

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Metody pro osazování desek plošných spojů

PCB Assembly Techniques

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

**Jiří Kordík
Praha 2019**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kordík** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457014**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody pro osazování desek plošných spojů

Název bakalářské práce anglicky:

PCB Assembly Techniques

Pokyny pro vypracování:

1. Popište metody používané v hromadné a kusové výrobě pro osazování desek plošných spojů.
2. Uveďte vady, které se mohou během procesu osazování a pájení objevit. Pokuste se rozebrat příčiny těchto vad.
3. Na vybraných osazených deskách proveďte vyhodnocení kvality pájení pomocí optické kontroly.
4. Proveďte analýzu cen osazení desek metodami pro hromadnou a kusovou výrobu.

Seznam doporučené literatury:

Slavata, Michal. Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži. [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2014.
Abel, Martin. SMT: Technologie povrchové montáže. Nakladatelství Platan, Pardubice, 2000, ISBN: 9788090273313, 8090273319.
Henshall, Greg; Bath, Jasbir; Handwerker, Carol A. Lead-Free Solder Process Development. eBook. IEEE Press 2011, ISBN: 9780470410745, 047041074.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.10.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 24. 5. 2019

Jiří Kordík

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat jedné nejmenované firmě, která mi poskytla exkurze, na kterých jsem se dozvěděl řadu informací potřebných k sepsání mé práce. Také děkuji rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o metodách osazování desek plošných spojů. Zde jsou představeny metody pro osazování kusovou a hromadnou výrobou. V další části se práce zabývá možnými chybami při elektrotechnické montáži. Tyto chyby jsou následně odhalovány pomocí různých metod pro optickou kontrolu. Poslední část je zaměřena na porovnání nákladů kusové a hromadné výroby desek plošných spojů.

Klíčová slova

SMT, THT, ruční osazování, automatické osazování, automatická pájecí linka, pájení, vady pájených spojů, optická kontrola, náklady

Abstract

The Bachelor thesis describe methods printed circuit board assembly techniques. There are presented two methods for pieces and mass production. In the next part is focused on possible soldering issues mistakes in electrical installation. These faults are subsequently detected by various methods for optical inspection. The last part is focused on compare the cost of pieces and mass production of printed circuit boards.

Keywords

SMT, THT, manual assembly, automatic assembly, automatic assembly system, soldering, soldering issues, optical control, costs

Obsah

1	Metody osazování desek plošných spojů	11
1.1	SMT a THT technologie	11
1.2	Hromadná výroba DPS	12
1.2.1	Příprava před osazením	12
1.2.2	Automatická pájecí linka.....	14
1.3	Kusová výroba DPS	28
1.3.1	Osazení SMD součástkami	28
1.3.2	Osazení součástkami s drátovými vývody	29
1.3.3	Optická kontrola	29
1.3.4	Elektrická kontrola.....	29
2	Vady vznikající při elektrotechnické montáži.....	30
2.1	Kontrola chyb v kusové výrobě:.....	30
2.2	Kontrola chyb v hromadné výrobě:	31
2.2.1	SPI (solder paste inspection) – automatická kontrola pasty.....	31
2.2.2	AOI (automated optical inspection) – automatická optická inspekce.....	32
2.2.3	RTG kontrola.....	33
2.3	Chyby pájených spojů	34
2.3.1	Odhalený základní kov	34
2.3.2	Dutinky po bublinách	34
2.3.3	Nedostatečné přetavení pájecí pasty	34
2.3.4	Špatná smáčivost.....	34
2.3.5	Kulička vedle součástky	35
2.3.6	Můstek (zkrat)	35
2.3.7	Webbing (rozstřík pájky).....	35
2.3.8	Tombstone (náhrobní kámen)	35
3	Hodnocení kvality pájených spojů pomocí optické kontroly	36
3.1	Experiment 1	36
3.2	Experiment 2	40
3.3	Chyby vzniklé ručním osazováním	41
3.4	Chyby vzniklé v automatickém osazování	42
3.4.1	Hledání chyb pomocí AOI 3D	42
3.4.2	Hledání chyb pomocí RTG	44
3.4.3	Hledání chyb pomocí 3D kamery	45
4	Porovnání nákladů na osazování v hromadné a kusové výrobě DPS	46

4.1	Náklady.....	46
4.1.1	Fixní náklady (stálé).....	46
4.1.2	Variabilní náklady (proměnné).....	46
4.1.3	Celkové náklady.....	46
4.1.4	Průměrné fixní náklady.....	47
4.1.5	Průměrné variabilní náklady.....	47
4.1.6	Průměrné celkové náklady.....	47
4.1.7	Mezní náklady.....	48
4.2	Praktický příklad porovnání nákladů nejmenované firmy.....	48
4.2.1	Fixní pro obě metody.....	49
4.2.2	Fixní pro určitou metodu.....	49
4.2.3	Variabilní pro obě metody.....	49
4.2.4	Variabilní pro určitou metodu.....	49
5	Závěr.....	53
6	Zdroje.....	54

Seznam obrázků

Obr. 1 Pásový zásobník [1]	13
Obr. 2 Tyčový zásobník [1].....	13
Obr. 3 Automatická pájecí linka [10]	14
Obr. 4 Princip tisku přes šablonu [1].....	16
Obr. 5 Šablonový tisk [12]	16
Obr. 6 Princip sítotisku [1]	17
Obr. 7 Dispenze [1]	17
Obr. 8 Pohled do osazovacího automatu [12].....	18
Obr. 9 Hlavice osazovacího automatu [12]	18
Obr. 10 Náhradní trysky [12]	19
Obr. 11 Způsoby montáže součástek na DPS [1]	19
Obr. 12 Ohřev vedením tepla [1]	22
Obr. 13 Pec pro přetavení horkým plynem [14]	22
Obr. 14 Ohřev kondenzací par [1]	23
Obr. 15 Pec pro přetavení kondenzací par [13]	23
Obr. 16 Pěnový dávkovač tavidla [1]	24
Obr. 17 Vlnový dávkovač tavidla [1].....	25
Obr. 18 Jednoduchá vlna [1].....	25
Obr. 19 Náběh vlny [12].....	26
Obr. 20 Kontrola elektrický jehel [12]	27
Obr. 21 Ruční osazovací pracoviště [1]	28
Obr. 22 Pájení hrotovou páječkou [17]	29
Obr. 23 Procentuální zastoupení vad při pájení [16].....	31
Obr. 24 Závislost včasného odhalení chyb na nákladech spojených s opravami [16]	31
Obr. 25 SPI (nanášeno správné množství pájecí pasty) [12]	32
Obr. 26 Princip RTG kontroly [18].....	33
Obr. 27 Odhalený základní kov [4]	34
Obr. 28 Dutinky po bublinkách [4].....	34
Obr. 29 Nedostatečné přetavení pájecí pasty [4]	34
Obr. 30 Špatná smáčivost [4]	34
Obr. 31 Kulička vedle součástky [4].....	35
Obr. 32 Můstek (zkrat) [4].....	35
Obr. 33 Webbing (rozstřík pájky) [4]	35
Obr. 34 Tombstone (náhrobní kámen) [4].....	35
Obr. 35 Dispenzor SMR PICK & PASTE by PACE [13]	36
Obr. 36 Destička pro experiment 1 s nanášenou pájecí pastou [13]	37
Obr. 37 Manipulátor SMT MANIPULATOR MO1 [13]	37
Obr. 38 Destička pro experiment 1 s osazenými součástkami [13]	38
Obr. 39 Pájecí pec Mistral 260 [13].....	38
Obr. 40 Teplotní profil přetavovací pece [13].....	38
Obr. 41 Zapájený referenční rezistor s ideálním množstvím pájecí pasty [13]	39
Obr. 42 Zapájený rezistor s přebytečným množstvím pájecí pasty [13]	39
Obr. 43 Zapájený rezistor s rozdílným množstvím pájecí pasty [13]	39
Obr. 44 Zapájený rezistor s velkým rozdílem množstvím pájecí pasty [13]	39
Obr. 45 Destička pro experiment 2 [13]	40

Obr. 46 Zkrat pájených vývodů [13].....	40
Obr. 47 Nezapájený kontakt [13]	40
Obr. 48 Zkrat pájených cest [13].....	40
Obr. 49 Zkrat nožiček součástky [13].....	41
Obr. 50 Nezapájený kontakt [13]	41
Obr. 51 Nezapájený kontakt [13]	41
Obr. 52 Kulička vedle součástky [13].....	41
Obr. 53 Nezapájený kontakt [13]	41
Obr. 54 Odhalení nadzvednuté diody pomocí AOI [12].....	42
Obr. 55 Odhalení nadzvednutého tranzistoru pomocí AOI [12].....	43
Obr. 56 Nedostatek pájecí pasty pod součástkou odhalen pomocí RTG [12]	44
Obr. 57 DPS před osazením BGA [12]	44
Obr. 58 Zkrat vývodů SMD konektoru odhalen pomocí RTG [1]	44
Obr. 59 Odhalené voidy pomocí RTG [12].....	44
Obr. 60 Nedostatečné množství pájecí pasty [13].....	45
Obr. 61 Posunutá součástka [13]	45
Obr. 62 Neosazená součástka [13].....	45
Obr. 63 Vlásokový zkrat mezi dvěma nožičkami [13].....	45
Obr. 64 Posunutá součástka [13]	45
Obr. 65 Závislost nákladů na produkci [15].....	47
Obr. 66 Závislost průměrných a mezních nákladů na produkci [15].....	48
Obr. 67 Graf závislosti celkových nákladů na produkci pro kusovou a hromadnou výrobu ...	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Náklady hromadné výroby	50
Tabulka 2 Náklady kusové výroby	51
Tabulka 3 FC, VC a TC kusové a hromadné výroby	52

Úvod

První kapitola je věnována metodám osazování desek plošných spojů. Dopodrobna jsou zde popsány pracoviště pro ruční a automatické osazování, které byly součástí autorovy podrobné exkurze ve dvou firmách osazujících desky plošných spojů. V rámci této exkurze byl autor detailně obeznámen s celým procesem výroby jak v kusové, tak hromadné výrobě. Na začátku kapitoly budou stručně popsány techniky osazování tištěných spojů, kde postupně SMT technologie nahrazuje technologii THT. Následně budou popsány pracoviště pro kusovou a hromadnou výrobu desek plošných spojů.

V druhé kapitole budou představeny chyby, které se mohou objevit již během procesu nanášení pájecí pasty, při osazování součástkami nebo během pájení. Pohled bude také zaměřen na důvody vzniku těchto chyb u pájených spojů.

Třetí část této práce tvoří praktické hodnocení kvality pájených spojů. Zde budou představeny dva experimenty, v jejichž rámci budou demonstrovány různé druhy vad. Také se zaměříme na některé vady, vznikající automatickým osazováním. Ty budou odhaleny pomocí různých optických přístrojů, které jsou využívány právě pro kontrolu montáže součástek na desky plošných spojů. Za zmínku jistě stojí snímky z AOI a RTG kontroly pořízené ve firmě s automatickým osazováním. Nakonec bude zaměřeno na chyby při osazování v kusové výrobě.

V poslední kapitole budou porovnávány metody pro osazování desek plošných spojů z pohledu ekonomického. Toto porovnání je uvažováno ve firmě, ve které proběhla jedna z exkurzí a autor měl možnost získat nákladové materiály pro toto porovnání. Tento bod může mít vliv na rozhodování firmy, zda zvolí raději ruční, anebo automatickou metodu osazování.

1 Metody osazování desek plošných spojů

1.1 SMT a THT technologie

Při osazování desek plošných spojů (DPS) existují dvě různé technologie. Prvním způsobem je technologie povrchové montáže (SMT - surface mount technology), druhým pak osazení součástkami s drátovými vývody (THT - through-hole technology).

U povrchové montáže se součástky určené k této aplikaci (SMD - surface mount device) osazují pájením přímo na plošky vyvedené na povrch desky plošného spoje. Plošné spoje mohou být vícevrstvé, z čehož plyne, že deska může být osazena SMD součástkami z obou stran. Hlavní výhodou povrchové montáže oproti osazování součástek s drátovými vývody je určitě velikost. Existuje mnoho provedení vyráběných SMD součástek. Součástky o stejné hodnotě se mohou lišit jak délkou, tak i šířkou, což má ale vliv na výkon této součástky. Velikost součástek má ale vliv i na velikost samotného plošného spoje, což je v dnešní době, kdy jsou požadavky na miniaturizaci přístrojů, hlavní výhodou. Další velkou výhodou je levnější a jednodušší výroba a také již zmiňovaná možnost osazení z obou stran plošného spoje. Nevýhody pak můžeme spatřovat ve špatném odvodu tepla.

Součástky s drátovými vývody jsou prostrčeny otvory v plošném spoji a na opačné straně zapájeny. Tento způsob je sice vytlačovaný povrchovou montáží, ale stále nachází své uplatnění. Hojně jsou využívány v amatérských podmínkách, kde si uživatel vyrobí vlastní plošný spoj o jedné vrstvě, ale také v profesionální výrobě, kde jsou součástky s vývody využívány ve smíšené montáži. Plošný spoj je nejprve z obou stran osazen povrchovou montáží a následně vývodovými součástkami. Jedná se hlavně o těžké součástky jako jsou transformátory nebo tlumivky, výkonové součástky nebo součástky, u kterých je potřeba lepší stabilita kvůli mechanickému namáhání – např. konektory, svorky. Své uplatnění však nachází v dnešní době také jednoduše proto, že veškeré drátové součástky není možné vyrobit pro technologii SMT, anebo proto, že v některých případech se nákup SMD oproti součástkám s drátovými vývody nevyplatí ekonomicky.

1.2 Hromadná výroba DPS

Ke hromadnému osazování desek plošných spojů dochází ve střední a velké výrobě. Jedná se o několik procesů, do kterých vstupuje deska plošných spojů a součástky, které mají být osazeny podle osazovacího schématu. Výstupem je poté osazený a opticky v každém kroku zkontrolovaný plošný spoj. K optické kontrole dochází po jednotlivých operacích z důvodu včasného zjištění chyb a následné opravě, neboť zjištění chyb až v pozdějších krocích je ekonomicky mnohonásobně náročnější. Automatické pájecí linky jsou samozřejmě individuálně nastavitelné a výrobce může využít pouze část automatického procesu. [1]

1.2.1 Příprava před osazením

Před samotným procesem osazování a přetavení je potřeba výrobní proces připravit pro určitou zakázku. Především se jedná o vyskladnění potřebných desek plošných spojů a SMD součástek určených k osazení těchto desek.

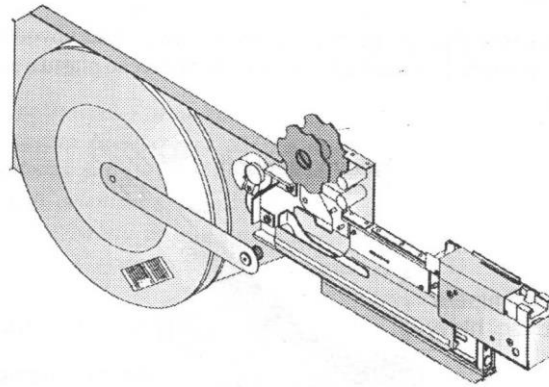
Desky plošných spojů jsou po vyskladnění umístěny na určitou dobu do temperovacích skříní, kde dochází k temperování (ohřívání) při dané teplotě (asi 80°C). Tento krok je velice důležitý k odstranění vlhkosti z desky, kterou deska absorbovala v průběhu zaskladnění. Tato vlhkost by mohla neblaze ovlivnit vlastnosti desky. Pokud by totiž k temperování nedošlo, zůstala by vlhkost v desce do procesu přetavení, kde by vlivem rychlé změny teplot mohlo dojít k delaminaci. Delaminace je oddělení jednotlivých vrstev plošného spoje vlivem vlhkosti a náhlé změny teplot. Po temperování se desky značí sériovými čísly, které jsou následně přiřazeny k zakázce.

