

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta elektrotechnická



Bakalářská práce

2022

Oldřich Moravec

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Pájené a lepené elektricky vodivé spoje

Květen 2022

Bakalant: Oldřich Moravec

Vedoucí práce: Ing. Josef Černošus

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucích bakalářské práce. Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při psaní vysokoškolských prací.

15. 5. 2022

.....

Podpis Bakalanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Moravec** Jméno: **Oldřich** Osobní číslo: **474370**
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:

Pájené a lepené elektricky vodivé spoje

Název bakalářské práce anglicky:

Soldered and adhesive electrically conductive joins

Pokyny pro vypracování:

Popište vlastnosti spojů realizovaných pomocí pájek a elektricky vodivých lepidel.
Popište technologie používané při výrobě elektricky vodivých spojů.
Připravte vzorky vodivých spojů pomocí různých materiálů s různým množstvím a změřte jejich parametry.
Vyhodnoťte výsledky, zaměřte se také na závislost parametrů spojů na množství materiálu dodaného do spoje.
Vyhodnoťte ekonomické dopady zavedení pájecí technologie vzhledem k různým parametrům zvolené technologie

Seznam doporučené literatury:

MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzřzení aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
EBNESAJJAD, Sina. Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing. Amsterdam: William Andrew/Elsevier, 2011. PDL handbook series. ISBN 978- 1-4377-4461-3.
KRÁL, Bohumil a kol. Manažerské účetnictví. 4. rozšířené a aktualizované vydání. Praha: Management Press, 2018. 791 stran. ISBN 978-80-7261-568-1.
SYNEK, Miloslav. Manažerská ekonomika. 5., aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2011. 471 s. Expert. ISBN 978-80-247-3494-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Josef Černošous CVUT v Praze FEL K13116

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

Datum zadání bakalářské práce: **22.02.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.01.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2023**

Ing. Josef Černošous
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

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Josefu Černohousovi a také paní Ing. Ivaně Beshajové, Ph.D. za odborné pedagogické vedení během této bakalářské práce. Dále patří poděkování mé rodině a blízkým, kteří mi poskytli dobré podmínky během psaní této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou metod propojování vodivých cest mezi deskou plošného spoje a elektronickou součástkou. První metoda je tvorba elektricky vodivých spojů s pomocí pájecí pasty a druhá metoda je s použitím elektricky vodivého lepidla. Práce je rozdělena celkem na tři hlavní části. Ta první se zabývá teoretickým rozbořem zkoumaných pájecích metod. Druhá část je věnována praktické části, kde je popsáno měření a testování pájených komponent v závislosti na množství nanesení pájecího materiálu. Poslední část této práce se zabývá vyhodnocením ekonomických dopadů při zavedení pájecí technologie vzhledem k množství spojovacího materiálu.

Klíčová slova

Elektricky vodivé lepidlo, pájecí pasta, pájka, pájecí technologie

Abstract

The bachelor thesis deals with the comparison of two methods of connecting conductive paths between a printed circuit board and an electronic component. The first method is the formation of electrically conductive joints with the help of solder paste and the second method is with the use of electrically conductive glue. The work is divided into three main parts. The first part is about the theoretical analysis of the investigated soldering methods. The second part is devoted to the practical part, which describes the measurement and testing of soldered components depending on the amount of application of solder material. The last part of this work is devoted with the evaluation of economic impacts in the introduction of soldering technology with respect to various parameters.

Index terms

Electrically conductive glue, solder paste, solder, solder technology

Obsah

Úvod	1
1 Pájené spoje	2
1.1 Použití tavidel při pájení.....	2
1.1.1 Tavidla v elektrotechnické výrobě	3
1.2 Pájecí slitiny.....	3
1.2.1 Olovnaté pájky.....	4
1.2.2 Bezolovnaté pájky	4
1.3 Pájecí pasty.....	7
1.4 Technologie pájení	9
2 Lepené spoje.....	13
2.1 Složení elektricky vodivých lepidel.....	13
3 Porovnání pájení a vodivého lepení	15
4 Hodnocení kvality spojů – diagnostické metody.....	17
4.1 Sledování tvarů a struktury spojů	17
5 Praktické ověření parametrů pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla.....	18
5.1 Příprava vzorků.....	18
5.1.1 Použitý spojovací materiál	18
5.2 Osazení vzorků SMT manipulátorem	19
5.2.1 Osazovaná součástka	19
5.3 Přetavení lepidla a pájecí pasty.....	19
5.4 Měření elektrického odporu	19
5.5 Měření mechanické pevnosti.....	21
5.6 Popis výsledných grafů.....	21
5.7 Vizuální kontrola a zmetkovitost.....	24
5.8 Vyhodnocení praktické části	26
6 Ekonomické zhodnocení technologií.....	27
6.1 Způsoby kalkulací nákladů	27
6.1.1 Kalkulace dělením	27
6.1.2 Kalkulace přírážková.....	28
6.1.3 Volba způsobu kalkulace pro tuto práci.....	28
6.2 Výrobní náklady.....	28
6.2.1 Účetní odpisy.....	29

6.2.2	Doba životnosti zařízení	29
6.2.3	Diskontování.....	29
6.2.4	Zmetkovitost	30
6.2.5	Anuita	30
6.2.6	Cena pořízení zařízení v dnešních penězích.....	31
6.2.7	Výpočet celkové odepisované částky s anuitou za rok.....	33
6.2.8	Doba výroby FR4 desky	33
6.2.9	Mzdové náklady	33
6.2.10	Materiálové náklady.....	34
6.2.11	Náklady na energie.....	34
6.2.12	Celkové náklady.....	36
6.3	Zhodnocení ekonomické části.....	36
7	Závěr	37
	Literatura.....	39
	Seznam obrázků	42
	Seznam tabulek	42
	Seznam grafů.....	43
	Seznam vzorců	43
	Přílohy	44
	Tabulka naměřených hodnot	44
	Rozpis roční platby za dodávku elektřiny.....	45
	Parametry elektricky vodivého lepidla	46
	Parametry pájecí pasty	48

Úvod

Při výrobě elektronických zařízení dochází ke spojování vodičů, desek plošných spojů a elektronických součástek tak, aby vznikl požadovaný funkční celek. Spoje v elektrotechnice se nazývají elektrické spoje. Musí být elektricky vodivé, aby byla zajištěna správná funkčnost zařízení.

Jako materiál pro elektrické spoje se používají pájky, nebo elektricky vodivá lepidla. Pájky jsou různé slitiny kovů, které se vyznačují specifickou teplotou tavení. Elektricky vodivá lepidla jsou lepidla s přidanými plnivými, např. stříbrem (Ag), mědí (Cu), zlatem (Au), niklem (Ni), aby byla dosažena jejich elektrická vodivost.

Z důvodu ekologických aktivit a poznatků o škodlivosti některých chemických látek vydala Evropská komise směrnici č.2002/95/ES o používání nebezpečných chemických látek v elektrotechnickém průmyslu, která je označována zkratkou RoHS (**R**estriction **o**f **H**azardous **S**ubstances, tj. omezování nebezpečných látek). Na jejím základě byl v české legislativě upraven Zákon o odpadech č.185/2001Sb. s prováděcí vyhláškou č. 352/2005 Sb. s účinností od 1. 7. 2006 a Nařízení vlády č. 481/2012 Sb., o omezování některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních s účinností od 2. ledna 2013. Jsou v nich obsažena práva a povinnosti výrobců a dovozců, kteří elektrická zařízení uvádí na trh v České republice.

Ve skupině zakázaných nebezpečných látek je mj. olovo, kadmium, rtuť a šestimocný chrom. Toto mělo u výrobců pájecích materiálů za následek vývoj nových pájek, které nebezpečné olovo neobsahují.

S materiály používanými pro výrobu elektrických spojů úzce souvisí i technologie, které se při výrobě elektrických spojů používají. Jejich použití závisí mj. na vlastnostech, které jsou pro elektrické spoje požadovány (např. na teplotní odolnosti pájených součástek a souvisejících komponent, ekonomických a technických možnostech výrobce, nebo na dostupnosti potřebných technických zařízení).

V této bakalářské práci budou v teoretické části popsány pájené i lepené spoje a s nimi související výrobní technologie. V praktické části budou představeny provedené zkoušky s jejich vyhodnocením. Na závěr bakalářské práce budou vyhodnoceny ekonomické dopady technologií, které se pro výrobu spojů v rozsahu této práce použily.

1 Pájené spoje

Pájením (v angličtině se používá termín „soldering“) nazýváme postup, kdy se roztaveným materiálem, tzv. pájkou, spojují součásti, které se při tom neroztaví. Pájka musí mít totiž nižší teplotu tavení, než mají součásti, které se spojují. Obvykle se pájky rozdělují na tzv. tvrdé a měkké, podle teploty tavení pájky. Do tavicí teploty 450°C se pájky označují jako měkké pájky, nad tavicí teplotu 450 °C se označují jako tvrdé pájky.

V elektrotechnickém průmyslu se využívá převážně měkkých pájek. Je to z důvodů např. omezené tepelné odolnosti součástek, nižších nároků na mechanickou pevnost spojů, nižších nákladů na spotřebu energie při pájení apod.

Tvrdé pájky se používají v aplikacích, kde dochází k většímu mechanickému nebo tepelnému namáhání. Lze jimi např. pájet i díly ze šedé litiny a oceli. Protože se v elektrotechnickém průmyslu používají podstatně méně než měkké pájky, v rozsahu této práce se jimi nebudu detailněji zabývat. [1, 2]

1.1 Použití tavidel při pájení

Aby pájený spoj byl maximálně pevný, musí být zajištěna dobrá smáčivost materiálu pájené plochy s roztavenou pájkou. Smáčivost závisí, kromě metalurgických vlastností, na čistotě povrchu při pájecí teplotě. Při pájení v běžné atmosféře se používají tzv. tavidla. [3]

Důvody pro použití tavidel jsou tyto:

- čištění neboli redukce oxidových vrstev pájeného povrchu,
- snižování povrchového napětí, aby se pájka hladce roztekla,
- zlepšování přenosu tepla mezi pájecím hrotem a pájeným povrchem.

Pokud nelze tavidla využít, pájí se v prostředích, kde se povrchové vrstvy, které snižují smáčivost, odstraňují, např. redukční plynná atmosféra nebo vakuum.

Tavidla se rozdělují podle způsobu pájení:

- pro měkká pájení (lihový nebo vodní základ),
- tvrdá pájení (borax, salmiak, kyselina boritá, chlorid zinečnatý),

nebo podle účinku na:

- tavidla s leptavým účinkem,
- tavidla bez leptavého účinku,

nebo podle složení na:

- pryskyřičná,
- organická,
- anorganická.

Základní složkou pryskyřičných tavidel je přírodní pryskyřice ve formě kalafuny (borovicová pryskyřice), nebo umělá pryskyřice. Pryskyřice bývá rozpuštěna v ethylalkoholu nebo xylenu. Aby bylo toto tavidlo aktivnější, přidávají se amin hydrochloridy nebo kyseliny, např. salicylová nebo jantarová.

Organická tavidla byla vyvinuta pro možnost jejich jednoduchého odstranění vodou po procesu pájení a jsou také velmi účinná. Při nedokonalém odstranění zbytků může docházet ke korozi, a to i za delší dobu. Mohou být použita pro takové aplikace, kde koroze nehrozí, nebo musí být zajištěno dokonalé odstranění tavidla po pájení.

Anorganická tavidla jsou vhodná pouze pro speciální případy. Základní složkou jsou soli nebo kyseliny, které obsahují aktivátor, např. čpavek, kyselinu fosforečnou, čpavek, nebo chlorid amonný. Povrch musí být po pájení dokonale očištěn, aby zbytky neměly dlouhodobý negativní vliv na vlastní i okolní pájené spoje, resp. celý výrobek. [1, 3]

1.1.1 Tavidla v elektrotechnické výrobě

Pro průmyslové pájení v elektrotechnice se jako tavidla využívají kapalné látky s obsahem kyseliny solné nebo fosforečné, které lze po zapájení smýt vodou nebo lihem.

Pro ruční pájení součástek se využívá kalafuna, která při tavicí teplotě okolo 200°C odstraní za 1 až 2 sekundy vrstvy nesmáčivých oxidů. Kalafuna je obsažena v tzv. trubičkové pájce. Po pájení se zbytky kalafuny odstraňují lihem, nebo se mohou na spojích nechat. [3]

1.2 Pájecí slitiny

Pájecí slitiny, označované i jako pájky, jsou slitiny kovů s nízkou teplotou tání. V elektrotechnice se využívá tzv. měkkého pájení, kdy teplota pájení nepřesahuje 450°C. Jedná se obvykle o slitiny dvou nebo tří složek. Z důvodu legislativy, která byla zmíněna v úvodu této práce, se pájky dají rozdělit do dvou kategorií:

- olovnaté pájky,
- bezolovnaté pájky. [1, 3]

1.2.1 Olovnaté pájky

Typickým představitelem olovnatých pájek je slitina Sn63Pb37 (63% Sn a 37% Pb). Pro zlepšení požadovaných vlastností mohou být přidány i další příměsi kovů (např. měď, kadmium, stříbro, zlato) v rozsahu jednotek procent. Příměs mědi např. snižuje roztékavost slitiny a dělá spoj tvrdší (slitina Sn60Pb38Cu2). Kadmium snižuje teplotu tavení, ale naopak podporuje nežádoucí povrchovou oxidaci pájky.

Vydaná směrnice Evropské unie tzv. RoHS úplně nezakazuje nebezpečné látky jako olovo a kadmium, ale stanovuje jejich maximální procentuální podíl. Např. kadmium (Cd) může být ve slitině obsaženo do 0,01% a ostatní nebezpečné látky, definované v RoHS, do 0,1%. Výjimku na zvýšený procentuální obsah zakázaných látek tvoří aplikace ve vojenství a lékařství. [1]

1.2.2 Bezolovnaté pájky

Bezolovnaté pájky se vyznačují vyšší cenou než olovnaté pájky a vyšší teplotou tavení. Zatímco olovnaté pájky Sn/Pb mají teplotu tavení 183°C, bezolovnaté pájky mají teplotu tavení v rozsahu 195°C až 227°C. Přesná tavicí teplota závisí na druhu použité příměsi.

Pájka SAC305

Typickým představitelem bezolovnatých pájek je pájka s označením SAC305 (96,5% Sn + 0,3% Ag + 0,5% Cu). Teplota tavení je 217 až 218°C. Pracovní teplota (např. v aplikaci, kdy připájená součástka vyzařuje velké množství tepelné energie a v důsledku toho dochází k zahřívání spoje) spoje může být až 175°C, bez vlivu na poškození nebo degradaci spoje. Tyto spoje se vyznačují vysokou spolehlivostí a odolností. [1, 4]

Pájka Sn/Cu

Složení eutektické slitiny (slitina, kde veškeré krystaly obsahují stejný poměr jednotlivých součástí, a také má ze všech jiných poměrů stejných kovů nejmenší teplotu tání) je Sn99,3Cu0,7 a teplota tavení je 227°C. Díky vysoké tavné teplotě umožňuje vysoké pracovní teploty a je odolná vůči defektům způsobeným dlouhodobým namáháním (tzv. únavové defekty). [1, 4]

Pájka Sn/Ag

Složení eutektické slitiny je Sn/Ag3,5 a teplota tavení je 221°C. Díky omezené rozpustnosti stříbra v cínu je slitina odolnější vůči zhrubnutí, které je pozorováno u pájky Sn/Pb. Někdy se do slitiny Sn/Ag přidává 1% zinku pro zlepšení struktury pájky. [1, 4]

Pájka Sn/Bi

Sloužení eutektické slitiny je Sn42/Bi58. Nízká teplota tavení 139°C umožňuje pájet součástky citlivé na tepelné zatížení. Pokud dojde ke kontaminaci olovem, teplota tuhnutí se snižuje až na 97°C (eutektická slitina Bi/Pb), ale jsou negativně ovlivněny tepelné únavové vlastnosti. Vysoký obsah Bi ve slitině způsobuje malou pružnost spojů a rychlou oxidaci na vzduchu. [1, 4]

Pájka Sn/In

Teplota tavení slitiny Sn48/In52 je 117°C, tj. je vhodná pro pájení citlivých součástek. Je odolná proti oxidaci. Další výhodou je, že zlato, obsažené na pozlacených kontaktech součástek, se v ní rozpouští pomaleji, než např. ve slitině SnPb.

Nevýhodou je, že vlivem přítomnosti India má slitina sklon k tvorbě studených spojů a korozi ve vlhkém prostředí. [1, 4]

Pájka Sn/Sb

Slitina Sn95/Sb5 má teplotu tání 232 – 240°C a je vhodná pro tepelně zatěžované aplikace. Antimon (Sb) zvyšuje tvrdost a pevnost slitiny, ale při překročení 4% snižuje pevnost v tahu. Při použití pryskyřičného tavidla bez ochranné atmosféry se dosahuje velmi dobré smáčivosti, lepší než u Sn63/Pb37 a Sn96,5/Ag3,5. [1, 4]

Příměsi v pájkách:

Příměsi v pájkách mají vliv na kvalitativní vlastnosti pájených spojů. A to jak pozitivní, tak i negativní. V tabulce čílo jedna jsou zobrazeny přípustné hodnoty úrovně znečištění.

