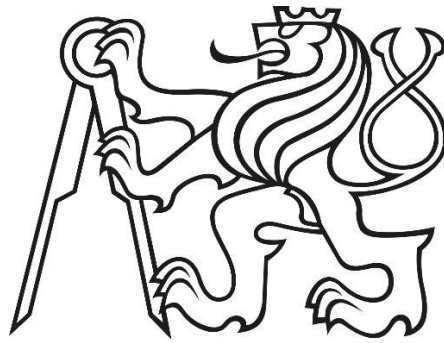


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Proces přecínování vývodů součástek

The process of re-tinning component leads

Bakalářská práce

Bachelor thesis

Pavel Procházka

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **507404**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Proces přecínování vývodů součástek

Název bakalářské práce anglicky:

The process of re-tinning component leads

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s vybranými technologiemi pájení a materiály především z pohledu přechodu na bezolovnaté pájení a přecínování součástek.
- 2) Proveďte test přecínování na vzorových součástkách. Výsledky testu vyhodnoťte.
- 3) Popište postup přecínování vývodů součástek s cílem zajistit RoHS3 kompatibilní součástku pocínováním vývodů v pájecí lázni.
- 4) Popište potřebné vybavení pro zajištění stabilního procesu přecínování.
- 5) Proveďte ekonomické zhodnocení podmínek, za kterých je vhodné přecínování využít.

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **15.02.2026**

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských prací MP č.2/2024.

V Praze, dne 24. května 2024

.....

Pavel Procházka

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu práce, panu prof. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D., za jeho čas, trpělivost a cenné rady během celého semestru. Dále děkuji firmě Rohde&Schwarz za poskytnuté informace k problematice práce. Rovněž bych chtěl poděkovat paní inženýrce Blance Kučerkové za poskytnuté konzultace k ekonomické části mé práce. Na závěr bych rád poděkoval rodině a přátelům, kteří mě během tvorby práce podporovali.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou přecínování vývodů součástek s olovnatou povrchovou úpravou s cílem vytvořit RoHS 3 kompatibilní součástku, která může být využita v bezolovnaté výrobě. Teoretická část práce je věnována pájení z hlediska materiálů a technologií, dále intermetalickým vrstvám a metodám analýzy materiálů, které byly použity v experimentální části práce. Cílem experimentální části práce bylo stanovení podmínek procesu přecínování, po kterém koncentrace olova na vývodech již vyhovuje evropské směrnici. V navazující části práce je navržen postup, jakým lze přecínování provádět v praxi, a je vyhodnocen ekonomický přínos procesu přecínování pro konkrétní součástku.

Klíčová slova

Bod zvratu, elektronový mikroskop, kalkulace, přecínování, pájecí lázeň

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of lead-coated component pins re-tinning in order to create a RoHS 3 compliant component that can be used in lead-free production. The theoretical part of the thesis is devoted to soldering in terms of materials and technologies, as well as intermetallic layers and material analysis methods that were used in the experimental part of the thesis. The aim of the experimental part of the thesis was to determine the conditions of the re-tinning process, after which the lead concentration on the pins complies with the European directive. In the follow-up part of the thesis, a procedure is proposed by which the re-tinning process can be carried out in practice and the economic benefit of the re-tinning process for a specific component is evaluated.

Keywords

Break-even point, calculation, electron microscope, re-tinning, solder pot

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Úvod	9
1 Pájení	10
1.1 <i>Legislativní aspekty pájení</i>	10
1.2 <i>Materiály pro pájení</i>	11
1.2.1 Olovnaté pájky	11
1.2.2 Bezolovnaté pájky	11
1.2.3 Tavidla	12
1.3 <i>Technologie pájení</i>	12
1.3.1 Ruční pájení.....	13
1.3.2 Pájení přetavením	13
1.3.3 Pájení vlnou.....	14
2 Intermetalické vrstvy	16
2.1 <i>Vznik intermetalických vrstev</i>	16
2.2 <i>Vlastnosti intermetalických vrstev</i>	17
2.3 <i>Důsledky tvorby intermetalických vrstev</i>	17
3 Analýza složení vývodů součástek	19
3.1 <i>Elektronová spektroskopie</i>	19
3.2 <i>Rentgenfluorescenční spektrometrie</i>	20
4 Experimentální část	22
4.1 <i>Cíle experimentu</i>	22
4.2 <i>Průběh experimentu</i>	22
4.2.1 Příprava vzorků.....	22
4.2.2 Povrchová analýza elektronovým mikroskopem	23
4.2.3 XRF analýza	27
4.2.4 Analýza výbrusů elektronovým mikroskopem.....	27
4.3 <i>Závěry experimentu</i>	28
5 Návrh provedení procesu přecínování v praxi	29
6 Ekonomická část	32
6.1 <i>Nákup a likvidace zásob</i>	33
6.2 <i>Náklady na přecínování stávajících součástek</i>	34
6.2.1 Investiční výdaje.....	34

6.2.2	Materiálové náklady	35
6.2.3	Náklady na elektrickou energii.....	36
6.2.4	Mzdové náklady	36
6.2.5	Nepřímé náklady.....	37
6.3	Kalkulace nákladů na přecínování 1 součástky.....	37
6.4	Citlivostní analýza	41
6.5	Ekonomické zhodnocení procesu pro konkrétní součástku	44
6.6	Stanovení bodu zvratu pro konkrétní součástku	44
	Závěr	46
	Seznam použité literatury.....	47
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek.....	49
	Přílohy	I
A.	Tabulky naměřených hodnot.....	I
B.	Grafy	V

Seznam použitých symbolů a zkratk

Teoretická a experimentální část

- **DPS** – deska plošného spoje
- **HASL** – povrchová úprava (angl. *Hot Air Solder Levelling*)
- **hm.%** - hmotnostní procento
- **IMC** – intermetalická vrstva (angl. *Intermetallic Compound*)
- **p.b.** – procentní bod
- **RoHS** – směrnice o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (angl. *Restriction of Hazardous Substances*)
- **SEM** – Skenovací Elektronový Mikroskop
- **SMD** – součástka povrchové montáže (angl. *Surface-Mount Device*)
- **SMT** – povrchová montáž (angl. *Surface-Mount Technology*)
- **TEM** – Transmisní Elektronový Mikroskop
- **WEEE** – směrnice o odpadních a elektrických zařízeních (angl. *Waste Electrical and Electronic Equipment*)
- **XRF** – rentgenová fluorescence (angl. *X-ray fluorescence*)

Ekonomická část

- **N** – celkové náklady na přecínování jedné součástky při zahrnutí zmetkovitosti
- **OI** – opotřebení (odpis) investice
- **PMAT** – přímý materiál
- **PMZ** – přímé mzdy
- **PN** – celkové přímé náklady
- **p_{ns}** – pořizovací cena nové součástky
- **RN** – režijní náklady
- **SE** – spotřeba energie
- **VN** – celkové vlastní náklady
- **ZSP** – zdravotní a sociální pojištění

Úvod

V souvislosti s legislativními změnami v oblasti ochrany životního prostředí na evropské úrovni v uplynulém období řeší celá řada firem problematiku toho, jak naložit se zásobami materiálu, který již stávajícím evropským normám nevyhovuje. Na práci jsem spolupracoval s konkrétní firmou z jižních Čech (dále v textu označovanou jen jako Firma), která dosud má pro součástky s olovnatou povrchovou úpravou využití, protože je v případě nutnosti může použít pro servisní účely a také je aplikuje v olovnaté výrobě, kde se vyrábí produkty pro leteckou techniku, zdravotnictví apod.

Tato práce má za cíl Firmě odpovědět na otázku, zda je možné přecínováním upravit vývody součástek tak, aby neobsahovaly olovo, a zda se tato úprava ekonomicky vyplatí. V nedávné době se totiž Firma potýkala s obtížnou dostupností některých nových součástek. Přínosem by pro ni bylo, kdyby mohla výpadek dodávky bezolvnatých součástek pokrýt přecínováním odpovídajících olovnatých součástek na bezolvnatou variantu, pokud by přecínování bylo proveditelné a cenově dostupné. V experimentální části práce se pokusím ověřit, za jakých podmínek je možné olovo z vývodů součástek odstranit. V návaznosti na to navrhnu možný postup, jak přecínování provádět v praxi. V závěrečné části práce zhodnotím, kdy je proces přecínování pro Firmu ekonomicky výhodný.

1 Pájení

Pájení je metalurgický způsob, kterým lze k sobě spojovat dva materiály. Na rozdíl od svaření není taven samotný spojovaný materiál, nýbrž je do vznikajícího spoje vpravena pájecí slitina v tekutém skupenství, která následně difunduje do struktury pájených materiálů, tuhne a vytváří mezi nimi pevný spoj. Oproti svařování může pájení probíhat za nižších teplot, které jsou shora limitované teplotou tavení spojovaného materiálu a zdola teplotou tání pájecí slitiny. Podle teploty tání pájky se rozlišuje pájení měkké a tvrdé. Jako měkké pájení je označováno pájení s teplotou tání pájecí slitiny do 450 °C, pájení pájkami s vyšší teplotou tání je považováno za tvrdé pájení. Z hlediska složení se pájky dělí na dva základní typy, olovnaté a bezolovnaté. [1]

1.1 Legislativní aspekty pájení

Dříve byly rozšířené převážně pájky olovnaté kvůli jejich lepším vlastnostem. S nástupem nového tisíciletí se na evropské úrovni začala řešit toxicita olova a její dopad na zdraví člověka a na životní prostředí. Výsledkem toho byly v roce 2003 vyhlášené dvě směrnice. První směrnice č. 2002/95/ES, „o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“ (angl. *Restriction of Hazardous Substances* – RoHS), a druhá směrnice č. 2002/96/ES, „o odpadních elektrických a elektronických zařízeních“ (angl. *Waste Electrical and Electronic Equipment* – WEEE). Tyto směrnice vedly k tomu, že od roku 2006 nesmí v rámci EU žádné komerční elektronické zařízení obsahovat více jak 0,1 hm. % olova. [2] Směrnice RoHS byla v roce 2011 nahrazena přísnější směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU, RoHS 2. O čtyři roky později byl seznam zakázaných látek dále rozšířen a vznikla směrnice RoHS 3 (2015/863/EU). [3], [4]

V České republice byla s účinností od 1. 7. 2006 evropská směrnice RoHS upravena zákonem č. 185/2001 Sb. „o odpadech a o změně některých dalších zákonů“, který je již od roku 2021 neplatný. S účinností od 2. 1. 2013 pak nařízení vlády č. 481/2012 Sb., „o omezování některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“, provádí zákon č. 22/1997 Sb., „o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů“, a zakotvuje evropskou směrnici RoHS 2 v českém zákoně. [3] Ve sbírce zákonů vyšlo 19. 6. 2019 nařízení vlády č. 146/2019 Sb., které mění

nařízení vlády 481/2012 Sb. a přináší do českého právního řádu dosud poslední evropskou směrnici RoHS 3.

Kvůli zavedení těchto evropských směrnic RoHS, RoHS 2 a RoHS 3 se začalo postupně upouštět od olovnatých pájek a zvýšil se tlak na vývoj nových pájecích slitin bez olova, které by měly podobné vlastnosti jako pájky olovnaté. Nicméně v odvětvích, ve kterých jsou vlastnosti olovnaté pájky nenahraditelné, jako je zdravotnictví, vojenství a vesmírný výzkum, se tyto pájky stále používají.

1.2 Materiály pro pájení

Následující subkapitoly budou věnovány materiálům používaným při pájení, tedy olovnatým a bezolvnatým pájkám, jejich porovnání a dále tavidlu.

1.2.1 Olovnaté pájky

Olovnaté pájky mají oproti jejich bezolvnatým alternativám řadu výhod. Mezi přední výhody se řadí nízký bod tavení olovnatých pájek, například eutektická pájka cínu a olova Sn63Pb37 má teplotu tání 183°C. [5] Dále olovnaté pájky lépe smáčí pájený povrch, mají lepší tvar spoje (součástka plně smáčena, konkávní (dutý) tvar pájky mezi vývodem a DPS (deska plošného spoje), optimální smáčecí úhel 15° [6]) a méně podléhají oxidaci, která je závislá na teplotě pájení.

1.2.2 Bezolvnaté pájky

Velkou nevýhodou bezolvnatých pájek je, že mají ve většině případů vyšší teplotu tání než olovnaté. Důsledkem toho je, že při přechodu na pájení bez olova musela být celá řada doposud používaných součástek předimenzována tak, aby vyšší teplotu pájení vydržela [7].

