



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži

Possible errors and control methods in the electronics assembly

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D

Michal Slavata

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Slavata** Michal

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži

Pokyny pro vypracování:

1. Metody kontroly kvality a chyby, ke kterým dochází při montáži součástek na desku plošných spojů
2. Porovnání kontrolních metod z pohledu ekonomické náročnosti a ekonomické výhodnosti
3. Výběr konkrétního defektu a snaha o jeho docílení pomocí experimentu
4. Vyhodnocení experimentu

Seznam odborné literatury:

1. Abel M., Cimburek V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. ABE.TEC, Pardubice 2005 .
2. Mach P., Skočil V., Urbánek J.: Montáž v elektrotechnice. ČVUT Praha, 2001.

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

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

Doc. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2014

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 20. 05. 2014

.....

Michal Slavata

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, podporu, rady a inspiraci v době mého studia.

V Praze dne 20. 05. 2014

.....

Michal Slavata

Anotace

Cílem bakalářské práce je seznámení čtenáře s problematikou hromadné výroby v oblasti elektrotechnické montáže.

Teoretická část je rozdělena do dvou hlavních částí. První část pojednává o automatizovaném procesu pájení a o chybách, které při tomto procesu vznikají. Druhá část je zaměřena na ekonomickou stránku věci. Tato část řeší problematiku kontroly pájených spojů a ekonomickou výhodnost zařazení kontrolních prvků do procesu výroby.

Praktická část je zaměřena na prskání tavidla při přetavování pájecí pasty. Cílem této části bylo dosáhnout tohoto defektu v laboratorních podmínkách školy.

Annotation

A goal of the bachelor thesis is to introduce the reader to the problems of mass production of the electronics assembly.

Theoretical part is divided into two main parts. First part deals with automated soldering process and with errors, which emerge during this process. Second part is focused on economical side of the matter. This part solves problems of the control of the soldered joints and economical advantage of inclusion of the control elements to the soldering process.

Practical part is focused on sizzle of flux. A goal of this part was to achieve to this defect in laboratorial conditions of school.

Klíčová slova

automatizovaná pájecí linka, SMT, THT, pájení, kontrolní metody, SPI, AOI, RTG, vznikající chyby, ekonomické srovnání kontrolních metod, prskání tavidla, AQL, NPV

Key words

automated soldering process, SMT, THT, soldering, control methods, SPI, AOI, RTG, emerging errors, economical comparison of control methods, sizzle of flux, AQL, NPV

Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	12
Seznam grafů.....	13
Seznam rovnic.....	14
Seznam zkratek.....	15
Úvod.....	16
1 Elektrotechnická montáž.....	17
1.1 Automatizovaná pájecí linka.....	17
1.1.1 Podavač DPS.....	17
1.1.2 Pájecí pasta a její nanášení.....	17
1.1.3 Osazovací automat.....	21
1.1.3.1 Osazení THT součástek.....	22
1.1.3.2 Osazení SMD součástek.....	22
1.1.3.3 Smíšené osazování.....	24
1.1.4 Pájení vlnou.....	25
1.1.4.1 Tavidlo a jeho nanášení.....	25
1.1.4.2 Předehřev.....	27
1.1.4.3 Vlna.....	28
1.1.4.3.1 Jednoduchá vlna.....	28
1.1.4.3.2 Dvojitá vlna.....	29
1.1.4.3.3 Dutá vlna.....	29
1.1.4.4 Čištění.....	30
1.1.5 Pájení přetavením.....	30
1.1.5.1 Pájení pomocí horkého plynu.....	31
1.1.5.2 Pájení pomocí IR zářiče.....	32
1.1.5.3 Pájení v parách.....	32
1.1.5.4 Teplotní profil.....	33
1.2 Kontrolní metody pájených spojů.....	34

1.2.1	Optické kontrolní metody	34
1.2.1.1	Automatická kontrola pasty - SPI.....	35
1.2.1.2	Automatická optická kontrola - AOI.....	36
1.2.1.3	Rentgenová kontrola kvality spojů	37
1.2.1.4	Laserová kontrola kvality spojů	38
1.2.2	Elektrické kontrolní metody	39
1.2.2.1	První stupeň	39
1.2.2.2	Druhý stupeň	39
1.2.2.3	Třetí stupeň.....	40
1.2.2.4	Testovací jehlová pole	40
1.3	Vznikající chyby	41
1.3.1	Chyby vstupních veličin	41
1.3.1.1	Čistota.....	41
1.3.1.2	Prohnutí DPS	41
1.3.1.3	Delaminace	41
1.3.2	Chyby vznikající při nanášení pasty	42
1.3.3	Chyby vznikající při pájení spojů	42
1.3.3.1	Můstky	42
1.3.3.2	Chybějící spoj	42
1.3.3.3	Kulička pájky vedle součástky	43
1.3.3.4	Popcorn efekt.....	43
1.3.3.5	Tombstone	43
1.3.3.6	Voidy	44
1.3.3.6.1	Makro voidy	44
1.3.3.6.2	Mikro voidy	44
1.3.3.6.3	Shrinkage voidy	45
1.3.3.6.4	Kirkendallový voidy	45
1.3.3.7	Whisker.....	45
1.3.3.8	Zvedání menisku	46

2	Ekonomická analýza kontrolních metod	47
2.1	AQL.....	47
2.2	Výběr kontrolních metod	48
2.3	Vstupní veličiny	49
2.3.1	Výrobní kapacita.....	49
2.3.2	Cena výrobku.....	49
2.3.3	Cena chyby	50
2.3.4	Místo vzniku chyby	50
2.3.5	Šance na odhalení chyby.....	51
2.4	Samostatné kontrolní metody.....	52
2.4.1	SPI.....	52
2.4.2	AOI1	53
2.4.3	AOI2	54
2.5	Kombinace kontrolních metod.....	55
2.5.1	SPI+AOI1	55
2.5.2	SPI+AOI1+AOI2.....	56
2.6	Vyhodnocení analýzy.....	58
3	Experiment	60
3.1	Pasty	60
3.2	Povrchy	60
3.2.1	Seznam povrchů.....	60
3.2.2	Vlastnosti povrchů	60
3.2.2.1	Čistá Cu	60
3.2.2.2	Cu + Ni + Au	60
3.2.2.3	Cu + bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn.....	61
3.2.2.4	Cu + chemický Sn	61
3.3	Nanášení pasty	61
3.4	Použité přístroje	62
3.4.1	Průběžná pec – Mistral 260	62

3.4.2	Profilometr	62
3.5	Postup.....	63
3.6	Vzorky před přetavením.....	63
3.7	Teplotní profil	64
3.8	Vzorky po přetavení	64
4	Vyhodnocení experimentu.....	65
	Závěr	68
	Zdroje.....	70

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení tavících past.....	18
Obr. 2 Dispenzer - vytlačování šroubovicí	20
Obr. 3 Sítotisk.....	20
Obr. 4 Šablonový tisk	21
Obr. 5 Různé druhy osazení součástek	21
Obr. 6 Princip osazování THT součástek	22
Obr. 7 Princip osazování SMD součástek - jedna strana.....	23
Obr. 8 Princip osazování SMD součástek - 2 strany - varianta 1.	23
Obr. 9 Princip osazování SMD součástek - 2 strany - varianta 2.	24
Obr. 10 Princip smíšeného osazování.....	25
Obr. 11 Pěnový dávkovač.....	27
Obr. 12 Jednoduchá vlna	29
Obr. 13 Dvojitá vlna	29
Obr. 14 Dutá vlna.....	30
Obr. 15 Pájení přetavením pomocí horkého vzduchu.....	31
Obr. 16 Pájení přetavením pomocí IR zářiče.....	32
Obr. 17 Pájení přetavením pomocí par	33
Obr. 18 Princip pájení v parách	33
Obr. 19 RTG kontrola.....	37
Obr. 20 Kontrola wirebondingu.....	38
Obr. 21 Kontrola zapájení BGA pouzdra	38
Obr. 22 První stupeň elektrické kontroly.....	39
Obr. 23 Statické jehlové pole.....	40
Obr. 24 Létající jehlové pole	40
Obr. 25 Prohnutí DPS	41
Obr. 26 Delaminace DPS.....	41

Obr. 27 Můstky	42
Obr. 28 Chybějící spoj	42
Obr. 29 Kulička pájky vedle součástky	43
Obr. 30 Popcorn efekt	43
Obr. 31 Princip popcorn efektu	43
Obr. 32 Tombstone efekt	43
Obr. 33 Princip tombstone efektu	44
Obr. 34 Makro voidy	44
Obr. 35 Micro voidy	44
Obr. 36 Shrinkage voidy	45
Obr. 37 Kirkendallové voidy	45
Obr. 38 Whiskery na pinech	45
Obr. 39 Whisker	45
Obr. 40 Princip zvedání menisku	46
Obr. 41 Schéma modelové kontrolní linky	49
Obr. 42 Použitá šablona	61
Obr. 43 Průběžná pec – Mistral 260	62
Obr. 44 Profilometr	62
Obr. 45 Deska z Cu před přetavením	63
Obr. 46 Deska z Cu před přetavením – výřez	63
Obr. 47 Deska z chem. Sn po přetavení	64
Obr. 48 Rozmístění poloh	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 Typy tavidel	26
Tabulka 2 AQL - výběr podle počtu kusů	47
Tabulka 3 AQL - určení maximálního počtu chybných výrobků	48
Tabulka 4 Výrobní kapacita modelové linky	49
Tabulka 5 Cena modelového výrobku	49
Tabulka 6 Roční spotřeba elektrické energie modelové linky	50
Tabulka 7 Cena chyby	50
Tabulka 8 Procentuální rozložení chyb	51
Tabulka 9 Šance na odhalení chyby - SPI	51
Tabulka 10 Šance na odhalení chyby AOI1	51
Tabulka 11 Šance na odhalení chyby AOI2	51
Tabulka 12 Pořizovací cena - SPI	52
Tabulka 13 Ukázka výpočtu NPV pro laserovou SPI	53
Tabulka 14 Vypočtené NPV pro SPI	53
Tabulka 15 Pořizovací cena AOI	53
Tabulka 16 Ukázka výpočtu NPV pro barevnou AOI1	54
Tabulka 17 Vypočtené NPV pro AOI1	54
Tabulka 18 Ukázka výpočtu NPV pro barevnou AOI2	55
Tabulka 19 Vypočtené NPV pro AOI2	55
Tabulka 20 Ukázka výpočtu NPV pro SPI+AOI1	56
Tabulka 21 Vypočtené NPV pro SPI+AOI1	56
Tabulka 22 Ukázka výpočtu NPV pro SPI+AOI1+AOI2	57
Tabulka 23 Vypočtené NPV pro SPI+AOI1+AOI2	58
Tabulka 24 Použité pasty	60
Tabulka 25 Naměřené hodnoty pro pastu Senju	65
Tabulka 26 Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek	66

Seznam grafů

Graf 1 Příklad teplotního profilu	34
Graf 2 Podíl nanesené pasty na vzniklých chybách.....	35
Graf 3 Poměr ceny chyby k množství vzniklých chyb v jednotlivých krocích výroby..	36
Graf 4 Laserová kontrola	38
Graf 5 Teplotní profil.....	64
Graf 6 Porovnání past	66
Graf 7 Průměrný počet prskanců	67

Seznam rovnic

Rovnice 1 Výpočet NPV.....	52
Rovnice 2 Výpočet cash flow - SPI.....	52
Rovnice 3 Výpočet cash flow pro AOI1.....	54
Rovnice 4 Výpočet cash flow pro AOI2.....	54
Rovnice 5 Výpočet cash flow pro SPI+AOI1.....	55
Rovnice 6 Výpočet cash flow pro SPI+AOI1+AOI2	57

Seznam zkratek

DPS – deska plošných spojů

SMT – surface mount technology

SMD – surface mount device

THT – through hole technology

SPI – automatická kontrola pasty

AOI – automatická optická kontrola

RTG – rentgenová kontrola

SIR – povrchové izolační odpory

CSP, LLC, LLMA, BGA – typy pouzder součástek

IR – infračervené záření

SW - software

TEM – transmisní elektronový mikroskop

SEM – rastrovací elektronový mikroskop

HAL – hot air leveling

AQL – acceptable quality limit

NPV – net present value

Úvod

Současný svět si už asi nikdo z nás nedokáže představit bez výtěžků moderní doby. Většina těchto pomůcek, usnadňujících nám život, je založena na využívání elektrické energie. Ať už je to třeba počítač, mobilní telefon, televize, nebo pouhá pračka, vše je závislé na práci s elektrickou energií. Tato práce musí být nějak řízena, k čemuž nám ve většině případů slouží vnitřní obvody v daném zařízení, které se skládají z desek plošných spojů. Z toho lze snadno vyvodit, že dnešní svět tak jak ho známe, je závislý na výrobě desek plošných spojů, a proto jsem si toto téma vybral pro svoji bakalářskou práci. Cílem bakalářské práce je seznámení čtenáře s problematikou hromadné výroby a kontroly v oblasti elektrotechnické montáže.

V úvodu této práce je seznámení se s technickým backgroundem. Jedná se především o samotný výrobní proces desek plošných spojů. Postupně jsou zde popsány principy všech hlavních zařízení, která najdeme na automatizované výrobní lince. Dále jsou zde rozvedeny kontrolní metody jakosti. Tento proces je z technologického hlediska velice náročný. Celý proces má řadu úskalí, která je třeba řešit, přičemž vždy musíme brát ohled i na náklady, které jsou spojeny s jejich řešením. Proto je velice výhodné celý proces důkladně monitorovat a odhalovat chyby výrobků v nejranějším možném stavu, kdy je jejich oprava ekonomicky nejvýhodnější.

O ekonomické výhodnosti pojednává kapitola druhá, která se zabývá sestavením ekonomické analýzy kontrolního procesu. Jedná se především o zařazení různých druhů kontrolních přístrojů, které používají rozdílné technologie. Výsledkem této analýzy, by měla být ideální kombinace přístrojů a technologií, která zaručí největší provozní úspory.

Třetí kapitola je věnována praktické části. Zde dochází k výběru konkrétního defektu, který vzniká při výrobě. Po konzultaci s vedoucím práce Ing. Karlem Duškem, Ph.D, jsem vybral rozstřík tavidla z pájky. Cílem této kapitoly je vytvoření tohoto defektu v laboratorních podmínkách školy.

Poslední kapitola se zabývá vyhodnocením experimentu, ve které je provedena analýza vzniklého defektu. Pozornost je zaměřena na porovnání různých povrchů, které se používají při výrobě desek plošných spojů v závislosti na množství vzniklých „prskanců“ tavidla.

1 Elektrotechnická montáž

1.1 Automatizovaná pájecí linka

Automatizovaná pájecí linka je dnes nedílnou součástí ve výrobním procesu DPS. Ruční výroba těchto komponentů je pro střední a větší série výroby dnes ekonomicky neúnosná a fyzicky nepředstavitelná. Proto v posledních desetiletích došlo k masovému rozvoji toho typu výroby a jeho kontroly. Do moderní pájecí linky vstupují 2 elementy – DPS a osazované součástky.

Pájecí linky umožňují velkou míru individualizace – v podstatě se jedná o složení několika jednotlivých strojů za sebe a jejich vzájemné propojení. Díky této individualizaci je možné pájet jak součástky typu SMD, tak typu THT na jedné lince. Dnešní linky se většinou skládají z těchto zařízení: podavač DPS, šablonový tisk pro nanášení pájecí pasty, automatická kontrola pasty (SPI), osazovací automat součástek SMT, optická kontrola osazení součástek (AOI), průběžná pec pro přetavení SMT součástek, optická a rentgenová kontrola, osazovací automat THT součástek, optická kontrola osazení součástek, přetavení pomocí vlny, optická a rentgenová kontrola, elektrická kontrola.

1.1.1 Podavač DPS

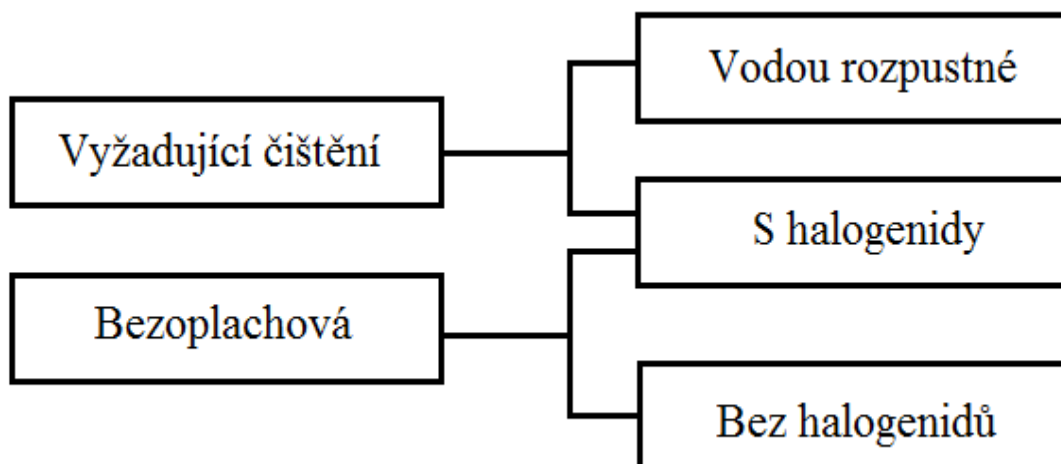
Podavač DPS je obvyklou součástí každé pájecí linky. Jeho úloha je zásobovat linku předem připravenými deskami, na které se budou osazovat komponenty. Musíme si uvědomit, že DPS je nepřehledné množství, a proto je většina podavačů nastavitelná na rozměry konkrétní DPS.

1.1.2 Pájecí pasta a její nanášení

Pájecí pasta se používá u technologie SMT, kde dochází k pájení přetavením. Hlavní výhodou používání pájecí pasty je nanášení jejího přesného množství na každý spoj. To zaručuje stejnou kvalitu všech spojů a jejich lepší reprodukovatelnost.

Pájecí pasta je složena ze dvou složek. První složkou je tavidlo, které je většinou tvořeno přírodní kalafunou. Druhou složkou je mikronizovaná kovová slitina. Podle druhu kalafuny můžeme pájecí pasty dělit do dvou skupin. Jsou to pasty vyžadující čištění a pasty bezoplachové (tzv. no-clean). Pro čištění vodou rozpustných past, se

používá deionizované vody a čištění past obsahujících halogeny je zajištěno pomocí saponátu.