Hliník (Al) – Hliník se používá na výrobu nosných rámečků DPS. Z rámečků se může částečně rozpouštět v Sn-lázni a již koncentrace 0,001% Al v pájce způsobuje zhoršenou adhezi, větší viskozitu pájky a praskání z důvodu křehkosti za tepla a podporuje oxidaci pájeného spoje. [1, 3]

Antimon (Sb) – Antimon se přidává do slitin pro zlepšení mechanických vlastností (vyšší pevnost) a zlepšení smáčivosti. Omezuje cínový mor a růst kovových vlasových výčnělků, tzv. whiskerů, způsobujících zkratky na DPS. [1, 3]

Arsen (As) – Příměsi arsenu v pájce jsou nežádoucí. Způsobují nesmáčivost a tvorbu dlouhých jehlic v mikrostruktuře. [1, 3]

Bismut (Bi) – Bismut v bezolovnatých pájkách nahrazuje olovo. Výrazně snižuje bod tání, např. pájka Sn42Bi58 dosahuje bodu tání již při 141°C. Hodí se k pájení součástek citlivých na tepelné zatížení (plastové páskové vývody). Nevýhodou je mírné snížení smáčivosti. [1, 3, 5]

Kadmium (Cd) – Příměsi kadmia v pájce snižují teplotu tavení a působí proti oxidaci povrchu. Je však velmi toxické a pro člověka karcinogenní, proto se jeho

používání eliminuje. Při větším obsahu než 0,01% vzniká tzv. písková struktura, pájka špatně zatéká a spoje jsou křehké a porézní. [1, 3]

Měď (Cu) – Příměs mědi nad určitou hodnotou v bezolovnatých pájkách je nežádoucí, protože výrazně zhoršuje roztékavost a zvyšuje teplotu tavení. Po ztuhnutí je pájka hrubozrnná, křehká a tvrdá. Např. u pájecích slitin Sn/Cu je při koncentraci Cu= 2% teplota tavení 300°C. Měď se do slitin dostává z DPS při pájení vlnou. Částečně se odstraní přidáním síry. [1, 3, 6]

Zlato (Au) – Příměs zlata ve slitině způsobuje zrnitost a křehkost. V tuhé fázi je Au velmi málo rozpustné a vytváří intermetalické sloučeniny, hodně strusky a způsobuje matnost povrchu. [1, 3]

Železo (Fe) – Kontaminace pájecí slitiny železem je nežádoucí. Vytváří se intermetalická slitina FeSn₂, což jsou drobné jehličky, které výrazně ovlivňují kvalitu pájení. [1, 3, 6]

Nikl (Ni) – Nikl je silně toxický. V tuhé fázi není rozpustný a vytváří puchýřky a intermetalické sloučeniny s cínem. [1, 3]

Stříbro (Ag) – Příměs stříbra v pájce má vliv na snížení schopností, aby se v pájce rozpouštěly jiné kovy, což je hodnoceno příznivě. Povrch pájky s obsahem stříbra je tmavý, bez lesku. [1, 3]

Ke znečištění pájek dochází při jejím používání, zejména při strojním pájení. Rychlým pohybem pájky přes kontakty se povlaky, nanesené pro lepší smáčivost, na kontaktech rozpouští a kontaminují pájku. Např. u pozlacených vývodů se musí zlatá vrstva rozpustit, aby pájený spoj vznikl s podkladovým materiálem. Jinak by intermetalické sloučeniny, které by vznikly při neodplavení zlata, způsobily snížení mechanické pevnosti spoje a případné rozpadnutí. [3]

Složky nebo příměsi hmotnostní %		Označení					
		Sn60Pb	Sn62PbAg	Sn63Pb	Sn5Pb	Sn10PbAg	Sn96Ag
Solidus °C		183	179	183	308	268	221
Likvidus °C		191	179	183	312	290	221
Sn	max	61,5	62,5	63,5	5,5	11	zbytek
	min	59,5	61,5	62,5	4,5	9	-
Pb		zbytek	zbytek	zbytek	zbytek	zbytek	-
Sb	max	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	-
	min	0,2	0,2	0,2			-
Bi	max	0,25	0,25	0,25	0,25	0,03	-
Ag	max	0,015	2,25	0,015	0,015	2,4	4,4
	min		1,75			1,7	3,6
Cu	max	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,2
Fe	max	0,02	0,02	0,02	0,02	-	-
Zn	max	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Al	max	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	-
As	max	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05
Cd	max	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005
S	max	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
P	max	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
jiné	celkem	0,08	0,08	0,08	0,08	0,1	-

Tabulka 1 - Pájky pro pájení v elektronice – přípustné úrovně znečištění [3]

1.3 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou homogenní směsí částic kovů odpovídajících složení pájky s technologickou (pojivou) složkou. Ta je tvořena tavidlem a rozpouštědlem s aktivátorem. Rozpouštědlo upraví pájecí směs do pastovitěho stavu s potřebnou viskozitou. Poměr jednotlivých složek v pájecí pastě bývá 90 % pájky, 6 % tavidla, 4 % rozpouštědla. Nejdůležitějšími parametry pasty je viskozita a velikost zrn. Pájecí pasta na měkké pájení se nanáší dávkováním nebo tiskem přes šablonu, tzv. sítotisk. [7]

Pájecí pasty lze rozdělit do dvou skupin, a to podle způsobu vytvrzení. V první skupině jsou pasty s obsahem např. epoxidové novolakové pryskyřice, fenolické pryskyřice nebo polyesterové pryskyřice a k vytvrzení dochází působením tepla. Ve druhé skupině obsahují pájecí pasty estery kyseliny akrylové, polyestery nebo uretany a vytvrzují se UV-zářením.

Výběr správné pasty závisí na požadovaných vlastnostech, tj. požadované pružnosti, odolnosti a přilnavosti pájky. Pájecí pasta se používá k pájení SMD (součástka pro povrchovou montáž) na elektronické desky. [8]

Nanášení pájecí pasty je náročným krokem technologie pájení přetavením. Pastu lze nanášet sítotiskem nebo šablonovým tiskem. Ručně lze pastu nanášet speciální jehlou. Ruční nanášení se využívá při opravách, nebo ve vývoji.

Důležitou vlastností pájecí pasty je její viskozita při teplotě nanášení. Pasta s vysokou viskozitou nemusí být protlačena do všech požadovaných ploch a následně nedojde k vytvoření vodivých cest. Naopak pasta s malou viskozitou může zatéct pod síto a způsobit nežádoucí spojení vodivých cest.

Nanášení jehlou je jednodušší způsob. Pasta se do ní nabere ručně a postupně se vytlačuje na požadovaná místa. Zpřesnění dávkování množství pasty se docílí použitím tzv. dávkovací stanice.

Nanášení pasty přes šablonu patří k nejčastěji používaným způsobům. Je velmi přesný a dosahuje se s ním vysoké stability. Na výrobu šablon se používají tyto materiály: měď, mosaz, molybden a plasty. Požadované tvary se v šablonách vyleptají, nebo vyřezou laserem. Řezání laserem je velmi přesné, ale cenově nákladnější.

Nad šablonou s otvory se pohybuje stěrka, která zatlačí pájecí pastu do šablony na podkladovou desku. Stěrka je velmi důležitou součástí zařízení. Jsou pryžové (levnější; ale kratší životnost), nebo kovové (dražší, spolehlivější, delší životnost, ale větší opotřebení šablon). [3, 9]



Obrázek 1 - Sítotisk pro laboratorní účely [10]

Osazování součástek se provádí po nanesení pájecí pasty. SMD manipulátor lze použít pro osazování menších sérií. Jedná se o jehlu s vakuem, na kterou se nasaje součástka a lze s ní pohybovat ve směrech x, y, z a otáčet kolem své osy. Pro velké série se používají osazovací automaty. [3, 9]



Obrázek 2 - Průmyslové osazování DPS [11]

Pryskyřice je materiál běžně používaný jako tavidlo v pájecí pastě.

Výhody použití pájecí pasty oproti pájecím slitinám (ve formě drátu nebo tyče) jsou:

- snadné ukládání na elektronické desky (pájecí výplňový produkt již v tekuté formě, a proto použitelný například pomocí šablony),
- snížení povrchového napětí výrobku pro tvrdé pájení, což umožňuje jeho šíření po plochách, které mají být pájeny,
- snadné nasazení elektronických součástí (součásti namontované po aplikaci pájecí pasty zůstávají na místě díky pastě, jejich vývody jsou přichyceny v tomto viskózním produktu),
- skutečnost, že umožňuje pájení (například průchodem pájecí pecí),
- ochrana kovů před oxidací během procesu pájení na tvrdo (omezuje kontakt mezi kyslíkem ve vzduchu a roztaveným kovem, rozpouští oxidy).

Po pájení je tavidlo nežádoucí (korozivní účinek) a musí být odstraněno (rozpuštění rozpouštědlem, oplach, sušení). [8]

1.4 Technologie pájení

Správně vytvořený pájený spoj musí mít požadované elektrické a mechanické vlastnosti. Dále je zde požadavek na vizuální vzhled pájených oblastí, aby bylo možné vytvořené spoje i opticky kontrolovat, např. je zřejmá kontura pájených vývodů pod pájkou.

Povrch pájky by měl být lesklý, hladký, spojitý a na okrajích zřetelný ostrý úhel 15° až 20°. Vývod, který se pájí, by měl být kompletně zapájen. [3, 9]

Postup pájení zahrnuje tyto základní úkony:

- umístění pájených částí do vhodné polohy s jejich fixací,
- nanesení tavidla a jeho aktivace,
- ohřev pájené oblasti na požadovanou teplotu,
- přivedení pájky na pájené spoje,
- ochlazení pájeného spoje,
- očištění zapájeného spoje.

Technologie pájení lze rozdělit do dvou skupin:

- ruční pájení,
- strojní pájení.

Ruční pájení se v dnešní době využívá pro opravy, vývoj, drobnou kusovou výrobu, dopájení součástek, nebo amatérské aplikace. K pájení se používá ruční páječka s vyhřívaným hrotem. Důležitá je příprava součástek před pájením, aby byly ve správné poloze. Dále pájené kontakty musí být zbaveny možných nečistot, které by způsobily nepřilnutí pájky. Tavidlo se nanáší před vlastním ohřevem, nebo se uvolňuje při vlastním pájení z dutiny v trubičce pájky. Člověk, na rozdíl od strojů, není při pájení schopen dodržet vysokou opakovatelnost a reprodukovatelnost – množství nanesené pájky, čas vlastního pájení, tepelné zatížení spoje. Ruční pájení není příliš spolehlivé, a proto není vhodné pro plnou sériovou výrobu. [3, 9]

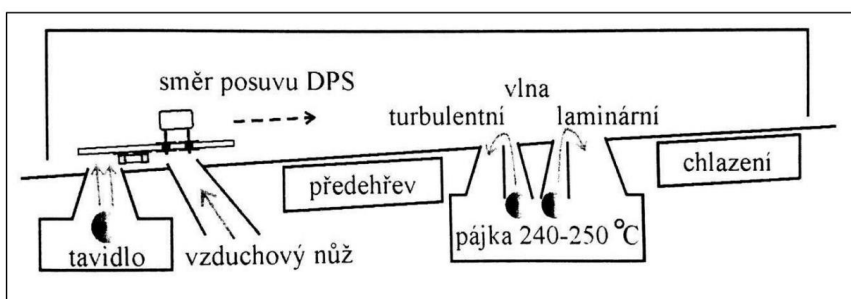
Rozvoj elektrotechnického průmyslu přinesl potřebu automatizace v oblasti pájení součástek, aby se poměrné výrobní náklady mohly snižovat s růstem produkce. Strojním pájením lze zapájet velké množství součástek najednou, a přitom kvalita spojů není negativně ovlivněna lidským faktorem, jako v případě ručního pájení. Strojní pájení lze rozdělit na:

- a) pájení vlnou,
- b) pájení přetavením. [3, 9]



Obrázek 3 - Automatická pájecí linka [9]

- a) Pájení vlnou pájky je nejpoužívanějším způsobem automatického strojního pájení. Na počátku pájecí linky se desky pokryjí tavidlem. Je žádoucí, aby se pokryly pouze oblasti, které to potřebují, a nedocházelo ke zbytečné nadspotřebě tavidla. Následuje přehřev, obvykle infračervený, kde se tavidlo aktivuje a dojde k ohřátí spodní strany desky s vývody na teplotu 130 °C až 150°C. Tímto přehřátím se zabrání teplotnímu šoku desky při následném průchodu pájecí vlnou. Pájecí vlna vznikne tak, že je roztavená pájka odspoda hnána čerpadlem tryskou (štěrbinou), která je napříč pájecí linky. Pro lepší výsledky pájení lze použít i dvojitou pájecí vlnu, která vzniká ve dvou tryskách obdobně jako jednoduchá vlna. Při průchodu desky nad pájecí vlnou se vlivem kapilárního vztlínání a hydrostatickým tlakem vyplní oblasti spojů pájkou. Po pájecí vlně následuje chlazení desky, obvykle ventilátorem. [3, 9, 12, 13]



Obrázek 4 - Pájecí vlna - schéma technologie [12]

- b) Pájení přetavením je druhý nejpoužívanější způsob strojního pájení. Pro tento druh pájení se typicky používá pájka ve formě pasty. Technologický proces má dvě časově nezávislé části: nejprve se nanese pájecí pasta a na vzniklé ostrůvky se umístí součástky (nejobtížnější krok této technologie) a následně se pájecí pasta přetaví a dojde ke spojení desky a vývodů součástek. Tavidlo se nanáší na desku buď před nanesením pasty na desku, nebo je již součástí pájecí pasty. Pájení přetavením má tato stádia:

1. Aktivace tavidla.
2. Tavení kovových kuliček, které jsou součástí pájecí pasty.
3. Roztavený kov smáčí a spojí pájené plochy (deska – vývod součástek) dohromady.
4. Postupné ochlazování tekuté pájky, při kterém se formuje výsledný tvar a struktura pájeného spoje.

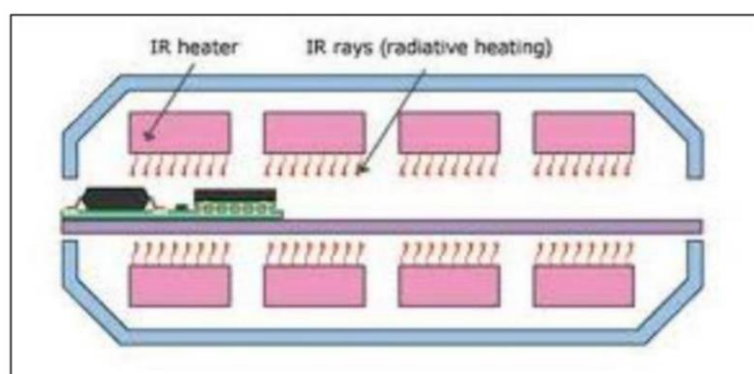
Proces přetavení je závislý na působícím způsobu přenosu tepla – proudění, vedení, záření a jejich vzájemné kombinaci. Výběr správné metody závisí na vlastnostech a velikostech pájených součástek, tepelné kapacitě pájených desek,

požadovaných výsledných vlastnostech, požadované kvalitě a výrobních nákladech. Podle způsobu ohřevu se pájení může dělit na:

- pájení zářením (světelným, infračerveným), tzv. reflow,
- pájení laserem,
- pájení impulsní,
- pájení v parách (kondenzační),
- pájení ohřevem horkou deskou nebo pásem,
- pájení proudem horkého plynu. [3, 9]

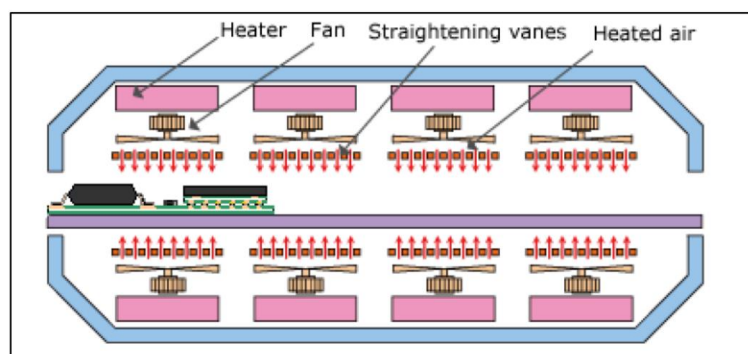
Ukázky linek pro přetavení:

Pájení IR zářením



Obrázek 5 - IR pájecí linka (reflow) [12]

Pájení proudem horkého plynu



Obrázek 6 - Konvekční pájecí linka [12]

2 Lepené spoje

S požadavkem na eliminaci škodlivého olova v pájkách začal rozvoj elektricky vodivých lepidel (ECA – Electrically Conductive Adhesives). Tato lepidla vyhovují jak ekologickým hlediskům, tak mají další výhody: nízkou vytvrzovací teplotu (100°C - 140°C) a možnost připojování vývodů až do rozteče 0,1mm (SnPb pájky do rozteče 0,3mm), kdy se mezi vodiči ještě nevytvářejí zkratky. [2, 3, 9]

2.1 Složení elektricky vodivých lepidel

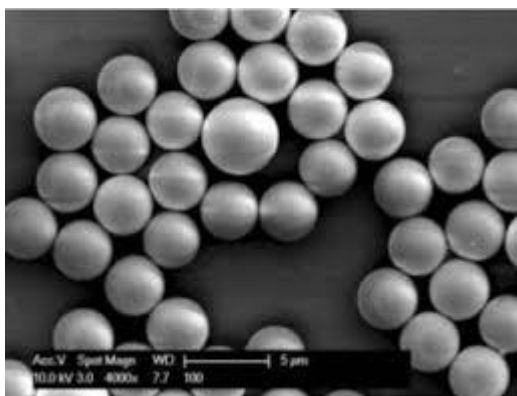
Elektricky vodivá lepidla se obecně skládají ze dvou složek

a) vazební složka, tzv. binder (pojivo) a

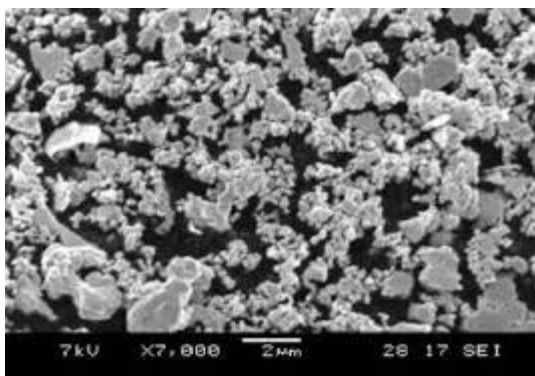
b) vodivá složka, tzv. filler (plnivo).