Při nahrazování olovnatých pájek bezolvnatými je třeba dbát na to, aby měly vytvořené bezolvnaté slitiny podobné vlastnosti, jako mají slitiny s olovem. Jedná se především o teploty solidu a likvidu, tedy teploty, při nichž pájka přechází z jedné fáze skupenství do druhé. Bezolvnaté pájky by také měly mít podobné fyzikální vlastnosti, jako je součinitel délkové roztažnosti α nebo elektrická vodivost G a tepelná vodivost λ . Dále je nutné, aby měly pájky podobné mechanické vlastnosti a smáčivost. Mechanické vlastnosti pájek lze porovnávat na základě pevnosti v tahu a pevnosti ve smyku. [1]

Základní kov, ze kterého se skládá většina bezolovnatých pájek, je cín. Má teplotu tavení přibližně 232 °C. Do pájek se přidávají další kovy, které buď snižují teplotu tavení pájecí slitiny, nebo zlepšují její fyzikální vlastnosti. Stříbro ve slitině snižuje teplotu tavení, zvyšuje pevnost spoje, ale je drahé. S cínem tvoří slitiny o dvou nebo třech složkách, ve kterých se vyskytuje v koncentraci od 1 do 4 hm. %. Měď také snižuje teplotu tavení a zvyšuje pevnost spoje, zvyšuje smáčivost pájky a omezuje rozpouštění mědi z pájeného povrchu. Její zastoupení ve slitinách se pohybuje mezi 0,5 – 1 hm. %. [8]

Obě tyto příměsi jsou zastoupeny v pájecí slitině SAC, a to v různých koncentracích. Mají vliv na výsledné vlastnosti slitiny. V experimentální části práce byla použita slitina SAC 305 (96,5Sn 3Ag 0,5Cu).

1.2.3 Tavidla

Tavidlo má v procesu pájení hned několik funkcí. Jednak napomáhá rozrušit tenké oxidové vrstvy na pájeném povrchu, čímž při pájení zvyšuje smáčivost pájecí slitiny. Zároveň chrání vytvořený pájený spoj před další oxidací. Tavidlo dále příznivě ovlivňuje povrchové napětí pájky, která pak snáze zatéká do spoje. Tavidla lze dělit na pryskyřičná, organická a anorganická. Některá tavidla mohou být chemicky agresivní, a je proto vhodné je následně ze spoje odstranit například izopropylalkoholem. Přítomnost agresivních tavidel ve spoji vede k jeho rychlejší degradaci. Tavidla, která nevyžadují mytí, se komerčně nazývají „No Clean“. [1], [9]

1.3 Technologie pájení

V praxi existuje několik technologií pájení, mezi které patří [10]:

- Ruční pájení
- Pájení přetavením (selektivní, hromadné)
- Pájení vlnou (selektivní, hromadné)
- Pájení vlečením
- Pájení ultrazvukem
- Pájení ponorem

Další podkapitoly jsou blíže věnovány ručnímu pájení, pájení přetavením a pájení vlnou.

1.3.1 Ruční pájení

Ruční pájení je ze všech technologií nejstarší. Spočívá v nahřátí místa vznikajícího spoje ruční hrotovou páječkou a vpravení pájecí slitiny do spoje ve formě trubičky. Tavidlo se aplikuje na pájené místo buď před pájením, nebo v jeho průběhu spolu s trubičkovou pájkou, ve které je tavidlo obsaženo. Ručně pájené spoje jsou však nespolehlivé, nemají konstantní vlastnosti a podobu, protože člověk nedokáže udělat každý spoj stejně. Záleží na době ohřevu pájeného místa, množství použitého tavidla a množství pájky ve spoji. Tento typ pájení má proto v průmyslu využití pouze na opravy jednotlivých spojů zapájených strojově nebo k připojení součástky, která nemohla být pájena hromadně s ostatními. [1]

1.3.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením (reflow) je významný způsob pájení součástek povrchové montáže SMD. Používají se k tomu pastovité pájky, které se skládají z pájky v prášku, tavidla v gelovité formě a reologických modifikátorů, které upravují roztékavost, viskozitu a lepivost pájecí pasty. Prášek se skládá z částic pájky kulovitěho tvaru s průměry od 5 do 160 μm . Pasta bývá na pájená místa aplikována dispenzerem, šablonovým tiskem, nebo sítotiskem. Do pasty jsou pak součástky osazovány vakuovou pinzetou, a drží v ní díky její lepivosti. K zapájení součástek dochází přetavením pasty. V té se za dodání tepla slíjí jednotlivé kuličky pájky dohromady a po vychladnutí tvoří výsledný spoj. Při přetavení dochází k efektu samovyrovnaní součástky (angl. *self-alignment*) vlivem povrchového napětí roztavené pájky [11]. Před samotným přetavením dochází k přehřívání, během kterého se z pájecí pasty vypařují kapalné složky, dochází ke změně viskozity pasty a aktivuje se tavidlo, které pájený povrch očistí od oxidů. Je několik způsobů, jakými lze pájení přetavením realizovat. Jsou to způsoby ohřevu infračerveným zářením, horkým vzduchem, v parách (např. galdenu) a laserem. [8]

Pájení přetavením lze realizovat hromadně i selektivně. Pro hromadné pájení se ze zmíněných způsobů ohřevu používá horký vzduch, páry galdenu a infračervené záření. Při selektivním přetavování se v praxi využívá především laser.

1.3.3 Pájení vlnou

Pájení vlnou patří mezi často používaný způsob strojního pájení. Rozlišuje se hromadné a selektivní pájení vlnou. Hromadné pájení se využívá pro pájení desek plošných spojů s velkou hustotou vývodů, zatímco selektivní vlna se uplatňuje v aplikacích s větší roztečí vývodů. Tato subkapitola se dále bude zabývat pouze strojním pájením hromadnou vlnou.

Výrobní linka na pájení vlnou zpravidla obsahuje část, ve které je na vývody osazených součástek aplikováno tavidlo v kapalné formě. Nejčastěji je k tomu využívána aplikace vlnou, nástřikem, nebo pěnou. [1] Tavidlo je nanášeno v takové míře, aby z vývodů neodkapávalo. Poté se DPS zahřívá v zóně předehřevu na přibližně 130–150 °C [1], což má za následek dvě skutečnosti. Jednak dochází při těchto teplotách k aktivaci tavidla, které začne plnit svoji roli (zmíněnou v subkapitole 1.2.3), a také zahřátí celé desky přispívá ke zmírnění teplotního šoku při procesu pájení jak desky, tak součástek na ní osazených. Zmenšení teplotního šoku vede ke snížení rizika vzniku zmetků zapříčiněných např. warpage efektem (deformace DPS vlivem rozdílu teplot mezi její svrchní a spodní stranou). Z tavidla se při předehřevu rovněž odpaří těkavé složky, které by při kontaktu s roztavenou pájkou mohly vést k jejímu rozprsknutí a znehodnocení spoje. Následuje samotné pájení vlnou, které může být realizováno jednoduchou, nebo dvojitou vlnou. Smáčené součástky jsou jednoduchou vlnou taveniny zapájeny díky kapilárnímu vztlínání (deska plošného spoje je nad vlnou). V případě, že je hustota součástek nebo vývodů větší, zejména pak u povrchové montáže SMT, může docházet ke vzniku stínů, které znemožňují vniknutí pájky na všechna místa, která je třeba zapájet (suchý spoj). Mezi sousedícími vývody mohou také vznikat můstky, které je zkratují, a může tak dojít ke zničení součástky. S výhodou se proto využívá dvojitá vlna, která se skládá z turbulentní a laminární vlny. Turbulentní proudění vlny vžene do spoje dostatečné množství pájky, která se tak dostane i na stíněná místa, a laminární vlna následně přebytečnou pájku odvede, čímž spoj vytvaruje do finální podoby. Když DPS opouští laminární vlnu, mohou se na kontaktech vlivem vyšší relativní rychlosti desky plošného spoje a vlny vytvářet krápníky, tedy výstupky pájky. Ty se odstraňují použitím horkovzdušného nože (angl. *hot knife*) za lázni s laminární vlnou. Je to proud horkého vzduchu o teplotě cca 300 °C, který nadbytky pájky ze spojů odstraní. Využívá se také

jednoduchá dutá vlna, jejíž rychlost proudění dosahuje $1-2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [8] Při těchto rychlostech se výrazněji uplatňuje Bernoulliho zákon a osazené součástky jsou proudem pájky přitahovány k DPS. [1], [8]

2 Intermetalické vrstvy

Tato kapitola bude věnována problematice intermetalických vrstev IMC, jejich vzniku, vlastnostem a vlivu na kvalitu pájeného spoje. V kontextu práce bude kapitola hlouběji zaměřena na intermetalické vrstvy mezi vývodem součástky a jeho povrchovou úpravou.

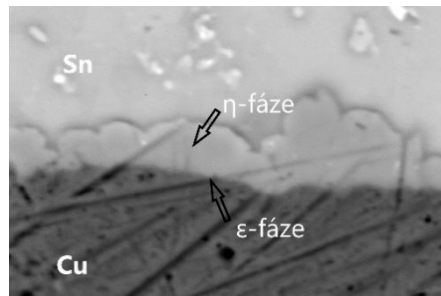
2.1 Vznik intermetalických vrstev

Intermetalické vrstvy vznikají při procesu pájení na rozhraní pájecí slitiny a pájeného povrchu. Příčinou jejich vzniku je difúze kovů roztavené pájky a kovů povrchu v okamžiku jejich vzájemného kontaktu. Nejrychleji probíhá difúze na začátku procesu a následně zpomaluje tak, jak se objem pájky sytí rozpuštěnými atomy substrátu. Narůstající vrstva brání rovnoměrné difuzi dalších atomů, nicméně ve vznikající struktuře IMC se vyskytují kanálky, jimiž mohou atomy ještě prostupovat. Vlivem toho intermetalická vrstva roste do různých tlouštěk v rámci svého povrchu. Na tloušťku vzniklé IMC má velký vliv rychlost ochlazování spoje. Dalšími vlivy, které ovlivňují růst IMC, jsou vysoká teplota a dlouhá doba pájení, případně opakované pájení. Při tvorbě intermetalických vrstev sehrává největší úlohu cín, který je základním prvkem ve většině používaných pájecích slitin. Ne všechny kovy, které se ve slitinách používají, reagují s materiály, na které se pájí. Jedná se například o bizmut, či olovo, které nereagují s mědí, zlatem a niklem. Proto, pokud vzniká spoj na měděném podkladu, vzniká především intermetalická vrstva z Sn a Cu. Ta je tvořena jednak sloučeninou Cu_6Sn_5 , nazývanou η -fáze, a také sloučeninou Cu_3Sn , takzvanou ε -fází. Fáze η se tvoří na rozhraní Cu-Sn difuzí těchto kovů v okamžiku pájení, následně se při stárnutí spoje mezi mědí a η -fází tvoří ε -fáze. [6], [8]

Pro další nárůst intermetalické vrstvy o tloušťku δ je rozhodující okolní teplota T a čas stárnutí spoje t . Pro přibližný odhad tloušťky vrstvy lze použít následující vztah [6]:

$$\delta = 1000e^{\frac{-5000}{T}} \cdot \sqrt{t} \text{ } [\mu\text{m}, K, s] \quad (2.1)$$

Na následujícím obrázku (obr. 1) z elektronového mikroskopu je naznačeno rozmístění obou zmíněných fází.



Obr. 1: Intermetalická vrstva (vlastní)

2.2 Vlastnosti intermetalických vrstev

Vybrané vlastnosti intermetalických vrstev a prvků, ze kterých se skládají, se nacházejí v tab. 1.

Vlastnosti (při pokojové teplotě)	Cu	Sn	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn
Youngův modul pružnosti v tahu [GPa]	117,0	41,0	85,6	108,3
Hustota [g/cm ³]	8,9	7,3	8,3	8,9
Houževnatost [MPa·m ^{-1/2}]	-	-	1,4	1,7
Vickersova tvrdost [MPa]	300,0	1 000,0	3 780,0	3 430,0
Rezistivita [10 ⁻⁸ ·Ω·m]	1,7	11,5	17,5	8,9
Teplotní roztažnost [10 ⁻⁶ /K]	17,1	23,0	16,3	19,0
Tepelná vodivost [W/(m·K)]	4,0	0,7	34,1	70,4

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti mědi, cínu a jejich IMC (upraveno podle [12])

Z tabulky je zřejmé, že intermetalické vrstvy mají rozdílnou teplotní roztažnost, a to jak mezi sebou, tak vůči mědi a cínu. To má za následek, že výsledný spoj bude vlivem narůstající IMC vrstvy vykazovat horší mechanické vlastnosti, jako například pevnost, jelikož jednotlivé vrstvy budou v závislosti na teplotě měnit své rozměry různě. Zásadními rozdíly mezi zmíněnými kovy a jejich sloučeninami jsou zejména rezistivita, tvrdost a také tepelná vodivost. Zvýšená rezistivita IMC vede ke snížení vodivosti spoje. Vyšší tepelná vodivost intermetalických sloučenin znamená, že jejich tvorba nemá negativní vliv na chlazení zapájených součástek. Díky vrstvě Cu₆Sn₅, která se tvoří přímo během procesu pájení, dochází k úspěšnému smáčení povrchu pájkou. Oproti tomu povrch, tvořený sloučeninou Cu₃Sn, je nesmáčivý.