Obr. 1 Rozdělení tavících past

V 90. letech byly z důvodu rychlosti a ekonomičnosti zaváděny bezoplachové pasty. Nicméně tyto pájecí pasty mají jednu nevýhodu a to je náchylnost k sesunutí pasty po tisku. Halogeny dodávají pastě lepší zpracovatelnost (pasta je tvárnější) a pájitelnost. Na druhou stranu zhoršují spolehlivost spoje. Pasta s halogeny má obecně lepší aktivační vlastnosti a právě těmito vlastnostem přisuzujeme výhody těchto past. Proto je snaha o vytvoření past bez halogenů, které by měly vylepšené aktivační vlastnosti. Toho docílujeme pomocí přidání organických kyselin. Tyto kyseliny ale mají jednu značnou nevýhodu – mají tendenci absorbovat vlhkost. Proto přidáváme speciální neionogenní aktivátory, které mají stejné aktivační schopnosti jako halogeny. Díky specifické kombinaci všech těchto složek můžeme dosáhnout lepší aktivace a tím i zlepšení pájitelnosti.

Přes veškerou snahu zlepšování této technologie, i ona má své hranice. V dnešní době se řada výrobců opět přiklání k technologii zakončené čištěním. Důvody jsou prosté:

1. Vyšší nárok na povrchově izolační odpory (SIR)
2. Náročnější podmínky, ve kterých jsou výrobky používány
3. Vývoj nových a menších pouzder – CSP, LLC, LLMA a dalších
4. Zmenšování Z-osového odstupu komponent od DPS

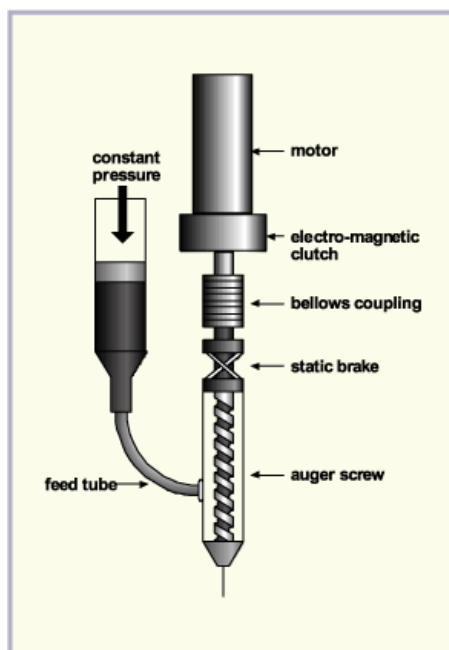
Díky těmto faktorům dochází k opětovnému rozšíření čištění, založeného na vodní bázi a za použití bezoplachových past. Vodní čištění se upřednostňuje z jednoduchých důvodů – ekologičnost a ekonomičnost celého procesu čištění.

Nejnovějším trendem v oblasti čištění je iontová čistota. Iontová čistota zaručuje, že na povrchu sestavy DPS nejsou žádné volné látky, které mají elektronovou aktivitu, a mohlo by dojít k jejich uvolnění. Mezi tyto látky patří např. kyseliny, zásady, soli a organické radikály. Tyto látky mohou s přispěním vlhkosti vytvářet dielektrika a způsobit pohyb iontů kovů, které kvůli rozdílu potenciálů způsobí vodivé můstky mezi elektrodami soustavy.

Nicméně na pájecí pastu klademe spoustu dalších požadavků. Pro koncového uživatele je nejdůležitější chování pasty během výrobního procesu DPS. Při tisku pasty chceme, aby pasta na šabloně byla stabilní, nezasychala na ní a aby po odstranění šablony vznikl ostrý obrazec, který bude rozměrově stabilní a nebude docházet k jeho hroucení. Při dávkování chceme, aby pasta nevytvářela vzduchové bubliny a nedocházelo k separaci jednotlivých složek pasty. Při osazování SMT součástek od ní požadujeme dobrou a dlouhou lepivost, která nám bude držet osazované součástky přesně na určeném místě. Během přetavovacího cyklu chceme, aby pasta měla vhodný přetavovací profil. Při nutnosti použití příliš velké teploty, by mohlo dojít k poškození součástek, nebo samotné DPS. Po přetavení by pasta měla vytvořit dokonalý spoj, který bude jak vzhledem, tak i tvarem odpovídat normě.

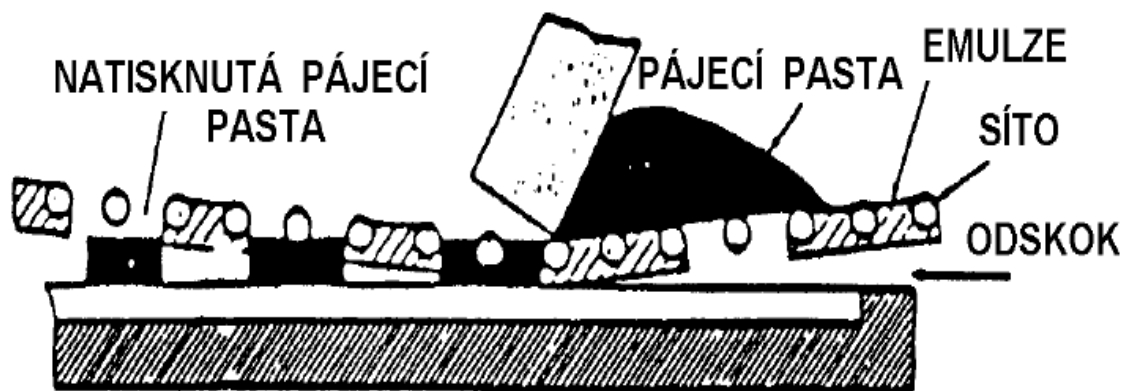
Po výběru pájecí pasty, která splňuje naše požadavky, nás čeká její nanesení na DPS. Nanesení můžeme provést třemi způsoby – pomocí disperzeru, pomocí sítotisku, nebo pomocí tisku přes šablonu.

Nanášení pomocí disperzeru, se používá v případech, kdy není ekonomicky výhodné vyrábět šablonu. To je v případech výroby malých sérií, při výrobě prototypů nebo při opravě. Disperzer může být ruční nebo strojní. Výhoda ručního dávkování je levné a rychlé nanášení na potřebné místo. Podle potřebného množství pasty se volí průměr jehly disperzeru. Některé kartuše (zásobníky pasty) jsou vyhřívány, aby byla zajištěna rovnoměrná viskozita pasty v celém objemu. Strojní nanášení disperzerem je využíváno jako alternativa k sítotisku nebo šablonovému tisku. Tato metoda je použita při výrobě malých sérií. Vytlačování pasty je zajištěno dvěma způsoby – vytlačováním pomocí vzduchu nebo pomocí šroubovice.

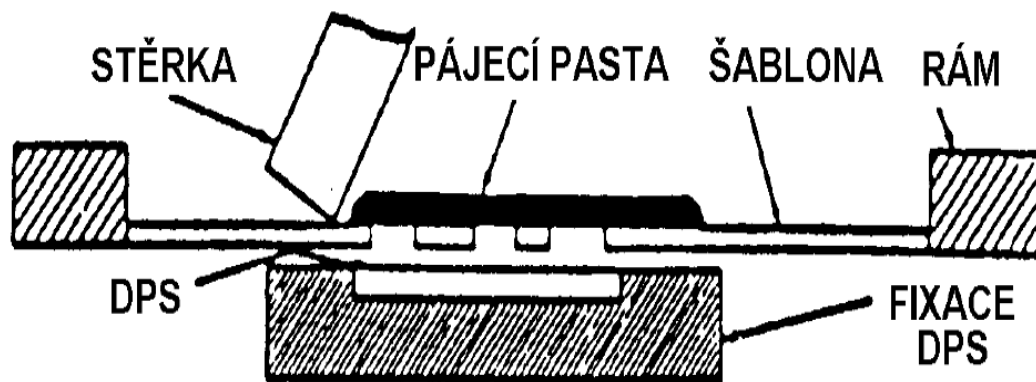


Obr. 2 Dispenzer - vytlačování šroubovicí [5]

Šablonový tisk a sítotisk je založen na podobném principu. Na DPS je přiložena šablona/síto, přes které se vytlačuje pasta pomocí stěrky. Síto se skládá z rámu a síťoviny. Jako materiál se nejčastěji používá polyester – z důvodu nižší ceny. Jeho nevýhodou je menší možnost napnutí. Kvalitnější síta se vyrábějí z nerezové oceli, která pro svoji vyšší cenu nejsou tolik používána. Šablony pro šablonový tisk se vyrábějí z kovů a to z nerezové oceli, bronzu, niklu anebo mosazi. Nevýhodou tohoto způsobu nanášení pasty je nutnost výroby nové šablony/síta pro každý druh DPS. Proto se tento způsob nanášení používá u středních a velkých sérií výroby.



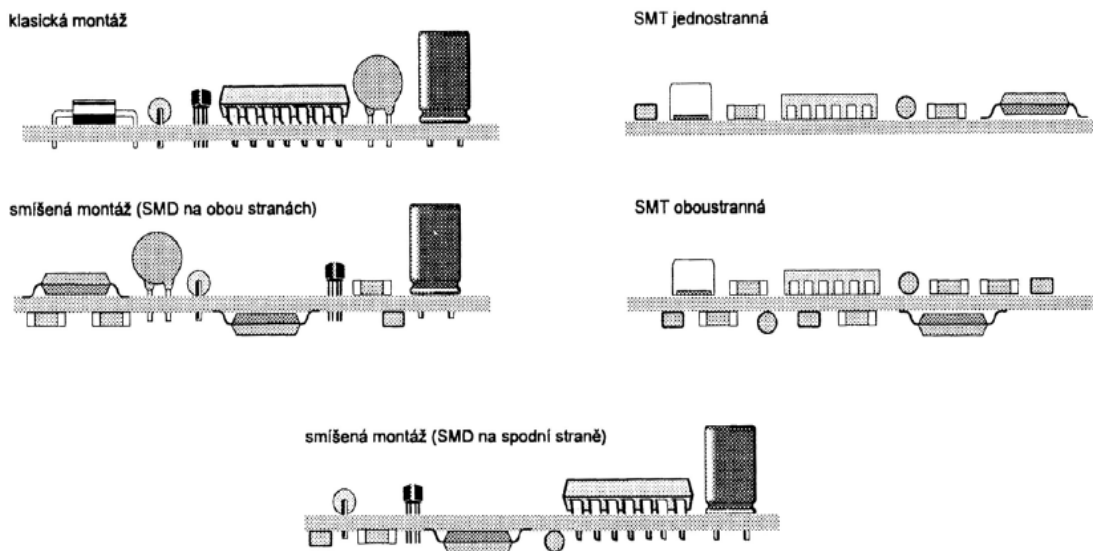
Obr. 3 Sítotisk [15]



Obr. 4 Šablonový tisk [15]

1.1.3 Osazovací automat

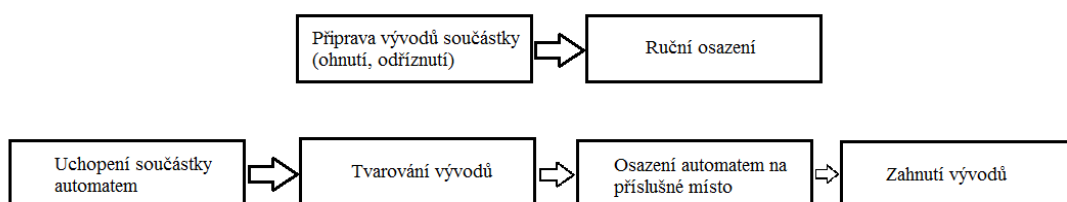
Osazovací automat je nedílnou součástí každé výrobní linky. Jeho úkolem je osazování součástek na DPS. Toto osazování je možné provést několika možnými způsoby. Vše záleží na typu použitých součástek a jejich umístění na jedné, nebo obou stranách DPS. Výběr postupu osazování závisí na poměru SMT a THT technologie. Z technologického hlediska je nejsložitější použití obou druhů součástek při oboustranném osazení DPS.



Obr. 5 Různé druhy osazení součástek [5]

1.1.3.1 Osazení THT součástek

Při osazování součástek THT do otvorů máme na výběr dva způsoby osazení. V případě malého počtu součástek je můžeme osazovat ručně. V tom případě musíme provést určité úpravy osazovaných součástek, jako je např. zahnutí a zkrácení vývodů. Tento typ osazování se používá zejména pro osazení náročných prvků, jako jsou např. konektory nebo cívky. V případě automatického osazování jsou součástky uchopeny ze zásobníku, jejich vývody jsou tvarovány a poté jsou umístěny na místo určení. Následně jsou jejich vývody zespoda lehce ohnuty, aby nedošlo k jejich uvolnění během následující přepravy. Tímto způsobem jsou osazovány především pasivní součástky. Pro pájení THT součástek se využívá pájení vlnou.



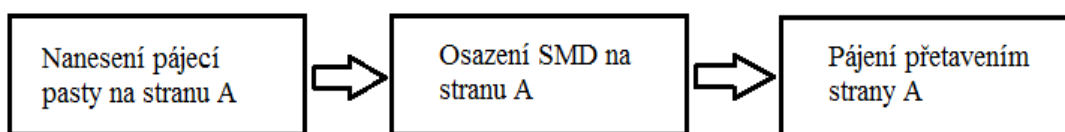
Obr. 6 Princip osazování THT součástek

1.1.3.2 Osazení SMD součástek

Montáž SMD součástek lze rozdělit na montáž součástek na jednu, nebo obě strany DPS. Pro jednodušší orientaci označíme vrchní stranu DPS jako stranu součástek a spodní stranu DPS jako stranu vývodů (na této straně by při použití THT součástek byly jejich vývody a proto strana vývodů).

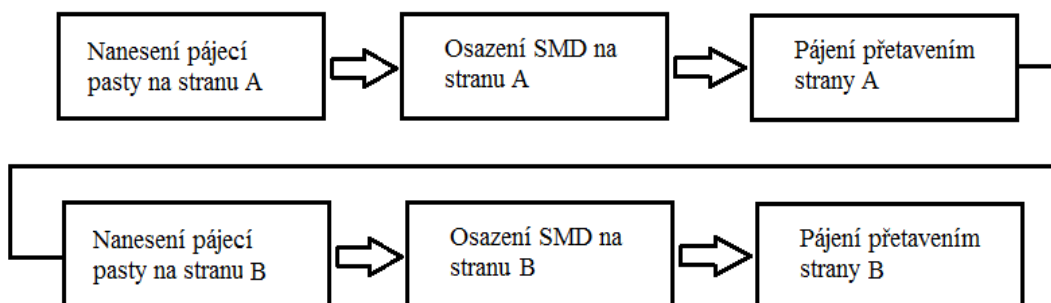
Při jednostranném osazování součástek se nejprve nanese pasta na stranu součástek. Po její kontrole jsou pomocí osazovacího automatu uchopovány součástky a postupně umísťovány na jejich pozice na DPS. Osazovací automat funguje na principu pick and place – uchoť a ulož. Uchopení součástek funguje na principu podtlaku. Automat je vybaven osazovací hlavicí, která vytváří podtlak a pomocí trysky uchopuje součástky. Trysek je několik druhů a jejich výměna se provádí většinou automaticky v závislosti na velikosti součástky. Osazovací hlavice je umístěna ve vodivých lištách a její pohyb je zajištěn pomocí servomotorů ve všech osách pohybu. Součástky jsou umístěny v zásobnících, odkud jsou brány pomocí osazovací hlavy. Zásobníků je

několik druhů. Mezi nejpoužívanější patří např. páskové, vibrační, paletové, modulární nebo miskové.



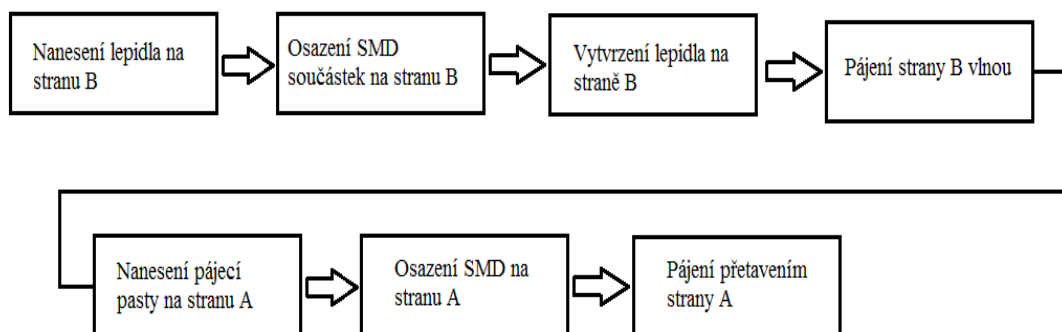
Obr. 7 Princip osazování SMD součástek - jedna strana

Při oboustranném osazování máme na výběr dva technologické postupy. První způsob je provedení jednostranného osazování dvakrát za sebou. Nejprve je nanášena pasta na stranu součástek, poté jsou součástky osazeny a nakonec zapájeny pomocí přetavení. Poté je deska otočena a opět nanášena pasta, osazeny součástky a připájeny. Tento proces má řadu nevýhod. Při sériové výrobě je to nutnost mít ve výrobní lince zařazeny dva automaty pro nanášení pasty, pro osazení součástek a pro přetavení. Další nevýhodou je riziko odpájení součástek z první strany při druhém přetavení. Tyto problémy se dají řešit použitím lepidla, kdy jsou součástky na straně vývodů přilepeny a přetavení obou stran probíhá souběžně.



Obr. 8 Princip osazování SMD součástek - 2 strany - varianta 1.

Druhý způsob je připájet stranu vývodů pomocí vlny. Na stranu vývodů je nanášeno lepidlo a poté jsou osazeny součástky. Následně je připájíme pomocí vlny. Strana součástek může být osazena před nebo po připájení strany vývodů. Při pájení vlnou totiž teplota na straně součástek nepřesáhne teplotu 100°C.



Obr. 9 Princip osazování SMD součástek - 2 strany - varianta 2.

