 6x6 mm. Na kontaktech v pravé části tohoto obrázku je pasta natisknuta ideálním způsobem, tedy bez vady. Na kontaktu v levé části tohoto obrázku, který není vidět celý, pasta není natisknuta ideálně, avšak vada nanesení pasty je malá a zanedbatelná. Při přitisknutí součástky k desce a přetavení pájecí pasty by takováto chyba měla být s velkou pravděpodobností eliminována a i kdyby ne, neměla by způsobit žádné problémy. Takovéto nanesení pasty je tedy nedokonalé, avšak dostačující.



Obrázek 33: Správně nanesená pájecí pasta

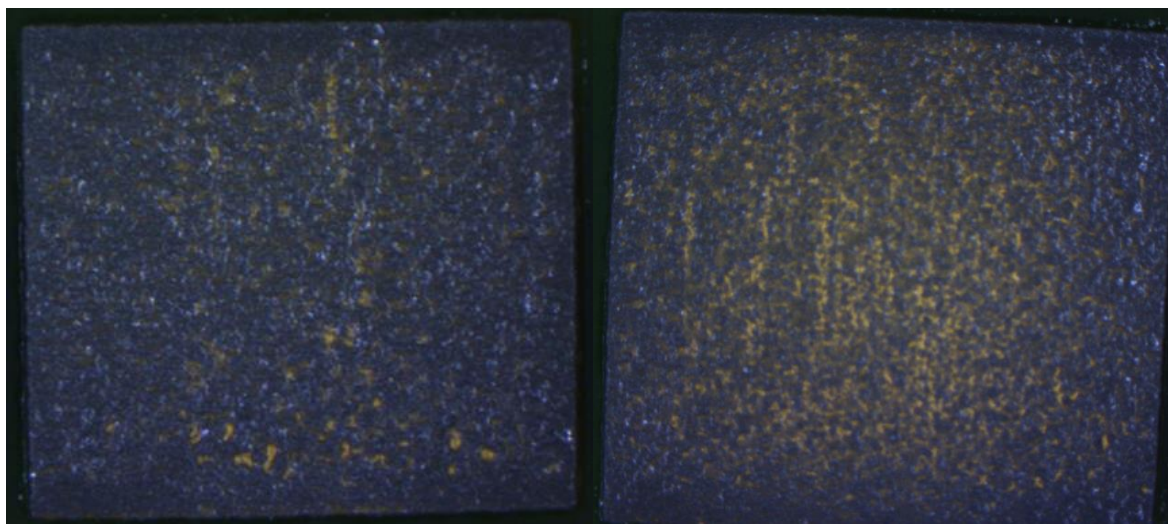
Na dalším obrázku, obrázku č. 34, jsou znázorněny dva typy vad, které mohou nastat při tisku pájecí pasty na desku. Na levé části obrázku je červeně označena „díra“ v pájecí pastě, tedy lokální absence pájecí pasty na kontaktu. V tomto případě, vzhledem k rozměrům kontaktu a vzhledem k velikosti plochy, na které pasta chybí, se dá říci, že takováto „díra“ sama o sobě nepředstavuje problém. Situace by se ovšem změnila, pokud by něco takového vzniklo na podstatně menším kontaktu. Také záleží na četnosti této vady. Pokud se na kontaktu vyskytne jedna nebo dvě takové „díry“, dá se to hodnotit jako dostatečně dobře natisknutá pasta, pokud je jejich množství větší, pasta je natisknuta špatně. V pravé části obrázku je zobrazena druhá chyba, která

při tisku pasty nastala a to nedostatečné množství nanesené pasty. V tomto případě se tak úplně nejedná o lokální absenci pasty na kontaktu, ale pasty je na něm nanášeno tak málo, že je přes ni kontakt vidět, prosvítá přes ni. Pokud nastane takováto situace, je pasta na kontakt nanášena nevyhovujícím způsobem.



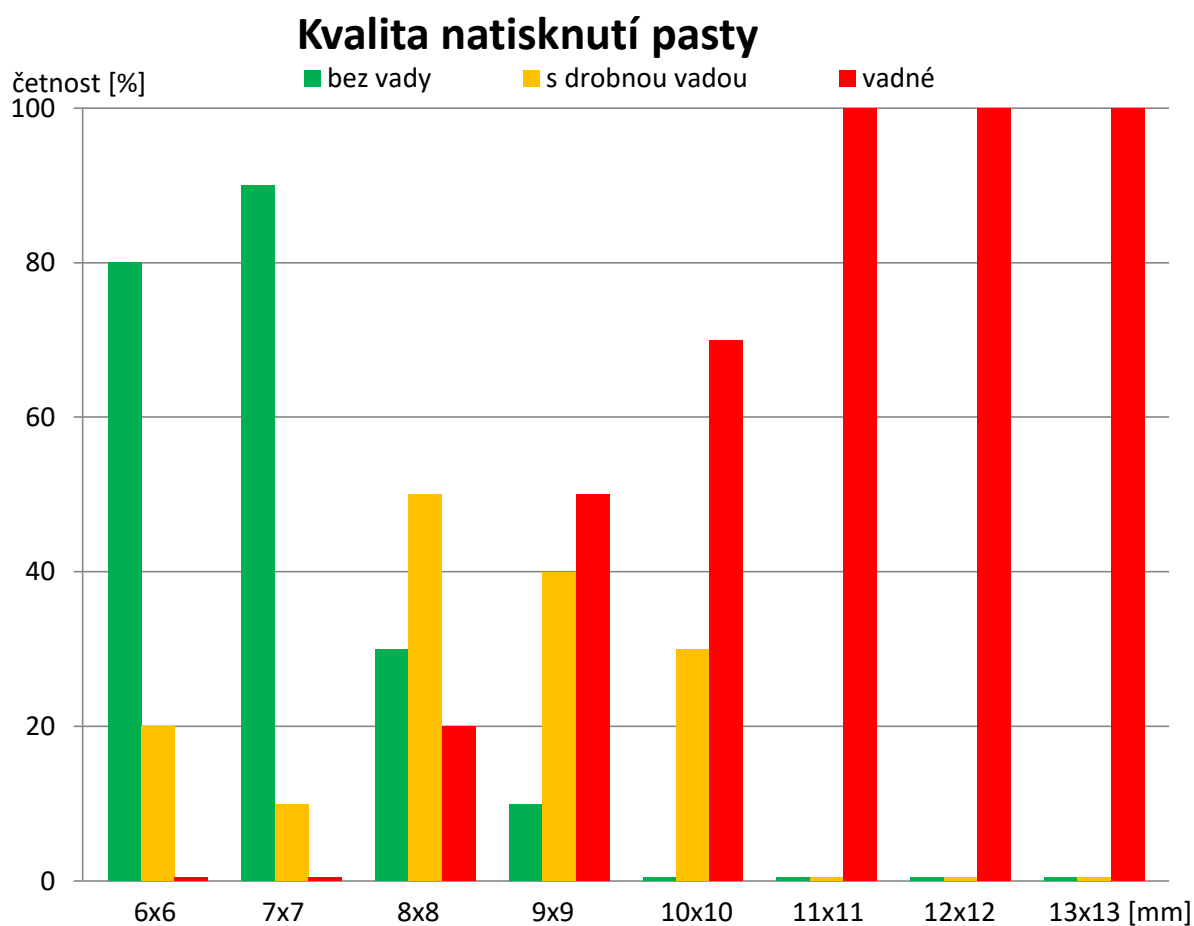
Obrázek 34: Vady tisku pájecí pasty

Jak bylo uvedeno v teoretické části, natisknutí nedostatečného množství pájecí pasty na desku je způsobeno takzvaným vybagrováním pasty stěrkou, kdy stěrka společně s přebytečnou pastou stáhne z kontaktu i pastu, která by na něm měla zůstat. Tento jev souvisí s velikostí kontaktu a limituje jejich maximální velikost. S rostoucí velikostí kontaktu se tento jev projevuje více, jak je vidět na obrázku č. 35. V levé části obrázku je kontakt o rozměrech 9x9 a v pravé části obrázku kontakt o rozměrech 13x13. Je jasně vidět, že větší kontakt prosvítá mnohem více, než kontakt menší.



Obrázek 35: Vybagrování pájecí pasty

V rámci experimentu byla na deset desek nanášena pájecí pasta Cobar OT2 SN100C, aby se ukázalo, jaká velikost kontaktu už je příliš velká na to, aby se dala při sítotisku používat. Kvalita natisknutí pasty byla vyhodnocena opticky, podle výše zmíněného. Potisknuté kontakty byly rozděleny do tří skupin na kontakty „bez vady“ tedy ideální, „s vadou“ tedy dostatečné a „vadné“ tedy nevyhovující. Kritéria dělení kontaktů do jednotlivých skupin jsou vysvětlena výše v této kapitole. Výsledky tohoto experimentu jsou znázorněny v grafu č. 1. Na ose x tohoto grafu je uvedeno, jaké velikosti kontaktu odpovídají jaké výsledky a na ose y procentuální zastoupení kvality nanášení pasty. Z této statistiky jsem vyvodil závěr, že plošky o rozměrech 6x6 a 7x7 jsou dostatečně malé na to, aby se s nimi dalo pracovat a byla zaručena dostatečná kvalita nanášení pájecí pasty. Kontakty o rozměrech větších 7x7 mm považuji za příliš velké na to, aby se na ně tato pasta dala nanést v dostatečné kvalitě. Vzhledem k ne úplně jednoznačnému způsobu vyhodnocení by se dalo říci, že i kontakty o rozměrech 8x8 mm jsou vyhovující, avšak doporučil bych takto velkou souvislou plochu již netisknout. Největší souvislá plocha, kterou bych tedy doporučil ještě tisknout, představuje plochu 49 mm².



Graf 1: Maximální velikost kontaktů

V případě, že by bylo nutno pracovat se součástkou, která má kontakt o větších rozměrech a hrozí, že by pasta nebyla natisknuta správně, je nutno oko v šabloně odpovídající takovému

kontaktu rozdělit mřížkou na více segmentů, viz kapitola 3.2. Pokud by nastal případ, že se pasta na kontakt nenanese v dostatečném množství, což může za určitých okolností nastat i u kontaktů menších rozměrů, než 6x6 mm, například pokud se pasta blíží konci své expirace, je vhodné na kontakt dodatečně nanést větší množství pájecí pasty a to ještě před osazením. Nanesení dodatečného množství pasty lze na kontakt aplikovat například pomocí injekční stříkačky, viz obrázek č. 36, na kterém je stříkačka znázorněna i s výsledkem její aplikace. Takovýto způsob nanesení pájecí pasty rozhodně není ideální a to jednak proto, že nejde přesně určit množství pasty aplikované na kontakt a navíc takto aplikovaná pasta rozhodně není rozprostřena rovnoměrně. Navíc na takovýto kontakt je vhodné umístit součástku manuálně s největší opatrností. Tento způsob nanesení pájecí pasty rozhodně není ideální a pokud možno, je vhodné se mu vyhnout. Na druhou stranu je toto řešení zajisté mnohem lepší, než na kontaktu nemít dostatečné množství pájecí pasty. Pasty se však dodatečně nesmí aplikovat příliš velké množství, což by mohlo způsobit problémy, stejně jako nedostatečné množství pasty. Šlo by takto řešit i nanesení pasty na kontakty větších rozměrů, u kterých se dá předpokládat, že pasta nebude nanesena dostatečně správně, ale takovýto řešení je nevhodné.

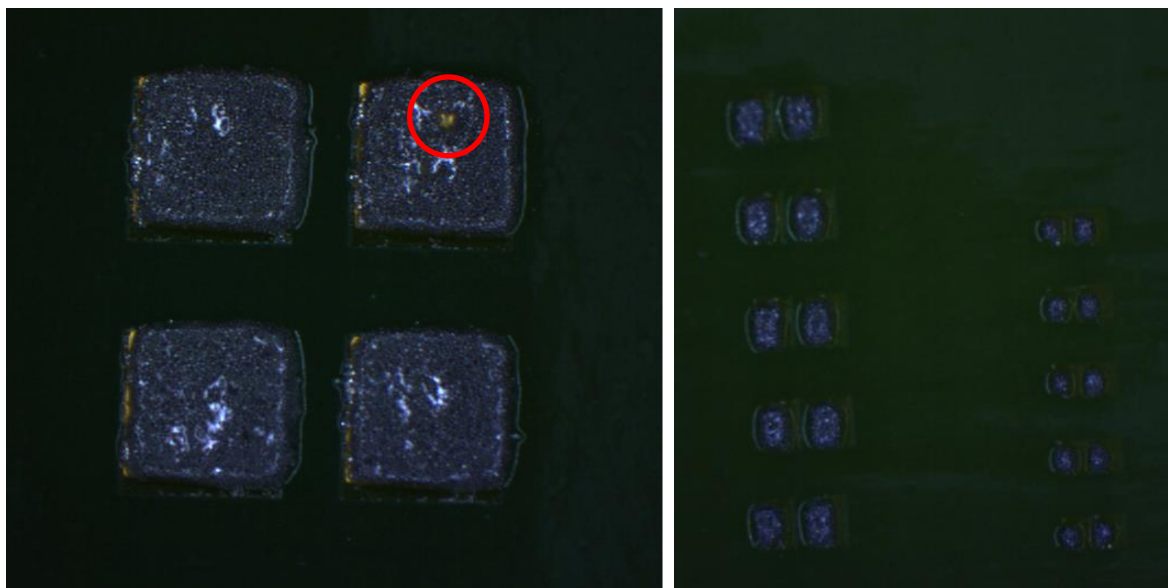


Obrázek 36: Dodatečné nanesení pasty

4.4.2 Minimální velikost

Minimální rozměr kontaktů, na které je pájecí pasta na této lince tištěna, je definován možnostmi osazovacího automatu. U něj je výrobcem udáno, že nejmenší osazovatelné součástky jsou typu 0201 a výrobce dále uvádí, že v nouzovém případě se dá pracovat i se součástkami typu 01005. Minimální velikost tedy v tomto ohledu odpovídá kontaktům určeným pro tento typ

pouzdra. Kontakty menších rozměrů by tak mohly vyžadovat pouze procesory, relé či čipy, jež mají mnoho vývodů malých rozměrů, tzv. nožičky. Kontakty odpovídající vývodům součástek 01005 jsou ovšem tak maličké, že by kontakty pro tyto procesory, relé či čipy měly být větší. Z tohoto důvodu odpovídají nejmenší kontakty, se kterými je experimentováno, kontaktům pouzder 01005. Tabulka s rozměry a použitými součástkami je v kapitole 4.4. Navíc vzhledem k tomu, že se jedná o prototypovou osazovací linku, je mnohdy třeba na desce po jejím vytvoření něco opravit či poupravit, takže je vhodnější a pohodlnější pracovat se součástkami větších rozměrů, se kterými se podstatně snáze manipuluje. Z tohoto důvodu také není důvod jít cestou minimalizace a snažit se pracovat s kontakty a součástkami ještě menších rozměrů, než jsou kontakty pouzder 01005. Pracovat s nimi by bylo totiž vzhledem k jejich velikostem prakticky nemožné. Například kontrola, jestli by takto malé nožičky byly správně připájené a případná manuální oprava by byla neproveditelná. Už manuálně osadit a připájet odpor typu 0201 je velmi náročný úkol.



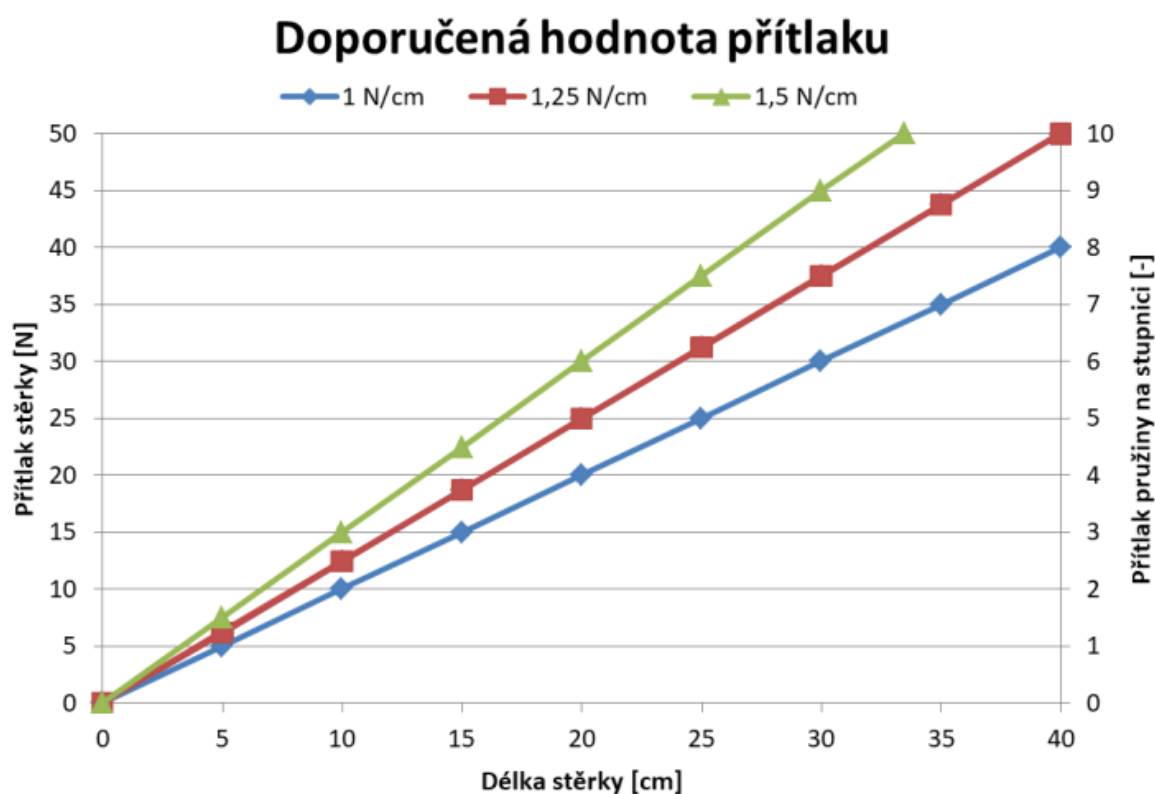
Obrázek 37: Minimální velikost kontaktů

V rámci experimentu byla na deset desek nanášena pájecí pasta Cobar OT2 SN100C, aby se ukázalo, jaká velikost kontaktu už je příliš malá na to, aby se dala při sítotisku používat. Na každé desce je 10 kontaktů odpovídajících vývodům součástek 01005, což představuje celkem 100 kontaktů, na které byla pasta tisknuta. Ve všech případech byla pasta na kontakty odpovídající součástkám 01005 úspěšně a bez vad nanášena. Dá se tedy říct, že minimální velikost ok v šabloně v ohledu tisku pasty na ně není omezena. Minimální velikost ok v šabloně je tedy limitována jinými aspekty. Pracovat na sítotisku s kontakty o rozměrech 0,25x0,188 mm tedy nepředstavuje žádný problém. Ukázka kontaktů s nanášenou pájecí pastou pro pouzdra 01005 a 0201 je na obrázku č. 37 vpravo. V levé části tohoto obrázku můžeme vidět kontakty pro dva odpory o rozměrech 0805. Na levé části tohoto obrázku je červeně označena „díra“ v pájecí pastě, tedy

lokální absence pájecí pasty na kontaktu. Jedná se o stejnou vadu jako na obrázku č. 34 v předchozí kapitole. Tím se potvrzuje, že tento typ vady úplně nesouvisí s rozměrem kontaktu, na který je pasta tištěna a i v tomto případě platí, že takováto vada není ideální, ale nepředstavuje problém. Je ovšem nutné, aby rozměr této „díry“ byl zanedbatelný vzhledem k rozměru kontaktu, na kterém se vyskytuje.

4.4.3 Vliv přítlaku stěrky

V kapitole 3.2 bylo zmíněno, že výrobce doporučuje přítlak 1 až 1,5 N na 1 cm délky stěrky a také, jak se velikost přítlaku nastavuje. Na následujícím grafu, grafu č. 2, je znázorněno, jak by se měl přítlak nastavit, aby na 1 cm délky stěrky působil určitý přítlak. Na pravé stupnici je vynesena hodnota, která by se měla nastavit na systému vedené stěrky, na levé stupnici je znázorněno, jakému skutečnému přítlaku tato hodnota odpovídá a na ose x proměnná délka stěrky, ta závisí na stěrce, kterou pro tisk zvolíme.

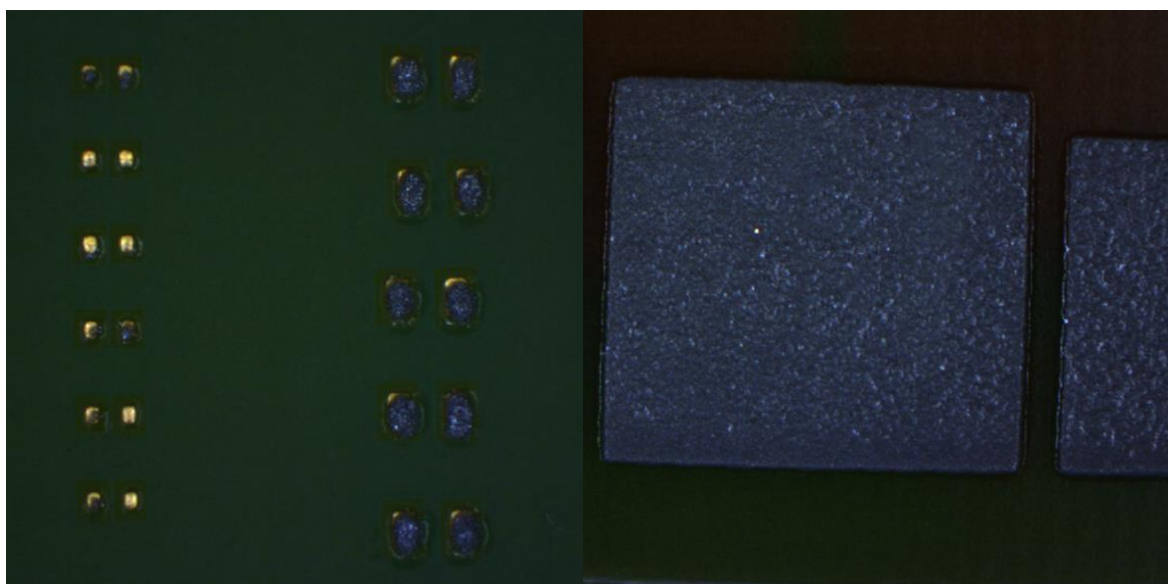


Graf 2: Nastavení přítlaku stěrky

U sítotisku jsou k dispozici stěrky dvou velikostí, a to 130 a 260 mm. Stěrka by ideálně měla být o něco delší, než vzor na šabloně a to přibližně o 10 mm. Rozhodně by však neměla být menší. Podle tohoto se má tedy pro tisk vybrat vhodná stěrka. Přítlak, jaký máme na stupnici nastavit, zjistíme tak, že délku stěrky v cm vynásobíme zvoleným přítlakem (1, 1,25 nebo 1,5), čímž získáme hodnotu na levé ose y a té přiřadíme hodnotu z pravé osy y, leží ve stejné výšce.