2.3 Důsledky tvorby intermetalických vrstev

U součástek s vývody ošetřenými povrchovou úpravou dochází rovněž k tvorbě intermetalických vrstev, a to mezi HASL a vývodem. To pak u zestárlých součástek s narostlou IMC vrstvou může vést k tomu, že jejich zapájení na DPS průmyslovou

metodou nebude úspěšné. Při smočení vlnou se odplaví η -fáze vrstvy a odkryje se nesmáčivá fáze, ke které pájecí slitina nepřilne, a součástka tak zůstane nezapájená.

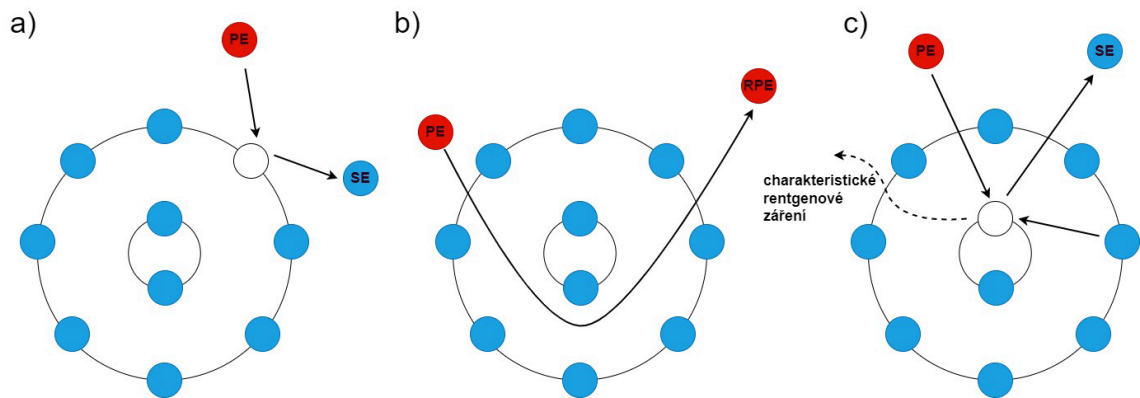
3 Analýza složení vývodů součástek

Tato část práce se zaměří na základní principy dvou typů analýzy složení povrchu, které budou použity v experimentální části práce.

3.1 Elektronová spektroskopie

Tato metoda je založena na zkoumání vzorku elektronovým mikroskopem. Ten využívá pro tvorbu obrazu svazek elektronů, na rozdíl od klasického světelného mikroskopu využívajícího proud fotonů. Urychlený elektron v elektrickém poli může mít až 100 000krát kratší vlnovou délku než viditelné světlo, a proto má elektronový mikroskop daleko větší rozlišení oproti světelnému. V komoře se zkoumaným vzorkem, ve které se elektronový paprsek šíří, musí být vytvořené hluboké vakuum, aby nemohl být paprsek vychylován okolními částicemi. Elektronové paprsky jsou emitovány rozžhavenou wolframovou elektrodou na cca 2 700 °C. [13]

Dva základní typy elektronových mikroskopů jsou TEM – transmisní elektronový mikroskop a SEM – skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop. U transmisního mikroskopu prostupuje elektronový paprsek skrz vzorek a sestavu elektromagnetických čoček a obraz je zobrazován na fluorescenčním stínítku. Tímto mikroskopem lze však pozorovat pouze vzorky tloušťky maximálně 100 nm, jelikož je paprsek prostupem materiálem silně rozptylován. U TEM mikroskopu se používá urychlovací napětí v rozmezí 80 až 300 kV. V experimentální části této práce je použit druhý typ, skenovací mikroskop SEM. U něho je paprsek elektromagnetickými cívkami zaostřen do bodu na vzorek a skenovacími cívkami je řádek po řádku veden po povrchu vzorku, čímž ho skenuje. Dopadající paprsek primárních elektronů má za následek: tvorbu sekundárních elektronů (a), rozptyl primárních elektronů RPE (b) a emisi tzv. charakteristického rentgenového záření (c). Jednotlivé interakce primárního elektronu s atomem prvku jsou shrnuty na obr. 2:



Obr. 2: Interakce primárního elektronu s atomem prvku (překresleno podle [14])

Po stranách komory jsou detektory rozptýlených primárních elektronů, sekundárních elektronů a také detektory rentgenového záření. Detekované sekundární elektrony dávají informaci o topografii a struktuře povrchu, analýza rozptýlených primárních elektronů dává informaci o rozložení fází v kompozitech a detekci rentgenového záření může mikroskop analyzovat prvkové složení materiálu. Z detekovaných elektronů počítač vytváří ucelený obraz zaměřeného povrchu, u kterého lze na základě energie detekovaného rentgenového záření v elektronvoltech rozhodnout o složení povrchu. Tato energie je rovna energii, která se uvolní při spadnutí elektronu z vyšší energetické hladiny do nižší na místo vytvořené vakance po vyraženém elektronu. Urychlovací napětí u SEM mikroskopů je nižší než u transmisního mikroskopu, od 0,5 kV do 30 kV. Čím vyšší je v komoře urychlovací napětí, tím hlouběji elektrony penetrují povrch. [13]

3.2 Rentgenfluorescenční spektrometrie

Tato metoda využívá rentgenového záření o vysoké energii. Při interakci záření s atomy zkoumaného vzorku dochází k jejich ionizaci, při které se uvolní elektron z vazby na nižší energetické hladině. Místo po vyraženém elektronu se zaplní některým z elektronů z vyšší energetické hladiny, čímž dochází k uvolnění energie. Tato energie odpovídá rozdílu energetických hladin obou elektronů a je vyzářena formou fotonu. Protože vyzářená energie je pro každý chemický prvek jiná, lze analýzou spektra vracejícího se záření vyhodnotit, jaké prvky jsou přítomny ve vzorku v místě měření. [15]

Pro tuto analýzu lze využít buď laboratorní XRF zařízení, nebo mobilní XRF analyzátor. Zatímco při použití laboratorního zařízení je vzorek zpravidla ve vakuu, mobilní analyzátor lze použít kdekoli na vzduchu a vzorek vyšetřit neinvazivně. Nevýhodou

mobilního analyzátoru je nižší rozlišení, a to především u lehkých kovů. Z dostupného zdroje lze vyčíst, že při analýze tenkých povrchových vrstev nemusí být výsledky vypovídající, protože rentgenový paprsek proniká do větší hloubky materiálu. [16]

4 Experimentální část

Tuto kapitolu věnuji experimentům, které jsem v rámci práce prováděl. Nejprve popíšu cíle experimentu, dále se budu věnovat jeho průběhu a na závěr shrnu dosažené výsledky měření.

4.1 Cíle experimentu

Cílem mého výzkumu bylo zjistit, zda a případně za jakých podmínek je procesem přecínování možné odstranit olovnatou povrchovou úpravu z vývodů starších čipů, které má Firma v zásobách a za účelem experimentu mně jich 11 kusů poskytla. Jak plyne z podkapitoly 1.1, snažil jsem se průměrný obsah olova na vývodech snížit pod 0,1 hm.%.

4.2 Průběh experimentu

Experiment jsem si rozvrhnul do 4 etap. V první fázi jsem si připravil z jednotlivých čipů vzorky. V dalším kroku jsem je zkoumal pod elektronovým mikroskopem Phenom Pro X s cílem zjistit procentuální podíl olova na vývodech po provedeném přecínování. Ve třetím kroku jsem tytéž vzorky podrobil XRF analýze a na závěr jsem provedl analýzu výbrusů jejich vývodů opět pod elektronovým mikroskopem.

4.2.1 Příprava vzorků

K přípravě vzorků jsem použil lázeň pájky meniskografu, což je přístroj standardně určený pro stanovení smáčivosti povrchu metodou smáčecích vah. Ve svém experimentu jsem využil toho, že na pohyblivou váhu meniskografu lze zavěsit nástavec podobný pinzetě, na který bylo možné fixovat čipy, jejichž vývody jsem upravoval. Na přístroji je možné nastavit různé časy doby ponoru, pro svůj experiment jsem zvolil časové intervaly 0,5 s, 5 s a 10 s. Použité pájecí slitiny pro máčení, počet upravených čipů a časové intervaly jejich máčení shrnuje tab. 2:

připravené vzorky			
počet upravených čipů [ks]	pájecí slitina	doba máčení [s]	teplota lázně [°C]
3	SAC 305	0,5	250
2	SAC 305	5	250
2	SAC 305	10	250
1	SnCu	0,5	250
1	SnCu	5	250
1	SnCu	10	250

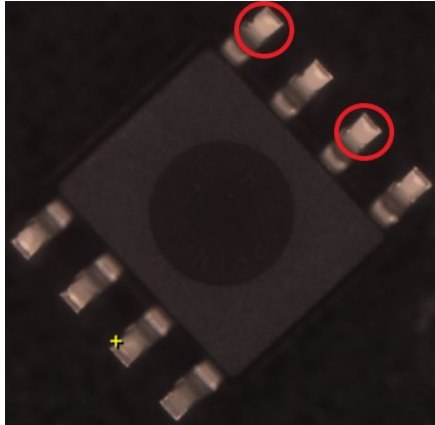
Tab. 2: Seznam připravených vzorků (vlastní)

Na přecínování jsem použil pájecí slitiny SAC 305 a SnCu. K prvním pokusům jsem zvolil slitinu SnCu, posléze jsem se od Firmy dozvěděl, že by pro přecínování v praxi používala slitinu SAC 305. Proto jsem se rozhodl věnovat podrobněji vzorkům máčených v pájce cínu, stříbra a mědi. Jeden čip jsem neupravoval, aby při analýze sloužil jako referenční vzorek. Každý čip obsahoval celkem 8 vývodů (na každé straně 4), obě strany jsem upravoval stejně. Vzorky jsem ponořoval do pájecí slitiny vždy do hloubky 2 mm, abych nepoškodil pouzdro a funkci integrovaného obvodu a aby experiment probíhal za stejných podmínek.

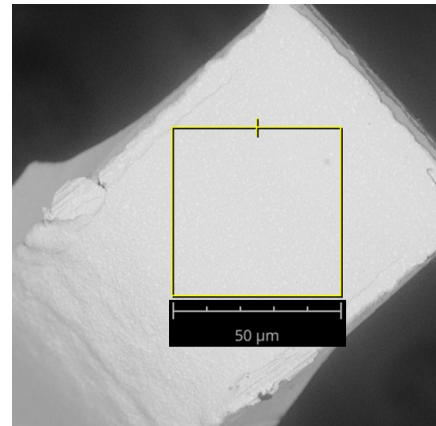
Před samotným přecínováním jsem vývody ošetřil tavidlem TOPNIK RF800 z důvodu zlepšení smáčivosti vývodu pájkou. Jedná se o takzvané „No Clean“ tavidlo, které není nutné z vývodů po přecínování odstraňovat.

4.2.2 Povrchová analýza elektronovým mikroskopem

Před analýzou elektronovým mikroskopem bylo nutné vzorky osadit na lepidlo terčíky, aby se v komoře mikroskopu neuvolnily. Na jeden terčík se vešly až tři čipy, tudíž jsem vždy jednu sadu stejně upravených vzorků zkoumal najednou. Elektrony byly při spektrální analýze urychlovány nejvyšším dosažitelným napětím 15kV. Měření jsem prováděl vždy na několika vývodech čipu, přičemž ze čtveřice vývodů jedné strany vždy alespoň jeden byl krajní a jeden vnitřní, viz obr. 3.



