

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Zkoušky spolehlivosti pájených spojů

Reliability Tests of Solder Joints

Bakalářská práce

Jan Kopáček

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kopáček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466237**
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:

Zkoušky spolehlivosti pájených spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Reliability Tests of Solder Joints

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na tématiku pájení přetavením se zaměřením na technologie, pájecí slitiny.
2. Seznamte se se zrychlenými testy životnosti a metodami určování kvality pájených spojů.
3. Pro soubor vzorků spojů pájených s různým nastavením pájecí pece proveďte zrychlené testy životnosti, měření elektrického odporu a zkoušku stříhem. Analyzujte růst intermetalických sloučenin.
4. Vyhodnoťte výsledky experimentů a optimální nastavení pece.
5. Ekonomicky zhodnoťte testování spolehlivosti pomocí zrychlených zkoušek ze strany výrobce elektronických zařízení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PIETRIKOVÁ, Alena, ĎURIŠIN, Juraj a MACH, Pavel. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vyd. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] PUTTLITZ, K. J., STALTER, K. A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. CRC Press, 2004. ISBN 978-0824748708

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Petr Veselý
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Zkoušky spolehlivosti pájených spojů vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Veselého 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

.....

Jan Kopáček

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Veselému za velmi cenné a profesionální rady, odborné vedení a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michaelle Makešové za odbornou pomoc na ekonomické části této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce je rozdělena na část technickou a část ekonomickou. Technická část se ještě dělí na teoretickou a praktickou. Teoretická část se zabývá pájeným spojem. Jsou zde uvedeny požadavky na pájené spoje a popsány různé technologie výroby pájených spojů. Dále se bakalářská práce zabývá zrychlenými testy životnosti pájených spojů a metodami určování kvality pájených spojů.

V praktické části se vyráběly vzorky pro testování s různými nastaveními pájecí pece, měřily se elektrické a mechanické parametry pro různé doby stárnutí a pomocí teplotně-vlhkostní a šokové komory se zrychlil proces stárnutí.

V ekonomické části práce se řeší, jestli se vyplatí či nevyplatí zřízení testovacího a měřícího střediska pro dlouhodobé testování, které by snížilo chybovost výrobního procesu.

Klíčová slova

Pájení přetavením, pájený spoj, pájecí pasta, pájecí metody, teplotní profily, spolehlivost pájených spojů, testování kvality pájených spojů, zrychlené procesy stárnutí

Abstract

The bachelor thesis is divided into the technical part and the economic part. The technical part is further divided into theoretical and practical part. The theoretical part deals with the soldered joints. In this section there are listed requirements of soldered joints and described different technologies of production of soldered joints. The bachelor thesis also deals with accelerated tests of soldered joints lifetime and researches methods of determining quality of soldered joints.

In the practical part the samples are producing for the purpose of testing with various settings of soldering furnace. There are also measured electrical and mechanical soldered joints parameters for different periods of ageing and the process of ageing is accelerated with using the temperature humidity chamber and shock chamber.

The economic part addresses if it is worth to establish the testing and measuring centre for long-term testing, which would theoretically lower the error rate of the production process.

Key words

Reflow soldering, soldered joint, solder paste, soldering methods, temperature profiles, solder joint reliability, solder joint quality testing, accelerated aging processes

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Pájené spoje	11
2.1. Požadavky na pájené spoje	11
2.2. Životnost pájeného spoje	11
2.3 Intermetalická vrstva	12
2.4. Smáčení a povrchové napětí	12
2.4.1 Smáčení	12
2.4.2 Nesmáčení	12
2.4.3 Odsmačení	13
2.4.4 Smáčecí úhel	13
2.5. Pájecí tavidla.....	13
2.6. Pájecí slitiny	14
2.7. Pájecí pasty	15
2.7.1 Možnosti nanášení pájecích past	16
3. Pájecí metody.....	17
3.1. Ruční pájení.....	17
3.2. Pájení tekutou pájkou – hromadné pájení.....	17
3.2.1. Pájení vlnou.....	18
3.2.2. Pájení vlečením	18
3.2.3. Pájení ponorem.....	18
3.3. Pájení přetavením – hromadné pájení	18
3.3.1 Ohřev infračerveným zářičem	19
3.3.2 Ohřev laserem	19
3.3.3 Ohřev horkým plynem	19
3.3.4 Ohřev kondenzací par.....	20
3.4 Teplotní profil.....	20
3.4.1 Heating factor - Q_{η}	22
4. Testy pájených spojů.....	24
4.1. Normy pro zkoušky pájených spojů	24
4.1.1 České normy.....	24
4.1.2 Mezinárodní normy	25
4.2 Mechanické namáhání a mechanické zkoušky pájených spojů.....	25
4.2.1 Zkouška stříhem	26

4.2.2	Zkouška tahem	27
4.3	Elektrické zkoušky pájených spojů	28
4.3.1	Měření elektrického odporu	28
4.4	Zrychlený proces stárnutí	29
4.4.1	Tepelné cyklování	29
4.4.2	Skladování při zvýšené teplotě.....	30
4.4.3	Zrychlená testování vlhkým teplem	31
4.4.4	Vibrační zkoušky.....	31
5	Praktická část	32
5.1	Úvod do praktické části	32
5.2	Pájecí pasta a osazení součástek	32
5.3	Přetavení v horkovzdušné peci	33
5.4	Měření odporů pomocí čtyřbodové metody	34
5.5	Měření maximální síly pro destrukci pájeného spoje	35
5.6	Konfokální mikroskop	36
5.6.1	Tloušťky intermetalické vrstvy	38
5.7	Zrychlené stárnutí DPS.....	39
5.7.1	Teplotně-vlhkostní komora	39
5.7.2	Šoková komora.....	39
5.8	Výsledky praktické části a diskuze.....	40
5.8.1	Teplotně-vlhkostní komora	40
5.8.2	Šoková komora.....	48
5.8.3	Způsob odtržení.....	54
6	Ekonomická část	56
6.1	NPV – Metoda čisté současné hodnoty (Net present value)	56
6.2	RCF – Roční ekvivalentní peněžní tok.....	57
6.3	IRR – Metoda vnitřního výnosového procenta (Internal rate of return).....	57
6.4	Model.....	58
6.4.1	Tvorba modelu	59
6.4.2	Investiční náklady	59
6.4.3	Provozní náklady.....	59
6.4.4	Výpočet NPV a RCF	63
6.5	Citlivostní analýza	64
6.5.1	Závislost RCF na diskontu	64
6.5.2	Závislost RCF na růstu ceny elektřiny	65

6.5.3	Závislost RCF na růstu mzdy zaměstnance.....	66
6.6	Závěr v ekonomické části	66
7	Závěr	68
8	Použité zdroje.....	70
	Seznam obrázků	75
	Seznam tabulek	76
	Seznam grafů.....	78
	Seznam rovnic	78
	Přílohy	79

1. Úvod

V dnešní době můžeme pájené spoje nalézt téměř všude, od domácích spotřebičů přes automobilový průmysl až k přístrojům, které zachraňují životy. Pájené spoje by měly mít takovou kvalitu, aby vydržely po celou dobu životnosti zařízení, protože mají zásadní vliv na spolehlivost.

Teoretická část se zabývá obecným popisem pájeného spoje a různými možnostmi jeho vzniku, od nanesení pasty až k samotnému přetavení. Poté následuje popis metod pro testování kvality pájených spojů a zrychleného procesu stárnutí. V praktické části je vytvořen experiment, kde se zkoumá ideální nastavení pájecí pece v závislosti na kvalitě pájených spojů.

Hlavním přínosem celé této práce je najít vhodné nastavení pájecí pece v závislosti na kvalitě pájených spojů, protože selhání spoje může způsobit selhání celého zařízení a následnou tragédii v běžném životě.

2. Pájené spoje

Pod definicí pájení si můžeme představit metalurgické spojení dvou kovů. Při tomto procesu se taví pouze přídatný kovový materiál, který nazýváme pájecí slitina. U pájení nedochází k roztavení spojovaných částí jako u procesu svařování. Proto volíme pájecí slitinu tak, aby její teplota tání byla vždy menší než teplota tání spojovaných materiálů [1].

Pájení dělíme na měkké a tvrdé. Měkké pájení, které využíváme v elektronice, dosahuje maximální teploty 500°C. Pokud přesáhneme tuto hodnotu, mluvíme již o pájení tvrdém. V dnešní době se prosazuje bezolovnaté pájení, olovnaté pájení je na ústupu [1].

Bezolovnaté pájky tvoří z většiny cín. Obsah cínu je nad 95 % a zbytek tvoří poměrně drahé kovy. Teplota tání je vyšší než teplota tání olovnatých pájek, pohybujeme se v rozmezí teplot 195 °C až 227 °C. Teplota tání je závislá na složení pájky [2].

2.1. Požadavky na pájené spoje

- Mechanická integrita spoje
 - Vhodné spojení pájené slitiny
 - Dobré mechanické vlastnosti (pevnost a tažnost spoje)
 - Vhodný konstrukční návrh spoje
- Elektrické a tepelné vlastnosti
 - Vhodný elektrický kontakt
 - Co nejmenší přechodový odpor
 - Vhodný tepelný kontakt
- Metalurgická stabilita
 - Reakční pochody v pájeném spoji
- Životnost
 - Odolnost proti oxidaci
 - Odolnost proti korozi [3]

2.2. Životnost pájeného spoje

Pod pojmem životnost pájeného spoje si můžeme představit dobu, po které dojde k opotřebení spoje natolik, že není schopen plnit svoji funkci. U pájených spojů je životnost v řádu desítek let, velký vliv na to má prostředí, kde zařízení pracuje. Určitě jinou životnost bude vykazovat spoj v počítači v porovnání se spoji v těžkých těžebních strojích. Tyto provozní stavy lze simulovat pomocí zrychlených testů, kde se snažíme napodobit reálné prostředí. V těchto testech je urychlena doba stárnutí, dochází ke změnám v pájeném spoji. V těchto

spojích začne difuze a elektrochemický proces koroze. Tyto nežádoucí procesy snižují vodivost pájeného spoje, také oslabují mechanické vlastnosti a tím i životnost. Při elektrochemickém procesu koroze dochází ke změnám vlastností materiálu, dochází ke snížení homogenity a snižování adheze [2] [4].

Celková životnost spoje je velice těžko předem odhadnutelná, protože je mnoho faktorů, které mohou celkovou dobu výrazně ovlivnit. Faktory, které ovlivňují životnost:

- Kvalita výrobního procesu
- Výkonové zatížení
- Mechanické zatížení (vibrace)
- Teplota, vlhkost [4]

2.3 Intermetalická vrstva

V každém pájeném spoji vzniká intermetalická vrstva. Tato vrstva je při tvorbě pájeného spoje velmi důležitá a v žádném z těchto spojů nesmí chybět. Během procesu stárnutí pájeného spoje dochází k růstu této vrstvy. Rychlost růstu vrstvy je ovlivňována teplotou, ve které se spoj nachází. Tato vrstva vzniká tam, kde nastává přechod mezi pájkou a mědí. Při procesu stárnutí tato vrstva roste na úkor pájky. Nastává úbytek pájeného spoje, dochází ke zhoršení elektrických vlastností pájeného spoje a může docházet k vzniku praskliny a následné mechanické deformaci [2].

2.4. Smáčení a povrchové napětí

Abychom dosáhli kvalitního spojení dvou materiálů, nestačí pouze přiložit roztavenou pájku mezi pájený materiál. Musíme počítat s vlastnostmi povrchu, které ovlivňují výsledný spoj [5].

2.4.1 Smáčení

V tomto případě dochází k tomu, že energie, která se nachází na povrchu materiálu, je vyšší než energie roztavené pájky. Vzniká metalurgická vazba a začne růst tenká intermetalická vrstva, která je velmi důležitá pro kvalitní pájený spoj [1].

2.4.2 Nesmáčení

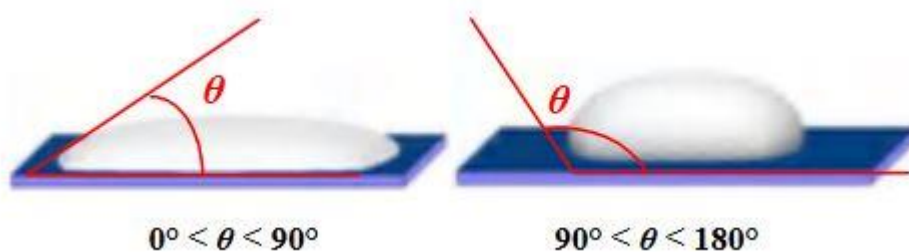
Zde nezačne vznikat vazba mezi pájeným povrchem a pájkou. Nedochází k pokrytí pájky po celé pájené plošce. Existuje několik možných příčin, které spolu velmi blízce souvisí. Jedna z nejčastějších příčin je volba nekvalitního tavidla. To má za důsledek nedostatečné očištění povrchu a tím nedochází k odstranění oxidační vrstvy [1].

2.4.3 Odsmásnění

Při procesu odsmásnění pájka, která smáčela celý pájený povrch, následně ustoupí zpět a zanechá po sobě kopečky pájky. Vzniklé nepravidelné útvary jsou navzájem odděleny tenkou vrstvou pájky. Tento jev může nastat při častém zahřívání pájeného spoje při opravárenské činnosti [1] [4] [6].

2.4.4 Smáčecí úhel

Podle velikosti smáčecího úhlu můžeme říct, jestli je spoj kvalitní či nekvalitní. Také podle velikosti smáčecího úhlu určujeme stupně smáčení. Smáčecí úhel je úhel mezi základním materiálem a tečnou povrchu pájky, značíme ho řeckým písmenem θ [1] [7].



Obrázek 1: Smáčecí úhel θ [7]

Stupně smáčení povrchu podle velikosti smáčecího úhlu:

- $0^\circ < \theta < 20^\circ$ – Výborné až dokonalé smáčení
- $20^\circ < \theta < 40^\circ$ – Dobré až velmi dobré smáčení
- $40^\circ < \theta < 55^\circ$ – Postačující smáčení
- $55^\circ < \theta < 90^\circ$ – Špatné smáčení
- $90^\circ < \theta$ – Nesmáčivost [1]

2.5. Pájecí tavidla

Hlavním úkolem pájecích tavidel je zlepšení smáčitelnosti pájeného povrchu tím, že dojde k odstranění oxidů a jiných nečistot z pájeného místa. U ideálního tavidla dochází k aktivaci až po zahřátí na teplotu aktivace neboli teplotu přehřevu. Za normálních podmínek by mělo být tavidlo nečinné, abychom nemuseli zbytky tavidla po pájení umýt. V dnešní době neumíme vyrobit ideální tavidlo, proto se snažíme o vhodný kompromis mezi těmito vlastnostmi.

Tavidla můžeme rozdělit na několik druhů:

- **Typ R** – Tento druh tavidla vykazuje nejmenší aktivitu. Základem je čistě bílá pryskyřice, která je rozpuštěna ve vhodném ředidle. Nevýhodou je, že ho lze

použit pouze pro velmi dobře pájitelné povrchy např. pro zlato. Hlavní předností je absolutní nečinnost při pokojové teplotě. Z toho plyne, že nemusíme zbytky po pájení odstraňovat [8] [1].

- **Typ RMA** – Tavidlo tohoto typu je mírně aktivní. Zlepšení vlastností se dosáhne přidáním organických směsí. Jako v předchozím případě se tento druh nemusí odstraňovat. Využití je pro pájení na měděných, zlatých nebo cíno-olověných pájkách [1].
- **Typ RA** – Tento typ je nejvíce aktivní. Využívá se pro takové povrchy, kde předchozí typy nelze využít. Využití je např. pro pájení kovů. Po pájecím procesu je nutné odstranit veškeré tavidlo, protože by mohlo zrychlit proces koroze [1].

Tavidla můžeme rozdělit na dvě skupiny podle toho, jaké látky je rozpouští:

- Tavidla rozpustná ve vodě
- Tavidla rozpustná rozpouštědlem [8]

2.6. Pájecí slitiny

Většina používaných slitin obsahuje velké množství cínu. Všechny slitiny, které neobsahují olovo, musí splňovat určité podmínky:

- Netoxické
- Dostupné a cenově přijatelné
- Úzký teplotní rozsah plasticity
- Přijatelné smáčení
- Vytvoření spolehlivého spoje [4]

V dnešní době používáme 8 základních slitin bez olova, které splňují podmínky výše uvedené.

- **Sn96.5/Ag3.5** – Slitina má teplotu tavení 221 °C. Největší výhodou je stabilita slitiny. Nevýhodou při procesu pájení přetavením je nedostatečná smáčivost [4].
- **Sn99.3/Cu0,7** – U této slitiny máme teplotu tavení 227 °C. Nevýhodou je horší smáčení povrchu. Pájené spoje z této slitiny nemají příliš dobré mechanické vlastnosti. Je velice vhodná pro pájení vlnou, kde ji potřebujeme velké množství. Slitina je v porovnání s jinými slitinami cenově nejdostupnější [4].

- **Sn/Ag/Cu** – Teplota tání eutektické slitiny je 217 °C. Měď (Cu) se přidává z důvodu zlepšení vlastností: lepší smáčivost, nižší bod tání, zvýšení odolnosti a životnosti. Procentuální zastoupení mědi se pohybuje od 0,75 % - 1,7 % [4].
- **Sn/Ag/Cu/X** – Oproti Sn/Pb má lepší odolnost v dlouhodobých testech životnosti. Jako čtvrtý prvek nejčastěji přidáváme Sb (antimon). Zastoupení Sb je maximálně 0,5 %. Využívá se pro ruční pájení nebo pájení vlnou [4].
- **Sn/Ag/Bi/X** – Přidáním Bi (bismut) dostáváme nižší teplotu tavení, tím dojde ke zlepšení smáčivosti. Tato slitina se řadí mezi nejlepší bezolovnaté slitiny. Zastoupení Bi ve slitině je maximálně 5 %. V praxi bylo zjištěno, že dochází k zvedání kuželů v pokovených otvorech. Tento jev nastává z důvodu různé teplotní roztažnosti mezi pájkou a DPS. Pro eliminaci tohoto jevu je do slitiny přidán čtvrtý prvek Cu nebo Ge (germanium), který zlepšuje i pevnost spoje [4].
- **Sn/Sb** – Tato slitina nemá žádné velké výhody. Nevýhody jsou velká teplota tavení a horší smáčení [4].
- **Sn/Zn/X** – Bod tavení je 199 °C. Nevýhodou je, že zinek způsobuje oxidaci a korozi. Při pájení dochází k reakci zinku a tavidla. Abychom zlepšili vlastnosti, přidáme jako třetí prvek Bi (bismut). Bi snižuje korozi ve vlhkých podmínkách. Zastoupení Bi < 3 %. Slitinu využíváme při výrobě spotřební elektroniky [4].
- **Sn/Bi** – Bod tavení Sn/Bi je 138 °C. Procentuální zastoupení Bi je 58 %, zbytek tvoří Sn 42 %. V praxi má tato slitina lepší vlastnosti než Sn/Pb. Pokud bychom chtěli, aby na spoji nedocházelo k zhrubnutí, přidáme 1 % Cu. Pro zlepšení mechanických vlastností se v praxi přidává do 1 % Ag [4].

2.7. Pájecí pasty

Pájecí pasta je složena z kuliček pájecí slitiny, tavidla a dalších materiálů, které upravují vlastnosti pasty. Hlavní využití najdeme pro pájení přetavením. Obvyklé složení pájecí pasty je 90 % pájecí zrna a 10 % tavidla. Velice důležitou vlastností pájecích past je velikost zrn. V dnešní době se zvyšuje hustota osazovaných součástek na plochu. Proto je požadavek na co nejmenší průměr zrn a na jejich velmi malý rozptyl. Velikost kuliček velmi zásadně ovlivňuje množství oxidů. Pokud dochází ke snižování průměru zrn, roste obsah oxidů. U malých velikostí zrn jednotky μm dochází k tomu, že do pasty se dostává super jemný prach [4] [5].

Požadavky na pájecí pasty:

- Lze nanést na plošný spoj pomocí sítotisku, šablonového tisku, pomocí ručního dávkovače nebo automatickým či poloautomatickým dávkovačem.
- Po nanesení na plošný spoj musí zůstat ve stavu, v jakém byla pasta nanesena. Nesmí dojít k tomu, že by začala stékat.
- Po osazení na osazovacím stroji zafixuje součástku na pozici.
- Po zahřátí v peci musí dojít ke slití zrn a tím k vytvoření celistvého vodivého spojení.

2.7.1 Možnosti nanášení pájecích past

Pájecí pasty lze nanášet třemi způsoby:

2.7.1.1 Dávkování

U tohoto způsobu je hlavní výhodou, že pasta se nanáší selektivně. Tento způsob nanášení pájecí pasty je vybrán při výrobě malých sérií, při kterých by bylo neekonomické pořizovat šablony. Také lze tuto metodu využít pro opravárenskou činnost [8] [9].

2.7.1.2 Tisk přes šablonu

Tento způsob nanášení pájecí pasty je v dnešní době velice častý. Šablony musí být vyrobeny z materiálu, který je neutrální k pájecí pastě, např. nerezová ocel. Místa, kde má být nanesena pasta na pájený spoj, jsou v šablonách řezána pomocí laseru nebo leptána kyselinou.