Vzhledem ke způsobu a přesnosti nastavování přítlaku není nutné řešit nastavení mezistupňů přítlaku, jako například 1,1 N/cm. [7]

Z experimentů s nastavením přítlaku stěrky bylo zjištěno, že snížení přítlaku stěrky je vhodné pro oka velkých rozměrů v šabloně, u kterých se pak méně projevuje efekt vybagrování a lze tak využít trochu větší otvory nebo zajistit lepší nanesení pasty do větších ok v šabloně. V návaznosti na kapitolu 4.4.1 se tím dá zajistit, že na kontakty o rozměrech 6x6 mm a 7x7 mm byla pasta natisknuta bez vady, zatímco na kontakty o rozměrech 8x8 mm a 9x9 mm se pasta nanasla v dostatečně dobré kvalitě, i když ne ideálním způsobem. Na druhou stranu, snížení přítlaku stěrky znamená zhoršení tisku pasty na kontakty malých rozměrů, tedy kontakty pro pouzdra typu 01005 a 0201. U otvorů v šabloně takovýchto rozměrů nedojde k správnému protlačení pájecí pasty přes šablonu na desku. Aby se toto projevilo, zvolil jsem přítlak odpovídající 0,5 N/cm, čemuž odpovídá obrázek č. 38. V levé části tohoto obrázku jsou vidět špatně otisknuté kontakty pouzdra 01005 a v pravé části správně natisknutou pastu na kontakt rozměru 9x9 mm.



Obrázek 38: Vliv přítlaku stěrky

Výsledky experimentů s nastavením přítlaku přinesly tyto výsledky:

- Pokud se na šabloně, přes kterou se pájecí pasta tiskne, nevyskytují žádná menší oka, tedy oka odpovídající kontaktům pouzder 0201 a menší a zároveň se na ní vyskytují převážně oka velkých rozměrů, je možné za účelem lepšího natisknutí pasty nastavit přítlak mimo doporučenou mez, tedy nižší, přibližně na 0,5 N/cm.
- U šablony, ve které je více ok velkých rozměrů, než malých, je vhodné pracovat s přítlakem 1N/cm.

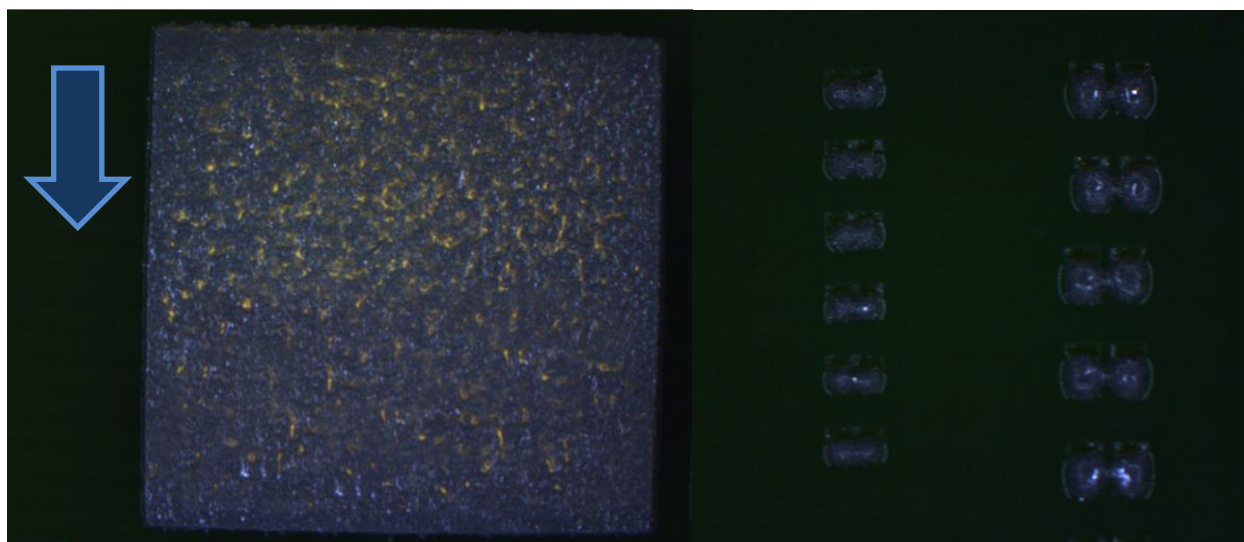
- Pokud jsou oka hraničních malých a hraničních velkých rozměrů na šabloně přibližně stejně zastoupena, je vhodné se držet nastavení přitlaku 1,25 N/cm, tedy „zlaté střední cesty“.
- Pokud se na šabloně vyskytují zejména menší oka, odpovídající velikosti kontaktů 0201 a menší, je vhodné nastavit přitlak na 1,5 N/cm.
- Nastavovat přitlak na hodnotu větší, než 1,5 N/cm není vhodné pro oka malých ani velkých rozměrů v šabloně. Větší přitlak totiž způsobí protlačení pasty pod šablonu, což vadí spíše u kontaktů menších rozměrů a zároveň vybagrování pájecí pasty, což vadí naopak u kontaktů větších rozměrů.

4.4.4 Vliv rychlosti pohybu stěrky

Rychlost, kterou se stěrka pohybuje nelze přesně nastavit, ani definovat, protože se s ní manipuluje manuálně. Je však lepší s ní manipulovat spíše pomalu, než rychle. Z více pokusů týkajících se vlivu rychlosti stěrky na kvalitu nanesení pasty na různé velikosti kontaktů na DPS jasně vyplynulo, že pokud se stěrkou vyloženě rychle netrhne, nemá rychlost jejího pohybu na kvalitu natisknutí pasty na desku nijak zásadní vliv. Vedená stěrka má navíc při pohybu po šabloně určitý odpor, který je dostatečný na to, aby nějakému velmi rychlému pohybu stěrkou zabránil.

4.4.5 Počet přejezdů stěrkou

Počet přejezdů stěrkou přes šablonu se obecně doporučuje na dva, jednou tam a jednou zpět. Toto pravidlo se experimentálně potvrdilo. Z opakovaných pokusů vyšlo, že pokud se přes šablonu přejede vícekrát, než dvakrát, není pasta nanášena rovnoměrněji, ale spíše se nějaká část vybagruje a navíc je pasta také spíše protlačena pod šablonu, tedy na místa mimo otvory v šabloně. Protlačení pasty pod šablonu představuje problém zejména u menších kontaktů s malou roztečí, kde hrozí jejich propojení pájecí pastou.



Obrázek 39: Vliv manipulace stěrkou

Vpravo na obrázku č. 39 jsou vidět kontakty, na které byla nanese na pasta dvojitým přejetím stěrkou tam a dvojitým přejetím stěrkou zpět přes šablonu. Jak je z obrázku vidět, dvojice kontaktů odpovídajících jednomu odporu byla pastou propojena, což by při osazení součástkou a zapájení znamenalo zkrat. Více vlevo jsou kontakty odpovídající pouzdru 01005 a více vpravo kontakty pouzdra 0201. Rozměry pouzder, například 0201, jsou jasně definované, takže jim odpovídající kontakty nelze umístit dále od sebe a tím propojení zabránit.

Pokud se přejede přes šablonu pouze jedním směrem, způsobí to nerovnoměrné nanese ní pasty, kdy je pasta nanese na jednu část kontaktu více, než na druhou, viz obrázek č. 39 vlevo. Směr pohybu stěrky je znázorněn modrou šipkou. Pasta se navíc na kontakt nanáší v menším množství, což způsobuje, že na větší kontakty není pasta nanese na správně.

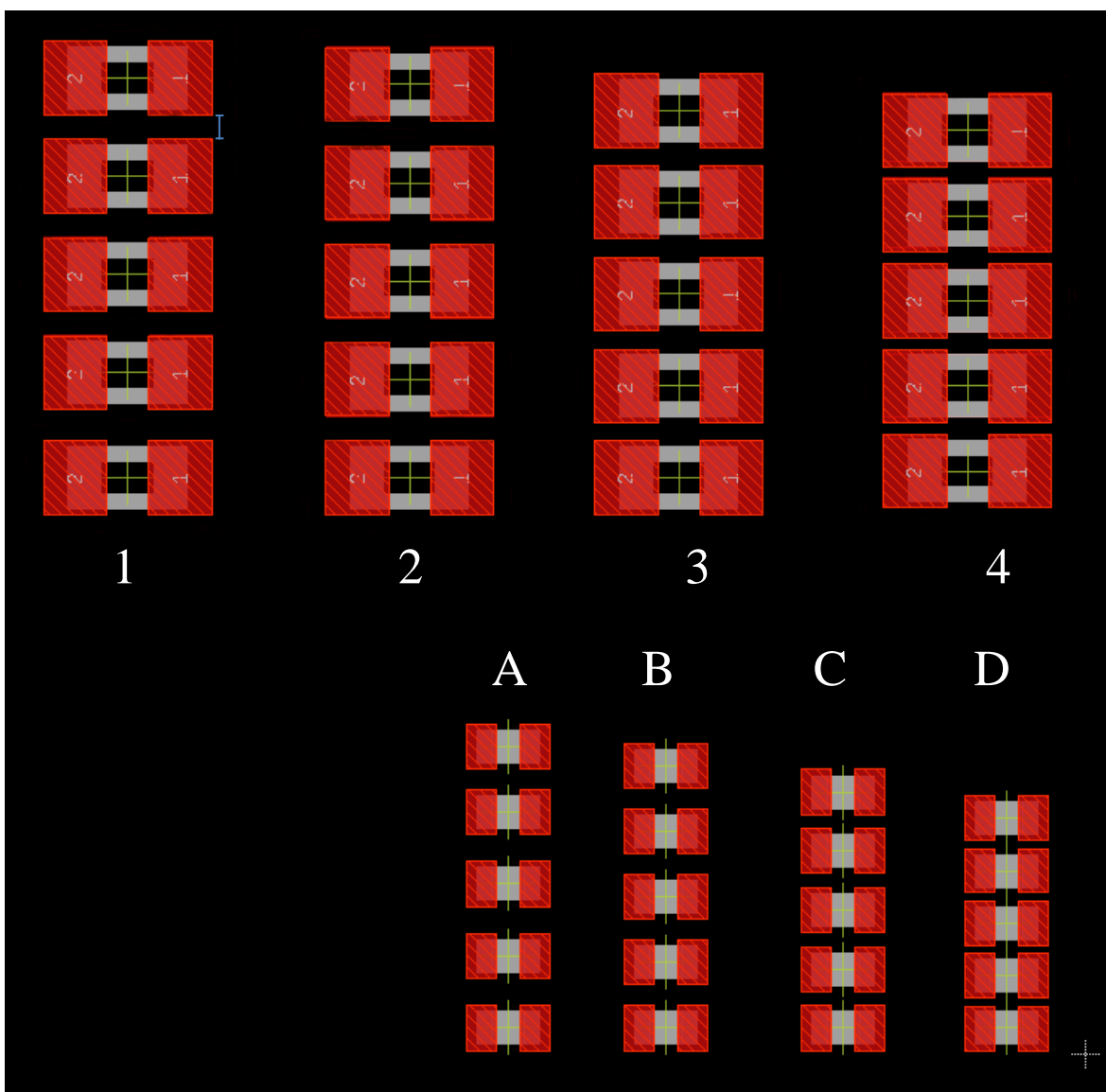
4.5 Minimální vzdálenost kontaktů

Tato kapitola se zabývá minimální vzdáleností otvorů v šabloně, respektive kontaktů na desce. Pokud jsou kontakty moc blízko sobě, může dojít při tvorbě vodivých spojů k jejich propojení. Takovýto stav je nežádoucí a znamená poruchu na desce. Stav, kdy jsou kontakty příliš blízko sobě, se projeví hned v prvním kroku výroby desky a to při tisku pájecí pasty na ní.

K optimalizaci vzdálenosti mezi kontakty byl použit spodní segment experimentální desky B. Celý tento segment je vidět na obrázku č. 29 a na obrázku č. 40 je zvětšena jeho levá dolní část, na které se zjišťovala ona minimální vhodná vzdálenost kontaktů. V horní části jsou vidět 4 sloupce určené pro odpory typu 0402 a v dolní části jsou 4 sloupce určené pro odpory typu 0201. V každém z těchto sloupců je jiná vertikální vzdálenost mezi kontakty. Horizontální vzdálenost mezi kontakty je definovaná rozměrem součástek a nelze ji měnit. Vertikální vzdálenosti kontaktů pro daný sloupec jsou uvedeny v následující tabulce. Na obrázku je vertikální vzdálenost naznačena modrou úsečkou v levé horní části.

Sloupec	1	2	3	4	A	B	C	D
Vzdálenost pinů [mm]	0,3	0,25	0,175	0,125	0,25	0,2	0,15	0,1

Tabulka 4: Vertikální vzdálenost kontaktů na desce B

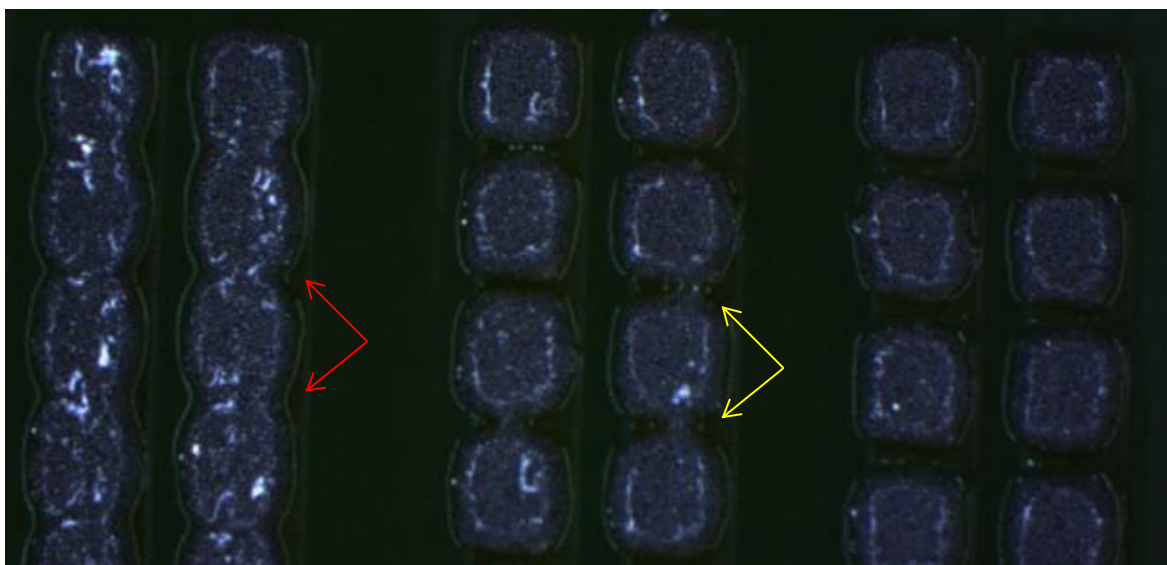


Obrázek 40: Detail segmentu desky B pro určení minimální vzdálenosti kontaktů

4.5.1 Minimální vzdálenost při nanášení pasty

Po natisknutí pájecí pasty na kontakty se má pasta vyskytovat pouze na kontaktech. Stav, kdy pasta mezi kontakty vytvoří můstky nebo je dokonce propojí souvislou vrstvou, je už z principu špatný. S největší pravděpodobností totiž po přetavení pájecí pasty vznikne mezi takto propojenými kontakty nežádoucí vodivé spojení neboli zkrat. I když existuje určitá šance, že smáčivost, respektive povrchové napětí, viz kapitola 2.1.8, roztavené pasty způsobí, že se pájecí pasta stáhne pouze na kontakt a jemu odpovídající vývod součástky, je nepravděpodobné, že by nežádoucí vodivé propojení nevzniklo. Výhodou kontroly, jestli se kontakty pastou propojí či ne hned po natisknutí je, že takové propojení je pomocí mikroskopu snadno zjištělné. Jednoznačně lze ovšem říci, že pokud po tisku pasta kontakty propojuje, je proces tisknutí pasty z principu

chybný a není možno s ním v takovémto stavu pracovat. Pokud tedy k propojení kontaktů opravdu dochází, jsou kontakty umístěny příliš blízko k sobě a toto se při návrhu desky musí zohlednit. Na následujícím obrázku jsou žlutě vyznačeny můstky mezi kontakty a červeně jsou vyznačena souvislá propojení kontaktů pouzder typu 0402.



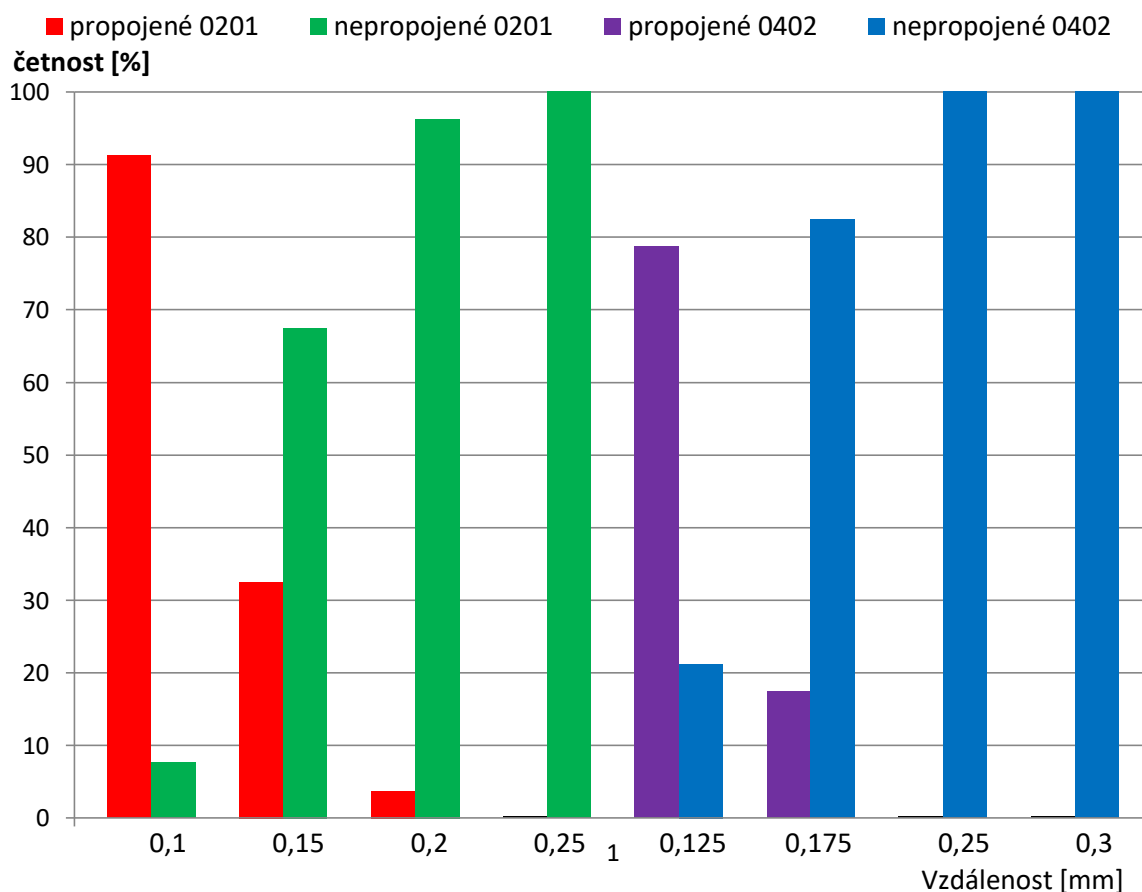
Obrázek 41: Kontakty propojené pájecí pastou

V rámci experimentu byla na deset desek nanesena pájecí pasta Cobar OT2 SN100C, aby se ukázalo, jaká vzdálenost kontaktů je již příliš malá na to, aby se dala při sítotisku používat. Na každé desce bylo v dané vzdálenosti od sebe 8 kontaktů, takže statistika byla vyhodnocena z 80 vzorků. Kvalita natisknutí pasty byla vyhodnocena opticky, podle výše zmíněného. Sousední dvojice kontaktů byly rozděleny do dvou skupin na „propojené“ tedy ty, které byly pastou propojeny a „nepropojené“ tedy ty, které pasta nepropojila. Dvojice kontaktů, u nichž se vyskytovala chyba jako na obrázku č. 41, byly zařazeny to skupiny propojené. Výsledky tohoto experimentu jsou znázorněny na grafu č. 3. Na ose x tohoto grafu je uvedeno, v jaké vzdálenosti kontakty byly a na ose y četnost propojených a nepropojených kontaktů.

Z tohoto experimentu vyplynulo, že minimální rozteč mezi kontakty, taková aby se stoprocentně zaručilo, že se pájecí pasta natiskne správným způsobem, je 0,25 mm. Toto platí pro kontakty odporů typu 0201 i 0402. Kontakty by tedy měly být od sebe umístěny ve vzdálenosti 0,25 mm a větší. Pokud by byly umístěny blíže sobě, například ve vzdálenosti 0,2 mm, hrozí s pravděpodobností 3,75% , že dojde při tisku pasty k jejich propojení. Použití takovéto vzdálenosti je tedy také možné, avšak je pak nutné kontaktům při kontrole věnovat vyšší pozornost a důkladně je zkontrolovat, popřípadě spoje upravit. Vzhledem k tomu, že se jedná o malosériovou výrobu, je i toto možné. Při vzdálenosti 0,175 mm je pravděpodobnost chyby 17,5% a při 0,15 mm 32,5%.

Tyto hodnoty považují již za příliš vysoké a takovéto vzdálenosti tedy za příliš malé a nepoužitelné.

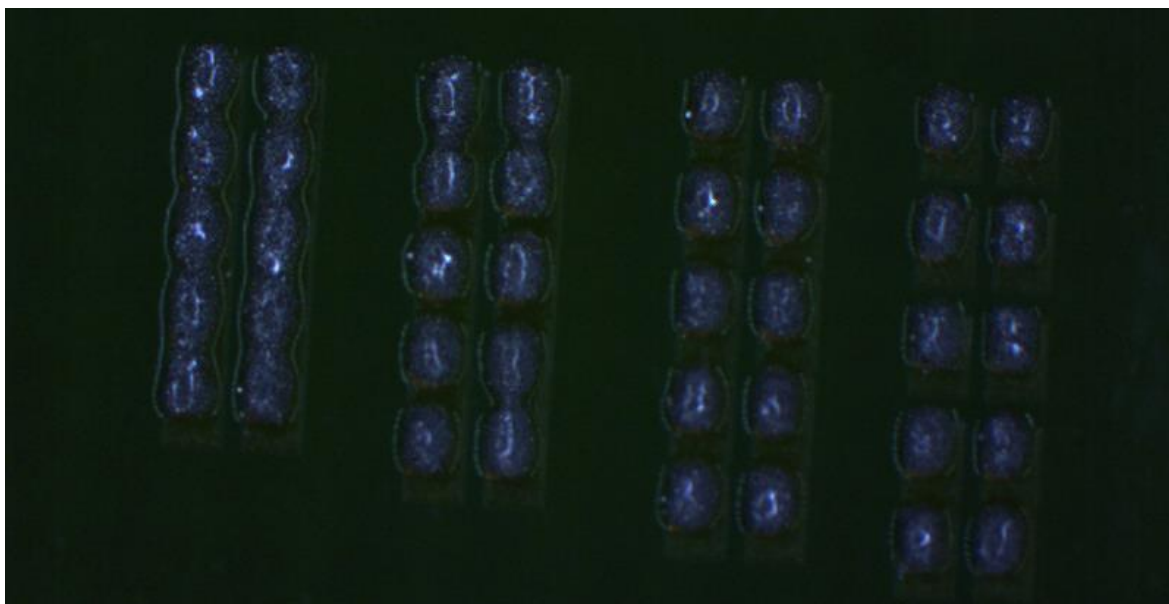
Četnost propojení kontaktů



Graf 3: Vyhodnocení minimální vzdálenosti kontaktů

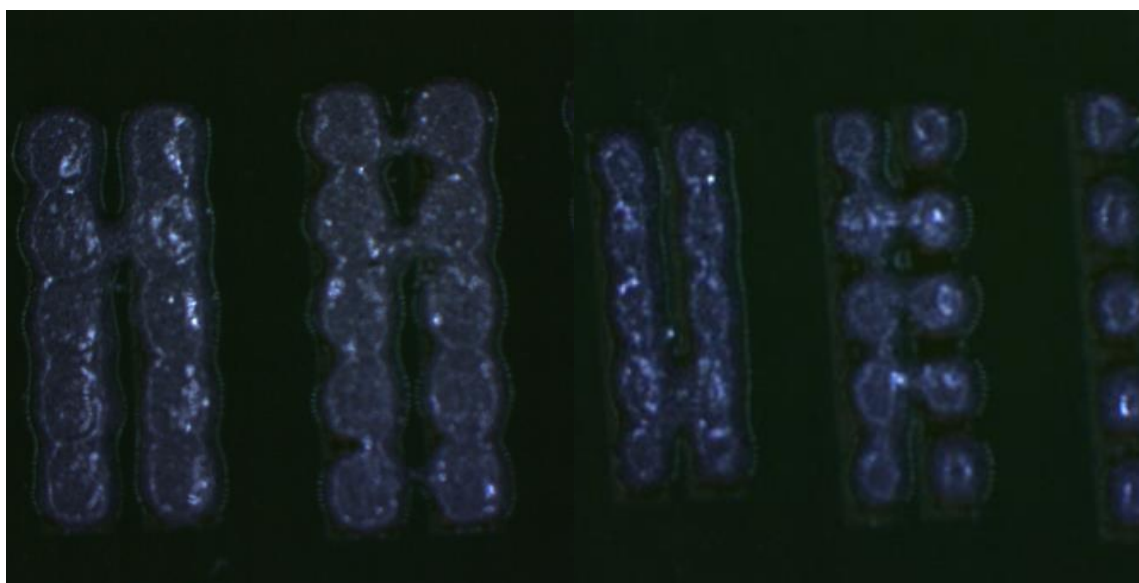
Pro kontakty součástek 0201 a 0402 vyšla minimální vhodná vzdálenost shodná. Vzhledem k tomu, že tloušťka vrstvy nanesené pájecí pasty odpovídá hloubce šablony a ta je pro všechna oka v šabloně shodná, se dá tedy říci, že velikost, přesněji povrch kontaktu a množství na něm nanesené pájecí pasty tedy nesouvisí s minimální vzdáleností kontaktů. Větší kontakty, které vyžadují větší součástky, by tedy teoreticky také mohly být umístovány do takovéto vzdálenosti. Vzhledem k jejich rozměrům, možnosti, že pouzdro přesahuje kontakty, a i jiným ohledům, jako je chlazení součástky, se ovšem větší součástky a tedy i jejich kontakty umísťují dále od sebe. Není tedy nutno řešit minimální vzdálenost velkých kontaktů v ohledu propojení pájecí pastou.