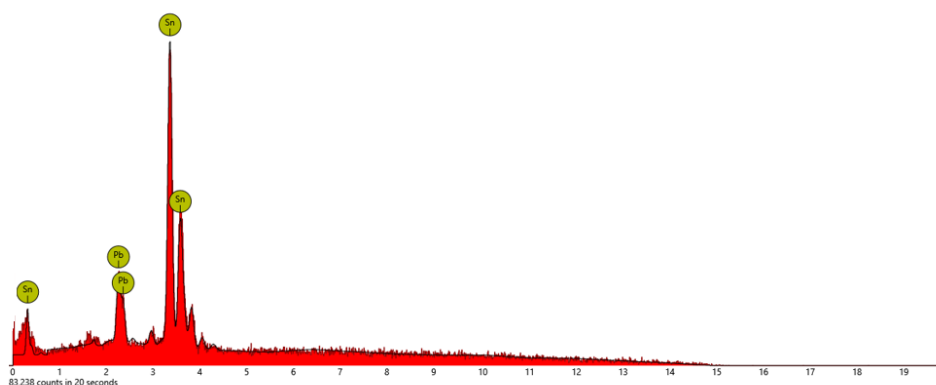
Obr. 3: Výběr analyzovaných vývodů (vlastní)



Obr. 4: Povrch vývodu referenčního vzorku (vlastní)

Tímto způsobem jsem postupoval pro případ, že by nedošlo ke kontaktu vývodů s lázní pájky ve stejný okamžik a každý vývod by tak byl smáčen jinou dobu. V takovém případě by mohla být koncentrace olova na sousedních vývodech rozdílná a tímto způsobem měření bych tak průměrnou koncentraci olova určil přesněji. Používal jsem primárně analýzu tzv. „mappingem“, což znamená, že jsem mikroskopem vyhodnocoval složení celého zaměřeného povrchu. Kompletní výsledky analýzy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulkách v příloze A.

Nejprve jsem zanalyzoval povrch referenčního vzorku, snímek povrchu jeho jednoho vývodu je na obr. 4. Na zaměřených místech jsem zaznamenal průměrný obsah olova 27,04 hm.% (viz tab. A1). Na obr. 5 se nachází příklad spektra prvků jedné oblasti referenčního vzorku.



Obr. 5: Spektrum referenčního vzorku (vlastní)

Takto obecně vypadala všechna spektra, která mikroskop vyhodnocoval. Na horizontální ose se nachází energie záření dopadajícího na detektory udávaná v keV a na vertikální ose je intenzita záření v CPS (*counts per second*). Program, který spektrum vyhodnocuje,

má v sobě referenční spektra všech prvků, která porovnává s naměřeným spektrem. Na obr. 5 je toto referenční spektrum vyneseno černě. Na základě toho u každého měřeného prvku poskytuje mikroskop údaj o tom, jak se tato spektra shodují (FIT). Údaj o míře shody v tabulkách v příloze A uvádím vždy napravo od naměřené koncentrace daného prvku. Pokud je shoda uvedeného prvku s referenčním spektrem menší než 0,85, tak ho program vyloučí ze seznamu detekovaných prvků, jelikož pod touto úrovní už není jisté, že detekovaná energie záření skutečně pochází z daného prvku. Program jsem nastavil tak, aby v naměřeném spektru olovo vždy hledal, a to i za cenu snížené shody. Takto naměřená data je však třeba brát s rezervou. Proto v tabulkách uvádím jak průměr všech naměřených koncentrací daného prvku, tak i průměr koncentrací určených s přijatelnou shodou větší nebo rovno 0,85. V následujících odstavcích mezi sebou budu porovnávat průměrné koncentrace olova vypočítané z údajů se shodou alespoň 0,85.

Máčení v SAC 305 po dobu 0,5 s

Po analýze vzorků máčených 0,5 sekundy ve slitině SAC 305 (viz tab. A2) jsem zjistil, že koncentrace olova na povrchu vývodů byla v průměru 4,61 hm.%. Při porovnání průměrné koncentrace olova referenčního vzorku a vzorků máčených půl sekundy je zřejmý její razantní pokles, za dobu máčení 0,5 sekundy klesla o 83 % oproti referenčnímu vzorku. Rozptyl měřených koncentrací po půl sekundě je ale značný, což naznačuje, že k odplavování olova z vývodů nedocházelo rovnoměrně. Na jednom vývodu jsem naměřil téměř 12 hm.% olova, zatímco na jiném místě téhož vývodu jsem jeho koncentraci stanovil na 2,8 hm.%. Z výše uvedeného usuzuji, že tato doba máčení je nedostatečná.

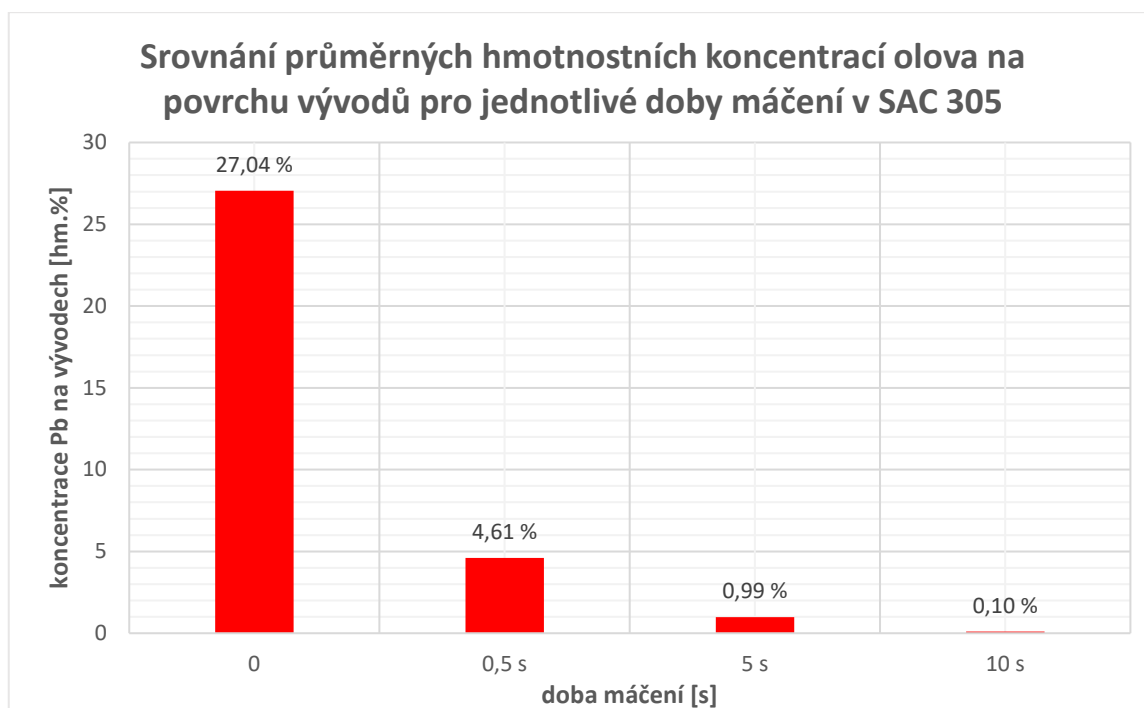
Máčení v SAC 305 po dobu 5 s

Jak plyne z tab. A3, na vzorku máčeném 5 sekund jsem provedl 9 měření různých oblastí, přičemž v osmi případech jsem přítomnost olova nedetekoval vůbec, ale v jedné oblasti mikroskop zachytil olovo v poměrně velkém zastoupení na povrchu, a to přibližně 8 hm.%. Průměrný výskyt olova na vzorku byl tedy 0,99 hm.%, což je pokles o 3,62 p.b. oproti vzorku máčeného 0,5 s. Zároveň je to pokles o 26,05 p.b. vůči referenčnímu vzorku. Máčení vývodů po dobu 5 sekund v pájecí lázni tak nevede k úspěšnému přecínování.

Máčení v SAC 305 po dobu 10 s

Měření vzorku máčeného 10 sekund jsem věnoval zvýšenou pozornost, aby byly mé závěry experimentu co nejvíce podložené. Proměřil jsem 32 oblastí vždy se stejným přiblížením tak, abych pokryl všech 8 vývodů rovnoměrně a zmapoval celý jejich povrch. Výsledky měření jednotlivých oblastí se nacházejí v tab. A4. Je z nich zřejmé, že na řadě míst jsem olovo nedetekoval vůbec, na některých oblastech mikroskop olovo po mém požadavku identifikoval, nicméně ve velmi malých koncentracích a s malými shodami vůči referenčnímu spektru. Při zanedbání těchto nepřesně určených hodnot klesla průměrná koncentrace olova na vývodech po době máčení 10 sekund na hranici 0,1 hm.%. Tuto dobu máčení lze již považovat za dostačující.

Pro shrnutí tohoto segmentu uvádím tabelární vyjádření poklesu koncentrace olova v závislosti na době máčení (viz tab. A6) a rovněž grafické porovnání naměřených průměrných koncentrací olova na obr. 6.



Obr. 6: Závislost koncentrace olova na době máčení (vlastní)

4.2.3 XRF analýza

Pro analýzu rentgenovým zářením jsem použil mobilní analyzátor DELTA od výrobce BAS Rudice. Na obr. 7 je vidět přístroj při analýze jednoho ze vzorků:



Obr. 7: Analyzátor DELTA (vlastní)



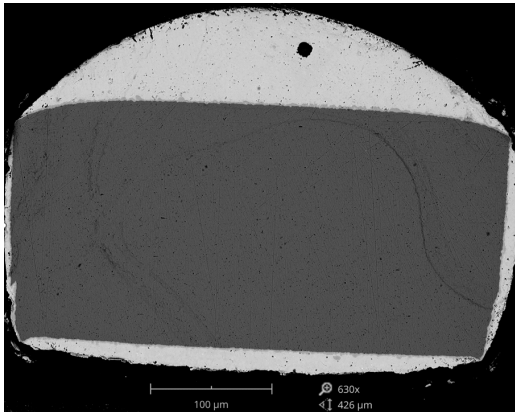
Obr. 8: Analyzovaná oblast (vlastní)

Domníval jsem se, že pomocí tohoto přístroje bude možno detekovat přítomnost olova na vývodech přesněji než elektronovým mikroskopem. Až při měření vyšlo najevo, že oblast, ve které zařízení analýzu provádí, byla mnohonásobně větší než povrch vývodů. Přístroj tak analyzoval nejen složení vývodů, ale částečně i pouzdra čipu a okolí, jak je vidět na obr. 8 (červený ovál). Proto konstatuji, že pro vyhodnocení koncentrace olova na vývodech je tento přístroj nepoužitelný a výsledky měření tímto přístrojem nemají pro stanovení potřebného času máčení žádnou vypovídající hodnotu.

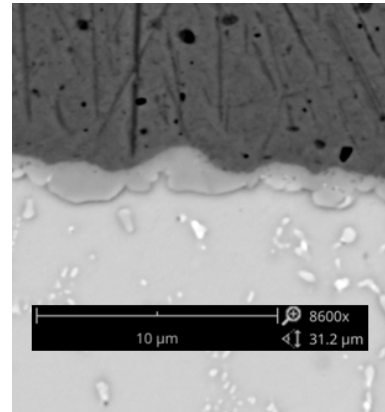
4.2.4 Analýza výbrusů elektronovým mikroskopem

Po měření na površích vývodů jsem nechal vývody čipů vybrousit, abych určil koncentraci olova pod jejich povrchem. Zejména pak cílem analýzy výbrusů bylo potvrdit, že se původní olověná povrchová úprava přecínováním odstranila po celém průřezu vývodu a že nedošlo pouze k jejímu překrytí vrstvou bezolovnaté slitiny. Na průřezu vývodů máčených 0,5 a 5 sekund jsem olovo detekoval, což vzhledem k jeho přítomnosti na povrchu vývodů není překvapivé. Zajímavostí je, že již po půl sekundě máčení v SAC 305 jsem naměřil přímo u vývodu stříbro. To je důkaz toho, že pájecí slitina se již za tento čas máčení dostala k vývodu a olovnatou úpravu na něm počala odstraňovat. Z pohledu práce je podstatné uvést výsledky měření výbrusu vývodu, který jsem máčel 10 sekund. Na něm jsem olovo v žádné míře nenaměřil, jak dokládá tab. A5. Na obr. 9 je

snímek výbrusu jednoho vývodu diskutovaného vzorku (10 s) v SAC 305 pořízený elektronovým mikroskopem.



