

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

## Problematika technologie povrchové montáže

Vliv vlhkosti

Zbyněk Plachý

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

Obor: Elektrotechnika a management

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Duben 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plachý** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **459144**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Problematika technologie povrchové montáže - vliv vlhkosti**

Název bakalářské práce anglicky:

**The issue of surface mount technology - the influence of moisture**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií povrchové montáže a s vybranými problémy, které se u této technologie mohou vyskytnout.
- 2) Provedte studii vlivu vlhkosti na chování pouzder součástek s ohledem na pájecí proces.
- 3) Ekonomicky analyzujte opravu součástky na desce plošného spoje.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

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

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mého bakalářského projektu panu docentu Karlu Duškovi za jeho odborné vedení, rady a hlavně pomoc a ochotě věnovat mi svůj čas.

Dále bych rád poděkoval slečně inženýrce Michaele Lachmanové za její odborné rady a pomoc v rámci ekonomické části bakalářské práce.

## Prohlášení

I declare that this work is all my own work and I have cited all sources I have used in the bibliography.

Prague, April 21, 2019

**Zbyněk Plachý**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 21. dubna 2019

**Zbyněk Plachý**

## Abstrakt

Cílem bakalářského projektu je seznámit se s problematikou vyskytující se u technologie povrchové montáže. Zvláštní pozornost budeme věnovat zkoumání vlivu vlhkosti.

V první části se seznámíme s technologií povrchové montáže a s běžnými problémy vyskytujícími se u této technologie zapříčiněnými vlhkostí.

V druhé části se zaměříme na praktickou studii vlivu vlhkosti a na chování pouzder součástek používaných v technologii povrchové montáže s ohledem na pájecí proces.

Ve třetí části se pokusíme o ekonomickou analýzu opravy součástky na desce plošného spoje.

**Klíčová slova:** SMT, SMD, Popcorn, Vlhkost, MSD, DPS

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

## Abstract

The main purpose of this bachelor's project is to introduce the issues associated with surface mount technology. We will focus on the investigation of the influence of moisture.

In the first part, we will discuss the common problems caused by moisture on surface mount technology.

In the second part, we will focus on the practical study of the influence of moisture on the device's case used in surface mount technology with regards to soldering process.

In the third part, we will make an economic analysis repairment of the device on a printed circuit board.

**Keywords:** SMT, SMD, Popcorn, Moisture, MSD, PCB

**Title translation:** The issue of surface mount technology — The influence of moisture

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Technologie povrchové montáže</b>	<b>3</b>
2.1 Historie	3
2.2 Pájení přetavením	4
2.2.1 Pájecí pasty	4
2.2.2 Nanášení pájky	5
2.2.3 Způsoby přetavení pájky	6
2.2.4 Teplotní profil	8
2.3 Pouzdření	10
2.4 Montáž v elektronice	11
2.4.1 Montáž první úrovně	11
2.4.2 Montáž druhé úrovně	11
2.4.3 Montáž třetí úrovně	11
2.5 Vlhkost	12
2.6 MSD	13
2.6.1 MSL	14
2.6.2 Dry pack	14
2.6.3 Vysoušení	15
2.6.4 Moisture Barrier Bag (MBB)	16
2.6.5 Vysoušedla	17
2.6.6 Indikátor vlhkosti HIC	19
2.6.7 Vady zapříčiněné vlhkostí	19
<b>3 Studie vlivu vlhkosti</b>	<b>23</b>
3.1 Návrh experimentu	23
3.1.1 Změna hmotnosti	24
3.1.2 Použité přístroje	25
3.2 Naměřené hodnoty	26
3.3 Zhodnocení výsledků	31
<b>4 Ekonomická analýza opravy a výměny součástky</b>	<b>35</b>
4.1 Problematika	35
4.2 Konkrétní problém	35
4.2.1 Vlivy přispívající k závadě	36
4.2.2 Výroba a následná kontrola	36
4.3 Problematika rozhodování	37
4.3.1 Rizikové součástky jako součást výrobku	37
4.3.2 Vyhození zmetku	38
4.3.3 Oprava součástky	39
4.3.4 Shrnutí	40
<b>5 Závěr</b>	<b>41</b>
<b>A Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>43</b>
<b>B Literatura</b>	<b>45</b>





# Kapitola 1

## Úvod

V dnešní době, kdy jsme obkloповáni elektronikou naprosto při každém našem kroku, se kladou nemalé požadavky na její zmenšování. Z toho důvodu se přechází na povrchovou montáž SMT (Surface Mount Technology), kde se využívají součástky pro povrchovou montáž SMD (Surface Mount Device). Při komerční elektrotechnické výrobě se využívá především této technologie.

S miniaturizací součástek jsou spojeny četné výhody. Zmenšují se rozměry součástek, klesá jejich hmotnost a tím dochází k úspoře materiálu. Zároveň kompaktní rozměry umožňují umístit více součástek na menší plochu. Další z řady výhod je možnost automatizace jak osazování DPS (desek plošných spojů) samotnými součástkami, tak jejich následné zapájení. Vlivem automatizace a stále dokonalejší technologii narůstá také spolehlivost.

Zároveň miniaturizace SMD přináší i nevýhody. Vzhledem k malým rozměrům jsou SMD náročné na osazování. Tuto nevýhodu lze snadno vyřešit pomocí již zmíněné automatizace. Problém nastává v době, kdy má dojít k opravě. Malé rozměry a husté osazování součástek na malém prostoru činí velké potíže při odpájení porouchané součástky, popřípadě následnému zapájení součástky nové. Další velký problém spojený s miniaturizací je špatný odvod tepla. Vzhledem k samotné velikosti součástky a její chladící ploše tomu nemůže být jinak a k omezení v tomto směru dochází. [1]

Správně umístěnou součástku na desku plošného spoje je třeba připojit k přípojovacím bodům desky. Tento spoj plní několik funkcí. Jedná se především o mechanické upevnění součástky, odvod ztrátového tepla vzniklého v součástce ( $\sim RI^2$ ) a vodivé (elektrické) propojení. Nejrozšířenějším druhem připojení je měkké pájení. Hlavní výhodou měkkého pájení je možnost současně vytvořit stovky spojů během poměrně krátké doby.

Měkké pájení je charakterizováno teplotou tavení nepřesahující 450°C. Mezi nejužívanější technologie měkkého pájení patří pájení vlnou (wave soldering), jež je primárně určeno pro THT a pájení přetavením (reflow soldering), jež zaujímá dominantní postavení u SMT. U pájení vlnou je proces dodání pájky a ohřev spoje prostorově a časově spojen. U technologie pájení

přetavením je proces dodání pájky a ohřev spojen prostorově a časově oddělen.

Nehermetická SMD pouzdra, jako i některé materiály použité na jejich výrobu a výrobu SMD součástek jsou citlivá na vlhkost. Tyto součástky označujeme jako MSD (Moisture Sensitive Devices). Při kombinaci vlhkosti a vysoké teploty může dojít k popraskání součástky. MSD součástky se třídí do skupin dle normy IEC 60749-20, která určuje bezpečné podmínky manipulace se součástkami bez rizika jejich snížené spolehlivosti nebo zničení při pájení přetavením.

Díky stále se zdokonalující technologii klesá cena dané elektroniky. Díky miniaturizaci SMD součástek dochází k menší spotřebě materiálu, tedy i k menším nákladům za spotřebované materiály. S dokonalejší robotizací a automatizací může dojít k redukci lidské síly. Tím se sníží náklady na mzdy. Dále dochází ke snížení chybovosti výroby, tím dochází k vyšší efektivnosti výroby. Všechny zmíněné aspekty přispívají k lepší ekonomičnosti výroby, ať už vlivem snížení nákladů nebo zvýšením efektivnosti výroby.

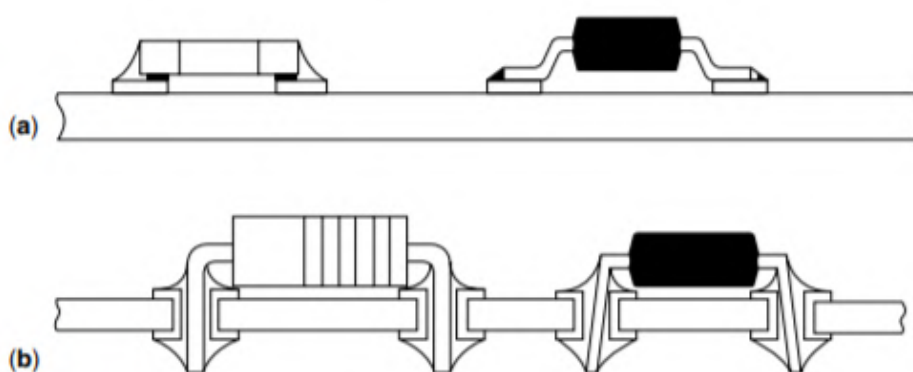
## Kapitola 2

### Technologie povrchové montáže

#### 2.1 Historie

Ačkoliv byla technologie povrchové montáže (SMT) vynalezena v šedesátých letech minulého století, o jejím nástupu začínáme hovořit až počátkem osmdesátých let minulého století. S nástupem této technologie dochází k revoluční změně v elektronickém průmyslu. Dále dochází k nástupu součástek s novými tvary a novým provedením vývodů. Objevují se vsazovací stroje. Dochází k pokroku v pájecích pastách, ve způsobu jejich nanášení na pájecí plošky. Dále dochází ke zvýšení účinnosti u pájení přetavením. Toto všechno vedlo ke změnám základů, na kterých výroba elektroniky doposud stála. SMD technologie začala nahrazovat technologii osazování plošných spojů součástkami s drátovými vývody THT (Through-Hole Technology).

U THT je nutné vyvrtání děr do desky plošného spoje, do kterých se následně vkládají vývody součástek. Tyto vývody se následně zapájí na druhé straně desky plošného spoje. Tato technologie je vhodnější pro ruční osazování a pájení, než-li technologie SMT. U technologie SMT odpadá proces vrtání děr do desky plošného spoje. Součástka se osazuje přímo na povrch desky plošného spoje do předem nanesené pájecí pasty, která je spolu se součástkou zahřáta a tím dojde k zapájení součástky na desku plošného spoje.



**Obrázek 2.1:** Rozdíl mezi (a) SMT a (b) THT.[2]

Technologie povrchové montáže je velmi závislá na automatizaci výroby. Je to zejména kvůli malým rozměrům použitých součástek a tím spojené špatné manipulace s nimi a náročnosti na správné usazení. Ale i kvůli používané technologii pájení. Ať už se jedná o pájení přetavením, nebo pájení vlnou. V obou případech je nutné, aby se pájená součástka nevystavovala vysokým teplotám po dobu delší než nezbytně nutnou, aby nedošlo k jejímu poškození, a zároveň, aby došlo ke správnému zapájení.

Při výrobě prototypů zařízení, nebo malosériové výrobě je technologie THT ekonomičtější než SMT. Proto se i dnes vyskytuje výroba THT součástek, stejně jako se tato technologie uplatňuje.

## 2.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením (Reflow) je jednou z nejužívanějších technik připojování součástek na desky plošných spojů. Charakteristickým jevem tohoto způsobu pájení je, že před samotným procesem pájení se na povrch pájených předmětů nanese potřebné množství pájecí pasty. Po přiložení spojovaných míst k sobě se pájecí pasta zahřeje na teplotu vyšší, než je teplota tání pájecí slitiny obsažené v pastě, tím dojde k jejímu roztavení a následně vzniká pájený spoj. Během procesu pájení může dojít k srovnání součástek vlivem povrchového napětí na pájecích ploškách (pady) desky plošných spojů. To, zda se součástky srovnají, nebo ne záleží na hmotnosti součástek a množství nanesené pájecí pasty.

### 2.2.1 Pájecí pasty

Pájecí pasta je složena ze směsi pájky, tavidla a dalších příměsí upravujících roztékavost, viskozitu a lepivost. Pájka je složena z kulovitých částic s určitým rozložením velikostí a s průměrem od  $5\mu\text{m}$  do  $160\mu\text{m}$ . Podle velikosti částic pájky se dělí do šesti tříd. Otázka, jakou zvolit pájecí pastu a jakou velikost částic, souvisí s velikostí pájecích plošek, respektive s velikostí otvorů v šabloně, přes kterou je pasta nanášena na DPS. Nedílnou součástí past jsou i

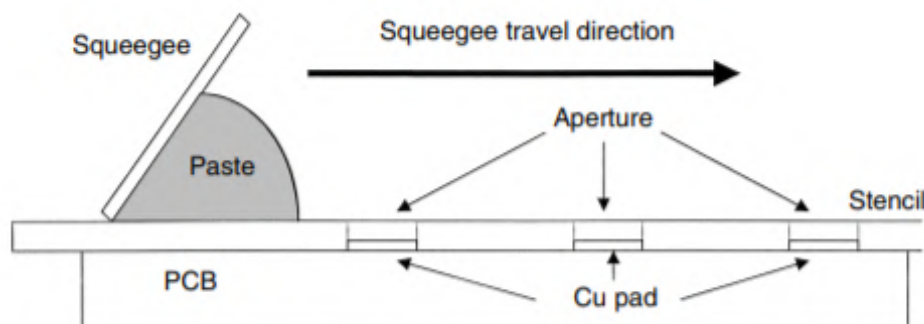
příměsí, zajišťující lepivost pájecí pasty. Lepivost je důležitá, neboť po vsazení součástky na své místo, je tato součástka lepivými silami přidržena na svém místě až do okamžiku, kdy dojde k zapájení součástky.