Vazební složka vytváří matici, ve které jsou umístěny vodivé částice, a současně zajišťuje mechanické vlastnosti spoje (pevnost, houževnatost, adhezi) a klimatickou odolnost. Jako pojivo se používá buď jednosložková nebo dvousložková epoxidová nebo silikonová pryskyřice. Jejím složením lze měnit teplotu a celkovou dobu vytvrzení. Obvyklá doba vytvrzování je od 30min. do 2 hod., ale některá lepidla se vytvrzují při pokojové teplotě 24 i více hodin.

Vodivá složka zajišťuje elektrické vlastnosti spoje (vodivost, šum atd.). Je nejčastěji tvořena stříbrnými, niklovými, paladiovými, nebo měděnými pocínovanými částicemi. Vodivé částice mají nejčastěji tvar šupinek (flakes) nebo kuliček (balls), kdy tento tvar částic významně ovlivňuje elektrické vlastnosti spoje. [3, 9]



Obrázek 7 - Elektricky vodivé lepidlo – vodivá složka ve formě kuliček [14]



Obrázek 8 - Elektricky vodivé lepidlo – vodivá složka ve formě šupinek [14]

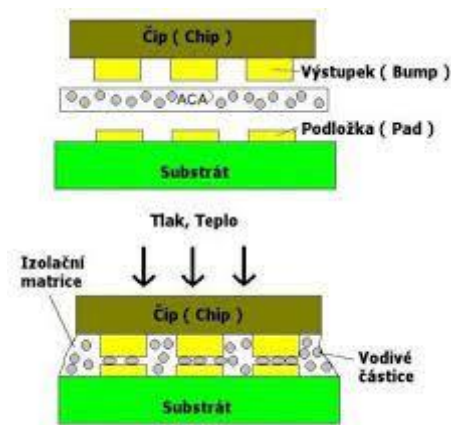
Podle elektrické vodivosti rozdělujeme elektricky vodivá lepidla na:

- a) Lepidla s izotropní elektrickou vodivostí (tzv. izotropní lepidla) a
- b) Lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí (tzv. anizotropní lepidla).

Izotropní lepidla mají elektrickou vodivost stejnou ve všech směrech, tj. jako u kovových pájek. Vodivou složku obvykle tvoří kuličky stejné velikosti.

Anizotropní lepidla jsou vodivá ve směru kolmém na rovinu základní desky a nevodivá ve směru rovnoběžném s touto rovinou. Této vlastnosti je dosaženo tvarem vodivých částic, nejčastěji to bývají šupinky. Rovina šupinek je srovnána rovnoběžně se základní deskou. Při vytvrzení dojde ke smrštění, a tím příčnému propojení vrstev šupinek, zatímco podélné propojení šupinek je pouze náhodné. Anizotropních vlastností nebylo u běžných pájek dosaženo, proto anizotropní vodivá lepidla získávají na oblibě.

Vyrábějí se ve formě fólií a používají pro připojování součástek s tzv. poduškovými vývody. Mezi součástku a propojovací desku se vloží fólie z anizotropního elektricky vodivého lepidla a po přitlačení součástek a následném vytvrzení dojde k propojení vývodů a připojovacích plošek – viz obr. číslo 9. Prostor mimo spojené kontakty zůstane nevodivý. Takto lze připojovat součástky s velmi malou roztečí vývodů. Při působení definované teploty a kolmého tlaku (směrem k základní desce) na součástky vznikne kvalitní spoj, elektricky vodivý pouze v jednom směru. [3, 9]



Obrázek 9 - Schéma aplikace anizotropního lepidla [9]

3 Porovnání pájení a vodivého lepení

Pájením se obecně dosahuje lepších elektrických i mechanických vlastností spojů než při vodivém lepení. Lepidla mají menší mechanickou pevnost i horší elektrickou vodivost. Z ekologických důvodů je používání SnPb pájek omezeno, a proto se vývoj vodivých lepidel rychle rozvíjí.

Vlastnosti	Pájecí pasta	Elektricky vodivé lepidlo
Vodivost	izotropní	izotropní, anizotropní
Odpor	nižší	vyšší
Šum	nižší	vyšší
Stabilita	vyšší	nižší
Odolnost proti navlhání	vyšší	nižší
Adheze	vyšší	nižší
Mechanická pevnost	vyšší	nižší
Teplota vytvrzení	vyšší	nižší
Doba životnosti	vyšší	nižší
Spolehlivost	vyšší	nižší
Cena	nižší	vyšší

Tabulka 2 - Porovnání vlastností pájených a lepených spojů [2, 3, 9]

Anizotropní vodivé spojení a vytvrzení při pokojové teplotě lze realizovat pouze elektricky vodivým lepidlem. Vyšší odpor u vodivého lepidla je způsoben nehomogenitou materiálu (obsah pryskyřice) a negativně se bude projevovat například v aplikacích využívající vyšší frekvence (vyšší impedance). Obsah pryskyřice ve vodivém lepidle ovlivňuje odolnost proti navlhání a dobu životnosti, kdy dochází k degradaci spojení např. působením slunečního záření. Vyšší cena vodivého lepidla je závislá především na použitých komponentech, např. částicím stříbra. Mechanická pevnost je také lepší u pájených spojů, neboť dochází k lepšímu přilnutí k pájeným plochám.

Zvýrazněné vlastnosti ukazují, v čem je daný druh spoje lepší nebo výhodnější, než spoj druhý. Ve většině případů je pájecí pasta lepší, ale nelze s ní například vytvořit anizotropní vodivé spojení, nebo ji vytvrdit při pokojové teplotě. Pro tyto zvláštní aplikace je potřeba použít vodivé lepidlo. [3, 9]

Výsledky v tabulce číslo 2 odpovídají pozorování, které jsem zjistil v praktické části.

4 Hodnocení kvality spojů – diagnostické metody

Hodnocený parametr	Komentář
Elektrické vlastnosti spojů	Z elektrických vlastností se sleduje zejména odpor. Voltampérová charakteristika bude různá pro pájené a lepené spoje, protože působí různé vnitřní mechanismy vodivosti.
Tvar spojů Struktura spojů	Hodnocení vizuálně. Souvisí se smáčivostí povrchů, typu a kvalitě pájky a tavidla a technologickým parametry při pájení.
Adheze spojů Odolnost spojů proti odtržení součástky	Zpravidla se měří „pull-off“ testem, kdy odtrhávací síla působí kolmo k rovině desky.
Elektrochemická migrace ve spojích	Iontová migrace je nebezpečná u lepených spojů, kdy v případě malých vzdáleností může dojít až ke zkratu mezi sousedními spoji. Sleduje se optickým nebo elektronovým mikroskopem.
Působení prostředí na spoje	Sledování změn z důvodu stárnutí se provádí optickou nebo rastrovací elektronovou mikroskopií.

Tabulka 3 - Základní metody hodnocení kvality spojů [3]

4.1 Sledování tvarů a struktury spojů

Nedestruktivní hodnotící diagnostická metoda je jednoduše aplikovatelná před i po zapájení součástek na desku. Automatické pájecí linky provádí kontrolu pomocí průmyslových kamer, kdy se porovnávají obrazy správně osazené (uložena v paměti hodnotící kamery) s aktuálně vyráběnou deskou. Přímou kontrolou na lince se zabrání v řadě případů výrobě zmetkových desek, a tím i velkým finančním ztrátám.

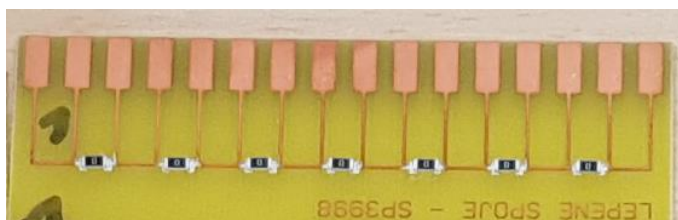
Metoda vizuální kontroly s pomocí on-line kamery je vhodná pro desky s SMD součástkami. V případě BGA součástek (Ball grid array – součástky s kontakty na spodní straně, např. mikroprocesory) by musel být použit rentgen, neboť kontakty jsou zakryty vlastní součástkou. [3, 9]

5 Praktické ověření parametrů pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla

V praktické části bakalářské práce je porovnán jeden druh elektricky vodivého lepidla s jedním druhem jednosložkové pájecí pasty. Zkoumané vlastnosti budou odpor na spojích, mechanická pevnost a vizuální kontrola v závislosti na množství použitého materiálu.

5.1 Příprava vzorků

Jednotlivé vzorky byly vytvořeny z FR4 desek o tloušťce 1,5 mm a každá byla osazena celkem sedmi rezistory. Pro každou sérii bylo osazeno celkem deset FR4 desek. Měření jednotlivých parametrů se vždy provedlo na pěti FR4 deskách, aby byly naměřené výsledky prokazatelné. Zbylých pět FR4 desek z každé série zůstalo pro případné další zkoumání (dále se bude pod pojmem série uvažovat 5 kusů FR4 desek).



Obrázek 10 - Deska FR4

Byly vytvořeny celkem čtyři série:

- Pájecí pasta (množství $0,117 \text{ mm}^3/\text{spoj}$)
- Pájecí pasta (množství $0,18 \text{ mm}^3/\text{spoj}$)
- Elektricky vodivé lepidlo (množství $0,117 \text{ mm}^3/\text{spoj}$)
- Elektricky vodivé lepidlo (množství $0,18 \text{ mm}^3/\text{spoj}$)

Rozměry kovové šablony, přes kterou se nanášel pájecí materiál přímo na kontakty FR4 desky, byly změřeny elektronickým mikroskopem. Princip šablonového tisku je již popsán v teoretické části 1.3. Rozměry v šabloně jsou u menších otvorů $1,3 \text{ mm} \times 0,6 \text{ mm} \times 0,15 \text{ mm}$ a u větších otvorů $1,5 \text{ mm} \times 0,8 \text{ mm} \times 0,15 \text{ mm}$. Z těchto hodnot byl následně vypočítán objem naneseného pájecího materiálu.

5.1.1 Použitý spojovací materiál

Použité elektricky vodivé lepidlo je jednosložkové a ekologicky nezávadné. To je velká výhoda jak pro pracovníky, kteří s tímto materiálem přicházejí do kontaktu, tak i pro zákazníky a životní prostředí.

Pájecí pasta je složena z mědi, cínu a stříbra. Neobsahuje olovo a je zdravotně nezávadná. Oproti elektricky vodivému lepidlu má o $37 - 39 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší teplotu tání.

- Lepidlo ECO SOLDER AX70MN (doporučená teplota pro přetavení 180 °C při 10 min.). Veškeré technické parametry se nachází v příloze.
- Pájecí pasta SAC DSP 350 (teplota pro přetavení 217 °C - 219 °C při 2 min.). Veškeré technické parametry se nachází v příloze.

Oba použité spojovací materiály vyhovují současné legislativě.

V ekonomické části této práce bude porovnáno mimo jiné i množství nanesení spojovacího materiálu v závislosti na kvalitě spojů. Při velkosériových výrobcích se výrobce snaží obvykle snižovat náklady na všech vstupujících položkách. V tomto případě by se dalo například ušetřit na množství nanesení spojovacího materiálu. Při nanesení menšího množství se ovšem musí počítat s vyšší zmetkovitostí.

5.2 Osazení vzorků SMT manipulátorem

Pro osazení rezistorů bylo použito zařízení, které se skládá z duté pohyblivé jehly a fixačního stolku. Skrz jehlu je vysáván vzduch a díky podtlaku je jehla schopna uchytit součástku. S jehlou se dá ručně pohybovat v ose x a y a také lze součástkou rotovat o 360° (v ose x a y). Díky senzoru umístěnému v jehle se po dotyku součástky s nanesenou vrstvou spojovacího materiálu přeruší odsávání, a součástka tak zůstane na svém místě.

5.2.1 Osazovaná součástka

Všechny série byly osazeny rezistorem SMD 125 mW, 0 Ohm, 0.1 %, 0805. I přesto, že je na součástce uvedena hodnota 0Ω, lze na ni malý odpor v řádech jednotek až desítek mΩ naměřit. V tomto případě bylo přeměřeno pět rezistorů a vždy se naměřilo 17 mΩ. Tato hodnota se dále uvažovala i v ostatních případech.

5.3 Přetavení lepidla a pájecí pasty

Přetavení elektricky vodivého lepidla se provedlo dle parametrů od výrobce ve vakuové sušárně SPT 200 při konstantní teplotě 180 °C po dobu 10 minut. Během procesu tavení lepidla v něm dochází k působení sil, které mají tendenci srovnat lepenou součástku do správného směru. Díky této vlastnosti se pak drobné nepřesnosti vyrovnají a výsledné spoje vypadají lépe i z vizuálního hlediska.

Přetavení pájecí pasty se provedlo dle parametrů od výrobce v průběžné peci Mistral 260. Deska plošného spoje projela během dvou minut třemi teplotními fázemi.

preheat 1	preheat 2	preheat 3
180°C	230°C	246°C

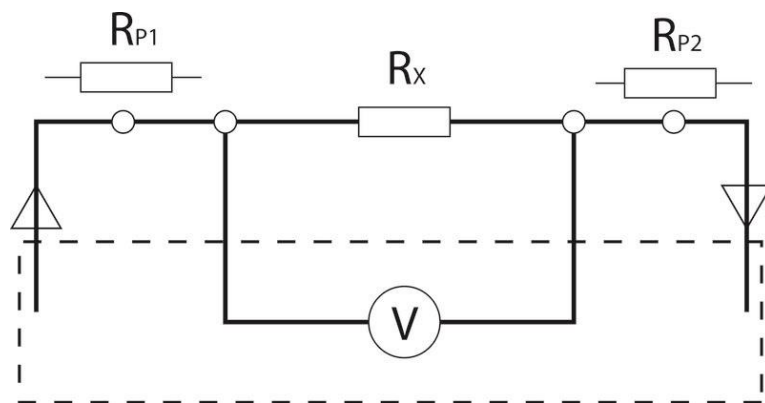
Tabulka 4 - Teploty přetavení pájecí pasty

5.4 Měření elektrického odporu

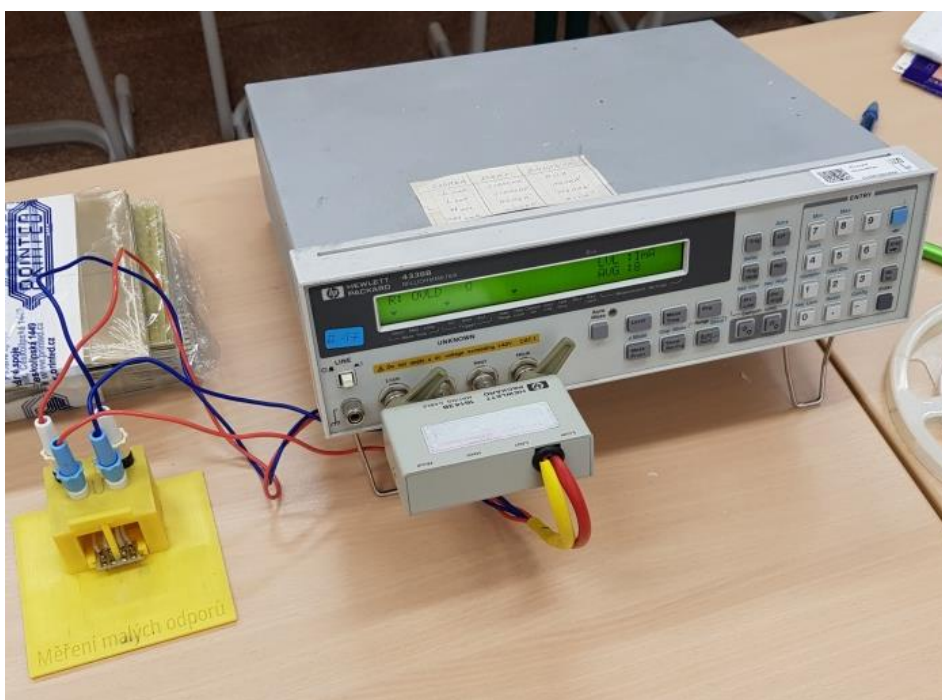
Měření elektrického odporu bylo provedeno čtyřbodovou metodou. Touto metodou bylo změřeno 70 vzorků s pájecí pastou a 70 vzorků s elektricky vodivým

lepidlem. Čtyřbodová metoda se využívá pro přesné měření malých odporů. Tato metoda využívá čtyři sondy, z toho dvě jsou proudové a dvě napěťové.