Obr. 9: Výbrus vzorku máčeného 10 sekund (vlastní)



Obr. 10: IMC na rozhraní vývod-pájka (vlastní)

Tmavší oblast uprostřed snímku je vývod čipu, jehož analýzou jsem zjistil, že je celý složený z mědi. Světlou oblastí kolem vývodu je přilnutá pájecí slitina. Na obr. 10 je pak vidět zřetelná intermetalická vrstva, která vyrostla mezi dolní stranou vývodu na obr. 9 a pájkou od okamžiku ponoření vývodu do slitiny do okamžiku zanalyzování výbrusu. Mezi těmito okamžiky uplynulo 65 dní. Vrstva je tvořena, vzhledem k materiálovému složení vývodu a pájky, sloučeninami Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Dle rovnice (2.1) může mít nově narostlá vrstva Cu_3Sn šířku zhruba $0,14 \mu\text{m}$ vzhledem k tomu, jsem vzorky skladoval při pokojové teplotě (přibližně 300 K). Přítomnost olova jsem na výbrusu zjišťoval zejména na rozhraní mezi vývodem a pájecí slitinou, kde jsem potenciální přítomnost olova očekával. To právě ze zmíněného rizika, že lázeň bezolovnaté pájky vývod pouze obalí a přímo u vývodu olovo v určitém množství zbude. Tuto skutečnost jsem ale měřením vyvrátil, protože na těchto místech jsem olovo nenaměřil, ani jsem ho nedetekoval při zkoumání pájecí slitiny v celém průřezu.

4.3 Závěry experimentu

Na základě provedených experimentů jsem udělal závěr, že pro úspěšné přecínování slitinou SAC 305 je potřeba máčet vývody alespoň 10 sekund při teplotě slitiny $250 \text{ }^\circ\text{C}$, aby bylo zajištěno, že upravené součástky budou RoHS 3 kompatibilní. Doporučuji před přecínováním ověřit v datasheetu součástky, že danou teplotu po tento čas vydrží. Vzhledem k tomu, že jsem byl při experimentech omezen malým počtem vzorků, doporučuji před případným zavedením procesu v praxi výsledky mých měření ověřit na větším počtu součástek.

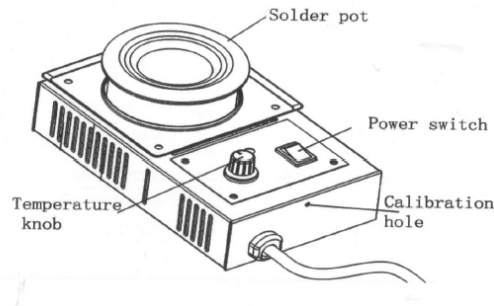
5 Návrh provedení procesu přecínování v praxi

Na realizaci procesu přecínování ve Firmě se dá nahlížet dvěma způsoby. První variantou pro Firmu může být zaměstnání pracovníka, který by součástky přecínovával ručně tak, jako jsem to činil při experimentu já. S touto možností se pojí malé investiční výdaje na pájecí lázeň, ve které by pracovník přecínování prováděl, ale vyšší chybovost procesu kvůli lidskému faktoru. Pracovník v tomto případě nemusí být výrazně kvalifikovaný. Ve druhé variantě by Firma mohla vynaložit velké náklady na pořízení poloautomatizované nebo automatizované linky, která by přecínování prováděla, a v takovém případě by se zmetkovitost procesu snížila. Nicméně i v tomto scénáři by musela zaměstnat obsluhu, která by měla nad linkou dohled. Ta by musela být navíc kvalifikovanější než pracovník, který by přecínování prováděl ručně. Na druhou stranu by se obsluha mohla věnovat i dalším aktivitám ve Firmě.

Důležitým kritériem pro rozhodnutí mezi těmito variantami je objem součástek, které Firma bude chtít přecínovat. V případě malého počtu součástek se statistické investice nemohou vyplatit. Pro Firmu se mně minimálně do začátku zdá bezpečnější zvolit první variantu s nízkými pořizovacími výdaji a až poté, když bude ověřeno, že proces funguje i v praxi, by mohla poplat automatizovanou linku. Z toho důvodu následující část textu věnuji návrhu pracoviště a pracovního postupu pro variantu ručního přecínování.

Vybavení pracoviště

Pracoviště nevyžaduje speciálně vyhrazený samostatný prostor, může být umístěno v kterékoli dílně společně s jinou výrobou. Základem pracoviště je pracovní stůl o rozměrech alespoň 120x60 cm s obvyklou výškou pro práci vsedě (cca 75 cm), vybavený tepluvzdornou podložkou, který je v dosahu zásuvky 230 V a je dobře osvětlen. Uprostřed stolu bude umístěna pájecí lázeň QUICK 100-4C, jejíž schéma je na obr. 11.



Obr. 11: Pájecí lázeň QUICK 100-4C (převzato z [17])

K realizaci pracovního postupu bude dále potřeba pinzeta se zakřiveným koncem na úchop součástek a pracovník by měl být vybaven rukavicemi k ochraně rukou před popálením. Pracoviště je potřeba vybavit časovačem, který pracovníka upozorní na dosažení času potřebného k přecínování. Z jedné strany lázně společně s nádobou s tavidlem budou umístěny součástky k přecínování, na druhé straně bude vyhrazený prostor na odložení opracovaných součástek. Aby byl proces efektivní, je potřeba mít na stole všechny součástky, které se v danou dobu mají přecínovat, aby pro ně pracovník nemusel chodit jednotlivě.

Postup přecínování

Na začátku pracovní doby si pracovník nachystá pracoviště do podoby popsané v minulém odstavci. Zapne nahřívání pájecí lázně a potenciometrem nastaví teplotu 250 °C. Do lázně bude postupně vkládat kousky tyčové pájky, dokud hladina roztavené pájky nedosáhne 5 mm pod okraj vaničky (takové množství odpovídá 300 gramů slitině SAC). Po nahřátí lázně je možné zahájit přecínování. Pracovník nastaví na časovači čas potřebný k přecínování 10 sekund. Uchopí součástku do pinzety, smočí jednu stranu vývodů v tavidle, oklepe přebytečné tavidlo a takto připravenou stranu vývodů ponoří do pájky do hloubky přibližně dvou milimetrů tak, aby pouzdro součástky zůstalo nad hladinou. V momentě ponoření vývodů pracovník spustí časovač, který ho posléze zvukově upozorní na dosažení potřebného času máčení. Poté součástku vytáhne z lázně, odloží ji na pracovní stůl a uchopí do pinzety tak, aby stejným způsobem přecínoval druhou stranu vývodů. Po přecínování obou stran součástku odloží do vyhrazeného prostoru a pokračuje s další součástkou. Na hladině lesklé pájky se bude tvořit vrstva oxidů, kterou je potřeba průběžně odstraňovat, aby byly vývody smáčeny. Pracovník ji

pozná jako matnou škrallouovitou vrstvu a odstraní ji kovovou stěrkou, kterou výrobce k pájecí lázni dodává v ceně.

Navržený postup jsem osobně vyzkoušel a pořídil z něho následující snímky.



Obr. 12: Základní vybavení pro přecínování (vlastní)



Obr. 13: Odstranění vrstvy oxidů (vlastní)

Na obr. 12 je vybavení, se kterým jsem pracoval, dobu máčení jsem měřil časovačem v mobilním telefonu. Na obr. 13 je zachyceno odstranění oxidové vrstvy z povrchu hladiny lázně, po kterém následuje očištění vývodů součástky v tavidle na obr. 14. Poté jsem vývody přecínoval, jak je zachyceno na obr. 15.



Obr. 14: Očištění vývodů v tavidle (vlastní)



Obr. 15: Přecínování (vlastní)

Zjistil jsem přitom, že lze s výhodou použít jako opěrný bod okraj lázně, který zamezí klepání ruky a lze tak poměrně jednoduše udržovat pozici součástky nad hladinou.

6 Ekonomická část

Úkolem ekonomické části mé bakalářské práce je vyhodnotit, která z následujících variant bude z ekonomického hlediska pro Firmu výhodnější:

- a) Provést přecínování vývodů součástek, které má Firma na skladě.
- b) Nakoupit nové součástky, splňující evropské normy, a nevyužitelné zásoby zlikvidovat.

Firma je plátce DPH, a proto budu všechny výpočty provádět v cenách bez DPH. Rozhodnutí, zda nakoupit nové součástky, jejichž povrchová úprava již vyhovuje příslušné evropské směrnici, nebo využít stávající zásoby a vývody součástek upravit, závisí především na počtu součástek na skladě a na ceně nových součástek. Po konzultaci s Firmou jsem zjistil, že by ji zejména zajímaly náklady na přecínování jedné součástky pro více variant počtu přecínovaných součástek v řádech stovek až nižších tisíců upravených součástek. V práci uvedu tyto náklady na kus explicitně pro 1, 25, 100, 480, 1 000, 2 400, 5 000 a 9 600 přecínovaných součástek, jejich závislost na počtu upravených součástek vynesu i graficky. Náklad na 1 přecínovanou součástku uvedu proto, jelikož v sobě nese informaci o minimálních nákladech, které Firma musí k přecínování určitě vynaložit. Uvedené náklady při přecínování 25 a 100 součástek pomohou lokalizovat oblast, ve které budu hledat bod zvratu. Počty součástek 480, 2 400 a 9 600 reprezentují objem, který pracovník stihne přecínovat za pracovní den, týden a měsíc podle navržené výkonové normy. Pro 1 000 součástek provedu vzorový výpočet a pro 5 000 součástek uvedu náklady na kus z toho důvodu, že Firmu explicitně zajímají.

Pro ekonomické zhodnocení procesu přecínování si zvolím konkrétní součástku, o které vím, že ji Firma na skladě má. Je nezbytné při rozhodování, zda součástku přecínovat nebo koupit novou, uvažovat takovou olovnatou a bezolovnatou součástku, která má při použití ve výrobě stejné vlastnosti a stejnou využitelnost. Musí se tedy jednat o vzájemně zaměnitelné součástky. Součástka, kterou jsem zvolil, je tatáž, kterou jsem měl k dispozici na experimenty. Jedná se o napěťovou referenci s označením REF01C109G0919 (REF01CS), která má v dnešní době alternativu pod označením REF01CSA+ s bezolovnatou úpravou. Co do technických parametrů sobě tyto reference

odpovídají, výstupní referenční napětí mají obě 10 V a obě jsou třídy C. Třída například určuje tzv. počáteční přesnost, která je tak u obou referencí dle datasheetu ± 100 mV. [18]

6.1 Nákup a likvidace zásob

Cena nové napěťové reference se odvíjí od počtu nakoupených kusů, souhrn cen pro jednotlivé objemy odebraných kusů uvádím v tab. 3.

počet nakoupených kusů REF01CSA+ [ks]	cena za jednu součástku [Kč/ks]
1	118,09
10	99,00
25	92,89
100	86,76
300	82,46
500	73,81
2 500	59,30
nad 5 000	58,03

Tab. 3: Cena REF 01 v závislosti na zakoupeném množství dle [19]

Jsem si vědom toho, že pro korektní posouzení toho, zda je ekonomicky výhodnější stávající součástky upravovat, nebo nakupovat nové, je potřeba uvažovat i náklady na likvidaci nevyužitelných zásob součástek v případě, že nebudou upraveny. Součástka, se kterou jsem experimentoval, vážila 0,08 g. Na 1 kilogram odpadu tak připadá 12 500 kusů součástek. Oslovil jsem sběrné dvory i soukromé společnosti likvidující elektroodpad s dotazem na cenu likvidace tohoto odpadu v řádu jednotek kilogramů. Oslovené sběrné dvory se vyjádřily tak, že likvidují pouze celé elektrospotřebiče, případně se s firmami domlouvají individuálně. Soukromé společnosti na mé dotazy nereagovaly vůbec. Z toho důvodu jsem do výpočtu konkrétní částku na likvidaci nepromítnul, předpokládám však, že vzhledem k hmotnosti a objemu součástek bude náklad na likvidaci jedné součástky vůči pořízení nové zanedbatelný. Nakonec mně Firma potvrdila, že likvidaci, ani výkup součástek s obsahem olova neprovádí. Pokud už součástky likviduje, tak v rámci dalšího elektroodpadu.

6.2 Náklady na přecínování stávajících součástek

Tato subkapitola se bude věnovat nákladům na proces přeměny olovnaté povrchové úpravy vývodů součástek na bezolovnatou. Jedná se o investiční výdaje na pájecí lázeň a časovač, dále o materiálové náklady, náklady na energii, mzdové náklady a režijní náklady.

6.2.1 Investiční výdaje

Mezi investiční výdaje patří nejprve pájecí lázeň. Vybral jsem lázeň QUICK 100-4C s pořizovací cenou 2 800 Kč bez DPH [20]. Lázeň pojme 300 g bezolovnaté pájecí slitiny. Její povrch je smaltovaný a odolává tak vysokým teplotám taveniny, během používání se v tavenině nerozpouští. Zároveň je povrch lázně méně náchylný na oxidaci. V rámci mých výpočtů lze tento náklad považovat za fixní. Druhým investičním výdajem je časovač, který pracovníka informuje o dosažení času máčení. Vybral jsem časovač s paměť nastaveného času s cenou 198 Kč bez DPH [21]. Posledním výdajem je pinzeta, pomocí níž bude pracovník manipulovat součástkami. Její cena je 235 Kč bez DPH [22]. Celkové investiční výdaje jsou součtem ceny pájecí lázně, časovače a pinzety, tedy 3 233 Kč.