Na následujícím obrázku, obrázku č. 42, je pro úplnost uveden snímek sloupců s kontakty pro pouzdra typu 0201. V levé části obrázku je vidět, že u sloupců A a B došlo k propojení kontaktů a u sloupců C a D nikoliv.



Obrázek 42: Kontakty pro pouzdra typu 0201 propojené pájecí pastou

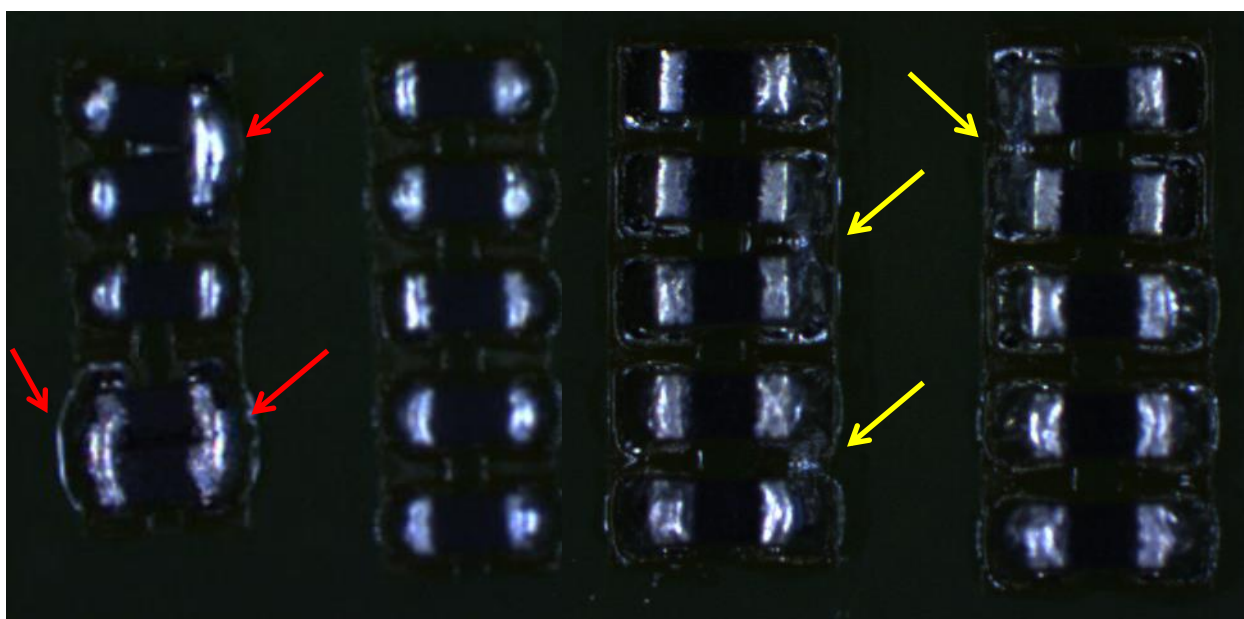
Pro doplnění kapitol 4.4.3 a 4.4.5 uvádím, že pokud se stěrkou přes šablonu přejíždí vícekrát, než dvakrát, nebo je nastaven příliš velký přítlak, větší než 1,5 N/cm, může tisk pasty na desku dopadnout jako na obrázku č. 43. Vlevo jsou kontakty pro pouzdro 0402, vpravo pro pouzdro 0201. Pro oba tyto stavy je výsledek shodný. Na tomto obrázku došlo nejen k vertikálnímu propojení kontaktů, ale k i horizontálnímu, což znamená, že součástku nelze použít už kvůli jejím rozměrům. Takovýto stav nastal ovšem pouze pokud byl sítotisk špatně nastaven nebo byl špatně použit. Na obrázku č. 43 je zobrazena deska, na kterou bylo tisknuto při přítlaku 2,5 N/cm.



Obrázek 43: Vliv přítlaku stěrky a počtu jejích přejezdů na minimální vzdálenost

4.5.2 Minimální vzdálenost po přetavení

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, v důsledku smáčivosti pájecí pasty se během procesu přetavení, když je pasta roztavená, pájka stahuje z povrchu desky na kontakty a vývody z desek. Důsledkem tohoto procesu se stává, že i když byly před přetavením pájecí pasty dva kontakty pastou propojeny, tak po přetavení mezi nimi propojení nevznikne. Může ovšem nastat i stav, kdy síly v roztavené pájecí pastě jsou natolik silné, že vychýlí osazené součástky z jejich pozice, přitáhnou je k sobě a pájka je po přetavení propojí. Toto se projevilo zejména u menších, lehčích odporů (typu 0201) a takto propojené odpory jsou vidět na obrázku č. 44, propojení je vyznačeno červenou šipkou. Další možností je, že při přetavení pájecí pasty nedojde k vychýlení součástky, ale pájecí pasta mezi kontakty vytvoří můstek a tak také dojde k nežádoucímu propojení kontaktů. Tento jev nastal zejména u větších, těžších odporů (typu 0402) a je zachycen na obrázku č. 44 vpravo. Takto propojené kontakty jsou vyznačeny žlutou šipkou.



Obrázek 44: Minimální vzdálenost kontaktů po přetavení

Zkoumání minimální vzdálenosti po přetavení pájky tedy potvrzuje výsledky, které ukázala předchozí kapitola, že minimální vhodná vzdálenost mezi kontakty představuje 0,25 mm. I když propojení kontaktů pájecí pastou po jejím natisknutí nemusí znamenat, že po přetavení je opravdu propojí, tak je to pravděpodobné.

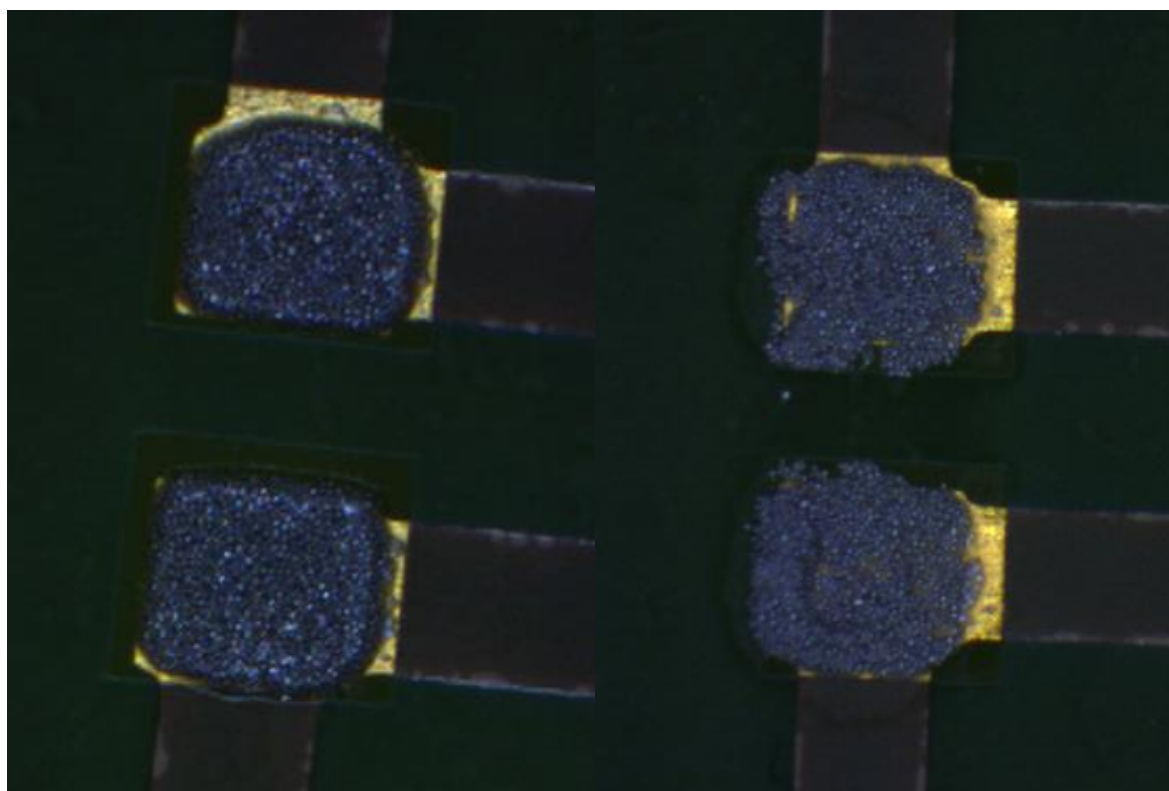
4.6 Bezpečná doba od nanesení pasty po přetavení

Ideální průběh tvorby DPS je nanést na desku pájecí pastu, na to okamžitě osadit součástky a tento polotovar okamžitě umístit do pece a přetavit. Proces tisku pasty na desku je v porovnání s ostatními procesy mnohem kratší. Dá se tedy říci, že pokud se vyrábí větší množství desek,

například 10, tak je efektivnější na začátku výroby na všechny desky natisknout pájecí pastu. Následně by tedy už nebylo nutné proces tisku pasty řešit a nebyla by tak odváděna pozornost od ostatních procesů výroby DPS. Výhodou takového postupu by navíc bylo, že pájecí pasta aplikovaná do sítotisku by byla mimo podmínky vhodné pro její skladování mnohonásobně kratší dobu. Tím, že by se tedy pasta během kratší doby uklidila zpět do nádoby k tomu určené a do ledničky, by bylo omezeno vysychání jejích složek a její celková degradace. Vzhledem k tomu, že při malosériové výrobě může být jedno balení pasty používáno i celý rok, by v opačném případě mohla být zbytečně pasta vystavena degradaci i stovky hodin navíc, viz následující výpočet, přičemž 6 hodin denně je rozdíl mezi 8 hodinami a 2 hodinami otevřené doby pasty.

$$6 \text{ hodin denně} \cdot 6 \text{ dní tisku měsíčně} \cdot 12 \text{ měsíců} = 432 \text{ hodin}$$

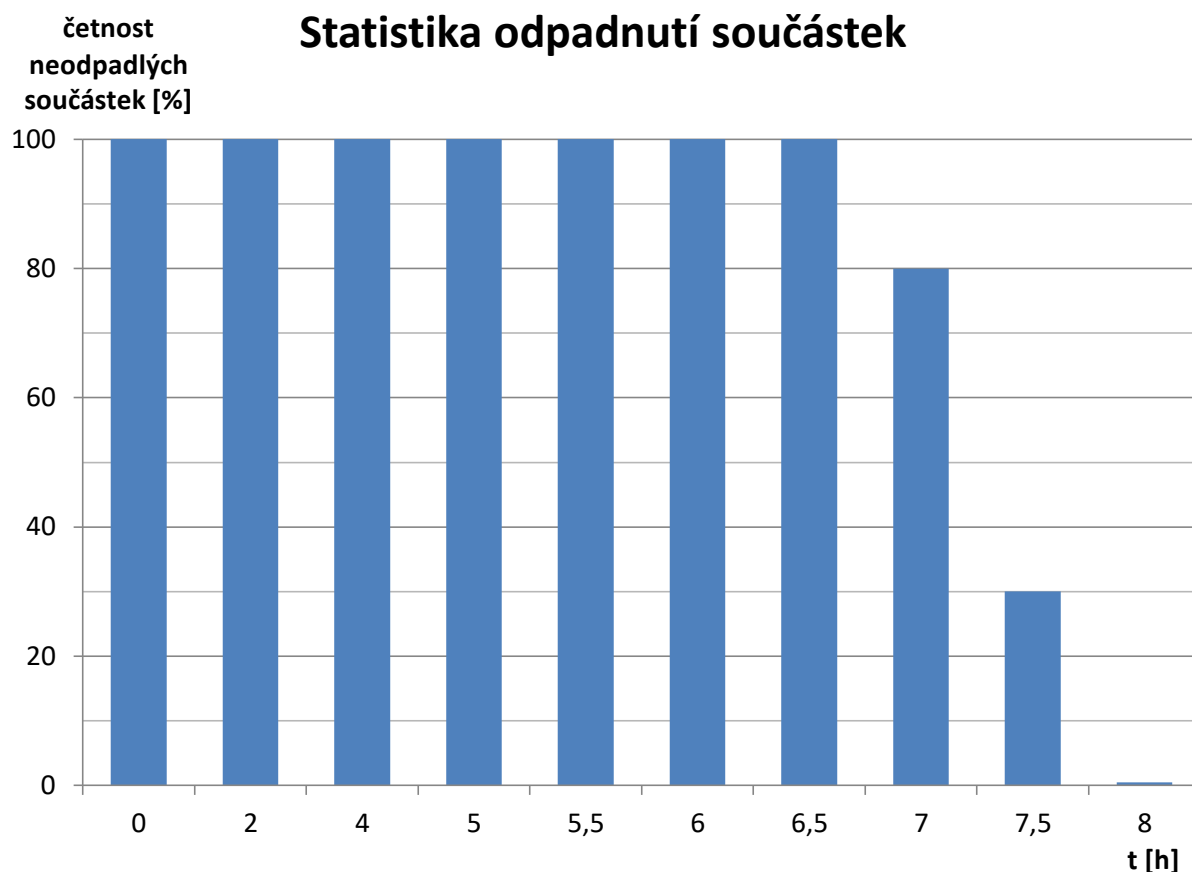
Na druhou stranu natisknutá pájecí pasta na desce podléhá degradaci, jako je například vysychání tavidla či reologických modifikátorů, mnohem snadněji. Je to dáno tím, že v sítotisku je aplikováno velké množství pájecí pasty pohromadě, takže v kontaktu s okolní atmosférou je jen určitá část této pasty. Zatímco na desku je natištěno velmi malé množství pasty, které má podobu velmi tenké vrstvy, což znamená, že v kontaktu s okolní atmosférou je v podstatě všechna pasta nanesená na kontaktu. Z těchto důvodů je tedy vhodné zjistit čas, po který může deska s nanesenou pastou stát a pasta zasychat, než dojde k jejímu přetavení v peci. Na fotce č. 45 je vlevo snímek čerstvě nanesené pasty a v pravé části snímek zaschlé pasty. Rozdíl je celkem zřetelný.



Obrázek 45: Vyschlá pájecí pasta

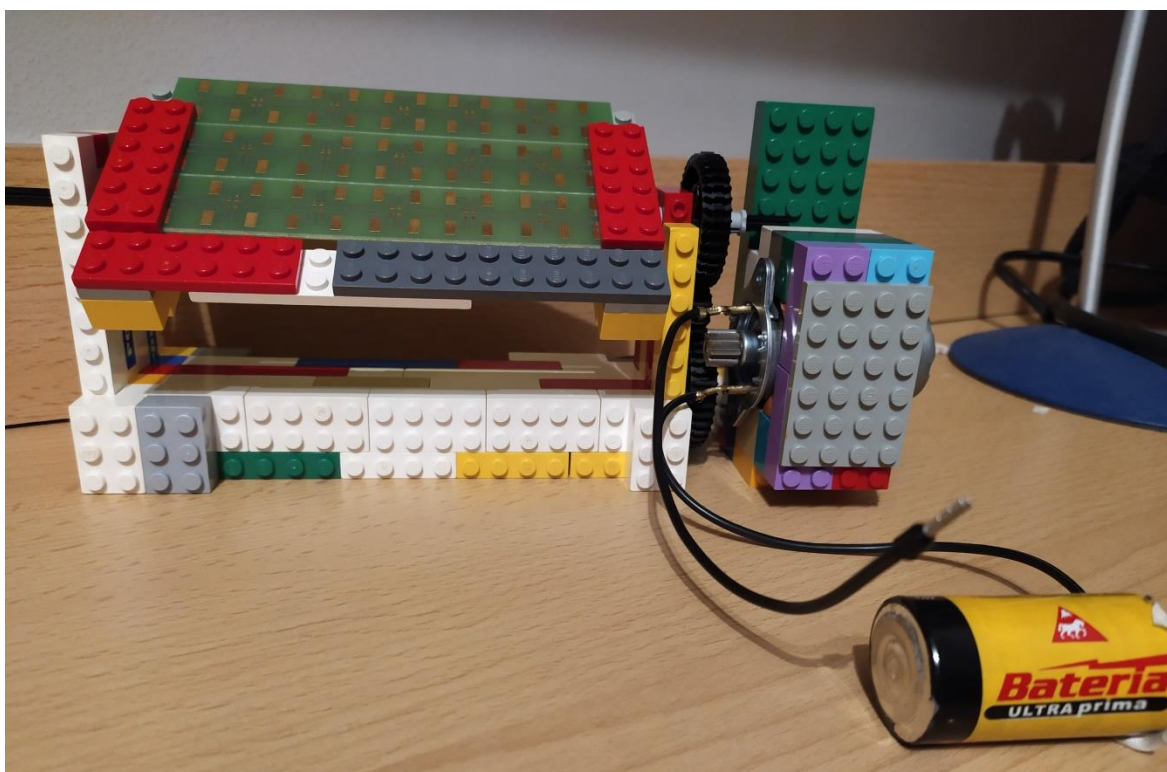
Fakt, že se součástka po osazení pomocí pájecí pasty „nepřilepí“ k desce naznačuje, že z ní některé její složky vyschly. Pokud pasta některé své složky již neobsahuje, nemůže dojít k vytvoření ideálního spoje. Tohoto tvrzení bylo využito v následujícím experimentu. Kromě toho, že bez všech složek pájecí pasty nemůže dojít k ideálnímu přetavení, by absence některých složek způsobila nepřilepení součástky k desce. Při nutné manipulaci s deskou z osazovacího automatu do pece by pak velmi pravděpodobně došlo k vychýlení osazené součástky z její pozice, což by vedlo k výrobě vadné desky.

Experiment pro zjištění bezpečné doby od nanesení pájecí pasty po její přetavení byl proveden následovně. Na experimentální desky byla natištěna pájecí pasta a následně byly odloženy stranou, kde se nechaly při teplotě 26°C ležet a pasta zasychat. Po určité době byla deska umístěna do osazovacího automatu a osazena součástkami. Následně byla deska otočena vzhůru nohama rychlostí 12,5 rad/s a bylo zkontrolováno, jestli součástky z desky odpadly, či ne. K experimentu byly použity první 3 segmenty desek B (jsou shodné). Pro každý čas 3 segmenty, tedy 30 součástek typu 0603. Výsledky tohoto experimentu jsou zobrazeny v následujícím grafu, grafu č. 4. Na ose y je vyneseno, kolik součástek neodpadlo a na ose x čas, po který se nechala deska před otestováním zasychat.



Graf 4: Statistika odpadnutí součástek

Z tohoto experimentu vyšlo, že po 6,5 hodinách zasychání pasty součástky osazené na kontakty s pájecí pastou stále na desce dostatečně pevně drží. Z toho se dá vyvodit závěr, že tavidlo z pájecí pasty po této době nevyschlo a součástka při manipulaci s deskou bude dostatečně pevně držet na své určené pozici. Po 7 hodinách zasychání však pasta nemá dostatečné vlastnosti na to, aby udržela součástky na místě jim určeném, a ty začínají odpadávat. Z desky osazené po 8 hodinách zasychání již všechny součástky odpadly. Z toho se dá předpokládat, že po 7 hodinách zasychání tavidlo z pájecí pasty do velké míry zmizí a tak by po této době již proces přetavení pájecí pasty nebyl ideální. Navíc k tomu by součástky při manipulaci s deskou mohly odpadnout a tak by se ani nepřipájely. Z tohoto důvodu doporučuji, aby byly desky přetaveny v peci nejpozději 6,5 hodiny po natisknutí pasty. S ohledem na zabránění degradace pasty, aplikované na sítotisku, doporučuji, aby se všechny desky, které mají být daný den osazeny, otiskly 6,5 hodiny před přetavením poslední z nich a pájecí pasta byla ze sítotisku sklizena a uskladněna. Na následujícím obrázku, obrázku č. 46, je zobrazeno zařízení na otáčení desek vzhůru nohama s uchycenou deskou. Zařízení je postaveno ze stavebnice lego a doplněno elektrickým motorkem, poháněným z tužkové baterie napětím 1,5 V. Zařízení se spouští přiložením volného kontaktu na kontakt baterie a otáčí se rychlostí 12,5 rad/s.