Třída	Průměr největších částic [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr částic větších než, nejvýše 1% obsahu [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr částic větších než, alespoň 80% obsahu [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr částic větších než, alespoň 90% obsahu [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr částic menších než, nejvýše 10% obsahu [ $\mu\text{m}$ ]
1	160	150	150 - 75	150 - 20	20
2	80	75	75 - 45	75 - 20	20
3	50	45	45 - 25	45 - 20	20
4	40	38	-	38 - 20	20
5	28	25	-	25 - 15	15
6	18	15	-	15 - 5	5

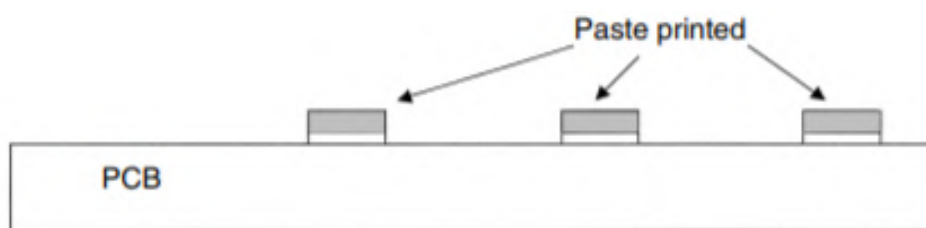
**Tabulka 2.1:** Třídy velikostí částic a jejich rozložení dle ANSI/J-STD-006. [1]

## 2.2.2 Nanášení pájky

Nanášení optimálního množství pájky na správnou pájecí plošku je důležitá operace, neboť správné nanášení pasty má velký vliv na výslednou kvalitu. Existuje mnoho způsobů nanášení pájecí pasty. Pájecí pasta může být nanášena šablonovým tiskem a v ojedinělých případech sítotiskem. Množství nanášené pasty určuje tloušťka šablony. Pájecí pasta může být nanášena také dávkováním neboli dispencí. Na potřebná místa se dávkuje pájecí pasta ručním nebo strojním dávkovačem. Tato metoda nanášení pájky je vhodná spíše pro kusovou nebo vzorkovou výrobu.



**Obrázek 2.2:** Princip šablonového tisku.[2]

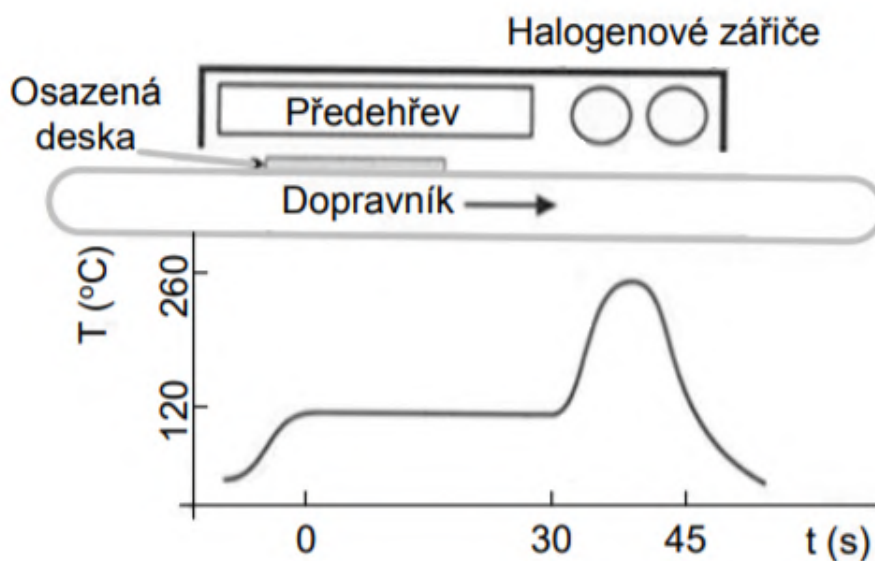


**Obrázek 2.3:** Natisknutá pájecí pasta na pájecích ploškách (padech).[2]

### 2.2.3 Způsoby přetavení pájky

Pájení přetavením můžeme rozdělit podle způsobu ohřevu nutného k přetavení pájky na:

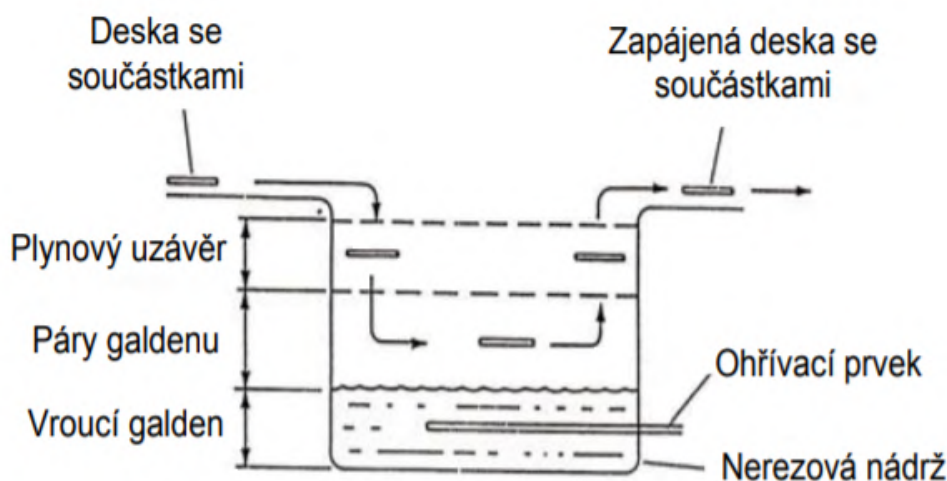
1. **Pájení zářením**, které funguje na principu absorpce záření různých vlnových délek pájených součástek. Ohřev závisí na stavu povrchu i na složení atmosféry v místě ohřevu. Ohřev, respektive jeho rovnoměrnost negativně ovlivňuje tvorba stínů rozměrnějšími součástkami. K rovnoměrnějšímu ohřátí se proto využívá kombinace ohřívání zářením směřováno ventilátorem a tím napomáhá k rovnoměrnému ohřevu pájených míst.[1]



**Obrázek 2.4:** Princip pájení pomocí IR záření.[3]

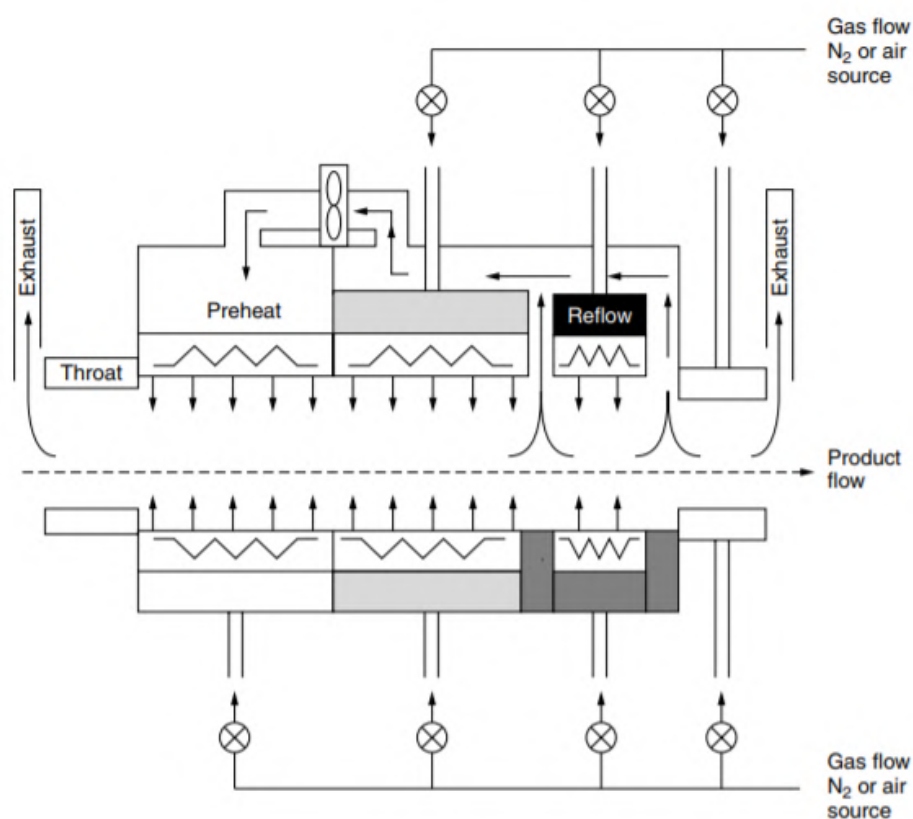
2. **Pájení v kondenzačních parách** využívá k předání potřebné energie k zapájení součástek kondenzaci nasycených par vhodné vroucí kapaliny na chladnějším povrchu. Při tom se uvolňuje teplo, které ohřívá jak součástky, tak pájku i desku plošného spoje. Přenos tepla se vyznačuje vysokou účinností. U této metody jsou vyloučeny negativní účinky stínění, jako tomu bylo u pájení zářením. Použitá kapalina musí být zcela inertní

ke všem použitým materiálům. Dále je žadané, aby kapalina neobsahovala žádný volný kyslík. Tím dojde k zamezení oxidace povrchu pájených spojů při pájení, neboť páry vytlačují vzduch z prostoru, kde probíhá proces přetavení pájecí pasty. [1]



**Obrázek 2.5:** Princip pájení v kondenzačních parách (pájení v dávkách) .[3]

3. **Pájení laserem** využívá pulsních laserů k dodání potřebné energie nutné k přetavení pájecí pasty. Laserový svazek dopadá pouze na místo, kde má dojít k zapájení dané součástky, tedy převážně na konce jejich vývodů. Z tohoto důvodu je pájení laserem vhodné pro pájení teplotně citlivých součástek, jelikož nedochází k zahřátí samotné součástky, ale pouze jejich vývodů. Jedná se o přesnou metodu, která je ovšem méně produktivní a zároveň nákladnější. Touto metodou nelze pájet součástky, které mají vývody pod pouzdrem.[1]
4. **Pájení nuceným prouděním horkého plynu**, je metoda, kdy se k dodání potřebného tepla pro přetavení pájky využívá průchodu, převážně tlakového plynu, ohřivacím zařízením. Nejčastěji se jedná o vzduch, popřípadě dusík. Množství transportovaného tepla lze regulovat teplotou, nebo rychlostí proudění plynu. Horký plyn je usměrňován tryskou na pájecí plošky. U tohoto způsobu přetavení pájky je zaručena maximální teplota, na kterou jsou pájené předměty ohřáty, za předpokladu, že nedojde k pochybení operátora. Maximální teplota nemůže být vyšší, než teplota plynu. Pro omezení oxidace povrchu pájeného spoje je preferován ohřev dusíkem.[1]



**Obrázek 2.6:** Princip pájení nuceným prouděním horkého plynu.[2]

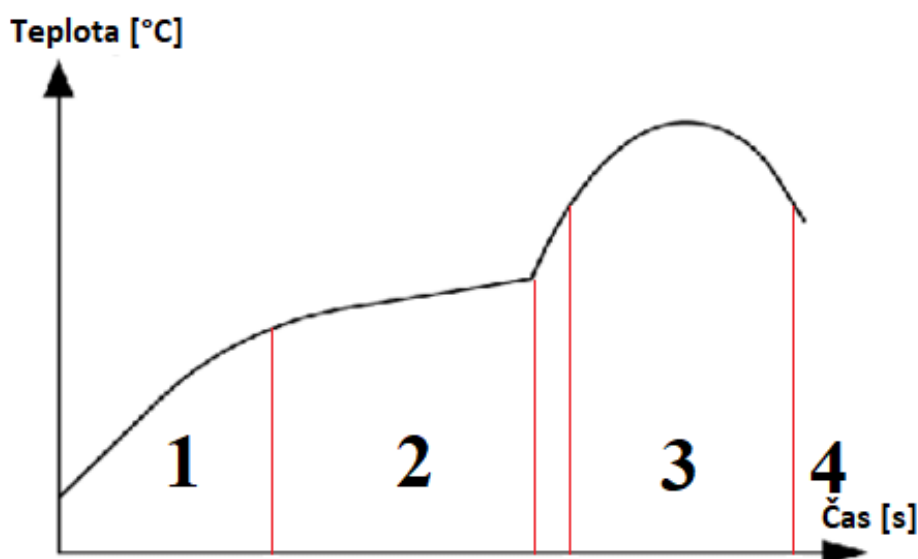
Metodu, kterou přetavíme pájku, volíme na základě druhu pájených desek, hustotě osazení součástek, jejich typu, velikosti pouzder a také na základě ekonomického hlediska.