V kalkulaci na přecínování 1 součástky budu uvažovat odpis investice. Nejkorektnější přístup by byl zahrnout do investičních výdajů vliv časové hodnoty peněz. Tím, že Firma investuje do vybavení k přecínování, přichází o alternativní užitek peněz, které mohla investovat do něčeho jiného. K vyjádření ceny ušlé příležitosti se používá diskont, který udává procentuální výnos, jenž by Firma získala, kdyby investovala do podobně rizikového projektu místo stávajícího.

Určení diskontní míry

Na přednášce ze Základů finančního managementu byl uveden vztah, kterým lze diskontní míru stanovit [23].

$$r = r_f + (r_m - r_f) \cdot \beta \text{ [%]} \quad (6.1)$$

kde:

- r je výnos vlastního kapitálu (diskontní míra)
- r_f je bezrizikový výnos (free), r_m je průměrný výnos trhu (market)
- $(r_m - r_f)$ je tzv. „Equity Risk Premium“ ERP

- β je tzv. beta koeficient (určuje rizikovost odvětví, do kterého se investuje)

Bezrizikový výnos jsem určil jako průměrný výnos státních dluhopisů 147. emise ze stránek Ministerstva financí České republiky, který byl stanoven ke dni 18. 4. 2024 na 5,2 % p.a. [24] Z internetových stránek Damodaran jsem zjistil hodnotu ERP pro Českou republiku, která činí 5,48 %. [25] Koeficient β jsem dohledal pro odvětví „elektrická zařízení“ opět ze stránek Damodaran. Jeho hodnota v západní Evropě v tomto odvětví je 1,16 [26]. Z dohledaných údajů již mohu odhadnout pomocí vztahu (6.1) diskontní míru r .

$$r = r_f + ERP \cdot \beta = 5,2 + 5,48 \cdot 1,16 = 11,61 \%$$

Vzhledem k tomu, že výše investice je relativně malá, a vzhledem k počtu součástek, který Firma uvažuje přecínovat, usuzuji, že i krátkodobá, rozhodl jsem se časovou hodnotu peněz ve výpočtu dále neuvažovat.

6.2.2 Materiálové náklady

Materiálové náklady zahrnují pájecí slitinu a tavidlo. Ve výpočtu uvažuji pájecí slitinu SAC 305 ve formě tyče, s níž jsem pokusy prováděl. Tuto slitinu jsem zvolil proto, že její použití Firma preferuje. Pořizovací cena jednoho kilogramu této slitiny je 2 222,15 Kč bez DPH [27]. Je třeba brát v potaz, že zhruba po přecínování 3 840 vývodů bude pájecí slitina (při maximálním využití objemu lázně) kontaminovaná olovem natolik, že ji bude třeba vyměnit. Další vývody by totiž po smáčení v kontaminované slitině mohly obsahovat olovo ve vyšší koncentraci než dovolené. S výkonovou normou pracovníka, který zvládne za hodinu přecínovat 60 součástek (na základě vlastní zkušenosti), přičemž má součástka 8 vývodů, vychází, že po osmihodinové směně bude potřeba slitinu vyměnit. Poptal jsem možnost použitou slitinu prodávat ve výkupu kovů. Dozvěděl jsem se, že za SAC 305 slitinu se stopovým obsahem olova, může Firma získat 900 Kč/kg. V rámci kalkulace snížím o tuto částku cenu slitiny.

K přecínování jsem při experimentu použil tavidlo TOPNIK RF800, které tak navrhuji i pro použití v praxi. Jeho cena za balení 100 ml je 290 Kč bez DPH [28]. Zvážil jsem na laboratorní váze, že při smočení vývodů jednoho čipu (8 vývodů) na nich ulpí

3 mg tavidla. Zároveň jsem zjistil, že 1 ml tohoto tavidla váží přibližně 0,8 g. Z toho vyplývá, že tavidlo v balení váží 80 gramů a vystačí tak na ošetření 26 666 čipů.

V kalkulaci na základě počtu součástek v zásobách zjišťuji, kolik celých dávek pájecí slitiny a tavidla musí Firma pořídit, aby přecínování provedla. Tyto celé dávky pak rozpočítávám na počet přecínovaných součástek.

6.2.3 Náklady na elektrickou energii

Příkon pájecí lázně je pouze 200 W, takže mohu s jistotou předpokládat, že k jejímu používání postačí jistit zásuvku standardně používaným jističem na 16 A a nebude tedy nutné jeho hodnotu zvyšovat. Hodina provozu lázně tedy spotřebuje 0,2 kWh elektrické energie. Firma mi sdělila, že odebírá elektrickou energii na hladině vysokého napětí, což podle přílohy č. 7 k vyhlášce č. 408/2015 Sb. odpovídá kategorii odběratele B. Získal jsem od Firmy reálný odhad, že by se cena, za kterou odebírají elektrickou energii, mohla pohybovat kolem 140 €/MWh. To při dubnovém průměrném kurzu eura vůči koruně 25,28 Kč činí 3 539 Kč/MWh. [29] Stanovení přesné ceny je pro Firmu komplikované, neboť odebírají elektřinu za pevné, i spotové ceny. V Jihočeském kraji, kde Firma působí, je distributorem EG.D (člen skupiny E.ON) a pro stanovení tarifu předpokládám, že Firma od společnosti E.ON odebírá i silovou elektrickou energii. Po emailové komunikaci s informační linkou E.ONu jsem zvolil jejich ceník IndexPower pro velké firmy. Uvažuji, že Firma má měsíční spotřebu větší než 25 MWh, pak podle tohoto ceníku Firma zaplatí 3 790 Kč/MWh bez DPH. [30] V této ceně je zahrnuta jak silová, tak distribuční složka ceny elektřiny. Zvolená cena elektřiny se blíží odhadu, který mně Firma poskytla.

6.2.4 Mzdové náklady

Další položkou v kalkulačním vzorci je mzda pracovníka, který bude přecínování vývodů součástek provádět. Jeho práce podle Národní klasifikace povolání odpovídá zařazení do kategorie 93292: Pomocní dělníci ve výrobě – montážní a pomocný pracovník v elektrotechnice. [31], [32] Jde o nenáročnou manuální práci, která nevyžaduje žádné vzdělání ani výraznou manuální zručnost. Charakter práce v této kategorii odpovídá první skupině prací [33], ve které zaručená mzda odpovídá minimální mzdě. Ta v roce 2024 činí 112,50 Kč/hod. [34] Při stanovení mzdy pracovníka vycházím z mediánu mezd v kategorii 93292 v Jihočeském kraji v roce 2020, který činil 26 425 Kč měsíčně, tedy 157 Kč/hod

[32], a indexu nárustu průměrných mezd v elektrotechnice mezi roky 2020 a 2023 [35], [36], který byl 1,2536 – viz tab. 4. Index jsem vypočítal jako podíl průměrných mezd za rok 2023 a 2020.

rok	průměrná mzda v elektrotechnice v ČR [Kč]	index nárustu mezd [-]	medián mezd pro kategorii 93292 v JČ kraji [Kč/měsíc]	medián mezd pro kategorii 93292 v JČ kraji [Kč/hod]
2020	34 626	1	26 425	157,29
2023	43 407	1,2536	33 126	197,18

Tab. 4: Vývoj mezd v elektrotechnice (zpracováno dle [32], [35], [36])

Na základě výše uvedených úvah počítám v kalkulaci s hodinovou mzdou pracovníka 200 Kč/hod. Odvody zdravotního a sociálního pojištění za zaměstnavatele jsou podle platné legislativy na úrovni 33,8 % hrubé mzdy (odvod zdravotního pojištění 9 %, odvod sociálního pojištění 24,8 %).

6.2.5 Nepřímé náklady

Nepřímé (režijní) náklady jsou v každé firmě vynakládány na činnosti, které nesouvisí přímo s výrobními procesy, ale jsou pro její činnost nezbytné, jako je údržba majetku firmy, činnost ekonomického a personálního oddělení, managementu, topení, svícení a mnoho dalších. Do kalkulačních vzorců se tyto náklady promítají prostřednictvím režijní přírážky vztážené k některému z přímých nákladů. Vzhledem k tomu, že proces přecínování bude pro Firmu doplňkovou činností, mohu předpokládat, že většina režijních nákladů je již pokryta hlavní činností Firmy. Proto do kalkulace zahrnuji pouze výrobní režii spojenou s případnými opravami pájecí lázně a ochrannými pracovními pomůckami pro zaměstnance. Režijní přírážku odhaduji na 50 % přímých mezd.

6.3 Kalkulace nákladů na přecínování 1 součástky

Náklady popsané v předchozích subkapitolách nyní přepočítám na jednu přecínovanou součástku. Vzorový výpočet provedu pro případ, že Firma přecínuje 1 000 součástek. Kalkulace na součástku se skládá z přímého materiálu, přímých mezd (včetně zdravotního a sociálního pojištění), spotřeby energie a odpisu investice. Součet těchto položek dá celkové přímé náklady na jednu součástku. K nim přičtu režijní náklady a výsledkem budou celkové vlastní náklady na jednu součástku. Tyto náklady upravím

o zmetkovitost procesu z , kterou po konzultaci s mým vedoucím práce a jeho odborném odhadu uvažují na 5 % z celkově upravených součástek. Vlastní náklady vydělím $(1-z)$, čímž vícenáklady na zmetky rozpočítám do úspěšně přecínovaných součástek.

Přehled označených parametrů vstupujících do kalkulace je v tab. 5. Jednotlivé složky kalkulace značím zkratkami, které jsou definovány v seznamu použitých symbolů a zkratk.

Tabulka vstupů kalkulace na přecínování jedné součástky					
popis vstupu	označení	hodnota	popis vstupu	označení	hodnota
cena časovače	p_c [Kč]	198	hodinová mzda pracovníka	p_{mzda} [Kč/hod]	200
cena pájecí lázně QUICK 100-4C	p_l [Kč]	2800	sazba zdravotního a sociálního pojištění	sazba ZSP [%]	33,80 %
cena zahnuté pinzety [Kč]	p_p [Kč]	235	doba přecínování jedné součástky	$t_{přec}$ [s]	60
celková počáteční investice	I [Kč]	3233	výkonová norma pracovníka	n [ks/hod]	60
příkon pájecí lázně	P [W]	200	doba provozu lázně na přecínování všech součástek	$t_{lázeň}$ [hod]	17
spotřeba lázně za hodinu	$E_{lázeň}$ [kWh]	0,2	počet vývodů, které lze ošetřit jedním balením tavidla	v_{tav}	213 328
nákupní cena pájecí slitiny SAC 305	p_{nSAC} [Kč/g]	2,22	cena tavidla TOPNIK RF800	p_{tav} [Kč]	290
počet dávek slitiny na přecínování všech součástek	d_{slit} [dávka]	3	zmetkovitost procesu	z [%]	5 %
výkupní cena pájecí slitiny SAC 305	p_{vSAC} [Kč/g]	0,9	cena elektřiny	p_{el} [Kč/kWh]	3,79
hmotnost slitiny v lázni (1 dávka)	m [g]	300	režijní přírážka	režie [%]	50 %
počet vývodů, které lze přecínovat v jedné dávce slitiny	v_{slit} [ks]	3840	počet dávek (balení) tavidla na přecínování všech součástek	d_{tav} [bal]	1
počet vývodů na součástce	x_v [ks]	8	počet součástek k přecínování	$x_{souč}$ [ks]	1000

Tab. 5: Parametry kalkulace (vlastní)

Výpočet přímého materiálu:

Nejprve je třeba určit, kolik celých dávek slitiny d_{slit} a kolik dávek tavidla d_{tav} bude potřeba k přecínování 1 000 součástek.