Pro osazovací automaty je pak nutné vyskladnění SMD součástek, které se nacházejí v různých baleních. Nejčastěji můžeme nacházet SMD součástky balené v takto:

- Součástky v pásech
- Tyčové zásobníky
- Paletové zásobníky

Součástky v pásech

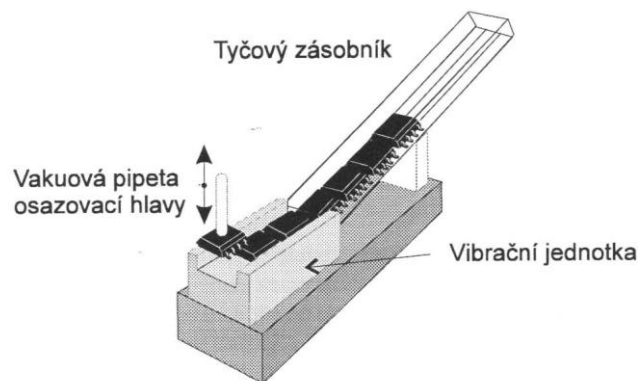
V dnešní době nejčastěji využívaná metoda balení SMD součástek. Vhodné jak pro velké série, kde je vysoká spotřeba, tak pro menší, kde se mění typy desek plošných spojů. Mezi výhody můžeme zařadit snadnou výměnu a doplňování, krátké cykly vlivem malých odstupů od jednotlivých součástek, dále pak zaručují ochranu proti záměně polarity. Součástky v pásech jsou umístěny v kotouči, jehož šířka je závislá na velikostech součástek. Šířka pásu má pak dopad na velikost šířky zásobníku, do něhož je kotouč připevněn. Zásobník funguje na mechanickém principu, kdy se po odebrání součástky posune pás o definovanou vzdálenost a odstraní tak ochrannou fólii z další součástky, čímž ji připraví k odběru. Připravené zásobníky s pásy jsou následně vloženy do automatu k osazování SMD součástek. [1]



Obr. 1 Pásový zásobník [1]

Tyčové zásobníky

Své využití mají především u integrovaných obvodů o malém až středním počtu vývodů. Princip je takový, že vibrační člen posouvá součástku až do míst, kde je součástka odebrána vakuovou pipetou osazovací hlavy. [1]



Obr. 2 Tyčový zásobník [1]

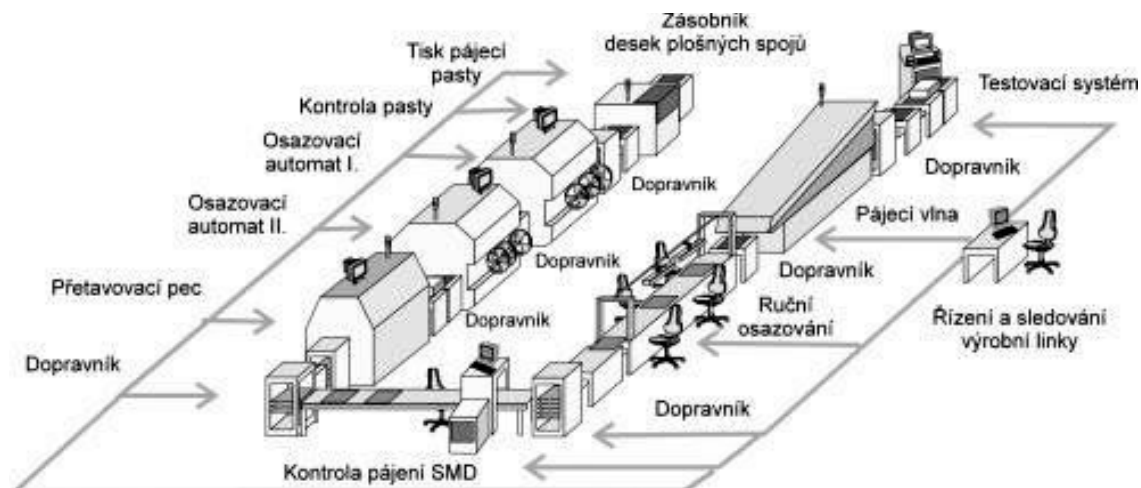
Paletové zásobníky

Využívány především u velkých integrovaných obvodů s velkým počtem vývodů a malými roztečemi mezi těmito vývody. [1]

1.2.2 Automatická pájecí linka

V automatickém procesu můžeme pájet jak součástky SMD, tak součástky s drátovými vývody. Celá automatizovaná linka může tedy vypadat takto:

- Zásobník DPS
- Tisk pájecí pasty
- Kontrola pasty
- Osazení SMD součástkami
- Optická kontrola osazení SMD součástek
- Přetavovací pec
- Kontrola pájení SMD
- Osazení součástek s drátovými vývody
- Pájecí vlna
- Kontrola pájení vlnou
- Elektrická kontrola



Obr. 3 Automatická pájecí linka [10]

1.2.2.1 Podavač DPS

Slouží k dodání desky umístěné v zásobníku, která je určena k osazení. Desky jsou umístěné v patrech nad sebou a výtahovým systémem se postupně posouvají na dopravník. Počet desek připravených v podavači je dán zakázkou a kapacitou podavače DPS.

1.2.2.2 Nanesení pájecí pasty

Pájecí pasty se využívají hlavně při osazování SMD součástkami. Jejich největší výhodou je nanesení přesného požadovaného množství na vývody plošného spoje. Množství nanesené pasty se liší podle velikosti plošek a součástek.

Pájecí pasta je tvořena dvěma složkami. První složkou je tavidlo a druhá je slitina kovů ve formě miniaturních kuliček. Existuje několik druhů tavidel, ale nejčastěji je využíváno přírodní pryskyřice (kalafuna). Stejně tak existuje mnoho druhů slitin kovů – liší se buď samotnými prvky, nebo procentuálním zastoupením těchto prvků.

Pájecí pasty můžeme dělit jak podle použité slitiny, tak podle obsaženého tavidla. Dělení podle slitin je na olovnaté a bezolvnaté. Podobně jako ostatní druhy bezolvnatých pájek vykazují i bezolvnaté pájecí pasty horší vlastnosti než pájecí pasty olovnaté. Z nařízení Evropské unie (RoHS) je však pájení olovnatými pájkami až na výjimky zakázáno. Tyto výjimky jsou vztaženy na přístroje využívané především ve zdravotnictví, letectví a automobilovém průmyslu, kde je za potřebí lepších spojů, které olovnaté pájky vykazují. Podle obsaženého tavidla se pájecí pasty dělí na vyžadující čištění a bezoplachové pasty. Bezoplachové pasty jsou sice nákladnější, ale jak název napovídá, nevyžadují po přetavení oplach, což ušetří v procesu výroby čas a tím i náklady.

Samotné nanášení pájecí pasty probíhá třemi způsoby:

- Tisk přes šablonu
- Síťotisk
- Dispenze

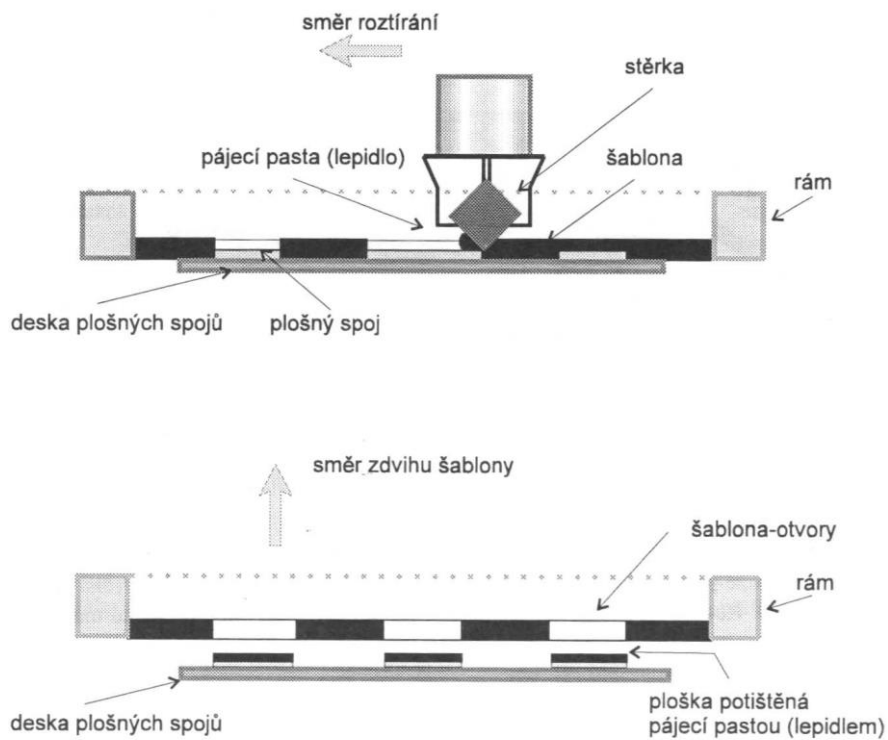
1.2.2.2.1 Šablona

Nejvíce využívaná metoda pro nanášení pájecí pasty na desky plošných spojů je v dnešní době tisk přes šablonu. Šablony jsou vyrobeny z pevného materiálu, nejčastěji z nerezové oceli. Otvory do těchto šablon jsou leptány nebo řezány v místech, kde má být nanesená pájecí pasta skrz šablonu na tištěný spoj.

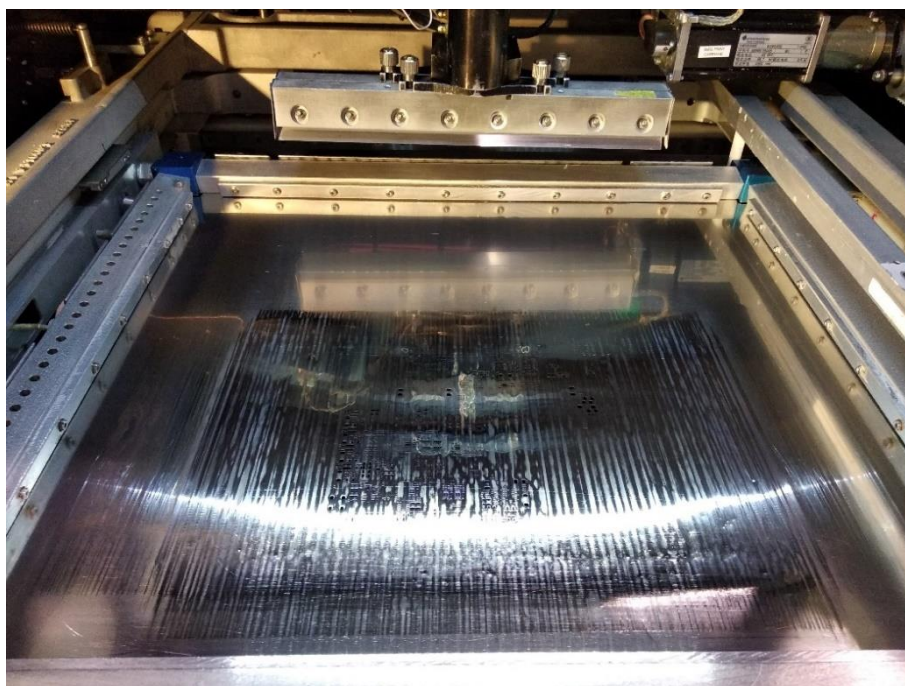
Šablona je umístěna v rámu, který zabraňuje prohýbání a tím vyšší kvalitu nanesení pasty. Dopravník desek plošných spojů dopraví desku do přístroje pro šablonový tisk na jasně definované místo určené programem. Následně je deska tlakem přitlačena k šabloně tak, aby mezi deskou a šablonou nevznikala mezera. Odstraněním mezery se zamezí tomu, aby se pájecí pasta protlačila také na místa mimo plošky tištěného spoje, což by mohlo vést k vadám. Po přitlačení je pájecí pasta, která musí být nanesena v nadbytečném množství, tlačena stěrkou z nerezové oceli přes šablonu, čímž se nanese pasta na místa, kde má šablona otvory. Po nanesení pájecí pasty deska klesne zpět na dopravník a pokračuje na optickou kontrolu pájecí pasty (SPI). I přes přitlačení desky k šabloně mohou na šabloně zůstat zbytky pasty, které by ovlivnily kvalitu nanesení pájecí pasty na další desky. Proto je po každém procesu nanášení šablona automaticky očištěna ze spodní strany speciálním papírem.

Výhody nanášení pájecí pasty přes šablonu oproti síťu jsou především tyto:

- Nižší opotřebení, což znamená vyšší životnost
- Lepší soutisk šablony a desky
- Možnost tisknout jemnější motivy



Obr. 4 Princip tisku přes šablonu [1]



Obr. 5 Šablonový tisk [12]

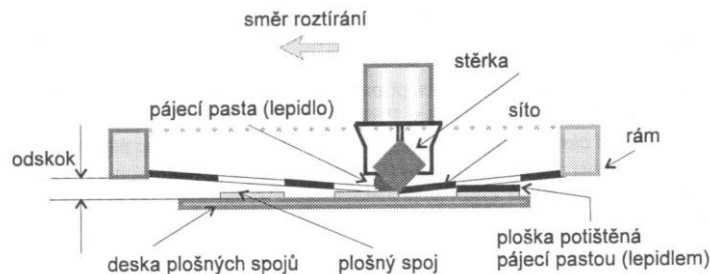
Na Obr. 5 vidíme síto umístěné v rámu připravené na šablonový tisk. Nad sítím je momentálně zvednutá stěrka.

1.2.2.2 Síto

Další metodou využívanou pro nanášení pájecí pasty je tisk přes síto. Materiálem pro výrobu síťovin bývá nejčastěji polyester. Motiv síta je vytvářen tak, že na síťovinu je nanášena fotocitlivá emulze, na kterou je přiložen požadovaný obrazec s místy, kde má být nanášena pájecí pasta. Pomocí UV záření fotocitlivá vrstva exponuje a nakonec se motiv vyvolá. Následně je síto uchyceno do rámu. Princip nanášení je podobný jako u šablonového tisku s tou výjimkou, že síto nebývá z pevného materiálu, takže se při nanášení prohýbá. Rozdíl můžeme najít také v používané stěrce, která může být narozdíl od tisku přes šablonu z polyuretanu.

Výhody tisku pájecí pasty přes síto v porovnání s tiskem přes šablonu:

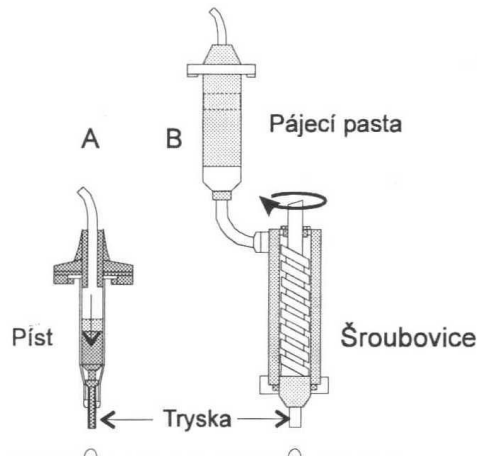
- Nižší náklady na výrobu síta
- Možnost tisku větších ploch
- Možnost vyšší rychlosti roztírání



Obr. 6 Princip síťotisku [1]

1.2.2.3 Dispenze

Dispenze není v hromadné výrobě vzhledem k nízké rychlosti nanášení využívána pro nanášení pájecí pasty. Své uplatnění má pouze v případě nanášení pájecí pasty do míst, kde je obtížné nanést pastu pomocí šablony nebo síta. Dále může být dispenze využita po optické kontrole pasty (SPI) na místech, kde je operátorovi hlášena chyba a je potřeba upravit množství pájecí pasty. Dispenzory se vyrábí ve dvojím provedení – ruční a strojní, kdy v automatické výrobě jsou využívány především strojní pro vyšší komfort při používání. Dále se mohou lišit způsoby vytlačování pájecí pasty, které je zajištěno buď pomocí tlaku způsobeného vzduchem, nebo pomocí šroubovice.



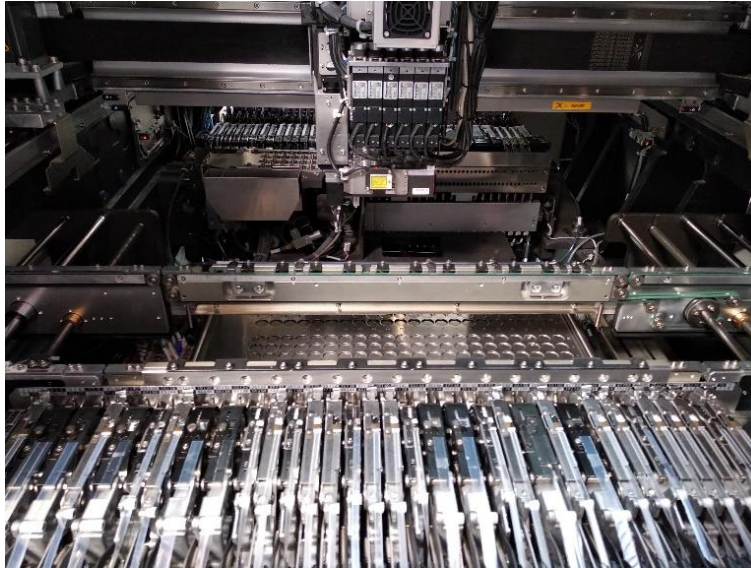
Obr. 7 Dispenze [1]

1.2.2.3 SPI (solder paste inspection) – kontrola nanesené pájecí pasty

Tento krok bude probrán v kapitole 2.

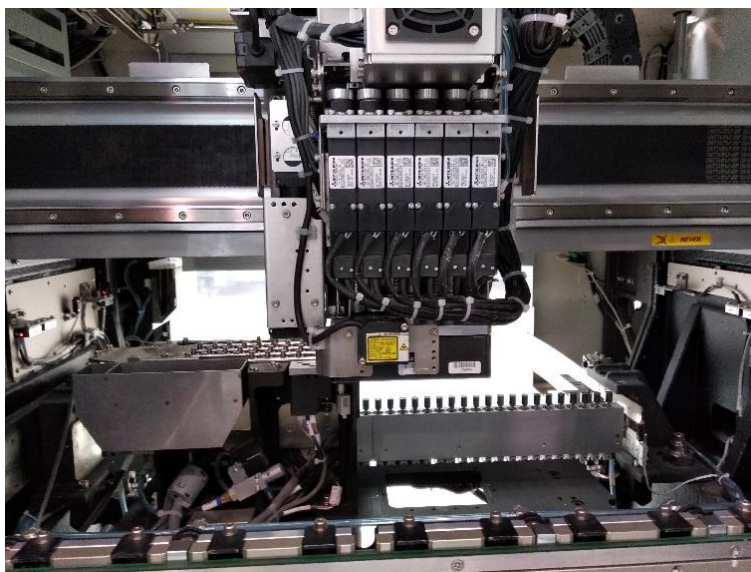
1.2.2.4 Osazovací automat

Osazovací automaty jsou nedílnou součástí v hromadné výrobě. Hlavní úlohou osazovacího automatu je přesné umístění součástky na přesně dané místo pokryté pájecí pastou. Na trhu je v dnešní době mnoho modelů, které se liší jak v rychlosti osazování, tak v množství funkcí. Některé automaty jsou vybavené dispenzorem, který zajistí kromě osazení také nanesení pájecí pasty.