#### ■ 2.2.4 Teplotní profil

SMT technologie je spojena především s hromadnou výrobou, jako i hromadným pájením. Z tohoto důvodu se uvádí teplotní profil pájecího procesu, jenž zobrazuje závislost teploty na čase. Pro správné zapájení součástek bez jejich poškození je nutné zvolit vhodný teplotní profil.[4]

Teplotní profil pro jednotlivé technologie nebo součástky bývá předepsán výrobcem. Výsledný teplotní profil musí respektovat veškeré vrcholové teploty, které snesou pájené součástky, teplotu tavení slitiny obsažené v pájce a teplotní profil tavidla tak, aby došlo k aktivaci tavidla a správnému zapájení pájených součástek bez jejich poškození.[4]





**Obrázek 2.7:** Sedlový teplotní profil typický pro průběžné pájecí pece.

Jak je vidět na Obrázku 2.7, teplotní profil jako takový se skládá z několika zón. Konkrétně se jedná o:

1. **Zóna předehřevu** neboli **pre-heat** zóna. Při zvyšování teploty dochází odpařování rozpouštědel v pájecí pastě a tavidla začínají měknout. Teplotní nárůst by v této zóně neměl přesáhnout  $3^{\circ}\text{C}$ , aby nedošlo ke změknutí tavidla ještě před dostatečným odpařením rozpouštědla. Následkem by mohlo být zvodnatění pájecí pasty, což by mohlo vést k tvorbě kuliček a můstků.[5]
2. **Oblast teplotního vyrovnání**, ve které dochází k úplnému odpaření rozpouštědel a rovnoměrnému rozložení tepla po celé ploše DPS. Tavidlo přechází do tekutého stavu a rozprostře se přes celou pájenou plochu, čímž ji chrání před další oxidací. Zvyšováním teploty dochází k aktivaci tavidla a následnému odstranění nečistot z pájené plochy DPS.[5]
3. **Zóna přetavení**, ve které teplota přesáhne teplotu tání pájecí slitiny. Dochází ke vzniku tekutého pájeného spoje. Je potřeba zajistit dostatečně dlouhou dobu smáčení, aby došlo ke kompletnímu roztavení pájky a k dobrému zapájení všech pájených součástí. Je potřeba zajistit, aby DPS nebyla vystavena vysoké teplotě delší, než nezbytně nutnou dobu, jinak by mohlo dojít ke vzniku křehkých pájených spojů nebo k poškození některých pájených součástí. V opačném případě, při nedostatečném prohřátí může dojít k nesprávnému přetavení pájecí pasty.[5]
4. **Zóna chlazení**, ve které dochází k chladnutí celé DPS a k tuhnutí pájky.[5]

## 2.3 Pouzdření

Otázka pouzdření je velmi komplexní, vyžaduje mít znalosti z mnoha oborů. U pouzdření je nutné zvolit vhodný materiál, optimálně ho zpracovat, vybrat vhodnou technologii. Konstruktor dále musí řešit přenos elektrických signálů, generování a odvod tepla, spolehlivost, klimatickou odolnost, pájitelnost, jakost a mnoho dalších problémů. Pouze paralelní pokrok v oblasti křemíkové technologie a litografie v oblasti pouzdření, umožní spolehlivé připojení a chlazení stále rychlejších a složitějších integrovaných obvodů. Pouzdření není pouze opatření součástky, modulu nebo funkčního celku pouzdrem, ale znamená to také připojování čipu k vývodům pouzdra, připojování součástek na propojovací desku a jejich spojování ve vyšší funkční celky. Pouzdření je tedy děleno do více úrovní, kdy každá úroveň je charakterizována specifickou technologií a provedením pouzder.[1]

Pouzdro se obecně skládá ze dvou prvků a to základny, umožňující elektrické propojení prvků elektrického obvodu a zároveň plnící nosnou funkci a ochranným krytem, který ale nemusí být vždy použit. Ochranný kryt chrání součástku před vnějšími vlivy. V dnešní době se užívají kryty keramické, plastové nebo kovové. [1]

V naší úloze se budeme zabývat především montáží první úrovně, respektive součástkami druhé úrovně. Montáž první úrovně je proces, kdy je montován čip. Součástka první úrovně je připojena na základnu pouzdra první úrovně. Tato součástka je propojena s vývody základny a následně je tento celek opatřen ochranným krytem. Tím dojde k vytvoření diskrétní součástky. Vzniklá součástka se nazývá součástkou druhé úrovně.

Jako pouzdra první úrovně se užívají tři základní typy.

1. **Pouzdra nehermetická**, jenž jsou nejčastěji plastová. Jedná se o nejlevnější pouzdra. Spojením polymer-kov může docházet k průniku vlhkosti dovnitř pouzdra. Různé kovy užití při výrobě součástek mohou následně reagovat s vlhkostí, tím mohou vzniknout elektrochemické články, které podporují vznik elektrochemické koroze.[1]
2. **Pouzdra částečně hermetická** užívající pokovenou keramiku v kombinaci s plasty. I v tomto provedení dochází k nepatrnému průniku vlhkosti dovnitř pouzdra, která může vyvolat elektrochemickou korozi.[1]
3. **Pouzdra hermetická**, vyráběny převážně z kovů nebo keramiky. Jedná se o nejkvalitnější pouzdra z hlediska ochrany proti vnějším klimatickým vlivům. S ohledem na jejich vysokou cenu se používají pouze pro nejnáročnější aplikace.[1]

## ■ 2.4 Montáž v elektronice

### ■ 2.4.1 Montáž první úrovně

Jedná se o proces montování na úrovni čipů. Součástka první úrovně (čip) je montována na základnu pouzdra první úrovně (nosič čipu), je propojena s vývody této základny a opatřena nějakým typem ochranného krytu. Většinou se jedná o plastový nebo kovový kryt. Cílem montáže první úrovně je vytvořit samostatnou diskrétní součástku, která se nazývá součástkou druhé úrovně.[1]

### ■ 2.4.2 Montáž druhé úrovně

Jedná se o proces, kdy jsou součástky druhé úrovně montovány na základnu pouzdra druhé úrovně (propojovací desku), například na desku plošného spoje. Cílem této montáže je vytvořit samostatnou funkční kartu, například síťovou nebo grafickou kartu. Tato funkční karta se občas nazývá jako dceřinná karta. Dceřiné karty se většinou neopatřují ochrannými kryty. Takto vytvořená funkční karta se nazývá součástkou třetí úrovně.[1]

### ■ 2.4.3 Montáž třetí úrovně

Jedná se o proces montování součástek třetí úrovně na základnu pouzdra třetí úrovně. Touto základnou je opět myšlena deska plošného spoje. Například v počítači se tato DPS nazývá základní (mateřská) deska (motherboard). Tato deska zajišťuje propojení s ostatními součástkami a deskami do vyšších celků. Desky se většinou propojují přes konektory. Celá soustava následně bývá opatřena ochranným krytem, například skříní (case). Takto vzniklá vyšší soustava se nazývá součástka čtvrté úrovně. Součástky čtvrté úrovně se mohou užívat samostatně, nebo dále montovat do vyšších celků.[1]



**Obrázek 2.8:** Součástka čtvrté úrovně - Na základní desce (motherboard - základna pouzdra třetí úrovně) jsou dceřiné desky - např. GPU (součástka třetí úrovně) složené ze součástek druhé úrovně a celá soustava je opatřena ochranným krytem (Case).

## 2.5 Vlhkost



Pro lidský život je vlhkost vzduchu nezbytnou součástí života. Ovšem v prostředí elektroniky a elektronické výroby může vlhkost znamenat vážné riziko pro spolehlivost a životnost elektroniky. Vlhkost vzduchu je proměnný faktor, ovlivněný převážně teplotou, kdy při vyšší teplotě je vzduch schopen přijmout větší množství vodních par. Vlhkost jako taková vyjadřuje množství vodních par v daném množství vzduchu. Toto množství můžeme vyjádřit například jako:

1. Relativní vlhkost, neboli poměrná vlhkost (RH). Udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a maximálním možným množstvím par, které je vzduch schopen pojmout za stejného tlaku a teploty. [%]
2. Měrná vlhkost, která udává hmotnost vodní páry vztahované na jednotku hmotnosti vzduchu. [%]
3. Absolutní vlhkost, neboli měrná hmotnost vodní páry, jenž udává množství vodní páry v jednotce objemu vzduchu. [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Vlhkost vzduchu napomáhá ke korozi pájených povrchů a to jak desek plošného spoje, tak připojovaných součástek a jejich vývodů. Korozi může napomáhat i následné vysoušení součástek, jež byly vystaveny velkému působení vlhkosti. Obecně lze tvrdit, že čím je vysoušení prováděno při vyšších teplotách, tím rychleji může dojít k oxidaci a následné korozi. Tato koroze snižuje kvalitu pájení a pájitelnost daných ploch.

## 2.6 MSD

Se zmenšováním rozměrů pouzder a zmenšováním tloušťky jejich stěn se zvyšuje rychlost, s jakou mohou součástky pohlcovat vlhkost a zároveň se snižuje množství vlhkosti, které jsou schopny pojmout. Starší pouzdra, která byla zároveň mohutnější, nepohlcovala vlhkost tak rychle. Hlavním nebezpečím pro součástky citlivé na vlhkost (Moisture Sensitive Devices) není samotná vlhkost absorbovaná z okolního prostředí, nýbrž její následné postupné rozpínání a odpařování během pájecího procesu. Následkem toho může dojít k poškození jak samotné součástky, tak i desky plošného spoje. Hlavní problém u negativních vlivů vlhkosti při přetavení je ten, že většina jich je „neviditelných“. Negativními následky jsou například poškození čipu nebo vodiče, tvorba vnitřních trhlin a delaminace plastu z montážního rámečku. Všechny tyto problémy nemusí být zjištěny během procesu testování. Kromě poruchy mohou způsobit zhoršení spolehlivosti. Trhliny se v některých případech mohou dostat až na povrch. V extrémním případě může dojít k tzv. Popcorn efektu, kdy součástka doslova „exploduje“ a popraská jako popcorn.

	<b>Caution</b> This bag contains <b>MOISTURE-SENSITIVE DEVICES</b>	<b>LEVEL (MSL)</b>  <small>If blank, see adjacent bar code label</small>
	<p>1. Calculated shelf life in sealed bag: 12 months at &lt; 40 °C and &lt; 90% relative humidity (RH)          Bag Seal Date: _____  <small>If blank, see adjacent bar code label</small></p> <p>2. Peak package body temperature: _____ °C  <small>If blank, see adjacent bar code label</small></p> <p>3. After bag is opened, devices that will be subjected to reflow solder or other high temperature process must be</p> <p>a) Mounted within: _____ hours of factory conditions  <small>If blank, see adjacent bar code label</small>          &lt; 30°C/60% RH, or</p> <p>b) Stored per J-STD-033</p> <p>4. Devices require bake, before mounting, if:</p> <p>a) Humidity Indicator Card reads &gt;10% for level 2a - 5a devices or &gt;60% for level 2 devices when read at 23 ± 5 °C</p> <p>b) 3a or 3b are not met</p> <p>5. If baking is required, refer to IPC/JEDEC J-STD-033 for bake procedure</p> <p><small>Note 1: Level (MSL) and body temperature defined by IPC/JEDEC J-STD-020</small></p>	

Obrázek 2.9: Štítek součástky citlivé na vlhkost. [6].