- počet dávek slitiny:

$$d_{slit} = \frac{x_{souč}}{v_{slit}} \cdot x_v = \frac{1\,000}{3\,840} \cdot 8 = 2,08 \doteq 3 \quad (6.2)$$

- počet dávek (balení) tavidla:

$$d_{tav} = \frac{x_{souč}}{v_{tav}} \cdot x_v = \frac{1\ 000}{213\ 328} \cdot 8 = 0,04 \doteq 1 \quad (6.3)$$

Nyní když vím, kolik Firma musí pořídit materiálu, mohu cenu přímého materiálu (PMAT) přepočítat na jednu součástku (první člen rozpočítává pájecí slitinu, druhý člen tavidlo):

$$PMAT = \frac{d_{slit} \cdot (p_{nSAC} - p_{vSAC}) \cdot m}{x_{souč}} + \frac{d_{tav} \cdot p_{tav}}{x_{souč}} = \frac{3 \cdot (2,22 - 0,9) \cdot 300}{1\ 000} + \frac{1 \cdot 290}{1\ 000} = 1,48 \text{ Kč/ks} \quad (6.4)$$

Výpočet přímých mezd:

Zaměstnancovu mzdu jsem stanovil na 200 Kč/hod, přičemž hodinovou pracovní normu zaměstnance jsem určil na 60 součástek, a to na základě vlastní zkušenosti z experimentu, že za minutu lze celou součástku přecínovat. Přímé mzdy (PMZ) na součástku jsou poté následující:

$$PMZ = \frac{p_{mzda}}{n} = \frac{200}{60} = 3,33 \text{ Kč/ks} \quad (6.5)$$

K tomu je nutné započítat ještě zdravotní a sociální pojištění ZSP ve výši 33,8 % přímých mezd.

$$ZSP = PMZ \cdot sazba\ ZSP = 3,33 \cdot 0,338 = 1,13 \text{ Kč/ks} \quad (6.6)$$

Výpočet spotřeby energie:

V první řadě je třeba určit dobu, po kterou je pájecí lázeň v provozu. Když je norma zaměstnance 60 součástek za hodinu, pak mu přecínování 1 000 součástek bude trvat 16,7 hodin. Ve výpočtu zanedbávám, že lázni po zapnutí trvá zhruba 10 minut se nahřát na pracovní teplotu. Na přecínování 1 000 součástek je lázeň v provozu tedy zhruba 17 hodin. Při spotřebě lázně 0,2 kWh s cenou elektřiny 3,79 Kč/kWh budou náklady na energii (SE) při přecínování jedné součástky:

$$SE = \frac{E_{lázeň} \cdot t_{lázeň} \cdot p_{el}}{x_{souč}} = \frac{0,2 \cdot 17 \cdot 3,79}{1\ 000} = 0,013 \text{ Kč/ks} \quad (6.7)$$

Spotřebu energie na kus bylo možno také počítat přímo z výkonové normy pracovníka.

Opotřebení (odpis) investice:

Poslední položkou přímých nákladů je odpis pájecí lázně, časovače a pinzety. Celkovou výši investice jsem v subkapitole 6.2.1 stanovil na 3 233 Kč. Odpis investice (OI) na jednu součástku vypočítám následovně:

$$OI = \frac{I}{x_{\text{souč}}} = \frac{3\,233}{1\,000} = 3,23 \text{ Kč/ks} \quad (6.8)$$

Přímé náklady celkem:

Součtem výše vypočítaných položek vzniknou celkové přímé náklady (PN):

$$PN = 1,48 + 3,33 + 1,13 + 0,013 + 3,23 = 9,18 \text{ Kč/ks} \quad (6.9)$$

Režijní náklady:

Do kalkulace zahrnuji režijní náklady (RN) ve formě 50 % přímých mezd:

$$RN = PMZ \cdot \text{režie} = 3,33 \cdot 0,5 = 1,67 \text{ Kč/ks} \quad (6.10)$$

Vlastní náklady celkem:

Vlastní náklady (VN) jsou součtem přímých nákladů a režijních nákladů:

$$VN = 9,18 + 1,67 = 10,85 \text{ Kč/ks} \quad (6.11)$$

Zahrnutí zmetkovitosti:

Celkové náklady na přecínování jedné součástky po zahrnutí zmetkovitosti N jsou:

$$N = \frac{VN}{1 - z} = \frac{10,85}{1 - 0,05} = 11,42 \text{ Kč/ks} \quad (6.12)$$

Výsledná podoba kalkulačního vzorce:

Následující tabulka (tab. 6) shrnuje vypočítané položky kalkulačního vzorce:

KALKULACE NA PŘECÍNOVÁNÍ JEDNÉ SOUČÁSTKY při celkovém počtu 1000 kusů [Kč/ks]	
1. přímý materiál	1,480
2. přímé mzdy	3,330
3. zdravotní a sociální pojištění	1,130
4. spotřeba energie	0,013
5. odpis investice	3,230
<i>přímé náklady celkem</i>	9,180
6. režijní náklady	1,670
<i>vlastní náklady celkem [Kč/ks]</i>	10,850
<i>vlastní náklady při zahrnutí zmetkovitosti [Kč/ks]</i>	11,420

Tab. 6: Kalkulace na přecínování jedné součástky při 1 000 ks (vlastní)

Výpočet založený na stejném principu jsem provedl i pro další počty přecínovaných součástek uvedených v úvodu této kapitoly. Tyto náklady uvádím v tabulce 7.

počet součástek k přecínování [ks]	náklady na přecínování jedné součástky [Kč/ks]
1	4 132,00
25	171,50
100	47,72
480	15,06
2 400	8,88
5 000	8,12
9 600	7,72

Tab. 7 Náklady na přecínování jedné součástky pro vybrané počty součástek (vlastní)

V příloze B na obr. B1 pak uvádím grafické znázornění závislosti nákladů na přecínování jedné součástky na počtu přecínovaných součástek.

6.4 Citlivostní analýza

Protože hodnoty vstupující do výpočtu konečné ceny přecínování jedné součástky se mohou měnit, provedu pro vstupy, které mají na výsledné náklady přecínování největší vliv, citlivostní analýzu. Ceny vstupů se mohou měnit podle pesimistického, realistického, nebo optimistického scénáře v závislosti na vývoji cen na trhu. Firma také může nakupovat materiál z jiného zdroje, než který uvažuji já, případně může dát zaměstnanci

jinou mzdu, než kterou jsem dovodil. Citlivostní analýza se obecně zakládá na tom, že je znám vztah, podle kterého se počítá hledaná veličina, v mém případě cena přecínování součástky, a jsou známy vstupní parametry pro výpočet. Pro tyto parametry budu zvažovat odchylku, která obecně může být $\pm (10 \div 30) \%$ původní hodnoty v závislosti na tom, zda vývoj těchto hodnot bude kopírovat optimistický nebo pesimistický scénář. Konkrétní zvolená velikost odchylky závisí na potenciální očekávané změně daného parametru. Upravené parametry dosadím do kalkulačního vzorce a budu zkoumat, jak se cena přecínování změní.

V návaznosti na předchozí subkapitolu budu citlivostní analýzu provádět pro objem 1 000 přecínovaných součástek. Následující koláčový graf na obr. 16 zobrazuje poměrné zastoupení položek kalkulace v tabulce 6.



Obr. 16: Zastoupení nákladů v kalkulaci při přecínování 1 000 součástek (vlastní)

Je patrné, že největší podíl na ceně přecínování mají mzdy, které jsou v kalkulaci zahrnuty jak přímo, tak prostřednictvím výrobní režie, která je k nim vztažena. Druhou největší položkou je rozpočítaná počáteční investice a třetí je spotřeba materiálu. Náklady na energii jsou oproti ostatním takřka zanedbatelné. Citlivostní analýzu má smysl udělat pro mzdy, jejichž změna se projeví i na zdravotním a sociálním pojištění a výrobní režii. Z materiálových nákladů má na konečnou cenu větší vliv cena pájecí slitiny. Ačkoli mají investiční výdaje třetinový podíl na výsledné ceně přecínování, jejich změnu neočekávám, a proto je do citlivostní analýzy nezahrnu. Následující tabulka (tab. 8) proto

obsahuje výsledky citlivostní analýzy při změně mzdy o $\pm 25\%$ a ceny pájecí slitiny o $\pm 10\%$.

		cena pájecí slitiny SAC 305 [Kč/1g]									
		2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,22	2,30	2,35	2,40	2,45
mzda pracovníka [Kč/hod]	150	9,60	9,65	9,70	9,74	9,79	9,81	9,88	9,93	9,98	10,03
	160	9,92	9,97	10,02	10,07	10,11	10,13	10,21	10,25	10,30	10,35
	170	10,25	10,29	10,34	10,39	10,44	10,45	10,53	10,58	10,62	10,67
	180	10,57	10,62	10,66	10,71	10,76	10,78	10,85	10,90	10,95	10,99
	190	10,89	10,94	10,99	11,03	11,08	11,10	11,17	11,22	11,27	11,32
	200	11,21	11,26	11,31	11,36	11,40	11,42	11,50	11,54	11,59	11,64
	210	11,54	11,58	11,63	11,68	11,72	11,74	11,82	11,87	11,91	11,96
	220	11,86	11,91	11,95	12,00	12,05	12,07	12,14	12,19	12,24	12,28
	230	12,18	12,23	12,28	12,32	12,37	12,39	12,46	12,51	12,56	12,61
	240	12,50	12,55	12,60	12,64	12,69	12,71	12,79	12,83	12,88	12,93
		cena přecínování jedné součástky [Kč/ks]									

Tab. 8: Citlivostní analýza na změnu mzdy a ceny pájecí slitiny (vlastní)

Oranžově vyznačená pole jsou původní hodnoty, které do kalkulace vstupovaly. Jim odpovídá rovněž zvýrazněná cena přecínování 11,42 Kč/ks. Při nejoptimističtější scénáři, kdy uvažují pokles ceny pájecí slitiny o 10 % a mzdu ve výši 150 Kč/hod, vyjde při přecínování 1 000 součástek cena na kus 9,60 Kč/ks. Výsledkem nejpesimističtějšího scénáře, kdy cena pájecí slitiny vzroste o 10 % a mzda stoupne na 240 Kč/hod, je cena přecínování 12,93 Kč/ks.

Je možné, že stanovená výše zmetkovitosti procesu 5 %, pro kterou jsem kalkulaci provedl, bude ve skutečnosti vyšší. Potenciálními zmetky mohou být součástky, kterým se při manipulaci ohnou vývody, v případě ponoření pouzdra součástky do slitiny může zmetek vzniknout tepelným namáháním. Zmetek může vzniknout i tak, že pracovník nedodrží stanovenou dobu máčení nebo teplotu a na vývodech tak zůstane olovo ve vyšší koncentraci než povolené. Proto uvádím tab. 9, ve které je vliv zmetkovitosti na výslednou cenu přecínování znázorněný, a to až do zmetkovitosti 30 %. Ta znamená, že zhruba na každou třetí přecínovanou součástku Firma vynaloží náklady, které nevedou k získání použitelné součástky. O tyto náklady je pak dražší přecínovat zbývající dvě součástky.

zmetkovitost [%]	náklady na přecínování jedné součástky [Kč/ks]
5 %	11,42
10 %	12,06
15 %	12,77
20 %	13,57
25%	14,47
30%	15,50

Tab. 9: Citlivostní analýza na změnu zmetkovitosti (vlastní)

6.5 Ekonomické zhodnocení procesu pro konkrétní součástku

Náklady na přecínování součástek a pořízení nových součástek pro různé počty kusů a vyčíslené úspory shrnuje tab. 10.

počet součástek k přecínování [ks]	náklady na přecínování [Kč/ks]	cena za nakoupenou součástku [Kč/ks]	náklady na přecínování součástek [Kč]	náklady na pořízení nových součástek [Kč]	úspora/ztráta přecínováním součástek [Kč]
1	4 132,40	118,09	4 132	118	-4 014
25	171,50	92,89	4 288	2 322	-1 965
100	47,72	86,76	4 772	8 676	3 904
480	15,06	82,46	7 228	39 580	32 352
1 000	11,42	73,81	11 420	73 810	62 390
2 400	8,88	73,81	21 306	177 132	155 826
5 000	8,12	58,03	40 613	290 130	249 517
9 600	7,72	58,03	74 098	557 050	482 952

Tab. 10: Vyčíslení úspor/ztrát při procesu přecínování (vlastní)

Z tabulky vyplývá, že přecínování 25 kusů napětových referencí se nevyplatí, zatímco pro 100 kusů součástek již přecínování přináší úsporu 3 904 Kč.