Obr. 8 Pohled do osazovacího automatu [12]

Na Obr. 8 je pohled osazovacího automatu. V popředí se nachází pásové podavače SMD součástek. V horní části snímku je vidět osazovací hlava se šesti tryskami pro uchopování SMD součástek.



Obr. 9 Hlavice osazovacího automatu [12]

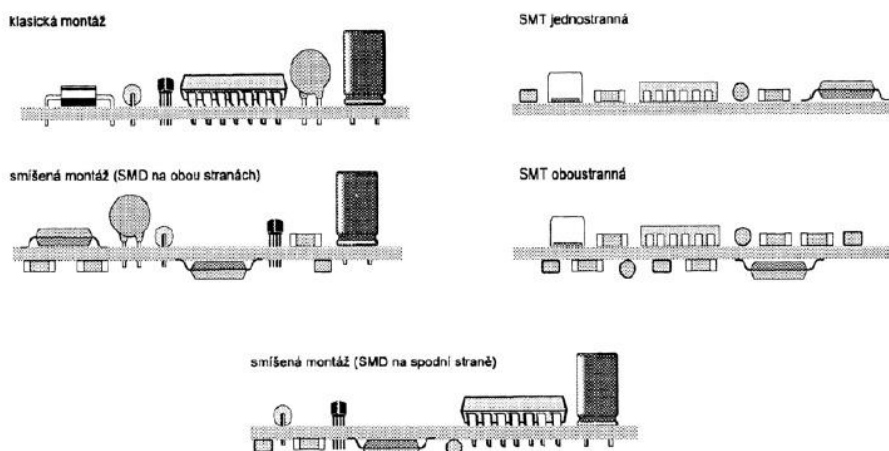


Obr. 10 Náhradní trysky [12]

Důraz je kladen především na rychlost osazení desky, na kterou má vliv nejen rychlost automatu, ale také provedení desky. Pro firmu osazující desky plošných spojů je tedy důležitá rychlost osazení desky, nikoli rychlost osazovacího automatu.

Existuje více způsobů provedení desek plošných spojů, které závisí na metodě osazování součástek (SMT a THT) a také na počtu osazovaných stran desky. Jsou to:

- Klasická montáž – pouze THT
- SMT jednostranná
- SMT oboustranná
- Smíšená montáž – SMT oboustranná a THT
- Smíšená montáž – SMT jednostranná a THT



Obr. 11 Způsoby montáže součástek na DPS [1]

1.2.2.4.1 Klasická montáž – pouze THT

Tato montáž je možná v případě malého počtu součástek osazovat ručně. V případě automatického osazování jsou součástky přenášeny ze zásobníku uchopením a vložením do otvorů v desce. Následně jsou drátové vývody součástky mírně ohnuty, aby nedošlo k uvolnění nebo posunu součástky během přepravy. Následně jsou součástky THT pájeny vlnou ze strany vývodů.

1.2.2.4.2 SMT jednostranná

Pro tento způsob osazení desek plošných spojů je prvním krokem nanesení pájecí pasty. Následuje kontrola nanesené pasty. Dále je na řadě samotné osazení SMD součástkami. Uchopování součástek je zajištěno pomocí podtlaku vytvářeného v osazovací hlavici. Samotná součástka je uchopena tryskou připojenou na tuto hlavici a následně umístěna na její pozici na DPS. Podle velikosti a hmotnosti součástek se mění také trysky. Nakonec jsou součástky pájeny přetavením.

1.2.2.4.3 SMT oboustranná

Tento způsob je téměř identický jako u SMT jednostranné. Po zapájení jedné strany dojde k otočení desky na druhou stranu. Následuje opět nanesení vodivé pájecí pasty, kontrola nanesené pasty a osazení SMD součástkami. Po osazení součástek podle osazovacího schématu dochází k přetavení nanesené pájky.

1.2.2.4.4 Smíšená montáž

Toto osazování je ze všech způsobů technologicky nejnáročnější. Osazují se jak součástky SMD, tak součástky s drátovými vývody. U tohoto postupu je nutné nejprve osadit SMD součástky a až následně osazovat metodou THT. Smíšenou montáž můžeme dělit podle toho, kde se nacházejí SMD součástky. Může to být na straně, kde jsou vyvedeny drátové vývody, na straně opačné, nebo na obou.

V prvním případě, tedy když osazujeme SMD součástky na stranu THT součástek, nejprve naneseleme pájecí pastu, osadíme SMD součástky a pájíme přetavením. Dále desku osadíme THT součástkami, jejichž vývody pájíme vlnou.

U pájení SMD součástek na stranu vývodů součástek THT upevníme SMD součástky pomocí lepidla. Následně desku otočíme a osadíme THT součástky, které pájíme vlnou.

Poslední způsob je technologicky nejnáročnější. Nejprve pájíme přetavením SMD součástky na straně THT součástek. Následně desku otočíme a pomocí lepidla uchytkáme SMD součástky na straně vývodů. Nakonec desku opět otočíme a osadíme THT součástkami, jejichž vývody pájíme vlnou.

1.2.2.5 AOI (automated optical inspection) – automatická optická kontrola osazení

Tento krok bude probrán v kapitole 2.

1.2.2.6 Pájení přetavením – reflow

Výhodou pájení přetavením oproti pájení vlnou je možnost osazovat i součástky s malou roztečí vývodů (typicky integrované obvody), které by v případě pájení vlnou musely být osazeny dodatečně. Při pájení přetavením totiž dochází k omezení tvorby můstků mezi blízkými spoji. [6]

Před samotným pájením je na desku nanášena pájecí pasta a následně jsou na ní osazeny součástky. Následuje sušení pasty, které se provádí kvůli odpaření kapalných složek pasty a aktivace tavidla, které pasta obsahuje. Sušení probíhá v závislosti na druhu pájecí pasty, ale přibližně se pohybuje okolo 120°C. [6]

Existuje několik možností pájení přetavením:

- ohřevem infračervenými zářiči
- ohřevem laserem
- ohřevem vedením tepla
- ohřevem horkým plynem
- ohřevem kondenzací par

1.2.2.6.1 Ohřevem infračervenými zářiči

Plošný spoj je nejprve přehřátý a následně je dopravníkem přesunut pod halogenové zářiče, které mají vlnovou délku v rozmezí od 0,8 do 400 mikrometrů. Nevýhodou pájení IR zářiči je nerovnoměrné prohřívání desky, protože část záření není pohlceno, ale odraženo. Záleží na mnoha aspektech povrchu jako jsou materiál, barva, drsnost nebo úhel dopadajícího záření. Z tohoto důvodu dochází k nerovnoměrnému prohřívání, což vede k rozdílné kvalitě pájených spojů. [6]

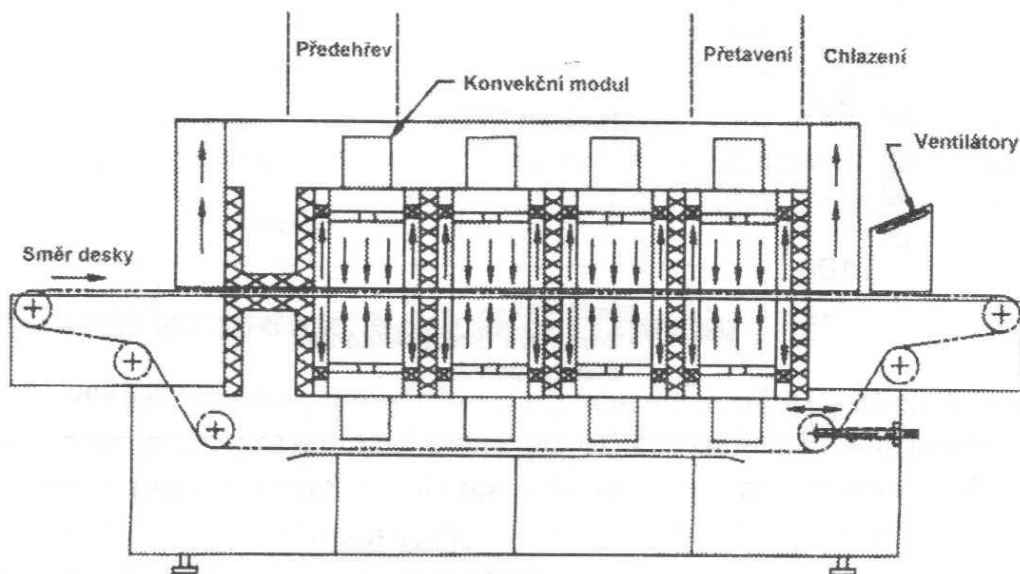
1.2.2.6.2 Pájení laserem

Laserový svazek je směřován na jednotlivé spoje, čímž se ohřívá pájecí pasta na teplotu, kdy dojde k jejímu přetavení. Tato metoda je využívána především k pájení součástek, které není možné připájet vlnou nebo přetavením kvůli náchylnosti součástky na teplotu. Pájení laserem je tedy spíše metodou pro osazení jednotek součástek, pro osazení celé desky plošného spoje se nevyužívá z důvodů časových, ale i ekonomických. [6]

1.2.2.6.3 Ohřev vedením tepla

Tento ohřev nachází využití v některých typech tunelových pecí. Zde dochází v jednotlivých zónách k ohřevu odporovým vinutím a odtud pak dochází sáláním a konvekcí k ohřevu desek plošných spojů.

Ohřev vedením tepla je použit ale i u různých typů páječek. Ty jsou používány například k osazování THT součástek nebo při opravách elektronických zařízení. V tomto případě pájení je pájecí hrot v kontaktu přímo s roztavenou pájkou a dochází tedy právě k ohřevu vedením tepla. [6]



Obr. 12 Ohřev vedením tepla [1]

1.2.2.6.4 Ohřev horkým plynem

Pro ohřev horkým plynem se nejčastěji užívá vzduch, ale může být použit například i dusík, který zároveň zabraňuje oxidaci na pájených spojkách. Ohřátý plyn je hnán ventilátory na dopravník desek plošných spojů. Výhodou této metody je oproti ohřevu IR zářiči lepší prohřátí desky z důvodu menší závislosti teploty na aspektech povrchu (např. materiál, barva, drsnost). Nevýhodou tohoto procesu je delší čas, za který nastane přetavení. Někdy bývá tento způsob kombinován s IR zářičem. [6]

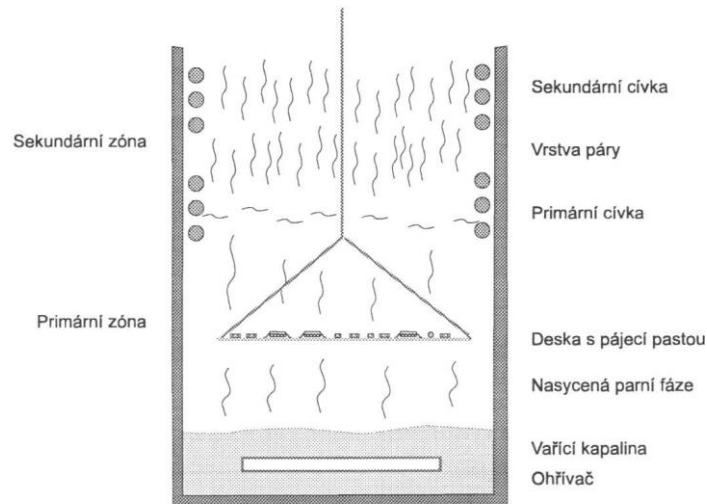
Tato metoda může být také využita například při opravách plošných spojů k výměně součástek, kdy jsou kontakty součástky ohřáté na teplotu roztavení pájky a následně je součástka odejmuta a nahrazena jinou.



Obr. 13 Pec pro přetavení horkým plynem [14]

1.2.2.6.5 Ohřev kondenzací par

Při tomto procesu pájení je osazená deska ohřívána teplem pomocí kondenzace pracovní kapaliny. Na plošný spoj se nanese pájecí pasta a následně je osazen součástkami. Takto osazená deska se vloží do pece určené pro pájení ohřevem kondenzací par. Pracovní kapalinou, která bude kondenzovat je například galden, což je kapalina s vysokou stabilitou v širokém rozsahu teplot (55–270°C). Desky nejsou umístěny v galdenu, ale v prostoru, kde se nacházejí páry této kapaliny. Po kondenzaci na plošném spoji dojde k ohřátí a zapájení kontaktů. Zkondenzovaná kapalina skapává zpět a je znovu ohřívána k varu. [6]



Obr. 14 Ohřev kondenzací par [1]



Obr. 15 Pec pro přetavení kondenzací par [13]

Také po přetavení dochází k AOI pro kontrolu přetavení součástek.

1.2.2.7 Pájení tekutou pájkou – flow

Existují tři základní druhy pájení tekutou pájkou:

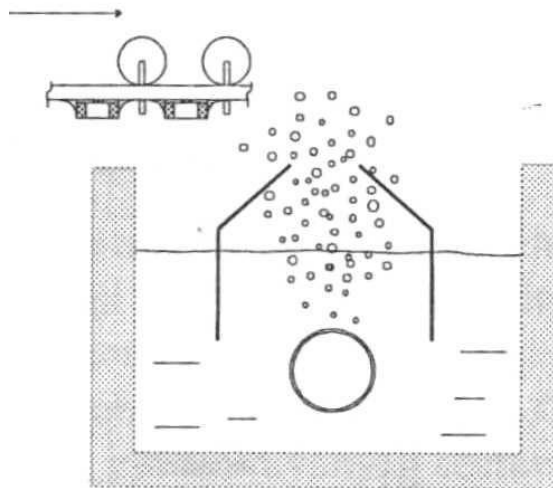
- pájení vlnou
- pájení vlečením
- pájení ponorem

1.2.2.7.1 Pájení vlnou

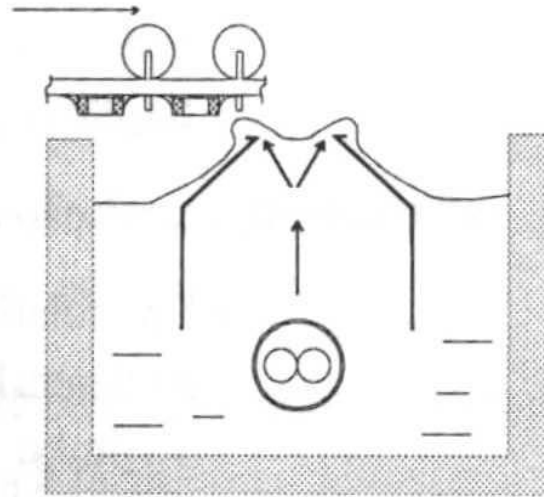
Pájení vlnou je velmi rozšířenou metodou hlavně kvůli využití. Pomocí vlny lze pájet nejen součástky s drátovými vývody, ale i SMD. Pro povrchovou montáž je využitelné z metod pájení tekutou pájkou právě pájení vlnou.

Před samotným procesem pájení vlnou se musí v případě povrchové montáže součástky k desce nejprve pomocí lepidla přilepit, aby je vlna nesmyla. Pro tento účel se využívají lepidla s malou roztékavostí a dobrou adhezí k desce a součástce. Dále je potřeba, aby lepidlo zajistilo dostatečnou pevnost spoje. Důležité je také, aby lepidlo nebylo elektricky vodivé.

Nanášení tavidla má hlavní funkci očištění kontaktu před pájením a následně zabránění oxidaci při nanášení pájky, způsobené reakcí s ovzduším. Nanesení tavidla může probíhat mnoha způsoby. Tavidlo může být součástí roztavené pájky, kde se nachází na samotné vlně. Další možností nanášení může být pěnový dávkovač, který patří k levnějším metodám nanášení tavidla. Princip je takový, že v nádobě s tavidlem jsou pomocí „provzdušňovač“, do kterého proudí vzduch, vytvářeny malé bublinky, stoupající vzhůru k desce, kde prasknou a tím na ni nanesou tavidlo. Nevýhodou této metody je potřeba velkého množství tavidla, což vede k vyšším provozním nákladům. Další možností může být sprejový dávkovač, který rozprašuje tavidlo tryskami pomocí stlačeného vzduchu. Tento proces probíhá přes šablonu dané desky.