Měření probíhá tak, že se nejprve všechny sondy zkratují a vynuluje se měřicí přístroj. Poté se vezme jeden vzorek a vloží se do přípravku s jehlami, které se přitisknou na kontakty měřeného rezistoru. Ve schématu níže je R_x měřený odpor a R_{p1} a R_{p2} znázorňuje přechodový odpor na svorkách, který je díky této metodě eliminován.



Obrázek 11 - Schéma zapojení čtyřbodové metody [5]



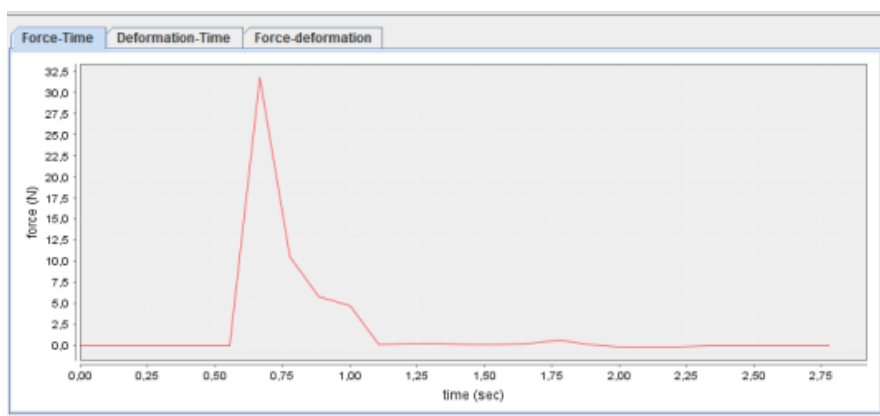
Obrázek 12 - Měřicí přístroj pro čtyřbodovou metodu

Naměřené hodnoty jsou v příloze v tabulce 15. Výsledné naměřené průměrné hodnoty jsou vždy z celé série. V případě pájecí pasty u většího množství vyšlo 23,0 mΩ a u menšího množství 24,2 mΩ. U lepených spojů vyšlo u většího množství 209,5 mΩ a u menšího množství 312 mΩ. Je tedy patrné, že při snížení množství naneseného spojovacího materiálu se zvýší odpor na jednotlivých spojích.

5.5 Měření mechanické pevnosti

V některých aplikacích je potřeba, aby spoje splňovaly určité nároky na mechanické vlastnosti. V tomto případě bylo měření mechanické pevnosti spojů provedeno na stejných vzorcích, na kterých byla měřena velikost odporu.

Měření se provádělo na trhačce značky DEFORM 02. Postup byl takový, že se nejprve v programovacím prostředí vytvořil program pro trhačku. V něm byla obsažena rychlost trhání součástky (5 mm/s) a vzdálenost, do které se má trhací nůž posunout. Poté se do přípravku na trhačce přichytil vzorek a přes počítač se spustil proces odtrhávání součástky a měření. Výsledkem tohoto měření byl obrázkový graf a soubor se zaznamenanými hodnotami.

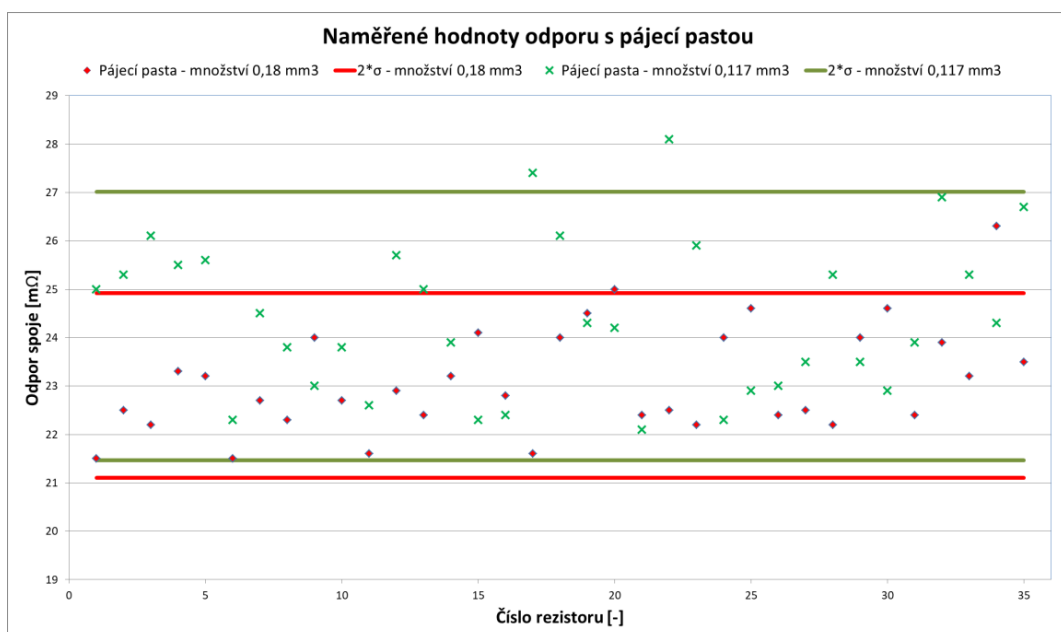


Obrázek 13 – Ukázka grafu z trhacího zařízení

Naměřené hodnoty jsou v příloze v tabulce 15. Výsledné průměrné hodnoty jsou z celé série bez červeně označených vyřazených hodnot. V případě pájecí pasty se trhací síla pohybovala okolo 22 N a u elektricky vodivého lepidla 7 N. Rozdíly trhací síly mezi velkým a malým množstvím naneseného pájecího materiálu jsou z hlediska rozptylu naměřených hodnot zanedbatelné.

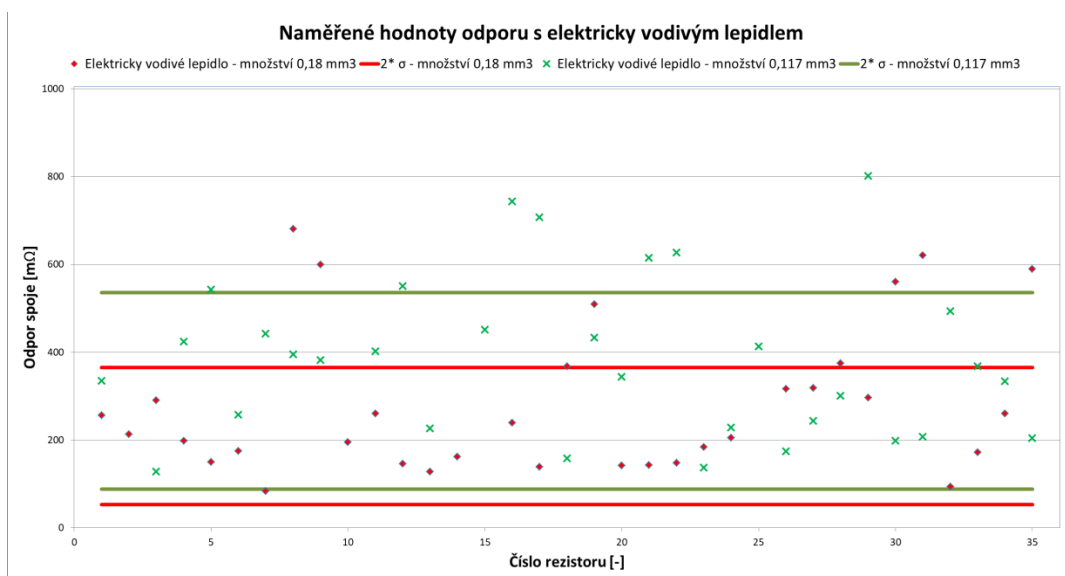
5.6 Popis výsledných grafů

Na následujících stránkách jsou uvedené grafy ze všech naměřených hodnot. Každý graf obsahuje větší a menší množství naneseného spojovacího materiálu v závislosti na měřené veličině (grafy byly vytvořeny z hodnot v tabulce 15 v příloze) a dále hranice směrodatné odchylky (označené písmenem σ). Jelikož se jednalo o ručně vyráběné spoje, byla zvolena hranice dvou směrodatných odchylek. Pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o dvě směrodatné odchylky, je při ideálním normálním rozdělení cca 95 %. Nepovedené spoje (v tabulce 15 v příloze) byly označeny červenou barvou a byly dále vyloučeny z výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. V následujících grafech pak tyto hodnoty lze převážně pozorovat mimo vyznačené hranice směrodatné odchylky.



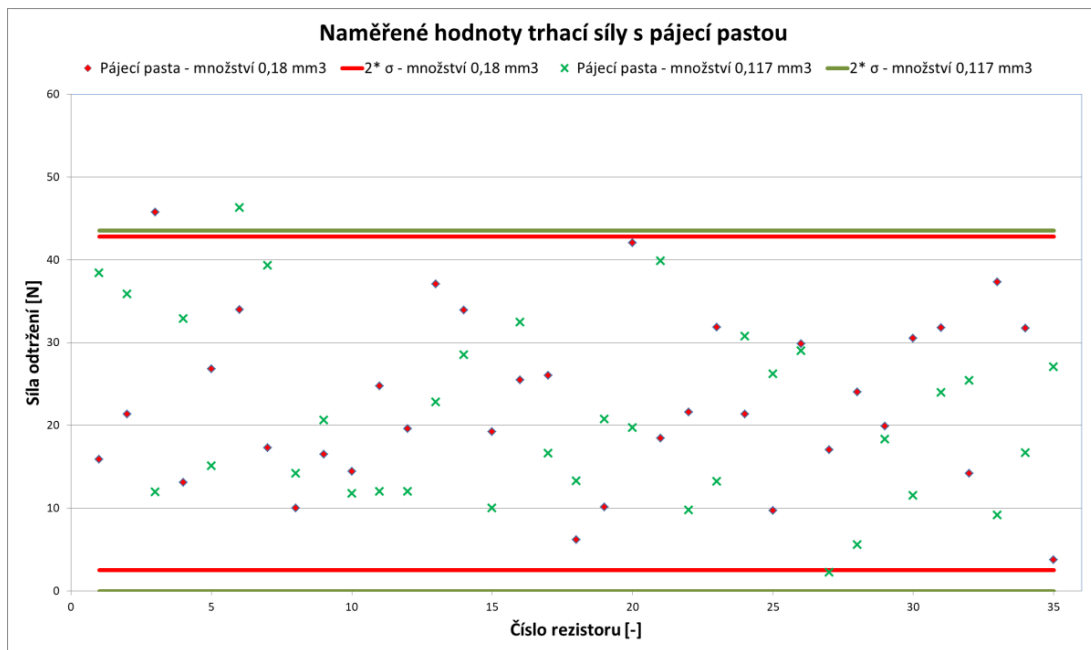
Graf 1 - Naměřené hodnoty odporu s pájecí pastou

Z grafu 1 je patrné, že množství nanesené pájecí pasty je závislé na velikosti spojového odporu. V případě většího množství vyšel průměrný odpor 23,0 mΩ a v případě menšího množství 24,2 mΩ. Hodnoty vyznačené nad horní mez směrodatné odchylky jsou považovány za zmetkové kusy.



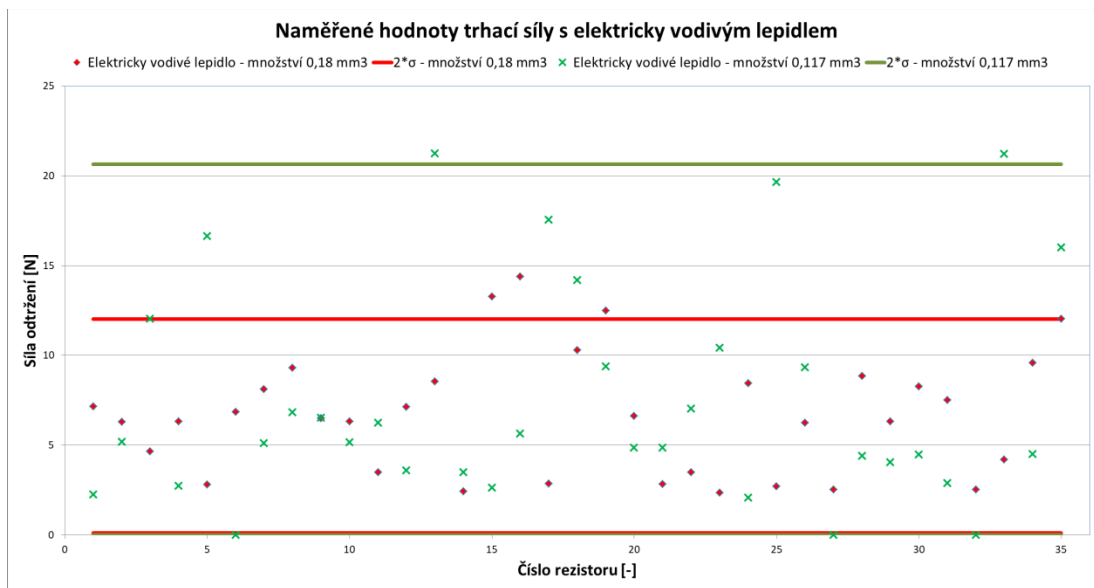
Graf 2 - Naměřené hodnoty odporu s elektricky vodivým lepidlem

Z grafu 2 je patrné, že množství naneseného elektricky vodivého lepidla je opět závislé na velikosti spojového odporu. V případě většího množství vyšel průměrný odpor 209,48 mΩ a v případě menšího množství 312,0 mΩ. Hodnoty vyznačené nad horní mez směrodatné odchylky jsou považovány za zmetkové kusy. V porovnání s pájecí pastou jsou naměřené hodnoty řádově u elektricky vodivého lepidla desetkrát vyšší.



Graf 3 - Naměřené hodnoty trhací síly s pájecí pastou

V grafu 3 jsou hodnoty naměřené trhací síly s pájecí pastou. V tomto případě není znatelný téměř žádný rozdíl mezi naneseným větším a menším množstvím spojovacího materiálu.



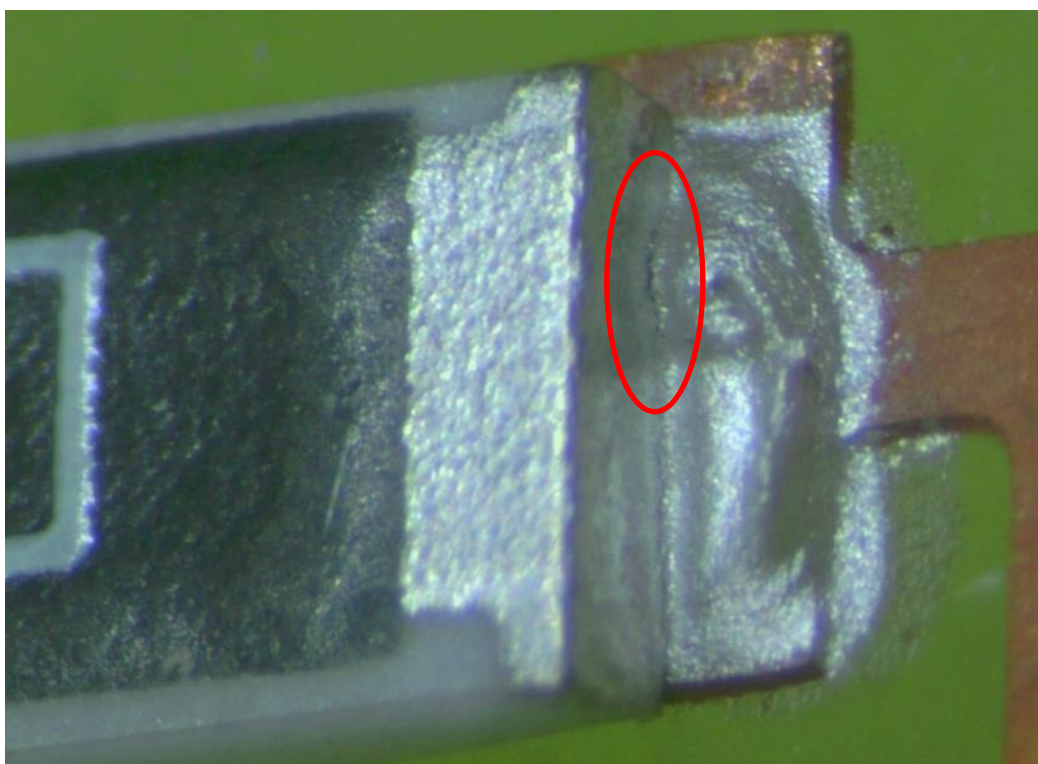
Graf 4 - Naměřené hodnoty trhací síly s elektricky vodivým lepidlem

V grafu 4 jsou hodnoty naměřené trhací síly s elektricky vodivým lepidlem. V porovnání s pájecí pastou je trhací síla u elektricky vodivého lepidla přibližně 3 krát nižší. Je zde vidět, že horní směrodatná odchylka menšího množství je větší než v případě menšího množství. Tento jev je nejspíš způsoben tím, že se jedná o destruktivní zkoušku.