Většinou jsou tyto šablony umístěny v zařízeních, která zabraňují pohybu a prohýbání. Šablona musí být přitlačena dostatečně velkou silou, aby došlo k odstranění mezery mezi šablonou a pájecí deskou. Pokud by mezera nebyla odstraněna, mohlo by dojít k protlačení pájecí pasty na místa, která jsou nežádoucí. Poté pomocí stěrky, na kterou tlačíme určitou silou, dojde k protlačení pájecí pasty přes otvory na desku pájeného spoje. Při každém opakování musíme důkladně šablonu očistit.

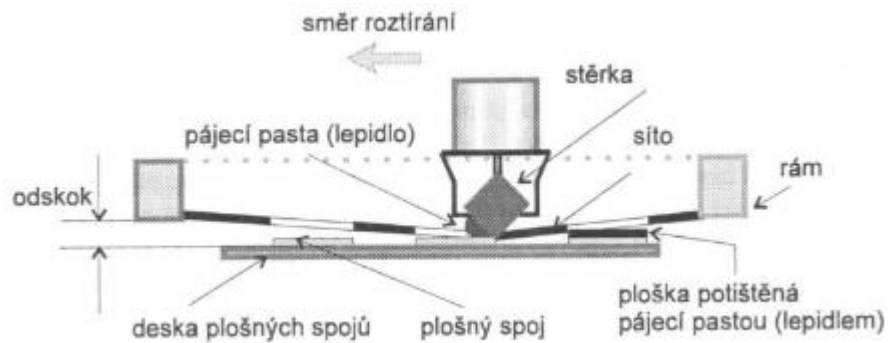
Tato metoda v porovnání s jinými metodami má tři základní výhody:

1. Téměř nulové opotřebení masky, velká životnost
2. Velká přesnost nanášení
3. Možnost tisku i malých motivů, které se nachází v těsné blízkosti [10]

2.7.1.3 Tisk přes síto

Síto je tvořeno vlákny, nejčastěji nylonem nebo polyesterem. Tyto materiály je nutné opatřit sítkou z fotocitlivého materiálu. Hustota ok je od 24 až 78 na 1 cm délky. Velikost zrn pájecí pasty je 40–70 um, proto používáme sítku s velikostí ok 200 um. UV světlem ozáříme

místa, kam potřebujeme nanést pájecí pastu. Neosvětlenou část musíme nechat zaschnout a zbytek, který byl osvětlen UV světlem, se vyleptá. Takto připravené síto je vloženo do rámu. Síto přiložíme 0,8 mm až 1 mm nad pájecí destičku a pomocí stěrky rozetřeme pájecí pastu viz obrázek č. 2 [1].



Obrázek 2: Princip tisku sítotiskem [1]

3. Pájecí metody

3.1. Ruční pájení

Tento způsob pájení provádíme pomocí páječky viz obr. č. 3, která má na konci hrot, který má větší teplotu, než je teplota tavení pájeného spoje. Tavidlo nanášíme ručně, a to těsně před samotným pájením. Hlavní nevýhodou této metody je, že nikdy nedokážeme přesně opakovat postup pájení. Nemáme vždy stejnou dobu prohřátí spoje a množství pájky ve spoji. Z tohoto důvodu se tato metoda využívá pouze k opravám špatně zapájených součástek z hromadného pájení. Dále ji lze využít pro opravu desek nebo pokud není součástka vhodná pro hromadné pájení [5].



Obrázek 3: Stanice pro ruční pájení [11]

3.2. Pájení tekutou pájkou – hromadné pájení

Pájení tekutou pájkou lze rozdělit do tří skupin [12].

3.2.1. Pájení vlnou

V nádobě s roztavenou pájkou dochází k tvorbě vln. Pájecí deska je pomalu posouvána nad vlnami. Tím dochází k tomu, že vlny smáčí spodní část desky. Celý tento proces má čtyři části. V první části dojde k nanesení tavidla na místo, kde má vzniknout pájený spoj. Ve druhé části se ohřeje na teplotu těsně nad bod tání tekuté pájky. Z tavidla se částečně odpaří rozpouštědlo. Ve třetí části dojde k samotnému zapájení, kdy vrcholky vlny omývají kontakty na spodní straně desky. Poté následuje ještě myčka desek. Nevýhodou je možnost vzniku můstků. Tyto můstky vznikají, pokud je velká hustota pájecích míst vedle sebe [12].



Obrázek 4: Zařízení pro pájení vlnou [15]

3.2.2. Pájení vlečením

Upevňovací deska se pohybuje po hladině pájecí slitiny. Před ponořením do pájky je nutné odstranit vrstvu oxidu, která se nachází na povrchu pájky. Tato metoda nemá velké využití v praxi [10].

3.2.3. Pájení ponorem

Pájení ponorem není příliš rychlý způsob pájení, ale je to způsob poměrně jednoduchý. Základem pro pájení ponorem je roztavená lázeň, do které z vrchu vkládáme DPS na určitou dobu. Velkou výhodou je, že roztavená lázeň zabraňuje přístupu vzduchu, tím nedochází k oxidaci. Nevýhodou tohoto pájení je nutnost odstranění přebytečného cínu po vytažení z lázně [14].

3.3. Pájení přetavením – hromadné pájení

V praxi se s touto metodou můžeme setkat velice často tam, kde pájení vlnou mohlo způsobit vznik můstků. Tato metoda umožňuje maximalizaci osazení. Prvním krokem je

nanesení pájecí pasty přes síto nebo masku na předem definované místo. Poté osazovací stroj osadí součástky. Následuje postupné zahřívání desky, při kterém dochází k sušení pasty a aktivaci tavidla, poté následuje proces zapájení [13].

Pro přetavení pájecí pasty lze využít několik metod:

3.3.1 Ohřev infračerveným zářičem

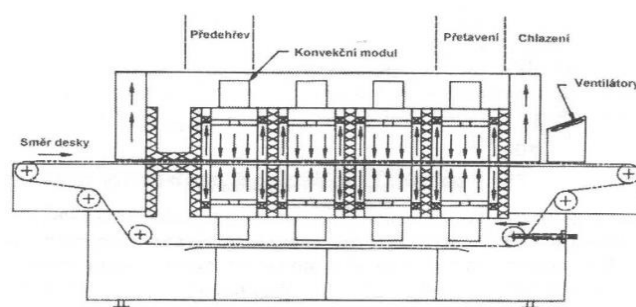
Využíváme IR zářič s vlnovou délkou 0,8 – 400 μm . Část záření je pohlcena destičkou a část je odražena zpět. Množství odraženého záření závisí na několika faktorech např. drsnost povrchu, úhel povrchu, barva a materiál. To má za důsledek nerovnoměrné zahřívání desky. Může se stát, že dojde k přehřátí určitých částí desky, proto je nutné volit takové součástky, které vydrží vyšší teploty [13].

3.3.2 Ohřev laserem

Při tomto druhu přetavení je laserový svazek směřován na jednotlivé spoje. Následně dochází k přetavení pájecí pasty. Nevýhodou je velká časová náročnost, protože spoje jsou taveny postupně. Je zde možná velice přesná regulace velikosti dodaného tepla, proto jsou spoje velice kvalitní. Další výhodou je, že dochází k minimálnímu ohřevu ostatních součástek [13].

3.3.3 Ohřev horkým plynem

Jako plyn nejčastěji využíváme vzduch. Další možností je jen dusík, který má tu výhodu, že zabraňuje oxidaci pájeného spoje. Na obrázku č. 5 vidíme pec rozdělenou do několika zón, které jsou vyhřívány odporovým vinutím. Výhodou je rovnoměrné prohřátí celé desky. Nevýhodou je delší časová náročnost [13] [15].



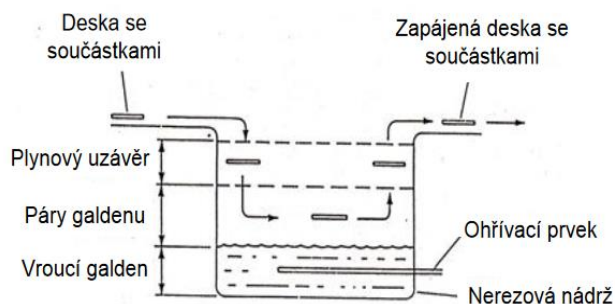
Obrázek 5: Princip pece pro ohřev horkým plynem [1]



Obrázek 6: Pec pro ohřev horkým plynem [15]

3.3.4 Ohřev kondenzací par

Zde využíváme kondenzační teplo pracovní kapaliny, které ohřívá desku pájeného spoje. Na desku pájeného spoje je nanесena pájecí pasta. Poté je deska osazena součástkami a vložena do zařízení pro pájení v parách. Jako kapalinu lze použít fluórouhlíky např. galden. Galden má vysokou stabilitu, nedochází ke změnám vlastností kapaliny při změnách teploty od 55 °C do 270 °C, bod varu je 230 °C. Zvolená pracovní kapalina nesmí být chemicky agresivní a nesmí docházet v celém teplotním rozsahu ke změnám vlastností. Pájecí desky jsou umístěny nad pracovní kapalinou v oblasti, kde se nachází pájecí páry [10].

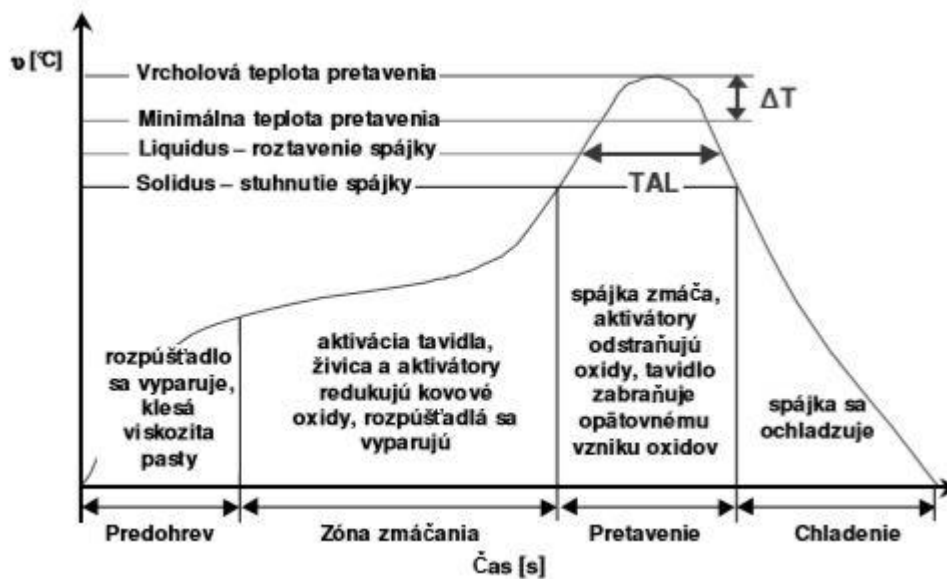


Obrázek 7: Zařízení pro pájení v parách [13]

3.4 Teplotní profil

Teplotní profil zobrazuje průběh teploty v čase. K dosažení kvalitního pájeného spoje se musí kromě maximální hodnoty teploty řešit také postup přehřátí a následné chladnutí. Správný průběh těchto teplot výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného pájeného spoje. Každá

pájecí pasta má jiný profil přetavení, ten udává výrobce. Volbou rychlosti dopravníku a teplot jednotlivých sekcí lze měnit teplotní profil pájecí pece [16] [17].



Obrázek 8: Příklad teplotního profilu [14]

Obrázek č. 8. znázorňuje rozdělení teplotního profilu na čtyři části: předehřev, zóna smáčení, zóna přetavení a zóna chladnutí.

1. **Předehřev** – V této části je teplota do 150 °C. Nárůst teploty nesmí být příliš velký, nesmí nastat teplotní šok. Při určité teplotě dochází k aktivaci tavidla a k odpařování rozpouštědla z pájecí pasty [14].
2. **Zóna smáčení** – V této části je teplota do 200 °C. Dochází k odpaření posledních zbytků rozpouštědla. Velice důležitým úkolem této části je prohřát celou DPS na stejnou teplotu. Tavidlo redukuje oxidy. U teploty nesmí dojít k prudkému nárůstu, tavidlo by nemělo téměř žádný účinek. Pokud by v zóně nebyla dostatečná teplota, nedošlo by k smáčení povrchu nebo by bylo smáčení nekvalitní [14].
3. **Zóna přetavení** – Zde se pohybujeme přibližně 20 °C nad teplotou přetavení pájecí pasty. Dochází k přeměně tuhé pájecí pasty na kapalinu, vzniká povrchové napětí. Velice důležitým parametrem je doba, ve které se nacházíme nad teplotou tavení. Pokud je doba příliš dlouhá, tavidlo nedokáže zabránit vzniku opětovné oxidace. Příliš vysoká teplota může poškodit součástky na DPS. Krátká doba nebo nízká teplota nevytvoří dostatečně pevný spoj [14].

4. **Zóna chladnutí** – V této fázi dochází k chladnutí DPS, součástek a pájených spojů z teploty přetavení na teplotu pokojovou. Rychlost chladnutí by měla být co největší, ale nesmí překročit určité meze, mohlo by totiž vzniknout termické napětí. Toto napětí vzniká v pájeném spoji z důvodu různé teplotní roztažnosti součástky a DPS, může dojít až ke vzniku trhlin v pájeném spoji a snížení spolehlivosti [14].

3.4.1 Heating factor - Q_η

Heating factor je kombinace teploty a času nad bodem tání pájecí slitiny, značíme Q_η . Jednotka je (s.K) – sekunda * Kelvin. Velikost Q_η má velký význam z hlediska spolehlivosti pájeného spoje. V případech, ve kterých Q_η není dostatečně velký, je čas přetavení krátký nebo teplota je těsně nad hranicí teploty přetavení, nevznikne spolehlivý (kvalitní) pájený spoj.

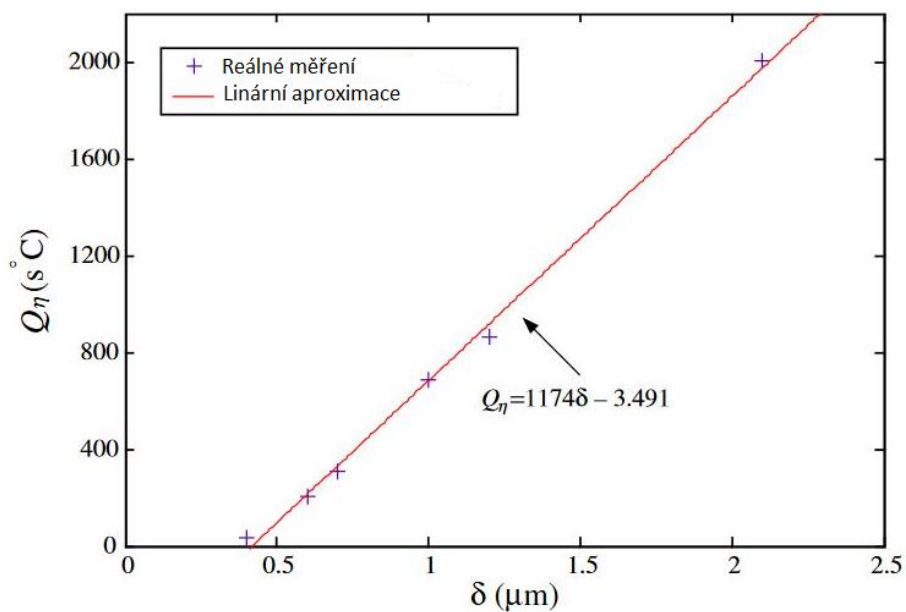
K dosažení kvalitního pájeného spoje musíme zvolit dostatečně velké Q_η . Q_η nemůžeme volit ale příliš velké, protože velikost Q_η ovlivňuje šířku intermetalické vrstvy vytvořeného pájeného spoje. Pomocí experimentu byla určena rovnice č. 1 mezi tloušťkou intermetalické vrstvy a Q_η . Tato rovnice platí pouze do určité tloušťky vrstvy, poté nelze další růst vyjádřit lineárně. Závislost, kterou vyjadřuje rovnice č. 1, byla zjištěna u 63Sn37Pb s měděnou podložkou [18].

$$Q_\eta = 1174 \delta - 3,491$$

Rovnice 1: Vztah mezi tloušťkou intermetalické vrstvy a Q_η [18]

δ – tloušťka intermetalické vrstvy [μm]

Grafické vyjádření vztahu mezi tloušťkou intermetalické vrstvy a Q_η znázorňuje obrázek č. 9.



Obrázek 9: Grafická závislost rovnice č.1 [18]

Matematický zápis heating factoru:

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T_{(t)} - T_m) dt$$

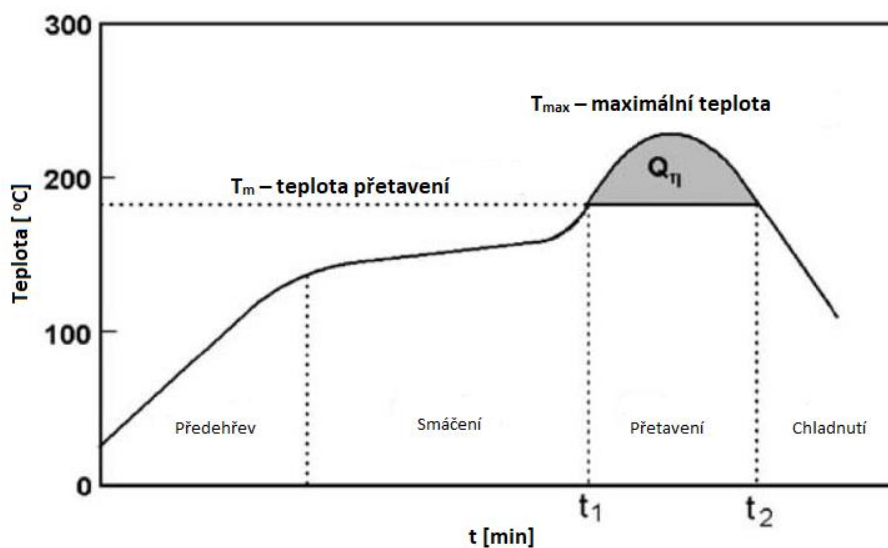
Rovnice 2: Matematický zápis heating factoru [18]

$T_{(t)}$ – skutečná teplota neboli měřená teplota v peci

T_m – teplota tání pájecí pasty

t_1 – čas ve kterém dojde k překročení teploty tání

t_2 – čas ve kterém dojde k poklesu teploty pod úroveň tání



Obrázek 10: Grafické zobrazení heating factoru [18]

4. Testy pájených spojů

4.1. Normy pro zkoušky pájených spojů

Testování pájených spojů vychází z norem pro testování. Normy rozdělujeme na normy české a normy mezinárodní. Níže je uvedeno několik norem, českých i mezinárodních.

4.1.1 České normy

- ČSN EN 6137–1–1. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení [19]
- ČSN EN 62137–1–2. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1–2: Zkouška pevnosti ve smyku [19]
- ČSN EN 62137–1–3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – část 1–3: Zkouška cyklickým padáním [19]
- ČSN EN 62137–1–4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – část 1–4: Zkouška cyklickým ohybem [19]

- **ČSN EN 62137-1-5.** Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje – Část 1–5: Mechanická únavová zkouška smykem [19]
- **ČSN EN 62137-3.** Technologie montáže elektroniky – Část 3: Směrnice pro volbu metod zkoušek vlivu prostředí a zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje [19]
- **ČSN EN 62137-4.** Technologie montáže elektroniky – Část 4: Metody zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje povrchově montovaných pouzder s vývody typu plošné pole [19]

4.1.2 Mezinárodní normy

- **IEC 62137-1-2: 2007** – Metoda zkoušení vlivu prostředí a odolnosti na pájený spoj při povrchové montáži - Zkouška pevnosti ve smyku [20]
- **IEC 60068-2-21: 2006** – Zkušební metoda pro pájitelnost a odolnost proti pájecímu teplu [20]
- **IEC 2137-1-5: 2009** – Metoda zkoušení prostředí a odolnosti na povrchu - Mechanická zkouška únavovou zlomeninou [20]

4.2 Mechanické namáhání a mechanické zkoušky pájených spojů

Mechanické vlastnosti pájených spojů jsou velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje životnost. Mechanickým namáháním dochází ke snížení mechanických vlastností, k porušení pájeného spoje a následnému selhání. Příčiny mechanického selhání:

- Termomechanické napětí
- Pnutí vyvolané prostředím
- Opakování cyklů zapnutí, vypnutí
- Rozdíl v tepelné roztažnosti propojených částí [4] [21]

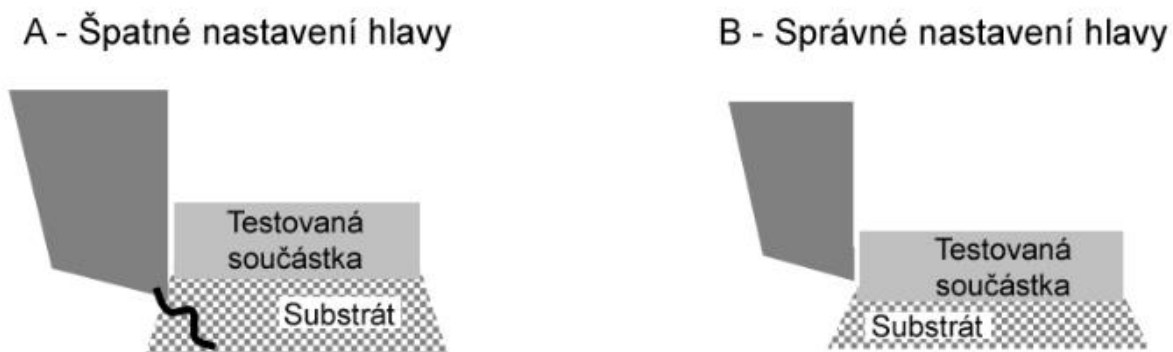
V reálných zařízeních dochází k cyklickému zatěžování a k únavě materiálu. Mechanické zkoušky, které způsobí deformaci pájky, zkoumají vliv vnější síly a okolního prostředí v závislosti na čase a způsobu deformace. Všechny tyto zkoušky jsou destruktivní, protože deformace pájky je nepružná [22].