### 2.6.1 MSL

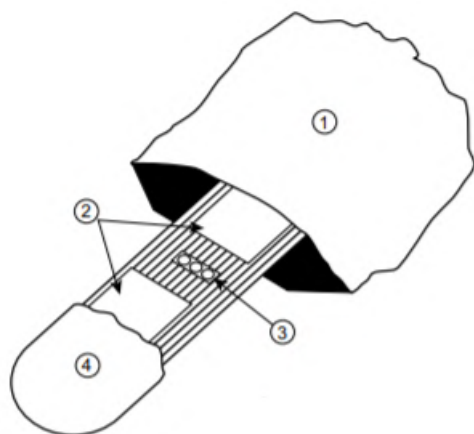
Výrobci používají normy k zajištění shody různých výrobků. Řešení problému manipulace se součástkami citlivými na vlhkost vyskytujících se v elektronické výrobě řeší norma J-STD-033C. Tato norma dělí součástky do tříd MSL (Moisture Sensitivity Level) v závislosti na typu a velikosti pouzdra součástky. Výrobce dodává MSD převážně v sáčcích s ochrannou vrstvou proti vlhkosti MBB (Moisture Barrier Bag). Dále se v sáčku nachází sáčky s absorberem vlhkosti a indikátor vlhkosti. Tomuto celku se říká Dry Pack. Tento obal obsahuje štítek, na kterém je výrobcem udaná úroveň citlivosti. Zároveň tento sáček indikuje, že daná součástka může být náchylná na vlhkost. MSL se skládá z osmi úrovní citlivosti na vlhkost, kdy každá úroveň udává bezpečnou životnost na dílně (Floor Life) po vytažení z ochranného obalu. Floor life je doba, po kterou mohou být jednotlivé úrovně bezpečně vystaveny vlivu typického pracovního prostředí po vyjmutí z Dry Packu a pájeny. Údaje stanovené normou J-STD-033C platí pouze při teplotě menší nebo rovné 30°C a relativní vlhkosti menší nebo rovné 60%. Se zvyšováním teploty nebo relativní vlhkosti se tato doba snižuje a naopak. [6]

MSL	Floor life
1	Neomezeno při $\leq 30^{\circ}\text{C}/85\% \text{ RH}$
2	365 dní
2a	28 dní
3	7 dní
4	3 dny
5	2 dny
5a	1 den
6	Před použitím nutno vysušit, po vysušení nutno pájet v časovém limitu uvedeném na štítku

**Tabulka 2.2:** Úroveň MSL a příslušné Floor life doby podle normy J-STD-033C.[6]

### 2.6.2 Dry pack

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6.1, součástky citlivé na vlhkost se dodávají ve speciálním balení, které se skládá z indikátoru vlhkosti a absorbéru vlhkosti uzavřeného společně s MSD uvnitř speciálního, vlhku nepropustného sáčku (MBB). Toto balení se nazývá DRY PACK a jeho uspořádání je znázorněno na obrázku 2.10.[7]



J-STD-033D-3-1

**Obrázek 2.10:** Schématické uspořádání DRY PACKu, kde 1 je MBB sáček, 2 je absorber vlhkosti v sáčcích, 3 je indikátor vlhkosti a 4 je uzavírací pěna.[7]

### ■ 2.6.3 Vysoušení

SMD pouzdra klasifikovaná úrovněmi 2a až 5a musí být před uzavřením do MBB vysušena. Časová perioda mezi vysoušením a uzavřením v MBB nesmí přesáhnout MET (Manufacturer's Exposure Time) dobu, povolenou pro distributora pro otevření sáčku a přebalení součástek. MET je maximální doba po sušení při 125°C, po kterou mohou být součástky vystaveny okolnímu prostředí před odesláním konečnému uživateli. Pokud je aktuální MET dodavatele větší než základních 24 hodin, pak musí být použit aktuální MET. Pokud distributor použije při přebalení sáčky MBB s aktivním absorberem vlhkosti, nemusí být tento čas odečten od MET.[7]

SMD pouzdra klasifikovaná úrovní 6, jsou extrémně citlivá na vlhkost a před každým použitím u koncového zákazníka musí být vysušeny při teplotě 125°C a následně zapájeny přetavením v časovém limitu specifikovaném na štítku. Z tohoto důvodu součástky úrovně 6 nemusí být baleny v MBB, sáček nemusí obsahovat indikátor vlhkosti a vysoušedlo vlhkosti. Balení do MBB se ovšem doporučuje, aby bylo zjevné, že se jedná o součástku citlivou na vlhkost.[8]



Tloušťka pouzdra	MSL	Vysoušení při 125 °C +10/-0 °C <5 % RH [hod]	Vysoušení při 150 °C +10/-0 °C <5 % RH [hod]
≤1,4 mm	2	7	3
	2a	8	4
	3	16	8
	4	21	10
	5	24	12
	5a	28	14
>1,4 mm ≤2,0 mm	2	18	9
	2a	23	11
	3	43	21
	4	48	24
	5	48	24
	5a	48	24
>2,0 mm ≤4,5 mm	2	48	24
	2a	48	24
	3	48	24
	4	48	24
	5	48	24
	5a	48	24

**Tabulka 2.3:** Doba vysoušení MSD jednotlivých MSL před vložením do Dry packu nebo po uplynutí MET.[7]

### 2.6.4 Moisture Barrier Bag (MBB)

Sáček MBB musí splňovat normu MIL-PRF-81705, TYPE 1, pro pružnost, ESD ochranu, mechanickou pevnost a odolnost proti proražení. Sáček musí být tepelně uzavíratelný (zátavený). Důležitým parametrem MBB je parametr WVTR (Water Vapour Transmission Rate), udávající míru propustnosti vlhkosti plastové nebo metalizované plastové vrstvy. U MBB musí být WVTR  $\leq 0,0310 \text{ g/m}^2$  za 24 hodin při 40°C po testech ohebnosti podle normy ASTM F 392. Měření WVTR se provádí dle normy ASTM F 1249.[7]

MBB se používá i pro skladování MSD, jelikož napomáhá k udržení stálé hladiny vlhkosti, jenž je spolu se stálou teplotou požadována pro skladování MSD. V MBB by měl být uzavřen aktivní absorbér, jenž pohltí vlhkost, která vnikla do MBB před jeho uzavřením. Absorbér dále udržuje vlhkost uvnitř sáčku menší než 10% při 25°C. Odsátí vzduchu před uzavřením MBB není požadováno, ovšem kvůli lepšímu balení a zmenšení objemu se může vzduch částečně odsát. Úplné odsátí vzduchu není dovoleno, jelikož by došlo ke snížení účinnosti absorbéru vlhkosti a mohlo by snadněji dojít k protržení MBB.[7]





Obrázek 2.11: MBB šáček

### 2.6.5 Vysoušedla

Vysoušedla, neboli absorbéry vlhkosti jsou materiály, které zajišťují pohlcování vlhkosti uvnitř MBB a zároveň musí splňovat normu MIL-D-3464, TYPE II. Musí být bezprašné, nekorozivní a musí mít absorpční vlastnosti dané normou.[7]

Vysoušedlo se skládá z bílého křemičitého gelu (silikagel) nebo molekulárního síta, uzavřeného v prachotěsném sáčku odolném proti opotřebení a roztržení.[8]

- **Silikagel** je pórovitá forma oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$  ve formě kuliček nebo granulátu vyráběného z křemičitanu sodného. Silikagel je chemicky neutrální a odolný vůči většině kyselin, ale citlivý vůči zásaditým látkám. Některé silikagely jsou schopny měnit barvu podle stavu absorbované vlhkosti.[8]



**Obrázek 2.12:** Vysoušedlo silikagel dodaný v dry packu u mnou objednaných součástek.

- **Molekulární síto** je syntetický, krystalický hlinitokřemičitan. Krystalické struktury hlinitokřemičitanu mají přesně definované rozměry pórů, které určují jak velké molekuly mohou být pohlceny. Molekuly menší než je rozměr pórů jsou absorbovány a větší molekuly, které neprojdou skrze póry pohlceny nejsou. Molekulární síta mají dobrou absorpční kapacitu i při nízké relativní vlhkosti a vyšších teplotách.[8]

Výpočet množství vysoušedla, které je nutno vložit do MBB v rámci Dry Packu je založen na ploše sáčku a množství propuštěných vodních par (WVTR) dle následující rovnice:

$$U = \frac{0,304 \cdot M \cdot WVTR \cdot A}{D} \quad [UNIT][7] \quad (2.1)$$

kde

- U - Množství vysoušedla [UNIT]
- M - Doba skladovatelnosti [měsíc]
- WVTR - propuštěné množství vodních par [g/m<sup>2</sup>/24hod]
- A - Exponovaná plocha MBB sáčku [dm<sup>2</sup>]
- D - Množství absorbované vody na množství vysoušedla při 10% relativní vlhkosti a 25 °C [g/UNIT]. Při neznámé hodnotě D se používá D=1,4 g/UNIT.
- 0,304 - Průměrný počet dní za měsíc/100 in<sup>2</sup>.

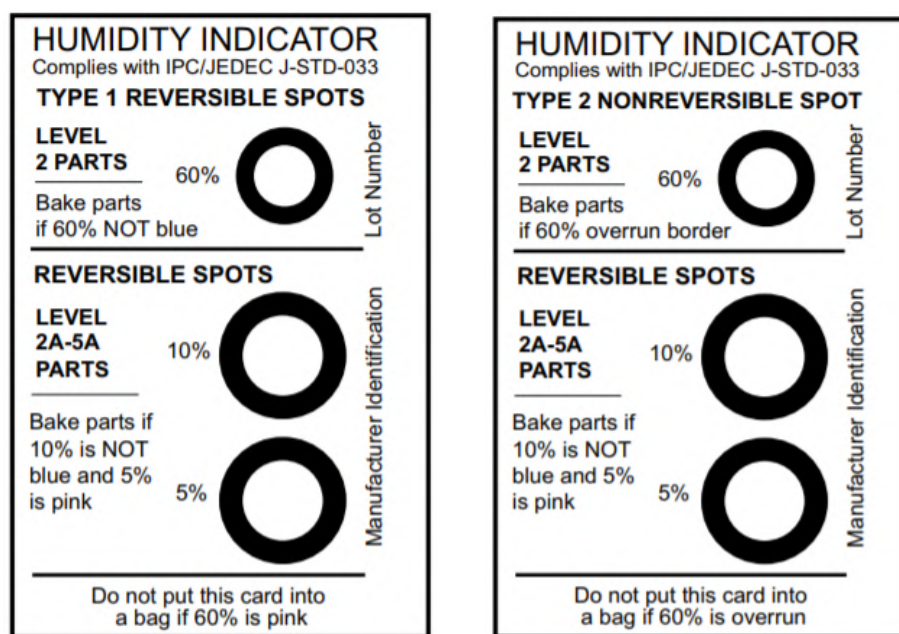
Vysoušedla v Dry Packu musí být v takovém množství, aby byla zajištěna podmínka vnitřní vlhkosti <10% při 25 °C až do konce doby skladovatelnosti. Jednotkou množství vysoušedla je UNIT. UNIT vysoušedla je definováno jako množství, které absorbuje minimálně 2,85g vlhkosti při 20% RH a 25 °C.

## 2.6.6 Indikátor vlhkosti HIC

Humidity Indicator Card (HIC), neboli indikační karta vlhkosti představuje jednoduchou a levnou metodu indikace vlhkosti uvnitř MBB. Existují dva typy HIC, TYP 1 (reverzibilní) a TYP 2 (nereverzibilní). Každá indikační karta obsahuje minimálně tři barevné terčíky (spoty) citlivé na relativní vlhkost 5 %, 10 % a 60 %. Jednotlivé terčíky jsou označeny, a hladinu vlhkosti indikují pomocí změny barevného odstínu.

Spot	Indikace 2 % RH	Indikace 5 % RH	Indikace 10 % RH	Indikace 55 % RH	Indikace 60 % RH	Indikace 65 % RH
5	Sucho Modrá	Změna $\geq 7\%$ odstínu Levandulová	Mokro Růžová	Mokro Růžová	Mokro Růžová	Mokro Růžová
10	Sucho Modrá	Sucho Modrá	Změna $\geq 10\%$ odstínu Levandulová	Mokro Růžová	Mokro Růžová	Mokro Růžová
60	Sucho Modrá	Sucho Modrá	Sucho Modrá	Sucho Modrá	Změna $\geq 10\%$ odstínu Levandulová	Mokro Růžová

Tabulka 2.4: Tabulka změny barvy (odstínů) jednotlivých indikačních terčíků.[7]



(a) : HIC TYP 1 (reverzibilní)

(b) : HIC TYP 2 (nereverzibilní)

Obrázek 2.13: Oba typy HIC.[7]

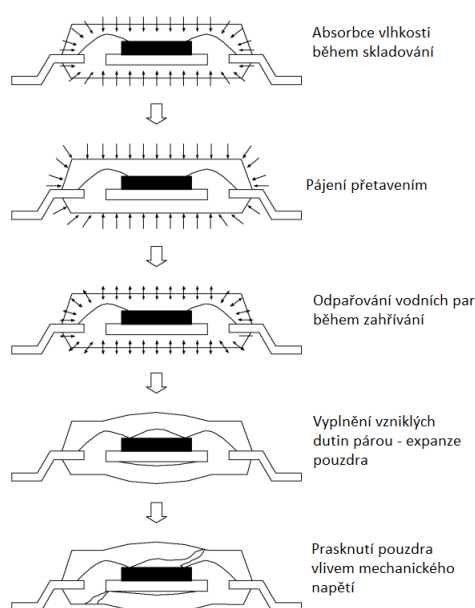
## 2.6.7 Vady zapříčiněné vlhkostí

Jak již bylo zmíněno v bodech 2.3, 2.5 a 2.6, součástky zapouzdřeny v nehermetických, popřípadě částečně hermetických pouzdrech jsou náchylné na absorpci vlhkosti ze vzduchu. Tato vlhkost může následně zapříčinit některou

z nežádoucích vad. Ovšem pouze za jedním jevem, a to konkrétně za elektrochemickou korozí, stojí vlhlost sama. Za ostatními jevy stojí kombinace absorbované vlhkosti v součástce a vysoká teplota při přetavení.