5.7 Vizuální kontrola a zmetkovitost

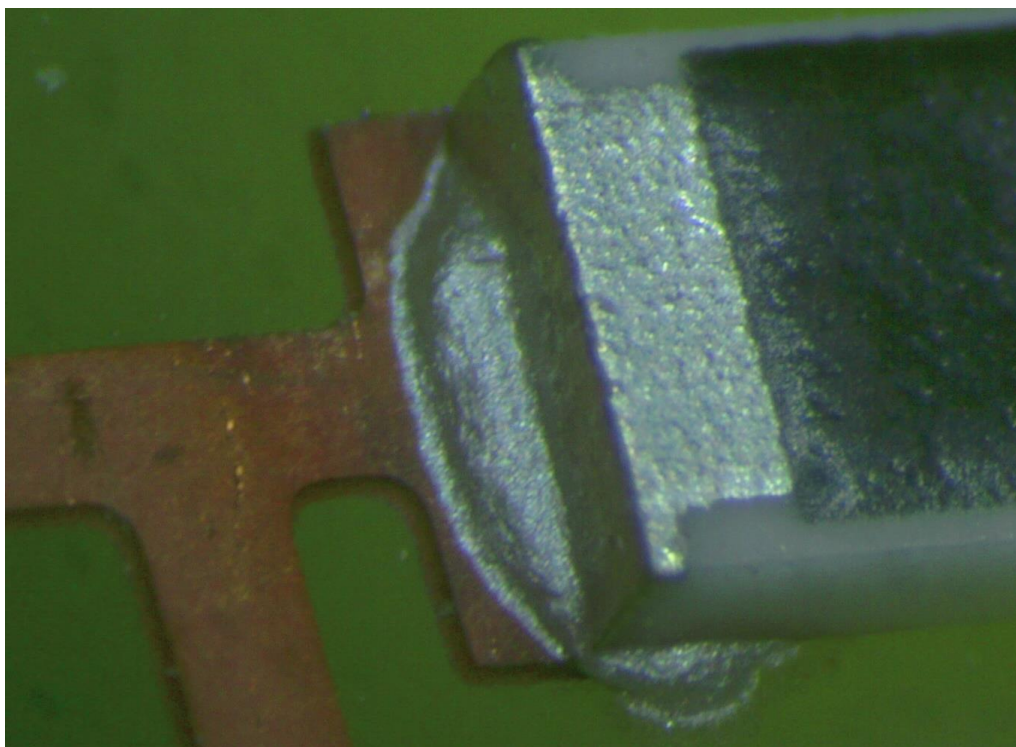
Pro vizuální kontrolu byla použita elektronická lupa SMART MIKROSKOP ALL-IN. Díky ní byly nafoceny zajímavé jevy, které se na spojích vyskytly. Cílem bylo zaměřit se na vzorky, kde byl naměřen mnohem větší odpor než u ostatních součástek v dané sérii. V takových případech lze totiž předpokládat, že došlo k nesprávnému propojení mezi kontakty a spojovacím materiálem.

Na obrázku 14 je spoj s množstvím $0,18 \text{ mm}^3$ naneseného elektricky vodivého lepidla. V jedné části spoje vznikla prasklina, která značně zvýšila elektrický odpor spoje. Při porovnání spojovacích materiálů na následujících obrázcích lze říci, že elektricky vodivé lepidlo má matně šedivou barvu. Také má během přetavení horší vzlínavost, která má za následek nerovnoměrné rozložení elektricky vodivého lepidla po celé ploše spoje.



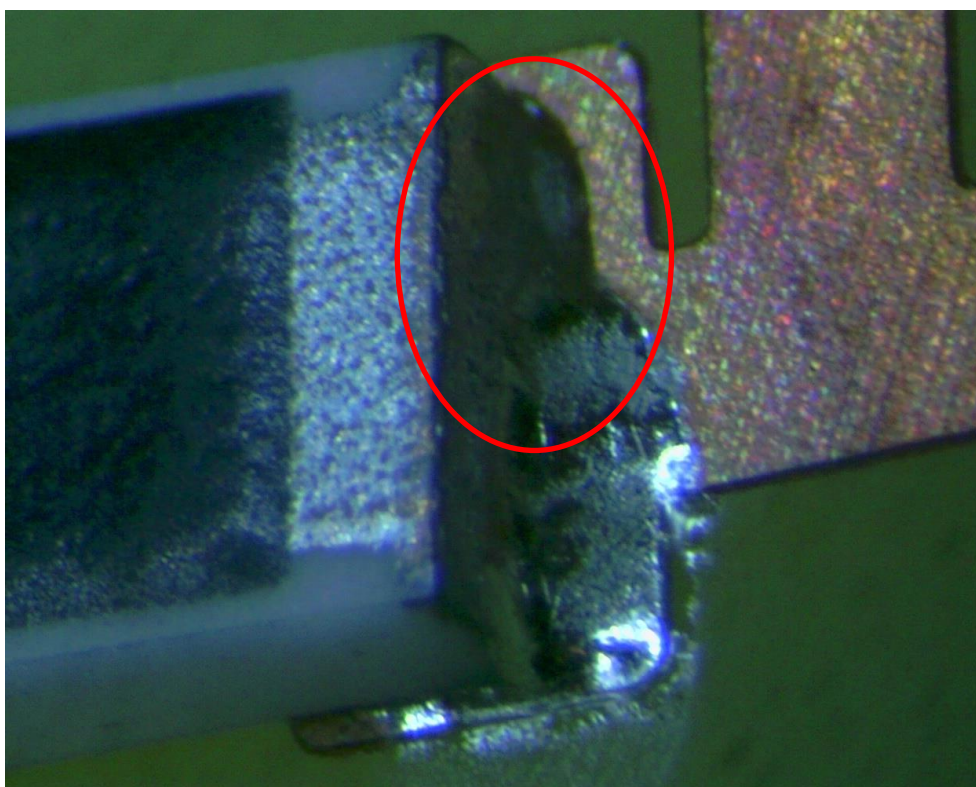
Obrázek 14 - Prasklina na spoji s elektricky vodivým lepidlem

Na obrázku 15 je ukázka správně přetaveného spoje s množstvím $0,18 \text{ mm}^3$ elektricky vodivého lepidla, kde je vidět spojitě propojení mezi osazeným rezistorem a měděným kontaktem na DPS bez prasklin nebo jiných pohledových vad.



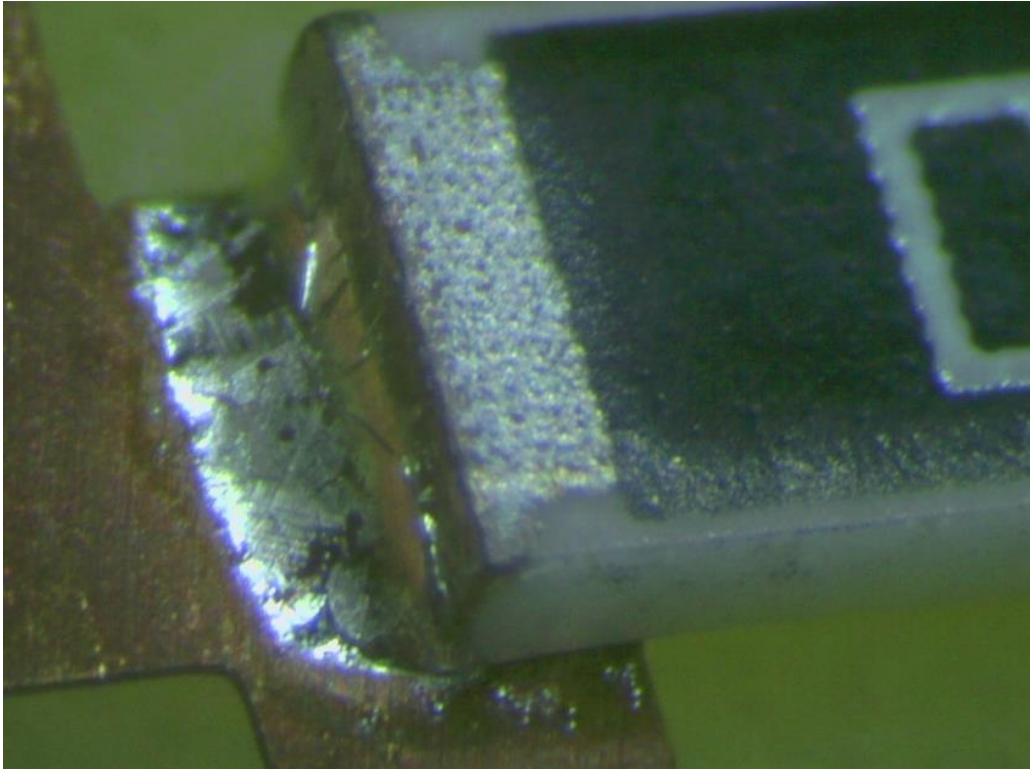
Obrázek 15 - Správný spoj s elektricky vodivým lepidlem

Na obrázku 16 je ukázka spoje s 0,117 mm³ pájecí pasty. Je zde patrné nerovnoměrné rozložení vrstvy pájecí pasty. Může to být způsobeno například špatně naneseným množstvím spojovacího materiálu přes nanášecí masku (při nanesení v masce vznikla bublina), nebo nehomogenitou pájecí pasty.



Obrázek 16 - Nerovnoměrně nanesená pájecí pasta

Na obrázku 17 je ukázka správně přetaveného spoje s množstvím $0,18 \text{ mm}^3$ pájecí pasty, kde je vidět spojitě propojení mezi osazeným rezistorem a měděným kontaktem na DPS bez prasklin nebo jiných pohledových vad.



Obrázek 17 – Správný spoj s pájecí pastou

5.8 Vyhodnocení praktické části

Naměřené výsledné hodnoty uvedené v příloze v tabulce 15 odpovídají teoretickým předpokladům spojovacích materiálů v tabulce 2. Spojový odpor byl naměřen u pájecí pasty přibližně 15 krát menší než u elektricky vodivého lepidla. Přídržná síla SMD součástek vyšla 3 krát vyšší u pájecí pasty.

Z naměřených hodnot také vyplývá, že pro získání nižší zmetkovitosti je nutné používat pájecí pastu, která zajišťuje nižší spojový odpor a vyšší přídržnou sílu SMD součástky, a tím i delší životnost pájeného spoje. V aplikacích, kde lze použít pouze elektricky vodivé lepidlo, by mělo být nanášeno větší množství objemu nanesené vrstvy.

Teplota přetavení byla nastavena dle parametrů doporučených výrobcem a větší množství spojovacího materiálu se nenanášelo z důvodu správného provedení trhací zkoušky. Při nanesení většího množství spojovacího materiálu by docházelo k vytržení kontaktu přímo na SMD rezistoru a tím i k nesprávnému měření trhací síly.

6 Ekonomické zhodnocení technologií

V rámci této bakalářské práce bylo úkolem, kromě technického zhodnocení, také ekonomicky zhodnotit vybrané pájecí technologie. Hodnotí se zde technologie elektricky vodivého spojování pomocí pájecí pasty a technologie vodivého spojování pomocí vodivého lepidla. Původně bylo zamýšleno zhodnotit výrobní náklady v reálných podmínkách některého podniku, ale při oslovení několika firem nebyla získána žádná data. Firmy tyto informace pokládají za obchodní tajemství.

Protože byla praktická část bakalářské práce zpracována v podmínkách laboratoře ČVUT, tak i ekonomické zhodnocení vychází z ekonomických údajů, které byly zjištěny v laboratoři ČVUT. Pro získání cen zařízení byl použit inventurní seznam laboratoře s příslušnými cenami a rokem pořízení, který byl nezbytný pro přepočítání na dnešní kupní ceny.

Ekonomické zhodnocení bude zaměřeno na porovnání měrných výrobních nákladů obou technologií vodivého spojování v provozu laboratoře ČVUT. Současně zde budou vysvětleny i odborné ekonomické pojmy, které se při výpočtech dále použily.

6.1 Způsoby kalkulací nákladů

Kalkulace je činnost, která stanovuje a zjišťuje množství přímých a nepřímých nákladů na jednotku výkonu. Lze ji rozdělit na předběžnou kalkulaci a výslednou kalkulaci. Předběžná kalkulace se sestavuje před zahájením výroby, kde jsou podkladem technickohospodářské normy spotřeby přímých nákladů a rozpočty nepřímých nákladů. Výsledná kalkulace je skutečný údaj zjištěný z vnitropodnikového účetnictví po ukončení výroby. [15, 16]

Kalkulace se dělí na dvě kalkulační techniky. Kalkulaci dělením a kalkulaci přiřázkovou. [15]

6.1.1 Kalkulace dělením

Jde o jednodušší metodu, která má ale svá omezení a lze ji použít pro stejnorodou výrobu. Kalkulace dělením se dále člení na dvě modifikace, a to na kalkulaci prostým dělením a kalkulaci dělením s poměrovými čísly.

V kalkulaci prostým dělením je předmětem výroby pouze jeden druh výrobku, a proto se tato metoda v praxi příliš nepoužívá. Celkové režijní náklady (TC) se v tomto případě podělí plánovaným počtem vyrobených kusů (Q) a vyjde celkový náklad na jeden kus výrobku (kalkulační jednici) n_k :

$$n_k = \frac{TC}{Q}$$

Vzorec 1 - Náklady na jeden kus výrobku [17]

V případě, kdy podnik vyrábí více druhů od jednoho podobného výrobku, lze použít kalkulaci dělením s poměrovými čísly. Pro výpočet této kalkulace je nutné zvolit hlavního představitele a z něho pak vypočíst poměrové hodnoty pro vyjádření ostatních druhů výrobků. Poměrová hodnota vyjadřuje poměr mezi nákladem na jednici hlavního představitele a nákladem na jednici dalšího podobného výrobku. Celkový objem výroby je přepočten na počet jednic hlavního představitele a celkové náklady jsou vyděleny zjištěným objemem výroby. [15, 18]

6.1.2 Kalkulace přírážková

Tento typ kalkulace se využívá ve výrobě, kde se vyrábí více výrobků různého druhu. Nejčastěji se využívá například v sériové a hromadné výrobě strojírenského nebo elektrotechnického charakteru.

Náklady se v tomto případě dělí na dvě skupiny, a to na přímé náklady a nepřímé náklady (režijní). K přímým nákladům lze přímo přiřadit kalkulační jednici (lze je přímo spočítat), nepřímé náklady se volí pomocí vhodné základny jako procentuální přírážka k přímým nákladům. Vhodná základna by měla být snadno zjištělná, dostatečně silná a měla by tvořit podstatný podíl ve struktuře nákladů. Nevýhodou přírážkové kalkulace je způsob zahrnutí ceny nepřímých nákladů. U velkosériové výroby tento typ kalkulace nadhodnocuje náklady velkosériových výkonů, které se pro firmu zdají jako málo ziskové. Naopak podhodnocuje náklady malosériových výkonů. [18, 19]

Tento způsob kalkulace je v praxi využíván nejčastěji.

6.1.3 Volba způsobu kalkulace pro tuto práci

Většina kalkulací stanovuje náklady jako celkovou sumu za jednotlivé položky (jsou též označovány jako úhrnné kalkulace). V této práci bude však použita metoda rozdílové kalkulace, která dokáže sledovat vynaložené náklady a zaměřuje se výhradně na náklady přímé. V této práci bude kalkulace porovnávat pouze rozdílné náklady vstupující do výroby jedné FR4 desky.

6.2 Výrobní náklady

Náklady představují hodnotové vyjádření všech vstupů výroby. Hlavní rozdělení je na náklady stálé (fixní; angl. zkratka FC) a náklady proměnné (variabilní; angl. zkratka VC). Fixní náklady nejsou závislé na objemu produkce, variabilní náklady se s objemem výroby mění. Celkové náklady jsou součtem fixních nákladů a variabilních nákladů a označují se zkratkou TC (angl. Total Cost)

Fixní náklady zahrnují: úroky z úvěru, nájemné, pojištění, platy manažerů, odpisy apod.

Variabilní náklady zahrnují: spotřebu materiálu, energii, náklady na dopravu, mzdy zaměstnanců apod. [16, 20]

6.2.1 Účetní odpisy

Účetní odpisy majetku stanovují, jak moc je v průběhu času majetek opotřeben. Jedná se o předpokládané opotřebení, které se v praxi stanovuje nejčastěji odborným odhadem. Opotřebení může být jak fyzické, tak morální. Na rozdíl od odpisů daňových jsou účetní odpisy v plné kompetenci účetní jednotky. Rozdělují se na dvě základní metody.

První metodou je odpis časový, kde se majetek odepisuje podle času. Lze například stanovit rychlost odepisování v různých časových intervalech.

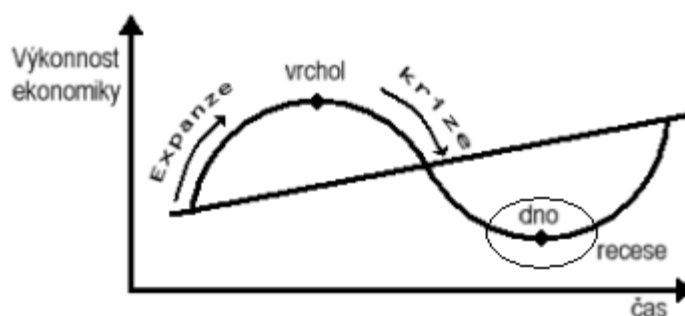
Druhou metodou je odpis výkonový, kde se uvažuje množství vykonané práce (např. množství najetých kilometrů).

V této práci bude použita metoda rovnoměrného časového odpisu, kde se délka odpisu zařízení bude uvažovat jako doba životnosti zařízení (tzn. 10 let).

6.2.2 Doba životnosti zařízení

Časové období, vyjádřené obvykle v letech, po které dané zařízení plní svoji funkci ve výrobě. K vyřazení zařízení z výrobního procesu dochází z důvodů fyzického opotřebení a morálního opotřebení.