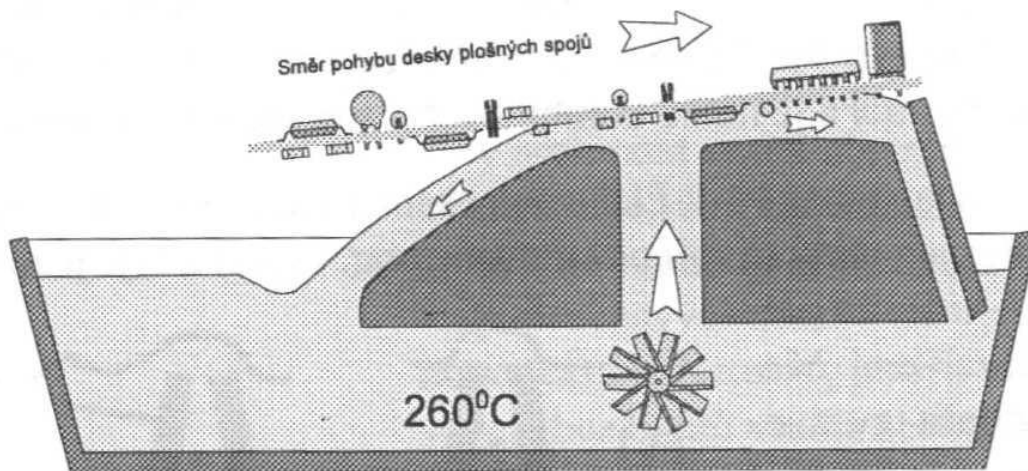
Obr. 16 Pěnový dávkovač tavidla [1]



Obr. 17 Vlnový dávkovač tavidla [1]

Při samotném pájení vlnou je roztavená pájecí slitina ve vyhřívané vaně poháněna čerpadlem, které vytváří vlnu. Tato vlna je ještě formována tryskami. Deska plošného spoje následně prochází nad touto vlnou s malým sklonem (asi 4-8°) a dochází jejímu smáčení roztavenou pájkou. Tím jsou kontaktní plošky se součástkami zapájeny. Kde se nenachází kontaktní plošky určené k pájení je nanesena nepájevá maska, na kterou se roztavená pájka nepřipájí. [6]

Aby nedošlo k poškození některých součástek náchylných na teplotu, neboť jsou po dobu několika sekund ponořeny do roztavené pájky, jejíž teplota se pohybuje okolo 140–260°C, jsou tyto součástky osazovány a pájeny dodatečně.



Obr. 18 Jednoduchá vlna [1]



Obr. 19 Náběh vlny [12]

Na Obr. 19 vidíme začátek procesu vlny, kdy začíná být roztavená pájka poháněna.

1.2.2.7.2 Pájení vlečením

Deska je vlečena po klidné hladině s roztavenou pájecí slitinou ve vyhřívané vaně. Pájení vlečením se tedy liší od pájení vlnou v tom, že pájecí slitina je poháněna čerpadlem jen minimálně. Liší se také ve sklonu, kde se u pájení vlnou pohyboval od 4° do 8°, zatímco dopravník DPS je u pájení vlečením rovnoběžně s nádobou. Vzhledem k porovnání s metodou pájení vlnou se pájení vlečením příliš nevyužívá. [6]

1.2.2.7.3 Pájení ponorem

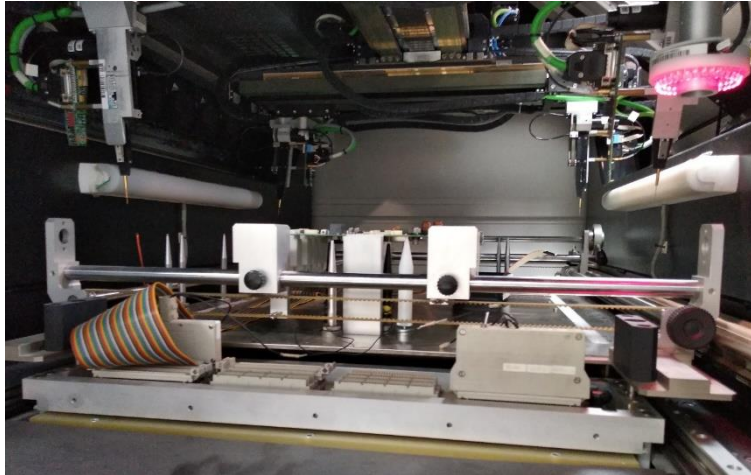
Stejně jako pájení vlečením nenachází pájení ponorem větší využití. Deska je ponořena do roztavené pájecí slitiny a následně vyjmuta. Využití je pouze v malých sériích nebo při výrobě prototypů. [6]

1.2.2.7.4 Selektivní pájení

Pájení pomocí malé trysky, která vytváří vlnu. Selektivní pájení je vhodné u desek, které jsou osazovány nízkým počtem součástek s drátovými vývody a není tedy potřeba pájení pomocí vlny. Před pájením je na požadované spoje nanášeno tavidlo. Tento proces probíhá zpravidla také selektivně, takže je tavidlo nanášeno pouze na body DPS, které budou pájeny. Následně se DPS pomocí dopravníku posune k pájení, kde na body, kam bylo nanášeno tavidlo, přilehne tryska, ze které proudí, podobně jako u vlny, roztavená pájka, čímž dojde k zapájení vývodu součástky

1.2.2.8 Elektrická kontrola

Elektrická kontrola probíhá pomocí jehlového pole. Existují dva druhy tohoto pole, přičemž první možností je statické jehlové pole. U této možnosti je potřeba zhotovit jehlové pole pro každý typ desky, což je oproti druhé metodě, kterou je létající jehlové pole, nevýhoda. Kontrola probíhá tak, že jehly, které jsou kontakty měřících přístrojů, postupně prověřují elektrické vlastnosti plošného spoje kontaktováním vybraných plošek.



Obr. 20 Kontrola elektrický jehel [12]

Na Obr. 20 jsou vidět jehly v momentálně neaktivní poleze na krajích snímku.

1.2.2.9 „Depanelizace“ a naskladnění

Na konci výrobního procesu hromadné výroby probíhá tzv. „depanelizace“, což je vyříznutí originálního tvaru desky plošných spojů z panelu. Panel je důležitý především v posouvání na dopravníku, protože má pravidelný tvar (většinou obdélník).

Po vyříznutí končí proces výroby a deska je uskladněna.

1.3 Kusová výroba DPS

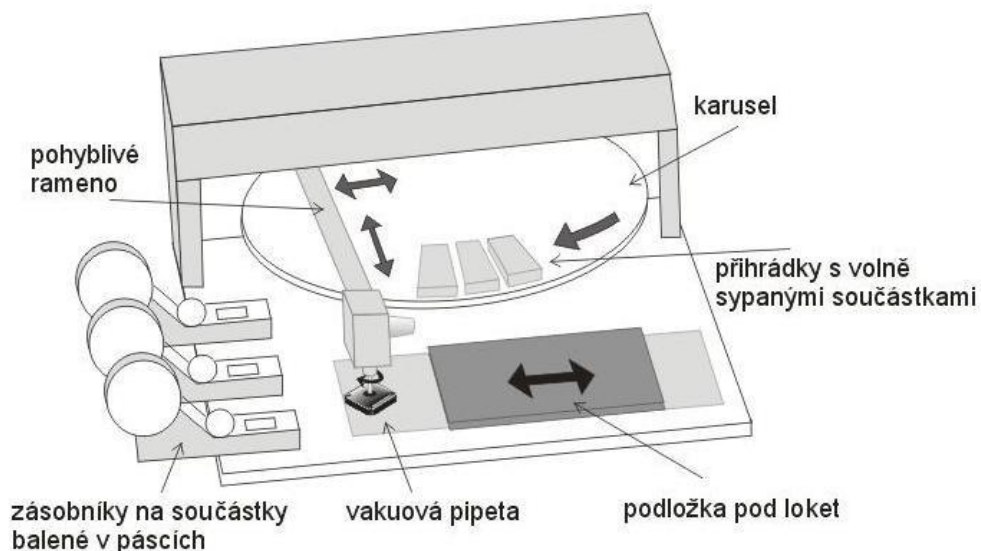
Ke kusové výrobě dochází především v malovýrobě, kde je více druhů desek plošných spojů, ale výroba je pouze zakázková a v malém počtu. Protože se vyrábí spíše více druhů desek po malých počtech kusů, výrobci se tedy nevyplatí výroba šablon nebo sít pro nanášení pájecí pasty a ani nákup ostatních komponentů do automatické pájecí linky. V malovýrobě se proto využívá ruční práce jak pro nanášení pasty, tak i pro osazování součástek SMT i THT.

1.3.1 Osazení SMD součástkami

Osazení desky SMD součástkami probíhá ve více fázích. Nejprve je potřeba desku důkladně zbavit nečistot a mastnoty. K tomu se využívá např. izopropylalkohol (IPA). Následně se deska uchytí na osazovacím pracovišti. Po uchycení desky je nanášena pasta na kontaktní plošky. Toto nanášení je nejčastěji prováděno dispencí. Nanášení pasty je oproti automatickému osazování samozřejmě méně přesné a není identické, což vede mnohdy k různým vadám. Jakmile je pájecí pasta nanášena na vyvedené plošky DPS, začne samotné osazování. To probíhá podle osazovacího listu (schématu), který má pracovník před sebou. Součástky mohou být uchopovány, podobně jako u automatického osazování pomocí vakuové pipety, a následně usazeny podle osazovacího listu. Dále mohou být využívány také pinzety.

Po osazení celé desky následuje pájení pájecí pasty. Toho můžeme docílit pájením přetavením, o kterém jsem se již zmiňoval.

Pokud má deska plošných spojů vyvedené plošky z obou stran, následuje ten samý proces z druhé strany – tedy nanášení pájecí pasty, osazení podle osazovacího schématu a pájení přetavením.

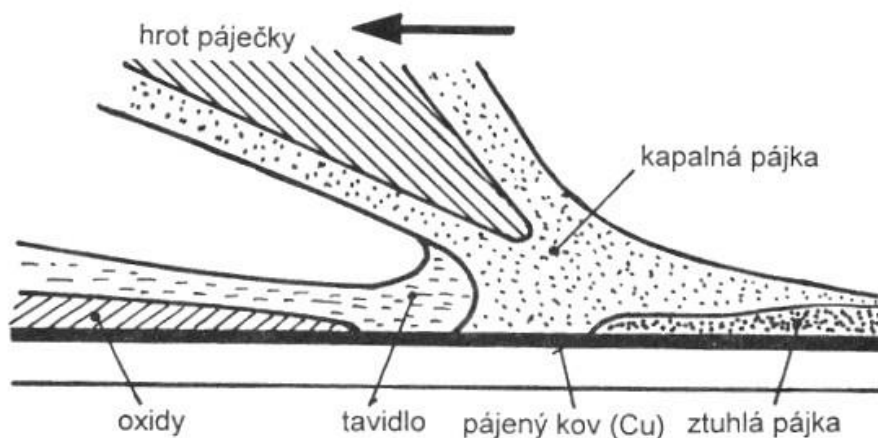


Obr. 21 Ruční osazovací pracoviště [1]

1.3.2 Osazení součástkami s drátovými vývody

Když je deska osazená SMD součástkami, mohou být pájeny součástky s drátovými vývody. Před tím se ale deska musí zkontrolovat, zda došlo ke správnému zapájení součástek, tedy zda nedošlo k nějakým vadám (např. zkraty kontaktů, tombstone, voidy). Pokud dojde k nalezení nějakých takových vad, je tyto vady potřeba odstranit. Toho se docílí například použitím tavidla nebo odpájením součástky a nahrazení součástkou novou.

Pokud je tedy deska zkontrolována a případně opravená, může se přejít na samotné osazování THT součástek. Ty jsou vkládány do otvorů na správné místo podle osazovacího listu. Poté se vývody této součástky z druhé strany mírně ohnou, aby nedošlo k vypadnutí nebo nadzvednutí součástky při pájení. Dále je vývod součástky nahřát páječkou (hrotovou, transformátorovou) a přiložením trubičkové pájky, která obsahuje také tavidlo, je připájen k plošnému spoji. Důležité je použít vhodné množství pájky, aby nedocházelo k různým defektům.



Obr. 22 Pájení hrotovou páječkou [17]

Jakmile jsou osazeny všechny součástky, je potřeba desku omýt, neboť se na ní nachází zbytky tavidla a jiné nečistoty.

Čištění desky může probíhat například:

- mícháním
- sprejováním
- ponořením
- ultrazvukově

Nejlépeších výsledků se dosahuje při ultrazvukovém čištění, u kterého je ovšem riziko poškození krystalů.

Dále tedy může být osazená a umytá přemístěna na další stanoviště výrobního procesu, kde dochází optické kontrole osazené desky.

1.3.3 Optická kontrola

Optická kontrola desek plošných spojů bude popsána v kapitole 2

1.3.4 Elektrická kontrola

Probíhá podle oživovacího postupu k danému plošnému spoji. Pracovník zkouší elektrické vlastnosti osazené desky pomocí různých měření a zkoušek. I v tomto stádiu mohou být objeveny chyby, které byly na předchozích pracovištích přehlédnuty.

2 Vady vznikající při elektrotechnické montáži

2.1 Kontrola chyb v kusové výrobě:

V kusové výrobě je výskyt chyb mnohonásobně větší než u hromadné výroby. Je to způsobené především lidským faktorem, který ovlivňuje jak nanášení pasty, tak proces osazování. Na rozdíl od automatické linky zde může docházet k poškození již samotného plošného spoje nesprávným zacházením v procesu výroby. Pracovník je nucen s deskou manipulovat, u čehož může docházet k mechanickému poškození desky nebo k jejímu znečištění. V procesu výroby je nutné odhalovat chyby co nejdříve, čímž se následně snižují náklady na dodatečné opravy. Proto kontrola probíhá po každém úkonu procesu výroby.

V malých firmách bychom hledali automatické systémy pro kontrolu desek plošných spojů jen těžko. Ke optické kontrole naneseného množství pájecí pasty a také kontrole osazení součástek se tedy využívá méně nákladných zařízení. Jedná se o tyto způsoby kontroly:

- Pohledem
- Lupa
- Mikroskop

Po nanesení pájecí pasty dispensorem na vývody plošného spoje zkontroluje pracovník nejprve pohledem, zda je množství nanesené pasty dostatečné, nebo naopak zda není přebytečné. V nepřehledných místech pak pracovník využívá pomůcky pro detailní pohled, aby tak předešel co nejvíce chybám. Tyto pomůcky bývají nejčastěji lupa nebo mikroskop.

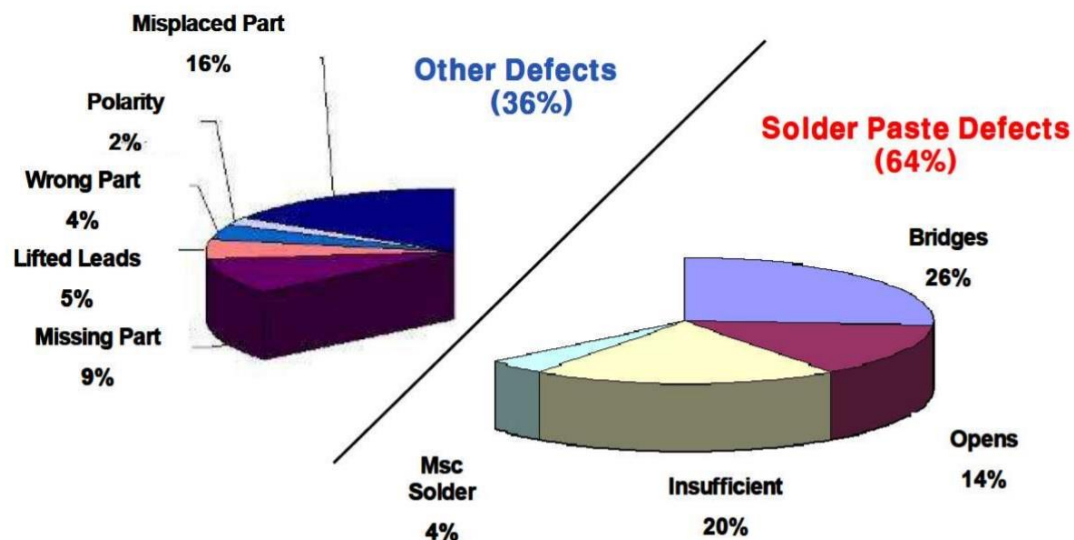
Po osazení a následném přetavení pájecí pasty, případně osazení a pájení součástek s drátovými vývody, přichází na řadu další optická kontrola. Pracovník opět pohledem nejprve porovná osazenou desku s osazovacím schématem. Porovnává především správnost součástek – typ, pouzdro, hodnota, polarita. Následně hledá chyby pájených spojů, které mohly vzniknout špatným nanesením pasty nebo přetavením. K detailnějšímu pohledu opět využívá lupy nebo mikroskop. V případě nalezení vadného pájeného spoje, nebo chyby pracovníků na předchozích pracovištích, je nezbytné před elektrickou kontrolou tyto závady odstranit a desku znovu očistit od nečistot.