### ■ Popcorn effect

Absorbovaná vlhlost součástkou a nahromaděná v ní při vysokých teplotách přetavení se začíná rozpínat a odpařovat. Vzhledem k miniaturizaci není součástka schopna propustit dostatečně rychle vodní páry. Tím může dojít k praskání vnitřních struktur součástky. V extrémním případě může dojít k viditelnému popraskání, vzniku boulí a vyvýšenin a expanzi pouzdra jako popcorn. [9]



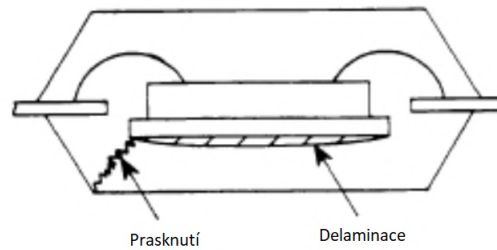
**Obrázek 2.14:** Sled po sobě jdoucích událostí při vzniku popcorn efektu.

### ■ Elektrochemická koroze

Reakcí vzdušné vlhkosti s kovy použitými při výrobě může docházet k elektrochemické reakci a vzniku intermetalických sloučenin uvnitř součástky. Při zahřátí součástky během vysoušení může docházet k oxidaci povrchu a tím ke zhoršení kvality pájení. Tento jev se projevuje až po několika vysoušecích cyklech, z toho důvodu jsou MST součástky uchovávány v Dry Packu. Zároveň s dokonalejší technologií dochází ke snížení nečistot v plastu použitém na výrobu pouzdra. To také napomáhá ke snížení výskytu tohoto jevu.

### ■ Delaminace

Kromě prasknutí může odpaření nahromaděné vlhkosti v součástce způsobit i delaminaci, která už nemusí být objevena během testování. Delaminace přímo ovlivňuje dlouhodobou spolehlivost a funkčnost součástky.



**Obrázek 2.15:** Prasknutí a delaminace součástky způsobené vlhkostí [10].

### ■ Dendrity

Růst dendritů není spojen pouze s vlhkostí a teplotou, ale i s miniaturizací a vyšší hustotou osazování. Menšími mezerami mezi jednotlivými součástkami dochází k jejich většímu ohrožení termo-izolačním selháním. Při splnění určitých podmínek teploty a vlhkosti se součástka pod napětím může stát elektrochemicky nestabilní. Důsledkem toho dojde k ionizaci kovů nebo pájecí pasty a dvě sousední plošky se začnou chovat jako anoda a katoda. Mezi touto anodou a katodou začne docházet elektrochemické migraci. Migrace iontů z anody a jejich následné usazování na katodě se nazývá růst dendritů. Dendrity vytváří „stroměčkové“ struktury. Vzniklé dendrity mohou být vodivé a dojde-li k jejich růstu do takové míry, že spojí anodu s katodou, může dojít ke zkratu na součástce a následně k poruše celého elektrotechnického celku. [11]

Mezi další vady způsobené vlhkostí patří například přerušení elektrického nebo tepelného vedení.



## Kapitola 3

### Studie vlivu vlhkosti

V této části se zaměříme na praktické zkoumání chování pouzder součástek citlivých na vlhkost po vyjmutí z dry packu a následnému pájecímu procesu. V rámci zkoumání chování MSD jsem zkušební vzorky rozdělil na dvě poloviny, kdy první polovina vzorků byla ponechána v místnosti a druhá polovina byla vložena do exikátoru, ve kterém byly součástky vystaveny zvýšené relativní vlhkosti oproti relativní vlhkosti v místnosti.

Výrobce	typ součástky	MSL	počet kusu [ks]	Označení
Koupené součástky				
Texas Instruments	OP AMP	2	30	1
Richtek	LDO VOLT REG	3	40	2
Kingbright	LED PLCC2 RED	4	80	3
Součástky dodané firmou				
NXP	Processor	3	10	4
Renesas	Flash memory/processor	3	10	5
NXP	DIRANA3	3	10	6
Micron	NAND memory	3	10	7
Samsung	DDR3 memory	3	10	8
Renesas	Processor/OS timer	3	10	9
Nichicon	elyt capacitor	1	10	10
TDK	Coil	1	10	11

**Tabulka 3.1:** Soupis použitých součástek při měření praktické části.

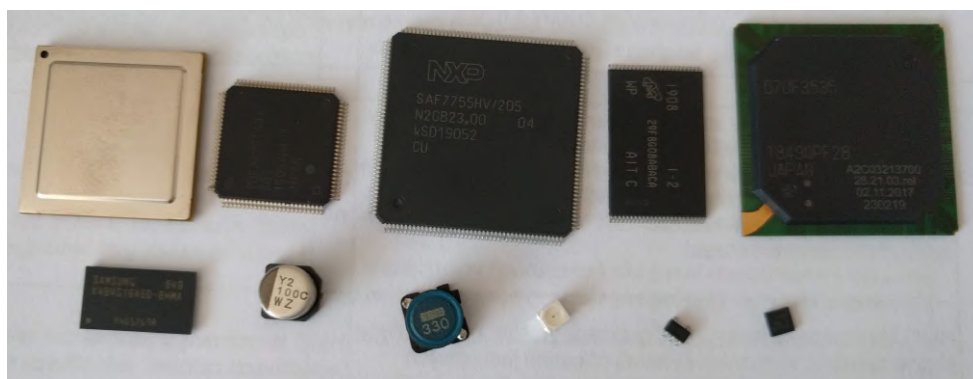
### 3.1 Návrh experimentu

Součástky pro můj experiment byly zajištěny ze dvou zdrojů. První část součástek byla zakoupena přímo pro moji bakalářskou práci. V rámci vybírání součástek jsem se snažil vybrat takové součástky, abych získal součástky různých úrovní MSL, konkrétně se jednalo o součástky úrovní 2, 3 a 4.



Druhou část součástek jsem získal z firmy, jenž si nepřála být jmenována. Tyto součástky byly bohužel v době, kdy se mi dostaly do rukou již vyjmuty z dry packu. Jedná se o součástky MSL 1 a 3.

Pro můj experiment mám tedy součástky celkem čtyř úrovní MSL. Přehled všech použitých součástek a jejich tříd je v tabulce 3.1. Z dané tabulky je patrné, že nejvíc zastoupena je třída 3.



Obrázek 3.1: Použité součástky v experimentu.

#### 3.1.1 Změna hmotnosti

V rámci experimentu jsem součástky ponechal několik dní vystavené určité vlhkosti a teplotě a následně zkoumal změnu jejich hmotnosti. Jednu polovinu součástek jsem nechal v místnosti, při pokojové teplotě cca 23 °C a relativní vlhkost kolem 30 %. Druhou polovinu součástek jsem vložil do exikátoru, kde spodní část nádoby namísto sušidla byla naplněna vodou, tím bylo zajištěno, že součástky v exikátoru byly vystaveny zvýšené vlhkosti, jenž dosahovala hodnoty relativní vlhkosti 100 % .

U koupených součástek jsem první vážení provedl hned po vyjmutí z dry packu a tuto hodnotu budu brát jako hmotnost suchých součástek. U součástek dodaných firmou jsem jejich vážení provedl hned, jakmile jsem je obdržel.

Po několika dnech, kdy byly součástky vystaveny působení vlhkosti, jsem je znovu zvážil a po tomto vážení jsem součástky nechal projet pecí s teplotním profilem určeným pro přetavení bezolovnatých pájecích past v konvenční peci Mistral 260, čímž jsem simuloval pájecí proces a chování navlhčelých pouzder SMD během pájecího procesu.

Následně jsem opět součástky zvážil. Po tomto vážení jsem jednu polovinu součástek opět vložil zpátky do exikátoru a druhou polovinu nechal v místnosti. Po sedmi dnech působení vlhkosti jsem opět provedl vážení hmotnosti součástek a následně je nechal znovu projet pecí a zvážil.

Veškeré změny hmotnosti budu vyhodnocovat pomocí relativního hmot-



nostního zisku, určeného dle následného vzorce:

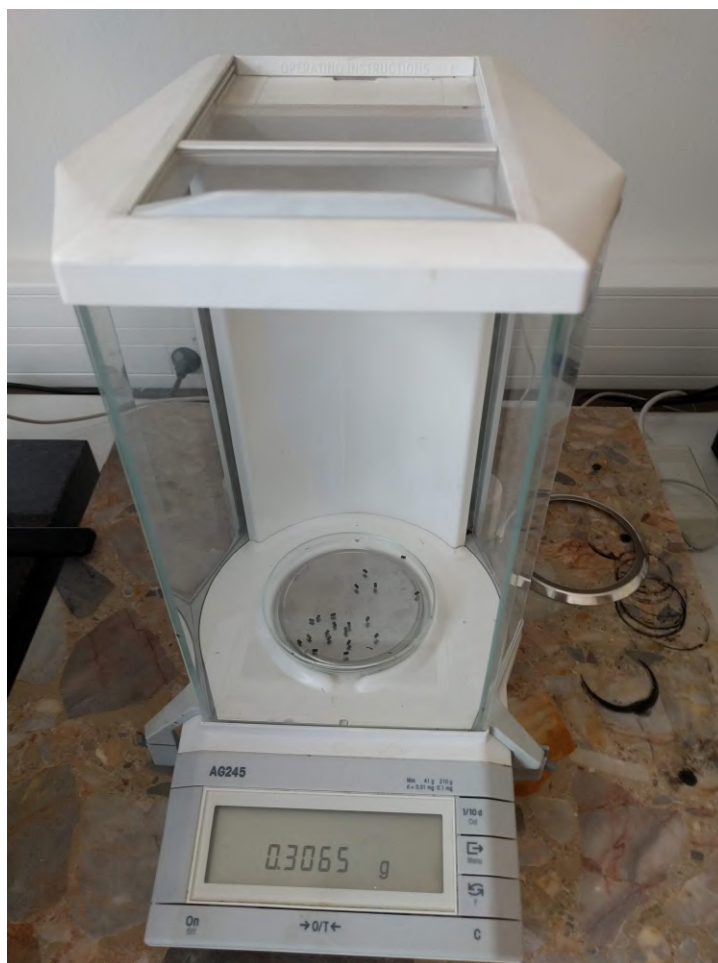
$$\Delta m_{rel} = \frac{\text{aktuální hmotnost součástky} - \text{hmotnost suché součástky}}{\text{hmotnost suché součástky}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Použité přístroje

Veškeré vážení bylo prováděno na analytické laboratorní váze Mettler Toledo AG245 s následujícími vlastnostmi:

<b>Maximální hmotnost</b>	210 g / 41 g
<b>Rozlišení</b>	0,1 mg / 0,01 mg
<b>Linearita</b>	±0,2 mg / ±0,03 mg
<b>Doba stabilizace</b>	3 s / 15 s
<b>Provozní teplota</b>	10 °C - 30 °C

**Tabulka 3.2:** Technické specifikace laboratorní váhy Mettler Toledo AG245.[12]



**Obrázek 3.2:** Použitá váha Mettler Toledo AG245.

Pro zjišťování podmínek v laboratoři, konkrétně teploty a vlhkosti jsem používal vlhkoměr, teploměr a tlakoměr GREISINGER GFTB 200.

<b>Měřicí rozsah teploty</b>	-25,0 °C - +70,0 °C
<b>Měřicí rozsah vlhkosti vzduchu</b>	0,0 % - 100% RH
<b>Měřicí rozsah tlaku vzduchu</b>	10,0 mbar - 1100 mbar
<b>Přesnost měření teploty</b>	±1 digit ± 0,5 % hodnoty
<b>Přesnost měření vlhkosti vzduchu</b>	±1 digit ± 2,5 % hodnoty
<b>Přesnost měření tlaku vzduchu</b>	±1 digit ± 1,5 mbar
<b>Provozní teplota</b>	-25,0 °C - +70,0 °C

**Tabulka 3.3:** Technické specifikace použitého vlhkoměru, teploměru a tlakoměru GREISINGER GFTB 200.[13]



**Obrázek 3.3:** Použitý vlhkoměr, teploměr a tlakoměr GREISINGER GFTB 200.

Pro simulaci pájení přetavením byla použita konvenční pájecí pec MISTRAL 260.