Cílem všech zkoušek spolehlivosti pájených spojů je omezit výrobu nekvalitních pájených spojů a zajistit, aby zařízení fungovala po celou dobu životnosti [23].

4.2.1 Zkouška stříhem

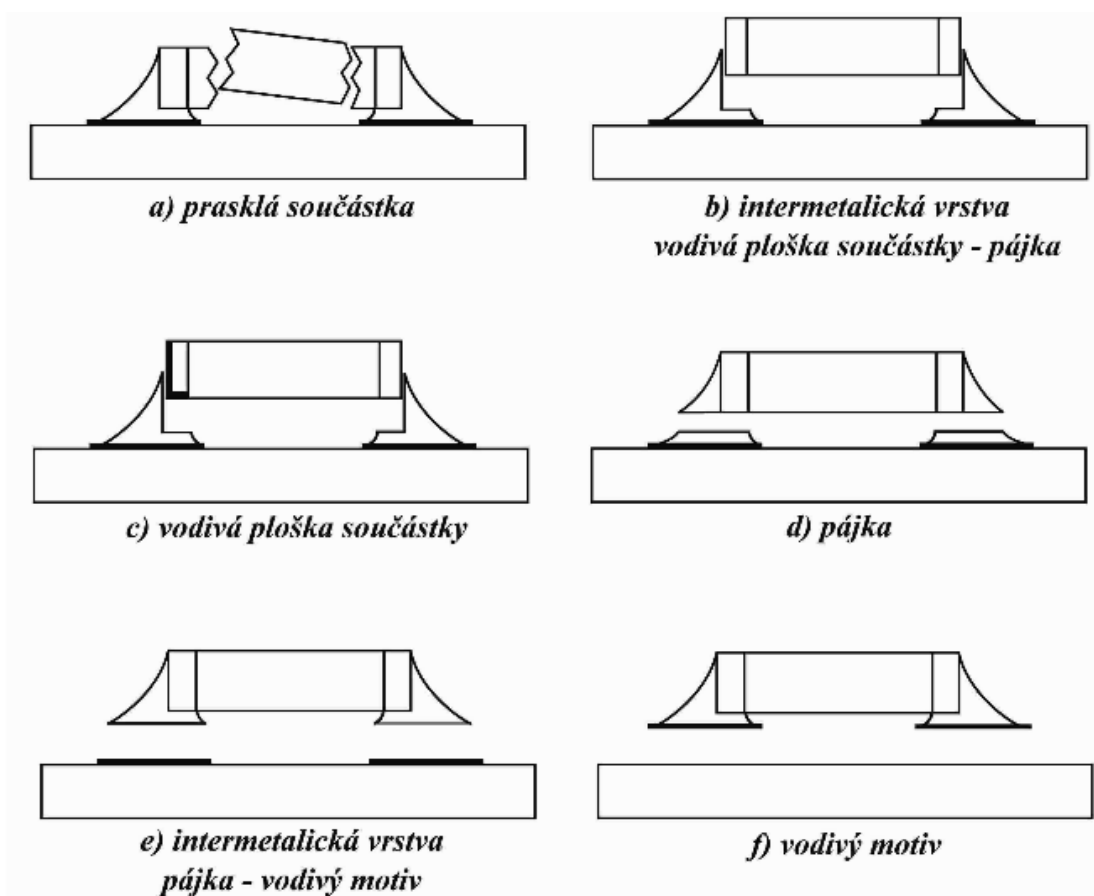
Tato mechanická zkouška vychází z české normy ČSN EN 62137–1–2 jako zkouška pevnosti ve smyku. Zjišťuje se maximální potřebná síla k utržení součástky z DPS a místo vzniku trhliny. Pomocí této metody lze testovat jen součástky, které jsou určeny pro povrchovou montáž. Nelze testovat součástky např. pro flip – chip technologie a součástky pro THT montáž [19] [22].

K dosažení rovnoměrné síly na součástku musí být vždy trhací trn umístěn rovnoměrně, tak jako na obrázku č. 11. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít k předčasnému popraskání pájky a následné chybě měření. Trhací trn musí vždy tahat za součástku a nesmí poškodit pájku [19] [22] [24].



Obrázek 11: Správné nastavení výšky trnu [24]

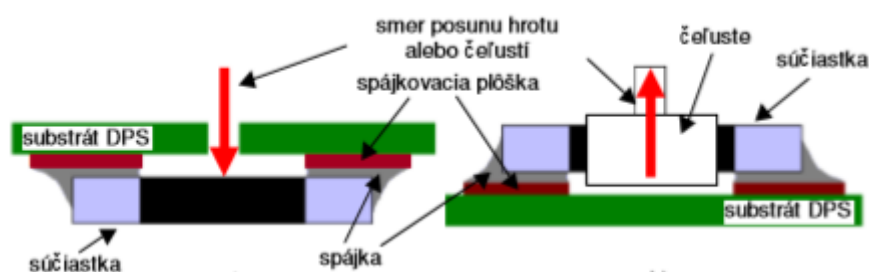
Norma také definuje rychlost trhacího trnu 1 mm za minutu. Na obrázku č.12 můžeme vidět místa, kde by mohlo dojít ke vzniku trhliny [19] [22] [24].



Obrázek 12: Místa s možností vzniku trhliny [22]

4.2.2 Zkouška tahem

Tato metoda je velice podobná metodě popsané v bodě 4.2.1. Zde se také zkoumají dva parametry, maximální síla pro odtržení součástky z DPS a místo porušení spoje. Také lze využít pouze součástky pro plošnou montáž. Jediný rozdíl je pouze ve směru působící síly. Zde je působící síla vedena buď zespodu přes DPS nebo je součástka uchopena do čelistí a tažena od DPS, viz obr. 13 [14].



Obrázek 13: Princip zkoušky tahem [14]

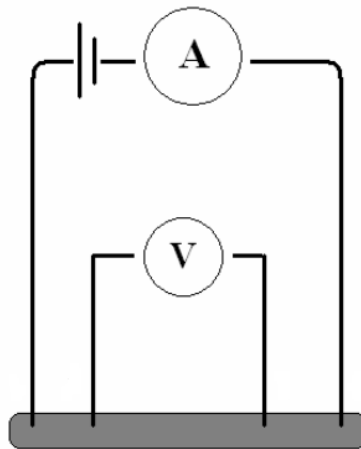
4.3 Elektrické zkoušky pájených spojů

Z hlediska elektrického je kvalita pájených spojů posuzována měřením elektrického odporu. Velice důležitou roli v posuzování kvality pájených spojů je aplikační využití [14].

4.3.1 Měření elektrického odporu

Pro měření elektrického odporu pájeného spoje jsou používány takové metody, které eliminují odpor přívodních vodičů a odpor měřících hrotů. Korekce je prováděna z důvodu velmi malého odporu měřeného spoje, řádově až $10^{-5} \Omega$. V některých případech může odpor přívodních kabelů být až 1000krát větší. Dvojbodová metoda je proto nevhodná, nedochází zde žádným způsobem ke korekci odporu přívodních kabelů [14].

Velice vhodnou metodou je metoda čtyřbodová. Hlavní výhodou je eliminace odporu kontaktu, přívodních kabelů a přechodového odporu. Využíváme ji pro měření malých odporů do 100Ω . Pro měření využíváme čtyři elektrody. Vnější svorky přivádí proud a vnitřní svorky jsou napěťové. Z hodnot napětí a proudu je pomocí miliohmmetru vypočítán výsledný odpor, viz obr. č. 14 [14] [25].



Obrázek 14: Princip čtyřbodové metody [25]

$$R = \frac{U}{I}$$

Rovnice 3: Vzorec pro výpočet elektrického odporu

R = měřený odpor (respektive vypočítaný odpor) [Ω]

U = měřené napětí voltmetrem [V]

I = měřený proud ampérmetrem [A]

Odpor pájeného spoje by měl být konstantní po celý pracovní rozsah napětí a proudu. Pomocí čtyřbodové metody lze změřit celkový odpor pájeného spoje. Tento odpor je tvořen několika dílčími odpory: odporem pájeného substrátu, odporem intermetalické vrstvy mezi pájkou a pájecí ploškou, odporem pájky, odporem intermetalické vrstvy mezi pájkou a kontaktem součástky a odporem kontaktu součástky [14].

4.4 Zrychlený proces stárnutí

Pájené spoje mají životnost v řádu jednotek až desítek let, životnost ovlivňuje několik faktorů, např. pájecí slitina nebo nastavení pájecího procesu. Pro urychlení procesu stárnutí jsou využívány klimatické komory. Během těchto testů je snaha zkrátit dobu stárnutí na několik týdnů. Tyto procesy lze rozdělit na několik druhů [14] :

4.4.1 Tepelné cyklování

Vycházíme z normy JESD22-A104 B. V tomto testu jsou DPS vystavovány velkým změnám teploty. Komory, které jsou pro takové testování využívány, jsou dvou nebo tři komorové. Při změnách teploty vzniká termické napětí. Toto napětí vzniká v důsledku různé teplotní roztažnosti pájky a pájené součástky. Termické napětí způsobuje zhoršení mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje [14].

Pro pájené spoje jsou používány maximálně dva cykly za hodinu. Během testů nedochází ke skokové změně teploty z důvodu tepelné kapacity součástek. Maximální dovolená změna teploty je 15 °C za minutu. Teplotní extrémy jsou voleny tak, aby došlo k simulaci co nejhorších možných pracovních podmínek. Počet cyklů vychází z konkrétní aplikace zařízení. Počítače mají jiný počet cyklů než automobily [14] [26].

Standard IPC-SM-785 doporučuje, aby měření elektrického odporu nebylo prováděno po určitém počtu cyklů, jako to provádíme v praktické části práce, ale je zde doporučeno provádět měření přímo v komoře při běhu zařízení. Pokud bychom se řídili standardem uvedeným na začátku odstavce, výsledkem by bylo přesné určení počtu teplotních cyklů, které způsobí selhání pájených spojů (neměřitelný elektrický odpor neboli spoj je přerušen) nebo dojde k nárůstu odporu nad určitou mez [26].

Životnost pájeného spoje je více závislá na frekvenci cyklování než na maximální teplotě. Testovací cykly se dělí na několik forem zkoušek. V tabulce č. 1 jsou uvedeny parametry jednotlivých zkoušek podle JESD22-A104 B [14] [27].

Forma zkoušky	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]	Počet cyklů za hodinu
A	-55	85	2–3
B	-55	125	2–3
C	-65	150	2
G	-40	125	<1–2
H	-55	150	2
I	-40	115	1–2
J	0	100	1–3
K	0	125	1–3
L	-55	110	1–3
M	-40	150	1–3

Tabulka 1: Nejhorší možné podmínky pro jednotlivé kategorie [27]

T_{min} – minimální teplota ve studené části šokové komory

T_{max} – maximální teplota v horké části šokové komory

4.4.2 Skladování při zvýšené teplotě

V této metodě je posuzován vznik poruch v závislosti na čase. Teplota je volena tak, aby byla vyšší než pokojová teplota. Zároveň musíme brát ohled na teplotu tání, tato teplota nesmí být překročena. Velice důležitým parametrem je stálost teploty v celém testovacím prostoru, proto jsou využívány takové pece, které splňují tuto podmínku [14].

Standard JESD22-A103C uvádí několik druhů zkoušek, které se liší pouze v teplotě viz tabulka č. 2. Při výběru formy zkoušky je nutné znát maximální teplotu, ta nesmí být překročena, aby nedošlo k přetížení neboli k vyvolání poruchy. Zohledňuje se bod tání přítomných kovů. Dále je velice důležité zjistit, při jakých teplotách dochází k degradaci obalu zařízení, např. při jaké teplotě se rozteče plastové pouzdro [28].

Typ zkoušky	Teplota [°C]	Tolerance [°C]
A	125	-0/+10
B	150	-0/+10
C	175	-0/+10
D	200	-0/+10
E	250	-0/+10
F	300	-0/+10
G	85	-0/+10

Tabulka 2: Parametry jednotlivých zkoušek [14]

Délka stárnutí je přibližně 1000 hodin. Po skončení testu je zařízení kontrolováno při pokojové teplotě. Pokud je zařízení nefunkční nebo došlo k překročení limitů funkčních parametrů (prudký nárůst odporu), je toto zařízení prohlášeno za nevyhovující [14].

4.4.3 Zrychlená testování vlhkým teplem

V tomto typu zkoušky využíváme klimatickou komoru. V této komoře se udržuje po určitou dobu stálá teplota a vlhkost. Během celého procesu testování nesmí docházet ke kondenzaci páry zpět na vodu. Tato podmínka musí být splněna z důvodu urychlení průniku vlhkosti do pájeného spoje. Další podmínkou je, aby po ukončení testu nedocházelo ke kondenzaci vody na testované vzorky. Není možné používat obyčejnou kohoutkovou vodu na vytvoření páry, je nutné používat vodu destilovanou, která má minimální rezistivitu 1 M Ω /cm. Nastavení klimatické komory vychází ze standardu JESD22-A118 nebo JESD22-A101. V tabulce č. 3 se nachází parametry pro zkoušku podle standardu JESD22-A118 a v tabulce č. 4 parametry podle standardu JESD22-A101 [14] [29] [30].

Forma zkoušky	Teplota v komoře [°C]	Relativní vlhkost v komoře [%]	Délka trvání [h]
A	130 (± 2)	85 (± 5)	96 (-0,+2)
B	130 (± 2)	85 (± 5)	264 (-0,+2)

Tabulka 3: Parametry zkoušky standard JESD22-A118 [14]

Teplota v komoře [°C]	Relativní vlhkost v komoře [%]	Délka trvání [h]
85	85	1000

Tabulka 4: Parametry zkoušky standard JESD22-A101 [30]

4.4.4 Vibrační zkoušky

Vibrační zkoušky jsou dalším typem zkoušek pájených spojů. Vibrace se objevují téměř ve všech zařízeních. Velice často se tyto testy používají pro zařízení, která jsou určena pro automobilový průmysl. Velice důležitým parametrem, který ovlivňuje měření, je testovací teplota okolí. Je známo několik druhů zkoušek např. sinusové vibrace s pevně danou frekvencí a náhodné vibrace. Vibrační testy probíhají většinou kolem první harmonické frekvence. U vibračních zkoušek se měří odpor po celou dobu testu, tím je určen přesný čas selhání. Existují i testy, při kterých se testuje zařízení až do 10 G přetížení, tento test trvá až 200 hodin. U vibračních testů je za nevhodný pájený spoj prohlášen takový spoj, jehož odpor se zvýší o 50 % v porovnání s odporem před začátkem testování [31] [32].

5 Praktická část

5.1 Úvod do praktické části

V praktické části bakalářské práce se zkoumá optimální nastavení pájecí pece s ohledem na životnost pájených spojů. Analyzují se čtyři nastavení pájecí pece v závislosti na kvalitě pájených spojů.

Na všechny vzorky byla nanášena pájecí pasta pomocí šablony, následně byly osazeny odpory a poté zapájeny v peci při různých nastaveních teploty v jednotlivých sekcích. Následně byl u všech 96 vzorků změřen elektrický odpor. Po změření byly vybrány čtyři vzorky od každého profilu na mechanické zkoušky a na hodnocení intermetalických vrstev.

Následovalo umístění poloviny vzorků do klimatické komory na čtrnáct dní (336 hodin), kdy docházelo k zrychlenému procesu stárnutí. Po uplynutí 336 hodin byl u vzorků měřen elektrický odpor a provedeny mechanické zkoušky. Po změření elektrického odporu a vybrání několika vzorků na mechanické testy byl zbytek vložen zpět na dalších 336 hodin. Následně opět proběhlo měření elektrického odporu a mechanických vlastností. Tento cyklus proběhl poté ještě jednou. Poslední vzorky byly v komoře 1008 hodin.

Druhá polovina vzorků byla vložena do šokové komory, kde docházelo k teplotnímu cyklování. Jeden cyklus trval 30 minut, to znamená patnáct minut v teplé části a 15 minut v části studené. Měření elektrických a mechanických parametrů probíhalo většinou po uplynutí 333 cyklů. Měření tedy probíhalo po 333 cyklech, 666 cyklech a 995 cyklech. Po uplynutí určitého počtu cyklů došlo ke změření elektrických a mechanických parametrů a následnému vrácení zpět do šokové komory.

5.2 Pájecí pasta a osazení součástek

Pro provedení všech měření bylo nutné vytvořit dostatečně velký počet vzorků. Na testovacích destičkách, jejichž součástí jsou pájecí kontakty z mědi, je cín. Pomocí šablonového tisku je nanášena pájecí pasta AMTECH NC-31, která obsahuje slitinu Bi58Sn42 a tavidlo typu ROL0 (kalafuna). Při tomto procesu byla velice důležitá přesnost nanášení uvedené pájecí pasty, použitý přípravek přesně zafixoval DPS. Před každým procesem nanášení došlo k umytí šablony pomocí izopropylalkoholu.

Následně došlo k osazení odporů se jmenovitou hodnotou 0Ω , po přeměření na miliohmmetru byl zjištěn odpor $19,5 \text{ m}\Omega$. Podmínkou při volbě odporů byla dostatečná velikost pouzdra součástky. Proto jsme zvolili SMD pouzdro typu 1206 o velikosti $3,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm} \times$

0,05 mm, aby bylo možné zachytit odpor trhacím trnem. Dalším parametrem byla vzdálenost pájecích kontaktů součástky.

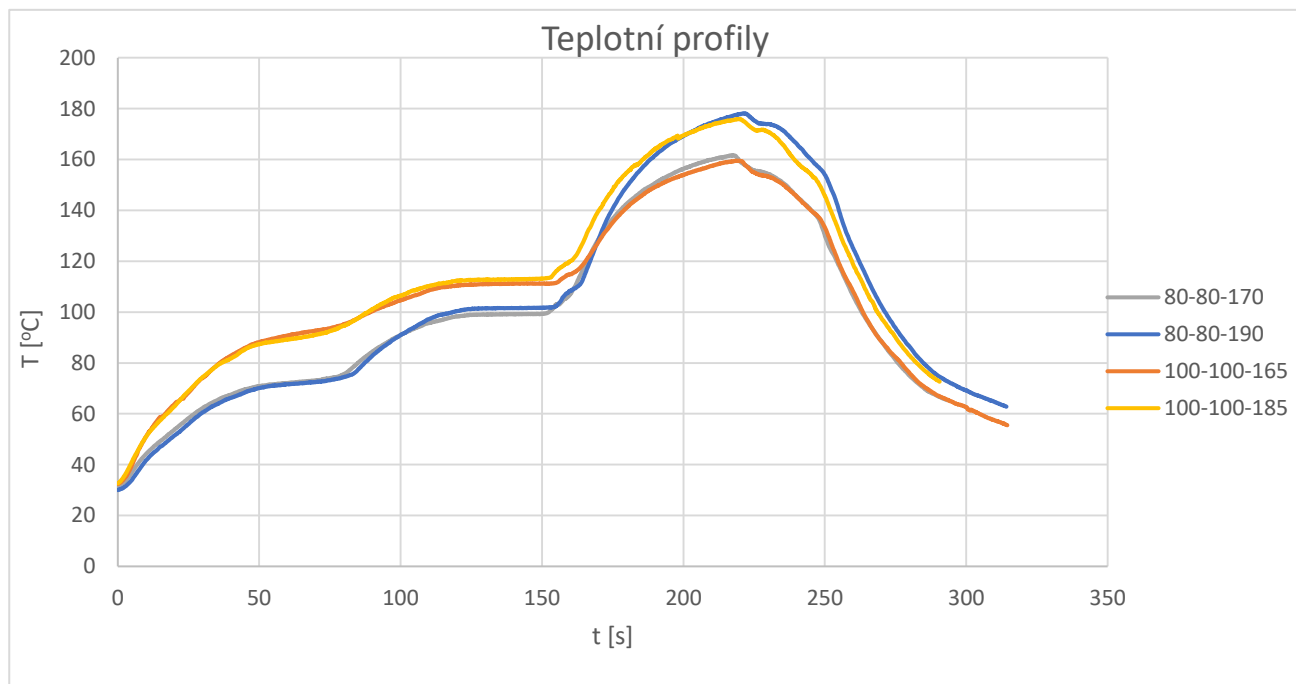
5.3 Přetavení v horkovzdušné peci

Pro zapájení součástek SMD byla zvolena metoda přetavení v horkovzdušné peci Mistral 260. Tato pec má tři nezávislé zóny, kterými projíždí dopravník s položenými DPS. První dvě zóny slouží jako předehřev DPS. Třetí zóna slouží k samotnému procesu pájení. Proces chladnutí probíhá po výjezdu z pece. Přetavení byla provedena pro čtyři různá nastavení pece. Parametry pájecího procesu uvádí tabulka č. 5.