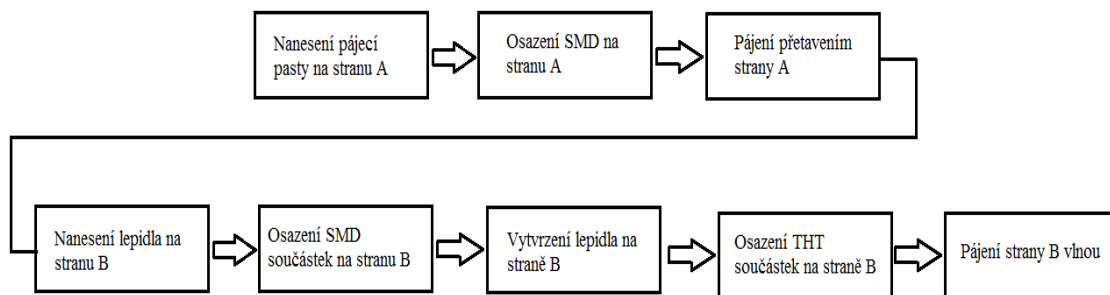
1.1.3.3 Smíšené osazování

Smíšené osazování je z technologického hlediska nejsložitější z důvodu použití obou typů součástek. Dále je nutno dodržet určité technologické postupy, jako je například montáž nejprve SMD součástek před součástkami THT z důvodu nanášení pasty. Smíšené osazování můžeme dělit podle umístění SMD součástek – na straně součástek, na straně vývodů, nebo na obou stranách.

Při osazování SMD součástek pouze na stranu součástek je celý postup velice jednoduchý. Nejprve naneseeme pastu, poté SMD součástky, které připájíme přetavením a nakonec osadíme THT součástky, jejichž vývody připájíme vlnou.

Při osazování SMD součástek na stranu vývodů SMD součástky upevníme pomocí lepidla. Poté osadíme THT součástky a následně vše připájíme pomocí vlny.

Pokud osazujeme SMD součástky na obě strany, je celý proces o něco složitější. Nejprve naneseeme pastu na stranu součástek, kterou osadíme SMD součástkami a připájíme přetavením. Poté pomocí lepidla upevníme součástky SMD na straně vývodů, osadíme THT součástky a celou stranu vývodů připájíme pomocí vlny.



Obr. 10 Princip smíšeného osazování

1.1.4 Pájení vlnou

Pájení vlnou je u nás nejrozšířenějším způsobem pájení. Tento způsob pájení je vhodný jak pro klasické THT součástky, tak i pro SMD součástky. Pájení vlnou se skládá z několika přesných technologických procesů, které je nutné dodržet pro dosažení maximálně spolehlivého a kvalitního spoje. Tyto procesy jsou: nanesení tavidla, předehřev a samotné pájení vlnou. Někdy může být jako doplňkový proces na konec cyklu zařazeno i čištění.

1.1.4.1 Tavidlo a jeho nanášení

Tavidla se vyskytují ve formě plynné, kapalné, nebo tuhé. Funkce tavidla je vcelku prostá, za to o to důležitější. Jeho úlohou je očištění povrchu DPS a součástky a následné zabránění oxidaci při nanášení rozteklé pájky. Tavidlo se skládá ze 4 základních složek: tavidlový nosič, aktivátor, aditivum a rozpouštědlo. Tavidlový nosič se většinou skládá z přírodní nebo syntetické pryskyřice. Někdy je tvořen organickou kyselinou. Aktivátory jsou založeny na organické bázi (halogenidy) nebo na anorganické bázi. Aditivum je látka specificky upravující vlastnosti tavidla. Může obsahovat látky, které upravují viskozitu, tixotropnost, nebo např. látky, které stabilizují pěnu a zabraňují shlukům. Rozpouštědla se používají organická (alkoholy) nebo anorganická (deionizovaná voda). V ČR jsou tavidla dělena podle normy ČSN EN ISO29454-1. Toto dělení je založeno na látce, kterou je tvořen tavidlový nosič.

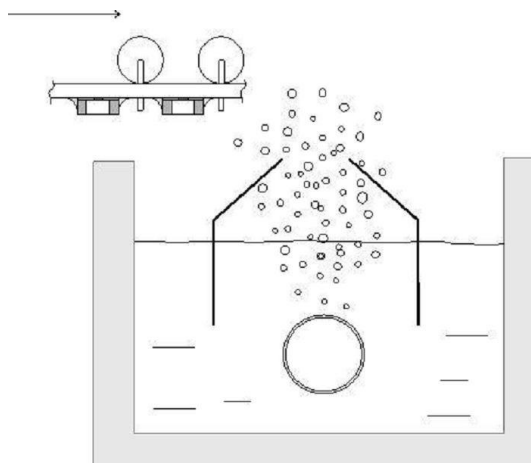
TYP TAVIDLA	ZÁKLADNÍ SLOŽKA	AKTIVÁTOR	FORMA TAVIDLA
1. pryskyřicové	1. kalafuna 2. bez kalafuny	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta
2. organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta
3. anorganické	1. soli 2. kyseliny 3. zásady	1. NH ₄ Cl 2. bez NH ₄ Cl 1. kyselina fosforečná 2. jiné kyseliny 1. aminy nebo amoniak	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta

Tabulka 1 Typy tavidel

Pro nanášení tavidla můžeme použít několik metod. Cílem všech metod je nanášení tavidla na DPS tak, aby vznikla jednotná vrstva, která na DPS vydrží po celou dobu pájení a která bude na všech spojích stejná a tudíž snadno reprodukovatelná. Dalším cílem je maximální úspora tavidla a tím i financí.

Ultrazvukový dávkovač je jedním z nejmodernějších zařízení určených pro nanášení tavidla. Jeho výhodou je vytváření dokonalé souvislé vrstvy s velmi malou tloušťkou. Princip spočívá v absorpci zvukových vln tavidlem, které způsobí změnu krystalové mřížky. Přenos tavidla se děje prostřednictvím zvukového vlnění, které vzniká na rezonátoru. Piezoelektrický krystal, který převádí elektrickou energii na mechanickou, je umístěn mezi dvěma kovovými komponenty, z nichž jeden tvoří trysku. Tento systém má snad jedinou nevýhodu a tou je náchylnost k ucpaní trysek.

Pěnový dávkovač patří spíše k levnějším metodám nanášení tavidla. Princip je založen na proudění vzduchu přes provzdušňovač, který je ponořen v tavidle. Provzdušňovač bývá z pravidla tvořen keramickým porézním kamenem. Vzduch v tavidle vytváří bubliny o průměru 1-2mm. Bubliny jsou vedeny kónickou tryskou na DPS, na kterou jsou nanášeny. Při prasknutí bubliny dochází k nanášení tavidla na spoje. Nevýhodou této metody je větší spotřeba tavidla, což vede k větším provozním nákladům.



Obr. 11 Pěnový dávkovač [5]

Sprejový dávkovač využívá k nanesení tavidla stlačený vzduch. Tryska je umístěna pod dopravník a pohybuje se v osách X a Y. Lepší přístroje nabízejí i možnost náklonu trysky, což umožní nástřik tavidla pod určitým úhlem. Tím dochází k dalšímu šetření tavidla. Nástřik tavidla pomocí trysek probíhá přes šablonu.

Posledním způsobem nanášení tavidla je pomocí dávkovače s rotujícím kartáčem. Tyto dávkovače dělíme na dva typy. Prvním z nich je dávkovač, využívající rotující buben s malými otvory. Buben je namáčen do tavidla a pomocí trysky umístěné uvnitř bubnu je tavidlo nanášeno přes otvor vymežující prostor pro nástřik. Pro nanesení správného množství tavidla je důležitá rychlost pohybu dopravníku s DPS, síla tlaku vzduchu z trysky, rychlost rotace bubnu a viskozita tavidla. Druhým způsobem je dávkovač s rotujícím kartáčem. Kartáč je tvořen syntetickými vlákny, která se ponořují do tavidla. Pomocí lamely dochází k napružení vláken a k následnému vymrštění tavidla na DPS. Pro nanesení správného množství tavidla je opět důležitá rychlost pohybu dopravníku s DPS, síla tlaku vzduchu z trysky, rychlost rotace bubnu a viskozita tavidla.

1.1.4.2 Předehřev

Hlavním úkolem předehřevu je aktivace naneseného tavidla. Jeho vedlejším efektem je minimalizace teplotního šoku DPS. Předehřev můžeme realizovat několika způsoby. Mezi nejrozšířenější patří infračervený a horkovzdušný předehřev.

Infračervený předehřev je realizován pomocí IR zářičů. Jeho hlavní nevýhodou je nerovnoměrná absorpce IR záření. Absorpce záření je ovlivněna velikostí, tvarem,

barvou a materiálem povrchu. Tato nerovnoměrná absorpce vede k nedokonalému prohřátí, což může vést ke špatné aktivaci tavidla a zvětšení teplotního šoku DPS.

Horkovzdušný předehřev je realizován pomocí topného tělesa, které ohřívá vzduch, a ventilátoru, který žene vzduch na DPS. Absorpce tepla je lepší a rovnoměrnější než u IR předehřevu. U obou typů předehřevů je důležitá rychlost dopravníku a vzdálenost DPS od zdroje tepla.

1.1.4.3 Vlna

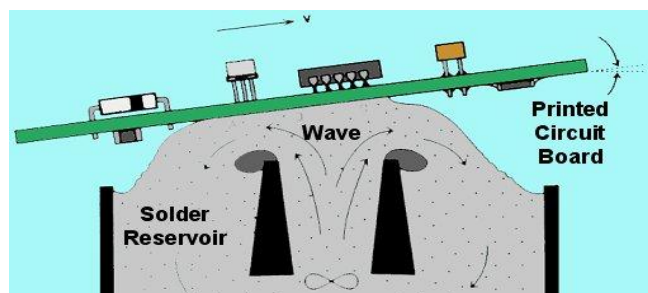
Vlnu lze charakterizovat jako roztavenou pájecí slitinu hnanou čerpadlem.. Zařízení na pájení vlnou se skládá z vyhřívané vany, ve které je roztavená slitina, čerpadla, které vytváří vlnu, a trysky, která vlnu formuje. První prototypy strojů, které pájely na základě vlny, se snažily o kolmý dopad vlny na DPS. To mělo značnou nevýhodu v podobě vzniku závoje pájky, který byl příčinou vzniku chyb, jako jsou např. krápníky nebo můstky. Dnes jsou dopravníky s DPS nakloněny pod úhlem 4°- 8°. Vlny dělíme na vlnu jednoduchou, dvojitou a skupinu tzv. reflexních vln, do které patří dutá vlny, delta vlna a turbulentní vlna.

Nejnovějším trendem v oblasti pájení vlnou je tzv. selektivní pájení vlnou, kde místo jedné velké vlny máme řadu trysek, tzv. komínků, které vytvářejí mnoho malých vln. Tato metoda pájení výrazně snižuje vznik chyb pramenících z pájení vlnou.

Nevýhodou pájení vlnou je velké množství roztavené pájky ve vaně. Množství se pohybuje v řádech stovek kg, v závislosti na velikosti stroje. Toto množství pájky musí být nějak chráněno proti povrchové oxidaci. Nejúčinnější je použití inertního plynu, nejčastěji dusíku. Toto řešení je velice finančně i prostorově nákladné, a proto není příliš rozšířené. Další možností je přimíchání oleje do slitiny. Olej díky menší hustotě plave na povrchu slitiny a vytváří tak olejový film, který brání oxidaci.

1.1.4.3.1 Jednoduchá vlna

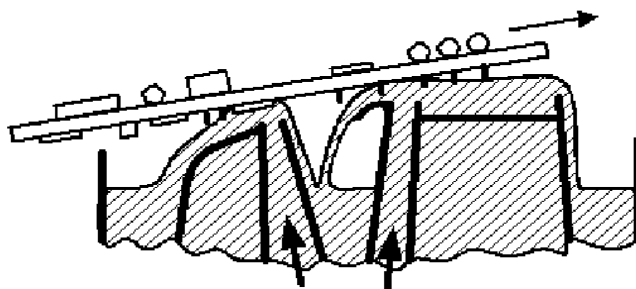
Jednoduchá vlna se většinou používá pro pájení klasických THT součástek. Pájení SMD součástek je samozřejmě také možné, ale pouze při jejich nižší koncentraci. Při velké koncentraci THT součástek může dojít ke vzniku praporků. Tento problém se dá řešit vhodným nastavením vlny a rychlosti dopravníku.



Obr. 12 Jednoduchá vlna [5]

1.1.4.3.2 Dvojitá vlna

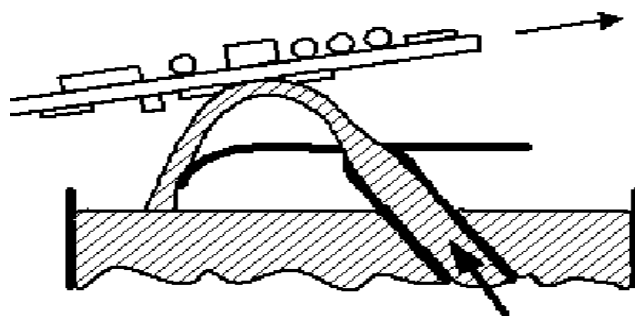
Dvojitá vlna se skládá ze dvou vln. Touto vlnou můžeme pájet klasické THT součástky a součástky SMD i ve vyšší koncentraci. První vlna je tvořena čerpadlem a tryska jí směřuje ve směru pohybu DPS. Druhá vlna je v podstatě klasická jednoduchá vlna. Úkolem první vlny je primární zapájení všech součástek. Zároveň se jí eliminuje vznik tzv. stínů u SMD součástek. Druhá vlna pak dopájí součástky.



Obr. 13 Dvojitá vlna [5]

1.1.4.3.3 Dutá vlna

Ve skupině reflexních vln je nejdůležitější vlnou vlna dutá. Dutá vlna je tvořena silným proudem slitiny, která je na DPS hnána pomocí čerpadla a trysky rychlostí 1m/s. Vlna je oproti jednoduché vlně velice úzká. Její šířka je 1 až 2cm. Další výhodou je lepší tepelný přenos při velmi nízkém tepelném zatížení. To je způsobeno velice krátkým kontaktem vlny s pájeným místem na DPS.



Obr. 14 Dutá vlna [5]

Po pájení vlnou následuje chlazení. Chlazení je důležité z hlediska vzniku kvalitní struktury pájky a jejího povrchu. Prudkým ochlazením spojů docílíme jemné struktury pájky a zabráníme tím vzniku intermetalických sloučenin, které zhoršují vlastnosti pájeného spoje.

1.1.4.4 Čištění

Tento proces zařazujeme na konec pájení vlnou podle toho, jaké tavidlo používáme. U no-clean tavidel, jak už název napovídá, proces čištění nepoužíváme. U tavidel s nutností čištění používáme nejčastěji různé ultrazvukové pračky, nebo ostříkový oplach. Zbytky tavidla je důležité odstranit, aby nedošlo ke vzniku koroze a následného zničení pájených vývodů.

1.1.5 Pájení přetavením

Pájení přetavením se využívá hlavně pro pájení SMD součástek. Prvním krokem je nanesení pájecí pasty (viz kapitola Pájecí pasta a její nanášení). Po nanesení pasty dochází k osazení součástek na DPS (viz kapitola Osazování SMD součástek). Osazená DPS putuje po dopravníku do pece, ve které dochází k přetavení pasty, což způsobí připájení součástek na DPS. Tento princip je zcela opačný než u pájení vlnou. Při pájení vlnou dodáváme pájecí materiál na pájené místo, zatímco zde se nejprve nanese pájecí materiál a až poté dojde k připájení součástek. Existuje několik způsobů přenosu tepla na DPS, od kterých se potom odvíjí jednotlivé technologické postupy pájení přetavením. K přenosu tepla můžeme využít kondukcí (vedení), konvekci (proudění), nebo radiaci (záření).

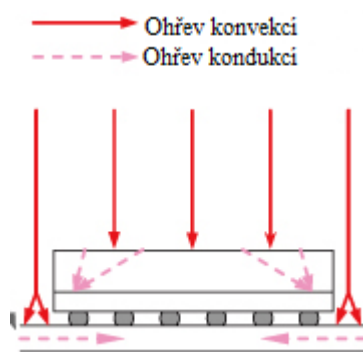
Při kondukcí využíváme rozdílných teplot DPS a média, které zajišťuje přenos tepla. Médium může být pevné, plynné, nebo kapalné. K přenosu tepla dochází přímým dotykem DPS a média. Kondukcí se využívá hlavně u materiálů, které mají výbornou tepelnou vodivost, např. kovy.

Při konvekcí tepla dochází k přenosu pomocí pohybu celého média. Medium je v tomto případě plynné, nebo kapalné. Přenos tepla je intenzivnější než u samotné kondukcí. Konvekcí může být přirozená, nebo nucená. Přirozená konvekcí nastává v důsledku působení gravitace v médiích, kde je rozdílná hustota média mezi studenou a teplou částí. Nucená konvekcí se vytváří uměle, pomocí ventilátorů nebo čerpadla a je používána pro vytvoření intenzivnějšího přenosu tepla.

Při radiaci se využívá přenosu tepla pomocí elektromagnetického vlnění. Na základě těchto 3 základních druhů přenosu tepla jsou poté konstruovány pece pro pájení přetavením. Základními technologie jsou pájení pomocí horkého plynu, IR pájení, pájení v parách, pájení laserem, nebo pájení na horké desce.

1.1.5.1 Pájení pomocí horkého plynu

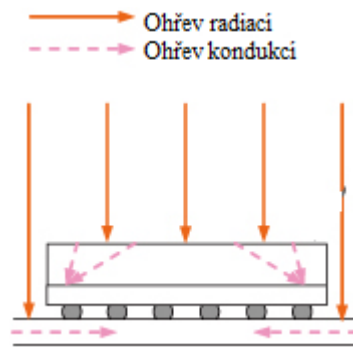
Pájení pomocí horkého plynu je klasický příklad využití přenosu tepla pomocí konvekcí. Jako plyn zde může být použit obyčejný vzduch, nebo dusík, který zároveň vytváří inertní atmosféru a zabraňuje tak oxidaci vytvářených pájených spojů. Plyn je ohříván pomocí tepelných elementů a ventilátory je hnán na dopravník s DPS. Výhodou tohoto způsobu je lepší prohřátí DPS a menší závislost teploty na parametrech součástek (materiál povrchu, barva, atd.). Nevýhodou je delší čas, než nastane přetavení. Někdy je tento způsob přetavení kombinován s IR zářičem.



Obr. 15 Pájení přetavením pomocí horkého vzduchu [5]

1.1.5.2 Pájení pomocí IR zářiče

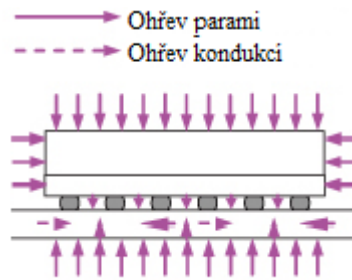
Tato metoda je typickým zástupcem přenosu tepla pomocí radiace. Teplo je vytvářeno a emitováno do okolí pomocí IR zářičů. Výhodou je nižší čas pájení a vyšší účinnost. Nevýhodou je nehomogenní ohřev DPS. Absorpce tepla je vysoce závislá na parametrech součástek. Je ovlivňována povrchem, barvou tvarem a velikostí. Může také docházet k shadow efektu, což je zastínění menší součástky součástkou větší. Dále může dojít k přehřátí, nebo naopak nezapájení součástek.