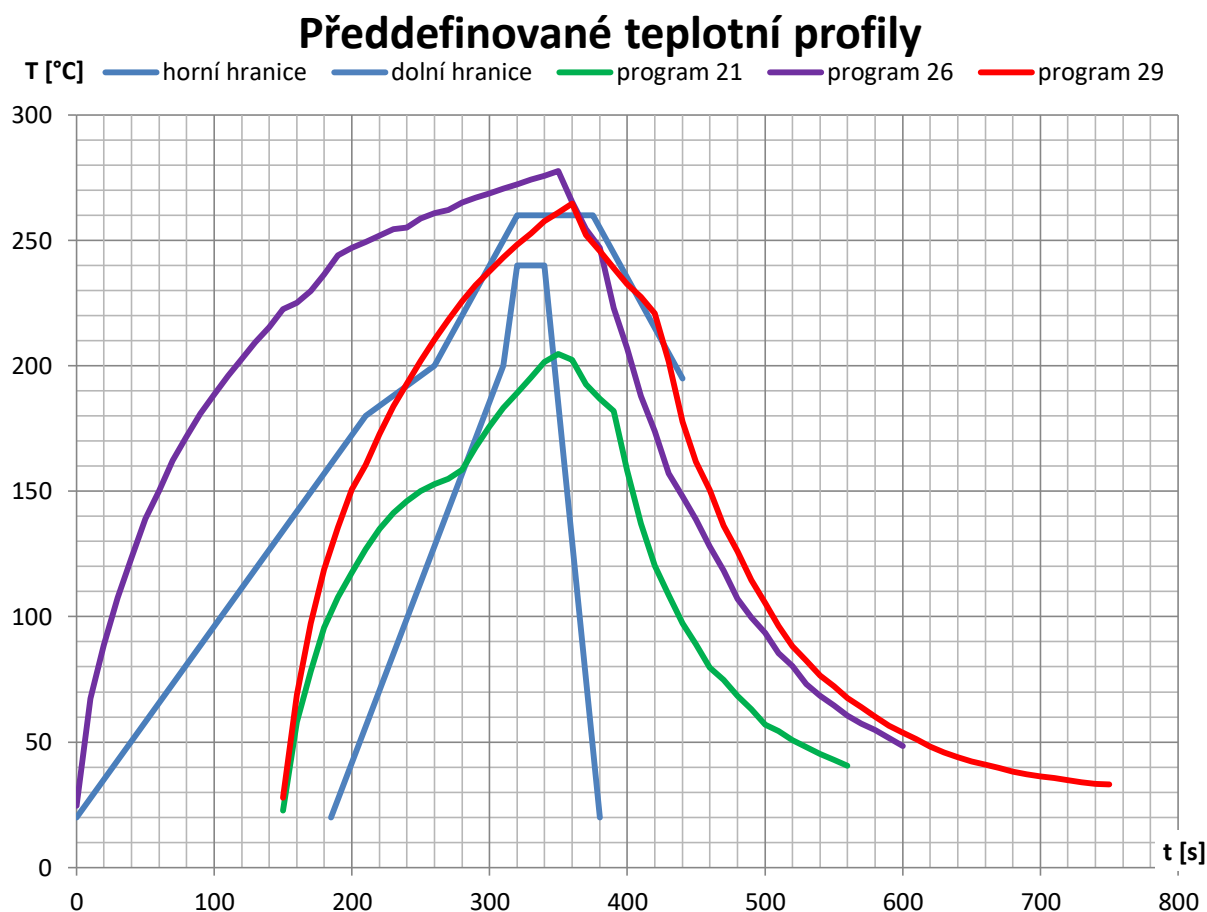


Obrázek 46: Zařízení na otáčení desek

4.7 Nastavení teplotního profilu pece

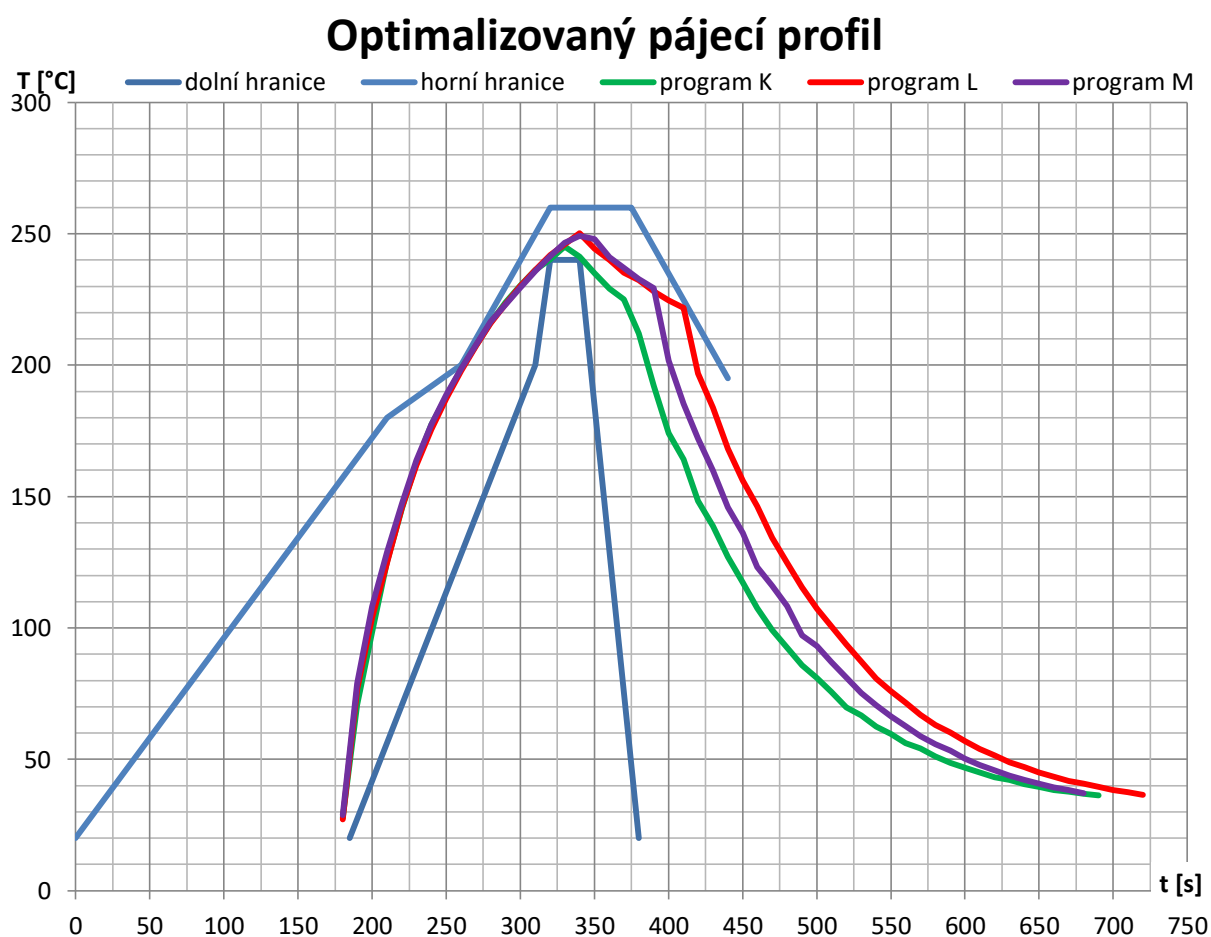
Pájecí pasta Cobar OT2 SN100C má, stejně jako všechny ostatní pájecí pasty, jasně definovaný teplotní profil, viz kapitola 2.1.7. Aby byla pasta správně přetavena a vznikl tak elektricky vodivý spoj s požadovanými mechanickými vlastnostmi, musí být vystavena určitým teplotám po určitou dobu. Závislost těchto teplot na čase představuje teplotní profil pájecí pasty. Je tedy nezbytné, aby teplotní profil pece odpovídal teplotnímu profilu pájecí pasty. Jinými slovy, pec musí být správně nastavena.

N následujícím grafu, grafu č. 5, jsou znázorněny průběhy teploty v peci odpovídající předdefinovaným programům z tabulky č. 1. (str. 39). Žádný z předdefinovaných programů pece neodpovídal požadovanému pájecímu profilu pasty, jež je v grafu ohraničen modrými křivkami. Nejblíže mu byl program č. 29, avšak ani ten není použitelný. Bylo tedy nutné pro pájecí pastu COBAR nastavit vlastní profil. Z naměřených teplotních průběhů plyne, že maximální dosažená teplota na desce zdaleka neodpovídá maximální nastavené teplotě v programu. Například u programu 26, kde je toto nejvýraznější, byla maximální teplota nastavena na 225°, ale skutečná teplota na desce dosáhla hodnoty skoro až 280 °C.



Graf 5: Předdefinované teplotní profily

Tato prototypová osazovací linka obsahuje pec RO-06 Plus od výrobce ESSEMTEC. Tato pec je pro naše potřeby dostačující, ale nepředstavuje nejlepší dostupnou technologii. Možnosti nastavení jejího teplotního profilu jsou do jisté míry značně omezené. Můžeme si sice zvolit teplotu, ale nemůžeme zvolit, jak rychle bude teplota narůstat například. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4, v peci můžeme nastavit 6 hodnot a to přehřátí pece, dvě teploty a jim odpovídající časy, po které se bude daná teplota udržovat a teplotu, při níž budou z pece desky vysunuty. Při přechodu z jedné teploty na druhou se pec snaží co nejrychleji dosáhnout požadované teploty chlazením či topením. Na následujícím grafu je zobrazen optimalizovaný profil pro pájecí pastu Cobar OT2 SN100C.

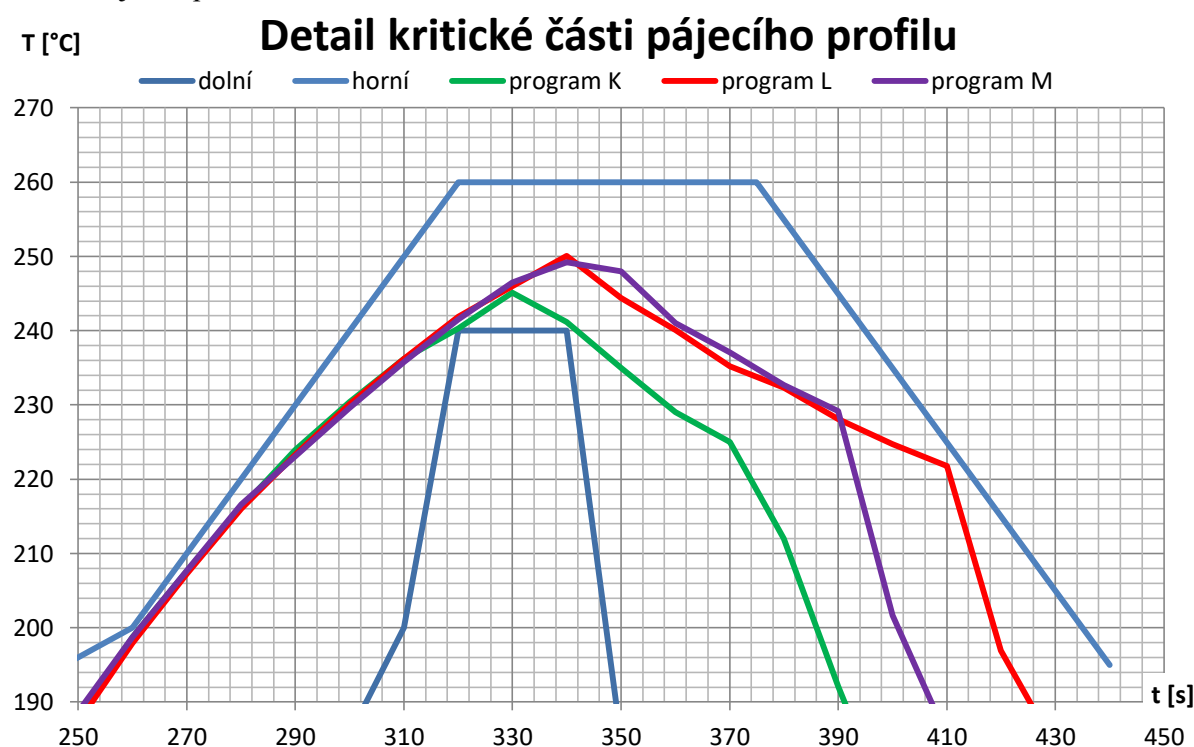


Graf 6: Optimalizovaný pájecí profil

Na grafu č. 6 je znázorněn teplotní profil pájecí pasty společně s dosaženými teplotními profily v peci. Teplotní profil pájecí pasty je znázorněn modrými křivkami „horní a dolní hranice“, skutečný teplotní profil se musí vejít mezi tyto dvě křivky. Křivky K, L a M již odpovídají dosaženým teplotním profilům v peci. Aby byly splněny požadavky na průběh teploty v čase, musí teplotní profil vypadat podobně jako profily K, L a M. Teplotní profily K a L jsou hraniční. Profil K dosahuje nejvyšší možné maximální hodnoty teploty a profil L zase nejnižší možné teploty, při níž se začne manipulovat s deskou. Před manipulací s deskou, což představuje vyjetí dopravníku

z pece, je nutno, aby byla teplota co nejnižší. Pájecí pasta totiž musí stihnout ztuhnout, než se s deskou začne hýbat. Profil M představuje střední cestu mezi profily K a L, jeho výhodou je, že se na rozdíl od dvou předchozích teplotních profilů nepřibližuje k hraničním hodnotám (ke křivkám horní a dolní).

Následující graf představuje přibližnou horní část předchozího grafu a to od teploty 190°C výše. Jak je na tomto detailu vidět, u programu M dochází k pohybu dopravníku při teplotě vyšší, než je teplota tuhnutí pájecí slitiny 227 °C. U programu M tedy hrozí pohnutí součástkou nebo vznik studeného spoje a tak je pro pájení nevhodný. Jako nejlepší varianta byl vybrán program L, protože má nižší T open a méně se přibližuje hraničním teplotního profilu, což je důležité vzhledem k následující kapitole.



Graf 7: Detail kritické části optimalizovaného pájecího profilu

V následující tabulce jsou číselně popsány teplotní profily K, L a M. Ve sloupci min je uvedena minimální požadovaná hodnota, zatímco ve sloupci max je uvedena maximální možná hodnota parametru. Zkratka TAL znamená time above liquid a zkratka FAT flux activation time. T open je teplota, při níž dojde k vyjetí roštu z pece. Program M je přeškrtnutý, neboť jeho T open je příliš vysoký.

Parametr	min	max	K	L	M
time to peak [s]	130	340	150	160	160
Peak temperature [°C]	240	260	245,1	250,1	249,2
FAT [s]	20	150	60	60	60
TAL [s]	30	120	70	100	90
T open [°C]	-	227	225	222	229,2

Tabulka 5: Optimalizované pájecí profily

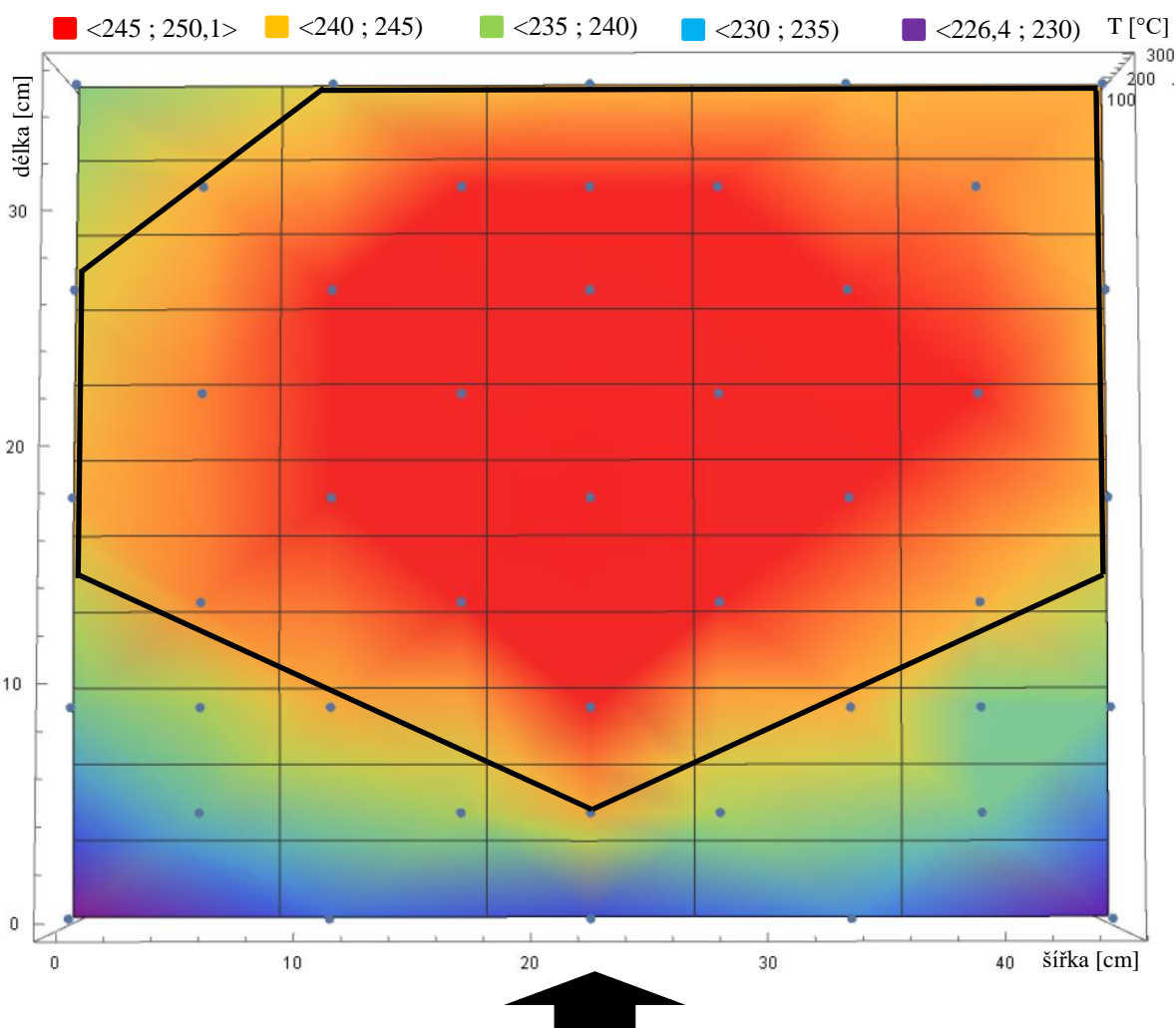
V této tabulce již jsou nastavené vstupní údaje pro jednotlivé teplotní profily K, L a M. Teplota T1 je přednastavená teplota a teplota T4 je teplota vyjetí roštu. Teploty T2 a T3 jsou v peci udržovány po dobu t2 a t3.

Program/parametr	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	t2 [s]	t3 [s]
K	220	225	235	200	1	35
M	225	230	240	200	1	35
L	225	235	240	190	1	35

Tabulka 6: Parametry nastavení pece pro optimalizované profily

4.8 Rozložení teploty v peci

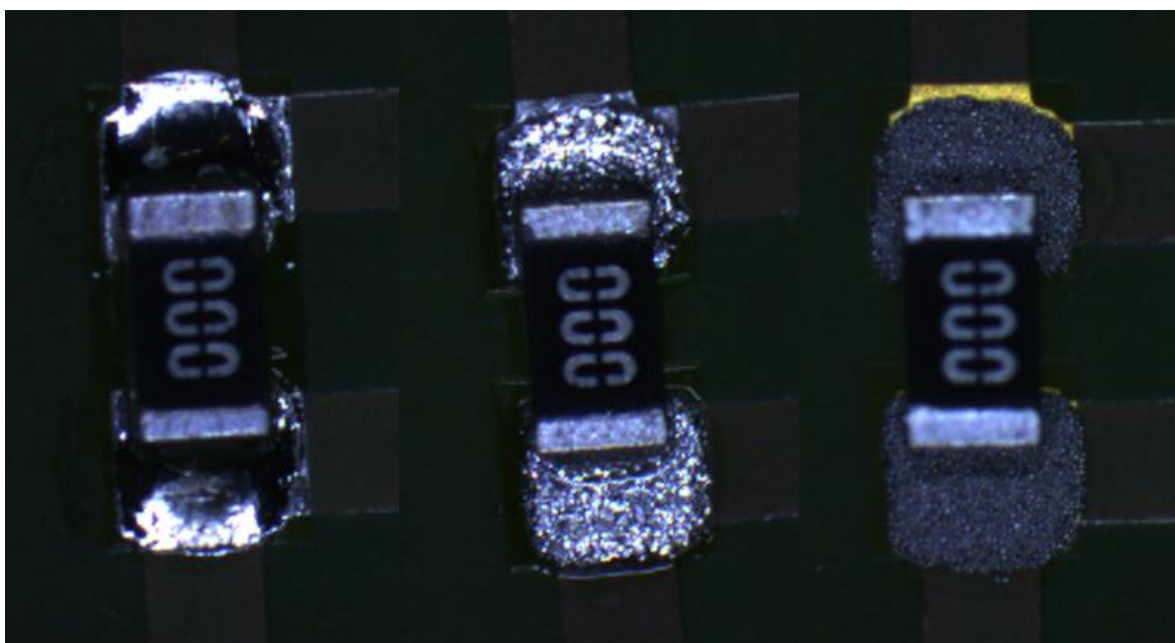
V předchozí kapitole byl optimalizován teplotní profil v peci tak, aby se shodoval s požadavky na přetavení pájecí pasty a jako výsledek vzešlo ideální nastavení pece. Průběh teplotních profilů byl měřen uprostřed pece. V této kapitole je zkoumáno, jakých hodnot dosahuje teplota v různých částech pece při použití optimalizovaného nastavení z předchozí kapitoly. Na následujícím grafu, grafu č. 8, je znázorněna Maximální dosažená teplota v peci při použití nastavení pece L. Na ose y je délka pece, na ose x šířka a na ose z maximální dosažená teplota.



Graf 8: Rozložení teploty v peci

Maximální dosažená teplota v peci byla rozdělena na pět intervalů, které jsou barevně odlišeny, mezi nimi je plynulý barevný přechod. Vhodná teplota pro přetavení pájecí pasty je znázorněna červenou a oranžovou barvou. Rošt s DPS vjíždí do pece ve směru černé šipky. Průběh teploty v peci byl měřen na 45 místech pece, které jsou v grafu vyznačeny šedými body. V grafu je dále černou křivkou vyznačena oblast, do které je vhodné při pečení desek umisťovat. Pájecí pasta Cobar SN100C OT2 se totiž správně přetaví při teplotě 240 °C a více a ve vyznačené oblasti je takovéto teploty dosaženo, mimo tuto oblast nikoliv. Pro přetavení pájecí pasty s použitím nastavení L je tedy vhodné umístit desky do středu roštu nebo více dozadu a doprava. V přední části pece se dosahuje nižší teploty nejspíše proto, že na přední stěně není tepelná izolace a je zde mezera, kudy teplo uniká, viz obrázek č. 15 (str. 37). V levém horním rohu se zase dosahuje nižší teploty nejspíše proto, že jedna z původních topných tyčí musela být vyměněna a byla nahrazena novou, která však nemá topnou spirálu po celé své délce jako ty původní, takže na svém konci již netopí. Tabulka s naměřenými hodnotami pro tento graf je uvedena v přílohách jako příloha č. 1.

Důvod, proč je nutné DPS vhodně umístit do pece, tedy do oblasti vyznačené černou křivkou, je zobrazen na obrázku č. 47. V levé části obrázku je vidět na kontaktech odporu správně přetavená pájecí pasta, tento odpor byl umístěn do vyznačené oblasti. Správně přetavená pájecí pasta tvoří lesklý, hladký povrch, který správně smáčí kontakty DPS i součástky. Pokud se DPS umístí mimo vyznačenou oblast, pasta na ní se přetaví špatně nebo se nepřetaví vůbec. Takovýto případ nastal u odporů uprostřed a vpravo. Uprostřed obrázku je vidět odpor, u kterého na pastu působila taková teplota, že se přetavila jen částečně. Povrch takto přetavené pasty je sice lesklý, avšak ne hladký a pasta špatně smáčí kontakty. V pravé části obrázku je vidět případ, kdy kontakt sice prošel pecí, ale teplota na něj působící nebyla dostatečně velká na to, aby se pasta byť částečně roztavila.



Obrázek 47 Kvalita přetavení pájecí pasty

Teplotní profily v různých částech pece mají různé průběhy, nedá se tedy říci, že v celé oblasti ohraničené černou křivkou je teplotní profil stejný, jako křivka L v grafu č. 7. Reálné průběhy teplot ve vyznačené oblasti mají ve skutečnosti průběh někde mezi křivkami L a K v grafu č. 7. Nemůžeme tedy říci, že v každém bodě vyznačené oblasti se dosahuje hodnot odpovídajících nastavení L z tabulky č. 5, ale můžeme říci, že v každé části vyznačené oblasti se dosahuje takových hodnot, že v této oblasti bude pájecí pasta Cobar SN100C OT2 správně přetavena.