Volba doby životnosti zařízení se stanoví na předpokládaném vývoji v hospodářské situaci (viz graf 5). V období expanze se používá doba životnosti šest let. V období krize se může doba životnosti uvažovat i na 12 let. Vzhledem k aktuální situaci bude počítáno s dobou životnosti 10 let. [16, 18, 20]



Graf 5 - Ekonomický růst (hospodářský cyklus) [21]

6.2.3 Diskontování

Diskontování neboli aktualizace, je přepočítání finančních tokových veličin z různého časového období ke zvolenému časovému bodu. Pro další porovnání (např. sečtení) je nutné zahrnout nestabilitu tržeb nebo zisků v různých časových bodech.

Při použití výpočtu pro diskontování si firma může cenu příležitosti (alternativní náklad kapitálu, diskont) určit sama podle vlastních předpokladů vývoje trhu.

V dalších výpočtech bude diskont označen písmenem r a bude využit k výpočtu cen zařízení na současnou hodnotu.

Pro účely této práce byl vzhledem k současné situaci v průmyslu diskont odhadnut na $r = 0,07$, tj. 7%. [16, 20]

6.2.4 Zmetkovitost

Ve výrobním procesu vznikají zmetky, tj. špatně vyrobené výrobky. Zmetkovitost označuje počet zmetků za určitý čas, nebo je vztažena na určitý počet dobrých výrobků.

Při výrobě FR4 desek v praktické části se také vyskytlo určité množství zmetků, které byly z dalších výpočtů vyloučeny (viz tabulka 5). K vyloučení došlo z důvodu velkého spojového odporu, nízké přídržné síly nebo vizuální vady. V tomto případě má na zmetkovitost vliv především ruční výroba jednotlivých spojů v závislosti na velikosti spoje.

Množství zmetků v jednotlivých sériích			
Pájecí pasta		Elektricky vodivé lepidlo	
Množství 0,18 mm ³	Množství 0,117 mm ³	Množství 0,18 mm ³	Množství 0,117 mm ³
2,9%	5,7%	22,9%	37,1%

Tabulka 5 - Množství vyloučených zmetků v sérii

Množství zmetků, které v jednotlivých sériích vznikly, je převzato z tabulky 15 v příloze.

6.2.5 Anuita

Anuita je pravidelná splátka z poskytnutého dlouhodobého úvěru. Část anuity tvoří vlastní splátka dluhu (tzv. úmor), zbytek tvoří úrok. Při stanovení anuity se vychází z podmínky, že součet všech anuit za celé období splácení úvěru diskontovaných k okamžiku uzavření půjčky se rovná nominální hodnotě dluhu. S postupem splácení klesá v anuitní splátce podíl úroků a roste podíl úmoru. U všech zařízení bude uvažována stejná doba životnosti i diskontní sazba. [16, 20]

Výpočet anuity:

$$A = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} = \frac{(1+0,07)^{10} \cdot 0,07}{(1+0,07)^{10} - 1} = 0,1424$$

Vzorec 2 - Výpočet anuity

kde r je diskontní míra a T je doba životnosti zařízení.

V tomto případě bude anuita využita pro výpočet ceny používaných zařízení za 1 rok, tj. pro stanovení odpisu zařízení. Cena používaných zařízení za 1 rok se vypočte vynásobením anuity a pořizovací ceny zařízení.

6.2.6 Cena pořízení zařízení v dnešních penězích

Pokud nejsou všechna zařízení nakoupena ve stejnou dobu, jejich pořizovací ceny mezi sebou nelze porovnávat. Na měnu působí postupem času inflace nebo deflace, která její hodnotu značně ovlivňuje. Ceny a rok pořízení jednotlivých zařízení v této práci pochází z inventurního seznamu laboratoře ČVUT, kde byla provedena praktická část bakalářské práce. Zařízení nebyla zakoupena ve stejné době, a proto se jejich kupní hodnota musí přepočítat na stejné časové období (v tomto případě jsou veškerá zařízení přepočtena k datu 1. 1. 2022). Míry ročních inflací byly převzaty z Českého statistického úřadu. Vakuová sušárna SPT 200 (rok pořízení 1977) byla ovšem pořízena před rokem 1989 a v té době byla konstantně udávána míra inflace 1,3 p.a. K této hodnotě je ale nutné připočíst skrytou inflaci hodnotu 2% p.a., kterou odhadli ekonomové z Vídně. [20]

Tabulka ročních inflací od roku nakoupení prvního zařízení								
Rok	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Inflace p.a. [%]	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Inflace p.a. [-]	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Rok	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Inflace p.a. [%]	3,3	3,3	3,3	3,3	1,4	9,7	56,6	11,1
Inflace p.a. [-]	0,033	0,033	0,033	0,033	0,014	0,097	0,566	0,111
Rok	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Inflace p.a. [%]	20,8	10,0	9,1	8,8	8,5	10,7	2,1	3,9
Inflace p.a. [-]	0,208	0,1	0,091	0,088	0,085	0,107	0,021	0,039
Rok	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Inflace p.a. [%]	4,7	1,8	0,1	2,8	1,9	2,5	2,8	6,3
Inflace p.a. [-]	0,047	0,018	0,001	0,028	0,019	0,025	0,028	0,063
Rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Inflace p.a. [%]	1,0	1,5	1,9	3,3	1,4	0,4	0,3	0,7
Inflace p.a. [-]	0,01	0,015	0,019	0,033	0,014	0,004	0,003	0,007
Rok	2017	2018	2019	2020	2021			
Inflace p.a. [%]	2,5	2,1	2,8	3,2	3,8			
Inflace p.a. [-]	0,025	0,021	0,028	0,032	0,038			

Tabulka 6 - Roční inflace od roku nakoupení prvního zařízení [22]

Zařízení	Rok pořízení	Požizovací cena [CZK]	Hodnocené období pro průměrnou inflaci	Počet roků	Cena v současných penězích [CZK]
Vakuová sušárna SPT 200	1977	39 500	1977-2021	43	351 490
Milíohmmetr HP	1997	108 146	1997-2021	23	203 295
SMT manipulátor M01P	1999	19 555	1999-2021	21	32 523
Mikroskop HAWK PRECISION (firma VISION)	2010	1 124 316	2010-2021	10	1 402 441
pec Mistral 260	2010	278 640	2010-2021	10	347 568
Sítotiskové zařízení SAB 06	2010	42 768	2010-2021	10	53 348
Trhačka DEFORM 02	2015	373 672	2015-2021	5	433 650
Smart mikroskop all-in (firma HOTAIR)	2018	35 068	2018-2021	2	38 617

Tabulka 7 - Přepočtené ceny všech použitých zařízení na současnou hodnotu

Výpočet ceny na současnou hodnotu se provedl pomocí vzorce:

$$K_A = K_B \cdot (1 + i_{t_{p+1}}) \cdot (1 + i_{t_{p+2}}) \cdot \dots \cdot (1 + i_{2021})$$

Vzorec 3 - Přepočet kupní ceny na současnou hodnotu [20]

Jelikož cílem této práce je vyhodnotit ekonomické dopady zavedení pájecí technologie vzhledem k různým parametrům zvolené technologie, budou vypočteny z rozdílných vstupních nákladů na jednotlivé technologie. V případě použitých strojů se technologie liší pouze v použité tavicí peci a vakuové sušárně.

Přepočtené ceny zařízení na dnešní hodnotu však nejsou reálné, a proto bude cena za vakuovou sušárnu SPT200 a pec Mistral 260 zjištěna z aktuální cenové nabídky na trhu. Alternativa pro vakuovou sušárnu je Vakuová sušárna EM-7013-ME s cenou 73 409 Kč včetně DPH. Aktuální cena za pec Mistral 260 je 10 045\$ včetně DPH (k 1. 1. 2022 byl kurz dolaru 24,86 Kč). Výsledná cena za pec je tedy 249 719 Kč. [23–25]

Cena zařízení pro pájecí pastu k 1. 1. 2022			
Zařízení	Rok pořízení t_p [-]	Požizovací cena K_B [CZK]	Aktuální cena K_A [CZK]
pec Mistral 260 (vypočtená)	2010	278 640	347 568
pec Mistral 260 (tržní)	2022		249 719
CENOVÝ ROZDÍL (vypočtená - tržní):			97 849

Tabulka 8 - Současné ceny pro technologii s pájecí pastou

Cena zařízení pro elektricky vodivé lepidlo k 1. 1. 2022			
Zařízení	Rok pořízení t_p [-]	Požizovací cena K_B [CZK]	Aktuální cena K_A [CZK]
Vakuová sušárna SPT 200 (vypočtená)	1977	39 500	351 490
Vakuová sušárna SPT 200 (tržní)	2022		73 409
CENOVÝ ROZDÍL (vypočtená - tržní):			278 081

Tabulka 9 – Současné ceny pro technologii s elektricky vodivým lepidlem

6.2.7 Výpočet celkové odepisované částky s anuitou za rok

Na základě znalosti hodnoty anuity, době životnosti všech zařízení a pořizovacích cen, lze vypočítat roční odepisovanou částku z celkové ceny nakoupených zařízení pro danou technologii. Je uvažováno konstantní odepisování po dobu deseti let.

$$O = A \cdot K_A$$

Vzorec 4 - Výpočet roční odepisované částky s anuitou

O značí celkovou odepisovanou částku za jeden rok, A je hodnota anuity a K_A je celková cena zařízení pro danou technologii včetně DPH. Pro technologii s pájecí pastou by byla roční odepisovaná částka 35 560 Kč a pro technologii s elektricky vodivým lepidlem 10 453 Kč.

6.2.8 Doba výroby FR4 desky

Jednotlivé kroky pro osazení a přetavení FR4 desky jsou popsány v praktické části této práce. Do výpočtu celkové hodnoty jedné FR4 desky je potřeba zahrnout i čas jednotlivých úkonů. Pro další výpočty se z tabulky 10 použijí pouze časy přetavení spojů. Ostatní časy jsou totožné a v rozdílové kalkulaci tudíž nepodstatné.

Čas jednotlivých úkonů pro jednu celou sérii (jedna série = 5 FR4 desek)						
	Příprava [min]	Nanesení materiálu přes masku [min]	Osazení součástkami [min]	Přetavení spojů [min]	Vizuální kontrola [min]	Celkem [min]
Příprava jedné série s pájecí pastou	6	4	15	2	2	29
Příprava jedné série s elektricky vodivé lepidlo	6	4	15	10	2	37

Tabulka 10 - Čas jednotlivých úkonů pro celou sérii

Ve vzorci 5 je N_S množství vyrobených sérií za jednu pracovní směnu, $t_{h/den}$ značí délku pracovní doby a t_1 série značí celkovou dobu výroby jedné série. V laboratorních podmínkách školy by laborant zaměstnaný na osmihodinovou pracovní dobu vytvořil 16,6 sérií (po zaokrouhlení 16) s pájecí pastou nebo 13 sérií s elektricky vodivým lepidlem.

$$N_S = \frac{t_{h/den}}{t_1 \text{ série}}$$

Vzorec 5 - Výpočet pro zjištění množství vyrobených sérií za jednu směnu

6.2.9 Mzdové náklady

Plat laboranta (pracovníka v laboratoři) ve škole bude uvažován jako průměrný plat v Praze ve čtvrtém čtvrtletí 2021. Jeho výše hrubého platu činí 46 152 Kč. K této mzdě je nutné připočítat povinné odvody státu, které se dělí na sociální pojištění (25 %) a zdravotní pojištění (9 %). Uvedená hrubá mzda se tedy navýší o 34 % a celkový měsíční plat laboranta bude školu stát 61 844 Kč. Dříve se tato částka označovala jako superhrubá mzda. [26]

Cena platu zaměstnance se do kalkulace započítá jako cena času, kdy laborant čeká na vytvrzení či přetavení spojů (v reálném případě by laborant mohl provádět jiné úkony, ale z důvodu jednoduchosti byl zvolen tento postup).

Rok má celkem 252 pracovních dnů (21 dnů za měsíc) a denní mzda laboranta bude po zaokrouhlení stát 2 945 Kč. Mzdový náklad na jednu sérii s pájecí pastou pak vychází 12,27 Kč a na jednu sérii s elektricky vodivým lepidlem 61,35 Kč.

$$\frac{12 \cdot 61844}{252} = 2945 \text{ Kč/směna}$$

Vzorec 6 - Výpočet ceny laboranta za jednu směnu

$$\frac{2945}{8 \cdot 60} \cdot 2 = 12,27 \text{ Kč/jedna sér.}$$

Vzorec 7 - Ukázka výpočtu ceny laboranta na jednu sérii s pájecí pastou

Ve vzorci 7 je mzda laboranta za jednu směnu vydělena 8 pracovními hodinami a 60 minutami. Celý zlomek je pak vynásoben časem 2 minuty (čas potřebný pro přetavení jedné série s pájecí pastou).

6.2.10 Materiálové náklady

V praktické části bylo použito elektricky vodivé lepidlo typu ECO SOLDER AX70MN a jeho cena činí 9 762 Kč za 500 g. Dále byla použita pájecí pasta typu SAC DSP 350, která stojí 2 957 Kč za 500 g. Detailní popis jednotlivých spojovacích materiálů viz přílohy. [27, 28]

Cena FR4 desky a cena nulového rezistoru je v obou případech stejná a nemá vliv na výsledné porovnání dvou technologií. Proto nebude ve výpočtu zahrnuta.

6.2.11 Náklady na energii

Do položky nákladů za elektrickou energii budou zahrnuty pouze vakuová sušárna SPT200 a pec Mistral 260. Nebude se uvažovat elektrická energie za osvětlení, počítače, klimatizaci nebo třeba manipulátor, který se využívá u obou technologií stejně dlouho.

Příkon jednotlivých zařízení byl zjištěn v laboratoři přímo ze štítkových hodnot. Štítková hodnota příkonu ale není hodnota, která je po zapnutí zařízení konstantně odebírána ze sítě (je z pravidla nižší). Pro tuto situaci bude proveden kvalifikovaný odhad, kde bude výsledná hodnota spotřeby elektrické energie vynásobena hodnotou 0,4.

Aby mohly být spotřeby elektrické energie porovnány, bude se uvažovat první polovina pracovní směny pro výrobu FR4 desek s elektricky vodivým lepidlem a druhá polovina pracovní směny pro výrobu s pájecí pastou.

Použité zařízení pro výrobu s pájecí pastou			
Zařízení	Příkon P [W]	Doba využití za rok [hod]	Spotřeba elektrické energie (vynásobena koeficientem 0,4) [kWh]
pec Mistral 260	3600	67,2	96,77

Tabulka 11 - Spotřeba elektrické energie pro výrobu s pájecí pastou

Použité zařízení pro výrobu s elektricky vodivým lepidlem			
Zařízení	Příkon P [W]	Doba využití za rok [hod]	Spotřeba elektrické energie (vynásobena koeficientem 0,4) [kWh]
Vakuová sušárna SPT 200	1200	252,0	120,96

Tabulka 12 - Spotřeba elektrické energie pro výrobu s el. vodivým lepidlem

Pro zjištění ceny za elektrickou energii se dále bude na laboratoř pohlížet jako na samostatný objekt. Veškerá použitá zařízení v laboratoři byla na jednofázové připojení, bude se tedy uvažovat připojení jednofázového hlavního jističe do 25A.

Cena za elektrickou energii byla vyhledána přes kalkulačtor na stránkách Energetického regulačního úřadu. Nejvýhodnější dodavatel elektrické energie je Pražská plynárenská, a.s. s produktem KOMPLET EKO Flexi 3 roky. Pro tento produkt nejsou vyžadovány žádné další podmínky. [29]

Celková roční cena za elektřinu se skládá ze čtyř položek: ceny za silovou elektřinu, ceny zajišťování distribuce elektřiny, ekologické daně a platby za ostatní regulované položky. Detailní rozpis jednotlivých položek viz příloha tabulka 16.

Souhrn - celková roční platba

Položka	Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Celková platba	2 582,63	542,35	3 124,98
Z toho za silovou elektřinu	1 017,89	213,76	1 231,64
Z toho za distribuci	1 375,68	288,89	1 664,57
Z toho za ostatní regulované služby	182,90	38,41	221,30
Z toho daň z elektřiny	6,16	1,29	7,46

Tabulka 13 - Rozpis položek cen za elektrickou energii [25]

Celkový roční poplatek za spotřebované množství elektrické energie (218 kWh, uvedeno v tabulce 11 a 12) je podle tabulky 13 zaokrouhleně 3 125 Kč. Na technologii lepení elektricky vodivých spojů se spotřebovalo 121 kWh (1 735 Kč) a na technologii s pájecí pastou se spotřebovalo 96,6 kWh (1 390 Kč). Vzorec pro výpočet jednotlivých cen za elektrickou energii je:

$$CENA\ ENERIE_{PÁJECÍ\ PASTA} = \frac{CELKOVÁ\ CENA \cdot SPOTŘEBA\ ENERIE_{PÁJECÍ\ PASTA}}{CELKOVÁ\ SPOTŘEBA\ ENERIE},$$

Vzorec 8 - Výpočet ceny elektrické energie pro technologii s pájecí pastou

kde celková cena podle tabulky 13 je 3 125 Kč a celková spotřeba elektrické energie podle tabulky 11 a 12 je 218 kWh.

6.2.12 Celkové náklady

Výpočet jednotlivých položek s vysvětlivkami se nachází v příloženém excelovém souboru (a zde v tabulce 14). Podle původních předpokladů v tabulce 2 se potvrdilo, že cena za celkové náklady s využitím elektricky vodivého lepidla je vyšší, než cena při použití pájecí pasty. V tomto případě je rozdíl na výrobu jedné FR4 desky 7,63 Kč (13,19 Kč – 4,34 Kč = 8,85 Kč).