Označení	T [°C] 1. zóna	T [°C] 2. zóna	T [°C] 3. zóna	počet vzorků pro teplotně-vlhkostní komoru	počet vzorků pro šokovou komoru
a	80	80	170	12	12
A	80	80	190	12	12
b	100	100	165	12	12
B	100	100	185	12	12

Tabulka 5: Teploty v jednotlivých zónách

Pro změření teplotního profilu pece byly použity dva termočlánky, které byly připájeny vysokoteplotní pájkou k testovací destičce. Následně projížděly pájecí pecí při různých nastaveních teplot. V grafu č. 1 je vyobrazen průběh teploty v čase pro různá nastavení pece.



Graf 1: Teplotní profily pájecí pece



Obrázek 15: Horkovzdušná pec Mistral 260

Tato pájecí pec nabízí velice přesný a kvalitní proces přetavení. Maximální teplota je 300 °C. Všechny procesy jsou řízeny procesorem a vše je vyobrazeno na LED – displeji, který umožní měnit rychlost dopravníkového pásu a teploty zón. V tabulce č. 6 jsou uvedeny základní parametry pece Mistral 260.

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	230 V
Příkon	3650 W
Rychlost dopravníku	15–60 cm/min
Šíře dopravníku	265 mm
Délka komory	860 mm
Teplotní rozsah	až 300 °C
Nahřívací čas	cca 15 min
Rozměry	1540 x 570 x 340 mm
Hmotnost	60 kg

Tabulka 6: Základní parametry pájecí pece Mistral 260 [33]

5.4 Měření odporů pomocí čtyřbodové metody

K měření odporů byla použita metoda popsaná v kapitole číslo 4.3.1. Pomocí této metody došlo ke změření všech vytvořených desek. Na každé desce se nacházelo sedm odporů. Celou měřicí soustavu ještě tvořil miliohmometr Kust MM2030, který je na obrázku č. 16. Pomocí rovnice 4 byla určena velikost odporu pájeného spoje.

$$R = (R_M - R_S)/2$$

Rovnice 4: Výpočet odporu pájeného spoje

R – výsledný odpor pájeného spoje

R_M – změřený odpor pomocí miliohmmetru

R_S – odpor součástky (19,5 mΩ)



Obrázek 16: Miliohmometr Kust MM2030

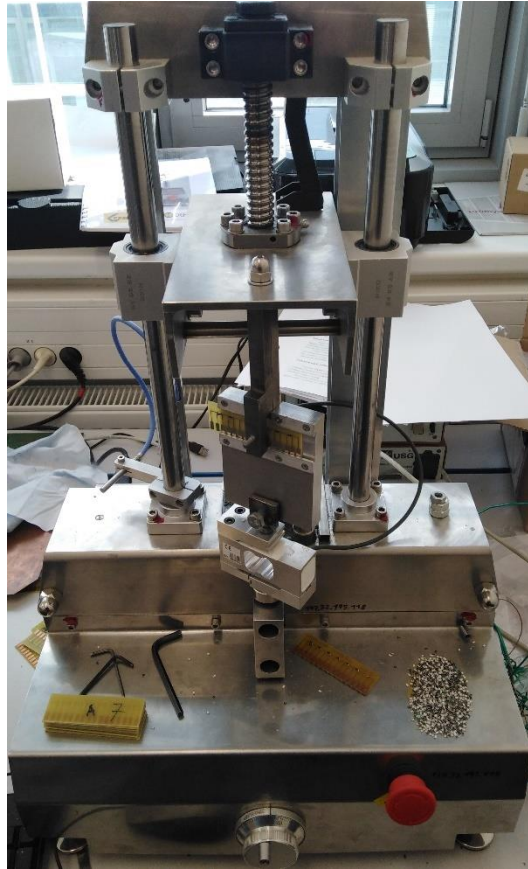
5.5 Měření maximální síly pro destrukci pájeného spoje

Pro zjištění síly, která je potřebná pro destrukci pájeného spoje, byla využita laboratorní trhačka DEFORM 02 obr. 17. Parametry trhačky uvádí tabulka č. 7.

Parametr	Hodnota
Přesnost posunu	10 μm
Krok posunu	0,5 μm
Vzdálenost čelistí	0,2 - 250 μm
Frekvence měření	3 sps
Převodník	24 bit
Hmotnost	43 kg
Velikost	420×670×390 mm
Napájení	230 V
Příkon v klidu	15 W
Maximální příkon	800 W
Přesnost měření	0,3 %
Silový rozsah	10, 50, 100, 500, 1000, 3000 N
Připojení k PC	Ethernet

Tabulka 7: Technické parametry trhačky [34]

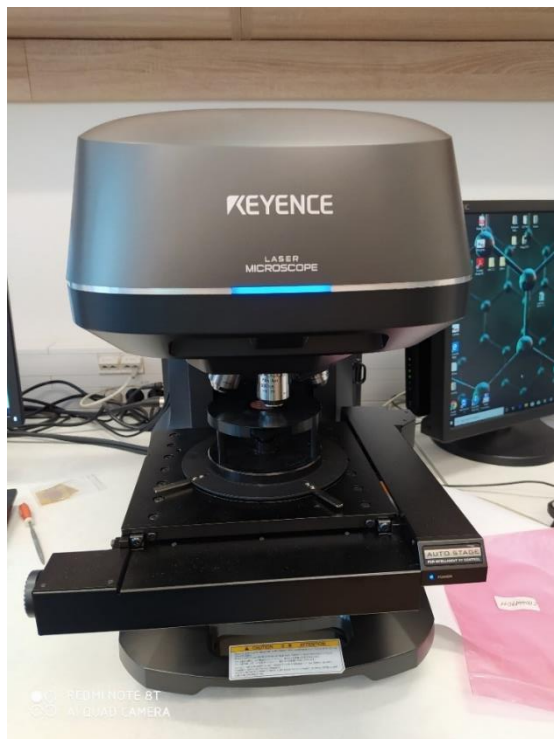
Na všech vzorcích jsme následně změřili sílu potřebnou pro destrukci pájeného spoje a vyhodnotili jsme způsob odtržení. Rychlost posunu trnu byla 1 mm za minutu. Maximální vzdálenost posunu byla 5 mm.



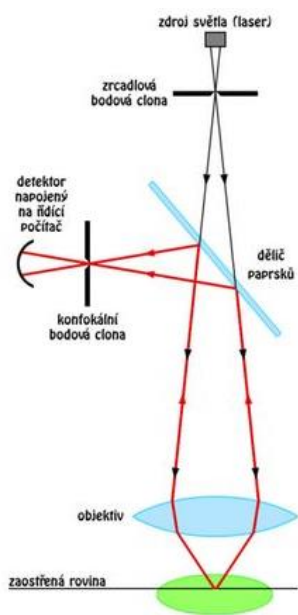
Obrázek 17: Trhačka DEFORM 02

5.6 Konfokální mikroskop

Pro zkoumání růstu tloušťky intermetalických vrstev byl využit konfokální mikroskop od firmy Keyence viz obr. č. 18. Prvním druhem byly vzorky, které nebyly v klimatické ani šokové komoře. Ve druhé skupině byly vzorky, které strávily 1008 hodin v klimatické komoře a třetí skupina vzorků strávila 995 cyklů v šokové komoře. Před začátkem měření pomocí konfokálního mikroskopu byla vytvořena mapa měřeného vzorku, která během procesu měření velmi usnadnila orientaci na měřicím vzorku. Dalším krokem bylo postupné zvětšování a ostření intermetalické vrstvy. Měření probíhalo při 300krát zvětšeném objektu. Po zaostření intermetalické vrstvy došlo k samotnému měření, zdrojem světla je v tomto případě laser. Laser procházel přes bodovou clonu a objektiv, dopadl na zkoumaný objekt. Došlo k odrazu laseru od zkoumaného objektu, laser prošel přes dichroické zrcadlo a bodovou clonu. Úkolem bodové clony bylo odfiltrování světla z jiných rovin. V poslední části se nachází fotonásobič, kde došlo k zesílení a detekování odraženého laserového paprsku viz obr. č. 19 [35].



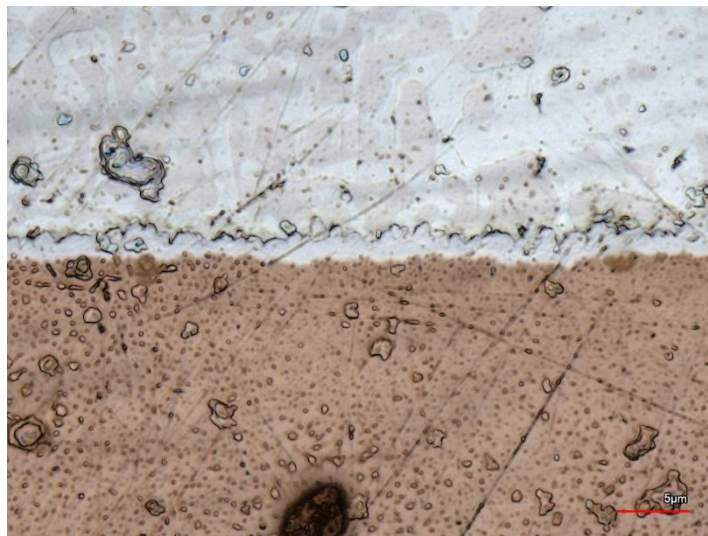
Obrázek 18: Konfokální mikroskop – Keyence



Obrázek 19: Princip konfokálního mikroskopu [35]

5.6.1 Tloušťky intermetalické vrstvy

Pomocí fokálního mikroskopu byly vytvořeny snímky intermetalické vrstvy, jeden ze snímků se nachází na obr. č. 20. Pro další zpracování byl využit program Adobe Photoshop, který má poměrně dobré funkce pro výběr určité oblasti. V našem případě byla potřeba velmi výrazně odlišit intermetalickou vrstvu od zbytku pájeného spoje. Pro další zpracování bylo nutné vytvořit obrázek, který by obsahoval pouze dvě barvy, černou a bílou viz obr. č. 21. Program BimapCounter od Adama Petráče byl využit v poslední části zpracování růstu intermetalických vrstev [36]. Program počítá průměrnou tloušťku vrstvy z 1024 hodnot. Aby program vypočetl potřebnou tloušťku intermetalické vrstvy, musí být zadány dva parametry. Prvním parametrem je měřítko. V našem případě je 5 μ m. Druhým parametrem je počet pixelů, které připadají na měřítko. To bylo pomocí Adobe Photoshop určeno 105 pixelů na 5 μ m.



Obrázek 20: Snímek z fokálního mikroskopu, pájecí profil A, čas 0 hodin



Obrázek 21: Upravený obrázek z Adobe Photoshop pro další zpracování

5.7 Zrychlené stárnutí DPS

Pro simulaci zrychleného stárnutí byly používány teplotně-vlhkostní komora a šoková komora.

5.7.1 Teplotně-vlhkostní komora

Pro zrychlený proces stárnutí byla využita teplotně-vlhkostní komora od výrobce CTS. Veškeré procesy v peci jsou řízeny pomocí LED panelu na přední straně. V této komoře byla nastavena teplota na 85 °C a relativní vlhkost na 85 %. Vzorky byly vždy po 14 dnech vyjmuty z pece, poté se u všech vzorků měřil odpor pájeného spoje. Vzorky, které nebyly měřeny na trhačce, se vrátily do pece na další čtrnáctidenní cyklus. V tabulce č. 8 jsou uvedeny základní parametry horkovzdušné pece.

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	230 V
Příkon	3200 W
Odebíraný proud	14,5 A
Teplotní rozsah	10 °C až 95 °C
Rozsah vlhkosti	10 až 98 %

Tabulka 8: Základní parametry teplotně-vlhkostní komory C+10/200

5.7.2 Šoková komora

Abychom měli možnost srovnání dvou procesů stárnutí a simulace různých pracovních podmínek, využili jsme šokovou komoru od firmy CTS. Ovládání je podobné jako u teplotně-vlhkostní komory. Komora je rozdělena na dvě části, horní část komory je horká a spodní část komory je velice chladná (až – 80 °C). Mezi těmito částmi jezdí výtah, ve kterém jsou umístěny testovací vzorky. Normy definují různé teploty studené a horké části, také definují dobu setrvání v jednotlivých částech. Převoz mezi teplou a studenou částí je velmi rychlý, aby proběhl co největší teplotní šok. V našem případě jsme nastavili teplotu studené části na – 40 °C a teplou část na 125 °C. Doba jednoho cyklu trvala 30 minut. To znamená, že 15 minut trvala studená část a 15 minut probíhala část teplá. V tabulce č. 9 jsou uvedeny základní parametry použité šokové komory.

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	400 V
Příkon	8,8 kW
Odebíraný proud	14 A
Teplotní rozsah teplé části	50 °C až 200 °C
Teplotní rozsah studené části	-80 °C až 100 °C

Tabulka 9: Základní parametry šokové komory TSS-70/66

5.8 Výsledky praktické části a diskuze

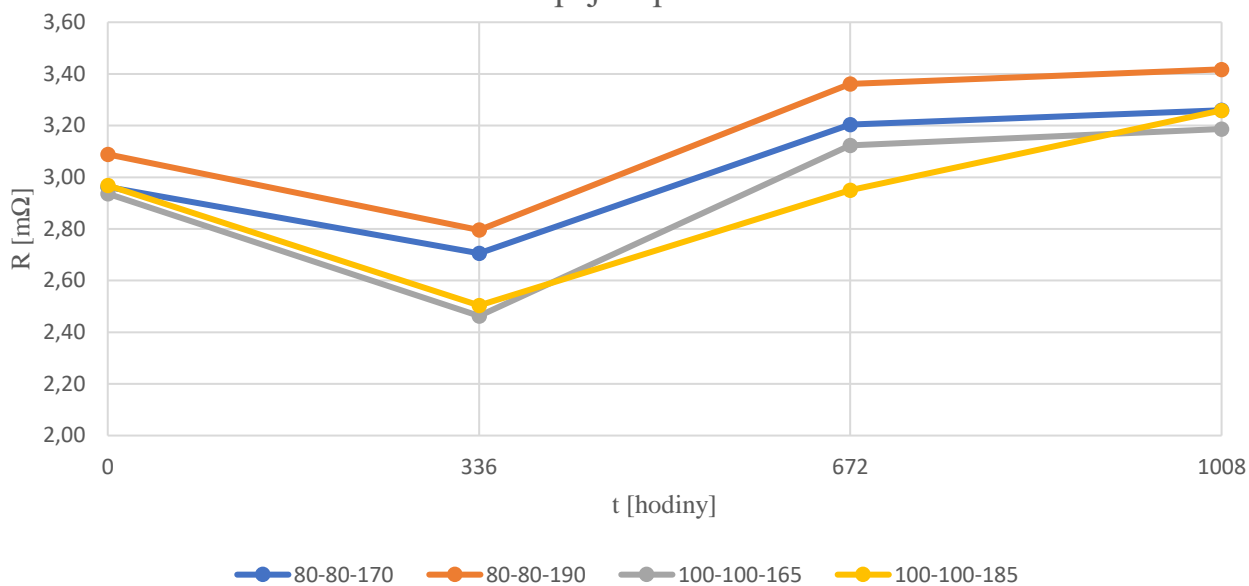
5.8.1 Teplotně-vlhkostní komora

V tabulce č. 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty odporu v $m\Omega$ pro různě dlouhé doby stárnutí v horkovzdušné komoře a pro všechny čtyři teplotní profily:

teplotní profil	t [hodiny]	0	336	672	1008
a	R [$m\Omega$]	2,96	2,71	3,20	3,26
	Variační koeficient [-]	0,14	0,14	0,12	0,12
A	R [$m\Omega$]	3,09	2,80	3,36	3,42
	Variační koeficient [-]	0,14	0,15	0,12	0,12
b	R [$m\Omega$]	2,94	2,46	3,12	3,19
	Variační koeficient [-]	0,17	0,16	0,10	0,12
B	R [$m\Omega$]	2,97	2,50	2,95	3,26
	Variační koeficient [-]	0,30	0,17	0,15	0,13

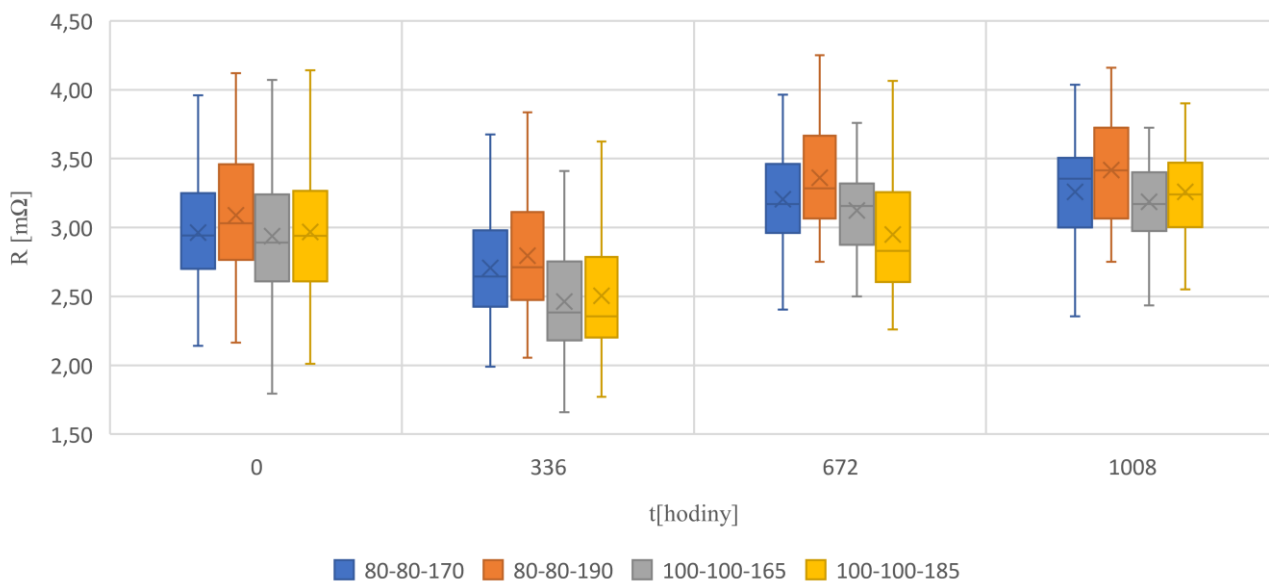
Tabulka 10: Průměrné hodnoty odporů pro různé pájecí profily a variační koeficienty

Změny průměrné velikosti elektrického odporu pro různá nastavení pájecí pece



Graf 2: Změny průměrné velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece



Graf 3: Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

T-test - p - hodnoty - Teplotně-vlhkostní komora				
	0 h	336 h	672 h	1008 h
a/A	0,0065	0,1998	0,0537	0,1574
a/b	0,6053	0,0005	0,2748	0,4953
a/B	0,8966	0,0049	0,0037	0,9975
A/b	0,0029	0,0000	0,0019	0,0325
A/B	0,0138	0,0001	0,0000	0,1661
b/B	0,5404	0,5716	0,0318	0,5083

Tabulka 11: T-test – teplotně-vlhkostní komora – rozdíl mezi pájecími profily – elektrický odpor

T-test - p - hodnoty - Teplotně-vlhkostní komora	
	počáteční / koncová hodnota
a/a	0,0004
A/A	0,0003
b/b	0,0105
B/B	0,0018

Tabulka 12: T-test – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – elektrický odpor