Když je deska správně osazená a umytá, přichází na řadu poslední kontrola – elektrická. Pracovník zde pod napětím měří hodnoty mezi

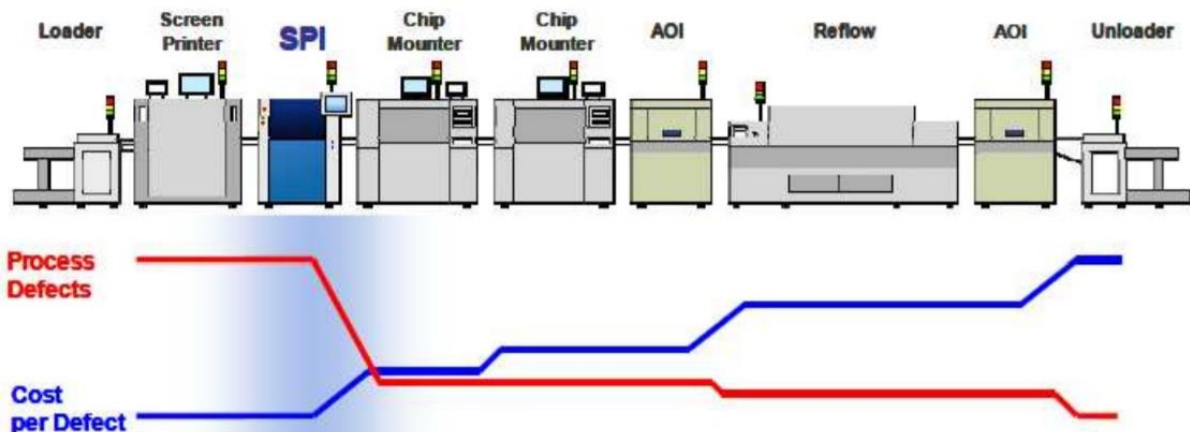
2.2 Kontrola chyb v hromadné výrobě:

2.2.1 SPI (solder paste inspection) – automatická kontrola pasty

Jedná se o velmi důležitý proces v automatické výrobě, kde více jak polovina chyb je zapříčiněna nesprávným nanášením pasty. Odhalení chybného množství nanesené pájecí pasty ulehčí náklady následných oprav. [16] Kamera snímá hodnoty, které porovnává s referenčními a v případě odchylky hlásí operátorovi chybu. Ta je následně operátorem opravena pomocí dispensoru.



Obr. 23 Procentuální zastoupení vad při pájení [16]



Obr. 24 Závislost včasného odhalení chyb na nákladech spojených s opravami [16]



Obr. 25 SPI (nanášeno správné množství pájecí pasty) [12]

Na Obr. 25 je bezchybná kontrola SPI. V případě problémů je operátor upozorněn červeným křížkem na potenciální chyby, které musí následně zkontrolovat a případně manuálně opravit.

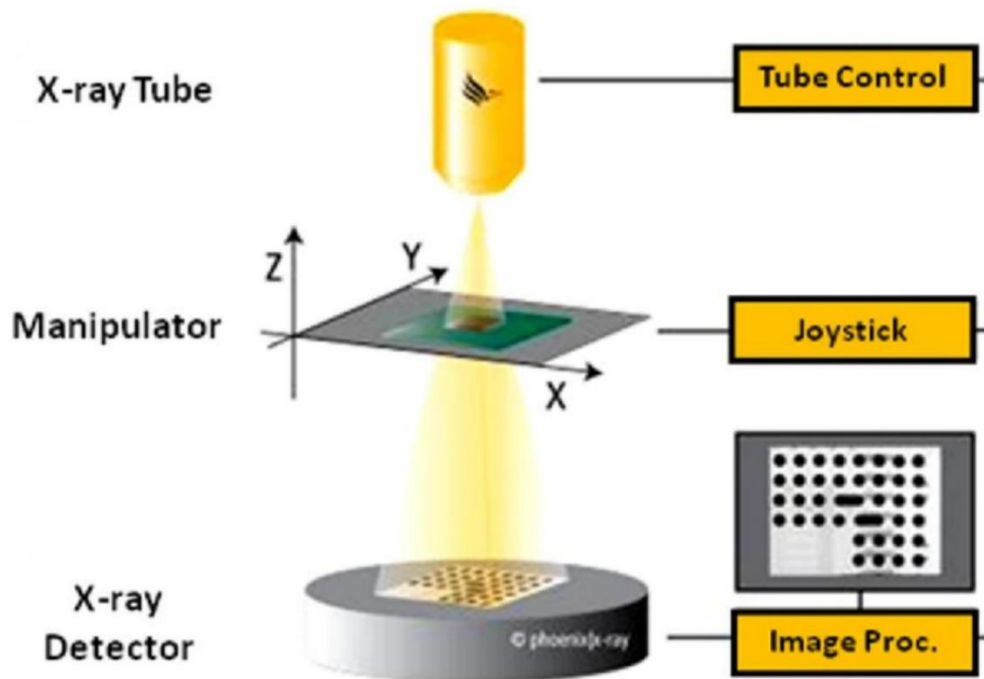
2.2.2 AOI (automated optical inspection) – automatická optická inspekce

Stejně jako SPI je AOI nedílnou součástí výrobní linky pro osazování DPS. Její zařazení můžeme nacházet za automatickým osazováním, kde porovnává osazenou desku s deskou referenční. Dále se AOI může nacházet za procesem přetavení, kde kontroluje kvalitu zapájených spojů. Velmi často se setkáme se zařazením za osazovací automat a také za proces přetavení, čímž dochází k vyšší přesnosti kontroly.

Jsou známy dva základní druhy podle využití technologie snímání. První je kontrola 2D, kde je snímána deska pouze shora. Tato metoda je méně přesná, protože neodhalí například součástku, která se při pájení nadzvedla. To by ovšem zvládla kontrola AOI s 3D technologií, která kromě snímku shora dokáže porovnávat kontrolovanou desku s deskou referenční z více úhlů. AOI kontrola však dokáže porovnávat pouze pohledem dostupné části, takže pro odhalení vad, které nejsou dostupné AOI se využívá RTG kontrola.

2.2.3 RTG kontrola

RTG kontrola se využívá pro kontrolu těch součástek, jejichž kontrola není možná pomocí AOI. Jedná se především o pájené spoje schované pod kontrolovanou součástkou, ale také se může využívat pro kontrolu poškození součástky.

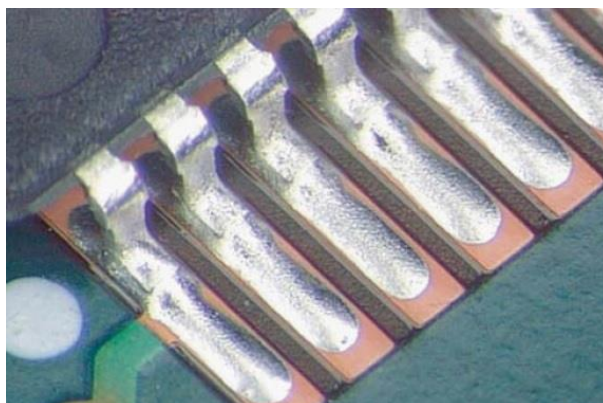


Obr. 26 Princip RTG kontroly [18]

2.3 Chyby pájených spojů

2.3.1 Odhalený základní kov

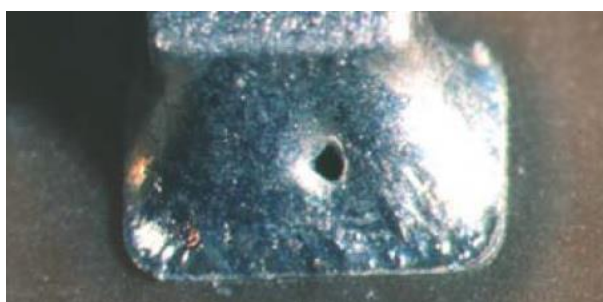
Tato závada vzniká nedostatečným množstvím nanesené pájecí pasty na vývody plošek DPS. To může být způsobeno chybným návrhem DPS, špatně navrženou nebo znečištěnou šablonou (sítem). Důvodem může být také horší smáčivost kontaktů, které mohly být poškozeny oxidací.



Obr. 27 Odhalený základní kov [4]

2.3.2 Dutinky po bublinách

Vznikají v důsledku vzduchové bublinky, která zůstane uvnitř pájeného spoje mezi částkami tavidla. Příčinou může být nesprávný pájecí profil, kdy dojde k prudkému nárůstu teploty. Dutinky mohou vznikat jak na povrchu (Obr. 28), tak uvnitř pájeného spoje.



Obr. 28 Dutinky po bublinkách [4]

2.3.3 Nedostatečné přetavení pájecí pasty

K nedostatečnému přetavení pájecí pasty v povrchové montáži dochází zejména kvůli špatně nastavenému teplotnímu profilu, když spoj není dostatečně prohřátý.



Obr. 29 Nedostatečné přetavení pájecí pasty [4]

2.3.4 Špatná smáčivost

Spoj je špatně smáčivý tehdy, kdy je při procesu pájení nedostatečné množství tavidla. Další možností vzniku špatně smáčeného spoje může být příliš dlouhé prohřátí (především při ručním pájení páječkou), kdy dojde k vypálení tavidla. Jednou z příčin pak může být také špatné skladování součástek. V tomto případě může dojít ke zoxidování.



Obr. 30 Špatná smáčivost [4]

2.3.5 Kulička vedle součástky

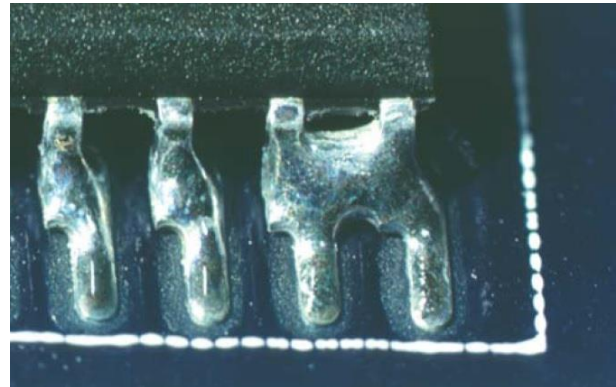
Tyto kuličky vznikají u součástek, na jejichž plošky bylo dodáno přebytečné množství pájecí pasty. Tyto kuličky mohou způsobit problémy, protože jsou vodivé a mohou tak vytvořit zkrat na DPS. Velikost kuliček se může pohybovat až do milimetrů.



Obr. 31 Kulička vedle součástky [4]

2.3.6 Můstek (zkrat)

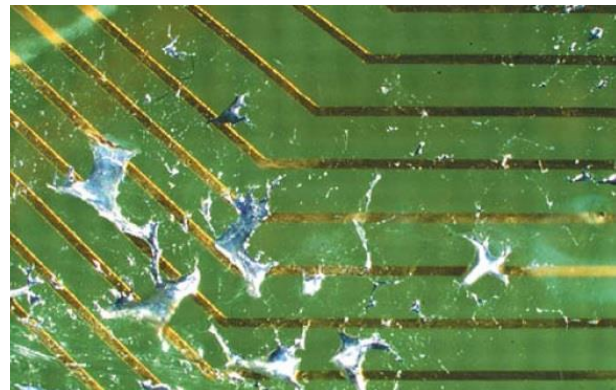
Můstky vznikají nesprávným nanesením pájecí pasty nejčastěji u součástek, jejichž kontakty mají malou rozteč. Při přetavení dojde k vodivému spojení. Příčinou může být také posunutí součástky, což je vidět na Obr. 32. K můstku dochází také kvůli špatnému návrhu DPS, kdy jsou například součástky příliš blízko sebe.



Obr. 32 Můstek (zkrat) [4]

2.3.7 Webbing (rozstřík pájky)

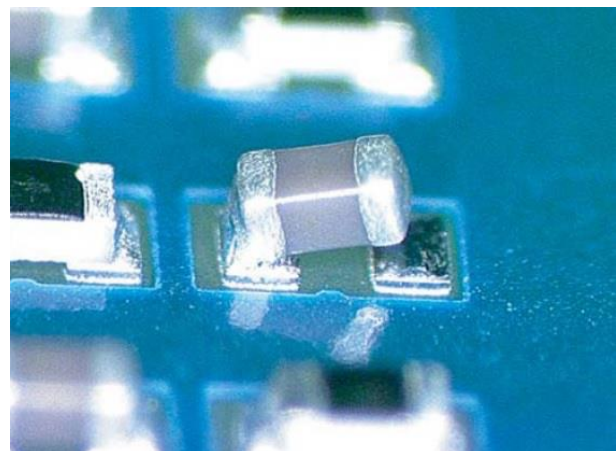
K webbingu dochází především ve dvou případech. Prvním ne nesprávné nanesení pájecí pasty při ručním osazování, kdy je pasta rozmazána na větší plochu nepájivé masky DPS. Dále pak webbing může vznikat během procesu pájení tekutou pájkou.



Obr. 33 Webbing (rozstřík pájky) [4]

2.3.8 Tombstone (náhrobní kámen)

Velice častá vada, se kterou se můžeme setkat při pájení, je tombstone. Nejčastěji nerovnoměrným nanesením pájecí pasty dojde k nadzvednutí součástky, takže nemůže vzniknout spoj na druhém vývodu součástky. Kromě nerovnoměrného nanesení pájky může být důvodem rozdílná smáčivost obou plošek, případně nedostatečné přitlačení součástky. Nakonec může chyba vzniknout při samotném návrhu DPS, kdy jsou plošky rozdílné velikosti různě prohřívány.



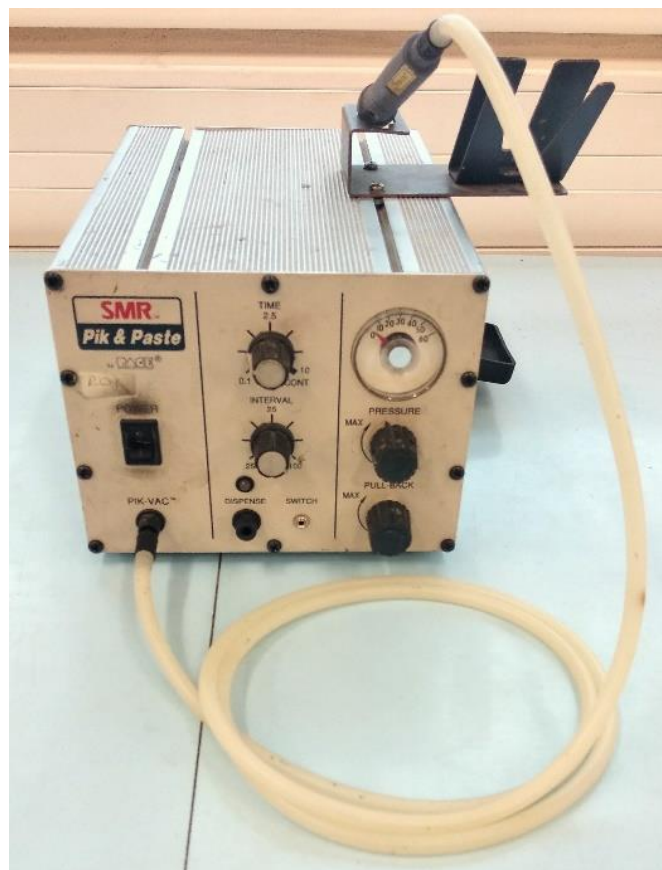
Obr. 34 Tombstone (náhrobní kámen) [4]

3 Hodnocení kvality pájených spojů pomocí optické kontroly

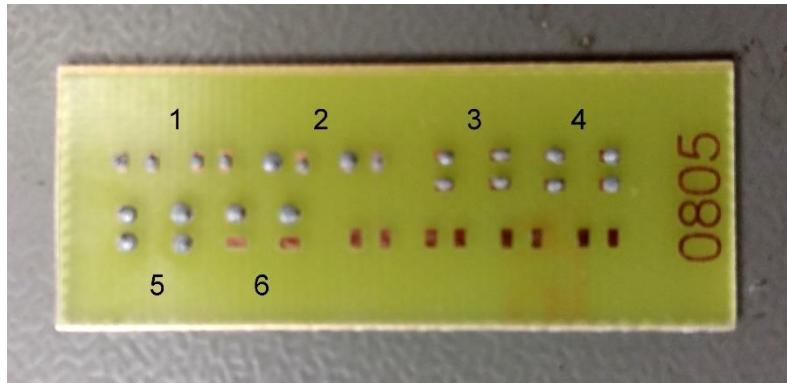
Jak již bylo napsáno v předešlé kapitole, k optické kontrole je možné využít více způsobů k odhalení chyb pájených spojů. Pro desky osazované ručně v kusové výrobě jsem využil elektronický mikroskop, při exkurzi v nejmenované firmě byla využita AOI 3D a RTG kontrola. Pro kontrolu dalších DPS osazených automatem jsem využil 3D kameru, kterou jsem použil také při obou experimentech.

3.1 Experiment 1

V prvním experimentu jsem demonstroval vady pájených spojů v kusové výrobě, které vznikají buď nesprávným nanesením pájecí pasty, anebo špatným osazením součástek. K tomuto úkolu jsem využil univerzitní dispenzor SMR PICK & PASTE by PACE, jehož funkce byla popsána v kapitole 1. Tento typ funguje tlačáním vzduchu nastavitelným tlakem po dobu, kterou operátor dispenzoru nastaví, čímž ovlivňuje množství nanesené pasty.



Obr. 35 Dispenzor SMR PICK & PASTE by PACE [13]



Obr. 36 Destička pro experiment 1 s nanesenou pájecí pastou [13]

Úmyslně jsem volil různé doby tlačení vzduchu, abych se odchytil od vhodně nastavené hodnoty a nanášel tak nedostatečné, nebo naopak přebytečné množství pájecí pasty. Každý případ jsem vytvořil dvakrát, abych následně vybral lepší vzorek.