4.9 Minimální velikost součástek

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3, výrobce osazovacího automatu udává, že největší osaditelné součástky jsou 40 x 40 mm. Toto omezení je dáno tím, že kamera není schopna při snímání součástky obsáhnout větší plochu a tím by tedy nebylo možno zaručit správné osazení. Nejmenší osaditelné součástky jsou typu 0201 a v nouzovém případě by šly osadit i 01005. Nejmenší součástky, se kterými bylo v této práci v rámci pokusů experimentováno, jsou typu 0201. Již součástky této velikosti představují pro osazovací automat určitý problém a při osazování je na to třeba brát zřetel. Pro správnou manipulaci s těmito součástkami je nutno přenastavit rychlost zdvihu součástky z „fast-fast“ na „slow-slow“, první slovo znamená rychlost přiblížení trysky a druhé rychlost oddálení, rychlost fast je přednastavena. Stejně tak pro umístění součástky na desku a následné oddálení trysky od součástky je nutné změnit přednastavenou rychlost z „fast-fast“ na „slow-slow“. Rychlost pohybu ramene se součástkou je také vhodné nastavit na „slow“.

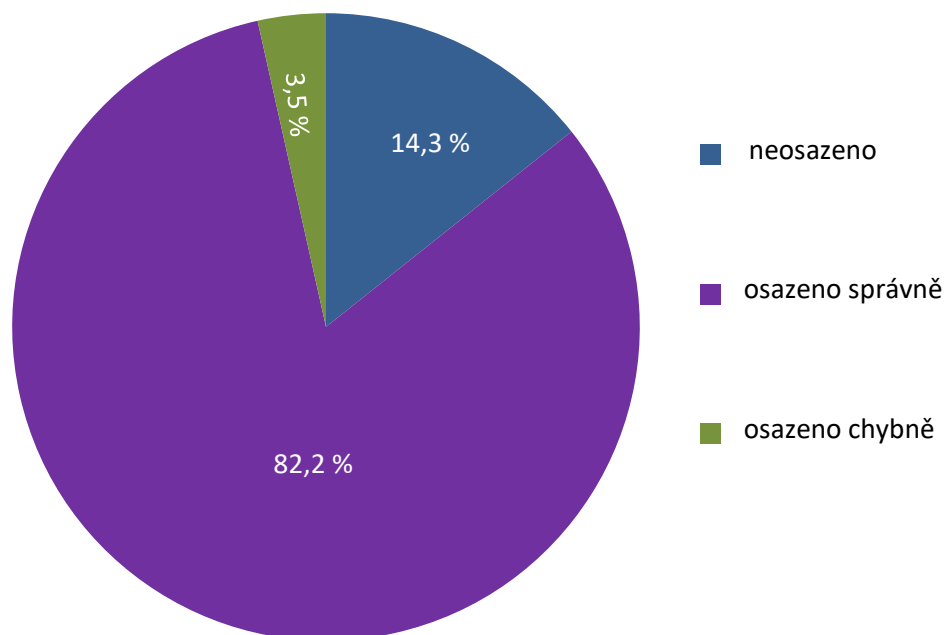
Práce se součástkami takto malých rozměrů navíc vyžaduje zvýšenou přesnost, je tedy nutno desku do osazovačky umístit opravdu přesně. V automatu je dále nutné nastavit menší toleranci odchylky natočení i posunutí uchycené součástky. Obě hodnoty je třeba nastavit alespoň na 85%. Toto je nutné vzhledem k malému množství pájecí pasty nanesené na desce. Pokud se součástka neumístí přesně na kontakty s pastou, nepřilepí se k nim a tím pádem se k desce neuchytí. V takovém případě je pak nutno například místo relativně snadného srovnání součástky součástku umístit manuálně.

Stav, že chyba nastane při přemístění součástky nad kameru, kde je zkontrolováno její uchycení nepředstavuje problém. Sice dojde ke ztrátě součástky, ale nehrozí chybné osazení součástky. Mnohem horší je, když chyba nastane při přesunu součástky od kamery na desku, protože takováto chyba již není osazovacím automatem automaticky kontrolována. Ze začátku se mnohdy stalo, že součástka nebyla na desku vůbec umístěna nebo se po osazení vyskytovala někde mimo svou pozici. Tento problém se vyřešil přenastavením výšky součástky v knihovně součástek automatu. Ukázalo se jako vhodné do knihovny nastavit výšku součástky nižší, než jaká výška je uvedena v katalogovém listu součástky. Výška součástky je udána $0,23 \pm 0,03$ mm. Jako nejlepší se však ukázalo nastavit výšku součástky na 0,01 mm. Toto je nejspíše způsobeno tím, že tryska pak

součástku více přitiskne k desce do nanesené pasty a tak součástka zůstane na daném místě i po pohybu trysky od desky. Při práci s menšími součástkami je také vhodné při zaměřování výšky povrchu desky automaticky nechat změřit její výšku v místě těchto součástek.

I přes tyto úpravy nastavení osazovacího automatu nebyly všechny součástky typu 0201 osazeny správně. V následujícím grafu je v procentech znázorněno, kolik odporů typu 0201 bylo ztraceno a kolik využito. Příklad, že chyba osazení nastane ve fázi přesunu součástky od kamery na desku, je označen jako „osazeno chybně“. Toto znamená, že je součástka buď úplně neosazena, což se stalo opravdu výjimečně, nebo osazena špatně, například nakřivo. Stav, kdy chyba nastala při přesunu součástky nad kameru je označen jako „neosazeno“, což vedlo ke ztrátě součástky. Buď se součástka ztratila úplně, nebo byla odhozena do misky k tomu určené. Takto odhozenou součástku však nemá vzhledem k jejím rozměrům, ceně a náročnosti manipulace s ní cenu zachraňovat. A takováto chyba nepředstavuje žádnou hrozbu pro správnost funkce desky na rozdíl od „osazeno chybně“. „Osazeno správně“ znamená, že součástka byla umístěna přesně na kontakty nebo jen se zanedbatelnou odchylkou a není nutno její polohu nijak upravovat.

Úspěšnost osazení odporů typu 0201



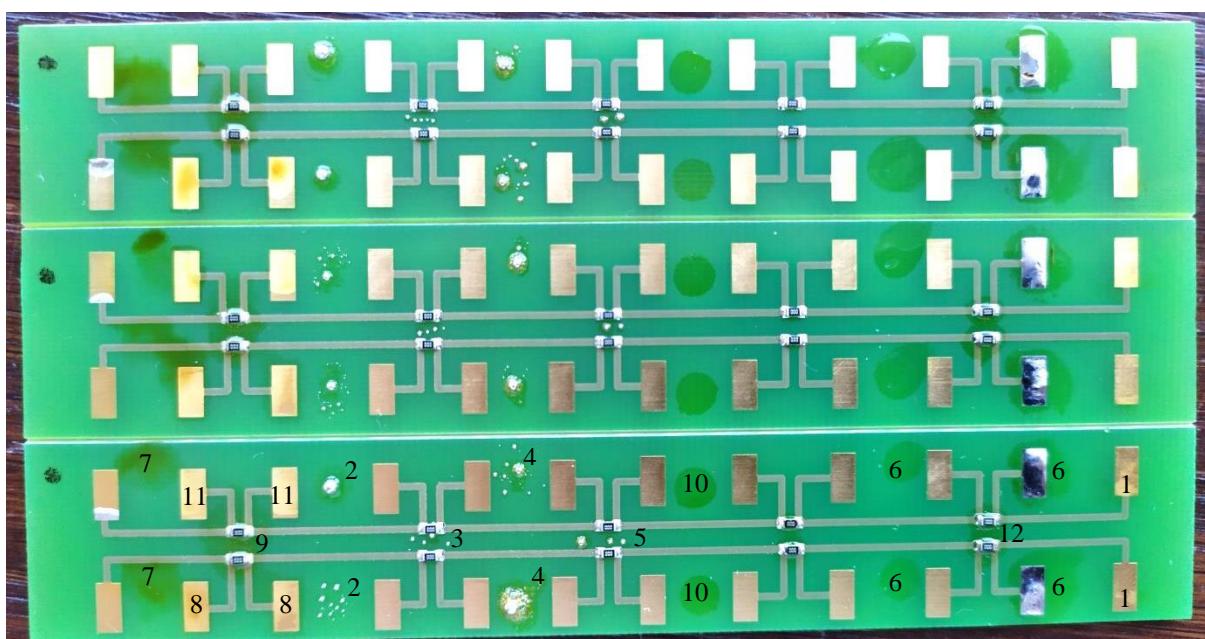
Graf 9: Úspěšnost osazení odporů 0201

Práce s takto malými součástkami není vzhledem k typu linky nutná a je určitým způsobem i neefektivní, vzhledem k náročné manipulaci s nimi, výše zmíněné ztrátě součástek, přerušování procesu osazování a času, který si tyto součástky vyžadují navíc. Proto bych doporučil spíše pracovat se součástkami velikosti 0402 a většími. U součástek typu 0402 přenastavování osazovacího automatu zmíněné v této kapitole není nutné, byly osazovány prakticky bezchybně. Navíc manipulace s nimi je snadnější. Pokud se pracuje se součástkami typu 0201, na základě

pokusů bych doporučil, aby se jich objednalo alespoň o 20 % více a tak během osazování desek nechyběly a nebylo nutno čekat na jejich dodání.

4.10 Ideální nastavení mycího procesu

Prvním krokem v procesu mytí DPS je jejich mytí v ultrazvukové myčce pomocí pracovní kapaliny. Při tomto procesu by mělo dojít k odstranění všech nečistot z DPS a jedinou nežádoucí věcí na jejím povrchu by měla být pracovní kapalina. Za účelem optimalizace mycího procesu byly vyrobeny experimentální desky, které byly znečištěny jednak procesem připájení součástek, ale také dodatečným znečištěním. Takto znečištěná deska je vidět na obrázku č. 48. Jsou to první tři segmenty z desky B. Každý segment byl znečištěn stejným způsobem, znečištění jsou vyznačena na posledním segmentu. Přičemž k pokusu bylo použito 30 segmentů (samostatných desek).



Obrázek 48: Znečištěná deska

Na každém segmentu je 14 různých znečištění, detailní fotky každého znečištění jsou v přílohách číslo 8 až 19. Znečištění jsou uvedena v následujícím seznamu.

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. Otisk na kontaktu | 8. Tavidlo 1 na kontaktu |
| 2. Pájecí pasta 1 na desce volně | 9. Tavidlo 1 mezi a kolem odporu |
| 3. Pájecí pasta 1 na desce mezi odpory | 10. Tavidlo 2 na desce |
| 4. Pájecí pasta 2 na desce volně | 11. Tavidlo 2 na kontaktu |
| 5. Pájecí pasta 2 mezi odpory | 12. Tavidlo 2 mezi a kolem odporu |
| 6. Znečištění po ručním pájení bez tavidla | 13. Tavidlo 1 pod odporem |
| 7. Tavidlo 1 na desce | 14. Tavidlo 2 pod odporem |

Jako pájecí pasta 1 je označená pájecí pasta Cobar SN100C OT 2, pro ruční pájení byl použit pájecí drát SN 10 a jako pájecí pasta 2 pasta Alpha Om 5100. Jako tavidlo 1 bylo použito tavidlo CHIPQUIK SMD291NL a jako tavidlo 2 tavidlo NTS SBG E.

Na ultrazvukové myčce jde nastavit tři parametry mycího procesu a to dobu mytí, kterou lze nastavit v rozmezí 30 vteřin až 30 minut. Dále teplotu pracovní kapaliny, vhodná teplota kapaliny HYDRON SSE 220 je výrobcem stanovena jako 40 až 60°C. Jako poslední parametr mytí jde nastavit výkon myčky a to v rozmezí 50 až 99%, výkon lze měnit po 5%. V těchto rozmezích byly měněny parametry mycího procesu, přičemž bylo hledáno jeho ideální nastavení. Jako ideální nastavení mycího procesu je považováno takové nastavení, při kterém dojde k úplnému odstranění všech 14 výše zmíněných znečištění. Kontrola odstranění znečištění byla prováděna opticky pomocí mikroskopu Mantis a to po umytí pracovní kapaliny a vysušení desky.

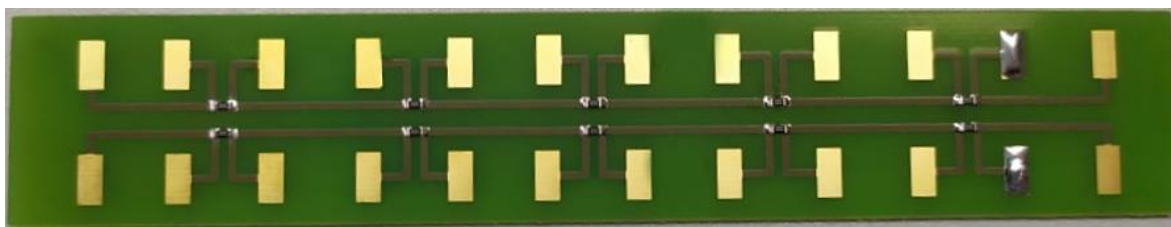
Vizuální kontrola představuje základní a nejjednodušší způsob kontroly, avšak neposkytuje žádné kvantitativní výsledky. Navíc některá iontová kontaminace není optickou kontrolou zjištělná. Z tohoto důvodu by bylo v případě potřeby možné očištěné desky (ideálním mycím programem) poslat do nějaké specializované laboratoře, kde by mohly být otestovány nějakým jiným způsobem, například metodou ROSE (Resistivity of solvent extract) nebo SIR (Surface Insulation resistance). Takovéto způsoby kontroly jsou však časově náročné (trvají až měsíc), vyžadují speciální zařízení, odborný personál a navíc jsou dosti drahé. Z těchto důvodů je v této práci kontrola kvality mycího procesu vyhodnocena optickou metodou, která je pro účely optimalizace této prototypové linky plně dostačující. [20]

V následující tabulce, tabulce č. 7, jsou uvedeny 2 typy nastavení parametrů mycího procesu, při nichž došlo k úplnému odstranění všech 14 typů znečištění. Jedná se tedy o ideální mycí procesy, přičemž proces A je méně intenzivní, ale trvá delší dobu a proces B je více intenzivní, ale za to časově méně náročný.

Proces/parametr	Výkon [%]	Čas [min]	Teplota [°C]
Proces A	70	10	50
Proces B	85	5	60

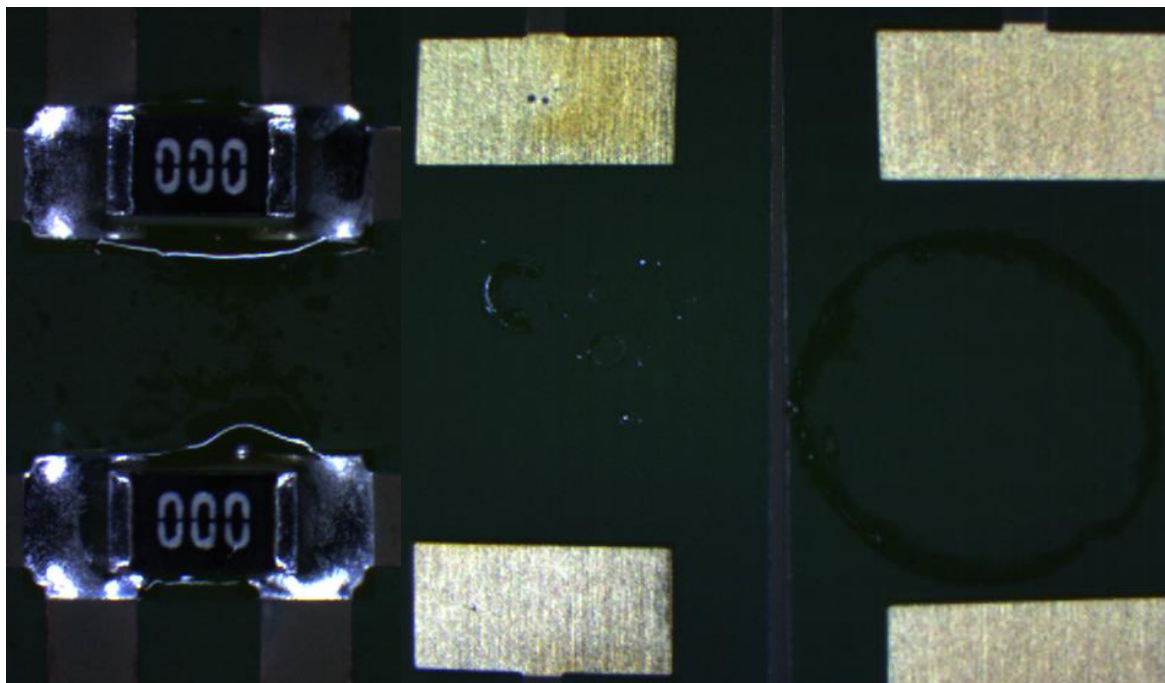
Tabulka 7: Parametry optimalizovaných mycích procesů

Na následujícím obrázku je zobrazena experimentální deska, která prošla mycím procesem A. Deska umytá procesem B vypadá stejně.



Obrázek 49: Umytá deska

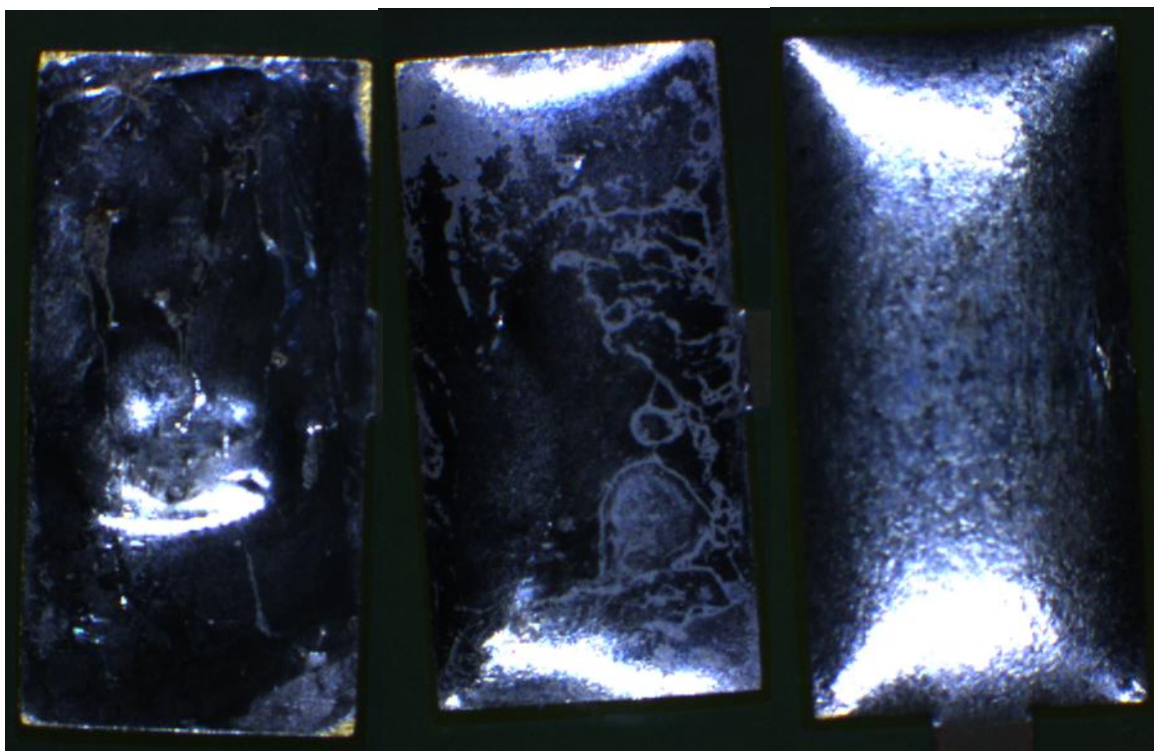
Na následujícím obrázku je ukázka špatně umyté desky. V levé části je zachyceno špatně umyté tavidlo 1 mezi odpory, v pravé části špatně umyté tavidlo 2 volně na desce. Uprostřed obrázku zbytky po pastě 1 aplikované volně na desku a tavidlo 1 na horním kontaktu. Jako příloha č. 2 je uvedena tabulka s různými programy mytí a jejich výsledky.



Obrázek 50: Ukázka špatně umyté desky

4.11 Vliv oplachu na kvalitu spoje

Jak bylo popsáno v kapitole 2.4, mytí DPS ultrazvukovou myčkou využívá k odstranění nečistot kavitaci, která narušuje povrch nečistot, čímž je z desky odstraňuje. Kavítace však působí na vše, co je na povrchu desky, včetně jí samé, takže by mohlo dojít i k narušení povrchu samotného pájeného spoje. Z tohoto důvodu je v této kapitole zkoumán vliv mycího procesu na kvalitu spoje. Konkrétně vliv na jeho mechanické a elektrické vlastnosti. K tomuto jsou použity měřicí přístroje z kapitol 4.1.3 a 4.1.4. Na obrázku č. 51 je vidět vliv kavitačního čištění na přetavenou pájecí slitinu. V levé části je pájecí slitina před procesem čištění, uprostřed po méně intenzivním čištění a napravo po více intenzivním čištění. Jak je z obrázku zřejmé, kavítace povrch pájecí slitiny ovlivňuje a proto je důležité ověřit, že proces mytí negativně neovlivní kvalitu vyrobených spojů.



Obrázek 51: Vliv kavitačního čištění na pájecí slitinu

Experiment probíhal tak, že po vyrobení experimentálních desek byl změřen odpor k nim připevněných nulových odporů. Změřená hodnota odporu se skládá z odporů dvou pájených spojů a vlastního odporu nulového odporu, který by měl teoreticky být nula. Ve skutečnosti však i nulové odpory určitý odpor mají. Odpory, zejména typu 0201, jsou ovšem tak malé, že jejich skutečný odpor nešlo změřit. Následně byla deska umyta a znovu byl změřen odpor připevněného nulového odporu. Průměry těchto dvou hodnot jsou pro různé mycí procesy porovnány v následující tabulce. Pokud by proces mytí pájené spoje poškozoval, projevovalo by se to mimo jiné i nárůstem jejich odporu. K experimentu byly použity desky typu A, na které jsou připevněny 3 typy odporů.

Parametry programu	Výkon [%]	nemyto	70	70	85	90	99	99
	délka [min]		10	15	5	10	15	30
	teplota [°C]		50	50	60	60	60	60
R0603	před mytím [mΩ]	12,1	12,3	11,9	12,1	11,8	12,1	12,3
	po mytí [mΩ]	-	12,2	12,1	12,3	11,6	12,0	12,6
	změna [mΩ]	-	-0,1	0,2	0,2	-0,2	-0,1	0,3
	změna [%]	-	-1,1	1,0	2,2	-1,8	-1,5	2,2
R0402	před mytím [mΩ]	35,2	33,5	31,8	33,1	33,7	34,5	33,8
	po mytí [mΩ]	-	32,8	32,3	33,3	33,1	34,6	33,8
	změna [mΩ]	-	-0,7	0,5	0,2	-0,6	0,1	0,0
	změna [%]	-	-2,1	1,5	0,8	-1,9	0,3	0,0
R0201	před mytím [mΩ]	34,1	31,8	30,7	32,7	32,8	32,5	32,3
	po mytí [mΩ]	-	31,6	31,2	33,3	33,2	32,4	33,0
	změna [mΩ]	-	-0,2	0,5	0,6	0,4	-0,1	0,7
	změna [%]	-	-0,5	1,4	1,9	1,3	-0,3	2,3

Tabulka 8: Změna elektrických vlastností spojů v důsledku mytí

Z tohoto experimentu vyplynulo, že proces mytí nemá na elektrické vlastnosti pájených spojů negativní vliv a to při použití optimalizovaných nastavení mycího procesu, ani při použití podstatně intenzivnějších nastavení. Optimalizované mycí profily jsou v tabulce znázorněny tučným písmem. Změna elektrického odporu před a po mytí vyšla maximálně jako 2,3% pro všechny typy odporů a to i ty nejmenší, na jejichž připevnění se používá nejmenší množství pájecí pasty a které by tedy měly být nejvíce náchylné. Velikost odporu se tedy před a po mytí částečně lišila, avšak výsledky ukazují, že někdy byl odpor menší před mytím a jindy po mytí. Změna naměřených hodnot je tedy nejspíše dána určitou nepřesností měření, kdy hodnota odporu nebyla změřena úplně přesně. Nicméně z experimentu plyne, že mytí pájených spojů nemá žádný negativní vliv na jejich elektrické vlastnosti, a i kdyby nějaký negativní vliv mělo, tak velmi malý a zanedbatelný. Naměřená hodnota žádného odporu se v důsledku mytí totiž nijak drasticky nezměnila.