Porovnání celkových nákladů na výrobu jedné série		
Nákladové položky	Technologie s použitím elektricky vodivého lepidla [CZK]	Technologie s použitím pájecí pasty [CZK]
Odpisy [Kč/série]	3,46	8,82
Mzdy [Kč/série]	61,35	12,27
Spojovací materiál [Kč/série]	0,55	0,27
Energie [Kč/série]	0,57	0,34
CELKEM [Kč/série]:	65,93	21,71
CELKEM [Kč/jedna FR4 DPS]:	13,19	4,34
Rozdíl [Kč/jedna FR4 DPS]:	8,85	

Tabulka 14 - Porovnání celkových nákladů na výrobu jedné série

6.3 Zhodnocení ekonomické části

Ekonomická část se nejprve zabývá vysvětlením základních pojmů, jako jsou kalkulace, výrobní náklady, odpisy, doba životnosti zařízení, diskontování a anuita.

Hlavním cílem v této ekonomické části bylo s pomocí rozdílové kalkulace porovnat výrobu se dvěma danými druhy elektricky vodivých spojovacích materiálů. Do kalkulace byla zahrnuta doba využití jednotlivých zařízení v procesu výroby, podle které se určilo, jaké náklady jsou v procesu výroby rozdílné. Z hlediska vytíženosti jednotlivých zařízení by v reálném případě bylo možné provést různé optimalizace, které by zrychlily proces a zvýšily produktivitu výroby (snížili cenu výroby). Nejvyšší položku tvoří mzda laboranta. Cílem této kalkulace bylo ukázat metody jednotlivých kroků a výpočtů. V reálném případě je tvorba kalkulací obtížnější a komplexní oblast a měla by zahrnovat spoustu dalších faktorů, jako je zmetkovitost, pravděpodobnost poruchy strojů, údržba apod.

Dle očekávání lze s tabulkou číslo 2 porovnat, že cena za celkové náklady s využitím elektricky vodivého lepidla je vyšší, než cena při použití pájecí pasty o 8,85 Kč na jednu osazenou FR4 DPS.

7 Závěr

Bakalářská práce byla rozdělena na tři oblasti, které tvoří celkový přehled o dané problematice lepení a pájení elektricky vodivých spojů.

V první části bakalářské práce jsou uvedeny teoretické informace o lepených i pájených elektricky vodivých spojích. V oblasti pájení je zde vysvětleno použití tavidel a jejich pozitivní účinky na kvalitu spojů. Dále je zde popsán ústup od jedovatých příměsí v pájkách, jako je například olovo nebo kadmium, které zatěžují životní prostředí. V technologii pájení je popsán celý proces výroby spojů jak ruční výrobou, tak i automatickou linkou. Zatím co pro vývoj či opravy se využívá ručního osazování a pájení, v průmyslu se využívají převážně automatické pájecí linky. Díky automatizaci jsou spoje vyrobeny přesněji a kvalitněji. V oblasti lepených elektricky vodivých spojů je popsáno složení lepidel a jejich výhody vůči pájecím pastám. Hlavními výhodami jsou nízká teplota pro vytvrzení spoje a schopnost lepidla docílit anizotropních vlastností. Hlavními nevýhodami jsou naopak vyšší hodnota spojového odporu, přídržná pevnost a cena.

V praktické části byly vytvořeny celkem čtyři série po deseti FR4 deskách a porovnával se jeden druh elektricky vodivého lepidla a jeden druh pájecí pasty. Každá FR4 deska byla osazena sedmi rezistory SMD 125 mW (0Ω). Na samotných rezistorech byl naměřen odpor 17Ω a tato hodnota se následně odečetla od hodnot naměřených na připájených součástkách. První dvě série obsahovali pájecí pastu s množstvím $0,117 \text{ mm}^3/\text{spoj}$ a $0,18 \text{ mm}^3/\text{spoj}$. Další dvě série obsahovaly stejná množství elektricky vodivého lepidla. Po přetavení spojovacího materiálu provedeného podle dokumentace od výrobců byl na každém rezistoru změřen čtyřbodovou metodou spojový odpor. Poté byla na stejných FR4 deskách provedena mechanická pevnost spojů na trhačce a všechny hodnoty byly zaneseny do tabulky 15. Naměřené výsledné hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům spojovacích materiálů v tabulce 2. Spojový odpor byl naměřen u pájecí pasty přibližně 15 krát menší, než u elektricky vodivého lepidla. Přídržná síla SMD součástek vyšla přibližně 3 krát vyšší u pájecí pasty. Součástí praktické části jsou i grafy s naměřenými hodnotami a směrodatnými odchylkami. Jelikož se jedná o ručně vyráběné spoje v laboratoři, byla zvolena hranice dvou směrodatných odchylek. Pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o dvě směrodatné odchylky, je při ideálním normálním rozdělení cca 95 %. Nepovedené spoje (v tabulce 15) byly označeny červenou barvou a byly dále vyloučené z výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. V grafech pak tyto hodnoty lze pozorovat především mimo vyznačené hranice směrodatné odchylky. Na závěr praktické části byla provedena vizuální kontrola a ukázka vad na nepovedených spojích. Tyto vady byly pravděpodobně zapříčiněny ruční výrobou spojů.

Ekonomická část se nejprve zabývá vysvětlením základních pojmů, jako jsou kalkulace, výrobní náklady, odpisy, doba životnosti zařízení, diskontní sazba, anuita a časová hodnota peněz.

Hlavním cílem v této ekonomické části bylo s pomocí zvolené rozdílové kalkulace porovnat výrobu se dvěma danými druhy elektricky vodivých spojovacích materiálů. Rozdílová kalkulace znamená, že se porovnají pouze rozdílné položky, které vstupují do celkové výroby spojů.

Kalkulace měla vycházet z cen zařízení zjištěných přímo z inventurního seznamu laboratoře, kde se prováděla praktická část práce. Po přepočtu původních cen zařízení na současnou hodnotu přes narůstající inflaci však vyšly ceny nereálné vůči dnešním tržním cenám. Proto byly tyto hodnoty nahrazeny cenami podobných zařízení na dnešním trhu. Z těchto cen se následně vypočetly odpisy, které jsou vztaženy k době využití zařízení pro výrobu jedné série. Dále zde byla zahrnuta mzda zaměstnance, která je rozdílná v době čekání na přetavení nebo vytvrzení spojů (v reálném případě by mohl zaměstnanec provádět například jiné další přípravy, to se zde však neuvažuje). Další rozdílnou položkou je cena za materiál a cena za energie.

Z hlediska vytíženosti jednotlivých zařízení by v reálném případě bylo možné provést různé optimalizace, které by zrychlily proces a zvýšily produktivitu výroby (snížili cenu výrobku). Hodně by také záleželo na druhu výroby a dalších skutečnostech. Cílem této rozdílové kalkulace bylo ukázat metody jednotlivých kroků a výpočtů. V reálném případě je tvorba kalkulací obtížnější a komplexní oblast a měla by zahrnovat spoustu dalších faktorů, jako je zmetkovitost, pravděpodobnost poruchy strojů, údržba apod.

Podle původních předpokladů v tabulce 2 se potvrdilo, že cena za celkové náklady s využitím elektricky vodivého lepidla je vyšší, než cena při použití pájecí pasty. V tomto případě je rozdíl na výrobu jedné FR4 desky 8,85 Kč.

Literatura

- [1] JANSÁ, Vojtěch. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT.
- [2] EBNEAJAD, Sina. *HANDBOOK OF ADHESIVES AND SURFACE PREPARATION*. Amsterdam: PDL HANDBOOK SERIES, 2011. ISBN 978-1-4377-4461-3.
- [3] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. 2001. vyd. B.m.: ČVUT, nedatováno. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] VOESTALPINE HIGH PERFORMANCE METALS CZ SPOL. S R. O. Pájení kovů. In: [online]. B.m. Dostupné z: https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/app/uploads/sites/18/2018/01/4_P%C3%A1jky-a-tavidla.pdf
- [5] HOTAIR. *Bezolovnatá pájecí pasta s nízkým bodem tání Sn42Bi58 500g* [online]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/bezolovnata-pajeci-pasta-s-nizkym-bodem-tani-sn42bi58-500g.html>
- [6] STM Centrum. *Nebezpečí vyplývající ze znečištění pájecí slitiny* [online]. 28. červen 2017. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/nebezpeci-vyplyvajici-ze-znecistenipajeci-slitiny/>
- [7] PBT ROŽNOV P.R, S.R.O. Pájecí pasty. *Pájecí pasty* [online]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/produkty/spotrebni-materialy/pajeci-pasty>
- [8] Pájecí krém. *Pájecí krém* [online]. 21. leden 2019. Dostupné z: https://cs.frwiki.wiki/wiki/Cr%C3%A8me_%C3%A0_braser
- [9] BÍM, Jiří. *Kvalita pájených a lepených spojů v elektrotechnice*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT.
- [10] LPKF. Precision component surface mount system. *Precision component surface mount system* [online]. Dostupné z: <https://www.lpkf.cn/industries-technologies/pcb-prototyping/process-steps/smt-finishing>
- [11] MAKROM. Osazování DPS Praha. *Naše nabídka v oblasti osazování desek plošných spojů* [online]. 2022. Dostupné z: <https://markom.cz/montaz/smd-montaz/>
- [12] HINTERMÜLLER, Jan. *Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev* [online]. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76708/F3-BP-2018-Hintermuller-Jan-%5B%20teplotniho%20profilu%20u%20pajeni%20pretavenim%20na%20tvorb%20intermetalicky%20vrstev%5D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [13] ŠILER, Antonín. *Návrh a realizace zařízení pro odpájení SMT součástky z desky plošného spoje* [online]. ČVUT, 2011. Bakalářská práce. b.n. Dostupné

- z: https://wiki.control.fel.cvut.cz/mediawiki/images/d/d5/Bp_2011_siler_antonin.pdf
- [14] TARIQ, Usman. *Influence of mechanical stress on properties of conductive adhesive joints* [online]. ČVUT, 2017. Diplomová práce. b.n. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73411/F3-DP-2017-Tariq-Usman-Influence%20of%20mechanical%20stress%20on%20properties%20of%20conductive%20adhesive%20joints.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] P., Tereza. *Ekonomie - účetnictví. Kalkulace - pojem, členění, kalkulační vzorec a metody* [online]. Dostupné z: <https://ekonomie-ucetnictvi.cz/kalkulace-pojem-cleneni-kalkulacni-vzorec-a-metody-ucetnictvi/>
- [16] FIALOVÁ, Helena a Jan FIALA. *Ekonomický slovník s odborným výkladem česky a anglicky*. 2014. vyd. Praha: A plus, nedatováno. 3. ISBN 978-80-87681-02-2.
- [17] SYNEK, Miroslav. *Manažerská ekonomika*. Praha: Grada, 2011. aktualizované a doplněné vydání, 4. ISBN 978-80-247-3494-1.
- [18] *Manažerské účetnictví*. Praha: Management Press, 2018. rozšířená, 4. ISBN 978-80-7261-568-1.
- [19] *Ekonomika lesního hospodářství*. In: [online]. vzdělávací. B.m. 2018. Dostupné z: <http://user.mendelu.cz/xbadal/Studijni%20opory/Ekonomika%20LH/Prezentace%20%E8.%2012.pdf>
- [20] VANĚK, Petr. *Tenkvrstvé technologie*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT.
- [21] *Ekonomický růst (hospodářský cyklus)* [online]. Dostupné z: http://ekonomie.topsid.com/index.php?war=trh_a_jeho_zakony&unit=ekonomicky_rust
- [22] ČSU. *Tab. 03.04 Míra inflace, vývoj spotřebitelských cen vybraných výrobků v České republice* [online]. 2021. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/143522126/32018121_0304.pdf/91af35fa-e453-4020-8446-77685e4b987d?version=1.1
- [23] *Vakuová sušárna EM-7013-ME* [online]. Dostupné z: https://www.polloshop.cz/vakuova-susarna--1-450-w/?gclid=CjwKCAjwve2TBhByEiwAaktM1NIZAav_zQEnJN_lbnb1iv4IBWbBmDaRAHkhYV3vdNpseEYbwQIWdBoCDGAQAvD_BwE
- [24] *MISTRAL 260 REFLOW SOLDERING OVEN* [online]. Dostupné z: <https://www.pcbunlimited.com/products/mistral-260-reflow-soldering-oven>
- [25] *Kurzy historie, kurzovní lístek ČNB* [online]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/historie/ceska-narodni-banka/D-31.12.2021/>

- [26] PODHORSKÁ, Jana. *Průměrná mzda v Praze - 4. čtvrtletí 2021* [online]. 7. března 2022. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xa/prumerna-mzda-v-praze-4-ctvrtleti-2021>
- [27] GROUP, Ulbrich. <https://www.ulbrich.cz/pf-606-p30-halogen-free-solder-paste>. *PF 606-P30 HALOGEN-FREE SOLDER PASTE* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.ulbrich.cz/pf-606-p30-halogen-free-solder-paste>
- [28] Amepox. *Amepox Microelectronics* [online]. 2022. Dostupné z: <https://amepox-mc.pl/elpox-kleje-epoksydowe/>
- [29] *Detailní rozpis výpočtu roční platby za dodávku elektřiny* [online]. Dostupné z: <http://kalkulator.eru.cz/DetailVypoctuPlatby.aspx>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Sítotisk pro laboratorní účely [10]	8
Obrázek 2 - Průmyslové osazování DPS [11].....	9
Obrázek 3 - Automatická pájecí linka [9]	10
Obrázek 4 - Pájecí vlna - schéma technologie [12]	11
Obrázek 5 - IR pájecí linka (reflow) [12].....	12
Obrázek 6 - Konvekční pájecí linka [12]	12
Obrázek 7 - Elektricky vodivé lepidlo – vodivá složka ve formě kuliček [14].....	13
Obrázek 8 - Elektricky vodivé lepidlo – vodivá složka ve formě šupinek [14]	14
Obrázek 9 - Schéma aplikace anizotropního lepidla [9]	15
Obrázek 10 - Deska FR4.....	18
Obrázek 11 - Schéma zapojení čtyřbodové metody [5].....	20
Obrázek 12 - Měřicí přístroj pro čtyřbodovou metodu	20
Obrázek 13 – Ukázka grafu z trhacího zařízení	21
Obrázek 14 - Prasklina na spoji s elektricky vodivým lepidlem	24
Obrázek 15 - Správný spoj s elektricky vodivým lepidlem.....	25
Obrázek 16 - Nerovnoměrně nanesená pájecí pasta.....	25
Obrázek 17 – Správný spoj s pájecí pastou.....	26

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Pájky pro pájení v elektronice – přípustné úrovně znečištění [3].....	7
Tabulka 2 - Porovnání vlastností pájených a lepených spojů [2, 3, 9]	15
Tabulka 3 - Základní metody hodnocení kvality spojů [3]	17
Tabulka 4 - Teploty přetavení pájecí pasty	19
Tabulka 5 - Množství vyloučených zmetků v sérii.....	30
Tabulka 6 - Roční inflace od roku nakoupení prvního zařízení [22].....	31
Tabulka 7 - Přepočtené ceny všech použitých zařízení na současnou hodnotu.	32
Tabulka 8 - Současné ceny pro technologii s pájecí pastou.....	32
Tabulka 9 – Současné ceny pro technologii s elektricky vodivým lepidlem	32
Tabulka 10 - Čas jednotlivých úkonů pro celou sérii	33
Tabulka 11 - Spotřeba elektrické energie pro výrobu s pájecí pastou	35
Tabulka 12 - Spotřeba elektrické energie pro výrobu s el. vodivým lepidlem ...	35
Tabulka 13 - Rozpis položek cen za elektrickou energii [25]	35
Tabulka 14 - Porovnání celkových nákladů na výrobu jedné série.....	36
Tabulka 15 - Naměřené hodnoty elektrického odporu a síly odtržení.....	44
Tabulka 16 - Rozpis roční platby za dodávky elektřiny	45

Seznam grafů

Graf 1 - Naměřené hodnoty odporu s pájecí pastou	22
Graf 2 - Naměřené hodnoty odporu s elektricky vodivým lepidlem	22
Graf 3 - Naměřené hodnoty trhací síly s pájecí pastou	23
Graf 4 - Naměřené hodnoty trhací síly s elektricky vodivým lepidlem.....	23
Graf 5 - Ekonomický růst (hospodářský cyklus) [21].....	29

Seznam vzorců

Vzorec 1 - Náklady na jeden kus výrobku [17].....	28
Vzorec 2 - Výpočet anuity	30
Vzorec 3 - Přepočet kupní ceny na současnou hodnotu [20]	32
Vzorec 4 - Výpočet roční odepisované částky s anuitou.....	33
Vzorec 5 - Výpočet pro zjištění množství vyrobených sérií za jednu směnu	33
Vzorec 6 - Výpočet ceny laboranta za jednu směnu.....	34
Vzorec 7 - Ukázka výpočtu ceny laboranta na jednu sérii s pájecí pastou	34
Vzorec 8 - Výpočet ceny elektrické energie pro technologii s pájecí pastou	35