## 3.2 Naměřené hodnoty

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, součástky od firmy nebyly zváženy po vyjmutí z dry packu. Jelikož mě ovšem zajímalo chování pouzder daných součástek při vystavení vlhkosti a následnému projetí pecí, přesná hmotnost suché součástky pro můj experiment není až tak důležitá a tedy jako přibližnou suchou hmotnost daných součástek budu brát hmotnost po prvním průchodu pecí.

Typ součástky	MSL [-]	Počet kusu [ks]	Značení	Hmotnost suché součástky $m_0$ [g]
Exikátor		100 %RH, 23 °C		
OP AMP	2	15	1e	0,2934
LDO VOLT REG	3	20	2e	0,3065
LED PLCC2 RED	4	40	3e	1,3587
Místnost		30 %RH, 23 °C		
OP AMP	2	15	1m	0,2926
LDO VOLT REG	3	20	2m	0,3070
LED PLCC2 RED	4	40	3m	1,3562
Exikátor		100 %RH, 23 °C		
Processor	3	5	4e	15,6656
Flash memory / processor	3	5	5e	3,2568
DIRANA3	3	5	6e	9,4848
NAND memory	3	5	7e	2,6014
DDR3 memory	3	5	8e	0,9277
Processor/OS timer	3	5	9e	13,5057
Elyt capacitor	1	5	10e	1,4363
Coil	1	5	11e	3,0323
Místnost		30 %RH, 23 °C		
Processor	3	5	4m	15,7378
Flash memory / processor	3	5	5m	3,2602
DIRANA3	3	5	6m	9,4884
NAND memory	3	5	7m	2,6101
DDR3 memory	3	5	8m	0,9222
Processor/OS timer	3	5	9m	13,4878
Elyt capacitor	1	5	10m	1,4341
Coil	1	5	11m	3,0391

**Tabulka 3.4:** Tabulka naměřených suchých hmotností součástek a jejich značení do dalších tabulek.

Po prvním vážení jsem jednu polovinu součástek nechal v místnosti a druhou polovinu součástek vložil do exikátoru. Jelikož jsem s koupenými součástkami začal experimentovat dřív, byly koupené součástky ponechány 13 dní v místnosti a exikátoru do prvního projetí peci. K dalšímu projetí peci došlo následně po dalších 7 dnech.

U součástek dodaných firmou došlo k prvnímu průchodu peci po 7 dnech a k druhému po dalších sedmi dnech. Jelikož tyto součástky nebyly při dodání v dry-packu, lze předpokládat, že byly již nějakou dobu vystaveny působení vzdušné vlhkosti.

### 3. Studie vlivu vlhkosti

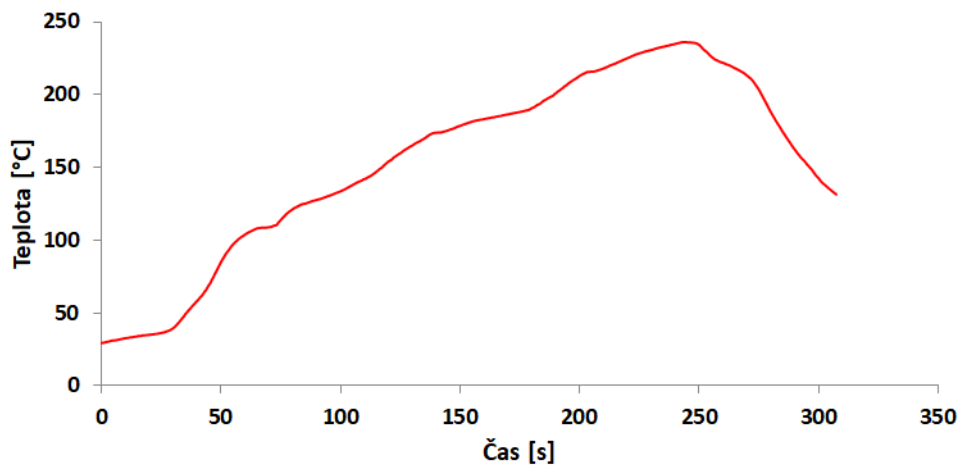


**Obrázek 3.4:** Součástky ponechané působení vlhkosti v exikátoru a v místnosti.



**Obrázek 3.5:** Použité součástky v experimentu.

Při „přetavení“ jsem vždy použil stejný teplotní profil s následujícím nastavením: rychlost posunu 15 cm/s, teplota první zóny 160 °C, teplota druhé zóny 210 °C a teplota třetí zóny 250 °C. Tento teplotní profil se může použít například u pájení přetavením při použití pájecí pasty SAC, která se běžně využívá jako pájecí pasta v SMT.



**Obrázek 3.6:** Naměřený teplotní profil použitý pro proces pájení přetavením.

Tento teplotní profil jsem naměřil pomocí termočlánků, kdy jsem na testovací DPS připájel termočlánky. Tuto DPS jsem následně nechal projet pecí, čímž jsem změřil teplotní profil.



**Obrázek 3.7:** Měření teplotního profilu pomocí termočlánků.

Mírnou modifikací vzorce 3.1 jsem dostal následující vzorec, pomocí kterého jsem byl schopen určit i relativní propustnost par součástíku během pájecího procesu.

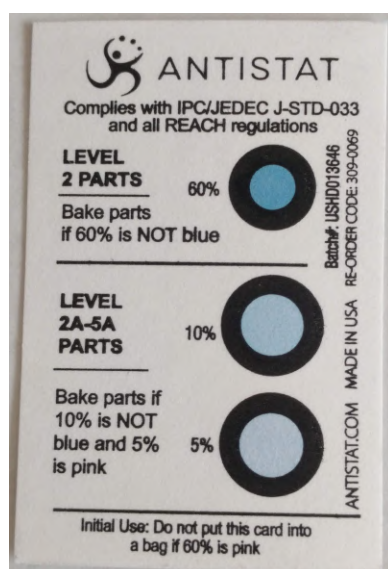
$$\Delta m_{prop} = \frac{m_p - m_v}{m_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$



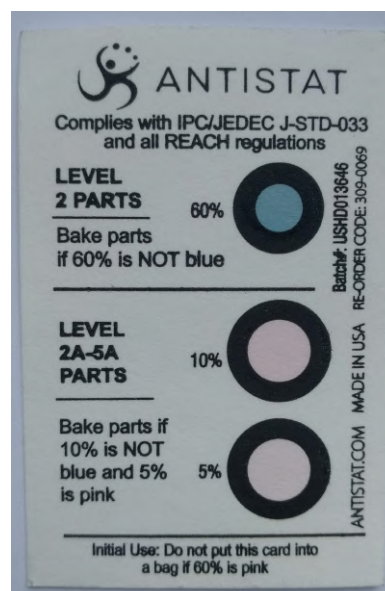
### 3. Studie vlivu vlhkosti

Značení	Hmotnost suché součástky $m_0$ [g]	Hmotnost součástky po prvním vystavení vlhkosti $m_{v1}$ [g]	Hmotnost součástky po prvním průchodu pecí $m_{p1}$ [g]	Relativní přírůstek $\Delta m_{rel1}$ [%]	Relativní propustnost par $\Delta m_{prop1}$ [%]
Exikátor, 13 dní, cca 100 %RH, 23 °C					
1e	0,2934	0,2934	0,2934	0,000	0,000
2e	0,3065	0,3067	0,3067	0,065	0,000
3e	1,3587	1,3737	1,3614	1,104	-0,903
Místnost, 13 dní, cca 30 %RH, 23 °C					
1m	0,2926	0,2926	0,2926	0,000	0,000
2m	0,3070	0,3071	0,3070	0,033	-0,033
3m	1,3562	1,3593	1,3568	0,229	-0,184
Exikátor, 7 dní, cca 100 %RH, 23 °C					
4e	15,6656	15,6744	15,6656	0,056	-0,056
5e	3,2568	3,2586	3,2568	0,055	-0,055
6e	9,4848	9,4911	9,4848	0,066	-0,066
7e	2,6014	2,6048	2,6014	0,131	-0,131
8e	0,9277	0,9306	0,9277	0,313	-0,313
9e	13,5057	13,5186	13,5057	0,096	-0,096
10e	1,4363	1,4376	1,4363	0,091	-0,091
11e	3,0323	3,0379	3,0323	0,185	-0,185
Místnost, 7 dní, cca 30 %RH, 23 °C					
4m	15,7378	15,7398	15,7378	0,013	-0,013
5m	3,2602	3,2607	3,2602	0,015	-0,015
6m	9,4884	9,4919	9,4884	0,037	-0,037
7m	2,6101	2,6112	2,6101	0,042	-0,042
8m	0,9222	0,9231	0,9222	0,098	-0,098
9m	13,4878	13,4913	13,4878	0,026	-0,026
10m	1,4341	1,4347	1,4341	0,042	-0,042
11m	3,0391	3,0409	3,0391	0,059	-0,059

**Tabulka 3.5:** Tabulka naměřených hodnot po prvním vystavení vlhkosti a projetí pecí.



**(a)** : Odstín terčků HIC po otevření dry-packu.



**(b)** : Odstín terčků HIC po měsíci v místnosti.

**Obrázek 3.8:** Porovnání změny odstínu jednotlivých citlivostních terčků HIC.

Značení	Hmotnost suché součástky $m_0$ [g]	Hmotnost součástky po druhém vystavení vlhkosti $m_{v2}$ [g]	Hmotnost součástky po druhém průchodu pecí $m_{p2}$ [g]	Relativní přírůstek $\Delta m_{rel2}$ [%]	Relativní propustnost par $\Delta m_{prop2}$ [%]
Exikátor, 7 dní, cca 100 %RH, 23 °C					
1e	0,2934	0,2937	0,2934	0,102	-0,102
2e	0,3065	0,3067	0,3066	0,065	-0,033
3e	1,3587	1,3759	1,3614	1,266	-1,065
Místnost, 7 dní, cca 30 %RH, 23 °C					
1m	0,2926	0,2928	0,2927	0,068	-0,034
2m	0,3070	0,3073	0,3073	0,098	0,000
3m	1,3562	1,3602	1,3574	0,295	-0,206
Exikátor, 7 dní, cca 100 %RH, 23 °C					
4e	15,6656	15,6769	15,6665	0,072	-0,066
5e	3,2568	3,2593	3,2572	0,077	-0,064
6e	9,4848	9,4918	9,4850	0,074	-0,072
7e	2,6014	2,6047	2,6014	0,127	-0,127
8e	0,9277	0,9311	0,9280	0,366	-0,334
9e	13,5057	13,5216	13,5082	0,118	-0,099
10e	1,4363	1,4373	1,4363	0,070	-0,070
11e	3,0323	3,0379	3,0324	0,185	-0,181
Místnost, 7 dní, cca 30 %RH, 23 °C					
4m	15,7378	15,7395	15,7373	0,011	-0,014
5m	3,2602	3,2610	3,2605	0,025	-0,015
6m	9,4884	9,4902	9,4877	0,019	-0,026
7m	2,6101	2,6109	2,6099	0,031	-0,038
8m	0,9222	0,9227	0,9221	0,054	-0,065
9m	13,4878	13,4916	13,4878	0,028	-0,028
10m	1,4341	1,4341	1,4341	0,000	0,000
11m	3,0391	3,0403	3,0387	0,039	-0,053

**Tabulka 3.6:** Tabulka naměřených hodnot po druhém vystavení vlhkosti a projetí pecí.

### 3.3 Zhodnocení výsledků

V tabulkách 3.5 a 3.6 jsem kromě naměřených hodnot dopočítal i relativní přírůstek hmotnosti  $\Delta m_{rel}$  a relativní propustnost par  $\Delta m_{prop}$ . Jelikož pouze koupené součástky mi byly dodané v dry-packu, budu se nejdříve věnovat výsledkům zjištěným u koupených součástek.

Koupené součástky zastupovaly MSL úroveň 2 (floor life 365 dní), 3 (floor life 7 dní) a 4 (floor life 3 dny).

Podíváme-li se do tabulky 3.5 vidíme, že součástky značené 1e, resp .1m (úroveň MSL 2) po 13 dnech v exikátoru nenasály žádnou vlhkost, stejně tak i pouzdra součástek v místnosti neabsorbovaly žádnou vlhkost. S tím i souvisí, že po následném projetí pecí pouzdra žádnou vlhkost nepropustily, jelikož žádnou nenasály.

Po dalším vystavení těchto součástek vlhkosti po dobu 7 dní vidíme v tabulce 3.6, že jak součástky v exikátoru, tak i v místnosti již nasály určité množství vlhkosti. Podle předpokladu součástky ve vlhčejším prostředí, tedy exikátoru, absorbovaly větší množství vlhkosti. Po průchodu těchto součástek

pecí je z tabulky patrné, že pouzdra součástek z exikátoru byly během doby pájecího procesu schopné propustit veškerou nasáklou vlhkost, kdežto pouzdra součástek v místnosti propustily menší množství vlhkosti a určité množství vlhkosti si nadále držely v sobě.