Jako další byl zkoumán vliv mycího procesu na mechanické vlastnosti pájených spojů. Protože měření mechanických vlastností je destruktivní, nebylo možné změřit vlastnosti spojů na desce před a po měření. Byla tedy vyčleněna jedna deska, která neprošla procesem mytí a na ní byla změřena minimální síla potřebná k odtržení odporu. Hodnota této síly je brána jako referenční hodnota, se kterou jsou porovnávány hodnoty odporů na deskách, které prošly různými procesy mytí. Výsledky tohoto experimentu jsou znázorněny v tabulce č. 9. Pro každý typ odporů a jednotlivé nastavení mycího procesu je v ní uvedena průměrná hodnota síly potřebné k odtržení odporu a její změna v porovnání s referenční hodnotou. Tučným písmem jsou v ní zvýrazněny optimalizované mycí procesy, ostatní zkoušené mycí procesy byly intenzivnější, než ty optimalizované.

Parametry programu / typ součástky	Výkon [%]	-	70	70	85	90	99	99
	délka [min]	-	10	15	5	10	15	30
	teplota [°C]	-	50	50	60	60	60	60
R0603	průměrná F [N]	31,928	30,072	27,996	32,964	29,658	27,169	32,467
	změna [%]	-	-5,8	-12,3	3,2	-7,1	-14,9	1,7
R0402	průměrná F [N]	18,716	20,556	19,051	17,094	17,622	19,232	17,444
	změna [%]	-	9,8	1,8	-8,7	-5,8	2,8	-6,8
R0201	průměrná F [N]	5,934	6,616	5,682	5,702	6,539	5,418	5,545
	změna [%]	-	11,5	-4,2	-3,9	10,2	-8,7	-6,6

Tabulka 9: Změna mechanických vlastností spojů v důsledku mytí

Zmenšení síly potřebné k odtržení odporu z desky indikuje zhoršení mechanických vlastností a naopak zvětšení této síly jejich zlepšení. Z naměřených hodnot vyšlo, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami síly pro desku nemytou a desky myté se pohybuje v rozmezí od -14,9 do 11,5%. Protože experiment neukázal žádnou drastickou změnu hodnot (maximálně 15%) a protože v mnohých případech šlo o změnu k lepšímu, dá se z něho vyvodit závěr, že rozdíl mezi

referenčními hodnotami z nemyté desky a hodnotami získanými z umyté desky je způsoben tím, že tento typ zkoušky je destruktivní a tak se porovnávají dva trochu odlišné vzorky. Výsledkem tohoto experimentu tedy je, že mytí DPS pomocí optimalizovaných nastavení mycího procesu, stejně tak jako pomocí intenzivnějších nastavení nemá na mechanické vlastnosti vytvořených spojů negativní vliv a i kdyby měl, tak jen velmi malý.

Vyrobené DPS, přesněji spoje na nich vytvořené, prošly optimalizovanými i mnohem intenzivnějšími nastaveními mycího procesu, přičemž jejich mechanické ani elektrické vlastnosti se nijak výrazně nezměnily, nezhoršily. Z této kapitoly tedy plyne, že mytí DPS z jejího povrchu odstraní nečistoty, avšak samostatné pájené spoje nepoškodí.

4.12 Výměna pracovní kapaliny

Při mytí DPS dochází k postupné kontaminaci pracovní kapaliny, což vede ke změnám jejích vlastností. Její vlastnosti navíc také ovlivňují vedlejší jevy, jako jsou odpařování nebo její rozptyl. Mytí pomocí degradované kapaliny může mít negativní dopad na konečný výsledek mytí. Z tohoto důvodu je vhodné před mytím zkontrolovat stav pracovní kapaliny a při určité míře jejího znečištění ji vyměnit. Výměnou pracovní kapaliny ve správnou dobu se tedy dosáhne jednak konzistentního procesu čištění a to vždy se stejně dobrým výsledkem, ale také snížení nákladů na pracovní kapalinu, protože se tím vyhneme její příliš časté výměně. [9][11]

Existují dvě nejefektivnější a nejpraktičtější metody měření vlastností kapaliny, ze kterých se dá její degradace odvodit. Těmito metodami jsou měření hodnoty pH a vodivosti. Tavidla obsažená v pájecí pastě obsahují například organické kyseliny, které snižují pH pracovní kapaliny. Čím více je tedy pracovní kapaliny znečištěná, tím více se mění její pH. Nevýhodou této metody je, že ji nelze použít u čisticích prostředků s neutrálním pH, mezi které patří i naše kapalina HYDRON SSE 220. Pro určení znečištění naší kapaliny je tedy vhodné použít druhou metodu a to měření vodivosti. V důsledku rozpuštěné kontaminace v pracovní kapalině narůstá počet iontů. Vodivost představuje součet iontů v pracovní kapalině. K výměně kapaliny HYDRON SE 220 je doporučeno přistoupit, když se její vodivost změní přibližně o 10%. [9][11]

Vodivost se měří pomocí konduktometrů. Pro optimalizaci doby výměny pracovní kapaliny je tedy vhodné pořídit konduktometr. V současnosti je na trhu velká nabídka konduktometrů, které se od sebe liší cenou i kvalitou. Jako plně dostačující konduktometr byl vybrán konduktometr ADWA AD31, který odpovídá požadavkům na rozlišení měření 0,01mS/cm i rozsahem měření konduktivity 0,00 - 20,00 mS/cm. Měření nemusí dosahovat vysoké přesnosti a dá se považovat za orientační, z tohoto důvodu je poměr jeho ceny a výkonu ideální. Jeho cena se pohybuje kolem 1300 Kč. Tento konduktometr je zachycen na obrázku č. 52.



Obrázek 52: Konduktometr ADWA AD31

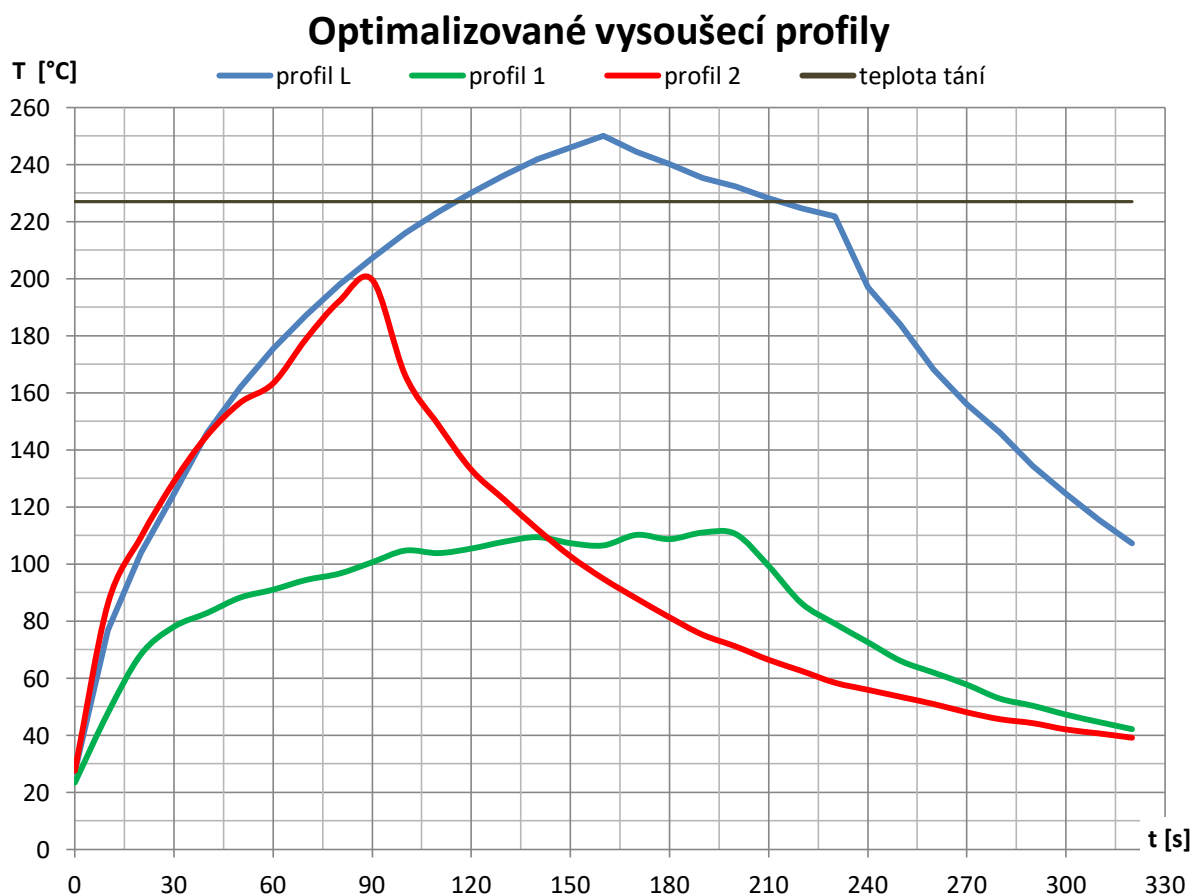
4.13 Vysušení v peci

Po umytí DPS v ultrazvukové myčce je z DPS pomocí pitné vody a následně demineralizované vody z desky omyta pracovní kapalina a desku je nutno vysušit. V první fázi sušení je deska ofouknuta stlačeným dusíkem, viz kapitola 3.6. Všechny tyto kroky se provádí manuálně a tak je nelze nijak optimalizovat, v kapitole 3.6 je naznačen správný postup. Druhá fáze vysušení desky probíhá vložení desky do pece, kde na desku působí zvýšená teplota a tak dojde k odpaření zbylé vlhkosti z jejího povrchu.

V následujícím experimentu byly umyté pokusné desky z kapitoly 4.10 vkládány do pece, u níž se hledal optimální vysoušecí teplotní profil. Ideální vysoušecí profil je takový profil, při kterém se z DPS odstraní veškerá vlhkost a to například i zpod součástek, zároveň je teplota působící na desku dostatečně nízká na to, aby nedošlo k roztavení pájecí pasty a doba působení vysoké teploty na desku byla co nejkratší. Kvalita vysušení zbylé vlhkosti byla kontrolována opticky pomocí mikroskopu Mantis.

V následujícím grafu jsou uvedeny průběhy dvou vysoušecích profilů, 1 a 2, a pro srovnání i přetavovacího programu L. Oba vysoušecí profily splňují požadavky na ideální vysoušecí profil. Profil 1 je vhodné použít v případě, kdy pec není střídavě používána na přetavení pájecí pasty a vysoušení. Tento profil pracuje s nižšími teplotami, a tedy méně namáhá DPS. Profil 2 je vhodné použít, když se pec střídavě používá k přetavení pájecí pasty a vysoušení desek. S tímto vysoušecím programem dochází k menším změnám teploty v peci oproti procesu přetavení a tak se pec nemusí zbytečně chladit a zahřívat. Přetavovací program L začíná na 225 °C a vysoušecí program 1 na 50 °C. Přechod pece mezi těmito teplotami trvá přibližně 15 minut a to oběma směry. Vysoušecí program 2 začíná i končí na 200 °C, takže změna teploty mezi ním a programem L je podstatně menší. Přechod pece z 225 na 200 °C trvá 2,5 minuty. Použití programu 2 při střídavém provozu pece tedy ušetří mnoho času i energie a samotná pec je méně namáhána. Cenou za toto je

ovšem větší tepelné namáhání vyráběné DPS. Takovému namáhání by ovšem vyrobené DPS nemělo nijak vadit.



Graf 10: Optimalizované vysoušecí profily

V následující tabulce jsou uvedeny parametry nastavení pece obou optimalizovaných vysoušecích programů a programu L. Teplota T1 je přednastavená teplota a teplota T4 teplota vyjetí roštu. Teploty T2 a T3 jsou v peci udržovány po dobu t2 a t3.

Program/parametr	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	t2 [s]	t3 [s]
1	50	75	100	90	60	120
2	200	185	200	200	50	1
L	225	235	240	190	1	35

Tabulka 10: Parametry optimalizovaných vysoušecích programů

5 Závěr

Cílem této práce bylo optimalizovat procesy prototypové osazovací linky za účelem minimalizace chybovosti výroby. Zpracování bylo koncipováno do tří částí. V první části byla vypracována rešerše problematiky výroby DPS, vztahená k této lince. Tato část představuje teoretický základ, ze kterého se ve zbytku práce vychází. Je zde popsán princip pájení, princip kavitačního mytí a jiná s nimi související problematika. Druhá část byla věnována popisu výroby DPS na této lince a analýze jejich jednotlivých zařízení. Dále se zde pro každé zařízení identifikovala potenciální rizika výroby. Na základě těchto rizik byly navrženy a provedeny experimenty za účelem optimalizace jednotlivých procesů výroby. Ve třetí části jsou popsány experimentální desky, navržené pro tuto práci, a uvedeny experimenty i se svými výsledky.

Jak je zmíněno v úvodu, bylo nutné přejít na výrobu s novým typem pájecí pasty. Jako ideální pasta pro výrobu na této lince byla vybrána pasta Cobar OT2 SN100C, pro niž byly následně optimalizovány výrobní procesy. Osazovací linka se skládá ze čtyř zařízení. Prvním z nich je sítotisk. V rámci sítotisku byly provedeny experimenty k určení minimální a maximální vhodné velikosti otvorů v šabloně a k určení ideálních parametrů procesu tisku pasty. Experimenty ukázaly, že minimální velikost ok v šabloně není sítotiskem limitována a určily jejich maximální vhodnou velikost. Ideální počet přejezdů stěrkou byl stanoven na dva, jednou tam a zpět. Dále byl pro různé případy stanoven vhodný přítlak stěrky a také se ukázalo, že rychlost pohybu stěrkou nelze přesně nastavit, avšak rychlost jejího pohybu nemá na kvalitu tisku příliš velký vliv. Také byla určena minimální vhodná vzdálenost kontaktů na DPS zaručující, že nedojde k jejich propojení. Jako poslední parametr sítotisku byla určena bezpečná doba od nanesení pasty po její přetavení. Druhým zařízením této linky je pec. V práci bylo určeno optimální nastavení pece pro správné přetavení vybrané pájecí pasty. Dále bylo pro toto nastavení zkoumáno rozložení teploty v peci, na základě čehož se určila oblast, do které mají být DPS umísťovány. Nakonec byly pro pec určeny dva vhodné vysoušecí programy DPS po mytí. Jeden z nich je vhodný, pokud se pec používá pouze k vysoušení a druhý pokud se pec střídavě používá pro přetavování a vysoušení. Třetím zařízením linky je osazovací automat. Z práce s osazovacím automatem této linky bylo zjištěno, že je vhodné pracovat se součástkami o velikosti pouzdra alespoň 0402 nebo většími. V opačném případě je nezbytné způsobem uvedeným v práci upravit parametry osazování a i tak počítat s určitou ztrátou osazovaných součástek. Čtvrtým zařízením této linky je myčka DPS. Mytí DPS je z části automatizované a z části manuální. V práci jsou uvedeny optimalizované mycí programy a ideální postup, jak správně postupovat při manuální části mytí. Dále bylo experimentálně ověřeno, že proces mytí negativně neovlivní kvalitu vytvořených vodivých spojů a to po elektrické ani mechanické stránce. Nakonec byla vybrána metoda určení vhodné doby

výměny pracovní kapaliny v myčce DPS. Jako nejlepší způsob se ukázalo měřit vodivost kapaliny pomocí konduktometru ADWA AD31 a při určité změně vodivosti ji vyměnit.

Na základě těchto experimentů bylo možno optimalizovat jednotlivé procesy výrobní linky. Pokud budou dodrženy postupy výroby, ovládání zařízení a jednotlivá jejich nastavení uvedená v této práci, bude na této prototypové osazovací lince DPS zajištěna minimální chybovost výroby DPS, což představuje hlavní cíl této práce.

6 Seznamy obrázků, tabulek a grafů

6.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura pájecí pasty	12
Obrázek 2: pájecí profil pasty Cobar SN100C OT2	16
Obrázek 3: Úhel smáčivosti	17
Obrázek 4: Součástky THT	19
Obrázek 5: Součástky SMD	19
Obrázek 6: Deska osazená SMD i THT	20
Obrázek 7 Schéma prototypové osazovací linky	23
Obrázek 8: Testovací stanice.....	24
Obrázek 9: Princip sítotisku	25
Obrázek 10: Schéma sítotisku s popisem [7].....	26
Obrázek 11: Sítotisk s napnutou šablonou	27
Obrázek 12: Nastavení přítlaku vedené stěrky sítotisku	28
Obrázek 13: Pracovní komora osazovacího automatu	32
Obrázek 14: Osazovací automat	34
Obrázek 15: Pec RO06Plus	37
Obrázek 16: Rozložení křemenných tyčí v topné zóně [5].....	38
Obrázek 17: Manuální pájení [21].....	42
Obrázek 18: Pájecí stanice JBC.....	43
Obrázek 19: Myčka DPS.....	45
Obrázek 20: Mycí kapalina HYDRON SE 220	48
Obrázek 21: Lupa.....	50
Obrázek 22: Multimetr ELMA 6800.....	52
Obrázek 23: Mikroskop MANTIS	53
Obrázek 24: KEITHLEY 2000 MULTIMETR	54
Obrázek 25: čtyřbodová metoda.....	55
Obrázek 26: Průběh síly při měření mechanických vlastností spoje.....	55
Obrázek 27: Trhačka	56
Obrázek 28: Deska A	57
Obrázek 29: Deska B	59
Obrázek 30: Pájecí pasta Cobar SN100C OT2.....	60
Obrázek 31: Část experimentální desky B určená k optimalizaci velikosti ok v šabloně ...	62

Obrázek 32: Detail pravého rohu obrázku č. 31	62
Obrázek 33: Správně nanesená pájecí pasta	63
Obrázek 34: Vady tisku pájecí pasty	64
Obrázek 35: Vybagrování pájecí pasty	64
Obrázek 36: Dodatečné nanesení pasty	66
Obrázek 37: Minimální velikost kontaktů	67
Obrázek 38: Vliv přítlaku stěrky	69
Obrázek 39: Vliv manipulace stěrkou	70
Obrázek 40: Detail segmentu desky B pro určení minimální vzdálenosti kontaktů.....	72
Obrázek 41: Kontakty propojené pájecí pastou	73
Obrázek 42: Kontakty pro pouzdra typu 0201 propojené pájecí pastou	75
Obrázek 43: Vliv přítlaku stěrky a počtu jejích přejezdů na minimální vzdálenost.....	75
Obrázek 44: Minimální vzdálenost kontaktů po přetavení	76
Obrázek 45: Vyschlá pájecí pasta	77
Obrázek 46: Zařízení na otáčení desek	79
Obrázek 47 Kvalita přetavení pájecí pasty	84
Obrázek 48: Znečištěná deska	87
Obrázek 49: Umytá deska	88
Obrázek 50: Ukázka špatně umyté desky	89
Obrázek 51: Vliv kavitačního čištění na pájecí slitinu	90
Obrázek 52: Konduktometr ADWA AD31	93

6.2 Seznam grafů

Graf 1: Maximální velikost kontaktů	65
Graf 2: Nastavení přítlaku stěrky	68
Graf 3: Vyhodnocení minimální vzdálenosti kontaktů.....	74
Graf 4: Statistika odpadnutí součástek	78
Graf 5: Předdefinované teplotní profily.....	80
Graf 6: Optimalizovaný pájecí profil	81
Graf 7: Detail kritické části optimalizovaného pájecího profilu	82
Graf 8: Rozložení teploty v peci.....	83
Graf 9: Úspěšnost osazení odporů 0201	86
Graf 10: Optimalizované vysoušecí profily.....	94

6.3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Předdefinované programy [5].....	39
Tabulka 2: Pouzdra SMD součástek [13].....	58
Tabulka 3: Rozměry kontaktů na desce.....	62
Tabulka 4: Vertikální vzdálenost kontaktů na desce B.....	71
Tabulka 5: Optimalizované pájecí profily.....	82
Tabulka 6: Parametry nastavení pece pro optimalizované profily.....	83
Tabulka 7: Parametry optimalizovaných mycích procesů.....	88
Tabulka 8: Změna elektrických vlastností spojů v důsledku mytí.....	90
Tabulka 9: Změna mechanických vlastností spojů v důsledku mytí.....	91
Tabulka 10: Parametry optimalizovaných vysoušecích programů.....	94

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Suganuma, K.: Lead-free soldering in electronics. Marcel Dekker, Inc., 2004, eBook ISBN 9780824741020
- [3] Abel, M.: SMT technologie povrchové montáže. 1. Vyd. Pardubice: Platan, 2000, ISBN: 80-902733-1-9.
- [4] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.
- [5] Essemtec, RO-06 Plus Convection Reflow Oven, Installation/Operating/Maintenance Manual, 2014. Dostupné z: <https://www.murraypercival.com/files/pdf/RO6user-manual.pdf>
- [6] S PoweR product s.r.o., Ultrazvuková čistička Typ UC10, Návod na obsluhu, 2016
- [7] pbt Works, Sítotiskové zařízení UniPrint (Lift), Instalační & Uživatelská příručka, 2011
- [8] Mechatronika, Automatic pick & place machine M10, User manual, 2018
- [9] Möller, T.: Proces čištění – monitorování a řízení, online článek. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/proces-cisteni-monitorovani-a-izeni>
- [10] Hughes, E.: Aculon NanoClear® Compatibility Using Zestron Chemistries, Zestron technical report, 2015. Dostupné z: <https://www.aulon.com/pdfs/aculon-zestron-compatibility-report.pdf>
- [11] Jones, M.: Čištění DPS – není všechno jen černé a bílé, online článek. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:69789/cisteni-dps-neni-vsechno-jen-cerne-a-bile>
- [12] pbt Works: Jak správně pájet: ruční pájení, online článek. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/jak-spravne-pajet-rucni-pajeni>
- [13] EEPOWER: Resistors and size packages, online článek. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/resistor-sizes-and-packages/>
- [14] Bím, J.: Kvalita pájených a lepených vodivých spojů v elektrotechnice, bakalářská práce, ČVUT, Praha 2018
- [15] Podzemský, J.: Degradace spojů pájených pájkami bez olova, disertační práce, ČVUT, Praha 2015
- [16] Hirman, M.: Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty, disertační práce, ZČU, Plzeň 2017
- [17] Franko, J.: Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice, bakalářská práce, ZČU, Plzeň 2016

- [18] Hrabák, P.: Vznik a růst intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájených spojů, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [19] Jakoubek, J.: Optimalizace pájecích profilů u průběžné přetavovací pece, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [20] Švéda, M.: Prototypové a malosériové čištění DPS, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [21] Slavata, J.: Elektricky vodivé spoje, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2019
- [22] Janáč, J.: Technologie tisku pájecí pasty, Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011
- [23] Sochorec, R.: Testy kavitační eroze, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v BRNĚ, 2015
- [24] Grňák, F.: Pájené a lepené vodivé spoje, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2019