Přílohy

Tabulka naměřených hodnot

Číslo SMD rezistoru	Pájecí pasta				Vodivé lepidlo			
	1. série Pájecí pasta - množství 0,18 mm ³		2. série Pájecí pasta - množství 0,117 mm ³		3. série Vodivé lepidlo - množství 0,18 mm ³		4. série Vodivé lepidlo - množství 0,117 mm ³	
	R [mΩ]	N _{max} [N]	R [mΩ]	N _{max} [N]	R [mΩ]	N _{max} [N]	R [mΩ]	N _{max} [N]
1	21,5	15,88	25,0	38,41	256	7,16	335	2,25
2	22,5	21,37	25,3	35,86	213	6,30	1576	5,18
3	22,2	45,74	26,1	11,97	290	4,65	128	12,04
4	23,3	13,13	25,5	32,87	198	6,32	424	2,71
5	23,2	26,82	25,6	15,14	150	2,79	542	16,63
6	21,5	33,97	22,3	46,32	175	6,84	257	0,00
7	22,7	17,29	24,5	39,35	84	8,10	442	5,09
8	22,3	10,04	23,8	14,18	681	9,30	395	6,82
9	24,0	16,50	23,0	20,66	600	6,50	382	6,52
10	22,7	14,43	23,8	11,76	195	6,31	1125	5,14
11	21,6	24,79	22,6	12,00	260	3,48	402	6,25
12	22,9	19,63	25,7	12,00	146	7,13	550	3,58
13	22,4	37,06	25,0	22,81	128	8,54	226	21,23
14	23,2	33,95	23,9	28,50	162	2,42	6314	3,48
15	24,1	19,23	22,3	10,00	1026	13,27	451	2,63
16	22,8	25,51	22,4	32,44	239	14,39	743	5,62
17	21,6	26,01	27,4	16,65	139	2,84	707	17,55
18	24,0	6,18	26,1	13,32	368	10,28	158	14,17
19	24,5	10,13	24,3	20,75	509	12,49	433	9,38
20	25,0	42,03	24,2	19,73	142	6,62	344	4,84
21	22,4	18,44	22,1	39,86	143	2,83	615	4,85
22	22,5	21,62	28,1	9,78	148	3,47	627	7,02
23	22,2	31,89	25,9	13,24	184	2,34	137	10,41
24	24,0	21,36	22,3	30,74	205	8,44	228	2,07
25	24,6	9,74	22,9	26,23	1415	2,69	413	19,64
26	22,4	29,88	23,0	29,03	316	6,25	174	9,33
27	22,5	17,03	23,5	2,23	318	2,51	243	0,00
28	22,2	24,04	25,3	5,57	375	8,84	300	4,39
29	24,0	19,89	23,5	18,35	296	6,32	801	4,04
30	24,6	30,50	22,9	11,56	560	8,25	198	4,48
31	22,4	31,82	23,9	23,99	621	7,50	207	2,88
32	23,9	14,20	26,9	25,40	94	2,51	493	0,00
33	23,2	37,33	25,3	9,14	172	4,20	368	21,20
34	26,3	31,73	24,3	16,72	260	9,58	334	4,49
35	23,5	3,78	26,7	27,04	590	12,04	204	15,99
Maximální hodnota	25,0	45,74	26,9	46,32	375	14,39	451	21,23
Minimální hodnota	21,5	3,78	22,3	2,23	84	2,34	128	2,07
Prům. hodnota	23,01	22,68	24,24	21,73	209,48	6,06	312,00	8,21
SMODCH	0,96	10,07	1,38	10,90	78,09	2,97	112,09	6,22
Prům. hodnota - 2*σ	21,1	2,5	21,5	-0,1	53,3	0,1	87,8	-4,2
Prům. hodnota + 2*σ	24,9	42,8	27,0	43,5	365,7	12,0	536,2	20,6
Vyřazené zmetky [%]	2,86		5,71		22,86		37,14	
	Nepovedené spoje vyloučené z výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.							
	Velmi nepovedené spoje (také vyloučené z výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky), k důkladnému prozkoumání pod mikroskopem.							
Poznámka:	Pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o dvě směrodatné odchylky, je při ideálním normálním rozdělení cca 95 %.							

Tabulka 15 - Naměřené hodnoty elektrického odporu a síly odtržení

Rozpis roční platby za dodávku elektřiny

Stálý plat:	92,20 Kč/měsíc
Cena vysokého tarifu:	9 270,90 Kč/MWh
Cena nízkého tarifu:	- Kč/MWh

Souhrn - celková roční platba

Položka	Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Celková platba	2 582,63	542,35	3 124,98
Z toho za silovou elektřinu	1 017,89	213,76	1 231,64
Z toho za distribuci	1 375,68	288,89	1 664,57
Z toho za ostatní regulované služby	182,90	38,41	221,30
Z toho daň z elektřiny	6,16	1,29	7,46

Detailní rozpis platby za silovou elektřinu

Položka	Jednotek	Cena jednotky [Kč]	Platba		
			Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Celková platba za silovou elektřinu	-	-	1 017,89	213,76	1 231,64
Z toho stálý plat	12 měsíců	0,00	0,00	0,00	0,00
Z toho vysoký tarif	0,218 MWh	4 675,00	1 017,89	213,76	1 231,64
Z toho nízký tarif	-	0,00	-	-	-

Detailní rozpis složek ceny zajišťování distribuce elektřiny

Položka	Jednotek	Cena jednotky [Kč]	Platba		
			Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Celková platba za zajišťování distribuce	-	-	1 375,68	288,89	1 664,57
Z toho stálý plat (platba za jistič)	12 měsíců	72,00	864,00	181,44	1 045,44
Z toho vysoký tarif	0,218 MWh	2 350,07	511,68	107,45	619,13
Z toho nízký tarif	-	0,00	-	-	-

Detailní rozpis platby za ekologickou daň.

Položka	Jednotek	Cena jednotky [Kč]	Platba		
			Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Daň z elektřiny	0,22 MWh	28,30	6,16	1,29	7,46

Detailní rozpis platby za ostatní regulované položky

Položka	Jednotek	Cena jednotky [Kč]	Platba		
			Bez DPH [Kč/rok]	DPH [Kč/rok]	Včetně DPH [Kč/rok]
Celková platba za ostatní regulované položky	-	-	182,90	38,41	221,30
Z toho platba za systémové služby	0,21773 MWh	113,53	24,72	5,19	29,91
Složka ceny na podporu elektřiny z podporovaných zdrojů energie	0,218 MWh	495,00	107,78	22,63	130,41
Z toho platba za činnosti operátora trhu	12 měsíců	4,20	50,40	10,58	60,98

Tabulka 16 - Rozpis roční platby za dodávku elektřiny

Parametry elektricky vodivého lepidla



ECO SOLDER AX 70_{MIN}

POLYMER BASE, SOLDER REPLACEMENT PASTE

- * **ELECTRICALLY CONDUCTIVE**
- * **HIGH TEMPERATURE RESISTIVE FORMULATION**
- * **EPOXY-PHENOLIC HYBRIDE TYPE BINDER**
- * **HARMLESS & SAFE TO USE (NO LEAD; NO CFC; NO VOC)**
- * **USES REGULAR ON LINE EQUIPMENT**
- * **STABLE TECHNOLOGICAL PROPERTIES.**

GENERAL DESCRIPTIONS:

AMEPOX MC product, trade name ECO-SOLDER™ represents new generation of single component, electrically conductive formulation designed for replacement of traditionally tin-lead solder pastes. Technology with our new ECO-SOLDER™ materials eliminates all type of solvents used for pre- or post-cleaning, like it is in conventional tin-lead solder technology.

One of the biggest advantages of ECO-SOLDER™ is, that it contains no lead or any other dangerous ingredients. It may be used with standard dispensing, SMD stenciling (10/20 mil pitches with excellent resolution) or screen printing application. ECO-SOLDER™ doesn't dry out on open screens or stencils for up to 2 weeks and refrigeration during storage of this material is not necessary.

ECO-SOLDER™ has extremely short curing time (especially with IR heating tunnel) and quite pleasant odor. This is 100% solids formulation without any volatile thinners so, is no fear about safety conditions for work. CFC solvent's attack ozone layer in the stratosphere is widely known. Aqueous cleaning solvents usually contain alcohol such a methanol, ethanol or isopropyl which are VOC (volatile organic compounds). VOC's are photochemically active and cause smog and ozone in the lower atmosphere. The use of ECO-SOLDER™ requires no fluxes and therefore no solvent cleaning of the PCB is needed.

E-S AX 70MN has high and stable electrical conductivity. This type is mostly for high-speed technological process. It doesn't change viscosity even on open area with thin layer.

SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Bright silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	2.1 – 2.4 g/cm ³
Viscosity	530 000 – 560 000 cps (*)
Drying time before curing process	Not necessary
Recommended curing schedule with air-circulated oven	180°C – (6 - 10) min. 200°C – (3 - 4) min.
Recommended curing schedule with heating tunnel	200°C in peak – 3 min. total time inside tunnel
Shelf life	6 months (when storage at 10°C – unopened)

(*) - Brookfield DVII; SSA#14; 1 rpm; 25°C.

TECHNICAL PROPERTIES (*):

Electrical resistivity	(1.0 – 2.5) x E(-6) Ωm
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	(-55)°C - (+200)°C
Max. operating temperature	300°C for ab 1.5 h.

(*) - Typical value for number of tests.

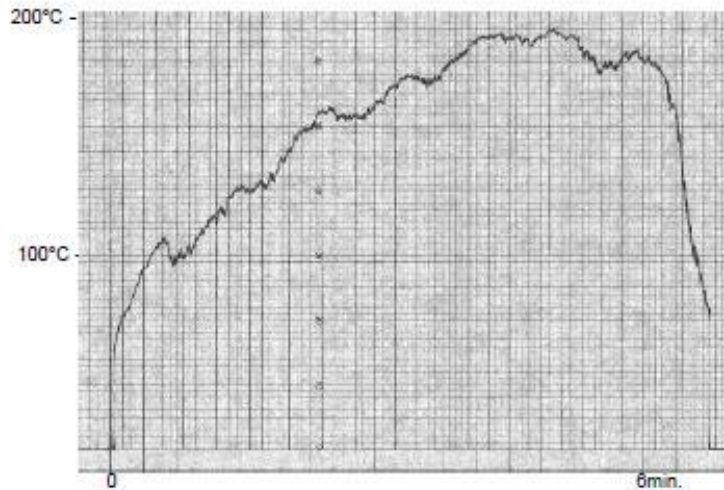


Fig.1. Example of heating tunnel profile for curing E-S AX 70MN

ATTENTION:

1. Product is ready for use, but should be mixed very thoroughly before use using wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. ***INSURE E-S AX 70MN IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH. Refrigeration during shelf time is not necessary.***
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC 70EM thinner. ***Thinner will change paste resistivity.*** Pls, do not exceed 1% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low conductivity and poor adhesion performance are symptomatic that paste is under curing conditions.
5. Refrigeration during shelf time not necessary, but useful. Keep container with lacquer in temp. no less 10 C. Before use, increase paste temperature very slowly.
6. Use paste with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
8. Clean by MEK or other suitable solvents. Allow screen to completely dry before using again.
9. Temperature during printing process must be kept between 20°C and 25°C, with relative humidity (RH) between 40% and 65%. This condition reduces static charges on the substrate.
10. When stored – keep container closed.

This information is based on data and tests believed to be accurate. AMEPOX MC makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product. (es-ax70mn)

Parametry pájecí pasty

TECHNICAL DATA SHEET

Sn/Ag/Cu. 350, Rev. B, 10/15



DSP 350 (Sn/Ag/Cu) LEAD FREE R.A. SOLDER PASTE

CORPORATE HEADQUARTERS USA: 315 Fairbank St. Addison, IL 60101¹ 630-628-8083¹ FAX 630-628-6543
EUROPE UK: Unit 9 Apex Ct. Bassendale Rd. Bromborough, Wirral CH62 3RE¹ 44 151 334 0888¹ FAX 44 151 346 1408
ASIA-PACIFIC HEADQUARTERS SINGAPORE: 6 Tuas South St. 5 Singapore 637 790¹ 65 6795 7757¹ FAX 65 6795 7767
PHILIPPINES: Phase 1 Qualitek Ave. Mariveles, Bataan Philippines C-2106 ! 6347 935 4119 ! FAX 6347 935 5608
CHINA: 3B/F, YiPa Print Bldg. 351 # JiHua Rd., Buji Shenzhen, China 518112¹ 86 755 28522814¹ FAX 86 755 28522787

This data is based on information that the manufacturer believed to be reliable and offered in good faith. Qualitek International, Inc. makes no warranties expressed or implied as to its accuracy and assumes no responsibilities and liabilities arising out of its use by others as conditions and methods of use of the products is beyond the control of Qualitek International, Inc. The user must determine the suitability of the product before using it on a commercial basis. The warranties extend only to the conformity of the product to the physical descriptions. In no event will Qualitek International, Inc. be responsible for special, incidental and consequential damages whether the claim is in contract, negligence or otherwise. Qualitek specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.

Description

Qualitek has developed a unique rosin activated (R.A.) flux system that may be used for leaded alloys as well as for high temperature lead free alloys.

DSP 350 Lead Free solder paste exhibits superior joint strength, with excellent wettability, print definition and tack life. The post soldering residues of DSP 350 are non-conductive, non-corrosive and highly insulated.

Main Features

- Excellent wettability
- Hard non corrosive residues

Technical Data

Flux Classification	Specification	Test Method
	ROM1	J-STD-004
Copper Mirror	No removal of copper film	IPC-TM-650 2.3.32
Corrosion	Pass	IPC-TM-650 2.6.15
SIR (cleaned) J-STD-004	2.61 x 10 ¹⁰ ohms	IPC-TM-650 2.6.3.3
Electromigration	Pass	Bellcore GR-78-CORE 13.1.4
Post Reflow Flux Residue	65%	TGA Analysis
Water Extract Resistivity (WER)	115,000 ohm/cm	
Metal Loading	88-89%	IPC-TM-650 2.2.20
Viscosity		
Brookfield ⁽¹⁾ , kcps	1000+/-10% kcps	IPC-TM-650 2.4.34 modified
Malcom ⁽²⁾ , poise	1650-1950	IPC-TM-650 2.4.34.3 modified
Thixotropic Index	0.50-0.60	
Slump Test		
25 C, 0.63 vertical/horizontal	No bridges all spacings	IPC-TM-650 2.4.35
150 C, 0.63 vertical/horizontal	No bridges all spacings	IPC-TM-650 2.4.35
25 C, 0.33 vertical/horizontal	0.15/0.15	IPC-TM-650 2.4.35
150 C, 0.33 vertical/horizontal	0.20/0.20	IPC-TM-650 2.4.35
Solder Ball Test	Pass	IPC-TM-650 2.4.43
Stencil Life	>4 hrs	QIT 3.44.5
Abandon Time	30 min	QIT 3.44.6

Physical Properties

Solder Composition

Qualitek Sn/Ag/Cu (Tin/Silver/Copper) alloys are designed as a lead-free alternative for Sn/Pb alloys for electronics assembly operations. Qualitek Sn/Ag/Cu alloys conform and exceed the impurity requirements of J-STD-006 and all other relevant international standards.

Typical Analysis														
	Sn	Ag	Cu	Pb	Sb	Bi	In	As	Fe	Ni	Cd	Al	Zn	Au
LF955-38	Bal	3.6-4.0	0.5-0.9	0.070 Max	0.200 Max	0.100 Max	0.100 Max	0.030 Max	0.020 Max	0.010 Max	0.002 Max	0.005 Max	0.003 Max	0.050 Max
LF958-35	Bal	3.3-3.7	0.5-0.9	0.070 Max	0.200 Max	0.100 Max	0.100 Max	0.030 Max	0.020 Max	0.010 Max	0.002 Max	0.005 Max	0.003 Max	0.050 Max
LF965-30	Bal	2.8-3.2	0.3-0.7	0.070 Max	0.200 Max	0.100 Max	0.100 Max	0.030 Max	0.020 Max	0.010 Max	0.002 Max	0.005 Max	0.003 Max	0.050 Max
LF217	Bal	3.8-4.2	0.3-0.7	0.070 Max	0.200 Max	0.100 Max	0.100 Max	0.030 Max	0.020 Max	0.010 Max	0.002 Max	0.005 Max	0.003 Max	0.050 Max

	Sn/Ag/Cu	Sn63/Pb37		Sn/Ag/Cu	Sn63/Pb37
Melting Point, °C	217-221	183 E	Yield Strength, psi	3724	3950
Hardness, Brinell	15HB	14HB	Total Elongation,%	27	48
Coefficient of Thermal Expansion	Pure Sn= 23.5	24.7	Joint Shear Strength, at 0.1mm/min 20 °C	27	23
Tensile Strength, psi	4312	4442	Joint Shear Strength, at 0.1mm/min 100 °C	17	14
Density, g/cc	7.39	8.42	Creep Strength, N/mm ² at 0.1mm/min 20 °C	13.0	3.3
Electrical Resistivity (μohm-cm)	13.0	14.5	Creep Strength, N/mm ² at 0.1mm/min 100 °C	5	1
Electrical Conductivity, %IACS	16.6	11.9	Thermal Conductivity, W/m.K	58.7	50.9

Particle Size

SAC alloys are available in 3(45-25μm), 4(38-20μm) and 5(25-15μm) J-STD-005 powder distribution. Solder powder distribution is measured utilizing laser diffraction, optical analysis and sieve analysis. Careful control of solder powder manufacturing processes ensures the particles' shape are 95% spherical minimum (aspect ratio < 1.5) and that the alloy contains a typical maximum oxide level of 80 ppm.

Metal Loading

Typical metal loading for R.A. 350 lead free stencil printing application is ~~88-89%~~. Compared to typical Sn63/Sn62 solder pastes manufactured with 90% by weight metal loading, DSP 350 Lead Free provides as much as 10-12% higher metal volume than Sn63/Sn62. This increased in volume of DSP 350 promotes better wetting and spreading of Sn/Ag/Cu lead free alloy.