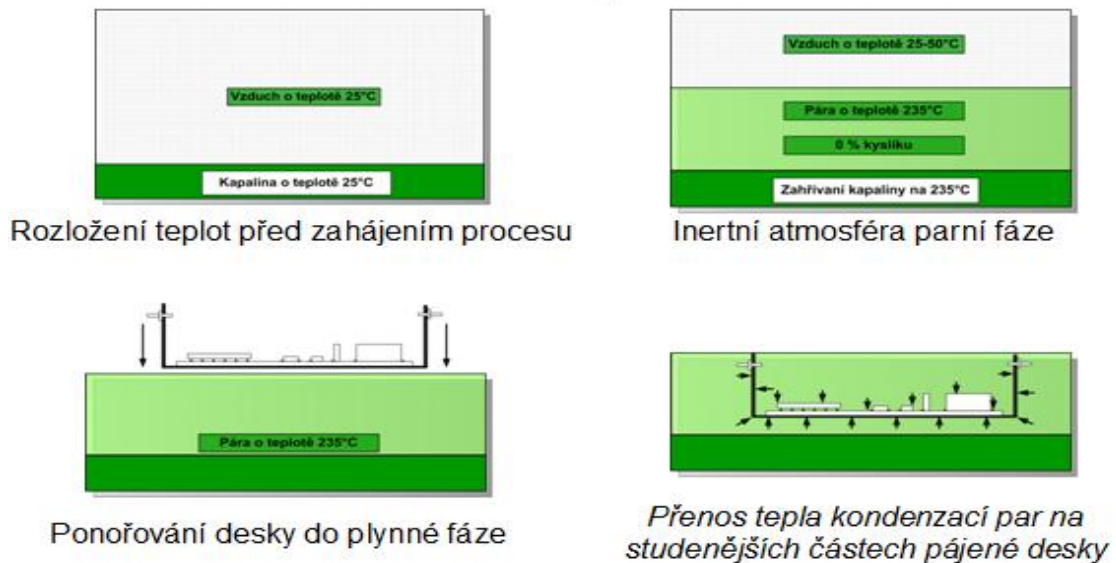
Obr. 16 Pájení přetavením pomocí IR zářiče [5]

1.1.5.3 Pájení v parách

Tato technologie byla vynalezena již v 70. letech minulého století, nicméně do obliby se dostala až s nástupem bezolovnatého pájení. Princip je velice jednoduchý. Na dně nádoby je umístěna kapalina, tzv. galden. V nádobě jsou umístěna topná tělesa, která zahřívají kapalinu na bod varu. Bod varu kapaliny je přesně definovaný a nedochází tudíž k přehřátí DPS. V momentě, kdy začnou vznikat páry, dochází k vytlačení veškerého vzduchu, protože páry jsou těžší než vzduch. Tím je zároveň vytvořena i inertní atmosféra bez použití dusíku. Poté dojde k ponoření DPS do par. Páry mají tendenci kondenzovat na chladnějším povrchu DPS a tím DPS ohřívají a dochází k pájení součástek. Výhodami pájení v parách, jak už bylo zmíněno, je vytvoření inertní atmosféry, přesně definovaná teplota pájení a v neposlední řadě také homogenní rozložení ohřevu DPS. Postupem času ale dochází k ubývání galdenu v soustavě. Další nevýhodou je větší náchylnost na tzv. tombstone efekt.



Obr. 17 Pájení přetavením pomocí par [5]



Obr. 18 Princip pájení v parách [5]

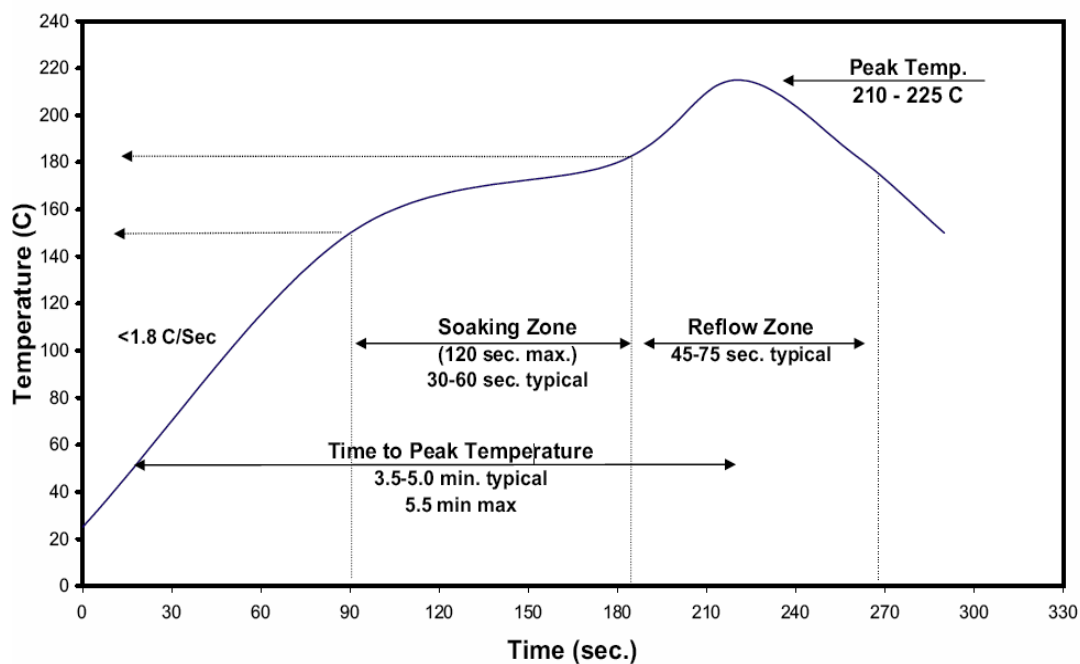
1.1.5.4 Teplotní profil

Teplotní profil pece je velice důležitým aspektem pro vytvoření požadované kvality spoje. V dnešní době se používají většinou průběžné pece, které se skládají z několika teplotních zón. Právě teplota v těchto zónách a rychlost dopravníku DPS vytváří teplotní profil. Základními zónami jsou: zóna předehřevu, zóna pájení a zóna chlazení. Každý výrobce pasty udává i její doporučený teplotní profil, nicméně každá DPS je trochu jiná. Liší se počtem součástek, jejich tvarem, povrchem, velikostí a barvou. Proto každá DPS vyžaduje trochu jiný teplotní profil. K měření a odzkoušení teplotního profilu slouží profilometr, který pomocí termočlánků zaznamenává průběh teploty v závislosti na čase.

V zóně předehřevu dochází k postupnému ohřátí DPS z pokojové teploty. To je velice důležité z hlediska minimalizace teplotního šoku, který by mohl DPS poškodit,

nebo úplně zničit. Nejčastěji se využívá dolního topení, které je tvořeno IR zářičem, nebo pomocí horkého vzduchu.

Zóna přetavení slouží k vytvoření spojů. Teplota v této zóně je jednoznačně nejvyšší, a proto zde jsou i nejvyšší rizika poškození desky. Vzhledem na parametry součástek může dojít k nadměrné, nebo naopak nedostatečné, absorpci tepla a tím i k poškození DPS. V této zóně také vznikají tzv. fluxy a jiné nečistoty.



Graf 1 Příklad teplotního profilu

1.2 Kontrolní metody pájených spojů

Pro výrobce i spotřebitele je prvořadým zájmem maximální kvalita a životnost DPS. Proto jsou do výrobního procesu zařazeny prvky kontroly, určené k detekování vadných výrobků a jejich vyřazení z výrobního procesu. Kontrolní metody můžeme rozdělit do dvou skupin – na metody optické a metody elektrické. Elektrické metody se využívají hlavně na konci výrobní linky k odzkoušení DPS jako celku, zatímco optické kontroly nalézají svoje uplatnění spíše v průběhu montáže.

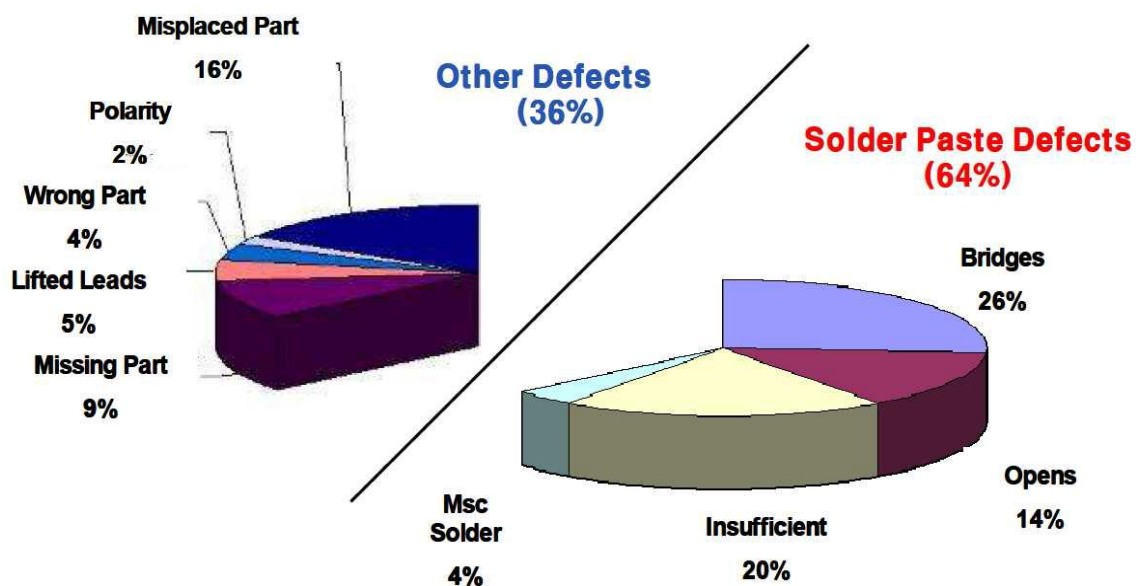
1.2.1 Optické kontrolní metody

U optické kontroly máme několik možností provedení. Nejjednodušší optickou kontrolou je obyčejná zrková kontrola pracovníka. Tato kontrola je jednoduchá a levná. Stačí k ní pouze dostatečně proškolený a zkušený pracovník. Dalším typem

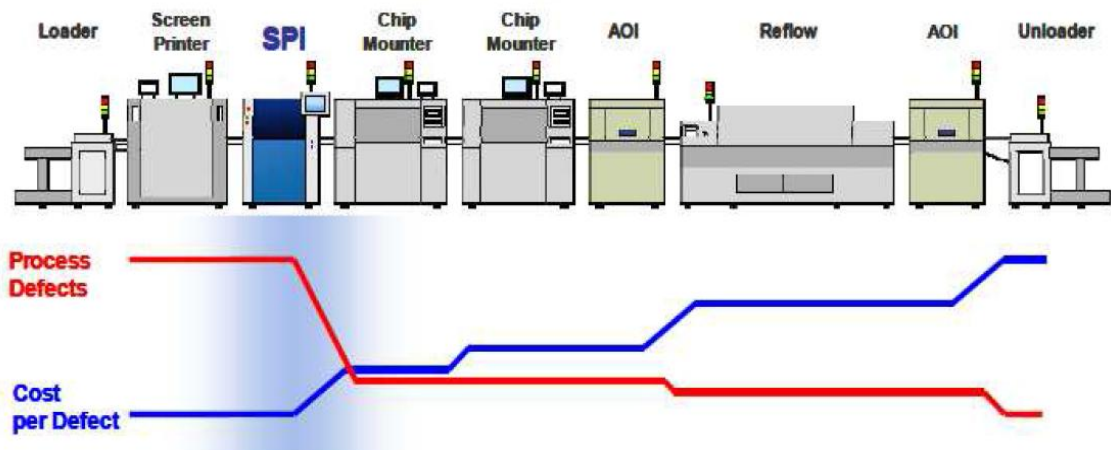
kontroly je kontrola pod mikroskopem, nebo lupou. Princip je v podstatě stejný jako u zrakové kontroly, zásadním rozdílem je lepší kontrola v oblastech s vysokou hustotou miniaturních součástek. Asi nejdůležitější kontrolou je testovací systém AOI – automatická optická kontrola. Jeho provedení může být velice rozličné a testovat se s ním může prakticky vše – od nanášení pasty po kompletně osazenou DPS.

1.2.1.1 Automatická kontrola pasty - SPI

Kvalita nanesení pájecí pasty závisí na mnoha faktorech. Je ovlivněna způsobem tisku, použitými materiály, samotnými vlastnostmi pasty a mnoha dalšími faktory. Už z těchto faktorů vyplívá, jak složité je přesné nanesení pasty. Dalším důvodem je statistika vzniku chyb ve výrobním procesu. Až 64% chyb pramení ze špatně nanesené pasty [7]. Tento poměr chyb jednoznačně ukazuje na to, jak je tato kontrola důležitá. Pokud by nebyla použita SPI tak prvním automatickým kontrolním systémem by byla AOI. Ta nepochybně odhalí mnoho chyb, na druhou stranu spousta chyb je pro ni neviditelných – např. u BGA součástek. Zároveň se dostáváme do situace, kdy osazujeme součástky na DPS, na které může být špatně nanesená pájecí pasta.



Graf 2 Podíl nanesené pasty na vzniklých chybách [7]



Graf 3 Poměr ceny chyby k množství vzniklých chyb v jednotlivých krocích výroby [5]

Princip kontroly pasty je založen na snímání nanesené pasty kamerami. Můžeme použít 2D nebo 3D snímání. Kontroly jsou zaměřeny na snímání polohy nanesení pasty a na množství nanesené pasty.

Kontrola ve dvou rovinách je založena na snímání pasty pomocí jedné kamery. Kamera je umístěna nad DPS a porovnává snímání obraz s předlohou. Předlohu je potřeba předem vytvořit pomocí SW, ve kterém nadefinujeme polohy jednotlivých míst, na které se má pasta nanést. Princip je založen na porovnání odstínu pasty s nanášenou pastou. Pomocí poměru plochy, na které pasta je a na které není, se vyhodnotí, zda je nanesený spoj akceptovatelný. Nevýhodou této kontroly je, že nemůže kontrolovat množství a výšku nanesené pasty.

Kontrola ve 3 rovinách je založena na různých principech. Můžeme použít více kamer, můžeme vyhodnotit odlesky několika různých světelných zdrojů, nebo využít např. laser. Jako nejpřesnější můžeme označit metodu laserovou. Laserový paprsek je nakloněn pod úhlem asi 60° a postupně přejíždí přes pastu. Kamera snímá jeho polohu a pomocí goniometrických funkcí přístroj počítá výšku pasty. Celkový objem je poté vypočten ze změřené výšky všech vzorků. Hlavní výhodou 3D snímání je vyhodnocení výšky, objemu i plochy pasty. Dále je možné vyhodnotit i případné defekty tvaru pasty, např. převislé nebo zaoblené okraje.

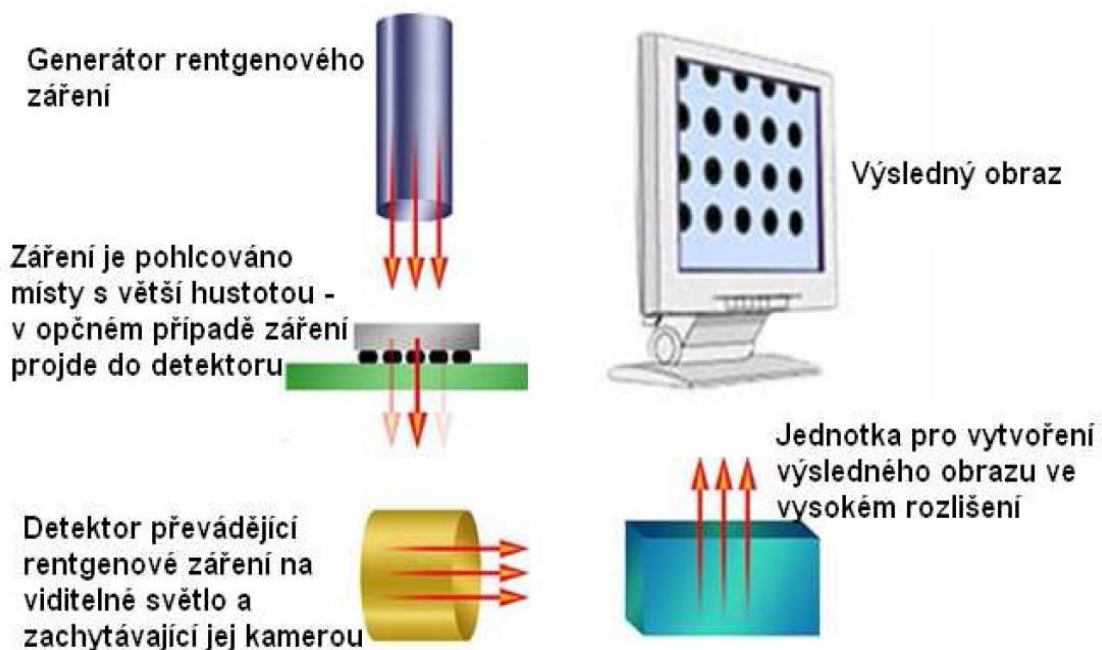
1.2.1.2 Automatická optická kontrola - AOI

Tento kontrolní systém se využívá při kontrole osazených součástek a při kontrole součástek po zapájení. Princip tohoto systému je velice jednoduchý. V systému

je nahrán obraz DPS s osazenými součástkami. Tento obraz je porovnáván s aktuálně snímaným obrazem procházející DPS. Obraz je snímán pomocí kamery s vysokým rozlišením. Systém kontroluje správnost polohy součástek, orientaci součástek, zkratky mezi vývody, nadzvednutí vývodů a mnoho dalších aspektů. Systémy mohou být jak v provedení In-line, tak i Off-line. Nevýhodou těchto systémů je možnost kontroly pouze viditelných míst. Výhodou je bezkontaktní měření, rychlost, flexibilita a možnost použití v různých fázích výroby. V dnešní době se pro kontrolu používají jak barevné, tak černobílé kamery.