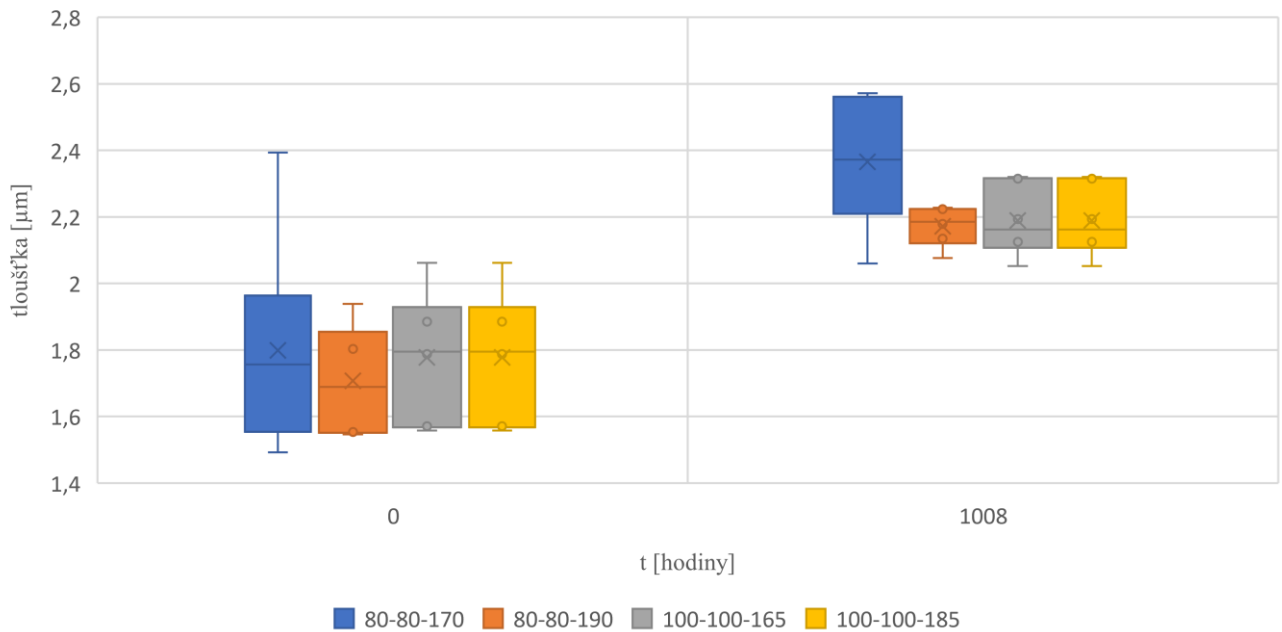
Teplotně-vlhkostní komora – 0 hodin			
značení	tloušťka [μm]	odchylka [%]	medián [μm]
a	1,80	9,05	1,74
A	1,71	8,90	1,69
b	1,78	9,73	1,80
B	1,77	9,83	1,79

Tabulka 13: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Teplotně-vlhkostní komora – 0 hodin

Teplotně-vlhkostní komora – 1008 hodin			
značení	tloušťka [μm]	odchylka [%]	medián [μm]
a	2,37	13,67	2,24
A	2,17	8,51	2,16
b	2,19	11,00	2,11
B	2,70	13,86	2,34

Tabulka 14: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Teplotně-vlhkostní komora – 1008 hodin

Změny velikosti šířky intermetalické vrstvy pro všechny pájecí profily



Graf 4: Změny velikosti tloušťky intermetalické vrstvy v teplotně-vlhkostní komoře pro různá nastavení pájecí pece

V tabulce číslo 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty odporů a vypočteny variační koeficienty pro čas stárnutí 0 hodin, 336 hodin, 672 hodin a 1008 hodin. Všechny průměrné hodnoty elektrického odporu byly zaznamenány do grafu číslo 2, aby byla vidět změna odporu v čase. V grafu číslo 2 je velice zajímavé, že odpor u všech pájecích profilů po uplynutí 336 hodin v teplotně-vlhkostní komoře klesne a poté již pouze roste. V našem případě jsou nejdůležitější dvě hodnoty. Je to velikost elektrického odporu pro čas 0 hodin a odpor po ukončení zrychleného procesu stárnutí. Proto byly vytvořeny výbrusy jen pro tyto dva časy. Pokud bychom měli pouze průměrné hodnoty odporů pro různé doby stárnutí, vycházel by jako nejlepší profil b (100-100-165). Odpor po zapájení spoje s tímto teplotním profilem je v porovnání s ostatními profily nejmenší a má také nejmenší nárůst odporu v čase.

Abychom mohli statisticky porovnat soubor naměřených hodnot, využili jsme oboustranný dvouvýběrový t – test na hladině významnosti 95 %. Tento test ukáže, zda nastavení pájecí pece a proces stárnutí statisticky ovlivnilo či neovlivnilo měřené vzorky. Pokud se podíváme do tabulky č. 11, kde jsou výsledky t-testu mezi všemi pájecími profily pro všechny časy stárnutí, vidíme statisticky významné rozdíly pro čas 0 hodin mezi pájecími profily a/A (80-80-170/80-80-190), A/b (80-80-190/100-100-165) a mezi profily A/B (80-80-190/100-100-185). Z toho můžeme konstatovat, že pájecí profil A (80-80-190) se pro čas 0

hodin statisticky významně liší od zbývajících profilů. Pokud se zaměříme na čas stárnutí 1008 hodin, je zde pouze jeden statisticky významný rozdíl, a to mezi pájecím profilem A (80-80-190) a pájecím profilem b (100-100-165).

V tabulce 12, ve které jsou výsledky t-testů mezi počáteční a koncovou hodnotou pro všechny čtyři pájecí profily, vidíme, že u všech profilů došlo k statisticky významnému rozdílu na hladině významnosti 95 %. Z toho lze usoudit, že v teplotně vlhkostní komoře proběhl proces degradace pájených spojů. Nejmenší změnu pozorujeme u počáteční a koncové hodnoty pájecího profilu b (100-100-165).

Pokud se zaměříme na růst intermetalické vrstvy v tabulkách číslo 13 a 14, můžeme vidět pro čas stárnutí 0 hodin nejmenší šířku intermetalické vrstvy pro pájecí profil A (80-80-190), největší intermetalická vrstva vznikla při pájecím profilu a (80-80-170). Z tohoto poznatku lze usoudit, že značný vliv na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy má teplota ve třetí fázi pájecího profilu neboli teplota, při které dochází k přetavení pájecí pasty.

Dalším velice důležitým parametrem je velikost nárůstu intermetalické vrstvy v čase. Nejlépe v tomto ohledu vychází pájecí profil b (100-100-165). Průměrný nárůst tloušťky je 0,41 μm . U tohoto pájecího profilu roste intermetalická vrstva nejpomaleji. Profil b (100-100-165) má v porovnání s ostatními profily vyšší teplotu v prvních dvou částech pájecí pece, ve třetí části nejnižší. Z toho lze usoudit, že zvýšením teploty v předehřevu a v zóně smáčení, zároveň snížením teploty v zóně přetavení, můžeme vytvořit pájený spoj, ve kterém dochází k nejpomalejšímu růstu intermetalické vrstvy ze všech zkoumaných pájecích profilů.

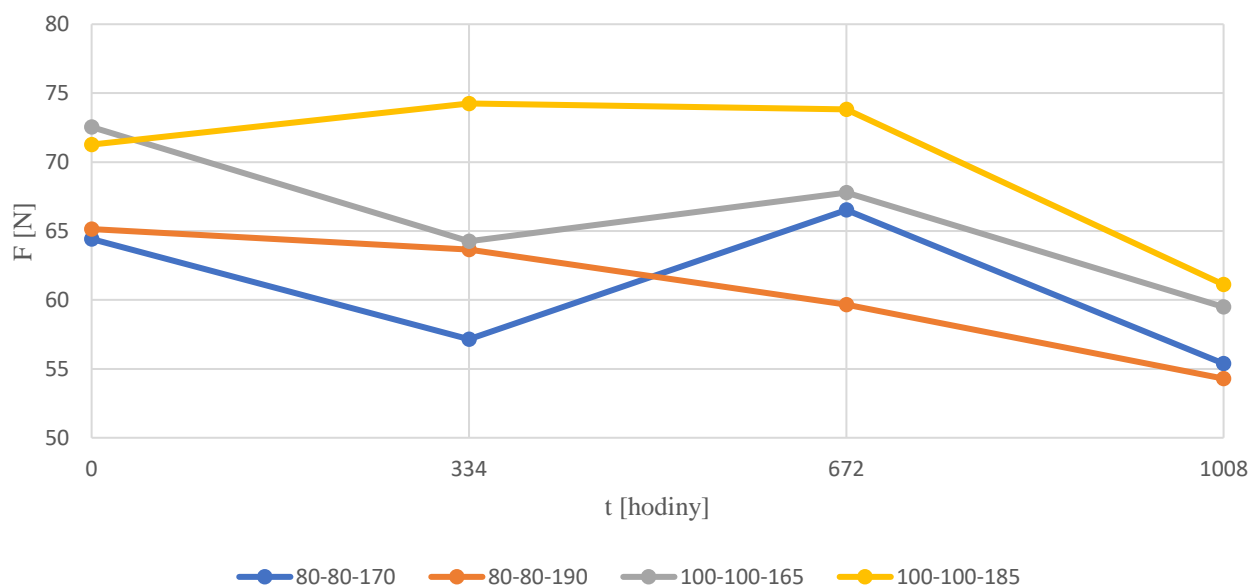
Po vyhodnocení všech výsledků měření se jako nejlepší pájecí profil, z pohledu velikosti odporu v teplotně-vlhkostní komoře, jeví pájecí profil b (100-100-165).

V tabulce č. 15 jsou uvedeny průměrné hodnoty síly F , která byla potřeba pro odtržení součástky z DPS pro různé druhy stárnutí:

teplotní profil	t [hodiny]	0	336	672	1008
a	F [N]	64,42	57,15	66,52	55,38
	Variační koeficient [-]	0,14	0,17	0,10	0,12
A	F [N]	65,14	63,64	59,65	54,29
	Variační koeficient [-]	0,13	0,17	0,08	0,12
b	F [N]	72,54	64,26	67,79	59,49
	Variační koeficient [-]	0,13	0,16	0,13	0,18
B	F [N]	71,26	74,25	73,83	61,11
	Variační koeficient [-]	0,12	0,13	0,09	0,13

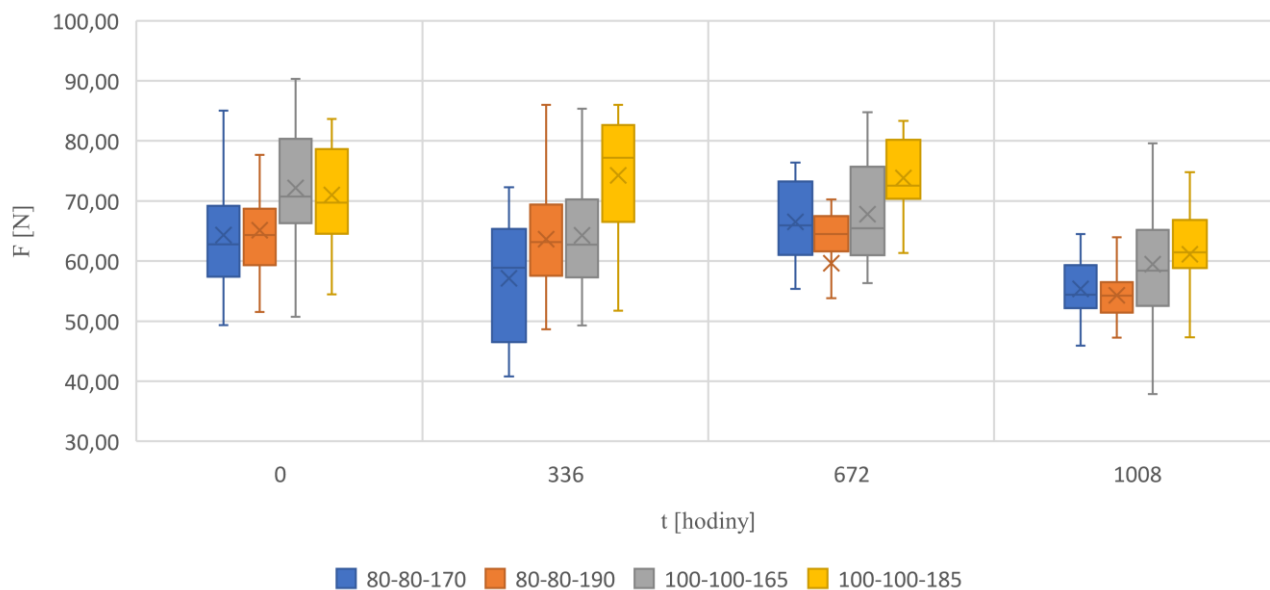
Tabulka 15: Průměrné hodnoty síly F pro různé pájecí profily a variační koeficienty

Změny průměrné velikosti smykové síly pro různá nastavení pájecí pece



Graf 5: Změny průměrné velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece



Graf 6: Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

T - test - p - hodnoty - Teplotně vlhkostní komora				
	0	336	672	10008
a/A	0,7385	0,1199	0,3501	0,6014
a/b	0,0025	0,0873	0,6825	0,1602
a/B	0,0054	0,0002	0,0096	0,0204
A/b	0,0052	0,8824	0,2198	0,0741
A/B	0,0115	0,0141	0,0003	0,0056
b/B	0,6346	0,0190	0,0527	0,5995

Tabulka 16: T-test – teplotně-vlhkostní komora – rozdíl mezi pájecími profily – smyková síla

T - test - p - hodnoty - Teplotně vlhkostní komora	
	počáteční / koncová hodnota
a/a	0,0004
A/A	0,0000
b/b	0,0001
B/B	0,0002

Tabulka 17: T-test – teplotně-vlhkostní komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – smyková síla

Nyní se zaměříme na hodnocení pájecího profilu z pohledu změn velikostí smykových sil pro stárnutí v teplotně-vlhkostní komoře. V grafu číslo 5 jsou vyneseny průměrné síly v různých časech stárnutí pro všechny čtyři pájecí profily. Zajímavé je, že u pájecího profilu A (80-80-190) dochází pouze ke snižování potřebné smykové síly k odtržení součástky z DPS. Ostatní profily mají v určité části nárůst smykové síly. Proto jsme provedli u pájecího profilu a

(80-80-170) t-test mezi body v čase stárnutí 336 hodin a 672 hodin. Tento test měl určit, zda je zde statisticky významný rozdíl. Výsledek t-testu je 0,0097 při hladině významnosti 95 % znamená statistický rozdíl. V tomto případě je pro nás také důležitá počáteční a koncová hodnota smykové síly. Jako nejlepší pájecí profily podle průměrné hodnoty se jeví b (100-100-165) a B (100-100-185). Pokud uděláme t-test mezi těmito dvěma pájecími profily pro čas stárnutí 0 hodin a 1008 hodin, viz tabulka číslo 16, dostáváme odpověď, že mezi těmito pájecími profily není statisticky významný rozdíl. Jediný rozdíl mezi těmito profily je v čase stárnutí 336 hodin. Z výsledků plyne, že vyšší teplota v části přehřevu a smáčení způsobí lepší mechanické vlastnosti. Na druhou stranu lze také usoudit, že hodnota teploty v zóně přetavení nemá téměř žádný vliv na velikosti smykové síly v počátečních a koncových bodech, ale ovlivňuje velikost smykové síly při procesu stárnutí.

Pokud tyto poznatky dáme do souvislosti s tloušťkou intermetalické vrstvy, je zde poměrně značný rozdíl mezi profily b (100-100-165) a B (100-100-185). U pájecího profilu b (100-100-165) je změna šířky intermetalické vrstvy 0,41 μm nejmenší ze všech. Pájecí profil B (100-100-185) má změnu šířky intermetalické vrstvy 0,93 μm největší. Z tohoto poznatku lze usoudit, že velikost potřebné smykové síly na odtržení součástky nezávisí na šířce intermetalické vrstvy. Toto tvrzení potvrzují výsledky v části 5.8.3.1. Pájený spoj praskl v intermetalické vrstvě – pájka – vodivý motiv pouze jednou, a to v čase 0 hodin pro pájecí profil B (100-100-185). Z měření také vyplývá, že pájené spoje praskají nejčastěji v intermetalické vrstvě – vodivá ploška součástky – pájka.

Po vyhodnocení všech dostupných výsledků vychází jako nejlepší teplotní profil b (100-100-165). Je to z důvodu nejmenšího nárůstu šířky intermetalické vrstvy a velké smykové síly. A to jak na začátku, tak na konci stárnutí.

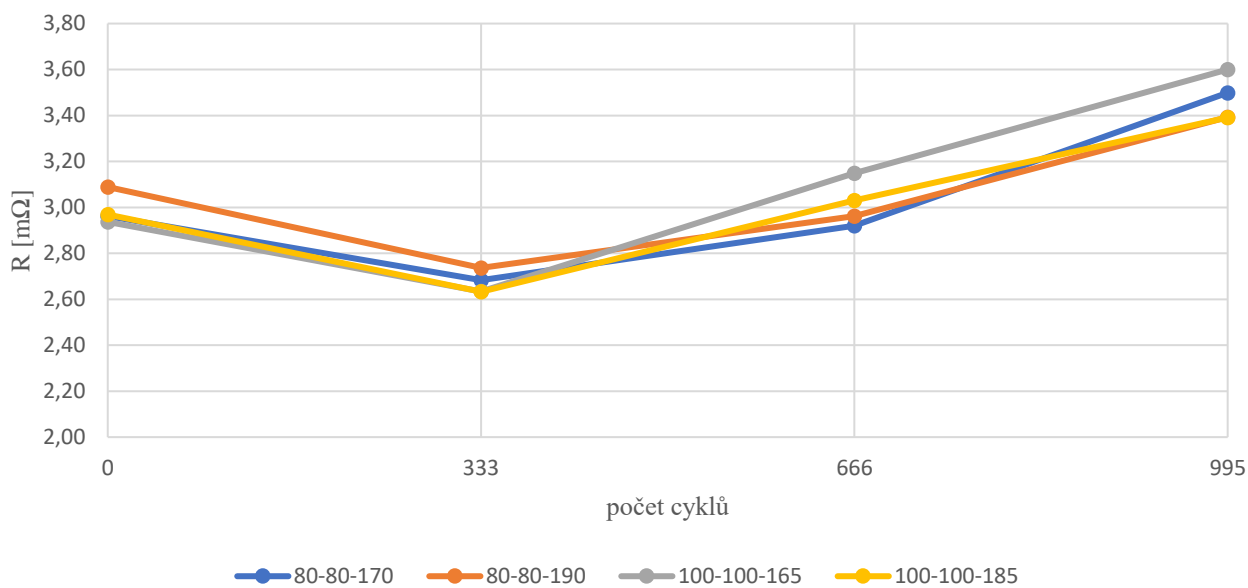
5.8.2 Šoková komora

V tabulce č. 18 jsou uvedeny průměrné hodnoty odporu v $m\Omega$ po určitém počtu cyklů pro všechny čtyři teplotní profily:

teplotní profil	Počet cyklů	0	333	666	995
a	R [$m\Omega$]	2,96	2,68	2,92	3,50
	Variační koeficient [-]	0,14	0,18	0,13	0,11
A	R [$m\Omega$]	3,09	2,74	2,96	3,39
	Variační koeficient [-]	0,14	0,17	0,17	0,11
b	R [$m\Omega$]	2,94	2,63	3,15	3,60
	Variační koeficient [-]	0,17	0,17	0,12	0,09
B	R [$m\Omega$]	2,97	2,63	3,03	3,39
	Variační koeficient [-]	0,30	0,16	0,10	0,13

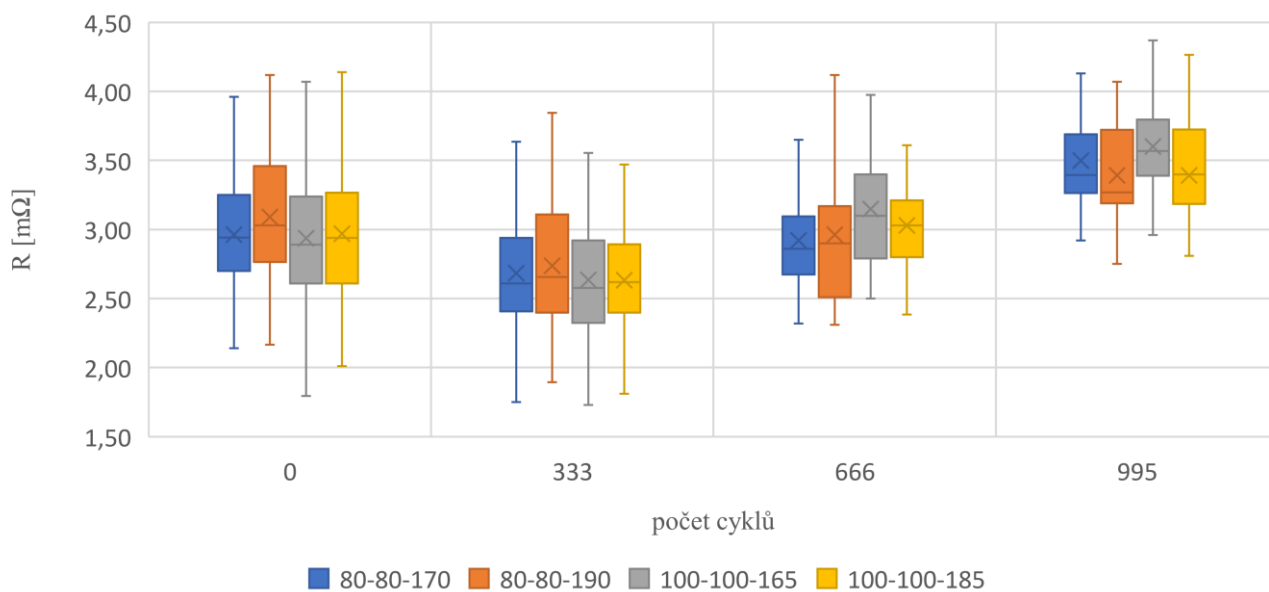
Tabulka 18: Průměrné hodnoty odporů pro různé pájecí profily a variační koeficienty