Bod 1 jsem si určil jako referenční, tedy s ideálním množstvím pájecí pasty. V bodě 2 jsem nanas nerovnoměrné množství této pasty. Plošky ve 3. a 4. bodě byly pokryty stejným množstvím jako referenční, ale součástky v bodě 3 byly lehce posunutě a v bodě 4 pak nedostatečně přitlačené. Přebytečné množství pájecí pasty bylo nanaseno na plošky v bodě 5, stejně jako v případě bodu 6. Zde ovšem pouze na jednu ze dvou kontaktů.

Po nanesení pájecí pasty jsem využil univerzitní manipulátor SMT MANIPULATOR MO1 pro osazování SMD součástek, který je stejně jako dispensor popsán v kapitole 1. Všechny plošky jsem osadil SMD odpory velikosti 0805.



Obr. 37 Manipulátor SMT MANIPULATOR MO1 [13]



Obr. 38 Destička pro experiment 1 s osazenými součástkami [13]

K přetavení pájecí pasty jsem využil univerzitní průběžnou pájecí pec Mistral 260. Tato pec má celkem tři zóny, ve kterých se plošný spoj posouvá nastavitelnou rychlostí. V mém případě jsem zvolil nejnižší možnou rychlost, tedy 15 cm/min. Použitá bezolovnatá pájecí pasta M31 (Sn95.75-Ag3.5-Cu0.75) měla teplotu tavení 219°C. Tuto teplotu překročila až v poslední sekci pece, čímž došlo k přetavení.



Obr. 39 Pájecí pec Mistral 260 [13]

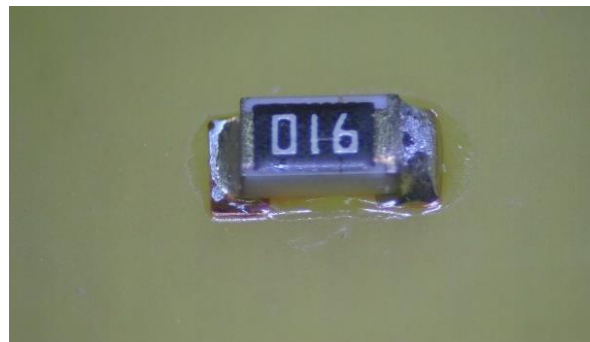


Obr. 40 Teplotní profil přetavovací pece [13]

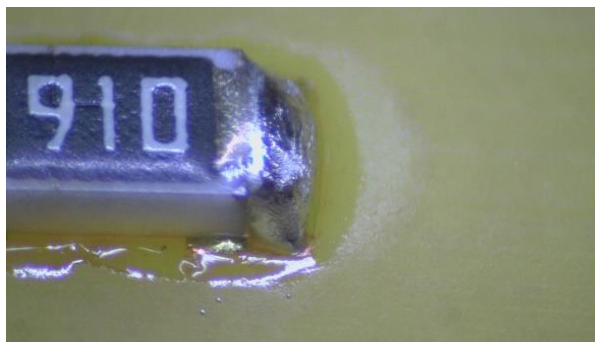
Po dokončení procesů pájení následovala optická kontrola již zmíněnou 3D kamerou. Odpory v bodě 1 byly zapájeny správně. V bodě 2 sice zůstaly odpory připájené k desce, ale nerovnoměrné nanesení pasty je do budoucna nespolehlivé. Body 3 a 4, které měly demonstrovat špatné osazení reistorů, se v tomto případě pomocí smáčecí síly dokázaly udržet a srovnat do správné polohy. U odporů v bodě 5 je jasně vidět přebytečné množství pájky oproti referenčním. V bodě 6, vlivem velkého rozdílu naneseného množství pájecí pasty, nastal efekt náhrobního kamene.



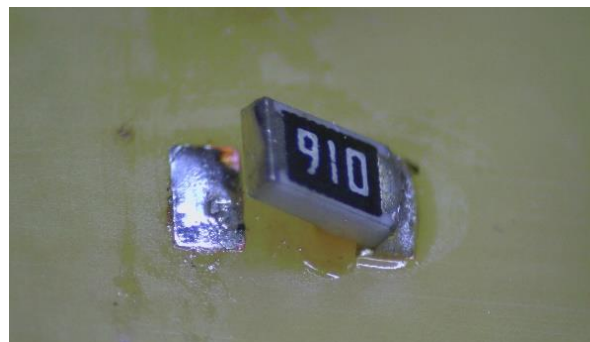
Obr. 41 Zapájený referenční rezistor s ideálním množstvím pájecí pasty [13]



Obr. 43 Zapájený rezistor s rozdílným množstvím pájecí pasty [13]



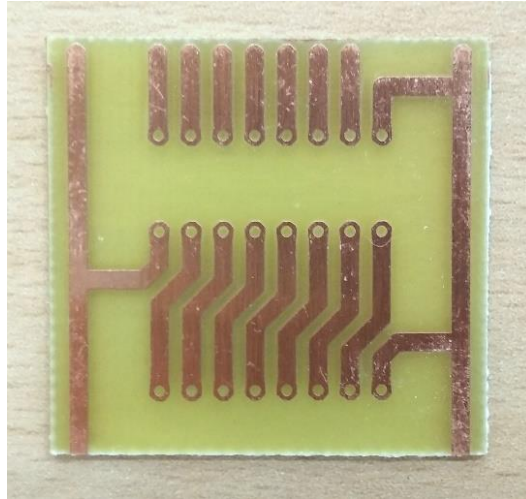
Obr. 42 Zapájený rezistor s přebytečným množstvím pájecí pasty [13]



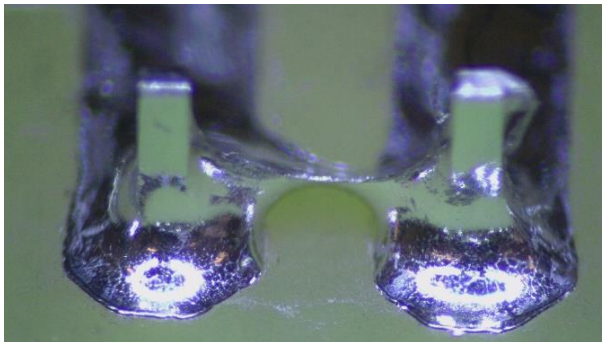
Obr. 44 Zapájený rezistor s velkým rozdílem množství pájecí pasty [13]

3.2 Experiment 2

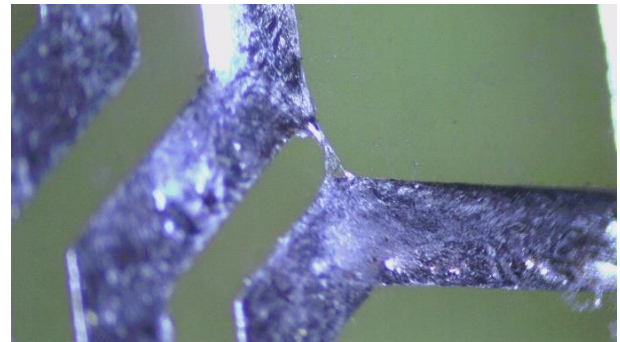
Druhý experiment měl ukázat možné chyby v případě osazení plošného spoje součástkou drátovými vývody prostrčenou skrz destičku. Vývody byly pájeny pomocí vlny univerzitní pájecí lázně MINISOL 2000.



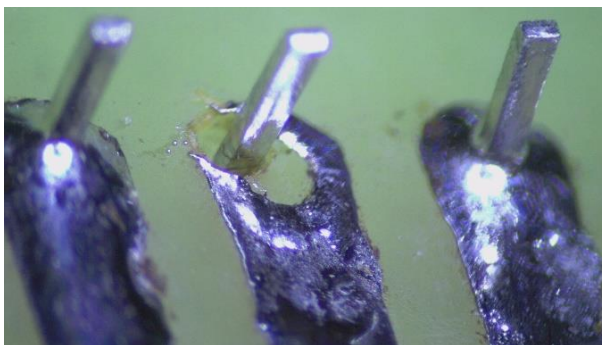
Obr. 45 Destička pro experiment 2 [13]



Obr. 46 Zkrat pájených vývodů [13]



Obr. 48 Zkrat pájených cest [13]



Obr. 47 Nezapájený kontakt [13]

Ze snímků pořízených opět pomocí 3D kamery můžeme vidět několik chyb. Na Obr.46 vznikl zkrat mezi dvěma vývody součástky. Obr.48 je také zkrat, ale tentokrát mezi dvěma vyvedenými cestami na plošném spoji. Na posledním snímku, tedy na Obr.47, vznikl nezapájený spoj z důvodu odpadnutí plošky během procesu vlny.

3.3 Chyby vzniklé ručním osazováním

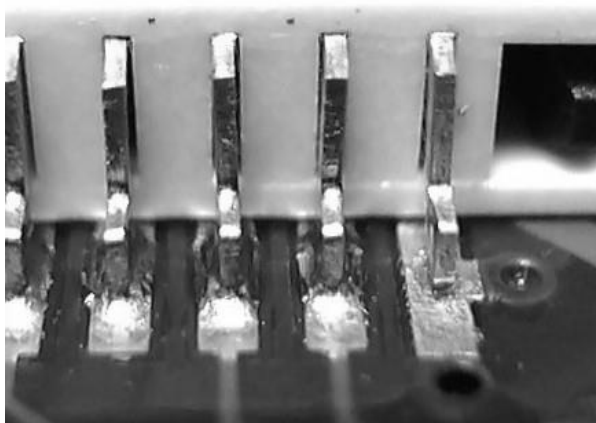
Optická kontrola desek plošných spojů osazovaných ruční metodou proběhla pomocí mikroskopu zaznamenávajícího černobílé snímky.



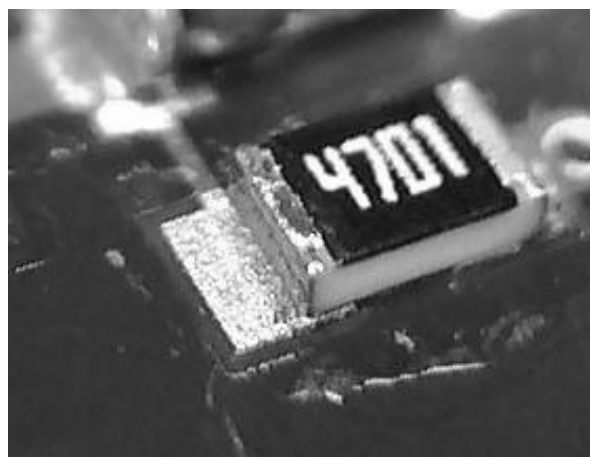
Obr. 49 Zkrat nožiček součástky [13]



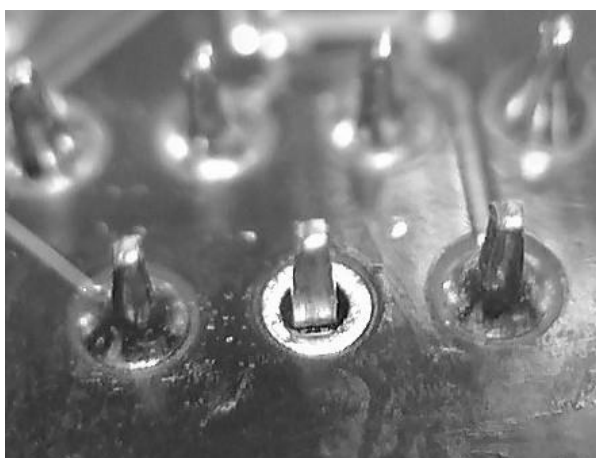
Obr. 52 Kulička vedle součástky [13]



Obr. 50 Nezapájený kontakt [13]



Obr. 53 Nezapájený kontakt [13]

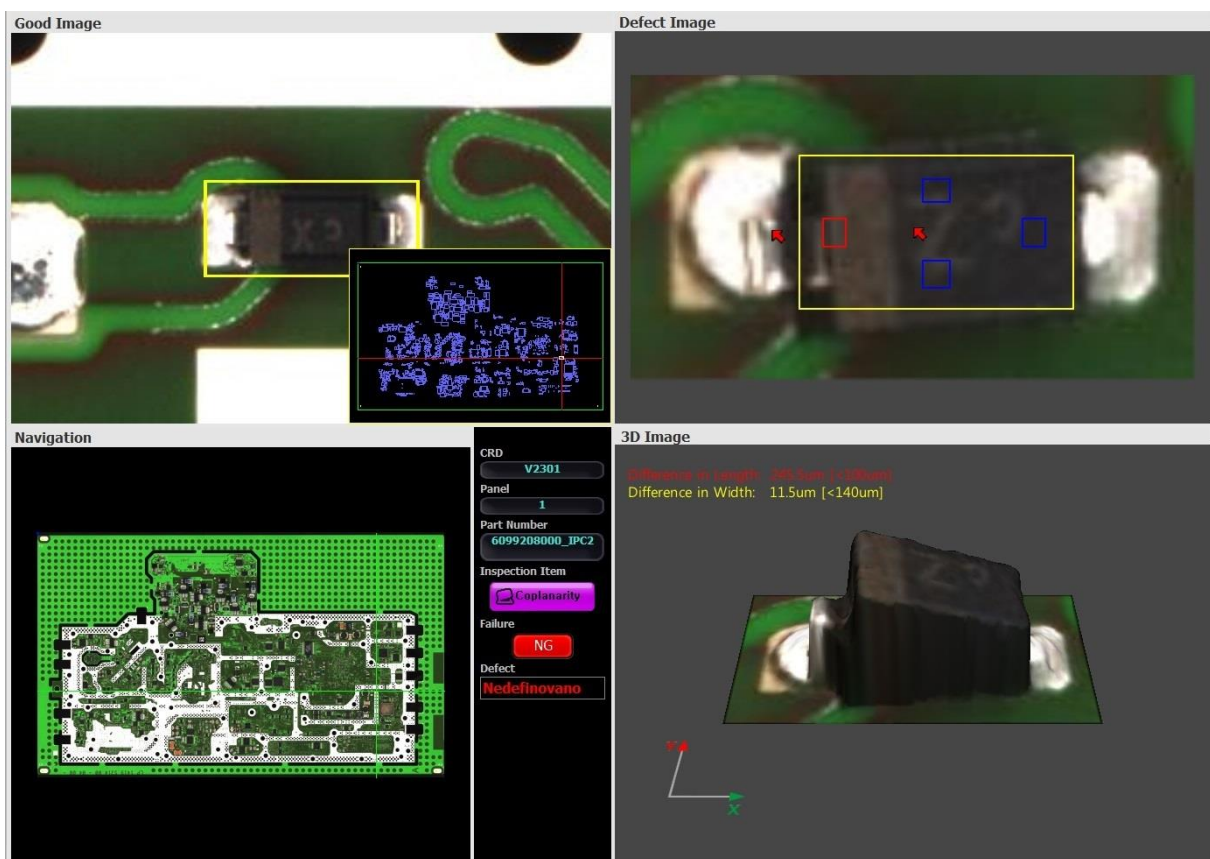


Obr. 51 Nezapájený kontakt [13]

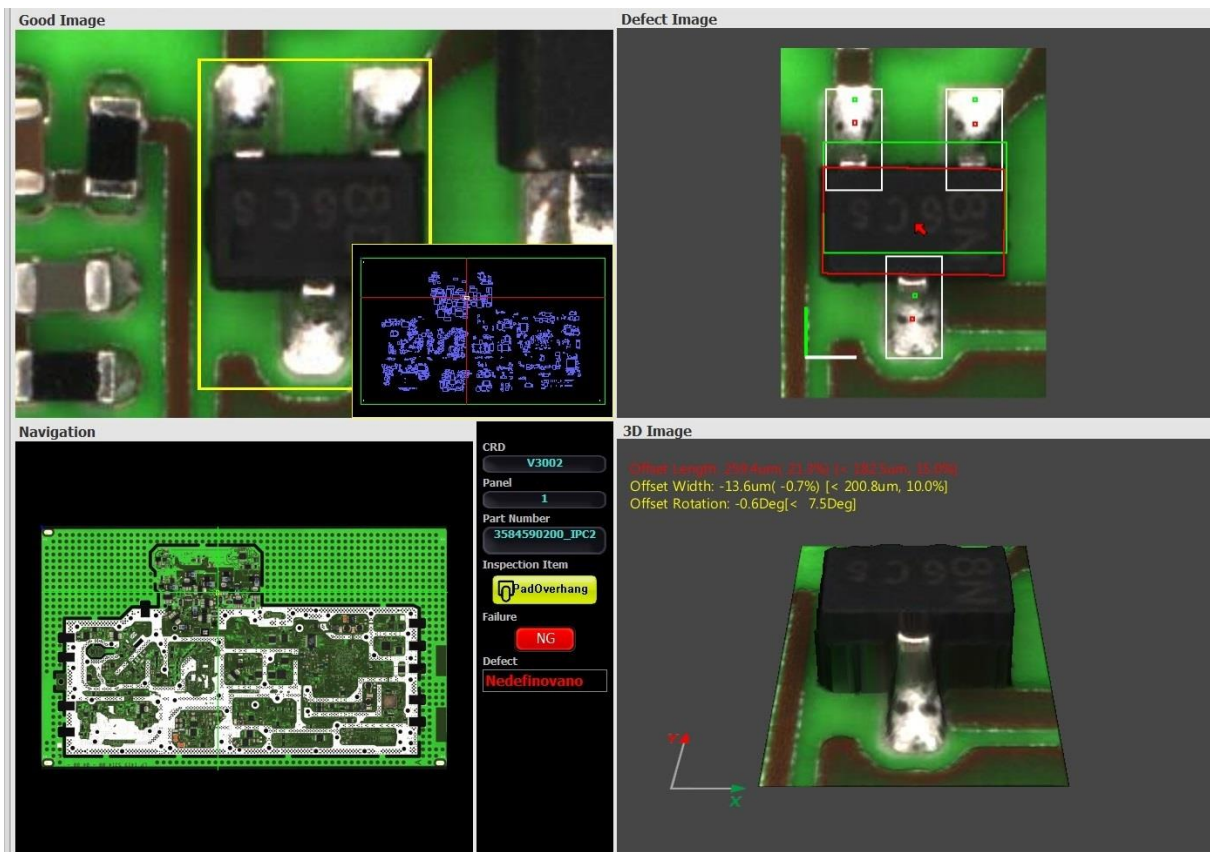
3.4 Chyby vzniklé v automatickém osazování

3.4.1 Hledání chyb pomocí AOI 3D

Na následujících snímcích se nacházejí chyby, které se vyskytují v hromadné metodě osazování DPS. Při exkurzi v nejmenované firmě jsme pomocí AOI s 3D snímáním odhalili dvě chyby. U obou se jednalo o posunutí součástky. Na pořizovaných snímcích můžeme v levém horním rohu vidět referenční součástku, se kterou se chybná součástka, která je umístěna na snímku v pravém horním rohu, porovnává. Vidíme také přesné umístění vadné součástky na DPS, což operátorovi, který má na starosti opravu usnadní práci. Snímek v pravém dolním rohu je právě výhodou 3D kontroly, která může oproti 2D metodě nacházet chyby z více úhlů. V těchto dvou případech by tedy 2D kontrola tyto chyby neodhalila.