1.2.1.3 Rentgenová kontrola kvality spojů

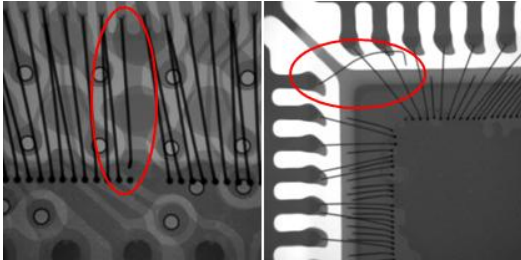
Až doposud, byly všechny kontrolní systémy založeny na pouhé kontrole viditelných ploch. Rentgenová kontrola posouvá hranice možnosti kontroly do míst, kam se s obyčejnými vizuálními kontrolami nedostaneme. Princip rentgenového záření je založen na emitování rentgenového záření na zkoumaný objekt, kde je část záření pohlcena. Pod objektem je umístěn snímač rentgenového záření, který ho převádí na viditelné světlo, které je sejmuto kamerou a následně zobrazeno na obrazovce.



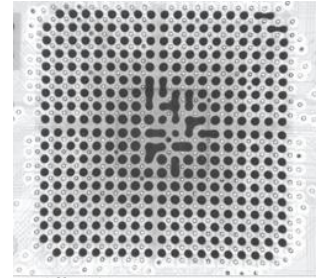
Obr. 19 RTG kontrola [26]

V praxi opět můžeme použít On-line, nebo Off-line systémy. Nevýhodou tohoto zařízení je pořizovací cena a vysoká náročnost na zobrazovací rozlišení obrazu. Výhodou systému je odhalování „neviditelných“ chyb. Můžeme kontrolovat přítomnost voidů, wirebondingu, mechanické trhliny uvnitř spoje, tvar spoje a kvalitu spoje pod

pouzdry součástek. Největší využití je u součástek s BGA pouzdry. Touto metodou můžeme zkontrolovat a vyhodnotit správnost zapájených spojů, které by jinak nebyly vidět.



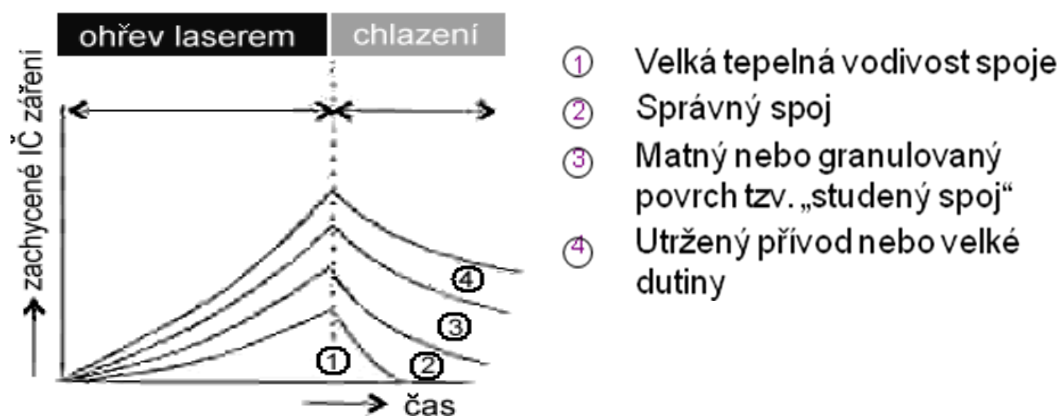
Obr. 20 Kontrola wirebondingu [5]



Obr. 21 Kontrola zapájení BGA pouzdra [5]

1.2.1.4 Laserová kontrola kvality spojů

Kvalitu spoje nemusíme kontrolovat pouze rentgenovým zářením. Odhalené spoje můžeme kontrolovat i pomocí laseru. Existují 2 způsoby kontroly pomocí laseru. V prvním případě se laser používá pouze jako zdroj světla pro kamerový kontrolní systém. Ve druhém případě se používá tzv. Vanzettiho systém. Pomocí výkonného laserového pulsu je kontrolovaný spoj zahřán. Teplota povrchu je měřena bezdotykovým čidlem. Po zahřátí spoje dochází k jeho chladnutí. Spoj lze charakterizovat pomocí emisivity a tepelné kapacity. Proces zahřívání a chladnutí spoje lze popsat pomocí křivky, která určuje správné množství pájky a propojení s DPS.



Graf 4 Laserová kontrola [5]

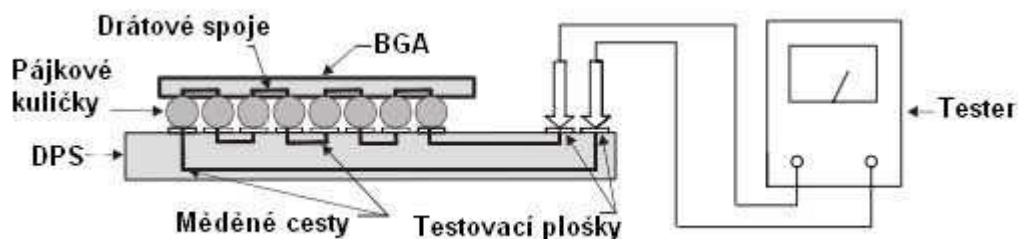
1.2.2 Elektrické kontrolní metody

Tyto metody patří mezi standardní kontrolní metody v elektrotechnické výrobě. Je s nimi počítáno již při návrhu nové DPS. Do návrhu jsou vhodně zakomponovány vývody testovacích a měřících obvodů. Metody můžeme rozdělit do 3 stupňů.

1.2.2.1 První stupeň

První stupeň je zaměřen na kontrolu samotných součástek. Jedná se o tzv. in-circuit testy. Cílem je otestovat hlavní parametry součástek po zapájení. Test je realizován pomocí jehlových polí, které jsou připojeny na vývody součástek. Jehlová pole jsou zdrojem napětí a proudů a měřící systémy měří parametry zkoušených součástek.

Předešlé metody jsou použitelné pro součástky s odhalenými vývody. U součástek s BGA pouzderem je to o něco složitější. U BGA pouzder se používají tzv. testovací patice. Jejich nevýhodou je, že mohou kontrolovat pouze nepřipájené BGA součástky, proto se využívají pouze při výrobě těchto součástek. U připájených součástek s BGA pouzderem se využívá tzv. metody sériového spojení vývodů – Daisy-Chain. Její princip spočívá v sériovém spojení všech vývodů, přičemž krajní vývody součástky jsou vyvedeny přes DPS na testovací vývody, kde probíhá měření. Pokud by některý z vývodů nebyl připájen, celý obvod by byl rozpojen a testovací systém by rozeznal vadně připájenou součástku.



Obr. 22 První stupeň elektrické kontroly [5]

1.2.2.2 Druhý stupeň

Tento stupeň se od prvního liší pouze testováním větších dílčích celků. Po otestování hlavních parametrů součástek v prvním stupni dochází k testování funkčnosti jednotlivých částí DPS. Test je realizován opět pomocí jehlového pole.

1.2.2.3 Třetí stupeň

Tomuto stupni se také říká systémový test. DPS je připojena pouze vstupními konektory, na které je pomocí testovacího algoritmu přivedeno testovací napětí a proud. Na výstupních konektorech dochází k měření a vyhodnocování hodnot.

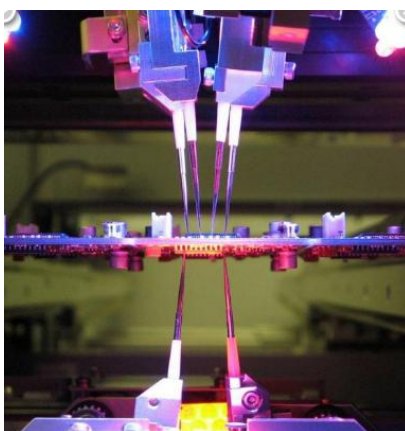
1.2.2.4 Testovací jehlová pole

Prvním typem jehlového pole je pole statické. Na vývody kontaktů jsou přivedeny kontakty měřících přístrojů – jehly. Toto pole se používá v prvním a druhém stupni elektrické kontroly. Nevýhodou tohoto typu pole, je nutnost sestavit pro jinou DPS jiné pole – pole je vždy děláno „na míru“ DPS.



Obr. 23 Statické jehlové pole [5]

Druhým typem je létající jehlové pole. Toto pole je velice flexibilní – stačí pouze zadat souřadnice testovaných kontaktů do programu. Výhodou tohoto typu je vysoká flexibilita – univerzální použití pro různé DPS. Nevýhodou je delší doba měření.



Obr. 24 Létající jehlové pole [5]

1.3 Vznikající chyby

Elektrotechnická montáž je z technologického hlediska velice náročný proces. Proto je důležité si uvědomit, jak náročné je tento proces kontrolovat a řídit. Prakticky od samého začátku až po konec může dojít k chybě procesu. Dnešním moderním trendem je předcházet chybám, a to jak systémovým, tak i náhodným. Z tohoto důvodu se provádí různé analýzy celého procesu. Tyto analýzy se snaží jednotlivé chyby „zaškatulkovat“ do jednotlivých kategorií. U chyb se posuzuje především to, jak často chyba může nastat, jak pravděpodobné je její odhalení a jak závažná chyba je.

1.3.1 Chyby vstupních veličin

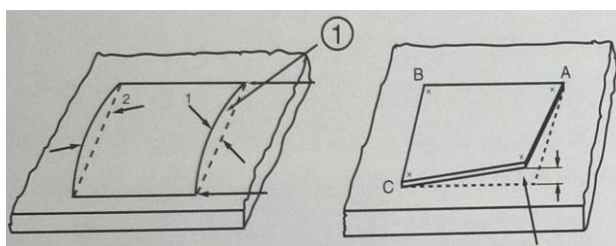
Tyto chyby nesouvisí přímo s chybami vznikajícími při elektrotechnické montáži. Jedná se o chyby, které vznikly při výrobě, přepravě, nebo jiné manipulaci se vstupními veličinami. Vstupními veličinami se rozumí DPS a osazované komponenty.

1.3.1.1 Čistota

V tomto případě se ani tak nejedná o chybu, jako spíš o nesprávnou manipulaci, nebo špatné skladování komponent. Různé nečistoty v podobě mastnoty mohou způsobit problémy se smáčivostí pájky a se vznikem správného spoje.

1.3.1.2 Prohnutí DPS

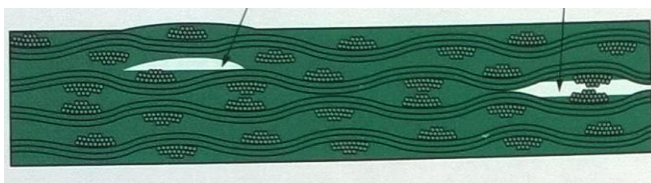
Z obrázku jsou patrné nejčastější druhy prohnutí. Deska může být prohnuta do tzv. luku, popřípadě může být ohnuta jenom jedna její část.



Obr. 25 Prohnutí DPS [3]

1.3.1.3 Delaminace

Delaminace je oddělení jednotlivých vrstev desky. Může vznikat při vysokém teplotním zatížení desky.



Obr. 26 Delaminace DPS [3]

1.3.2 Chyby vznikající při nanášení pasty

Při nanášení pasty vzniká až 65% všech chyb v procesu elektrotechnické montáže. Z tohoto důvodu je nutné pravidelně kontrolovat šablony, zda nejsou nadměrně opotřebené. Záleží především na rozměrech otvoru a na výšce šablony. Výška šablony do značné míry určuje množství nanesené pasty. Při jejím přílišném opotřebení může dojít k nanesení nedostatečného množství pasty. Tvar otvoru zase určuje rozložení nanesené pasty. Aby nedocházelo k vylézání pasty zpod součástky, můžeme volit otvor ve tvaru „houby“. Tím ale zvyšujeme riziko částečného, nebo dokonce úplného ucpání otvoru.

1.3.3 Chyby vznikající při pájení spojů

1.3.3.1 Můstky

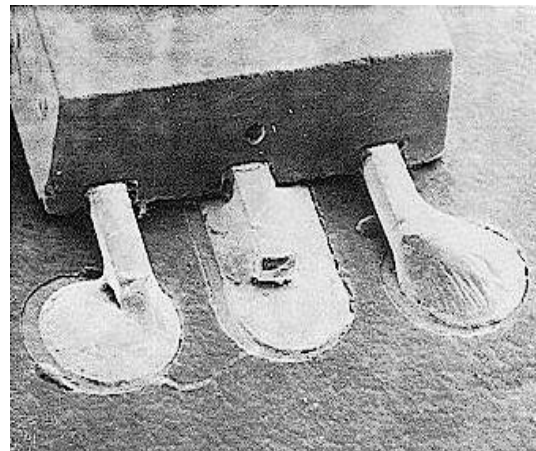
Můstky jsou jednou z nejčastějších chyb. Jedná se o galvanické propojení sousedních vývodů, nebo vodičů na povrchu desky. Nejčastější příčinou této chyby, je nadměrné množství pájecí pasty, které se při přetavení rozteče do stran a spojí se se sousedním vývodem.



Obr. 27 Můstky [5]

1.3.3.2 Chybějící spoj

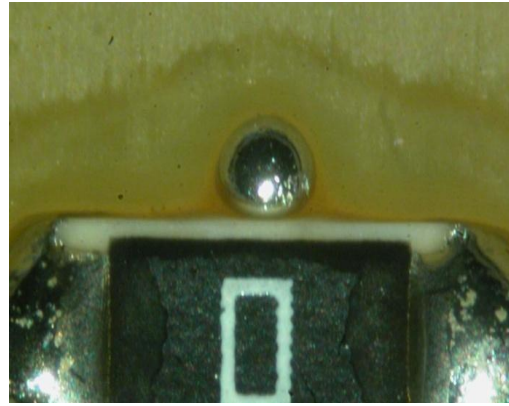
Chybějící spoj je v podstatě opakem můstku. Zde dochází k nevytvoření spoje, mezi vývodem součástky a DPS. Nejčastější příčinou je nedostatečné množství pájecí pasty, způsobené částečně, nebo zcela ucpanou šablonou pro nanášení pájecí pasty.



Obr. 28 Chybějící spoj [5]

1.3.3.3 Kulička pájky vedle součástky

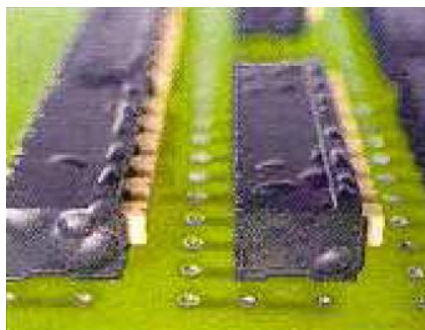
V tomto případě dochází k přetavení pájecí pasty mimo vývod součástky a mimo pájecí plošky DPS. Kulička vzniká při nadměrném množství pájecí pasty, která je součástkou vytlačena vedle ní.



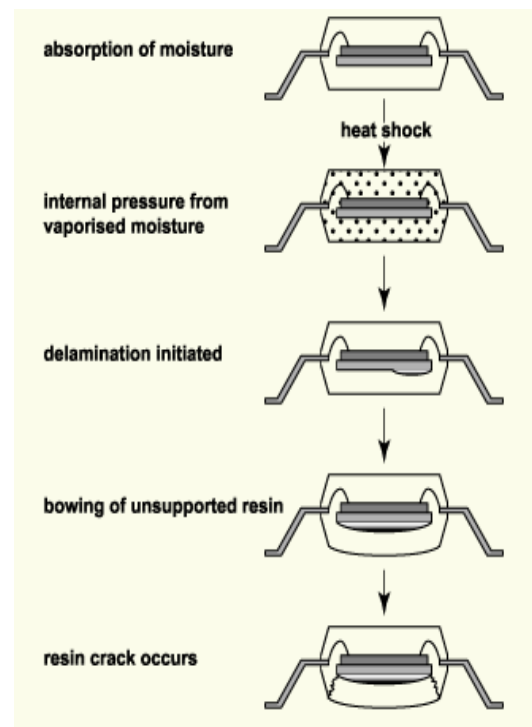
Obr. 29 Kulička pájky vedle součástky [5]

1.3.3.4 Popcorn efekt

Princip popcorn efektu je popsán na obrázku. Jedná se o absorpci vlhkosti, která se následným tepelným šokem začne rozpínat a poškodí tak pouzdro součástky. Nejčastější příčinou je vystavení součástek nepříznivým vlivům prostředí.



Obr. 30 Popcorn efekt [5]



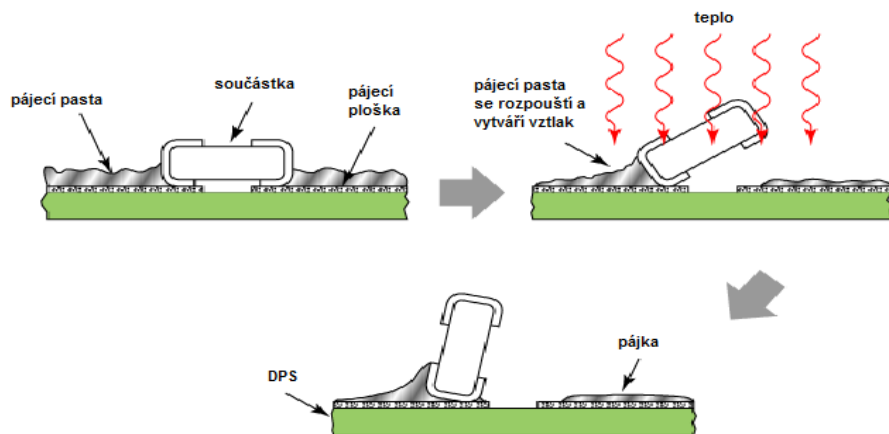
Obr. 31 Princip popcorn efektu [5]

1.3.3.5 Tombstone

Jedná se o tzv. efekt náhrobního kamene. Při tomto efektu dochází k postavení součástky na její hranu. Nejčastější příčinou je špatný návrh desky (rozdílný rozměr pájecích plošek, rozdílná tepelná kapacita u pájecích plošek), nerovnoměrně nanesená pájecí pasta, nebo nepřesné osazení součástky automatem.



Obr. 32 Tombstone efekt [5]



Obr. 33 Princip tombstone efektu [5]

1.3.3.6 Voidy

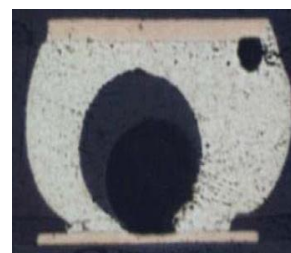
Voidy jsou dutiny, nebo dutinky, které vznikají uvnitř, nebo na povrchu pájeného spoje. Voidy ovlivňují mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti spoje, a proto můžeme říct, že podle jejich výskytu se dá hodnotit kvalita spoje.