Změny průměrné velikosti elektrického odporu pro různá nastavení pájecí pece



Graf 7: Změny průměrné velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece



Graf 8: Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

T - test - p - hodnoty - šoková komora				
	0 cyklů	333 cyklů	666 cyklů	995 cyklů
a/A	0,007	0,502	0,771	0,304
a/b	0,605	0,538	0,064	0,314
a/B	0,897	0,513	0,323	0,348
A/b	0,003	0,188	0,184	0,032
A/B	0,014	0,164	0,602	0,988
b/B	0,540	0,989	0,269	0,056

Tabulka 19: T-test – šoková komora – rozdíl mezi pájecími profily – elektrický odpor

T - test - p - hodnoty - šoková komora	
	počáteční / koncová hodnota
a/a	0,0000
A/A	0,0007
b/b	0,0000
B/B	0,0000

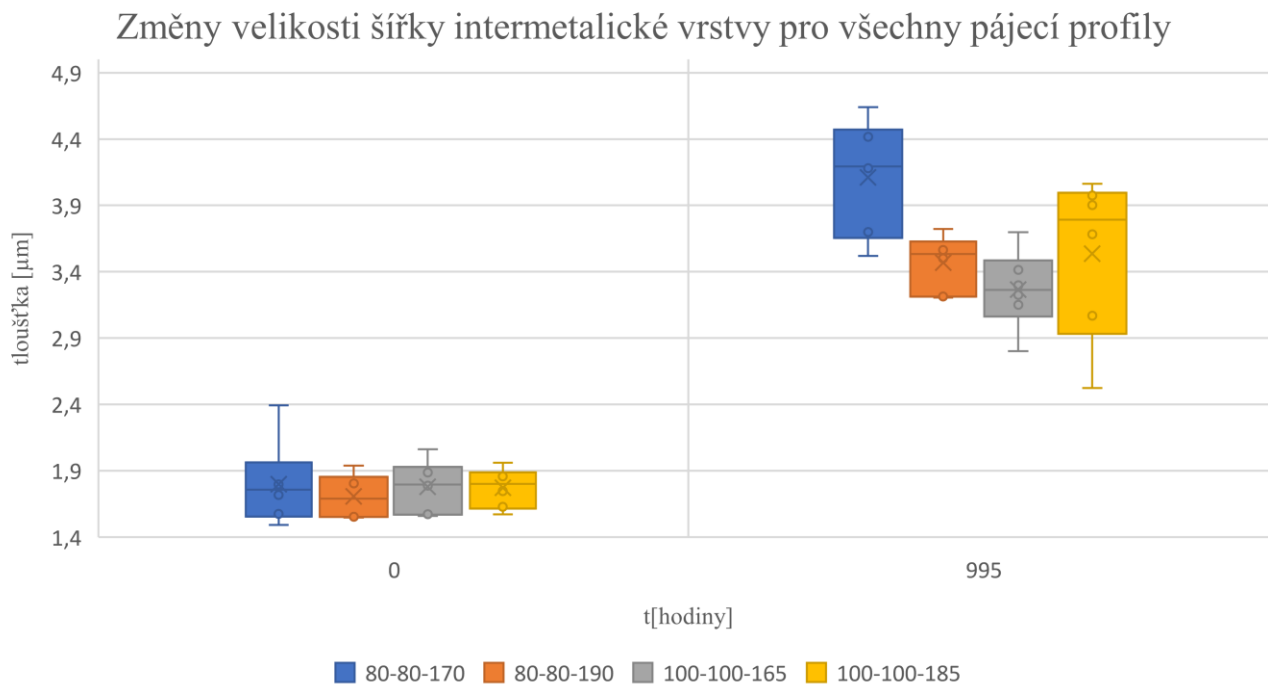
Tabulka 20: T-test – šoková komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – elektrický odpor

Šoková komora – 0 cyklů			
značení	tloušťka [μm]	odchylka [%]	medián [μm]
a	1,80	9,05	1,74
A	1,71	8,90	1,69
b	1,78	9,73	1,80
B	1,77	9,83	1,79

Tabulka 21: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Šoková komora - 0 cyklů

Šoková komora – 995 cyklů			
značení	tloušťka [μm]	odchylka [%]	medián [μm]
a	4,11	16,13	4,21
A	3,47	14,64	3,59
b	3,26	13,00	3,28
B	3,54	15,15	3,70

Tabulka 22: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Šoková komora – 995 cyklů



Graf 9: Změny velikosti tloušťky intermetalické vrstvy v šokové komoře pro různá nastavení pájecí pece

Do tabulky číslo 18 byly uvedeny průměrné hodnoty odporů a vypočteny variační koeficienty pro 0 cyklů, 333 cyklů, 666 cyklů a 995 cyklů. V grafu číslo 7 jsou zaznamenány změny odporu v čase. Z grafu je patrné, že všechny profily se chovají v šokové komoře velice podobně. K dosažení jistoty, že mezi pájecími profily opravdu nejsou statistické rozdíly, byly provedeny t-testy mezi jednotlivými profily viz tabulka číslo 19. T-testy odhalily statistický rozdíl před začátkem cyklování mezi pájecími profily a/A (80-80-170/80-80-190), A/b (80-80-

190/100-100-165) a A/B (80-80-190/100-100-185). Po uplynutí 995 cyklů můžeme pozorovat statisticky významný rozdíl pouze mezi pájecím profilem A/b (80-80-190/100-100-165). Z toho lze vyvodit, že pájecí profil nemá zásadní vliv na velikosti odporu při cyklické změně teploty.

Pokud se podíváme na souvislost velikosti odporu s růstem šířky intermetalické vrstvy, viz tabulky číslo 21 a 22, vidíme, že v šokové komoře došlo k rychlejšímu růstu intermetalické vrstvy než v teplotně-vlhkostní komoře. Velice zajímavé je, že pájecí profil b (100-100-165) má největší odpor po 995 cyklech a nejužší intermetalickou vrstvu. Z toho lze vyvodit, že při teplotním cyklování velikost odporu nezávisí na šířce intermetalické vrstvy, ale závisí na jiných parametrech (mohou to být například praskliny v pájeném spoji).

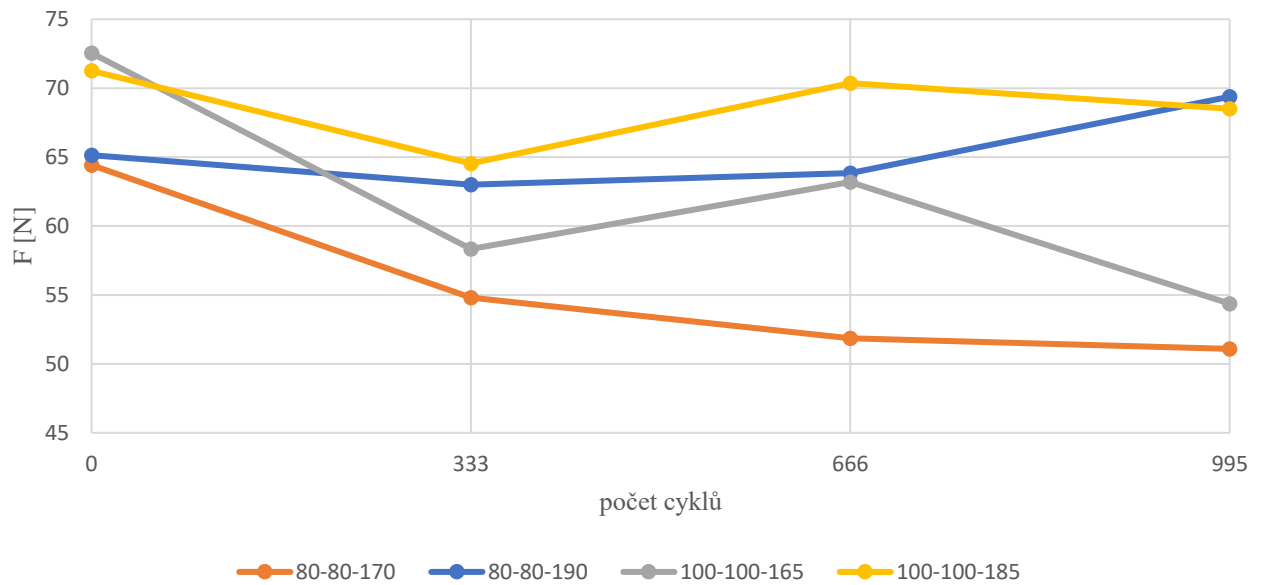
V tomto případě je velice těžké určit, jaký pájecí profil je nejvhodnější. Pokud porovnáme přírůstek intermetalické vrstvy a změnu odporu v čase, jako nejvhodnější vychází pájecí profil A (80-80-190). Je zde nejmenší přírůstek odporu v čase a druhý nejmenší přírůstek intermetalické vrstvy.

V tabulce č. 23 jsou uvedeny průměrné hodnoty síly F, která byla potřeba pro odtržení součástky z DPS po určitém počtu cyklů:

teplotní profil	Počet cyklů	0	333	666	995
a	F [N]	64,42	54,81	51,86	51,09
	Variační koeficient [-]	0,14	0,15	0,08	0,21
A	F [N]	65,14	63	63,83	69,38
	Variační koeficient [-]	0,13	0,13	0,15	0,13
b	F [N]	72,54	58,34	63,19	54,37
	Variační koeficient [-]	0,13	0,19	0,16	0,19
B	F [N]	71,26	64,54	70,37	68,5
	Variační koeficient [-]	0,12	0,17	0,13	0,18

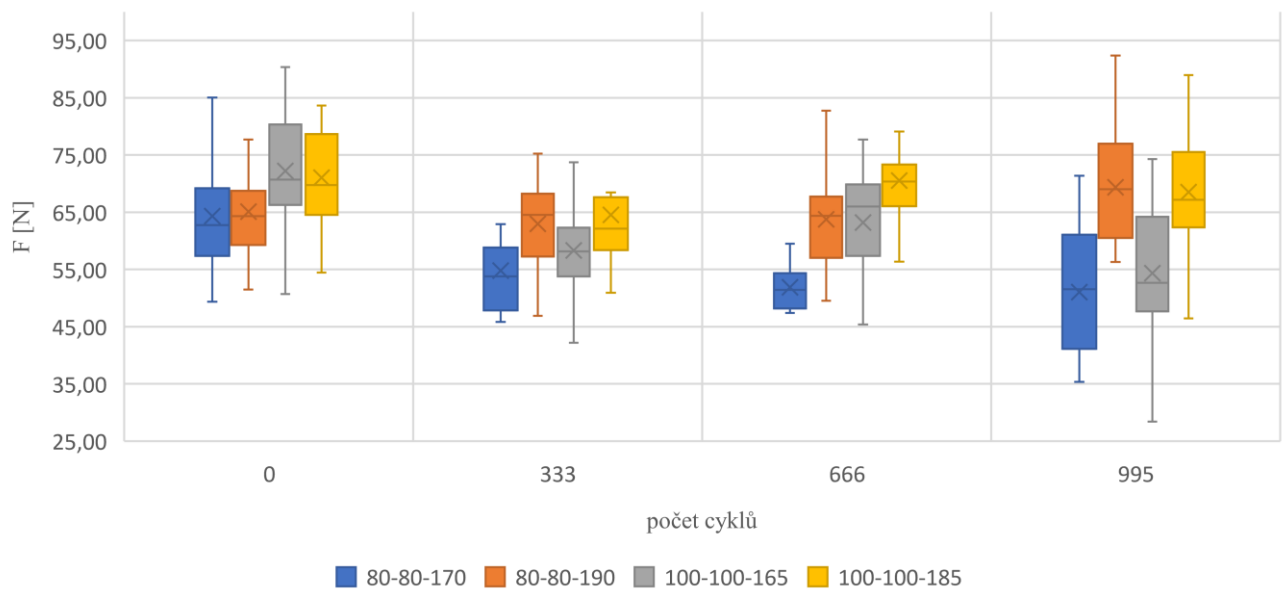
Tabulka 23: Průměrné hodnoty síly F pro různé pájecí profily a variační koeficienty

Změny průměrné velikosti smykové síly pro různá nastavení pájecí pece



Graf 10: Změny průměrné velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece



Graf 11: Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece

t - test - p - hodnoty - šoková komora				
	0 cyklů	333 cyklů	666 cyklů	995 cyklů
a/A	0,7385	0,0158	0,0003	0,0000
a/b	0,0025	0,3593	0,0008	0,3314
a/B	0,0054	0,0158	0,0000	0,0000
A/b	0,0052	0,2318	0,8832	0,0000
A/B	0,0115	0,6878	0,0734	0,8070
b/B	0,6346	0,1628	0,0630	0,0004

Tabulka 24: T-test – šoková komora – rozdíl mezi pájecími profily – smyková síla

t - test - p - hodnoty - šoková komora	
	počáteční / koncová hodnota
a/a	0,0000
A/A	0,1065
b/b	0,0000
B/B	0,4058

Tabulka 25: T-test – šoková komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – smyková síla

V tabulce číslo 23 jsou uvedeny průměrné hodnoty potřebné smykové síly pro odtržení součástky z DPS a variační koeficienty. Průměrné hodnoty smykové síly jsme zobrazili do grafu číslo 10. Oproti elektrickému odporu jsou zde mnohem znatelnější změny v jednotlivých pájecích profilech. Pokud bychom se měli rozhodovat pouze podle průměrné velikosti smykové síly, jako nejlepší se jeví teplotní profily A (80-80-190) a B (100-100-185). U pájecího profilu A (80-80-190) je zajímavé, že síla oproti začátku narostla. U tohoto pájecího profilu by bylo vhodné a velmi zajímavé pokračovat v procesu stárnutí. Proto jsme u tohoto teplotního profilu udělali t-test pro body 666 cyklů a 995 cyklů. Výsledek t-testu je 0,098. Proto lze tento růst prohlásit za statisticky nevýznamný na hladině 95 %. Z grafu číslo 10 lze také usoudit, že největší vliv na velikosti konečné smykové síly má teplota v zóně přetavení, a ne teplota zóny předehřevu a smáčení. Vyšší teplota v zóně přetavení způsobí lepší mechanické vlastnosti spoje z hlediska dlouhodobého teplotního cyklování.

V tabulce číslo 25 je vypočítána hodnota t-testu pro všechny pájecí profily, porovnávají se statistické rozdíly před měřením a po měření. Tato tabulka potvrzuje, že u A (80-80-190) a B (100-100-185) nedošlo ke vzniku statistického rozdílu. Tyto pájecí profily odolaly teplotnímu cyklování téměř bez úhony. U zbývajících profilů byl pokles smykové síly značný.

Pokud výsledky dáme do souvislosti s intermetalickou vrstvou, je nárůst vrstvy u dvou teplotních profilů téměř stejný. Pro profil A (80-80-190) je $1,76\mu\text{m}$ a pro B (100-100-185) je

1,77 μ m. U profilu a (80-80-170) je přírůstek 2,31 μ m a u b (100-100-165) je 1,48 μ m. Z těchto údajů lze předpokládat, že šířka intermetalické vrstvy neovlivňuje mechanické vlastnosti pájených spojů při teplotním cyklování. Pokud bychom se měli rozhodnout pro vhodný pájecí profil, v tomto případě jsou to profily A (80-80-190) a B (100-100-185). Oba vykazují z hlediska mechanických vlastností téměř shodné výsledky. Z tohoto lze usoudit, že pájené spoje s vyšší teplotou v zóně přetavení odolávají lépe teplotnímu cyklování z pohledu mechanických vlastností. Pokud se podíváme na způsob odtržení součástky z DPS, je zde velice zajímavé, že pro počet cyklů 0 a 333 spoje praskají ve větší polovině až ve dvou třetinách případů v intermetalické vrstvě-vodivá ploška součástky-pájka a ve zbývajícím počtu praskají v pájce. Po 666 cyklech dochází u profilů a, A, b ke stejnému jevu. U profilu B se, stejně jako u všech profilů po 995 cyklech, poměry otočí.

5.8.3 Způsob odtržení

Značení	Místo vzniku trhliny
A	Prasklá součástka
B	Intermetalická vrstva-vodivá ploška součástky-pájka
C	Vodivá ploška součástky
D	Pájka
E	Intermetalická vrstva-pájka-vodivý motiv
F	Vodivý motiv

Tabulka 26: Vysvětlení značení

5.8.3.1 Teplotně-vlhkostní komora

čas 0 h	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	71 %	0 %	29 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	82 %	0 %	18 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	57 %	11 %	32 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	57 %	7 %	32 %	4 %	0 %

Tabulka 27: Místo vzniku praskliny pro čas 0 h

čas 336 h	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	50 %	7 %	43 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	64 %	7 %	29 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	71 %	0 %	29 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	29 %	0 %	71 %	0 %	0 %

Tabulka 28: Místo vzniku praskliny pro čas 336 h

čas 672 h	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	50 %	7 %	43 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	50 %	14 %	36 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	36 %	7 %	57 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	50 %	0 %	50 %	0 %	0 %

Tabulka 29: Místo vzniku praskliny pro čas 672 h

čas 1008 h	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	76 %	0 %	24 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	33 %	5 %	62 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	62 %	0 %	38 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	76 %	0 %	24 %	0 %	0 %

Tabulka 30: Místo vzniku praskliny pro čas 1008 h

5.8.3.2 Šoková komora

počet cyklů 0	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	71 %	0 %	29 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	82 %	0 %	18 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	57 %	11 %	32 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	57 %	7 %	32 %	4 %	0 %

Tabulka 31: Místo vzniku praskliny po 0 cyklech

počet cyklů 333	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	57 %	0 %	43 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	57 %	0 %	43 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	86 %	0 %	14 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	64 %	0 %	36 %	0 %	0 %

Tabulka 32: Místo vzniku praskliny po 333 cyklech

počet cyklů 666	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	57 %	0 %	43 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	64 %	0 %	36 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	57 %	0 %	43 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	43 %	0 %	57 %	0 %	0 %

Tabulka 33: Místo vzniku praskliny po 666 cyklech

počet cyklů 995	A	B	C	D	E	F
80-80-170	0 %	33 %	0 %	67 %	0 %	0 %
80-80-190	0 %	38 %	0 %	62 %	0 %	0 %
100-100-165	0 %	43 %	0 %	57 %	0 %	0 %
100-100-185	0 %	38 %	0 %	62 %	0 %	0 %

Tabulka 34: Místo vzniku praskliny po 995 cyklech

6 Ekonomická část

V ekonomické části bakalářské práce jsme zjišťovali, zda se vyplatí či nevyplatí zřízení testovacího střediska ve firmě, která se zabývá výrobou desek plošných spojů pro automobilový průmysl. Model počítá s výrobou desek plošných spojů do brzdového systému automobilů, selhání takového zařízení by mohlo mít i katastrofické následky.

Pokud se rozhodujeme o realizaci projektu, musíme zjistit, jaké finanční prostředky nám realizace přinese. Proto jsme se rozhodli zvolit NPVC, které nám má určit celkovou současnou hodnotu nákladů a poté dokážeme vypočítat RCF.

6.1 NPV – Metoda čisté současné hodnoty (Net present value)

Ve firmách ji využívají manažeři z důvodu maximalizace tržní hodnoty firmy. Výsledkem této metody je rozdíl mezi současnou hodnotou očekávaných příjmů z investice a nákladů spojené s realizací a provozem projektu. Nevýhodou této metody je určení diskontované sazby, protože je velice obtížné předpokládat budoucí vývoj ekonomiky. Diskont udává riziko investice a časovou cenu peněz.

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \sum_{i=3}^N \frac{CF_N}{(1+r)^n} \quad (5.1)$$

$$NPV = CF_0 + \sum_{i=1}^N \frac{CF_N}{(1+r)^n} \quad (5.2)$$

Rovnice 5: Vzorce pro výpočet NPV

CF – předpokládaný hotovostní tok v roce n

CF₀ – hotovostní tok v roce nula

n – doba životnosti projektu

r – kapitálové náklady na investici (diskontní sazba)

Pokud máme všechny potřebné vstupy a vypočteme NPV, ve většině případů platí velice jednoduché pravidlo. Když je NPV < 0 je projekt nevhodné realizovat. Pokud je NPV > 0 je projekt výhodný, protože přinese zvýšení hodnoty firmy. Výše uvedené podmínky platí pouze pro NPV anuitní. Pokud bychom měli více projektů a všechny tyto projekty by měly kladné NPV, volíme projekt s největším NPV[37] [38].

Dalším typem je takzvané nákladové NPV neboli NPVC. V tomto případě řešíme pouze provozní a investiční náklady, které jsou spojeny s realizací a provozem projektu. Pokud

máme tedy více projektů a rozhodujeme se pomocí NPVC, zvolíme takový projekt, který má nejmenší záporné číslo. NPVC počítáme, pokud dopředu nevíme, jak velký bude mít investice finanční přínos.