Podobně se chovaly i součástky značené 2e resp. 2m (úroveň MSL 3), jen s tím rozdílem, že již během prvního vystavení vlhkosti došlo u obou vzorků součástek k absorbování určitého množství vlhkosti.

Největší rozdíly jsou pozorovatelné na součástkách značené 3e resp. 3m úrovně MSL 4. Jedná se o nejcitlivější součástky, z mnou zkoumaných součástek. U těchto součástek se již nejvíce projevuje rozdíl v absorpci vlhkosti mezi součástkami v místnosti a v exikátoru. Po 13 dnech relativní přírůstek těchto součástek v exikátoru činí již zhruba 1,1 %, kdežto přírůstek součástek v místnosti činí pouze zhruba 0,23 %. Při vystavení součástek vysokým teplotám během projetí pecí mají jejich pouzdra propustnost 0,9 % resp 0,18%. Pouzdra těchto součástek jsou schopna propustit většinu absorbované vlhkosti.

V kapitole 2.6.7 jsou vyjmenovány mechanické vady související s rychlou expanzí vodních par absorbovaných v pouzdru součástky během pájecího procesu. Konkrétně se jedná o vady jako je popcorn effect, delaminace nebo prasknutí. Nejvíce náchylné na tyto vady jsou mnou zkoumané součástky MSL 4. Tyto součástky jsou nejcitlivější na vlhkost z mých zkušebních vzorků. A toto tvrzení podporují i moje naměřené hodnoty, kdy dané součástky již po prvním vystavení vlhkosti absorbují největší relativní množství vlhkosti, kterou se následně během pájecího procesu snaží propustit, což jejich pouzdra nemusí vydržet. V tabulce 3.6 pak je patrné, že po dalším vystavení vlhkosti tyto součástky absorbovaly ještě větší množství vlhkosti.

Součástky dodané firmou jsem zvažil hned jak se mi dostaly do rukou. Jelikož ovšem hmotnost součástek po prvním projetí pecí, byla menší než hmotnost, jenž jsem zvažil první den měření, rozhodl jsem se jako hmotnost suché součástky brát hmotnost po prvním projetí pecí, což pro můj experiment dostačovalo. Ovšem z toho důvodu jsou relativní přírůstky a relativní propustnosti par v tabulce 3.5 shodné.

Tyto součástky byly reprezentovány převážně procesory a paměťmi MSL úrovně 3. Dále zde byly dvě pasivní součástky reprezentující úroveň MSL 1.

Podíváme-li se do tabulky 3.6 můžeme pozorovat, že hmotnostní přírůstky se pohybují v rozmezí setin až desetin procenta, což je srovnatelné s koupenými součástkami MSL úrovně 3. Dále pozoruji, že součástky během simulace procesu pájení přetavením byly schopné propustit téměř veškerou absorbovanou vlhkost.

Zároveň jsem potvrdil předpoklad, že záleží i na podmínkách prostředí, ve



kterém jsou součástky skladovány. Jelikož u všech vzorků v exikátoru jsou patrné vyšší hmotnostní přírůstky než u součástek v místnosti, s čímž je spojeno následné vyšší riziko poškození součástek během pájecího procesu.



## Kapitola 4

### Ekonomická analýza opravy a výměny součástky

#### 4.1 Problematika

Elektronika vyrobená technologií povrchové montáže se uplatňuje ve všech možných odvětvích průmyslu a různých aplikacích. Ať už se jedná o jednoduché aplikace jako je například zábavní průmysl a výroba dětských hraček, přes výpočetní techniku, automobil, až po letecký průmysl popřípadě vojenství, vždy existuje snaha výrobce zamezit výrobě zmetku tak, aby došlo k redukci následných poruch zapříčiněných tímto vyrobeným zmetkem.

V závislosti na určení výrobku dochází proto k různým kontrolám. Kontrola samozřejmě znamená dodatečné náklady pro výrobce, který musí zařízení následně prodat za vyšší částku, aby pro něj daná výroba měla ekonomický smysl. Zároveň platí, že čím náročnější aplikace, tím přísnější průběžné a výstupní kontroly jsou, stejně tak i nutnost dodržovat přesné výrobní technologické procesy.

Konkrétně v automobilu si již žádný výrobce nedovolí, aby došlo například k osazení DPS nevyzkoušenými a neprovořenými součástkami, popřípadě aby se něco zkusilo tzv. naslepo. Právě naopak, v automotive existují přesné výrobní technologické postupy, které je nutno dodržovat a jejich dodržování se neustále kontroluje.

#### 4.2 Konkrétní problém

V ekonomické části bakalářské práce budu řešit, zdali se vyplatí firmě opravovat jednu součástku, u níž došlo k chybnému osazení, nebo zda-li bude výhodnější risknout průchod zmetku a projevení závady až za nějakou dobu, ovšem s tím, že náklady na následnou opravu již budou mnohem vyšší, než kdyby došlo k opravě chybně osazené součástky již během procesu výroby.

V mém konkrétním případě se jedná o problém konkrétní společnosti, jenž si nepřála být jmenována a s reálnými údaji, kdy při osazování součástek na

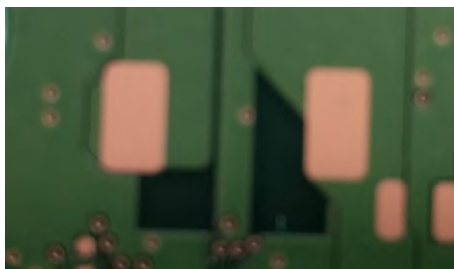
DPS dojde k mírně nepřesnému osazení jedné součástky, konkrétně cívky, což spolu s několika dalšími faktory může časem vést ke zkratu a vzniku závady na celém zařízení.

#### 4.2.1 Vlivy přispívající k závadě

Samotný problém spočívá v tom, že na osazení je použita cívka, jenž má široké vývody a mezi pady, na které má být cívka osazena, leží prokov. Vlivem nepřesného osazení cívky, roztékavosti pájky a následné oxidace, může časem dojít ke spojení vývodů cívky a prokovu a tím dojde ke zkratu a následnému poškození celého zařízení.



Obrázek 4.1: Spodní pohled na „problematickou“cívku



Obrázek 4.2: Výřez neosazené DPS s „problematickými“pady.

Na obrázku 4.1 vidíme pohled na spodní stranu cívky, tedy na stranu s vývody, které se osazují na pady zobrazené na výřezu dané DPS na obrázku 4.2. Jak je patrné z obou obrázků, díky tloušťce vývodů cívky a téměř žádnému prostoru mezi pady a prokovem stačí i menší odchylka osazení a může dojít k závadě.

#### 4.2.2 Výroba a následná kontrola

Ve společnosti dojde během jednoho roku k osazení 1 000 000 DPS, kdy náklady na jednu vyrobenou DPS jsou 1 000 Kč/kus a cena použité cívky je 1 Kč/kus.

Osazená a následně zapájená DPS prochází automatickou optickou kontrolou. Náklady na pořízení tohoto zařízení se pohybují okolo 2 000 000 Kč. Pravděpodobnost posunu součástky při osazování je 30 %, z těchto 30 % automatická optická kontrola vyhodnotí 10 % jako rizikových. Tedy máme celkem 3 % rizikových osazených DPS, u kterých může dojít ke vzniku závady.



**Obrázek 4.3:** Pohled na vychýlenou cívku, vyhodnocenou automatickou optickou kontrolou jako riziková.

## 4.3 Problematika rozhodování

V rámci ekonomie, existují vždy alespoň dvě řešení jak s danou situací naložit. V tomto konkrétním případě ovšem existují tři možnosti, jak by se mohl výrobce zachovat.

### 4.3.1 Rizikové součástky jako součást výrobku

Tato možnost, pokud by si ji výrobce vybral, je možností nejjednodušší a spočívá v tom, že by výrobce nedělal nic a i osazené desky vyhodnocené jako rizikové by dal do oběhu.

Během výroby by výrobce neměl žádné dodatečné náklady spojené s opravou rizikových DPS. Zároveň by na sebe vzal riziko, že během provozu zařízení by mohlo dojít k jeho závadě během záruční doby a náklady spojené s opravou by šly za výrobcem.

V daném případě existuje šance 3ppm, že se projeví závada. Následné náklady za opravu se pohybují v řádech desetitisíců. Navíc je nutné počítat i s následnou diagnostikou vadného zařízení a zjišťování příčin, proč k závadě vzniklo. Náklady spojené s opravou a diagnostikou tedy jsou 50 000 Kč za opravu a 150 000 Kč za následnou diagnostiku poškozené části, celkem 200 000 Kč.

Jednoduchým výpočtem, kdy pronásobím pravděpodobnost vzniku závady a počet zařízení, u kterých dojde během provozu k závadě.

$$n = \frac{3}{1000000} \cdot 1000000 = 3 \text{ kusy}$$

Jak již bylo řečeno výše, v tomto případě jsou náklady spojené pouze s následným servisem a diagnostikou.

$$C_a = 3 \cdot (50000 + 150000) = 600000 \text{ Kč.}$$

Celkové náklady možnosti „*Použití rizikových součástek jako součást výroby*“ jsou  **$C_a=600\ 000\ \text{Kč}$** .

Ovšem v tomto případě, existují i další náklady nepřímo spojené se vzniklou závadou. Jedná se především o škodu na pověsti společnosti, kdy by pověst výrobce „zmetků“ mohla zhoršit budoucí postavení výrobce na trhu nebo o náklady spojené s hromadným svoláváním aut, v nichž byla použita DPS od daného výrobce a následná kontrola, zda daná auta nejsou osazena zmetky v rámci zabránění dalších závad a tím i nehod, pokud by se například jednalo o závadu ovlivňující řízení vozidla.

Za předpokladu, že následná kontrola, při hromadném svolávání automobilů, by stála cca 200 Kč za jedno vozidlo, jelikož výrobce má s autorizovanými servisny nasmlouvané velmi nízké ceny za kontroly svolaných vozidel (cca 35% cena), následné náklady spojené s hromadným svoláváním a kontrolou by výrobce přišly na 200 milionů korun, svolal-li by všech 1 000 000 vozidel, ve kterých byla za daný rok DPS s vadně osazenou součástí použita.

Pověst výrobce, ačkoliv nejde určit její hodnotu, je další důležitý prvek, jenž ovlivňuje výši zisků společnosti. Zákazníci si v rámci důrazu na kvalitu, raději vybírají osvědčené společnosti, než společnosti s pochybnou pověstí. Špatná pověst může vést k obtížnějšímu získávání budoucích kontraktů a ke snížení budoucích zisků.

### ■ 4.3.2 Vyhození zmetku

I tato možnost je jednoduchá a spočívá pouze v tom, že dané 3 % rizikových DPS výrobce vyhodí. Tato možnost již předchází poškození pověsti, popřípadě následnému vzniku závady a její opravě.

$$C_b = 1000000 \cdot 0,03 \cdot 1000 = 30000000 \text{ Kč.}$$

Opět jednoduchým pronásobením počtu vyrobených DPS procentem rizikových DPS a náklady na DPS dostanu celkové náklady možnosti „*Vyhodit zmetek*“  **$C_b=30\ 000\ 000\ \text{Kč}$** .

V případě, že by výrobce měl nasmlouvanou dodávku 1 000 000 kusů DPS za rok pro svého zákazníka, musel by dodatečně řešit výrobu zbylých kusů, což by sebou přineslo další náklady. V mém případě se budu zabývat ale pouze náklady spojenými s „opravou“ oněch rizikových 3 %.

### ■ 4.3.3 Oprava součástky

Nejsložitější možnost, která spočívá v tom, že rizikové DPS se výrobce rozhodne opravit. S opravou budou spojeny dodatečné náklady, především se bude jednat o mzdu technika, jenž bude opravu provádět a o náklady spojené s pořízením zařízení a pomůcek potřebných pro opravu. Dále samotná oprava bude vyžadovat určitou energii na její provedení, tedy oprava DPS se mírně promítne do zvýšení spotřeby elektrické energie.

Opravu bude provádět technik, jehož hodinová mzda je 200 Kč. Technik provede odpájení vychýlené cívky a následně připájí novou cívku. Po tomto úkonu provede kontrolu, zda je vychýlení cívky tentokrát v mezích. Technikovi oprava trvá 5 minut a dalších 5 minut následná kontrola, tedy celková doba opravy s kontrolou zabere technikovi 10 minut. Navíc existuje 5% šance, že dojde k poškození celé DPS během opravy a technik je nucen ji vyhodit.

Pro kontrolu technik potřebuje mikroskop, jehož pořizovací výdaje se pohybují okolo 8 000 Kč. Dále technik bude potřebovat speciální zařízení a pomůcky na provedení opravy. Pořizovací výdaje na toto zařízení jsou 110 000 Kč. Jedná se o kompletní rework systém pro opravy SMD, konkrétně se jedná o horkovzdušnou opravárenskou stanici se spodním přehřevem, stojan, držák, optickou sadu a vakuovou pipetu.