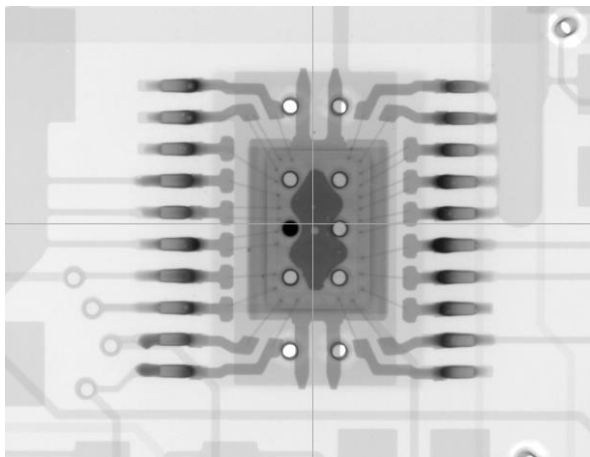
Obr. 54 Odhalení nadzvednuté diody pomocí AOI [12]



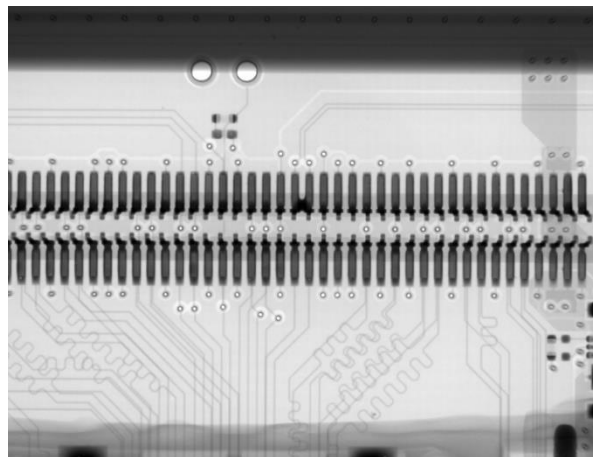
Obr. 55 Odhalení nadzvednutého tranzistoru pomocí AOI [12]

3.4.2 Hledání chyb pomocí RTG

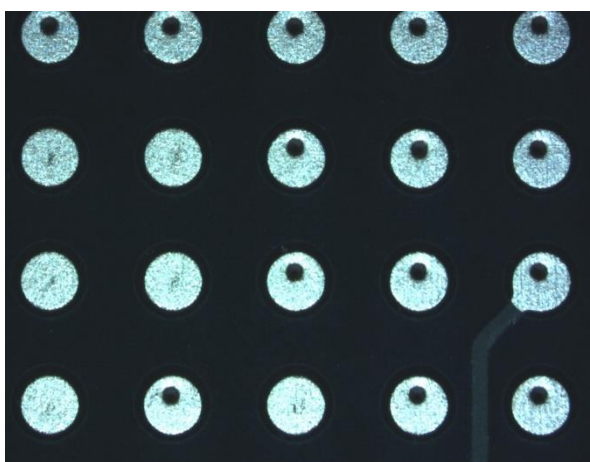
V případě hledání chyb pájení u pouzder BGA bylo potřeba využít RTG kontrolu. Stejná kontrolní metoda musela být použita také pro konektor, kde by chyba nebyla možná odhalit jinou optickou kontrolou. Na spodních snímcích je rentgenový snímek BGA pouzdra. Zde došlo z důvodu špatného návrhu plošného spoje, kde prokovy byly navrženy přímo na plošky. Během procesu pájení pak vzduch v prokovu vytvořil bublinku, což je vidět na Obr. 59.



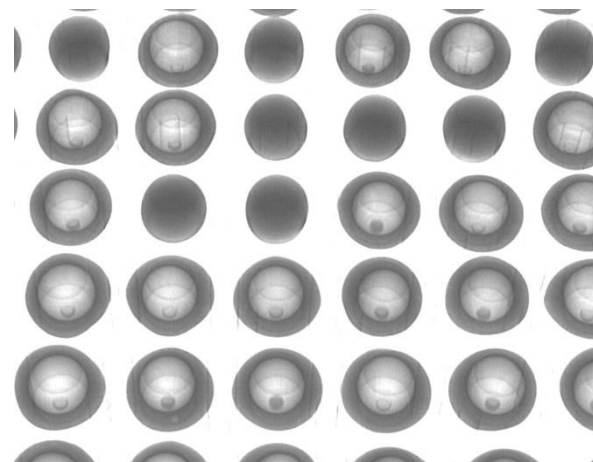
Obr. 56 Nedostatek pájecí pasty pod součástkou odhalen pomocí RTG [12]



Obr. 58 Zkrat vývodů SMD konektoru odhalen pomocí RTG [1]



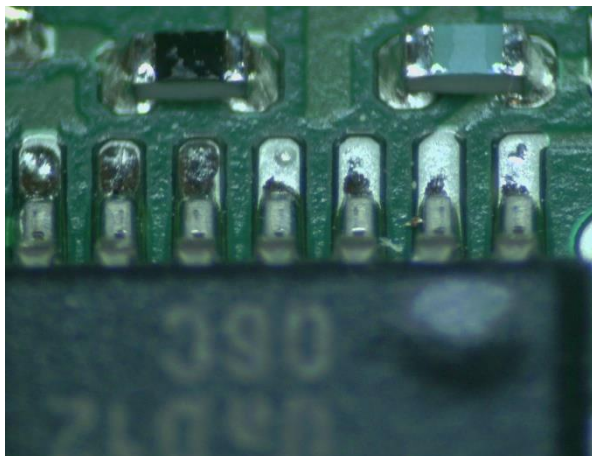
Obr. 57 DPS před osazením BGA [12]



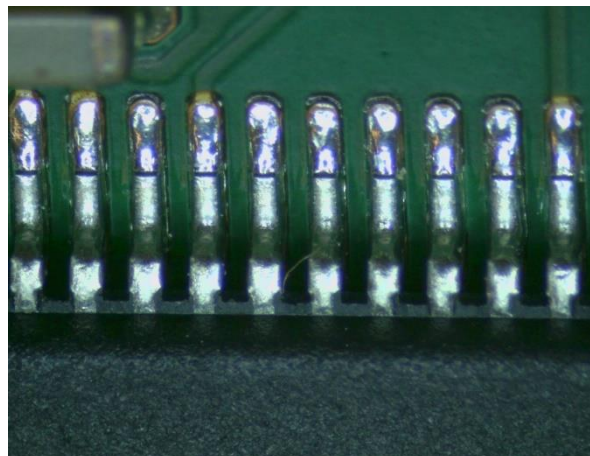
Obr. 59 Odhalené vovy pomocí RTG [12]

3.4.3 Hledání chyb pomocí 3D kamery

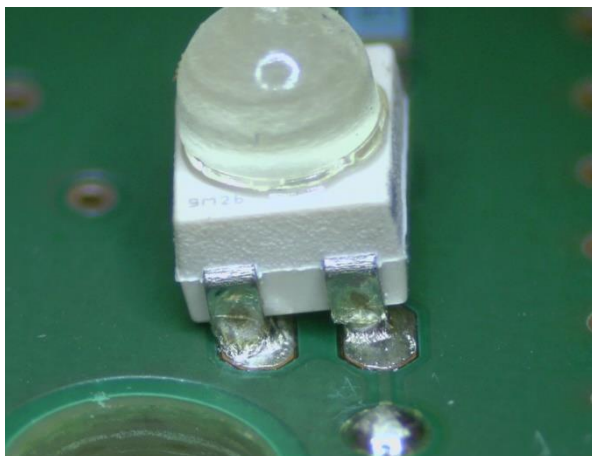
Chyby vzniklé automatickým osazováním opět pomocí 3D kamery.



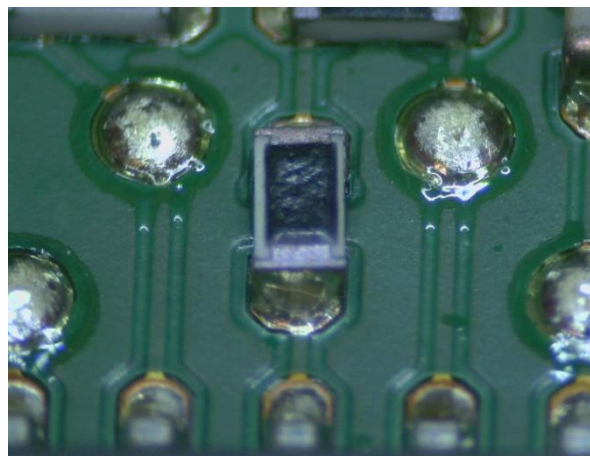
Obr. 60 Nedostatečné množství pájecí pasty [13]



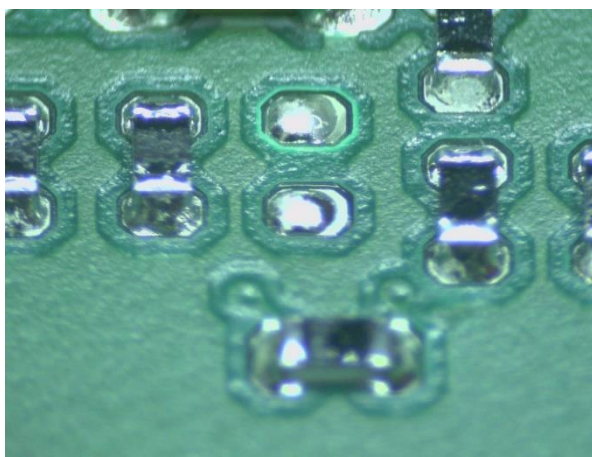
Obr. 63 Vlásokový zkrat mezi dvěma nožičkami [13]



Obr. 61 Posunutá součástka [13]



Obr. 64 Posunutá součástka [13]



Obr. 62 Neosazená součástka [13]

4 Porovnání nákladů na osazování v hromadné a kusové výrobě DPS

V posledním bodě mé práce budu porovnávat metody osazování desek plošných spojů, které byly popsány v první kapitole této práce, tedy ruční (kusová výroba) a automatické osazení (hromadná výroba), z nákladového hlediska. Porovnání nákladů na osazení je uvažováno ve firmě, která disponuje plně vybavenými pracovišti pro obě tyto metody. Do nákladů tedy budou započteny pouze náklady na osazení.

Pro určení nákladů je vhodné nejprve uvést definice a typy nákladů, které se mohou vyskytovat.

4.1 Náklady

Pojmem náklady jsou uvažovány vstupy zasahující do výroby. Výše nákladů uplatňuje svoji roli především při úsilí firmy po maximalizaci zisku. [3]

Z časového hlediska, jakým posuzujeme náklady, dělíme náklady na krátkodobé a dlouhodobé. V dlouhodobém období jsou všechny náklady, na rozdíl od krátkodobého, variabilní. V této práci budu uvažovat pro porovnání metod osazování pouze krátkodobý časový úsek zohlednění nákladů.

4.1.1 Fixní náklady (stálé)

Fixní náklady (FC – fixed cost) jsou veškeré náklady, které nemění svoji velikost s velikostí výroby (Q – quantity = output). Jako fixní náklady můžeme označit například placení nájmu, úroky, stálé platy zaměstnanců a další. Tyto náklady musí být uhrazeny i v případě nulové výroby. V porovnání osazovacích metod v této práci však nebudou uvažovány jako náklady firmy, ale jako náklady nezávislé na počtu kusů desek plošných spojů. Celkové fixní náklady mohou být značeny TFC (total fixed cost). [2]

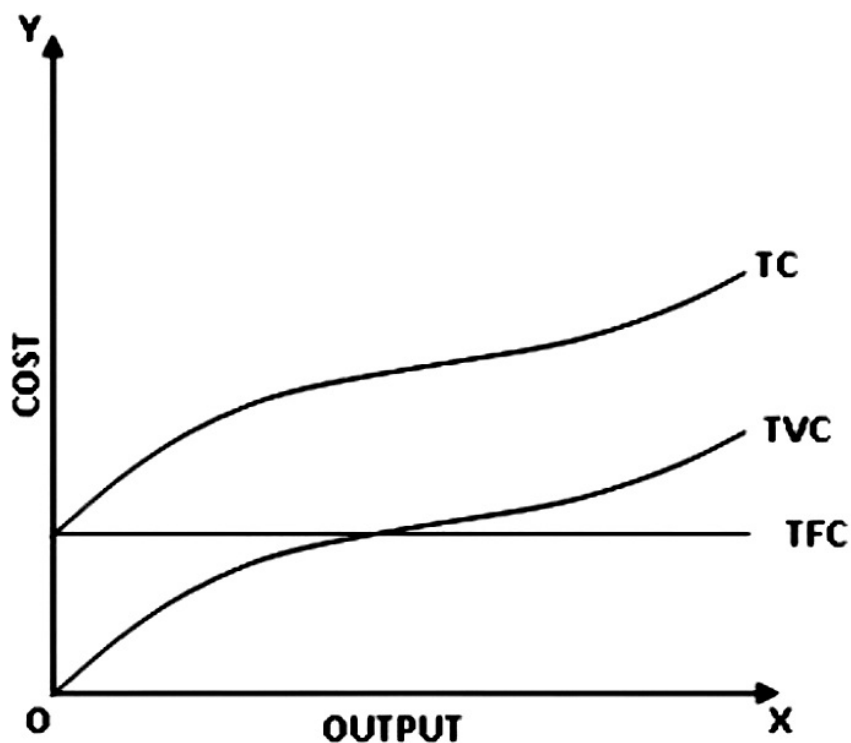
4.1.2 Variabilní náklady (proměnné)

Variabilní náklady (VC – variable cost) na rozdíl od fixních nákladů přímo závisí na velikosti výroby. Jako variabilní náklady můžeme označit například materiál, energie spotřebovaná na výrobu, hodinové platy zaměstnanců a další. Celkové variabilní náklady mohou být značeny TVC (total variable cost). [2]

4.1.3 Celkové náklady

Celkové náklady (TC – total costs) jsou veškeré náklady vstupující do výroby. Jsou součtem všech fixních a variabilních nákladů.

$$TC = FC + VC \quad (1)$$



Obr. 65 Závislost nákladů na produkci [15]

4.1.4 Průměrné fixní náklady

Průměrné fixní náklady (AFC – average fix cost) jsou fixní náklady vztažené na jednotku výroby. Ty jsou závislé na velikosti výroby, kdy s velikostí výroby klesají.

$$AFC = \frac{FC}{Q} \quad (2)$$

4.1.5 Průměrné variabilní náklady

Průměrné variabilní náklady (AVC – average variable cost) jsou stejně jako AFC vztažené na jednotku výroby.