8 Seznam příloh

Příloha 1: Naměřená data k rozložení teploty v peci.....	103
Příloha 2: Mycí programy a jejich výsledky.....	103
Příloha 3: Katalogový list Cobar-OT2-SN100C-T3/T4 1.....	104
Příloha 4: Katalogový list Cobar-OT2-SN100C-T3/T4 2.....	105
Příloha 5: Katalogový list Cobar-OT2-SN100C-T3/T4 3.....	106
Příloha 6: Katalogový list Hydron SE 220 1.....	107
Příloha 7: Katalogový list Hydron SE 220 2.....	108
Příloha 8: Katalogový list Hydron SE 220 3.....	109
Příloha 9: Otisk na kontaktu.....	110
Příloha 10: Pájecí pasta 1 na desce volně.....	110
Příloha 11: Pájecí pasta 1 na desce mezi odporů.....	110
Příloha 12: Pájecí pasta 2 na desce volně.....	111
Příloha 13: Pájecí pasta 2 na desce mezi odporů.....	111
Příloha 14: Znečištění po ručním pájení.....	111
Příloha 15: Tavidlo 1 na desce.....	112
Příloha 16: Tavidlo 1 na kontaktu.....	112
Příloha 17: Tavidlo 2 mezi a kolem odporů.....	112
Příloha 18: Tavidlo 2 na desce.....	113
Příloha 19: Tavidlo 2 na kontaktu.....	113
Příloha 20: Tavidlo 2 mezi a kolem odporů.....	113
Příloha 21: Znečištění tavidlem 1 pod odporem a umyté tavidlo 1 pod odporem.....	114
Příloha 22: Tabulka naměřených hodnot ke kapitole 4.11, síla potřebná k odtržení.....	114
Příloha 23: Tabulka naměřených hodnot ke kapitole 4.11, elektrický odpor.....	115

9 Přílohy

bod	x [cm]	y [cm]	T [°C]	bod	x [cm]	y [cm]	T [°C]	bod	x [cm]	y [cm]	T [°C]
1	0	36	236,8	16	33,75	36	241,3	31	16,9	22,5	249,1
2	0	27	240,6	17	33,75	27	248,1	32	16,9	13,5	246,1
3	0	18	241,2	18	33,75	18	245,4	33	16,9	4,5	239,2
4	0	9	238,5	19	33,75	9	241,2	34	28,1	31,5	247,9
5	0	0	226,4	20	33,75	0	232,5	35	28,1	22,5	249,2
6	11,25	36	241,1	21	45	36	240,2	36	28,1	13,5	246,6
7	11,25	27	246,6	22	45	27	241,3	37	28,1	4,5	239,6
8	11,25	18	245,2	23	45	18	240,9	38	39,4	31,5	244,7
9	11,25	9	240,7	24	45	9	238,2	39	39,4	22,5	245,3
10	11,25	0	231,2	25	45	0	228,3	40	39,4	13,5	241,2
11	22,5	36	240,8	26	5,6	31,5	241,9	41	39,4	4,5	236,3
12	22,5	27	248,3	27	5,6	22,5	243,2	42	22,5	4,5	241,6
13	22,5	18	250,1	28	5,6	13,5	242,3	43	5,6	9	238,8
14	22,5	9	245,3	29	5,6	4,5	235,9	44	39,4	9	240,8
15	22,5	0	235,4	30	16,9	31,5	247,5	45	22,5	31,5	248,1

Příloha 1: Naměřená data k rozložení teploty v peci

Výkon [%]	60	65	50	60	70	70	70	80	80	85	90
Čas [min]	2	4	10	10	6	10	15	2	5	5	10
Teplota [°C]	45	50	50	50	55	50	50	50	60	60	60
otisk prstu	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto
pájka 1 mezi odpory	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
pájka 1 volně na desce	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto
pájka 2 volně na desce	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
pájka 2 mezi odpory	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
zbytky po ručním pájení	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto	umyto
tavidlo 1 na desce	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
tavidlo 1 na kontaktu	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
tavidlo 1 mezi odpory a z boku	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto
tavidlo 1 pod odporem	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto
tavidlo 2 pod odporem	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
tavidlo 2 deska	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
tavidlo 2 kontakt	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	umyto	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto
tavidlo 2 kolem odporů	zůstalo	zůstalo	zůstalo	umyto	zůstalo	umyto	umyto	zůstalo	umyto	umyto	umyto

Příloha 2: Mýcí programy a jejich výsledky

Cobar-OT2-SN100C-T3/T4

Description product

The **Cobar-OT2-SN100C** is a next generation lead-free solder paste. The flux system is halogen and halide free. The SN100C alloy is a tin copper based alloy which is eutectic at 227 °C.

SN100C stands for the alloy composition Sn99.3Cu0.7Ni0.05Ge0.005

See the Product Data Sheet (PDS) for the specification of the product concerned. Read the Material Safety Data Sheet (MSDS) before handling and/or using this product.

Receiving and storage

After receiving the solder paste it should be unpacked and stored. **DO NOT** store the paste in a fridge or at temperatures lower than 8 °C. Leave the jars sealed at room temperature until use.

Cartridges should be stored in a horizontal position. To eliminate flux segregation it is advised to rotate the cartridges once a month.

Handling

Allow the jars and their contents to reach the ambient temperature at the printer before use. **DO NOT** open cold containers as moisture may condense on the product and affect performance. Do not place it on a hot plate, furnace, reflow oven or any other artificial means to warm.

Stir the material for 1 minute with a steel spatula (or equivalent). This practice homogenizes the product and prepares it for immediate test.

Solder paste is a shelf-life item and should be managed as a FIFO-supply. **DO NOT** store new and used paste in the same container. Keep the jars tightly sealed when not used.

Application Note

Print recommendations

Use a squeegee with a minimum necessary length. Recommended is to have 25 mm (1 ") on both sides of the print pattern. Apply 10 gram/cm of squeegee length on the stencil.

The stroke of the squeegee should start and end 50 mm (2") before/after print pattern to allow the paste to roll properly.

Printer settings depend on print equipment, stencil materials and temperature. General recommended settings:

Print speed [mm/s]	Squeegee pressure [kg/cm] @ 23 °C
25 – 100	0.20 (0.50 kg/inch)
100 – 200	0.25 (0.65 kg/inch)

Decrease pressure by 5% per 1 °C higher temperature.

For typical PCB's: separation speed 10 mm/s. For the MPM machines step 6 of slow-mode.

Recommended operating temperature is between 22-28 °C and 30-70 %RH.

In case no printing has been done for more than four hours, it is highly recommended to perform a total stencil cleaning prior to re-start.

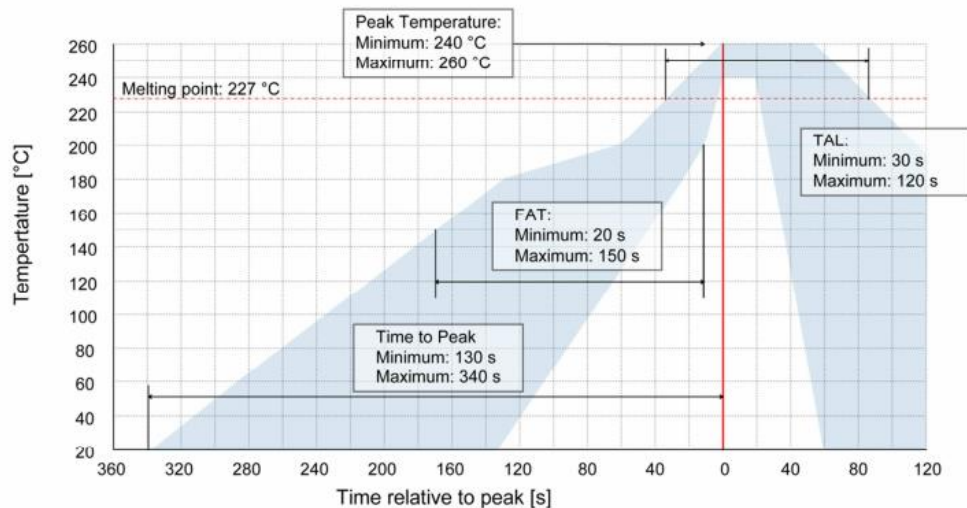
Tack time

It is recommended to place components and reflow the assembly no longer than 24 hours after printing.

Reflow profile

The printed boards can be reflowed up to 24 hours after printing without adverse effects. The recommended profile can only be considered as a guideline for the initial setting of the equipment.

Application Note



FAT = Flux Activation Time (time between 150 and 200 °C)

TAL = Time Above Liquidus (time above 227 °C)

T_p = Peak Temperature (maximum temperature)

NOTE:

Although the solder paste has a very wide process window a linear reflow profile is preferred in case of poor wettable components/board finishes.

For vapour phase or inert reflow soldering a longer soak and/or time above liquidus are less critical.

Residues/cleaning

Cobar-OT2-SN100C is a no-clean formula. Residues that remain on the assembly after soldering are chemically inert and not meant to be cleaned. Residues on the PBA can however be cleaned with Cobar MCA-1424 Aqueous cleaner.

The residues on stencil, spatulas and other tools as well as misprints may be cleaned with cleaner MCI-2330.

Disclaimer:

The information given in this publication has been worked up to the best of the knowledge of Balver Zinn/Cobar as well as taking into consideration the applicable laws and regulations. We cannot anticipate all conditions under which this information and our products or the products of other manufacturers in combination with our products may be used. We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety and suitability of our products alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product or product combination for their own purposes. Unless otherwise agreed in writing, we sell the products without warranty, and buyers and users assume all responsibility and liability for loss or damage arising from the handling and use of our products, whether used alone or in combination with other

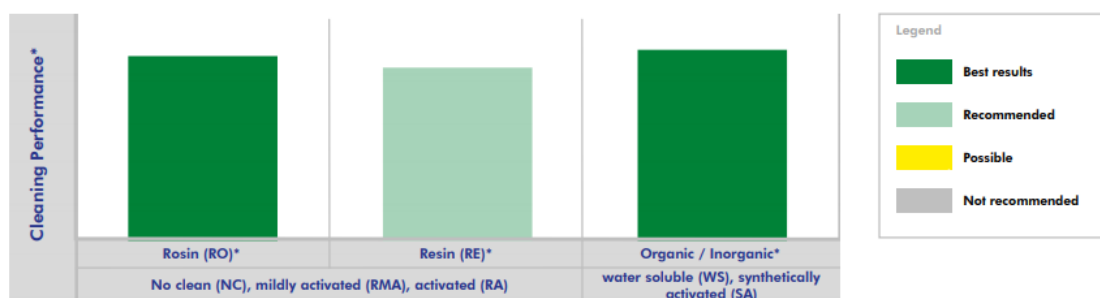
HYDRON® SE 220

pH neutral defluxing agent for semiconductor electronics



HYDRON® SE 220 is a water-based, single-phase cleaning agent specifically developed for the use in dip tank processes. HYDRON® SE 220 reliably removes flux residues from all kind of semiconductor electronics, such as leadframes, discrete devices, power modules and power LEDs as well as flip chip or CMOS, i.e. after die attach. Due to its single-phase formulation, the cleaning agent shows an excellent processability and good rinsing performance, providing optimal surface characteristics for subsequent processes such as wire bonding or molding. HYDRON® SE 220 is pH-neutral and thus ensures excellent material compatibility.

Areas of application – Defluxing of Semiconductor Electronics



* J-STD-004

Advantages compared to other cleaners

- Due to its single-phase formulation, HYDRON® SE 220 can be easily processed and provides excellent performance in dip tank processes.
- Can be easily rinsed off with DI-water without leaving any residues.
- pH-neutral, therefore excellent material compatibility, specifically with dies, no attack of chip passivations.
- Provides stainless, activated copper surfaces for subsequent processes such as wire bonding, molding and adhesive bonding and retains these activated surfaces over a temporary storage time.
- HYDRON® SE 220 has no flash point and a low odor and thus can be applied in dip tank equipment without explosion proof.

Process Steps

Cleaning Process	Parts	1. Cleaning	2. Rinsing	3. Drying
Ultrasonic (US) / Spray under immersion (SUI)	Power Modules, Leadframes, Discrete Devices, Power LEDs, Flip Chips, CMOS	HYDRON® SE 220	DI-water ¹	Hot air or circulating air

¹ The DI-water should have a temperature of 20-40°C/68-104°F.

Independent Test Center - Largest choice of leading machines, chemistry & analytics



Machine Test Center



Analytical Center

Visit our Machine Test Center and clean your power electronics in cleaning machines of leading international equipment suppliers.

Your benefits:

- You are introduced to the cleaning machines & you clean your power electronics under production conditions supported by your ZESTRON process engineer
- You check the cleaning results immediately on site (ROSE, optionally IR, IC, SEM/EDX etc.) for maximum comparability & result transparency
- You receive a process guarantee including detailed process parameters for the machine/cleaner combination that we recommend

Contact ZESTRON's process engineers for cleaning trials:

Europe: Phone +49 (841) 63526; techsupport@zestron.com / South Asia: Phone +604 (3996) 100; support@zestronasia.com

Or visit our website for a virtual tour: <http://www.zestron.com/en/company/virtual-company-tour.html>

Technical Data*

Density	(g/ccm) at 20°C/68°F	0.99
Surface tension	(mN/m) at 25°C/77°F	26.0
Boiling point	°C/°F	> 98°C / > 208°F
Flash point	°C/°F	None until boiling
pH value	10g/l H ₂ O	Neutral
Vapor pressure	(mbar) at 20°C/68°F	Approx. 20
Cleaning temperature	°C/°F	40 - 60°C / 104 - 140°F
Solubility in water		Soluble
Application concentration ¹	Concentrate	20 - 25 %
HMIS Rating	Health-Flammability-Reactivity	1 - 0 - 0

* Please note that the following information represents HYDRON® SE 220 at 25 % concentration.

¹ The concentrate of HYDRON® SE 220 has to be diluted in DI-water.

Product Features & Cleaning Standards

<p>100% compliance with EU guidelines (RoHS 1, 2 & 3, WEEE)</p>	<p>HYDRON® Technology offers single-phase formulations and a good processability</p>
<p>Extensively tested and suitable for cleaning lead-free solder pastes</p>	<p>Product is free of any critical substances according to SIN & SVHC lists</p>

Technical Information

ZESTRON
High Precision Cleaning

Environmental, health & safety regulations

- HYDRON® SE 220 is water-based and biodegradable.
- HYDRON® SE 220 is formulated free of any halogenated compounds and environmentally friendly.
- Refer to the MSDS for specific handling precautions and instructions.

Availability & Storage

1 Liter	✓
5 Liter	✓
25 Liter	✓
200 Liter	✓

- Available as concentrate
- Store HYDRON® SE 220 in the original container at a temperature between 5 - 30°C / 41 - 86°F.
- The product has a minimum shelf life of 5 years in factory sealed containers.



Further product information

- **Material Compatibility**
Please review the Material Compatibility overview before using the cleaning agent.
- **HYDRON® Technology Sheet**
Detailed information on HYDRON® Technology
- **Filter recommendation**
To take full advantage of HYDRON® Technology and further extend the bath life of HYDRON® SE 220, filtration is recommended.
- **Safety data sheet**

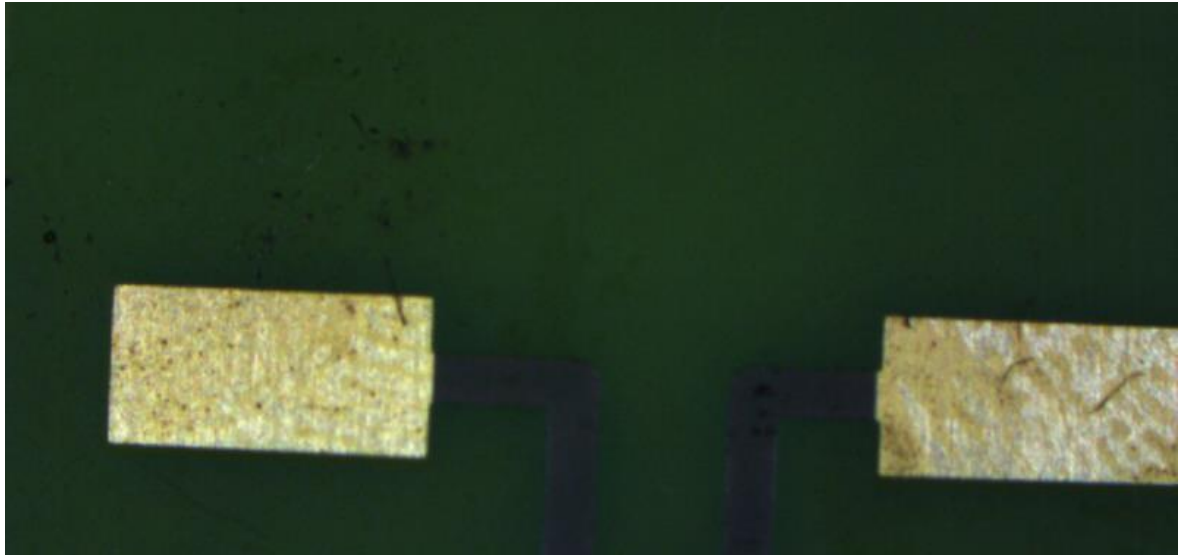
Available Process –Optimization –Products

To ensure a stable running cleaning process, it is important to monitor cleaning agent concentration and regular bath treatment. For HYDRON® SE 220 a variety of process support products are available:

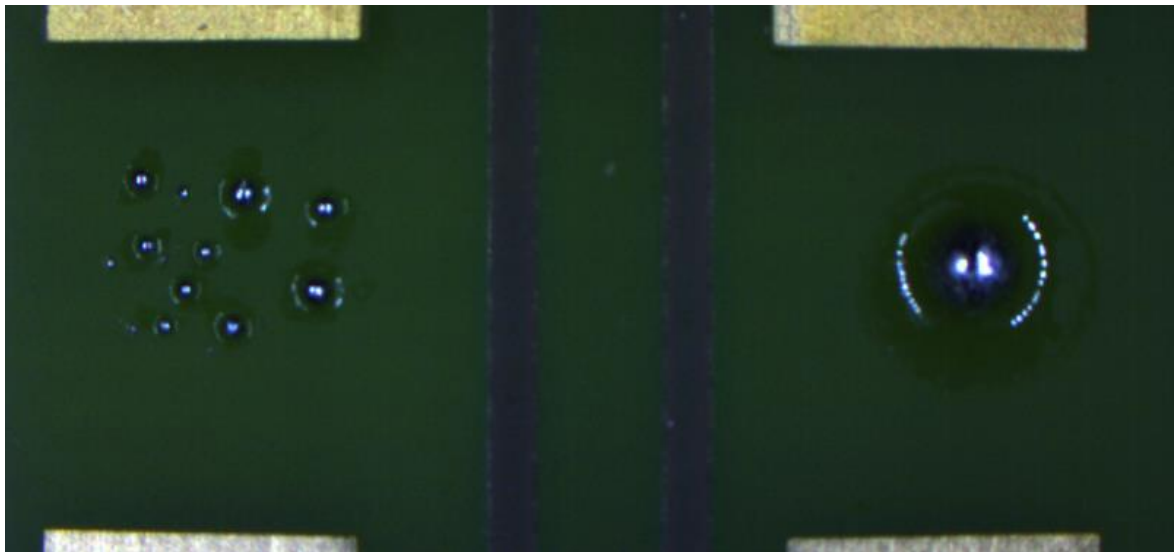


Concentration measurement:

- ZESTRON® EYE for automated real-time concentration monitoring providing 100% traceability.
- ZESTRON® Bath Analyzer 20 a manual test method for fast and reliable checks on cleaner concentration.



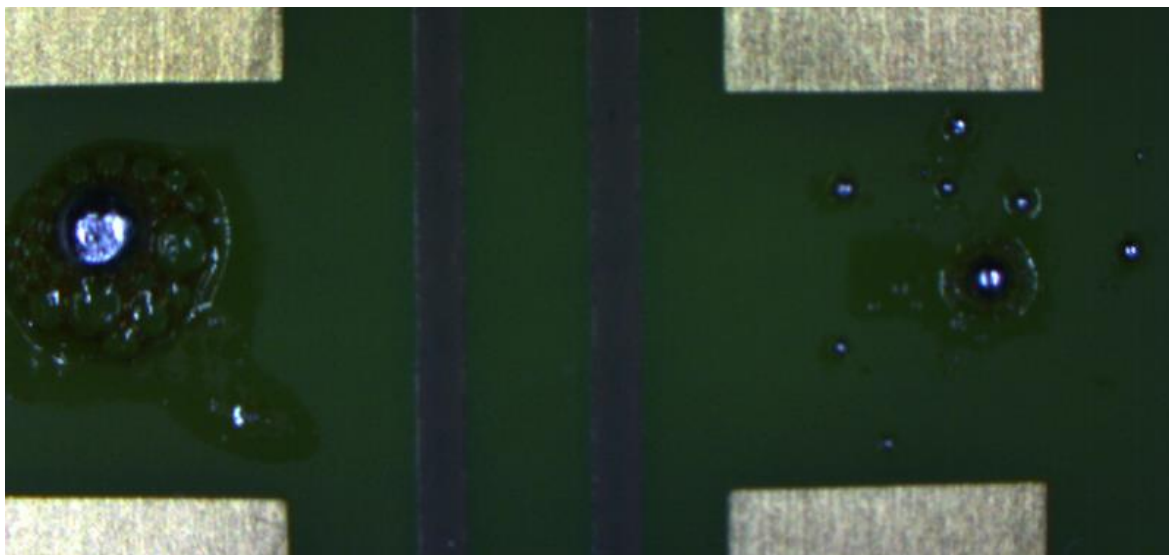
Příloha 9: Otisk na kontaktu



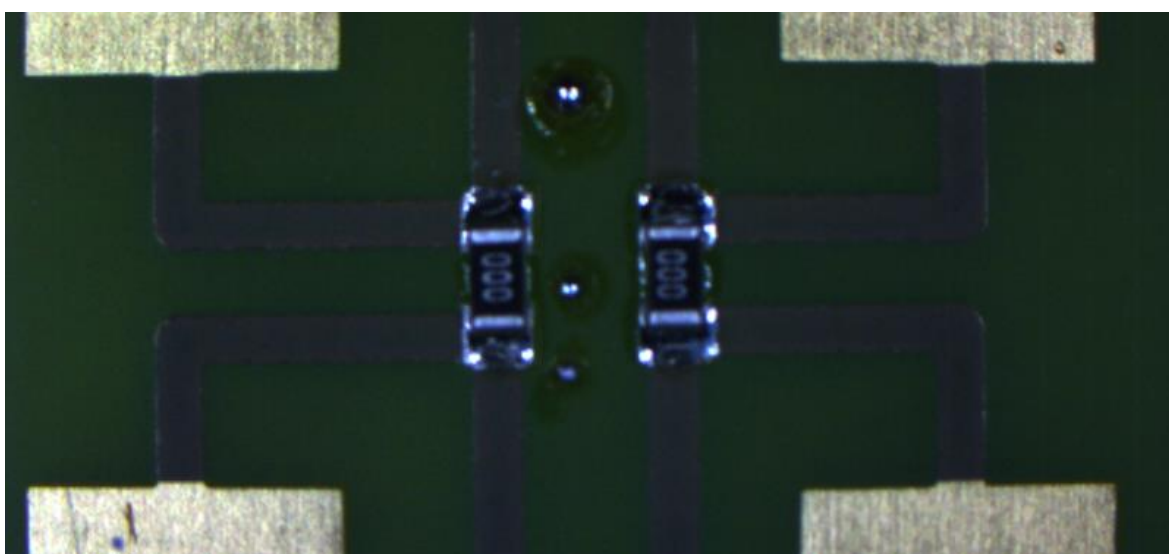
Příloha 10: Pájecí pasta 1 na desce volně