Voidy můžeme rozdělit na:

1. Makro
2. Mikro
3. Shrinkage
4. Kirkendallový

1.3.3.6.1 Makro voidy

Tyto voidy jsou velké 100 až 300 μm . Příčinou jejich vzniku je odpařování plynů z tavidel a pájecích past během procesu přetavení.



Obr. 34 Makro voidy [5]

1.3.3.6.2 Mikro voidy

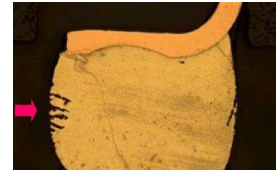
Velikost mikro voidů je 25 až 50 μm . Vznikají na rozhraní pájecí plošky a pájky. Vyskytují se v jedné rovině a je jich vždy více pohromadě. Příčina vzniku těchto voidů je zatím neznámá.



Obr. 35 Micro voidy [5]

1.3.3.6.3 Shrinkage voidy

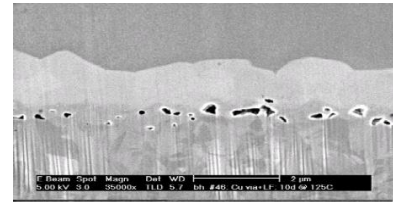
Jsou to protáhlé voidy, vznikající na povrchu pájky, které se dále rozšiřují a větví směrem dovnitř pájky. Příčinou vzniku je proces tuhnutí pájky.



Obr. 36 Shrinkage voidy [5]

1.3.3.6.4 Kirkendallový voidy

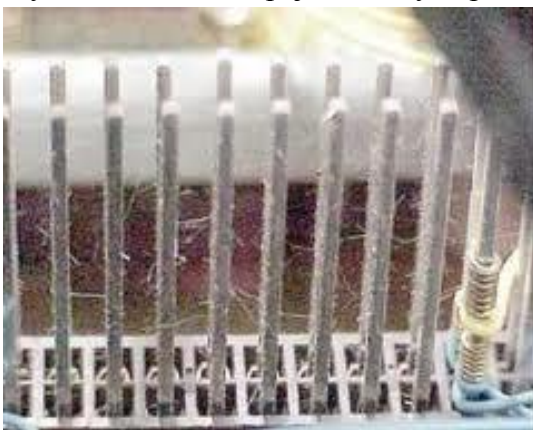
Vznikají během tepelného namáhání pájeného spoje na rozhraní pájecí plošky a pájky. Příčinou těchto voidů je rozdílný difuzní koeficient na tomto rozhraní, kdy objem jedné sloučeniny roste, protože se do ní difundují atomy druhé sloučeniny, která se redukuje.



Obr. 37 Kirkendallový voidy [5]

1.3.3.7 Whisker

Whisker je „vlásek“, který roste z povrchu materiálu. Tento „vlásek“ je tvořen čistým kovem. V případě cínových pájek se jedná o čistý cín. Tato chyba se častěji vyskytuje u bezolovnatých pájek, z důvodu vyššího podílu cínu. Průměr whiskru je 3-10 μm . Délka může být až 1cm. Hlavní příčinou vzniku whiskru je tlakové napětí. Jedná se o napětí vnější i vnitřní. Vnější napětí je způsobeno mechanickým namáháním. Vnitřní napětí je způsobené velikostí zrn uvnitř pájecí slitiny, typem povrchové úpravy pájecích plošek a koeficientem teplotní roztažnosti substrátu a pájky. Mezi další faktory patří krystalová struktura pájecí slitiny, teplota a vlhkost.



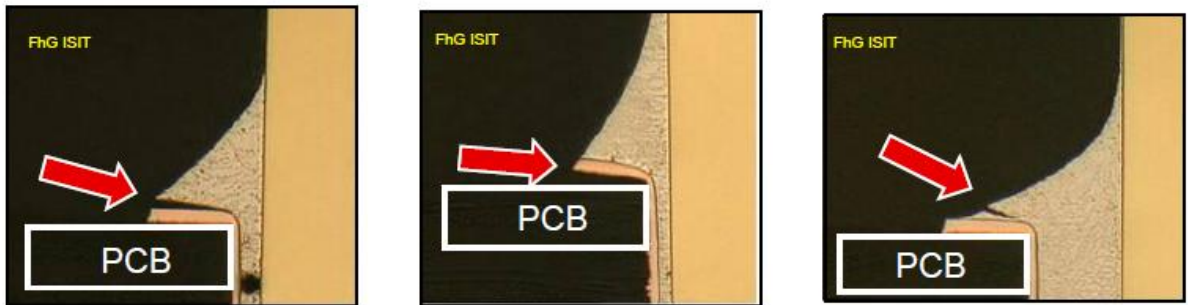
Obr. 38 Whiskery na pinech [5]



Obr. 39 Whisker [5]

1.3.3.8 Zvedání menisku

Zvedání menisku je způsobeno smršťováním pájky během chladnutí. Tím dochází ke změně objemu pájky. To má za následek zvednutí pájky z plošky, zvedání plošky z DPS, nebo částečné prasknutí menisku.



Obr. 40 Princip zvedání menisku [3]

2 Ekonomická analýza kontrolních metod

Jak již bylo řečeno, automatizovaná pájecí linka je dnes nedílnou součástí ve výrobním procesu DPS. Stejně tak jsou její nedílnou součástí i kontrolní přístroje nedílnou součástí automatizované pájecí linky. Celé odladění linky, je jak z technologického, tak i z ekonomického hlediska, velice náročné. Je zde hodně norem a vyhodnocovacích metod, podle kterých se dnešní výrobci musejí řídit. Jednou z nich je např. metoda AQL (acceptable quality limit).

2.1 AQL

Limit AQL se používá k stanovení počtu testovaných vzorků a k maximálnímu možnému počtu chyb, které se mohou v testovaných vzorcích vyskytovat. Při použití metody AQL je nejprve nutné stanovit 3 parametry.

1. Celkový počet výrobků daného produktu
2. Inspekční úroveň kvality
3. AQL úroveň odpovídající danému trhu, kde se výrobek vyskytuje

V první tabulce vybíráme, podle počtu vyrobených produktů a podle vybrané inspekční úrovně kvality.

Lot size (Number of ordered products)			General inspection levels		
			I	II	III
2	to	8	A	A	B
9	to	15	A	B	C
16	to	25	B	C	D
26	to	50	C	D	E
51	to	90	C	E	F
91	to	150	D	F	G
151	to	280	E	G	H
281	to	500	F	H	J
501	to	1,200	G	J	K
1,201	to	3,200	H	K	L
3,201	to	10,000	J	L	M
10,001	to	35,000	K	M	N
35,001	to	150,000	L	N	P
150,001	to	500,000	M	P	Q
500,001	and over		N	Q	R

Tabulka 2 AQL - výběr podle počtu kusů

Z uvedeného příkladu je patrné, že výrobek se vyrábí v rozmezí 3 201 až 10 000 kusů. Inspekční stupeň kvality je II a tomu odpovídá písmeno L.

Druhá tabulka navazuje na první, v níž pod písmenem L najdeme počet vzorků, které máme otestovat. Jedná se o 200 vzorků, z nichž vybíráme procento, kolik výrobků je přijatelných jako vadných. V uvedeném příkladu volíme 2,5% pro závažné chyby a 4% pro lehké chyby.

Code letter	Sample size					
		1.0	1.5	2.5	4.0	6.5
A	2	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0
B	3	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0
C	5	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 1
D	8	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 1	≤ 1
E	13	≤ 0	≤ 0	≤ 1	≤ 1	≤ 2
F	20	≤ 0	≤ 1	≤ 1	≤ 2	≤ 3
G	32	≤ 1	≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 5
H	50	≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 7
J	80	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 7	≤ 10
K	125	≤ 3	≤ 5	≤ 7	≤ 10	≤ 14
L	200	≤ 5	≤ 7	≤ 10	≤ 14	≤ 21
M	315	≤ 7	≤ 10	≤ 14	≤ 21	≤ 21
N	500	≤ 10	≤ 14	≤ 21	≤ 21	≤ 21
P	800	≤ 14	≤ 21	≤ 21	≤ 21	≤ 21
Q	1,250	≤ 21	≤ 21	≤ 21	≤ 21	≤ 21
R	2,000	≤ 21	≤ 21	≤ 21	≤ 21	≤ 21

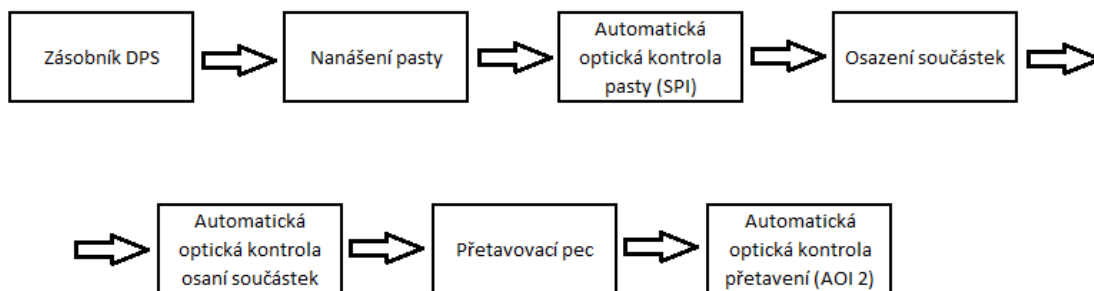
Tabulka 3 AQL - určení maximálního počtu chybných výrobků

Z druhé tabulky vyplývá, že počet závažných chyb nesmí překročit hranici 10 kusů a počet lehkých chyb nesmí překročit hranici 14 kusů.

Tato metoda zcela objektivně určuje počet akceptovatelných chyb na vyrobené množství výrobků. Ke stanovení vstupních kritérií zpravidla dochází po dohodě mezi zákazníkem a výrobcem.

2.2 Výběr kontrolních metod

Pro usnadnění výběru kontrolních metod jsem sestavil fiktivní výrobní linku, kde jsem porovnával, jak je výhodné investovat do jedné, dvou, nebo tří kontrolních metod. Jednalo se o automatickou kontrolu pasty (SPI), automatickou kontrolu osazených součástek (AOI1) a o automatickou kontrolu po přetavení součástek (AOI2).



Obr. 41 Schéma modelové kontrolní linky

Linka se skládá ze zásobníku DPS, přístroje na automatické nanášení pasty, automatické optické inspekce pasty, přístroje na osazení součástek, automatické optické kontroly po osazení, přetavovací pece a automatické optické kontroly po přetavení.

2.3 Vstupní veličiny

2.3.1 Výrobní kapacita

Celkovou výrobní kapacitu linky jsem stanovil na 500 000 kusů za rok. Chybovost jsem zvolil 7%. Z těchto údajů nám tedy vyplývá průměrný počet vzniklých chyb za rok – 35 000 chybných kusů.

Celková výroba	500 000
Chybovost	7%
Chyb. výrobků	35 000

Tabulka 4 Výrobní kapacita modelové linky

2.3.2 Cena výrobku

Z následující tabulky je patrné, kolik stojí jednotlivé komponenty DPS. Celková cena výrobku je dána součtem jednotlivých položek.

Deska	150kč
Pasta	35kč
Součástky	300kč
Výrobek	485kč

Tabulka 5 Cena modelového výrobku

K ceně výrobku je nutné připočítat i provozní náklady jednotlivých přístrojů. Pro zjednodušení výpočtů jsem stanovil pouze cenu elektřiny, kterou vybraný přístroj spotřebuje za jeden rok.

Roční náklady na elektrickou energii u přístrojů		Náklady na přístroje/kus
Zásobník	10 000kč	0,02kč
Tisk	20 000kč	0,04kč
SPI	25 000kč	0,05kč
Osazování	15 000kč	0,03kč
AOI1	20 000kč	0,04kč
Pec	60 000kč	0,12kč
AOI2	20 000kč	0,04kč

Tabulka 6 Roční spotřeba elektrické energie modelové linky

2.3.3 Cena chyby

Pro budoucí výpočty jsem musel určit také cenu chyby v jednotlivých krocích. Při výpočtu ceny chyby jsem vycházel z nákladů, které byly spojeny s jednotlivým výrobkem. Při odhalení chyby na SPI kontrole, byla cena chyby stanovena takto: elektrická energie spotřebovaná v zásobníku, tisku pasty a v SPI + cena nanesené pasty (DPS se po omytí pasty může opět použít). Při odhalení chyby až na optické kontrole přetavení jsem cenu stanovil takto: elektrická energie spotřebovaná v zásobníku, tisku pasty, SPI, osazování, AOI1, peci a v AOI2 + DPS, nanesené pasty a osazených součástek.

kontrola	cena chyby
SPI	35,11kč
AOI1	335,13kč
AOI2	485,25kč

Tabulka 7 Cena chyby

2.3.4 Místo vzniku chyby

Dále jsem musel určit místo vzniku chyby. Při nanášení pasty vzniká 70% celkových chyb, při osazování součástek 20% celkových chyb a při přetavení 10% celkových chyb. Při určování poměru chyb jsem vycházel ze studie společnosti Quiptech [7].

Kontrola	Výskyt chyb	Počet chyb	Úspora/rok při odhalení všech chyb
SPI	70%	24 500	860 195
AOI1	20%	7 000	2 345 910
AOI2	10%	3 500	1 698 375

Tabulka 8 Procentuální rozložení chyb

2.3.5 Šance na odhalení chyby

Dalším aspektem byla použitá technologie v kontrolním přístroji. Při výběru použitých technologií jsem vycházel z běžně používaných technologií. U SPI to byly technologie laseru, 3D a 2D snímání. U AOI to byly technologie černobílé a barevné kamery. Při určování procentuální šance na odhalení chyby, jsem vycházel z materiálu Vysokého učení technické v Brně, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií [27].

Šance na odhalení chyby SPI		Odhalené chyby	Neodhalené chyby	Reálná úspora/rok
Laser	99%	24 255	245	851 593
3D	94%	23 030	1 470	808 583
2D	88%	21 560	2 940	756 972

Tabulka 9 Šance na odhalení chyby - SPI

Šance na odhalení chyby AOI 1		Odhalené chyby	Neodhalené chyby	Reálná úspora/rok
barevná	98%	6860	140	2 298 992
černobílá	91%	6370	630	2 134 778

Tabulka 10 Šance na odhalení chyby AOI1

Šance na odhalení chyby AOI 2		Odhalené chyby	Neodhalené chyby	Reálná úspora/rok
barevná	98%	3430	70	1 664 408
černobílá	91%	3185	315	1 545 521

Tabulka 11 Šance na odhalení chyby AOI2

2.4 Samostatné kontrolní metody

2.4.1 SPI

V této variantě jsem počítal s investicí pouze do automatické kontroly pasty. Investice se lišila podle použité technologie.

Technologie	Cena
Laser	2 450 000kč
3D	2 200 000kč
2D	2 000 000kč

Tabulka 12 Pořizovací cena - SPI

Životnost všech technologií jsem stanovil na 10 let. Doba odepisování byla 5 let. Diskont byl 10%. Jednotlivé technologie se dále lišily cenou údržby a spotřebou elektrické energie. Pro rozhodnutí mezi jednotlivými variantami jsem použil výpočet NPV (net present value). NPV je ukazatel, který počítá pouze s budoucími cash flow. Vlastně nám říká, kolik nám za zvolenou dobu životnosti daný projekt přinese.

$$NPV = \sum_0^t \frac{Cf_t}{(1+r)^t}$$

Rovnice 1 Výpočet NPV

Pro výpočet cash flow jsem použil následující vzorec:

$$CF_1 = (\text{úspora} - N_{1energ.} - N_{1údržba} - N_{1obsluha}) * (1 - d_z) + \text{Odpisy}_1 * d_z$$

Rovnice 2 Výpočet cash flow - SPI

Daňový základ jsem stanovil na 19%. Náklady na energii a obsluhu se každým rokem zvedaly o míru inflace = 3%. Náklady na údržbu se zvedaly o 6%, ve kterých byla zohledněna jak míra inflace, tak postupné zvyšování poruchovosti v závislosti na stáří stroje.

cena přístroje	2 450 000	diskont	10,00%								
daňový základ	19,00%	inflace	3%								
životnost	10										
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
investice	2 450 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy	0	490 000	490 000	490 000	490 000	490 000	0	0	0	0	0
udržba stroje	0	24 500	25 970	27 528	29 180	30 931	32 787	34 754	36 839	39 049	41 392
spotřeba el. e.	0	25 000	25 750	26 523	27 318	28 138	28 982	29 851	30 747	31 669	32 619
obsluha	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615
provozní náklady	0	371 100	382 968	395 236	407 919	421 032	434 591	448 612	463 113	478 112	493 627
úspora	0	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593	851 593
daňový štít odpisů	0	93 100	93 100	93 100	93 100	93 100	0	0	0	0	0
cash flow	-2 450 000	482 299	472 686	462 749	452 476	441 854	337 772	326 414	314 669	302 520	289 953
disk CF	-2 450 000	438 454	390 650	347 670	309 047	274 357	190 663	167 502	146 795	128 298	111 789
NPV	55 226										

Tabulka 13 Ukázka výpočtu NPV pro laserovou SPI

Technologie	NPV
Laser	55 226
3D	81 973
2D	19 974

Tabulka 14 Vypočtené NPV pro SPI

Z vypočtených NPV můžeme určit, která investice je nejvýhodnější. Pokud bychom pořizovali pouze SPI kontrolu, nejvýhodněji vychází technologie 3D snímání.

2.4.2 AOI1

Výpočet pro automatickou optickou kontrolu po osazování součástek byl stejný, jako výpočet pro SPI. Pro výběr mezi jednotlivými variantami jsem opět použil NPV.