$$AVC = \frac{VC}{Q} \quad (3)$$

4.1.6 Průměrné celkové náklady

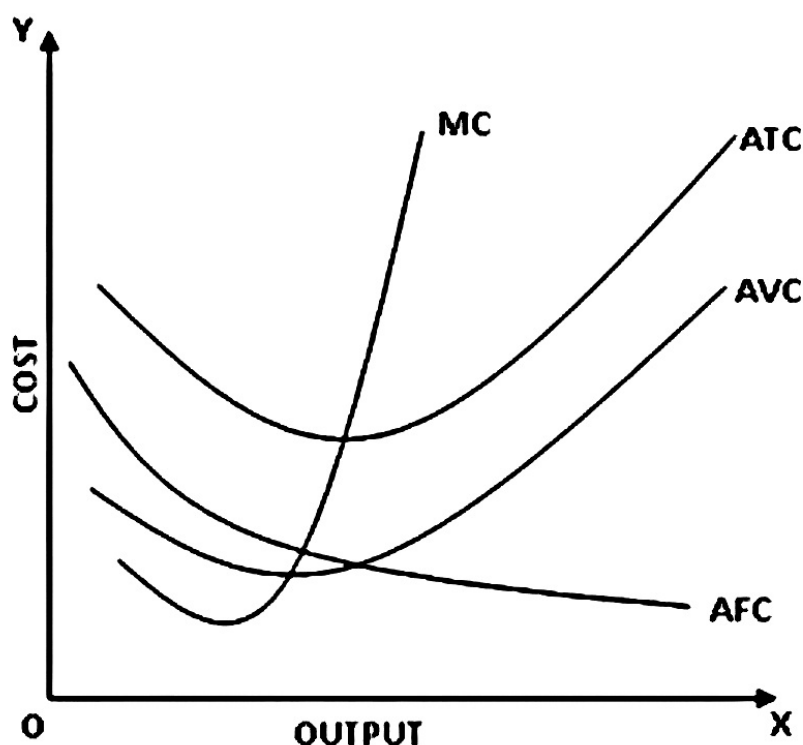
Průměrné celkové náklady (ATC – average total cost) jsou dány součtem průměrných fixních a průměrných variabilních nákladů.

$$ATC = AFC + AVC \quad (4)$$

4.1.7 Mezní náklady

Mezní náklady (MC – marginal cost) jsou firmou vynaložené náklady při zvýšení výroby o jednotku. Hodnota mezních nákladů je ukazatelem firmě, zda a o kolik jednotek má měnit výrobu, aby dosáhla maximálního zisku. Z Obr.66 se průsečík MC a ATC nachází v minimu funkce ATC. V tomto bodě jsou tedy průměrné celkové náklady minimální. [2]

$$\frac{\Delta TVC}{\Delta Q} = \frac{\Delta TVC}{1} = \Delta TVC = MC \quad (5)$$



Obr. 66 Závislost průměrných a mezních nákladů na produkci [15]

4.2 Praktický příklad porovnání nákladů nejmenované firmy

Pro porovnání nákladů metod ručního a automatického osazování mi byly poskytnuty data v jedné nejmenované firmě osazující desky plošných spojů. Porovnání je vztaženo k tištěnému spoji, který byl dříve osazován ruční metodou osazování. Stejně tak pasta byla nanášena ručně pomocí dispenze. S příchodem automatické linky se však výroba přesunula a nanášení pájecí pasty i následné osazení součástkami probíhalo automaticky. Náklady zde nejsou uváděny v CZK ani jiné měně, ale v minutách.

Náklady v Tabulce 1 jsou uváděny v minutách a jsou vztaženy buď k celé zakázce, nebo pouze k jedné desce této zakázky. V mém porovnání budu uvažovat celkem tři druhy nákladů:

4.2.1 Fixní pro obě metody

Tyto náklady jsou totožné pro obě metody. Konkrétně se jedná o tyto body:

- Spuštění zakázky
- Přeskladnění materiálu
- Vyskladnění THT součástek
- Temperování a příprava DPS
- Vyskladnění SMD
- Testování
- Naskladnění osazených DPS

4.2.2 Fixní pro určitou metodu

Tyto náklady jsou vztažené jen pro jednu metodu, ale nejsou závislé na výstupu neboli počtu vyrobených desek plošných spojů. Jsou to náklady vztažené na celou zakázku. Jedná se o tyto body:

Hromadná výroba:

- Příprava dat
- Clustering zakázek
- Příprava podavačů
- Automatické osazení
- AOI první strany desky
- AOI druhé strany desky
- Selektivní pájení
- Vyřezávání DPS z panelu
- Pájení THT součástek
- Hledání závad

Kusová výroba:

- Příprava před ručním osazením
- Ruční osazení a pájení
- Ruční pájení speciálních materiálů
- Výstupní kontrola

4.2.3 Variabilní pro obě metody

- Interní logistiky
- Temperování a příprava DPS

4.2.4 Variabilní pro určitou metodu

Náklady vztažené pouze k výrobě jedné desky. Jsou to tyto položky:

Hromadná výroba:

- Automatické osazení
- Selektivní pájení
- Vyřezávání DPS z panelu
- Pájení THT součástek
- Testování

Kusová výroba:

- Ruční osazení a pájení
- Ruční pájení speciálních materiálů
- Hledání závad
- Testování
- Výstupní kontrola

Činnost	čas/zakázku (min)	čas/1 kus DPS (min)
Spuštění zakázky	30	
Přeskladnění materiálu	1	
Příprava dat	13,230	
Interní logistiky		0,510
Clustering zakázek	16,320	
Vyskladnění THT součástek	14,530	
Temperování a příprava DPS	13,992	0,462
Vyskladnění SMD	105,786	
Příprava podavačů	131,592	
Automatické osazení	140	1,985
AOI první strany desky	0,001	
AOI druhé strany desky	0,001	
Kontrola v teplotní komoře		
Elektrická jehlová kontrola		
Selektivní pájení	5	1
Označení serializačními štítky		
Vyřezávání DPS z panelu	10,555	0,562
Ruční vyřezávání V drážkou		
Příprava THT konektorů		
Montáž THT součástek		
Pájení THT součástek	8	1,800
Hledání závad	0,001	
Testování	10	6
Naskladnění osazených DPS	8	

Pozn.: Pokud je okénko tabulky bez hodnot, znamená to, že daná akce u této DPS neprobíhá.

Tabulka 1 Náklady hromadné výroby

Činnost	čas/zakázku (min)	čas/1 kus DPS (min)
Spuštění zakázky	30	
Přeskladnění materiálu	1	
Interní logistiky		0,510
Vyskladnění THT součástek	14,530	
Temperování a příprava DPS	13,992	0,462
Vyskladnění SMD	105,786	
Příprava před ručním osazením	60	
Ruční osazení a pájení	30	37,650
Ruční pájení speciálních materiálů	10	56
Hledání závad		0,001
Testování	10	3
Výstupní kontrola	15	5
Naskladnění osazených DPS	8	

Pozn.: Pokud je okénko tabulky bez hodnot, znamená to, že daná akce u této DPS neprobíhá.

Tabulka 2 Náklady kusové výroby

Výpočet FC:

Výpočet proběhl sečtením příslušných položek z tabulky.

Příklad výpočtu pro společné FC:

$$FC = 30 + 1 + 14,53 + 13,992 + 105,786 + 10 + 8 = 183,308 \text{ (min)}$$

Výpočet VC:

Výpočet proběhl sečtením příslušných položek a následným vynásobením počtem DPS.

Příklad výpočtu pro hromadné VC při počtu dvou DPS:

$$VC = (1,985 + 1 + 0,562 + 1,8 + 6) \times 2 = 22,694 \text{ (min)}$$

Výpočet TC:

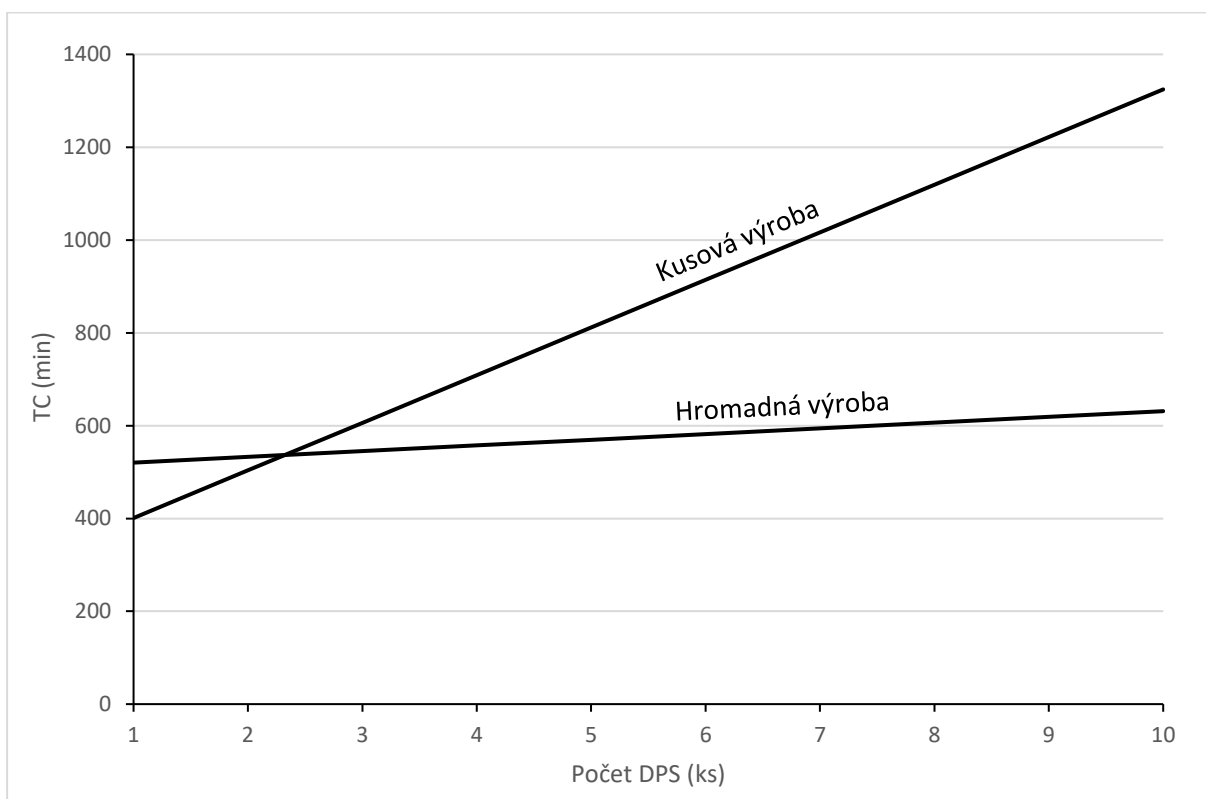
Výpočet proběhl dle rovnice 1, tedy součtem fixních a variabilních nákladů.

Příklad výpočtu pro kusové TC při počtu tří DPS:

$$TC = 183,308 + 115 + 0,972 \times 3 + 101,651 \times 3 = 606,177 \text{ (min)}$$

Počet DPS (ks)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FC společné (min)	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3	183,3
FC hromadná (min)	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7	324,7
FC kusová (min)	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0
VC společné (min)	1,0	1,9	2,9	3,9	4,9	5,8	6,8	7,8	8,7	9,7
VC hromadná (min)	11,3	22,7	34,0	45,4	56,7	68,1	79,4	90,8	102,1	113,5
VC kusová (min)	101,7	203,3	305,0	406,6	508,3	609,9	711,6	813,2	914,9	1016,5
TC hromadná (min)	520,3	532,6	545,0	557,3	569,6	581,9	594,2	606,6	618,9	631,2
TC kusová (min)	400,9	503,6	606,2	708,8	811,4	914,0	1016,7	1119,3	1221,9	1324,5

Tabulka 3 FC, VC a TC kusové a hromadné výroby



Obr. 67 Graf závislosti celkových nákladů na produkci pro kusovou a hromadnou výrobu

5 Závěr

V prvním bodě této bakalářské práce jsme se seznámily s kusovou a hromadnou výrobou desek plošných spojů. Tato část byla probrána s některými praktickými poznámkami, které byly zaznamenány během exkurzí firem. Teoretické informace byly doplněny pozorovanými poznatky a také o detailní snímky jednotlivých částí automatické výrobní linky.

V druhé části byly probrány kontrolní metody, které se vyskytují v hromadné a kusové výrobě. Dále byly popsány různé druhy chyb, které se často vyskytují během elektrotechnické montáže. K nim byly uvedeny možné příčiny vzniku těchto vad. Jednalo se o chyby vznikající již během procesu nanášení pájecí pasty, dále chyby automatického osazování a nakonec vadné spoje vznikající během procesu přetavení.

Ve třetí části byly metody kontroly popsané ve druhé části převedeny do praxe. Pomocí různých metod došlo ke kontrole mnoha chyb, které se mohou vyskytovat na deskách plošných spojů. Nejprve jsem se zaměřil na chyby vznikající během ručního osazování. Zde byly demonstrovány dva experimenty, během nichž byly ukázány různé chyby. V prvním případě došlo k vadnému spoji kvůli nerovnoměrně nanesené pastě. V případě, že byl rozdíl množství nanesené pasty ještě větší, došlo k efektu tzv. náhrobního kamene. U chybných osazení se díky smáčivým silám rezistory srovnaly do správné polohy. Druhý experiment demonstroval chyby při pájení vlnou. I v tomto případě došlo k několika vadám. Ve dvou případech k můstkům a pak k nezapájení jednoho kontaktu vlivem odpadnutí plošky, čímž nemohlo dojít ke smočení plošky a kontaktu. Oba experimenty byly kontrolovány 3D kamerou pro optickou kontrolu. Pro kontrolu desek osazených v kusové výrobě byla použita ještě jiná metoda. Za pomoci mikroskopu s černobílým záznamem snímků byly nalezeny další možné vady ruční elektrotechnické montáži. Pro kontrolu hromadné výroby byly v nejmenované firmě zaznamenány dva snímky pomocí AOI kontroly, na kterých je v obou případech zobrazeno nadzvednutí součástky. Dále byly zaznamenány snímky rentgenovou kontrolou, která odhalila vady, jež by ostatní optické kontroly odhalit nedokázaly. Nakonec opět pomocí 3D kamery byly vytvořeny snímky dalších vad na deskách osazených automaticky.

Z grafu je patrné, že se průsečík obou metod nachází lehce za počtem dvou kusů desek plošných spojů. Pokud by tedy bylo za potřebí vyrobit zakázku o jednom nebo dvou kusech, bude pro firmu výhodné využít ruční metodu osazování desek plošných spojů. Naopak kdyby bylo požadováno osadit 3 a více desek, bude z pohledu nákladů výhodnější využití automatického osazování desek plošných spojů. V reálném světě by ale v tomto případě na ruční osazení nedošlo ani v případě jednoho či dvou kusů těchto desek. Důvodem je to, že k takto malé zakázce by byly přiřazeny například další kusy na sklad. Toto tvrzení mi ostatně doložila i nejmenovaná firma, která kusovou výrobou již nevyrábí. Graf se samozřejmě může lišit u různých typů desek, takže jiný typ desky může mít průsečík až při větším počtu kusů. Kusová výroba má proto své uplatnění stále například při osazování prototypů.

6 Zdroje

[1] ABEL, Martin. SMT: technologie povrchové montáže. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902733-1-9.

[2] FIALOVÁ, Helena. Základy mikroekonomiky. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02541-1.

[3] FIALOVÁ, Helena a Jan FIALA. Ekonomický slovník: s odborným výkladem česky a anglicky. Vyd. 2., doplněné a aktualizované. Praha: A plus, 2009. ISBN 978-80-903804-4-8.

[4] IPC-A-610E Task Group. Acceptability of Electronic Assemblies. Bannockburn, Illinois: IPC, April 2010. ISBN 1580986285.

[5] KUBA, Jan a Pavel MACH. Technologické procesy. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2007. 166 s. ISBN 978-80-01-03617-4.

[6] Pavel Mach, Pájení v elektrotechnice. Dostupné z WWW:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/56864/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf

[7] SEMACH, Aplikační technologie. Dostupné z WWW:
http://www.semach.cz/pdf/popis_smt.pdf

[8] Abel Martin, Základy oprav součástek na deskách plošných spojů. Dostupné z WWW:
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6247/zaklady-oprav-soucastek-na-deskach-plosnych-spoju>

[9] Slavata, Michal. Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži. [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2014.

[10] SMT centrum, Organizace výrobní linky. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/organizace-vyrobnni-linky/organizace-vyrobnni-linky/>

[11] SMT centrum, Technologické postupy v SMT. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/technologicke-postupy-v-smt/technologicke-postupy-v-smt/>

[12] Snímky pořízené v nejmenované firmě.

[13] Snímky pořízené v prostorách ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.

[14] Kurtz Ersa, Reflow System Ersa HOTFLOW. Dostupné z WWW:
<https://www.kurtzersa.com/electronics-production-equipment/soldering-machines/reflow-soldering/produkt-details/hotflow-48-1.html>

[15] Simple Thoughts, COST OUTPUT RELATIONSHIP IN THE SHORT RUN. Dostupné z WWW: http://subinkolannoor.blogspot.com/2013/10/cost-output-relationship-in-short-run_25.html

[16] SMT-info, Bulletin seminářů: 15. 2. 2011. Dostupné z WWW:
http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1102.pdf

[17] Ivana Beshajová Pelikánová, Montáž SMT a THT. Dostupné z WWW:
<http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>

[18] Semantic Scholar Detection of plated through hole defects in printed circuit board with X-ray. Dostupné z WWW: <https://www.semanticscholar.org/paper/Detection-of-plated-through-hole-defects-in-printed-Huang-Zhu/7f822488d8fd630fba6487e4fa587e2eba6a9b75>