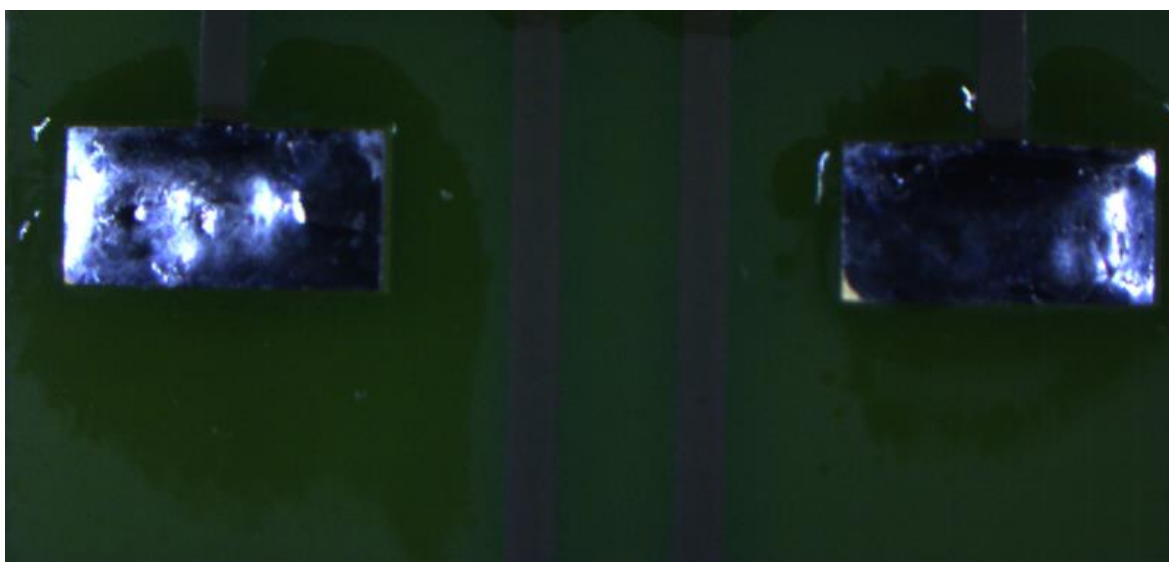
Příloha 11: Pájecí pasta 1 na desce mezi odpory



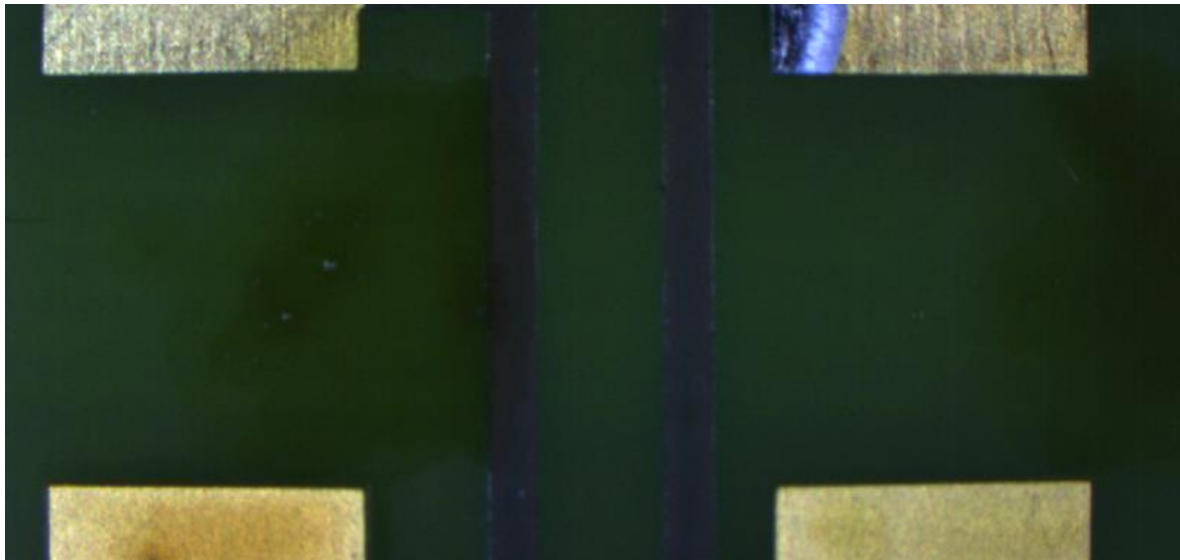
Příloha 12: Pájecí pasta 2 na desce volně



Příloha 13: Pájecí pasta 2 na desce mezi odpory



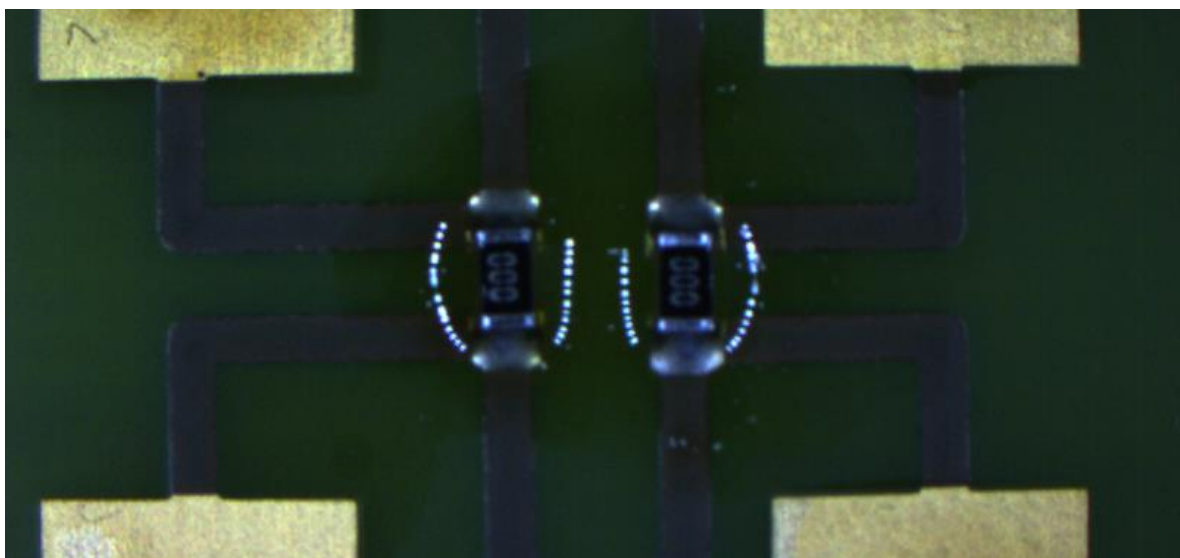
Příloha 14: Znečištění po ručním pájení



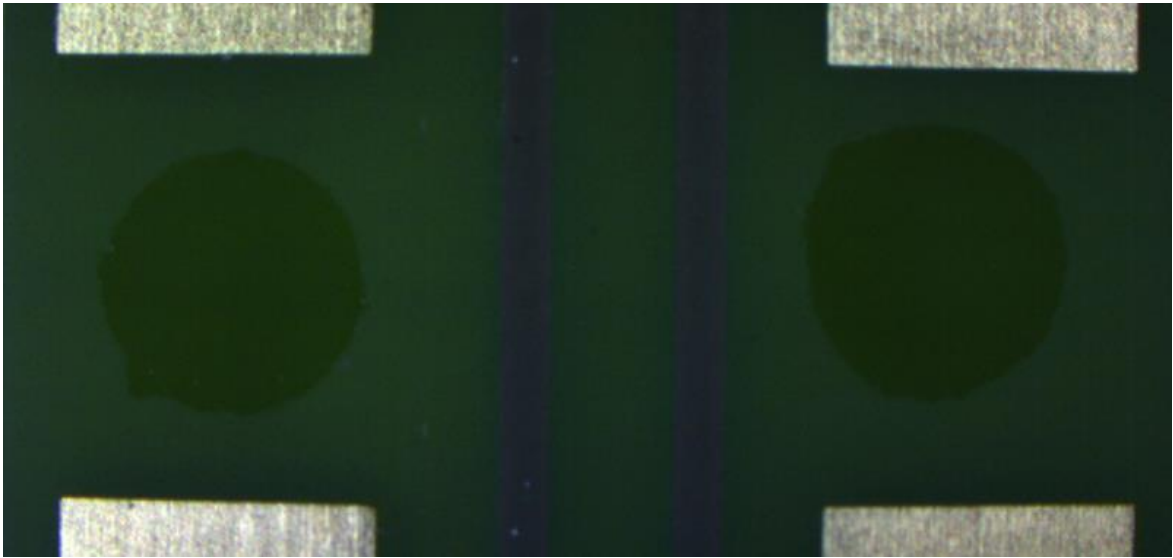
Příloha 15: Tavidlo 1 na desce



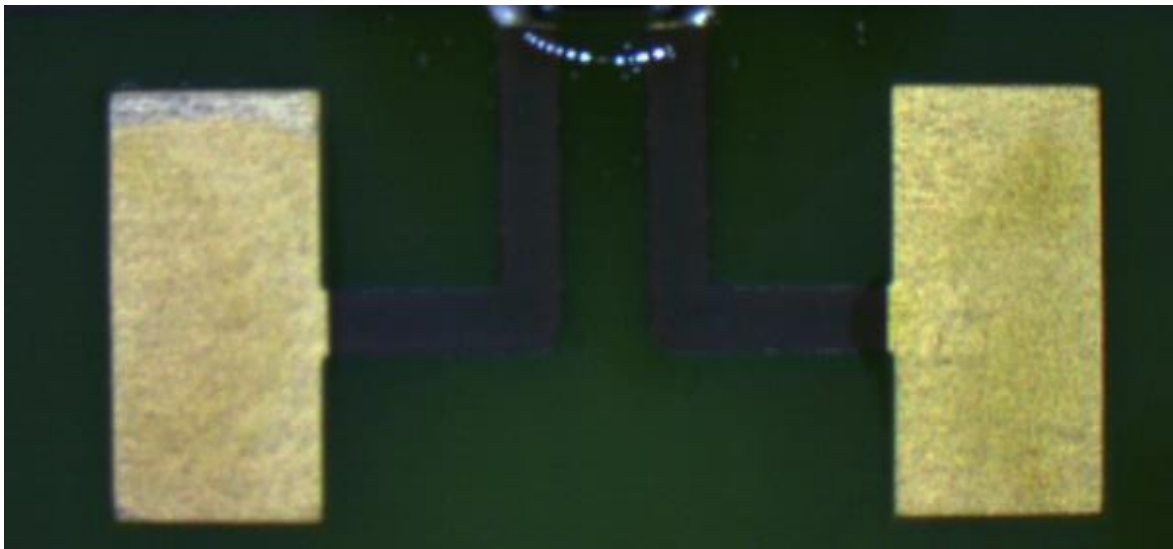
Příloha 16: Tavidlo 1 na kontaktu



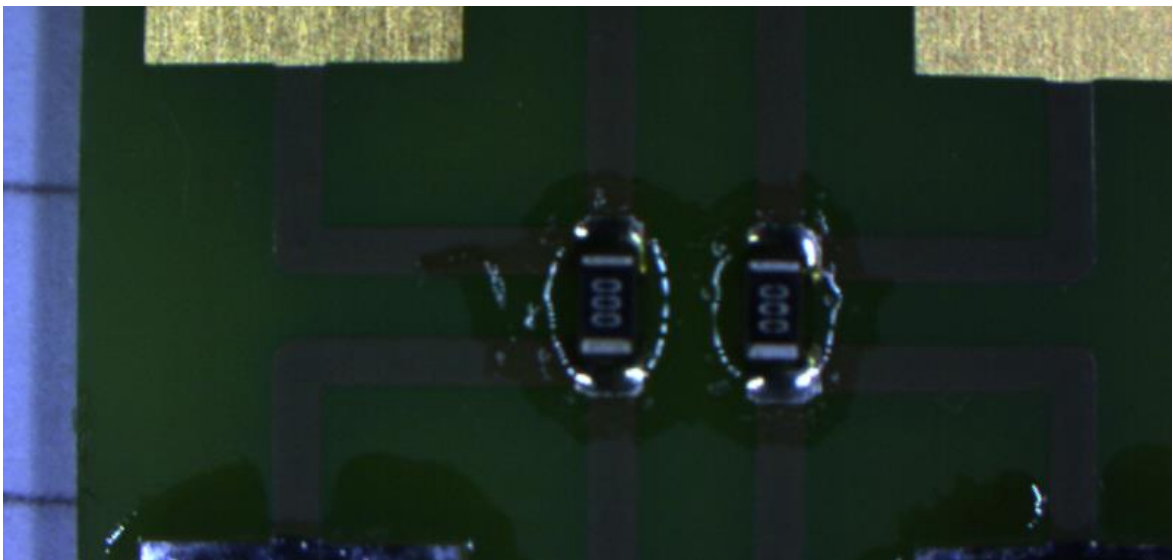
Příloha 17: Tavidlo 2 mezi a kolem odporů



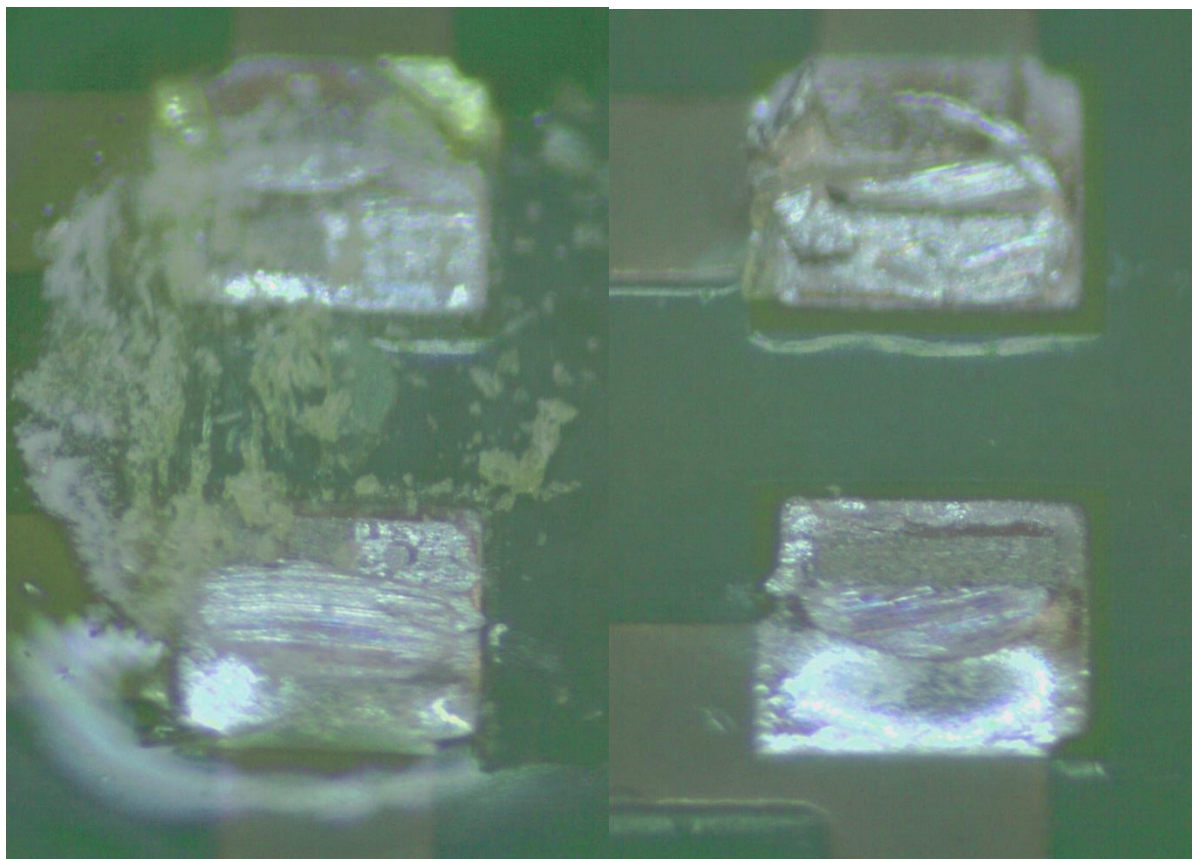
Příloha 18: Tavidlo 2 na desce



Příloha 19: Tavidlo 2 na kontaktu



Příloha 20: Tavidlo 2 mezi a kolem odporů



Příloha 21: Znečištění tavidlem 1 pod odporem a umyté tavidlo 1 pod odporem

deska	segment	mycí program		potřebná síla k odtržení [N]					
1	*	nemyje se, výchozí		33,6778	31,689	27,0174	39,874	28,9838	30,4935
	**	T [°C]	-	36,2722	33,3104	29,7825	34,3799	27,3744	30,2845
	***	t [min]	-	17,8485	21,9968	15,3365	17,7797	23,9968	15,3365
	****	P [%]	-	7,1283	5,7425	6,4834	6,3471	5,2785	4,6214
2	*	optimalizovaný 1		31,3017	25,3839	34,381	33,3484	27,0683	26,4105
	**	T [°C]	70	32,2077	31,1457	28,8217	30,8478	26,3845	33,5668
	***	t [min]	10	21,0197	20,1168	25,3127	19,3002	14,7103	22,8764
	****	P [%]	50	6,0087	7,3473	5,9064	6,5253	6,3921	7,5145
3	*	optimalizovaný 2		35,3163	32,9455	30,4445	36,765	29,0696	34,2147
	**	T [°C]	85	33,4481	31,3224	30,5856	27,908	37,842	35,7083
	***	t [min]	5	19,2454	14,8878	22,5965	18,7169	13,0593	14,0601
	****	P [%]	60	3,6376	4,3374	6,8792	7,6034	6,0061	5,7456
4	*	1+		20,9234	26,0338	18,6152	23,9085	29,3625	23,6478
	**	T [°C]	70	29,479	35,1278	28,9845	31,6654	37,9847	30,2187
	***	t [min]	15	17,5478	16,8741	23,149	19,4753	15,7824	21,4796
	****	P [%]	50	4,8754	7,3647	5,3588	4,7984	7,5498	4,1475
5	*	2+		32,1895	31,0885	26,9127	30,6127	36,165	31,0259
	**	T [°C]	90	38,0408	28,1147	17,9573	26,2688	25,8736	31,6468
	***	t [min]	10	22,4185	18,849	15,7921	17,9041	10,9272	19,8408
	****	P [%]	60	5,9144	8,5394	6,4438	5,789	6,7397	5,8057
6	*	2++		35,0944	34,8569	26,3344	32,0042	27,3684	16,7471
	**	T [°C]	99	25,1266	23,4899	24,2131	28,5846	26,4092	25,8028
	***	t [min]	15	13,1526	24,4685	24,0905	21,4017	17,1059	15,1701
	****	P [%]	60	5,2144	4,3618	4,586	5,6028	7,0026	5,7384
7	*	2+++		29,5391	33,745	34,8268	25,9139	37,6406	35,8454
	**	T [°C]	99	32,6783	31,8129	27,8724	29,2579	34,8168	35,6536
	***	t [min]	30	17,8602	19,0926	18,9281	16,0896	15,1606	17,5301
	****	P [%]	60	6,7935	5,3234	5,543	6,0548	4,8784	4,6741

Příloha 22: Tabulka naměřených hodnot ke kapitole 4.11, síla potřebná k odtržení

deska	segment	odpor před mytím [Ω]						program		odpor po mytím [Ω]					
		0,0118	0,0124	0,0114	0,0117	0,0121	0,0117	nemyle se, výchozí		0,0118	0,0124	0,0114	0,0117	0,0121	0,0117
1	*	0,0118	0,0124	0,0114	0,0117	0,0121	0,0117	T [°C]	-	0,0125	0,0116	0,0125	0,0132	0,0127	0,0119
	**	0,0125	0,0116	0,0125	0,0132	0,0127	0,0119	T [°C]	-	0,0125	0,0116	0,0125	0,0132	0,0127	0,0119
	***	0,0342	0,0364	0,0345	0,0364	0,0342	0,0356	t [min]	-	0,0342	0,0364	0,0345	0,0364	0,0342	0,0356
	****	0,0348	0,0352	0,0329	0,0318	0,0352	0,0345	P [%]	-	0,0348	0,0352	0,0329	0,0318	0,0352	0,0345
	*	0,0123	0,0120	0,0126	0,0117	0,0126	0,0122	optimalizovaný 1	70	0,0121	0,0125	0,0129	0,0112	0,0128	0,0118
2	**	0,0116	0,0126	0,0124	0,0130	0,0128	0,0117	T [°C]	70	0,0114	0,0127	0,0115	0,0126	0,0121	0,0123
	***	0,0326	0,0341	0,0343	0,0341	0,0329	0,0327	t [min]	10	0,0319	0,0331	0,0337	0,0340	0,0317	0,0321
	****	0,0328	0,0318	0,0298	0,0325	0,0313	0,0323	P [%]	50	0,0317	0,0325	0,0311	0,0315	0,0317	0,0311
	*	0,0112	0,0108	0,0116	0,0122	0,0131	0,0127	optimalizovaný 2	50	0,0119	0,0117	0,0125	0,0125	0,0128	0,0115
	**	0,0118	0,0115	0,0128	0,0133	0,0122	0,0117	T [°C]	85	0,0126	0,0128	0,0117	0,0125	0,0140	0,0128
3	***	0,0315	0,0348	0,0339	0,0327	0,0320	0,0334	t [min]	5	0,0322	0,0353	0,0338	0,0319	0,0325	0,0341
	****	0,0325	0,0318	0,0327	0,0318	0,0357	0,0316	P [%]	60	0,0337	0,0333	0,0321	0,0314	0,0352	0,0324
	*	0,0121	0,0119	0,0117	0,0128	0,0124	0,0117	1+	60	0,0119	0,0124	0,0121	0,0127	0,0121	0,0131
	**	0,0123	0,0118	0,0109	0,0116	0,0118	0,0122	T [°C]	70	0,0118	0,0116	0,0115	0,0113	0,0123	0,0118
	***	0,0309	0,0328	0,0311	0,0317	0,0325	0,0316	t [min]	15	0,0314	0,0331	0,0328	0,0312	0,0328	0,0322
4	****	0,0305	0,0308	0,0304	0,0287	0,0347	0,0292	P [%]	50	0,0311	0,0314	0,0295	0,0308	0,0337	0,0304
	*	0,0113	0,0118	0,0108	0,0111	0,0118	0,0123	2+	50	0,0108	0,0119	0,0112	0,0105	0,0113	0,0129
	**	0,0120	0,0123	0,0127	0,0128	0,0122	0,0109	T [°C]	90	0,0114	0,0111	0,0133	0,0116	0,0114	0,0121
	***	0,0326	0,0355	0,0327	0,0343	0,0326	0,0346	t [min]	10	0,0329	0,0332	0,0328	0,0324	0,0336	0,0337
	****	-	0,0331	0,0337	0,0315	0,0322	0,0335	P [%]	60	0,0332	0,0332	0,0342	0,0323	0,0319	0,0345
5	*	0,0115	0,0121	0,0118	0,0112	0,0124	0,0119	2++	60	0,0109	0,0127	0,0109	0,0115	0,0118	0,0122
	**	0,0123	0,0118	0,0128	0,0132	0,0127	0,0119	T [°C]	99	0,0127	0,0116	0,0119	0,0120	0,0128	0,0124
	***	0,0342	0,0348	0,0345	0,0364	0,0342	0,0329	t [min]	15	0,0342	0,0352	0,0343	0,0356	0,0347	0,0337
	****	0,0308	0,0317	0,0321	0,0318	0,0342	0,0345	P [%]	60	0,0319	0,0327	0,0314	0,0313	0,0334	0,0338
	*	0,0125	0,0122	0,0128	0,0119	0,0128	0,0124	2+++	60	0,0124	0,0128	0,0123	0,0126	0,0132	0,0128
7	**	0,0118	0,0124	0,0122	0,0128	0,0126	0,0115	T [°C]	99	0,0127	0,0121	0,0128	0,0124	0,0119	0,0132
	***	0,0328	0,0339	0,0345	0,0338	0,0332	0,0345	t [min]	30	0,0329	0,0337	0,0331	0,0335	0,0338	0,0356
	****	0,0326	0,0317	0,0331	0,0323	0,0315	0,0325	P [%]	60	0,0334	0,0335	0,0328	0,0346	0,0308	0,0331

Příloha 23: Tabulka naměřených hodnot ke kapitole 4.11, elektrický odpor