6.2 RCF – Roční ekvivalentní peněžní tok

K určení ročního ekvivalentního peněžního toku musíme čistou současnou hodnotu projektu vynásobit anuitním faktorem. Výsledkem je, že dojde k rovnoměrnému rozdělení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let po celou dobu životnosti. Tato metoda je využívána pro porovnání projektů, které nemají stejnou dobu životnosti [39].

$$RCF = \frac{q^n * (q - 1)}{q^n - 1} * NPV \quad (6.1)$$

$$q = 1 + i \quad (6.2)$$

Rovnice 6: Vzorec pro výpočet RCF

i – roční úroková míra

n – životnost projektu

NPV – čistá současná hodnota

6.3 IRR – Metoda vnitřního výnosového procenta (Internal rate of return)

Pomocí této metody hledáme diskontní sazbu, při které dochází k rentabilitě investice. Hledáme takovou diskontní sazbu, při které dojde k pokrytí všech nákladů, které jsou spojeny s danou investicí.

$$0 = CF_0 + \frac{CF_1}{1 + IRR} + \frac{CF_2}{(1 + IRR)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + IRR)^n} \quad (7.1)$$

$$0 = C_0 + \sum_{i=1}^N \frac{CF_N}{(1 + IRR)^n} \quad (7.2)$$

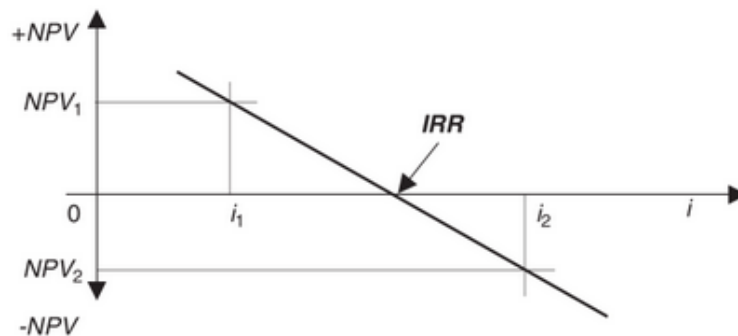
Rovnice 7: Vzorce pro výpočet IRR

CF_0 – hotovostní tok v roce nula

CF_n – předpokládaný hotovostní tok v roce n

n – doba životnosti projektu

Při výpočtu vycházíme ze stejných hotovostních toků jako při metodě NPV. V této metodě neřešíme větší nebo menší než nula jako v metodě minulé. Zde porovnáváme, jestli je $IRR > r$. Pokud předchozí podmínka platí, tento projekt je pro podnik výhodný. R zde představuje alternativní náklad. Alternativní náklady jsou náklady obětované příležitosti. Pokud by bylo $IRR < r$, tento projekt není vhodný pro realizaci. Obrázek č. 22 ukazuje, jak graficky určit IRR, pokud jsou známy hotovostní toky v určitých obdobích. Výhoda IRR je, že ukazuje návratnost původně investovaných korun. Pokud se pomocí IRR rozhodujeme mezi dvěma projekty, které se navzájem vylučují, nestačí porovnat pouze velikost IRR, ale je také důležité, jestli mají projekty stejný finanční základ [37] [40].



Obrázek 22: Grafické určení IRR [39]

6.4 Model

Po konzultaci s vedoucím práce a na základě zkušeností z reálných pájecích linek jsme určili chybovost výrobní linky bez testování a bez úprav parametrů výrobního procesu na 1 %. Pokud by došlo k zřízení testovacího a měřicího střediska, došlo by s největší pravděpodobností k poklesu na 0,5 %. Zvolili jsme nákup tří zařízení, které bude firma využívat pro simulaci pracovních podmínek v automobilu a urychlovat proces stárnutí. Prvním zařízením je teplotně-vlhkostní komora, ve které se nastaví požadovaná teplota a vlhkost. Druhým zařízením je šoková komora, která má dvě části, horkou část až 125 °C a studenou část až -40 °C. Dochází zde k rychlému převozu testovacích vzorků mezi horkou a studenou částí. Třetím zařízením je vibrační komora, kde dochází k simulování vibrací, které jsou v automobilu vždy, pokud je v provozu.

6.4.1 Tvorba modelu

Při rozhodování, zda má nebo nemá být projekt realizován, je nutné znát jeho vstupy a výstupy. Velice důležitým parametrem, který nám ovlivňuje konečnou hodnotu NPVC a RCF, je diskont. Určení diskontu je poměrně složitá věc. Pokud určujeme diskont, musíme počítat s inflací, výnosem a také s rizikem. V našem případě byla velikost diskontu určena na 10 %. Inlace 3 % + výnos 2 % a 5 % je riziko spojené s investicí do projektu. V části 6.5.1 je provedena citlivostní analýza, protože u firem může diskont dosahovat různých hodnot.

6.4.2 Investiční náklady

Počítáme zřízení nového oddělení. Ceny klimatické komory, šokové komory, vibrační komory a elektronového mikroskopu poskytla firma SPECION, s.r.o. Velikost klimatické komory jsme určili na 200 litrů. Teplotní gradient pro ohřev a chladnutí je 10 K/min. Cena klimatické komory je 1 197 450 Kč bez DPH. U šokové komory je uvedena cena pro komory s objemem 32 litrů nebo 66 litrů. Pro náš model byla zvolena šoková komora s objemem 66 litrů. Cena šokové komory TSS-70/66 je 1 463 550 Kč bez DPH. U vibrační komory je uvedena pouze řádová cena, to samé u elektronového mikroskopu. Všechny ceny jsou uvedeny v tabulce č. 35. Celkový součet všech zařízení, které potřebujeme, vstupuje poté do výpočtu NPV jako hotovostní tok v roce nule.

Zařízení	Cena [Kč]
Klimatická komora	1 197 450
Trhačka	341 000
Šoková komora	1 463 550
Vibrační komora	3 991 500
Elektronový mikroskop	2 900 000
Zařízení na výbrusy	52 000
Miliohmometr s čtyřbodovou metodou	30 000
Celkem	9 975 500

Tabulka 35: Počáteční investice do vybavení

6.4.3 Provozní náklady

Mezi provozní náklady řadíme takové náklady, které přímo souvisí s provozem testovacího střediska. Jsou to náklady na obsluhu, náklady za elektrickou energii. Ještě musíme zahrnout nákup destilované vody pro klimatickou komoru. Firma SPECION, s.r.o. poskytla informace ohledně údržby a servisu komor. U klimatické komory nedochází k příliš častým poruchám, většinou dochází pouze k výměnám osvětlení v komoře a silikonového těsnění dveří. U šokové komory dochází ke stejným servisním úkonům, ale může navíc dojít k výměně kompresoru. S touto výměnou je počítáno v pátém roce provozu. Firma také doporučuje jednu

za rok kompletní čištění komor. U šokové komory je důležité mazání hřídele výtahu, který převáží vzorky mezi teplou a studenou částí, speciální vazelínou. U vibračních komor dochází k mazání mechanických částí.

6.4.3.1 Náklady na obsluhu

Uvažujeme pouze jednoho pracovníka. Hodinovou mzdu jsme stanovili na 400 Kč za hodinu. V této mzdě je již počítáno se zdravotním a sociálním pojištěním a odvodem daní. Mzda je poměrně vysoká, je to z důvodu velkého požadavku na vzdělání. Na takovou pozici by s největší pravděpodobností bylo požadováno vysokoškolské vzdělání. Také je velice důležité říct, že základní výpočet RCF uvažuje růst platů, růst byl zvolen na 3 % za rok.

6.4.3.2 Elektrická energie

Ve výpočtu spotřeby elektrické energie vycházíme ze štítkových hodnot komor na katedře Elektrotechnologie. Cyklus zrychleného stárnutí v klimaticko-vlhkostní komoře trvá okolo 3 měsíců a poté následuje vyhodnocení měření. Ve výpočtu není zahrnuto navýšení fixního poplatku. Důvodem je, že testovací středisko by pravděpodobně mělo menší odběr elektrické energie než výrobní proces. Není počítáno se změnou tarifu. Celková cena elektřiny byla určena 4,81 Kč/kWh.

Spotřeba elektrické energie pro jednotlivá zařízení je uvedena v tabulkách níže.

6.4.3.2.1 Výpočet spotřeby elektrické energie – Teplotně-vlhkostní komora

Spotřeba elektrické energie – Teplotně-vlhkostní komora	
Příkon [kW]	3,2
Čas [h]	2 016
Odebraná elektrická energie [kWh]	6 451,2
Cena elektřiny [Kč/kWh]	4,81
Celková cena [Kč]	31 030

Tabulka 36: Výpočet spotřeby – Teplotně-vlhkostní komora

6.4.3.2.2 Výpočet spotřeby elektrické energie – Šoková komora

Spotřeba elektrické energie – Šoková komora	
Příkon [W]	8 800
Čas [h]	1 008
Odebraná elektrická energie [Wh]	8 870 400
Odebraná elektrická energie[kWh]	8 870
Cena elektřiny [Kč/kWh]	4,81
Celková cena [Kč]	42 667

Tabulka 37: Výpočet spotřeby – Šoková komora

6.4.3.2.3 Výpočet spotřeby elektrické energie – Vibrační deska

Spotřeba elektrické energie – Vibrační deska	
Příkon [W]	700
Čas [h]	1 000
Odebraná elektrická energie [Wh]	700 000
Odebraná elektrická energie[kWh]	700
Cena elektřiny [Kč/kWh]	4,81
Celková cena [Kč]	3 367

Tabulka 38: Výpočet spotřeby – Vibrační deska

6.4.3.2.4 Výpočet spotřeby elektrické energie – Trhačka

Spotřeba elektrické energie – Trhačka	
Příkon maximální [W]	800
Příkon v klidu [W]	15
Čas potřebný k trhání [h]	53
Spotřebovaná energie [kWh]	32
Cena elektřiny [Kč/kWh]	4,81
Celková cena [Kč]	155

Tabulka 39: Výpočet spotřeby – Trhačka

6.4.3.2.5 Výpočet spotřeby elektrické energie – Elektronový mikroskop

Spotřeba elektrické energie – Elektronový mikroskop	
Příkon [W]	500
Čas [h]	20
Odebraná elektrická energie [Wh]	10 000
Odebraná elektrická energie[kWh]	10
Cena elektřiny [Kč/kWh]	4,81
Celková cena [Kč]	48

Tabulka 40: Výpočet spotřeby – Elektronový mikroskop

6.4.4 Výpočet NPV a RCF

Životnost	10										
Diskont [%]	10										
Růst platu [%]	3										
Růst elektřiny [%]	4										
Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Investice [Kč]	9 975 500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Obsluha [Kč]	0	360 000	370 800	381 924	393 382	405 183	417 339	429 859	442 755	456 037	469 718
Spotřeba elektrické energie [Kč]	0	77 267	80 358	83 572	86 915	90 391	94 007	97 767	101 678	105 745	109 975
Údržba [Kč]	0	3 000	3 000	3 000	3 000	15 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Provozní náklady [Kč]	0	756	794	833	875	919	965	1 013	1 064	1 117	1 173
Odpisy [Kč]	0	1 042 306	2 108 300	2 108 300	2 108 300	2 108 296	0	0	0	0	0
Celkové náklady [Kč]	0	441 023	454 951	469 329	484 172	511 493	515 311	531 639	548 496	565 899	583 866
Daňový štít	0	198 038	400 577	400 577	400 577	400 576	0	0	0	0	0
Cash flow	-9 975 500	-242 985	-54 374	-68 752	-83 595	-110 917	-515 311	-531 639	-548 496	-565 899	-583 866
NPVC	-10 639 662										
RCF [Kč]	-1 731 556										

Životnost projektu byla stanovena pomocí firmy SPECION, s.r.o. na 10 let. Tato životnost je dána životností šokové komory. Je velice důležité zmínit, že doba životnosti závisí na frekvenci využívání zařízení. Pro základní výpočet byl stanoven růst platů na 3 %, růst elektřiny na 4 % ročně. U růstu platů i elektřiny bylo vycházeno z období posledních deseti let, při předpokladu stejného nárůstu i v letech příštích. U odpisů bylo zvoleno rovnoměrné odepisování dlouhodobého majetku a poté sečteny jednotlivé roky u všech zařízení, které by firma nakoupila pro testovací středisko. Všechna použitá zařízení jsou ve druhé odpisové skupině, viz tabulka č. 41.

Odpisy					
Roky	1	2	3	4	5
Teplotně-vlhkostní komora	131 720	266 433	266 433	266 433	266 432
Šoková komora	160 991	325 640	325 640	325 640	325 639
Vibrační komora	439 065	888 109	888 109	888 109	888 108
Trhačka	37 510	75 873	75 873	75 873	75 872
Elektronový mikroskop	264 000	534 000	534 000	534 000	534 000
Zařízení na výbrusy	5 720	11 570	11 570	11 570	11 570
Miliohmmetr	3 300	6 675	6 675	6 675	6 675
Celkem	1 042 306	2 108 300	2 108 300	2 108 300	2 108 296

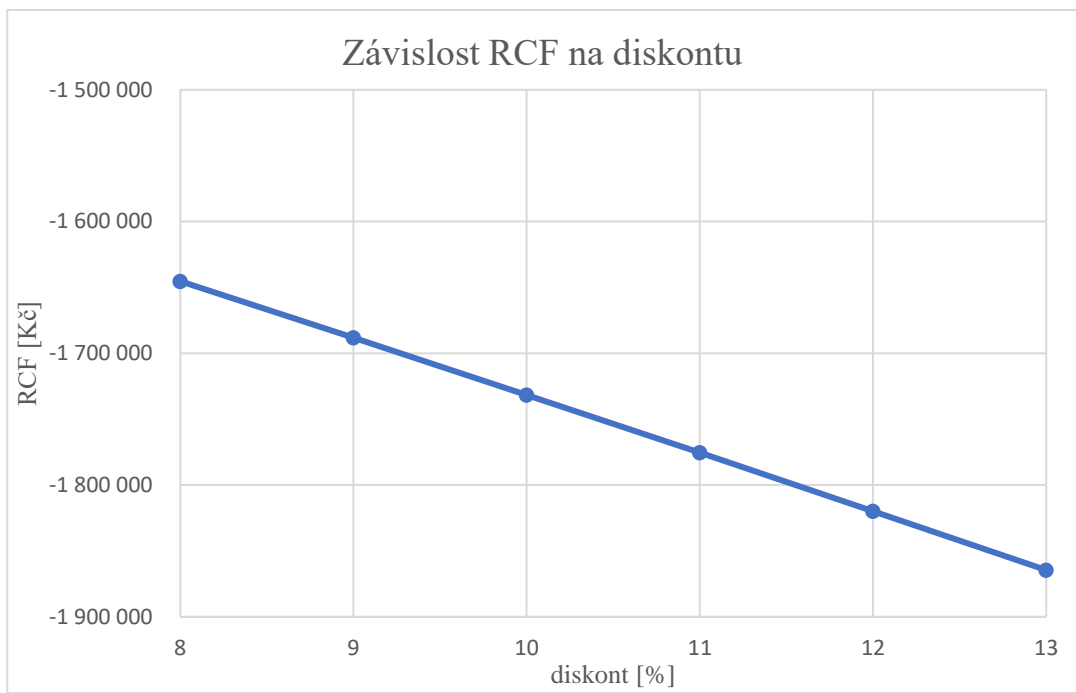
Tabulka 41: Odpisy všech zařízení

6.5 Citlivostní analýza

Úkolem citlivostní analýzy je zkoumat, jak se bude měnit RCF, pokud bude docházet ke změnám některých vstupních dat.

6.5.1 Závislost RCF na diskontu

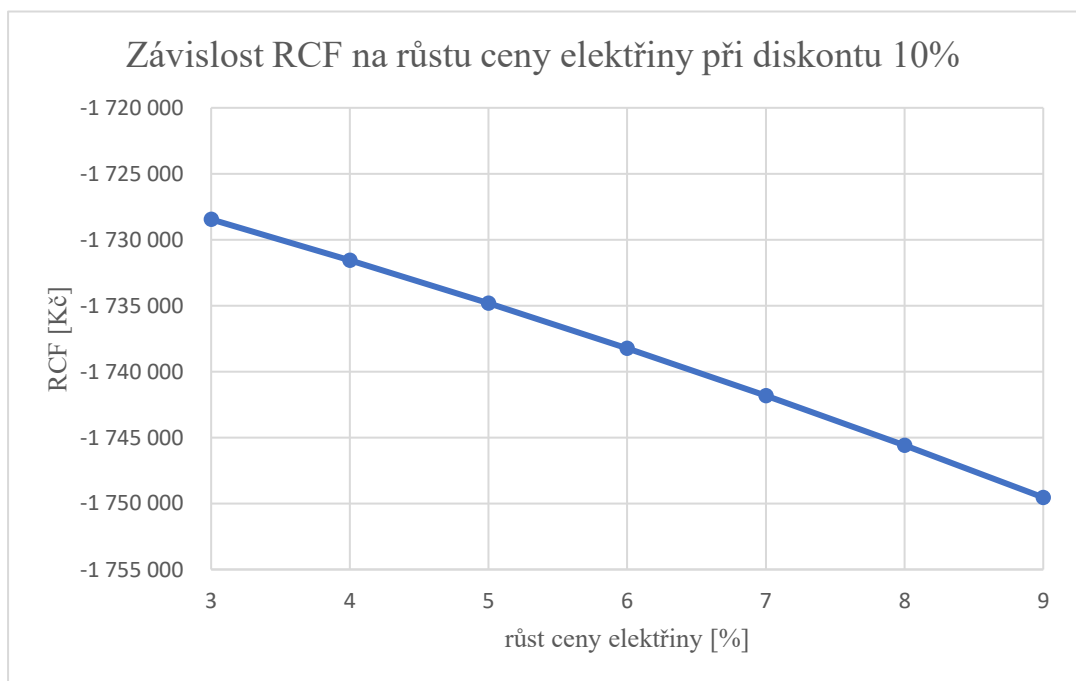
Pro základní výpočet uvažujeme diskont 10 %. V citlivostní analýze začínáme diskontem 8 % a končíme na 13 %. Z grafu č. 12 můžeme vidět, že přímka poměrně rychle klesá. Z toho plyne, že RCF je značně závislé na diskontu.



Graf 12: RCF na diskontu

6.5.2 Závislost RCF na růstu ceny elektřiny

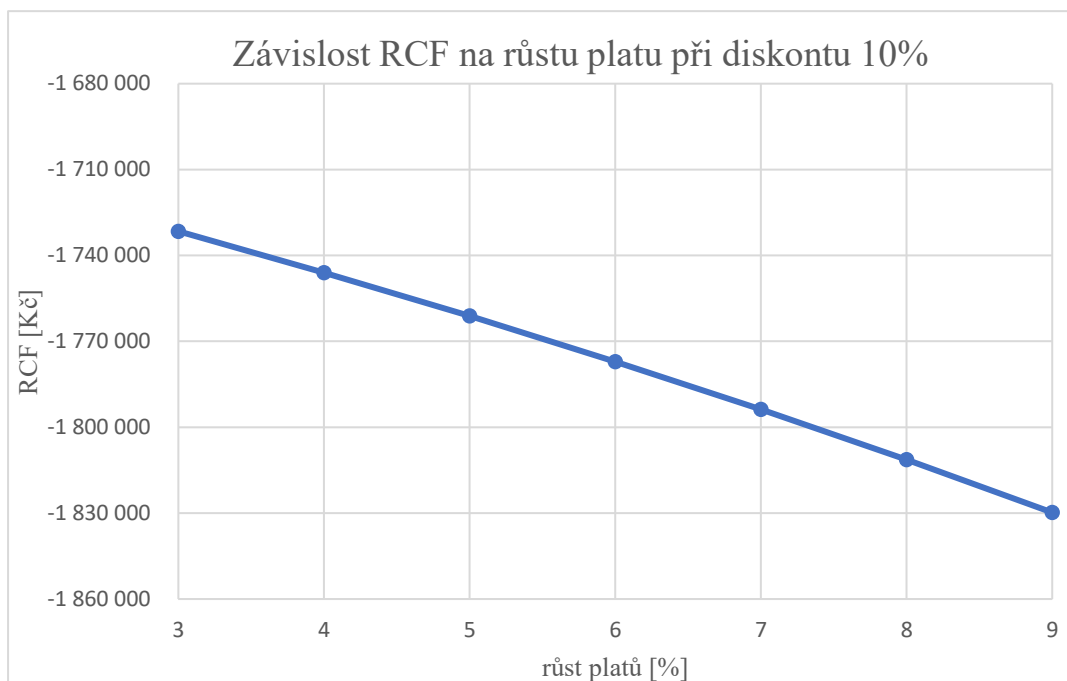
Pro výpočet uvažujeme diskont 10 %. Graf č. 13 ukazuje, jak se mění velikost RCF, pokud by došlo k procentuálnímu růstu ceny elektřiny.



Graf 13: Závislost RCF na růstu elektřiny

6.5.3 Závislost RCF na růstu mzdy zaměstnance

Pro výpočet uvažujeme diskont 10 %. Graf č. 14 ukazuje, jak se mění velikost RCF, pokud by docházelo k různému růstu mzdy zaměstnance.



Graf 14: Závislost RCF na růstu platů

6.6 Závěr v ekonomické části

V našem případě je velice obtížné přesně určit, jaké příjmy investice do testovacího střediska přinese. Jak bylo zmíněno na začátku, počítali jsme s výrobou plošných desek do brzd automobilů a testováním by mělo dojít ke snížení pravděpodobnosti selhání výrobků.