Technologie	cena
Barevná kamera	3 000 000
Černobílá kamera	2 800 000

Tabulka 15 Pořizovací cena AOI

Výpočet se lišil pouze v cash flow. Zde jsem musel zohlednit nepoužití automatické kontroly pasty. V praxi to znamená, že všechny chyby, které by automatická kontrola pasty odhalila, prošly až do procesu osazování.

$$CF_1 = (\text{úspora} - N_{1\text{energ.}} - N_{1\text{údržba}} - N_{1\text{obsluha}} - N_{1\text{SPI}}) * (1 - d_z) + \text{Odpisy}_1 * d_z$$

Rovnice 3 Výpočet cash flow pro AOI1

cena přístroje	3 000 000	diskont	10,00%									
daňový základ	19,00%	inflace	3%									
životnost	10											
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
investice	3 000 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy	0	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	0	0	0	0	0
údržba stroje	0	30 000	31 800	33 708	35 730	37 874	40 147	42 556	45 109	47 815	50 684	
spotřeba el. e.	0	20 000	20 600	21 218	21 855	22 510	23 185	23 881	24 597	25 335	26 095	
obsluha	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615	
provozní náklady celkem	0	371 600	383 648	396 111	409 006	422 348	436 155	450 444	465 234	480 544	496 395	
úspora	0	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	2 298 992	
daňový štít odpisů	0	114 000	114 000	114 000	114 000	114 000	0	0	0	0	0	
ztráty z důvodu nepoužití SPI	0	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	8 210 685	
cash flow	-3 000 000	-4 975 467	-4 985 226	-4 995 322	-5 005 766	-5 016 573	-5 141 757	-5 153 331	-5 165 311	-5 177 712	-5 190 551	
disk CF	-3 000 000	-4 523 152	-4 120 022	-3 753 059	-3 419 006	-3 114 897	-2 902 388	-2 644 474	-2 409 656	-2 195 855	-2 001 182	
NPV	-34 083 691											
NPV	-34 083 691											

Tabulka 16 Ukázka výpočtu NPV pro barevnou AOI1

Technologie	NPV
Černobílá kamera	-34 717 272
Barevná kamera	-34 083 691

Tabulka 17 Vypočtené NPV pro AOI1

Z vypočtených NPV je zřejmé, že pořízení pouze automatické optické kontroly po osazení součástek nic neřeší. Do kroku osazení součástek se dostane příliš mnoho chyb, vzniklých při nanášení pasty, na které jsou následně osazeny součástky.

2.4.3 AOI2

Výpočet pro automatickou optickou kontrolu po přetavení byl stejný, jako výpočet pro SPI nebo AIO1. Pro výběr mezi jednotlivými variantami jsem opět použil NPV. Cena přístrojů byla stejná, jako u AIO1.

Výpočet se lišil pouze v cash flow. Zde jsem musel zohlednit nepoužití automatické kontroly pasty a automatické optické kontroly po osazení. V praxi to znamená, že všechny chyby, které by automatická kontrola pasty a automatická optická kontrola osazení odhalily, prošly až do procesu přetavení.

$$CF_1 = (\text{úspora} - N_{1\text{energ.}} - N_{1\text{údržba}} - N_{1\text{obsluha}} - N_{1\text{SPI}} - N_{1\text{AIO1}}) * (1 - d_z) + \text{Odpisy}_1 * d_z$$

Rovnice 4 Výpočet cash flow pro AOI2

cena přístroje	3 000 000	diskont	10,00%								
daňový základ	19,00%	infflace	3%								
životnost	10										
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
investice	3 000 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy	0	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	0	0	0	0	0
údržba stroje	0	30 000	31 800	33 708	35 730	37 874	40 147	42 556	45 109	47 815	50 684
spotřeba el. e.	0	20 000	20 600	21 218	21 855	22 510	23 185	23 881	24 597	25 335	26 095
obsluha	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615
provozní náklady celkem	0	371 600	383 648	396 111	409 006	422 348	436 155	450 444	465 234	480 544	496 395
úspora	0	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408	1 664 408
daňový štít odpisů	0	114 000	114 000	114 000	114 000	114 000	0	0	0	0	0
ztráty z důvodu nepoužití SPI	0	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625	11 888 625
ztráty z důvodu nepoužití AOI 1	0	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750	3 396 750
cash flow	-3 000 000	-11 219 980	-11 229 739	-11 239 834	-11 250 279	-11 261 086	-11 386 269	-11 397 843	-11 409 823	-11 422 224	-11 435 064
disk CF	-3 000 000	-10 199 982	-9 280 776	-8 444 654	-7 684 092	-6 992 248	-6 427 252	-5 848 896	-5 322 767	-4 844 138	-4 408 712
NPV	-72 453 515										

Tabulka 18 Ukázka výpočtu NPV pro barevnou AOI2

Technologie	NPV
Černobílá kamera	-72 861 497
Barevná kamera	-72 453 515

Tabulka 19 Vypočtené NPV pro AOI2

Z vypočtených NPV je zřejmé, že pořízení pouze automatické optické kontroly po přetavení nic neřeší. Do přetavovací pece přichází příliš mnoho chyb vzniklých v minulých krocích.

2.5 Kombinace kontrolních metod

2.5.1 SPI+AOI1

V této variantě dochází ke kombinaci více kontrolních prvků. Jedná se o kombinaci automatické kontroly pasty a automatické optické kontroly po osazení součástek. Ceny investic jsou stejné jako u SPI a AOI.

$$CF_1 = (celk.úspora - celk.N_{1energ.} - celk.N_{1údržba} - celk.N_{1obsluha} - N_{1SPI}) * (1 - d_z) + celk.Odpisy_1 * d_z$$

Rovnice 5 Výpočet cash flow pro SPI+AOI1

cena SPI - laser	2 450 000	diskont	10,00%									
cena AOI 1	3 000 000	inflace	3%									
daňový základ	19,00%											
životnost SPI - laser	10											
životnost AOI 1	10											
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
investice SPI - laser	2 450 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
investice AOI 1	3 000 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
investice celkem	5 450 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy SPI - laser	0	490 000	490 000	490 000	490 000	490 000	0	0	0	0	0	0
odpisy AOI 1	0	600000	600000	600000	600000	600000	0	0	0	0	0	0
odpisy celkem	0	1 090 000	1 090 000	1 090 000	1 090 000	1 090 000	0	0	0	0	0	0
udržba SPI - laser	0	24 500	25 970	27 528	29 180	30 931	32 787	34 754	36 839	39 049	41 392	
udržba AOI 1	0	30 000	31 800	33 708	35 730	37 874	40 147	42 556	45 109	47 815	50 684	
udržba celkem	0	54 500	57 770	61 236	64 910	68 805	72 933	77 309	81 948	86 865	92 077	
spotřeba el. e. SPI - laser	0	25 000	25 750	26 523	27 318	28 138	28 982	29 851	30 747	31 669	32 619	
spotřeba el. e. AOI 1	0	20 000	20 600	21 218	21 855	22 510	23 185	23 881	24 597	25 335	26 095	
spotřeba el. e. celkem	0	45 000	46 350	47 741	49 173	50 648	52 167	53 732	55 344	57 005	58 715	
obsluha SPI - laser	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615	
obsluha AOI 1	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615	
obsluha celkem	0	643 200	662 496	682 371	702 842	723 927	745 645	768 014	791 055	814 787	839 230	
ztráty při použití laserové SPI	0	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	82 107	
provozní náklady celkem	0	742 700	766 616	791 348	816 925	843 380	870 746	899 056	928 347	958 656	990 022	
úspora celkem	0	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	3 150 585	
daňový štít odpisů celkem	0	207 100	207 100	207 100	207 100	207 100	0	0	0	0	0	
cash flow	-5 450 000	2 090 980	2 071 608	2 051 576	2 030 858	2 009 429	1 780 163	1 757 232	1 733 506	1 708 956	1 683 550	
disk CF	-5 450 000	1 900 891	1 712 073	1 541 379	1 387 103	1 247 697	1 004 856	901 738	808 693	724 764	649 081	
NPV	9 428 276											

Tabulka 20 Ukázka výpočtu NPV pro SPI+AOI1

Technologie	NPV
SPI laser + barevná AOI	9 428 276
SPI 3D + barevná AOI	7 411 753
SPI 2D + barevná AOI	4 897 831
SPI laser + černobílá AOI	8 594 695
SPI 3D + černobílá AOI	6 578 172
SPI 2D + černobílá AOI	4 064 250

Tabulka 21 Vypočtené NPV pro SPI+AOI1

Z vypočtených NPV nejlépe vychází varianta laserové SPI a barevné AOI. Zde se ukazuje, jak významné je zařazení SPI do výrobní linky.

2.5.2 SPI+AOI1+AOI2

V této variantě dochází ke kombinaci více kontrolních prvků. Jedná se o kombinaci automatické kontroly pasty, automatické optické kontroly po osazení

součástek a automatické optické kontroly po přetavení. Ceny investic jsou stejné jako u SPI a AOI.

$$CF_1 = (\text{celk. úspora} - \text{celk. } N_{1\text{energ.}} - \text{celk. } N_{1\text{údržba}} - \text{celk. } N_{1\text{obsluha}} - N_{1\text{SPI}} - N_{1\text{AOI1}}) * (1 - d_z) + \text{celk. } \text{Odpisy}_1 * d_z$$

Rovnice 6 Výpočet cash flow pro SPI+AOI1+AOI2

cena SPI - laser	2 450 000	diskont	10,00%								
cena AIO 1	3 000 000	inflace	3%								
cena AIO 2	3 000 000										
daňový základ	19,00%										
životnost SPI - laser	10										
životnost AIO 1	10										
životnost AIO 2	10										
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
investice SPI - laser	2 450 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
investice AIO 1	3 000 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
investice AIO 2	3 000 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
investice celkem	5 450 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy SPI -laser	0	490 000	490 000	490 000	490 000	490 000	0	0	0	0	0
odpisy AIO 1	0	600000	600000	600000	600000	600000	0	0	0	0	0
odpisy AIO 2	0	600000	600000	600000	600000	600000	0	0	0	0	0
odpisy celkem	0	1 690 000	1 690 000	1 690 000	1 690 000	1 690 000	0	0	0	0	0
údržba SPI - laser	0	24 500	25 970	27 528	29 180	30 931	32 787	34 754	36 839	39 049	41 392
údržba AIO 1	0	30 000	31 800	33 708	35 730	37 874	40 147	42 556	45 109	47 815	50 684
údržba AIO2	0	30 000	31 800	33 708	35 730	37 874	40 147	42 556	45 109	47 815	50 684
údržba celkem	0	84 500	89 570	94 944	100 641	106 679	113 080	119 865	127 057	134 680	142 761
spotřeba el. e. SPI - laser	0	25 000	25 750	26 523	27 318	28 138	28 982	29 851	30 747	31 669	32 619
spotřeba el. e. AIO 1	0	20 000	20 600	21 218	21 855	22 510	23 185	23 881	24 597	25 335	26 095
spotřeba el. e. AIO 2	0	20 000	20 600	21 218	21 855	22 510	23 185	23 881	24 597	25 335	26 095
spotřeba el. e. celkem	0	65 000	66 950	68 959	71 027	73 158	75 353	77 613	79 942	82 340	84 810
obsluha SPI - laser	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615
obsluha AIO 1	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615
obsluha AIO 2	0	321 600	331 248	341 185	351 421	361 964	372 823	384 007	395 527	407 393	419 615
obsluha celkem	0	964 800	993 744	1 023 556	1 054 263	1 085 891	1 118 468	1 152 022	1 186 582	1 222 180	1 258 845
ztráty při použití laserové SPI	0	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886	118 886
ztráty při použití AIO 1	0	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935	67 935
provozní náklady celkem	0	1 114 300	1 150 264	1 187 459	1 225 931	1 265 728	1 306 901	1 349 500	1 393 581	1 439 200	1 486 416
úspora celkem	0	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992	4 814 992
daňový štít odpisů celkem	0	321 100	321 100	321 100	321 100	321 100	0	0	0	0	0
cash flow	-5 450 000	3 167 336	3 138 205	3 108 077	3 076 914	3 044 679	2 690 229	2 655 724	2 620 018	2 583 067	2 544 821
disk CF	-5 450 000	2 879 396	2 593 558	2 335 144	2 101 574	1 890 506	1 518 564	1 362 806	1 222 258	1 095 472	981 139
NPV	15 530 417										

Tabulka 22 Ukázka výpočtu NPV pro SPI+AOI1+AOI2

Technologie	NPV
SPI laser + barevná AOI1+barevná AOI2	15 530 417
SPI 3D + barevná AOI+barevná AOI2	12 667 535
SPI 2D + barevná AOI+barevná AOI2	8 986 370
SPI laser + černobílá AOI+barevná AOI2	13 513 418
SPI 3D + černobílá AOI+barevná AOI2	10 650 537
SPI 2D + černobílá AOI+barevná AOI2	6 969 371
SPI laser + barevná AOI1+ černobílá AOI2	14 922 435
SPI 3D + barevná AOI+ černobílá AOI2	12 059 533
SPI 2D + barevná AOI+ černobílá AOI2	8 378 388
SPI laser + černobílá AOI+ černobílá AOI2	12 905 437
SPI 3D + černobílá AOI+ černobílá AOI2	10 042 555
SPI 2D + černobílá AOI+ černobílá AOI2	6 361 389

Tabulka 23 Vypočtené NPV pro SPI+AOI1+AOI2

Z vypočtených NPV nejlépe vychází varianta SPI laser + barevná AOI1+barevná AOI2. Jako druhá nejlepší vyšla varianta SPI laser + barevná AOI1+ černobílá AOI2.

2.6 Vyhodnocení analýzy

Cílem analýzy bylo sestavit ideální kombinaci kontrolních metod v průběhu výrobní linky. Jako kritérium při výběru jsem použil NPV. Pokud se podíváme na NPV pro jednotlivé přístroje, zjistíme, jak důležitá je automatická kontrola pasty. Při použití samotných automatických optických kontrol samozřejmě dojde také k úspoře výrobních nákladů, nicméně výroba bude stále velice neefektivní. Z tohoto důvodu dnes každá automatizovaná výrobní linka DPS obsahuje automatickou kontrolu pasty.

Při výběru automatické optické kontroly nejlépe vychází varianta s 3D kontrolou. Nicméně pokud chceme zařadit do výrobní linky DPS další kontrolní systémy, vyplatí se investovat do lepší technologie – laseru. Ten dokáže odhalit více chyb než technologie 3D.

Pokud plánujeme zařadit do výrobní linky DPS automatickou optickou kontrolu osazených součástek, nebo kontrolu po přetavení, vyplatí se investovat do barevné technologie. Barevná kamera díky lepším rozpoznávacím schopnostem dokáže odhalit více chybných výrobků než kamera černobílá.

Z vypočtených NPV, se jako nejlepší kombinace kontrolních systémů jeví laserová kontrola pasty + barevná optická kontrola osazených součástek + barevná optická kontrola po přetavení. Seznam kompletních výpočtů nalezneme v příloženém souboru NPV-bakalářská práce.xlsx.

3 Experiment

Cílem mého experimentu bylo dosažení zvolené chyby, vznikající v automatizovaném procesu pájení, v laboratorních podmínkách školy. Zvolenou chybou byl rozstřík tavidla z pájecí pasty při přetavení. Experiment byl realizován na 2 pastách, které se lišily svým chemickým složením. Pasty byly nanесeny na 4 různé povrchy. Celkem tedy vzniklo 8 vzorků, které jsem porovnal jak z hlediska odlišné pasty, tak z hlediska odlišného povrchu.

3.1 Pasty

Pasta	Sn%	Cu%	Ag%
Senju M31-GRN360-K1MK	95,75	3,5	0,75
Qualitek SAC 305 Type 862	96,5	3	0,5

Tabulka 24 Použité pasty

3.2 Povrchy

3.2.1 Seznam povrchů

1. Čistá Cu
2. Cu + Au
3. Cu + bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn
4. Cu + chemický Sn

3.2.2 Vlastnosti povrchů

3.2.2.1 Čistá Cu

Čistá Cu pro elektrotechnickou montáž (jádro i povrch z Cu). Tento povrch simuluje klasické Cu vývody na DPS. V elektrotechnické montáži se nejčastěji používá bezkyslíkatá Cu. Tato měď má výbornou jak tepelnou, tak i elektrickou vodivost.

3.2.2.2 Cu + Ni + Au

Cu + Ni+ Au (jádro z Cu, poté nanесen Ni a povrch z Au). Tento povrch simuluje pozlacené vývody na DPS. Zlato se na povrch nanáší galvanicky. Hlavními

výhodami jsou: naprostá rovnost povrchu, dobrá hájitelnost, stálost a lepší elektrická vodivost než u obyčejné mědi.

3.2.2.3 Cu + bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn

Cu + bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn (jádro z Cu, povrch ze slitiny). Tento povrch vzniká ponořováním holých DPS do roztavené slitiny, kde na Cu vývodech při vytahování desky tato slitina zůstane. Někdy je tento materiál označován zkratkou HAL (hot air leveling).

3.2.2.4 Cu + chemický Sn

Cu + chemický Sn. Chemický cín se skládá ze dvou složek. První složkou je vrstva polyfenylamin polymerové soli, která zabraňuje difuzi mědi do cínu. Druhou vrstvou je samotný cín. Oproti technologii HAL má chemický cín delší životnost a nižší výrobní náklady.

3.3 Nanášení pasty

Pasta byla na jednotlivé vzorky nanášena pomocí ručního šablonového tisku. Průměr otvorů byl 4mm, rozteč otvorů byla 3cm a tloušťka šablony byla 2,5mm.



Obr. 42 Použitá šablona

3.4 Použité přístroje

3.4.1 Průběžná pec – Mistral 260

K pokusu jsem použil horkovzdušnou pec Mistral 260. Pec je rozdělena do třech nezávislých zón, kterými je možné definovat teplotní profil. Maximální teplota může být až 300°C, krok je 0,1°C. Rychlost pásového dopravníku lze nastavit v rozmezí 15 cm/min - 60 cm/min, krok je 1 cm/min.



Obr. 43 Průběžná pec – Mistral 260 [4]

3.4.2 Profilometr

Pro měření teplotního profilu jsem použil profilometr PRF. Jedná se o mikroprocesorový systém pro multi-kanálové měření teploty. Systém je umístěn na DPS, která je uvnitř teplotně izolovaného obalu. Pro záznam dat slouží paměť RAM, na kterou jsou zapisovány údaje ze senzorů. Jako senzory jsou použity termočlánky typu „K“ (NiCr-NiAl).