Doba životnosti obou potřebných zařízení je 5 let. Obě zařízení bude firma rovnoměrně odepisovat po dobu životnosti, tedy odpisy činí 23 600 Kč.

U 5% opravovaných DPS dojde během opravy k poškození a tyto desky se budou muset vyhodit. Jedná se o 1500 desek, kde náklady spojené s vyhozením těchto desek činí 1 500 000 Kč.

$$n_{riziko} = 1000000 \cdot 0,03 = 30000 \text{ kusů}$$

Další náklady spojené s opravou jsou náklady za nové cívky, kdy nová cívka stojí 1 Kč. V rámci zjednodušení uvažují, že počet nových cívek = počtu rizikových DPS. Předpokládám tedy, že k poškození DPS během opravy dojde během pájení nové cívky. Náklady spojené pořízením nových cívek, jenž nahradí vychýlené cívky jsou 30 000 Kč.

Celkový počet rizikových kusů, určených k opravě během jednoho roku jsem výpočtem určil jako 30 000 kusů. Doba opravy těchto rizikových DPS, resp špatně osazené součástky na těchto DPS bude trvat tedy 5 000 hodin. Mzdové náklady spojené s opravou budou činit 1 000 000 Kč plus náklady na zdravotní a sociální pojištění zaměstnance.

$$C_c = 1000000 + 1500000 + 23600 + 30000 = 2553600 \text{ Kč.}$$

Sečtením všech dílčích nákladů dostaneme náklady celkové pro možnost „Oprava“  $C_c = 2\,553\,600$  Kč.

#### 4.3.4 Shrnutí

Varianta	Celkové náklady TC [Kč]
a) Použití rizikových součástek	600 000
b) Vyhození zmetku	30 000 000
c) Oprava	2 553 600

**Tabulka 4.1:** Tabulka celkových přímých ročních nákladů jednotlivých variant.

Jak je patrné z tabulky 4.1, suveréně nejdražší varianta je druhá možnost, kde výrobce vyhodí všechny vyrobené zmetky, bez snahy je opravit nebo bez jejich dodání a podstoupení rizika vzniku závady.

U třetí varianty, tedy opravy, kdy výrobce provede opravu rizikových DPS, přinese výrobcí dodatečné náklady na opravu ve výši zhruba 2,5 milionu Kč. Ovšem v tomto případě bude mít výrobce „čistou“ hlavu a nebude muset řešit poškození pověsti, popřípadě dodatečnou výrobu chybějících DPS.

První možnost, kdy by se výrobce rozhodl použít rizikové součástky pro další výrobu a problém zcela ignoroval by výrobcí přinesl dodatečné roční náklady ve výši 600 000 Kč. To jsou náklady přímo spojené s daným rizikem a závadou a jak již bylo řečeno v kapitole 4.3.1, s touto konkrétní možností existuje obrovské množství dalších nepřímo spojených nákladů, které daleko převyšují náklady přímé.

Po uvážení všech výše zmíněných aspektů, by se homo economicus měl rozhodnout pro možnost, kdy provede opravu a to i přesto, že se oprava může na první pohled jevit až jako druhá nejlepší volba. V rámci rozhodování, by ovšem měly být brány v potaz všechny důležité okolnosti, v našem případě i náklady nepřímo spojené s výrobou zmetků. Vezmeme-li v potaz i tyto nepřímé náklady, zjistíme, že první možnost, tedy použití rizikových součástek, která se jeví jako nejméně nákladná, ovšem s největším riskem, může být v konečné fázi mnohonásobně nákladnější než možnosti, kdy se rozhodneme, buď všechny rizikové desky vyhodit, nebo opravit.



## Kapitola 5

### Závěr

Problematika povrchové montáže je velmi komplexní a široká oblast, ve které se prolíná několik oborů. Se stále zdokonalující se technologií se zvyšuje jak ekonomičnost výroby, tak i výsledná kvalita. Pokrok v oblasti materiálů s sebou přináší nové možnosti při řešení pouzder součástek, ale i zmenšení samotných součástek. Stejně tak dochází i ke snížení vad způsobených vlhkostí, ať už pomocí správného zacházení s MSD součástkami, tak i díky lepším vlastnostem použitých materiálů.

Během mého experimentu jsem v první řadě ověřil, že záleží na podmínkách, v jakých jsou součástky skladovány, ať už se jedná o součástky úrovně MSL 1 nebo 4. U všech zkoumaných vzorků totiž došlo k většímu relativnímu přírůstku (absorbci vlhkosti) právě u poloviny součástek, jež byla vystavena zvýšené vlhkosti v exikátoru. Konkrétně došlo u těchto součástek k třem až sedminásobné vyšší absorpci vlhkosti.

V podobných hodnotách jako součástky MSL 3 se pohybovaly i součástky MSL 1 a 2. Tyto součástky by měly mít neomezený floor-life za běžných podmínek, respektive 365 dní. Pasivní součástky cívka a kondenzátor (MSL 1), by za dodržení podmínek  $\leq 30\text{ °C}/85\% \text{ RH}$  měly mít neomezenou životnost na dílně. U součástky značené jako m10 (kondenzátor) můžeme v tabulce 3.6 pozorovat, že během 7 dní vystavení podmínkám v místnosti nedošlo k absorpci žádné vzdušné vlhkosti touto součástkou. Cívka absorbovala určité množství vlhkosti, ale z příslušných tabulek je patrné, že pouzdro této součástky je schopné propustit veškerou absorbovanou vlhkost během procesu pájení. Tedy tyto součástky a jejich pouzdra sice absorbují nějakou vlhkost, ale na rozdíl od ostatních tříd jsou ji schopny během rychlého ohřátí v souvislosti s pájecím procesem všechnu propustit ven ze svého pouzdra.

Relativní přírůstky hmotnosti všech součástek MSL úrovně 3 vystavené podmínkám v místnosti se pohybovaly v řádech setin procenta, což je o řád méně než se pohybovaly relativní přírůstky LEDEK, tedy součástek MSL 4. U těchto součástek se i v místnosti pohybovaly relativní přírůstky v řádu desetin procenta a při vystavení vyšší vlhkosti v exikátoru dokonce v jednotkách procent. Zároveň pozorují, že na rozdíl od součástek do úrovně MSL 3 klesá i

propustnost vodních par ven z pouzdra během ohřátí těchto součástek při procesu pájení.

Ze všech výše zmíněných bodů je tedy jasně patrné, že s vyšší třídou MSL jsou součástky více náchylné na absorbovanou vlhkost a zároveň se snižuje jejich schopnost propustit vodní páry ven ze svých pouzder během pájecího procesu, což může vést k následným vznikům vad, jako je například delaminace nebo popcorn effect.

Ač by se mohlo zdát, že s rostoucí třídou MSL roste i cena součástek, ne nutně tomu tak musí být. Ačkoliv je jasné, že pasivní součástky jsou levnější než procesory, tak zároveň i LEDky jsou levnější než procesory. Z výpisu použitých součástek na můj experiment je jasně patrné, že LEDky mají vyšší MSL než měřené procesory. Tedy třída MSL souvisí spíš se součástkou samotnou a její aplikací, kdy se výrobce součástek snaží zamezit vzniku závady na výrobku, do kterého dodává součástky, vhodným značením MSL součástky tak, aby se součástkami bylo vhodně manipulováno a předcházelo se vzniku závad spojenými s vlhkostí a zároveň se tak zvyšovala efektivnost výroby.

Se zvyšováním efektivnosti mírně souvisí i moje ekonomická část bakalářské práce. Konkrétně řeším problém, jak by se měl ekonomicky rozhodnou výrobce, zjistil-li by, že u jistého procenta vyrobených zařízení existuje riziko budoucího vzniku závady na celém zařízení, je-li toto riziko zapříčiněno vychýlením pasivní součástky na DPS.

V tomto případě má výrobce tři možnosti jak se zachovat. Pro každou možnost jsem určil přímé dodatečné náklady, které souvisí s danou možností. Tyto přímé roční náklady jsou zobrazeny v tabulce 4.1.

Dle této tabulky by již manažer firmy mohl provést rozhodnutí, jakou možnost zvolit. Každopádně toto rozhodnutí, pouze na základě této tabulky přímých nákladů by s největší pravděpodobností bylo špatné a vedlo by k mnohonásobně vyšším dodatečným nákladům spojeným s touto závadou než obě další možnosti.

Při správném ekonomickém rozhodování se nemůžeme řídit pouze náklady přímými, ale musíme vzít v potaz všechny související věci a tím pádem i náklady nepřímé spojené s danou věcí. Nepřímé náklady totiž mohou kolikrát mnohonásobně převýšit náklady přímé, což je i náš případ viz. kapitola 4.3.1.

Toto tvrzení lze zobecnit, kdy nejen v rámci ekonomického rozhodování, ale i jiných případech rozhodování musíme brát v potaz jak přímé věci, tak i věci nepřímé spojené s daným rozhodnutím. Ačkoliv ne vše se dá vyjádřit v penězích, i v běžných záležitostech se člověk rozhoduje podle toho, co pro něj má vyšší „cenu“. V teorii ekonomie se toto nazývá opportunity cost, neboli cena ztracené příležitosti.

## Příloha A

### Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Význam
MSD	Moisture sensitive device - součástka citlivá na vlhkost
MSL	Moisture sensitive level - úroveň citlivosti na vlhkost
SMT	Surface mount technology - technologie povrchové montáže
SMD	Surface mount device - součástka pro povrchovou montáž
DPS	Deska plošného spoje
THT	Through-hole technology - technologie osazování součástkami s drátovými vývody
RH	Relativní vlhkost
MBB	Moisture barrier bag - sáček s ochrannou vrstvou proti vlhkosti
MET	Manufacturer's exposure time - doba povolená pro distributora pro otevření dry packu a přebalení součástek
WVTR	Water vapour transmission rate - míra propusnosti vlhkosti
U	Množství vysoušedla nutného pro vložení do MBB v rámci dry packu [UNIT]
M	Doba skladovatelnosti [měsíc]
A	Exponovaná plocha [dm <sup>2</sup> ]
D	Množství absorbované vody na množství vysoušedla [g/UNIT]
HIC	Humidity indicator card - indikační karta vlhkosti
$\Delta m_{rel}$	Relativní přírůstek hmotnosti
$\Delta m_{prop}$	Relativní propustnost vodních par
n	Počet kusů
C	Celkové přímé náklady



## Příloha B

### Literatura

- [1] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 1.vyd., Praha, 2001, ISBN 80-01-02392-3.
- [2] N.-C. Lee, *Reflow soldering processes and troubleshooting*. Newnes, 1st edition, Boston, 2001, ISBN-13: 978-0750672184.
- [3] P. Mach, “Pájení.” [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76879/mod\\_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76879/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf), 2017, dostupné 21.4.2019.
- [4] P. Veselý, “Risk analýza pájení čipů,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2015.
- [5] O. Renza, “Teplotní profil, růst intermetalických vrstev,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2018.
- [6] ABETEC, “Jak vyhovět požadavkům norem pro součástky citlivé na vlhkost prostředí elektronické výroby,” *ABE.TEC s.r.o.*, vol. 1, 2017.
- [7] JEDEC, “J-std-033d - handling, packing, shipping and use of moisture, reflow, and process sensitive devices,” Bannockburn, Illinois, 2014, dostupné 28.4.2019.
- [8] T. Pospíšil, “Navlhavost materiálů a součástek a rychlost vysoušení,” *Bakalářská práce, VUT v Brně*, Brno 2016.
- [9] J. Kulhavý, “Studie růstu dendritů na deskách plošných spojů,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2017.
- [10] A. Mitra, “Challenges with msd components and its future.” [https://www.smta.org/chapters/files/SMTA\\_India\\_Chapter\\_SMTA\\_Moisture\\_Sensitive\\_Device\\_Control\\_Training\\_Package\\_October\\_2013.pdf](https://www.smta.org/chapters/files/SMTA_India_Chapter_SMTA_Moisture_Sensitive_Device_Control_Training_Package_October_2013.pdf), 2013, dostupné 17.12.2018.
- [11] O. Novák, “Pájené spoje, růst dendritů,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2016.

- [12] M. Toledo, "Mtag specs." [https://www.marshallscientific.com/v/vspfiles/specs/MTAG\\_specs.pdf](https://www.marshallscientific.com/v/vspfiles/specs/MTAG_specs.pdf), 2000, dostupné 23.4.2019.
- [13] GREISINGER, "Katalog greisinger 2018 - 2019." <https://greisinger.cz/GHM-GREISINGER-GFTB-200-Presny-teplomer--vlhkomer--barometr>, 2018, dostupné 2.5.2019.