V tomto modelu jsme uvažovali pouze provozní a investiční náklady. Není možné přesně určit, kolik investice přinese. Ve většině případů najdeme na jedné straně příjmy a na druhé straně výdaje. V našem případě máme pouze číselně vyjádřené náklady, ale nemáme druhou stranu. Nedokážeme přesně určit, kolik nám investice přinese nebo ušetří finančních prostředků. Není možné říct, že selže každý 1000 kus. Máme pouze pravděpodobnost výskytu selhání. Nemáme přesný počet kusů, které selžou. Každé selhání brzdového systému nezpůsobí stejně velký problém. Jednou může dojít k malé nehodě, při které nedojde k žádné škodě na zdraví a majetku, při jiné může dojít k obrovskému neštěstí. Mohou nastat případy, kdy je po firmě požadována finanční kompenzace z důvodu újmy na zdraví, kterou způsobil jejich vadný výrobek. Tyto částky se mohou pohybovat i v řádech miliónů korun. Snížením

pravděpodobnosti selhání dojde i ke snížení případů, ve kterých je po firmě požadována finanční kompenzace z důvodu nekvalitního výrobku. Pokud by bylo dokázáno, že za vážnou smrtelnou nehodu může právě zařízení, které firma vyrábí, můžeme se dostat až do milionových částek, které by firma musela vyplatit jako odškodnění.

Z důvodu popsaných výše nepočítáme klasické NPV. Počítáme takzvané nákladové NPVC. Protože máme pouze náklady, vychází nám NPVC záporné, nemáme žádný příjem. Abychom mohli určit náklady na provoz uvažovaného střediska ročně, musíme z NPVC vypočítat RCF přes anuitu. Dostáváme finanční tok pro každý rok provozu střediska s životností 10 let. V tomto případě vychází RCF 1 731 556 Kč při diskontu 10 %, růstu platů 3 % ročně a růstu elektřiny 4 % ročně.

V kapitole 6.5 jsme provedli citlivostní analýzu. Vytipovali jsme tři vstupy tohoto modelu, které se mohou měnit v průběhu funkčnosti testovacího střediska. Do grafu jsme vynesli závislost RCF na diskontu. Z výsledků plyne, že závislost na diskontu je poměrně velká. Další analýza zkoumala závislost RCF na růstu elektřiny. Závislost ukazuje, že růst RCF není příliš velký. Můžeme to vysvětlit tím, že spotřeba elektrické energie střediska není příliš vysoká. V posledním grafu řešíme závislost RCF na růstu platu zaměstnance.

Pokud bychom se měli rozhodnout, jestli investovat nebo neinvestovat do testovacího střediska, odpověď by byla s největší pravděpodobností ano. V našem případě se jedná o firmu, která vyrábí velké série desek plošných spojů pro automobilový průmysl, můžeme se pohybovat okolo 500 000 kusů ročně. Takže snížení pravděpodobnosti selhání o 0,5 % při této produkci je již poměrně značné a může ušetřit nemalou částku ročně při nákladech na testovací středisko 1 731 556 Kč za rok.

7 Závěr

V teoretické části byly uvedeny základní informace o pájených spojích, tavidlech, pájecích slitinách a o pájecí pastě. Seznámili jsme se s požadavky, které jsou kladeny na pájené spoje. Byla provedena rešerše na téma nanášení pájecí pasty a uvedeno několik pájecích metod. V teoretické části byly citovány české a mezinárodní normy pro testování spolehlivosti pájených spojů a uvedeny dvě mechanické a jedna elektrická zkouška. Nakonec byla provedena rešerše na téma zrychlené procesy stárnutí pájených spojů.

Hlavním úkolem technické části bakalářské práce bylo najít ideální pájecí profil, který nejlépe obstál v dlouhodobých testech životnosti pájených spojů. Diskuze nad výsledky je rozdělena na čtyři části. Pro teplotně-vlhkostní komoru a šokovou komoru je uveden nejlepší pájecí profil elektrické a mechanické odolnosti. Pokud bychom měli vybrat pouze jediný pájecí profil z hlediska dlouhodobého působení tepla a vlhka, byl by to pájecí profil b (100-100-165). Tento pájecí profil má teplotu v zóně předehřevu, a i v zóně smáčení, 100 °C. Teplota v zóně přetavení je 165 °C. Vybraný profil má nejlepší elektrické i mechanické vlastnosti v teplotně-vlhkostní komoře. Z tohoto lze také usoudit, že pro dlouhodobou odolnost teple a vlhku je důležitá vyšší teplota v zóně předehřevu a v zóně smáčení, zároveň nižší teplota v zóně přetavení. Pájecí profil b, který se jeví jako nejlepší v odolnosti, má nejnižší teplotu v zóně přetavení ze všech zkoumaných profilů. U pájených spojů, které jsou vystaveny velkým teplotním změnám, jsou výsledky jiné.

U elektrického odporu je nejlepší pájecí profil A (80-80-190). Z pohledu mechanických vlastností vychází dva teplotní profily velice podobně, je to profil A (80-80-190) a B (100-100-185). Mezi těmito profily nebyla zjištěna žádná výrazná odchylka, proto z pohledu mechanických vlastností odolávají teplotnímu cyklování téměř stejně. Pokud dáme dohromady výsledky z šokové komory, jako nejlepší profil se jeví A (80-80-190). Velice zajímavé je, že teplota v zóně přetavení je ze všech profilů největší a teplota v zóně předehřevu a smáčení je nižší. Kdybychom srovnali výsledky vhodných profilů z teplotně vlhkostní komory b (100-100-165) a šokové komory A (80-80-190), můžeme si všimnout, že vlastnosti pájených spojů z pohledu životnosti ovlivňují teploty ve všech třech zónách pájecí pece. Různou změnou teplot můžeme měnit vlastnosti pájených spojů z pohledu kvality v dlouhodobých procesech stárnutí.

Určení nejvhodnějšího pájecího profilu, který obstál v obou případech, nebylo jednoznačné. Výsledky teplotně-vlhkostní komory a šokové komory jdou často proti sobě.

Nakonec jsme se rozhodovali ze dvou teplotních profilů b (100-100-165) a A (80-80-190). Jako nejlepší teplotní pájecí profil jsme určili teplotní profil b (100-100-165). Pro tento profil bylo rozhodnuto z důvodu velmi dobrých vlastností v teplotně-vlhkostní komoře. V šokové komoře sice není tento profil úplně nejlepší, ale nepropadl v žádném testu oproti profilu A (80-80-190), který propadl v mechanických zkouškách v teplotně-vlhkostní komoře.

Ekonomickou část jsme také rozdělili na dvě části. V teoretické části jsme uvedli základní kritéria hodnocení investice projektu. V druhé části jsme zjišťovali investiční náklady spojené s realizací testovacího zařízení a provozní náklady testovacího střediska. RCF 1 731 556 Kč, které nám vyšlo, není pro firmu zanedbatelná částka. Pokud ale hovoříme o výrobě pro automobilový průmysl, kde roční produkce je kolem 500 000 kusů a více, je investice do takového střediska z důvodu zvýšení kvality výroby a bezpečnosti výrobků žádoucí.

Získat ceny jednotlivých zařízení (teplotně-vlhkostní komora, šoková komora, vibrační komora a elektronový mikroskop) byl poměrně značný problém. V několika firmách jsem byl slušně odmítnut. Bylo mi oznámeno, že tyto informace slouží pouze pro interní účely. Nakonec ceny všech zařízení poskytla firma Specion, s.r.o. Tato firma se zabývá prodejem špičkových zařízení v oblasti laboratorní techniky.

8 Použité zdroje

- [1] ABEL, Martin. *SMT - technologie povrchové montáže*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 978-80-902733-1-3.
- [2] DOC. ING. IVANSZENDIUCH, CSC. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. 2. prosinec 2019. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [3] MILAN DOSEDLA. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu spoje* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30282276.pdf>
- [4] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE. TEC, 2005. ISBN 978-80-903597-0-3.
- [5] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 978-80-01-02392-1.
- [6] LABAJ, Radek. *Solder Joint Reliability and Wetting Characteristics Influence* [online]. nedatováno [vid. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/30297738>
- [7] HARANT, P a F STEINER. *Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah*. nedatováno, 5.
- [8] FILIP ZRUBECKÝ. *Pájecí slitiny v elektrotechnice* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18858/1/Bakalarska%20prace%20Zrubecky%20%28elektronicka%20verze%20se%20zadanim%29.pdf>
- [9] *Výběr dispenzeru podle aplikace* [online]. [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:12000/vyber-dispenzeru-podle-aplikace>
- [10] JIŘÍ KORDÍK. *Metody pro osazování desek plošných spojů* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85067/F3-BP-2019-Kordik-Jiri-Bakalarska%20prace%20KOS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

- [11] *Pájecí stanice* [online]. 15. listopad 2019. Dostupné
z: https://www.naradihornig.cz/extol-industrial-pajeci-stanice-s-lcd-elektr-regulaci-200-450-8794520_z36407/
- [12] BC. MARTIN ČEPEK. *Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem* [online]. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Dostupné
z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64768/F3-DP-2016-Cepek-Martin-Mechanicke%20vlastnosti%20spoju%20pajenych%20ultrazvukem.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] *Pájení v elektrotechnice* [online]. 15. listopad 2019. Dostupné
z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf
- [14] PIETRIKOVÁ, Alena a Juraj ĎURIŠIN. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [15] *Kurtz ersa* [online]. 17. listopad 2019. Dostupné
z: <https://www.kurtzersa.com/electronics-production-equipment/soldering-machines/reflow-soldering/produkt-details/hotflow-314-1.html>
- [16] JAN HINTERMÜLLER. *Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné
z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76708/F3-BP-2018-Hintermuller-Jan-%5BVliv%20teplotniho%20profilu%20u%20pajeni%20pretavenim%20na%20tvorbu%20intermetalicky%20vrstev%5D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [17] JIŘÍ HUSÁK. *Měření pájitelnosti metodou smáčekcích vah při tenzi par* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné
z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61182/F3-BP-2015-Husak-Jiri-BP%20Jiri%20Husak-Pajitelnost%20odevzdana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18] TAO, Bo, Yiping WU, Han DING a Y. L. XIONG. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor $Q\eta$. *Microelectronics Reliability* [online]. 2006, 46(5), 864–872. ISSN 0026-2714. Dostupné
z: [doi:10.1016/j.microrel.2005.04.013](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.04.013)

- [19] *Česká státní norma* [online]. 16. listopad 2019. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/search/result?values%5Bfind%5D=%E2%80%A2%09%C4%8CSN+EN+62137-4>
- [20] *Mezinárodní normy* [online]. 22. listopad 2019. Dostupné z: <https://webstore.iec.ch/searchform&ComNumber=91>
- [21] CLECH, Jean-Paul M., Richard J. COYLE a Babak ARFAEI. Pb-Free Solder Joint Thermo-Mechanical Modeling: State of the Art and Challenges. *JOM* [online]. 2019, **71**(1), 143–157. ISSN 1543-1851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-018-3003-0
- [22] FILIP LOMBERSKÝ. *Spolehlivost pájených spojů* [online]. Plzeň, 2019. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10482/1/BP-Spolehlivost%20pajenych%20spoju-Lomersky%20Filip.pdf>
- [23] JEAN-PAUL M. CLECH, Babak Arfaei a RICHARD J. COYLE. *Pb-Free Solder Joint Thermo-Mechanical Modeling: State of the Art and Challenges* [online]. 1. prosinec 2019. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-018-3003-0>
- [24] BC. VOJTĚCH JANSÁ. *Tepelní stárnutí bezolovnatých nízkoteplotních spojů* [online]. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172777
- [25] *Wikiwand-Four-terminal sensing* [online]. 1. prosinec 2019. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/Four-terminal_sensing
- [26] PUTTLITZ, Karl J. a Paul A. TOTTA. *Area Array Interconnection Handbook*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 978-1-4615-1389-6.
- [27] *JEDEC STANDARD JESD22-A104-B* [online]. Dostupné z: <http://web.cecs.pdx.edu/~cgshirl/Documents/22a104b%20Temperature%20Cycling.pdf>
- [28] *22a103c.pdf - JEDEC STANDARD High Temperature Storage Life JESD22-A103C (Revision of JESD22-A103-B NOVEMBER 2004 JEDEC SOLID STATE*

- TECHNOLOGY ASSOCIATION* [online]. [vid. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.coursehero.com/file/29069989/22a103cpdf/>
- [29] *The Effects of Humidity on Tin Whisker Growth by Immersion Tin Plating and Tin Solder Dipping Surface Finishes / Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2020-06-07]. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2015.07.048
- [30] *1-JEDEC standards for product level qualification.pdf* [online]. [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: http://audace-reliability.crihan.fr/Ateliers_files/1-JEDEC%20standards%20for%20product%20level%20qualification.pdf
- [31] KWANG-LUNG, Lin. *Solder Materials*. B.m.: World Scientific, 2018. ISBN 978-981-323-821-3.
- [32] PANG, John Hock Lye. *Lead Free Solder: Mechanics and Reliability*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2011. ISBN 978-1-4614-0463-7.
- [33] *P2J Technology* [online]. 22. listopad 2019. Dostupné z: <https://www.p2jtechnology.cz/produkty/smt-montaz/pajeci-pece-pajeni-vlnou/prubezna-pajeci-pec-mistral-260/>
- [34] *Trhacka.cz - Technické parametry* [online]. [vid. 2019-12-21]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/text-technicke-parametry>
- [35] SR, MEFANET, síť lékařských fakult ČR a. *Konfokální mikroskop – WikiSkripta* [online]. [vid. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Konfok%C3%A1ln%C3%AD_mikroskop
- [36] BC. ADAM PETRÁČ. *VLIV TAVIDLA NA TLOUŠŤKU INTERMETALICKÉ VRSTVY UPÁJENÝCH SPOJŮ* [online]. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76267/F3-DP-2018-Petrac-Adam-VLIV%20TAVIDLA%20NA%20TLOUSTKU%20INTERMETALICKE%20VRSTVY%20U%20PAJENYCH%20SPOJU_Petrac.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [37] PETRA, Růčková a Roubíčková MICHAELA. *Finanční management*. B.m.: Grada Publishing a.s., 2012. ISBN 978-80-247-8037-5.

- [38] KOLEKTIV, Synek Miloslav a. *Manažerská ekonomika - 5., aktualizované a doplněné vydání*. B.m.: Grada Publishing a.s., 2011. ISBN 978-80-247-3494-1.
- [39] *Kritéria ekonomické efektivity* [online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/225801/mod_resource/content/1/Krit%C3%A9ria%20ekonomick%C3%A9%20efektivnosti.pdf
- [40] NĚMEC, Vladimír. *Projektový management*. B.m.: Grada Publishing a.s., 2002. ISBN 978-80-247-0392-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Smáčecí úhel θ [7]	13
Obrázek 2: Princip tisku sítotiskem [1]	17
Obrázek 3: Stanice pro ruční pájení [11]	17
Obrázek 4: Zařízení pro pájení vlnou [15]	18
Obrázek 5: Princip pece pro ohřev horkým plynem [1]	19
Obrázek 6: Pec pro ohřev horkým plynem [15]	20
Obrázek 7: Zařízení pro pájení v parách [13]	20
Obrázek 8: Příklad teplotního profilu [14]	21
Obrázek 9: Grafická závislost rovnice č.1 [18]	23
Obrázek 10: Grafické zobrazení heating factoru [18]	24
Obrázek 11: Správné nastavení výšky trnu [24]	26
Obrázek 12: Místa s možností vzniku trhliny [22]	27
Obrázek 13: Princip zkoušky tahem [14]	27
Obrázek 14: Princip čtyřbodové metody [25]	28
Obrázek 15: Horkovzdušná pec Mistral 260	34
Obrázek 16: Miliohmmetr Kust MM2030	35
Obrázek 17: Trhačka DEFORM 02	36
Obrázek 18: Konfokální mikroskop - Keyence	37
Obrázek 19: Princip konfokálního mikroskopu [35]	37
Obrázek 20: Snímek z fokálního mikroskopu, pájecí profil A, čas 0 hodin	38
Obrázek 21: Upravený obrázek z Adobe Photoshop pro další zpracování	38
Obrázek 22: Grafické určení IRR [39]	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Nejhorší možné podmínky pro jednotlivé kategorie [27]	30
Tabulka 2: Parametry jednotlivých zkoušek [14]	30
Tabulka 3: Parametry zkoušky standard JESD22-A118 [14]	31
Tabulka 4: Parametry zkoušky standard JESD22-A101 [30]	31
Tabulka 5: Teploty v jednotlivých zónách	33
Tabulka 6: Základní parametry pájecí pece Mistral 260 [33]	34
Tabulka 7: Technické parametry trhačky [34]	35
Tabulka 8: Základní parametry teplotně-vlhkostní komory C+10/200.....	39
Tabulka 9: Základní parametry šokové komory TSS-70/66	40
Tabulka 10: Průměrné hodnoty odporů pro různé pájecí profily a variační koeficienty	40
Tabulka 11: T-test – teplotně-vlhkostní komora – rozdíl mezi pájecími profily – elektrický odpor.....	42
Tabulka 12: T-test – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – elektrický odpor.....	42
Tabulka 13: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Teplotně–vlhkostní komora – 0 hodin	42
Tabulka 14: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Teplotně–vlhkostní komora – 1008 hodin.....	42
Tabulka 15: Průměrné hodnoty síly F pro různé pájecí profily a variační koeficienty.....	45
Tabulka 16: T-test – teplotně-vlhkostní komora – rozdíl mezi pájecími profily – smyková síla	46
Tabulka 17: T-test – teplotně-vlhkostní komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – smyková síla.....	46
Tabulka 18: Průměrné hodnoty odporů pro různé pájecí profily a variační koeficienty	48
Tabulka 19: T-test – šoková komora – rozdíl mezi pájecími profily – elektrický odpor.....	49
Tabulka 20: T-test – šoková komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – elektrický odpor.....	49
Tabulka 21: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy – Šoková komora - 0 cyklů.....	50
Tabulka 22: Výsledky tloušťky intermetalické vrstvy - Šoková komora – 955 cyklů.....	50
Tabulka 23: Průměrné hodnoty síly F pro různé pájecí profily a variační koeficienty.....	51
Tabulka 24: T-test – šoková komora – rozdíl mezi pájecími profily – smyková síla	53
Tabulka 25: T-test – šoková komora – počáteční / koncová hodnota pájecích profilů – smyková síla	53

Tabulka 26: Vysvětlení značení	54
Tabulka 27: Místo vzniku praskliny pro čas 0 h	54
Tabulka 28: Místo vzniku praskliny pro čas 336 h	54
Tabulka 29: Místo vzniku praskliny pro čas 672 h	54
Tabulka 30: Místo vzniku praskliny pro čas 1008 h	55
Tabulka 31: Místo vzniku praskliny po 0 cyklech	55
Tabulka 32: Místo vzniku praskliny po 333 cyklech	55
Tabulka 33: Místo vzniku praskliny po 666 cyklech	55
Tabulka 34: Místo vzniku praskliny po 995 cyklech	55
Tabulka 35: Počáteční investice do vybavení	59
Tabulka 36: Výpočet spotřeby – Teplotně-vlhkostní komora.....	60
Tabulka 37: Výpočet spotřeby – Šoková komora	61
Tabulka 38: Výpočet spotřeby – Vibrační deska	61
Tabulka 39: Výpočet spotřeby – Trhačka	61
Tabulka 40: Výpočet spotřeby – Elektronový mikroskop	62
Tabulka 41: Odpisy všech zařízení	64

Seznam grafů

Graf 1: Teplotní profily pájecí pece	33
Graf 2: Změny průměrné velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	41
Graf 3: Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	41
Graf 4: Změny velikosti tloušťky intermetalické vrstvy v teplotně-vlhkostní komoře pro různá nastavení pájecí pece	43
Graf 5: Změny průměrné velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	45
Graf 6: Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece.....	46
Graf 7: Změny průměrné velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	48
Graf 8: Změny velikosti odporu v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	49
Graf 9: Změny velikosti tloušťky intermetalické vrstvy v šokové komoře pro různá nastavení pájecí pece	50
Graf 10: Změny průměrné velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece	52
Graf 11: Změny velikosti smykové síly v závislosti na době stárnutí pro různá nastavení pájecí pece.....	52
Graf 12: RCF na diskontu	65
Graf 13: Závislost RCF na růstu elektřiny	65
Graf 14: Závislost RCF na růstu platu	66

Seznam rovnic

Rovnice 1: Vztah mezi tloušťkou intermetalické vrstvy a Q_n [18]	22
Rovnice 2: Matematický zápis heating factoru [18]	23
Rovnice 3: Vzorec pro výpočet elektrického odporu.....	28
Rovnice 4: Výpočet odporu pájeného spoje.....	35
Rovnice 5: Vzorce pro výpočet NPV	56

Rovnice 6: Vzorec pro výpočet RCF	57
Rovnice 7: Vzorce pro výpočet IRR	57

Přílohy

Příloha 1: CD s podklady k této bakalářské práci