Obr. 44 Profilometr [4]

3.5 Postup

1. Výběr vhodných povrchů a pájecích past
2. Ruční nanesení pájecích past na vybrané povrchy pomocí šablonového tisku
3. Optická kontrola nanesené pasty
4. Vložení vzorků do horkovzdušné pece Mistral 260 a jejich následné přepájení
5. Vyhodnocení vzorků pomocí mikroskopu

3.6 Vzorky před přetavením



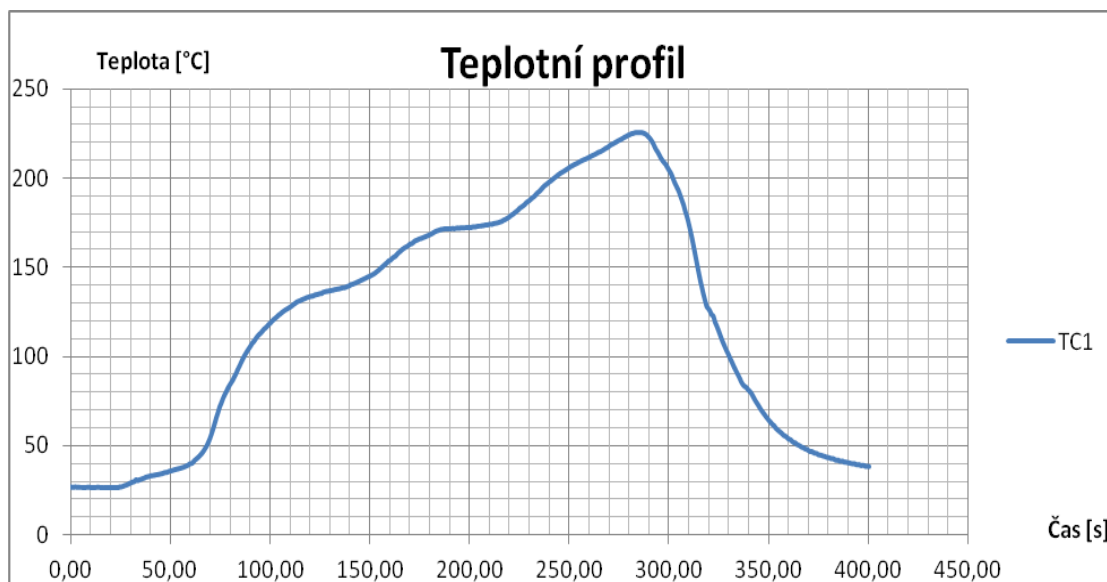
Obr. 45 Deska z Cu před přetavením



Obr. 46 Deska z Cu před přetavením – výřez

3.7 Teplotní profil

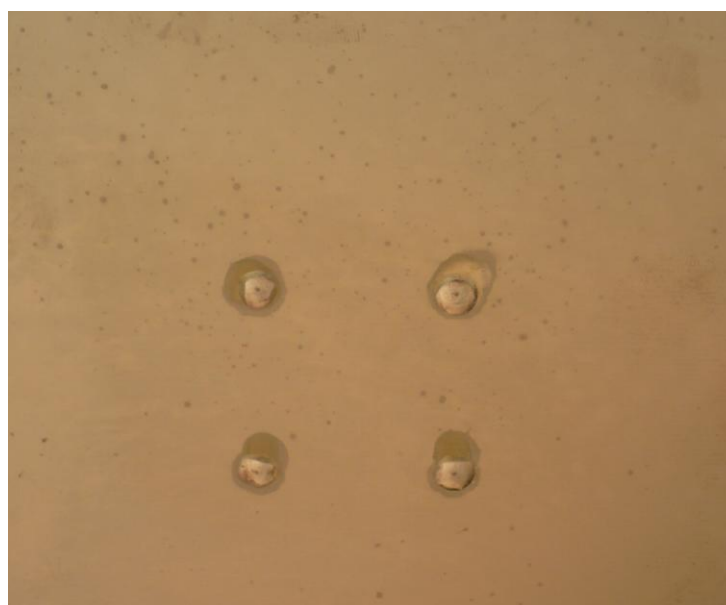
Teplotní profil nastavujeme pomocí rychlosti posunu dopravníku a teplotami v jednotlivých zónách pece. Pro experiment jsem zvolil rychlost posunu 15cm/min a teploty 150°C pro zónu 1, 190°C pro zónu 2 a 230°C pro zónu 3.



Graf 5 Teplotní profil

3.8 Vzorky po přetavení

Na obrázku 47 je uveden příklad DPS s povrchovou úpravou chemický cín a s pájecí pastou Senju M31-GRN360-K1MK



Obr. 47 Deska z chem. Sn po přetavení

4 Vyhodnocení experimentu

Při vyhodnocení experimentu jsem se zaměřil na počet a místo vzniku prskanců tavidla. Jelikož není možné spočítat všechny prskance vzniklé na DPS, tak jsem pro porovnání zvolil průměrný počet prskanců na 1cm^2 . Data byla odebrána ze 4 míst DPS a následně zprůměrována. Každé místo mělo plochu 1cm^2 . Tato poloha míst byla zvolena z důvodu nerovnoměrného výskytu prskanců na DPS.



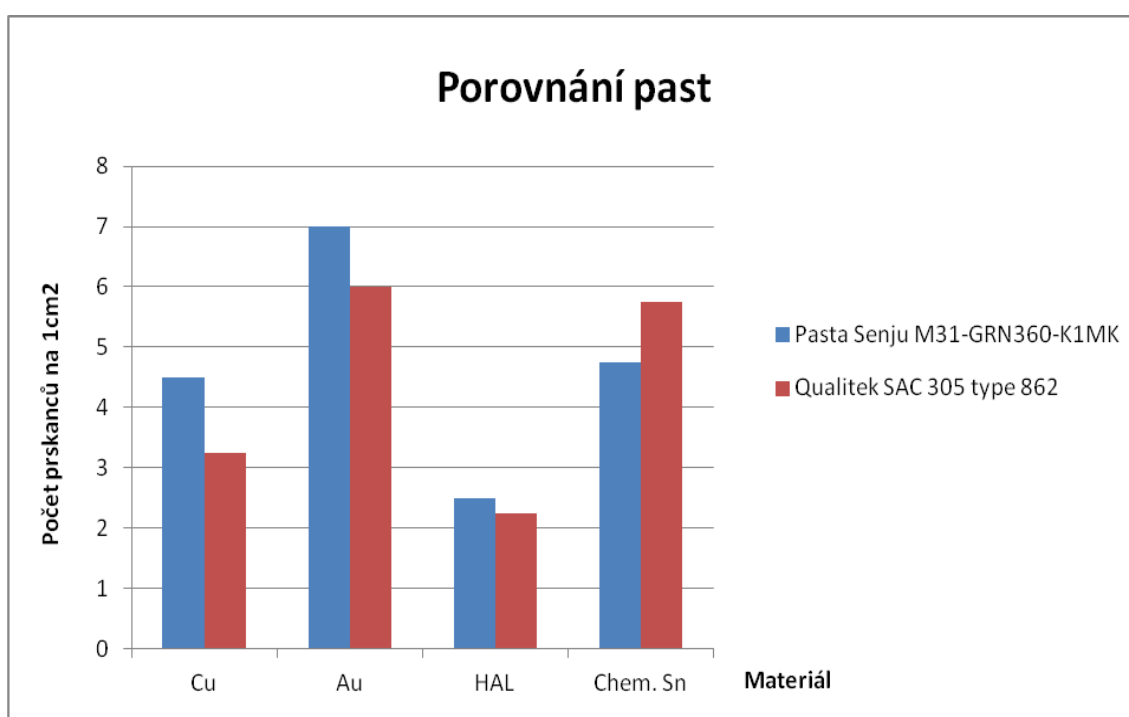
Obr. 48 Rozmístění poloh

Pasta Senju M31-GRN360-K1MK					
Materiál	Poloha 1	Poloha 2	Poloha 3	Poloha 4	Počet prskanců na 1cm^2
Cu	9	3	2	4	4,5
Au	13	9	2	4	7
Bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn (HAL)	4	2	1	3	2,5
Chemický Sn	8	7	1	3	4,75

Tabulka 25 Naměřené hodnoty pro pastu Senju

Qualitek SAC 305 type 862					
Materiál	Poloha 1	Poloha 2	Poloha 3	Poloha 4	Počet prskanců na 1cm ²
Cu	6	4	1	2	3,25
Au	10	8	3	3	6
Bezolovnatá pájecí slitina na bázi Sn (HAL)	3	2	1	3	2,25
Chemický Sn	9	6	3	5	5,75

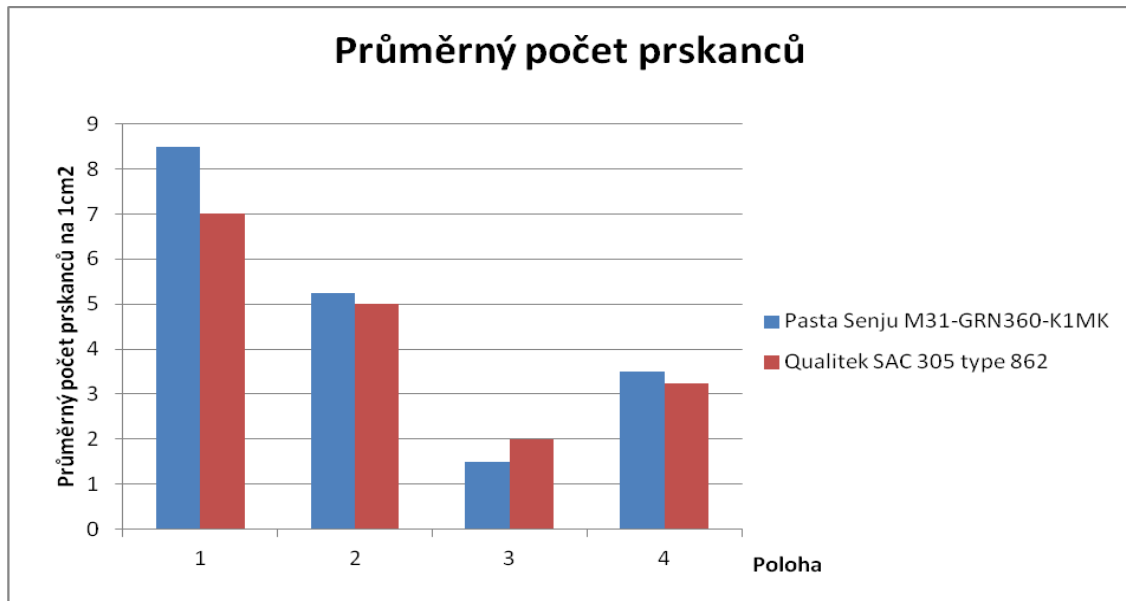
Tabulka 26 Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek



Graf 6 Porovnání past

Ze zjištěných hodnot je patrné, že pasta Qualitek SAC 305 Type 862 má z pohledu prskání tavidla lepší chování na čisté Cu, Au a povrchu technologie HAL. Pasta Senju M31-GRN360-K1MK se chovala lépe pouze na povrchu z chemického Sn. Povrch, který vytvářel nejméně prskanců, byl povrch technologie HAL – 2-2,5 prskanců na 1cm². Je však nutné přihlídnout k faktu, že povrch technologie HAL je vysoce lesklý, což mohlo ovlivnit následný sběr dat. Povrch z čisté Cu je srovnatelný s povrchem na bázi chemického cínu – okolo 4,5 prskanců na 1cm². Nejhuře dopadl povrch z Au – až 7 prskanců na 1cm².

Dalším zajímavým faktem je, že všechny vzorky mají tavidlo rozteklé na stejnou stranu. Tento efekt přisuzují vlastnostem průběžné pece. S tímto faktem také souvisí to, která oblast byla nejvíce zasažena prskanci tavidla. Pokaždé se jednalo o oblast, na kterou vyteklo více tavidla, na zbylých stranách bylo prskanců výrazně méně. Strana, na kterou vyteklo tavidlo, byla vždy označena polohou 1. Zbylé polohy byly pokaždé posunuty o 90° proti směru hodinových ručiček. Proto je největší rozdíl v počtu prskanců mezi polohami 1 a 3.



Graf 7 Průměrný počet prskanců

Závěr

V rámci mé bakalářské práce, jsem podle zadání provedl analýzu automatické výrobní linky DPS a kontrolních metod, které tato linka využívá jak z hlediska technického, tak z hlediska ekonomického. Dále jsem se pokusil o vytvoření konkrétního defektu, vznikajícího při výrobě.

Cílem první kapitoly bylo uvedení do problematiky výroby DPS. Zde jsem začal popisem pájecí linky jako celku. Poté jsem přešel k rozboru jednotlivých přístrojů. Snažil jsem se o vysvětlení jejich funkce ve výrobní lince a o objasnění různých technologií, které mohou být využívány.

Poté jsem se zaměřil na kontrolní zařízení. Zde jsem popsal obě skupiny kontrolních zařízení – optické i elektrické. Z optických kontrolních zařízení jsem do své práce vybral automatickou kontrolu pasty, automatickou optickou kontrolu, rentgenovou kontrolu a laserovou kontrolu. U elektrických kontrolních zařízení se jednalo především o kontrolu jehlovým polem.

Po probrání výroby a kontroly jsem se zaměřil na vznikající chyby. Musíme si uvědomit, že vznikajících chyb je celá řada a probrání všech chyb, které mohou nastat při výrobě DPS by bylo nad rámec této bakalářské práce. Proto jsem vybral pouze část chyb, které jsem považoval za nejdůležitější a snažil jsem se je rozdělit do několika kategorií.

První kategorií byly chyby vstupních komponentů. Tyto chyby úplně nesouvisí s výrobou DPS, nicméně z technologického hlediska se musí počítat i s nimi.

Druhou kategorií byly chyby, které pramení z nanášení pasty. Skupina těchto chyb je jasně největší. Jedná se o 60-70% všech vzniklých chyb.

Poslední skupinou chyb byly chyby, které vznikají při přetavení. Tato skupina přímo souvisí s chybami, vznikajícími při nanášení pasty. U některých chyb je velice složité jejich zařazení. Například u tombstone efektu. Pokud nanese ne správné množství pasty na vývody, může dojít při přetavení k tombstone efektu. Jedná se o chybu, za kterou může špatně nanesená pasta, nebo o chybu, která vznikla špatně nastaveným teplotním profilem? Takovýchto chyb bychom mohli nalézt spoustu. Proto

jsem u chyb, vznikajících při nanášení pasty popsal pouze důvody vzniku chyby a samotné chyby jsem popsal až v následující kapitole – chyby vznikající při pájení spojů.

Další kapitolou byla ekonomická analýza. Zde jsem si kladl za cíl rozbor výrobní linky z ekonomického hlediska a nalezení ideální kombinace kontrolních metod. Jako kritérium při výběru jsem použil NPV. Z vypočtených hodnot NPV, pro jednotlivé přístroje, je jasně patrný význam automatické kontroly pasty. Je nutné si uvědomit, že při použití samotných automatických optických kontrol samozřejmě také dojde k úspoře výrobních nákladů, nicméně výroba bude stále velice neefektivní.

Z vypočtených NPV, se jako nejlepší kombinace kontrolních systémů jeví laserová kontrola pasty + barevná optická kontrola osazených součástí + barevná optická kontrola po přetavení. Seznam kompletních výpočtů naleznete v příloženém souboru NPV-bakalářská práce.xlsx.

Další částí mé práce byl experiment. Experimentem se zabývá třetí a čtvrtá kapitola. Jako experiment jsem vybral prskání tavidla z pájky při přetavení. Samotnou realizaci experimentu jsem provedl pod dohledem vedoucího práce Ing. Karla Duška, Ph.D. Při vyhodnocení experimentu, jsem se zaměřil na počet vzniklých prskanců, které vznikly na reprezentativních testovacích vzorkách. Jednalo se o vzorky s různou povrchovou úpravou. Povrchy byly vybrány podle nejpoužívanějších povrchů, které se využívají při výrobě DPS. Nejlepším povrchem z pohledu nejmenší četnosti prskání tavidla jsem shledal povrch technologie HAL. Naopak nejhorším povrchem bylo zlato.

Zdroje

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] IPC-A610 TASK GROUP. Acceptability for electronic assemblies. Revision D. Bannockburn, Ill: IPC, 2005. ISBN 15-809-8750-8.
- [4] KOBLÍŽEK, Vilém. Hromadné pájení přetavením – teplotní profil průběžné pece [cvičení]. Praha: ČVUT, 25. dubna 2013.
- [5] Karel Dušek, Technologie povrchové montáže. Presentace zaslané pomocí emailu.
- [6] SMT-info, Bulletin seminářů: 19. 10. 2010. Dostupné z WWW: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1010.pdf
- [7] SMT-info, Bulletin seminářů: 15. 2. 2011. Dostupné z WWW: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1102.pdf
- [8] SMT-info, Bulletin seminářů: 18. 10. 2011. Dostupné z WWW: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1110.pdf
- [9] SMT-info, Bulletin seminářů: 12. 2. 2013. Dostupné z WWW: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1302.pdf
- [10] SMT centrum, Báze znalostí, SMT technologie. Dostupné z WWW: <http://www.smtcentrum.cz/smt/>
- [11] ABE.TEC, Kompletní linky pro osazování SMT. Dostupné z WWW: <http://www.abetec.cz/eshop/category/kompletni-linky-na-osazeni-smd/>
- [12] Amtech, Automatická optická kontrola. Dostupné z WWW: <http://www.amtech.cz/automaticka-opticka-kontrola.html>
- [13] Procházka Martin, Optimalizace procesu strojního pájení vlnou. Dostupné z WWW: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/2846>
- [14] Denisa Filáková, Technologie pájení přetavením. Dostupné z WWW: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/11540>
- [15] Martin Janáč, Technologie tisku pájecí pasty. Dostupné z WWW: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/17507>
- [16] SMT centrum, Technologické postupy v SMT. Dostupné z WWW: <http://www.smtcentrum.cz/technologicke-postupy-v-smt/technologicke-postupy-v-smt/>

- [17] SMT centrum, Nanášení lepidla. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/lepidla-pro-smd/nanaseni-lepidla/>
- [18] SMT centrum, Služby v oblasti pájení a spolehlivosti povrchové montáže. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/osazovani-smd/>
- [19] SMT centrum, Kontrola pomocí RTG. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/kontrolni-systemy/kontrola-pomoci-rtg/>
- [20] SMT centrum, Laserové kontrolní systémy. Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/kontrolni-systemy/laserove-kontrolni-systemy/>
- [21] Quality inspection tips, What is the “AQL”, and when it is applicable?. Dostupné z WWW:
<http://www.qualityinspection.org/what-is-the-aql/>
- [22] Business Vize, Hodnocení investic: Čistá současná hodnota (NPV) stručně a jasně. Dostupné z WWW:
<http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-cista-soucasna-hodnota-npv-strucne-a-jasne>
- [23] Printed s.r.o., TPV - Technologická část. Dostupné z WWW:
<http://www.printed.cz/tpv-technologicka-cast-935>
- [24] hw.cz., DPS s povrchovou úpravou galvanickým zlacením. Dostupné z WWW:
<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/dps-s-povrchovou-upravou-galvanickym-zlacenim.html>
- [25] Semach, Chemický cín. Dostupné z WWW:
<http://www.semach.cz/povrchy.html>
- [26] GSA service, XRay inspection. Dostupné z WWW:
http://www.gsaservice.com/XRay_Inspection_BGA_Glenbrook_Technologies.ppt
- [27] Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, Optická inspekce. Dostupné z WWW:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/10a_opticka_inspekce.pdf