6.6 Stanovení bodu zratu pro konkrétní součástku

Nyní stanovím nejnižší počet přecínovaných napětových referencí, pro které se již proces vyplatí. Hledám množství součástek $x_{souč}$, pro které platí rovnice:

$$\text{nákup nových součástek} = \text{přecínování starých zásob} \quad (6.13)$$

Vím, že hledané množství součástek leží v intervalu (25, 100). V tomto rozmezí cena nové součástky p_{ns} je 92,89 Kč/ks (dle tab. 3) a na úpravu tohoto množství součástek vystačí 1 dávka pájecí slitiny i tavidla. Rovnice (6.13) má proto tvar:

$$p_{ns} \cdot x_{souč} = \frac{I + p_{tav} + (p_{nSAC} - p_{vSAC}) \cdot m}{1 - z} + \frac{x_{souč}}{1 - z} \cdot (SE + PMZ + ZSP + RN) \quad (6.14)$$

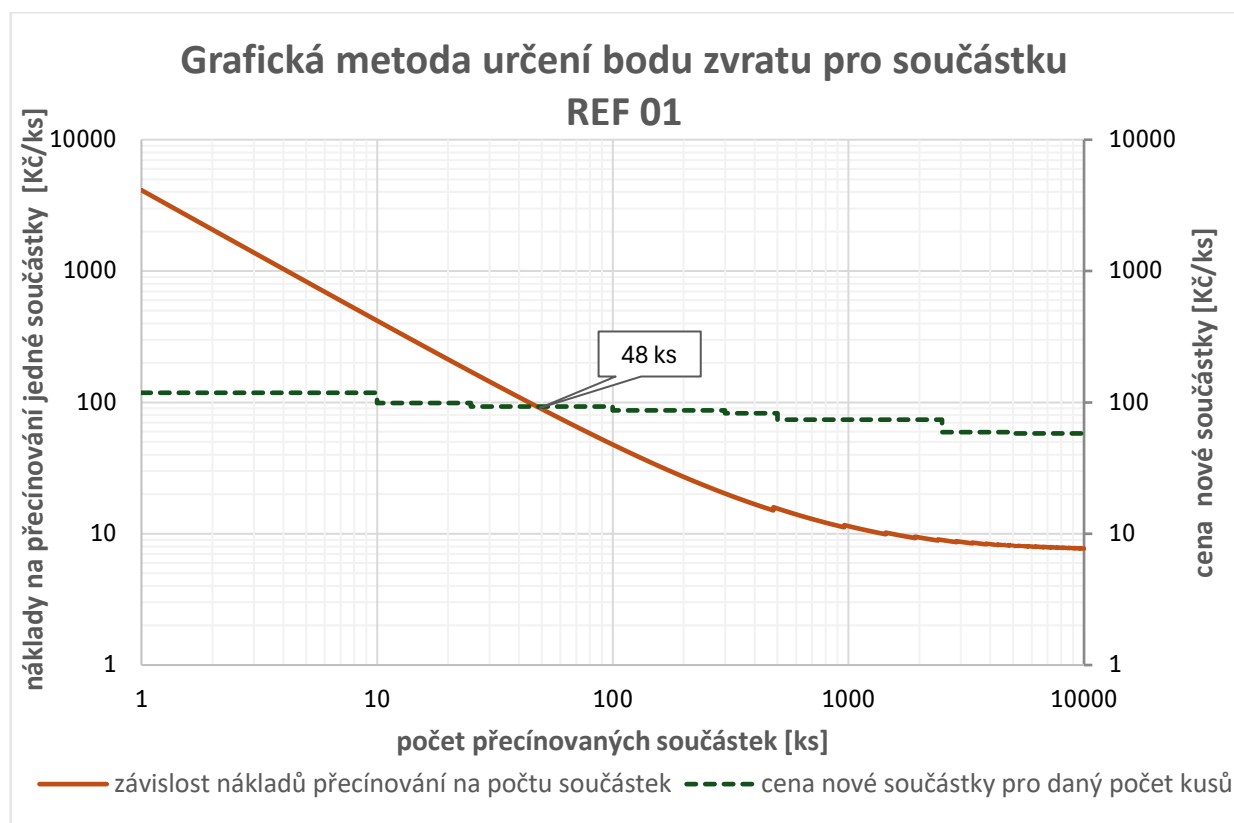
Z rovnice (6.14) vyjádřím počet součástek $x_{souč}$:

$$x_{souč} = \frac{I + p_{tav} + (p_{nSAC} - p_{vSAC}) \cdot m}{p_{ns} \cdot (1 - z) - (SE + PMZ + ZSP + RN)} \quad (6.15)$$

Do rovnice (6.15) dosadím hodnoty z tab. 5 a výsledků vztahů (6.5), (6.6), (6.7) a (6.10):

$$x_{souč} = \frac{3\,233 + 290 + (2,22 - 0,9) \cdot 300}{92,89 \cdot (1 - 0,05) - (0,013 + 3,33 + 1,13 + 1,67)} = 47,73 \doteq 48 \text{ ks} \quad (6.16)$$

Náklady na pořízení 48 kusů nových součástek jsou 4 459 Kč, zatímco přecínování tohoto počtu součástek vyjde Firmu na 4 436 Kč (při jednotkové ceně přecínování 92,42 Kč/ks). Od 48 kusů uvažovaných součástek se již přecínování Firmě vyplatí. Na obr. 17 je bod zvratu vyřešen rovněž graficky. Všechny osy jsou pro přehlednost v logaritmickém měřítku.



Obr. 17: Grafická metoda určení bodu zvratu pro REF 01 (vlastní)

Závěr

Cílem této práce bylo ověřit, zda a za jakých podmínek je možné přecínováním součástek s olovnatou úpravou vývodů získat součástky kompatibilní s evropskou směrnicí RoHS 3, navrhnout konkrétní postup a potřebné vybavení pro provádění přecínování v praxi a zhodnotit ekonomické podmínky, za kterých je vhodné přecínování využívat. Lze konstatovat, že tyto cíle práce byly naplněny.

V experimentální části práce bylo zjištěno, že upravená součástka REF01CS splňuje směrnicí RoHS 3, tedy že průměrný obsah olova na vývodech součástky je menší než 0,1 hm.%, jsou-li máčeny v lázni SAC 305 při teplotě 250 °C alespoň 10 sekund. Vzhledem k tomu, že výsledky experimentu jsou podloženy malým počtem vzorků, bylo by vhodné výsledky ověřit na širším spektru součástek před zavedením procesu v praxi. Následně bylo navrženo vybavení pracoviště a postup, kterým by se mohlo přecínování v praxi provádět.

V ekonomické části práce bylo bodem zvratu vypočteno, že se navržený postup pro tuto součástku vyplatí již od 48 kusů. Kalkulací byly stanoveny náklady na přecínování jedné součástky při celkovém množství 1 až 9 600 součástek. Závislost těchto nákladů na počtu přecínovaných součástek byla vynesena graficky, pro vybrané počty uvažovaných součástek byla vyčíslena úspora/ztráta pro Firmu spojená s realizací navrženého procesu. Kdyby se Firma rozhodla přecínovat například 1 000 uvažovaných součástek s olovnatou povrchovou úpravou, uspořila by 62 390 Kč oproti tomu, kdyby nakoupila stejný počet bezolovnatých součástek se stejnou funkcí. V případě, že by bylo potřeba přecínovat řádově více součástek, což by teoreticky mohlo vyplývat z hodnoty korekce zásob ve výroční zprávě Firmy za období 2021/22, bylo by vhodné proces přecínování automatizovat.

Seznam použité literatury

- [1] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001.
- [2] „Manuál k nařízení vlády o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních". MPO, duben 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozariadeni/2019/4/Manual-k-narizeni-vlady-c-481-2012-Sb_Aktualizace_04_2019.pdf
- [3] „Základní informace k problematice RoHS", MPO. Viděno: 21. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozariadeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>
- [4] „Přehled směrnic EU o ROHS". [Online]. Dostupné z: <https://www.smart-tec.com/smart-tec/doc/en/downloads/rohs3-smart-tec-graficky-prehled-cz.pdf>
- [5] E. Efsan a A. Marini, „A Review of Solder Evolution in Electronic Application", *Int. J. Eng.*, lis. 2012.
- [6] J. Sedláček, „Fyzikální principy pájení", prezentováno v FEL ČVUT, 2022. [Online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/365793/mod_resource/content/2/FYZIKÁLNÍ%20PRINCIPY%20PÁJENÍ.pdf
- [7] L. Sun a L. Zhang, „Properties and Microstructures of Sn-Ag-Cu-X Lead-Free Solder Joints in Electronic Packaging", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, roč. 2015, doi: 10.1155/2015/639028.
- [8] A. Pietriková, J. Ďurišín, a P. Mach, *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektrotechnike*. Košice: Fakulta elektrotechniky a Technickej informatiky v Košiciach, 2010.
- [9] F. Riley, Ed., *The Electronics Assembly Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. doi: 10.1007/978-3-662-13161-9.
- [10] M. Abel a V. Cimburek, *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*, Vyd. 1. Pardubice: ABE. TEC, 2005.
- [11] K. Dušek, „Pájení úvod 2", prezentováno v FEL ČVUT, 2022. [Online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/365795/mod_resource/content/1/pajeni_uvod_2.pdf
- [12] T. Siewert, S. Liu, D. Smith, a J. C. Madeni, *Properties of Lead-Free Solders*, roč. 2002. Colorado: National Institute of Standards and Technology. [Online]. Dostupné z: https://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf
- [13] Z. Hájková, P. Baueroval, A. Fejfar, a M. Šlouf, „Elektronový mikroskop – klíč k odhalení tajemství mikro a nanosvětla", *Chem. Listy*, s. 128–134, 2018.
- [14] R. Hurt, *Electron emission mechanism*. 2016. Viděno: 26. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_emission_mechanisms.svg
- [15] V. Otruba, „Analytická RTG spektrometrie", MUNI, 2011. [Online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/C7031/um/14_AS_RTG.pdf
- [16] „Rentgen-fluorescenční spektrometrie". MUNI. [Online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2017/C6920/um/XRFLIBS_teorie.pdf
- [17] „Lead-free Solder Pot Instruction Manual". QUICK ELECTRONIC EQUIPMENT CO.
- [18] „Datasheet REF01", Analog Devices. [Online]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/REF01_02_03.pdf?ADICID=SYND_WW_P682800_PF-spglobal
- [19] „Napěťová reference REF01CSA+", Farnell. Viděno: 26. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/analog-devices/ref01csa/voltage-ref-series-10v-soic-8/dp/2518579?CMP=KNC-GCZ-GEN-KWL-Pmax-Test-1338&mckv=_dc|pcrid||&gad_source=1&gclid=Cj0KQCjw_qexBhCoARIsAFgBleuiZF6sAMeoYnWTWUnLBA91ugORvW8bObY4A6LihOAUzZL4QBkgpr0aApjsEALw_wcB

- [20] „Cínová lázeň smaltovaná QUICK 100-4C", hotair.cz. Viděno: 2. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pajeni/cinove-lazne/cinova-lazen-smaltovana-quick-100-4c.html>
- [21] „Digitální minutka", Alza. Viděno: 3. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/tfa-digitalni-minutka-casovac-a-stopky-tfa38202201-d6205224.htm>
- [22] „Univerzální zahnutá pinzeta", GME. Viděno: 14. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1503488/proskit-1pk-104t-univerzalni-pinzeta-zahnuta>
- [23] O. Starý, „Zadlužení, WACC", prezentováno v FEL ČVUT, 2024. [Online]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=309322>
- [24] „Výnosy státních dluhopisů", Ministerstvo financí České republiky. [Online]. Dostupné z: <https://www.mfcr.cz/cs/rozpocetova-politika/rizeni-statniho-dluhu/emise-statnich-dluhopisu/vynosy-sdd#147.%20emise%20-%20CZ0001006498>
- [25] A. Damodaran, „Country Default Spreads and Risk Premiums". [Online]. Dostupné z: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html
- [26] A. Damodaran, „Beta, Unlevered beta and other risk measures in Western Europe". [Online]. Dostupné z: <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/betaEurope.xls>
- [27] „Tyčová pájka SAC 305", ESDSHOP. Viděno: 19. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.esdshop.cz/tycova-spajka-sac-305-bezolovo/>
- [28] „Kalafunové tavidlo k pájení SMD Topnik RF800 100ml", hotair.cz. Viděno: 5. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/kapaliny-pro-pajeni/kalafunove-tavidlo-k-pajeni-smd-topnik-rf800-100ml.html>
- [29] „Průměrný kurz koruny vůči Euro", ČNB. Viděno: 17. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/financni-trhy/devizovy-trh/kurzy-devizoveho-trhu/kurzy-devizoveho-trhu/prumerne_mena.html?mena=EUR
- [30] „Ceník IndexPower od E.ON Energie", E.ON. Viděno: 17. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.eon.cz/getmedia/c9425bd3-f2ef-4533-8b0b-7f2d5fe4e4a0/EON_Cenik_IndexPower_01_01_2024.pdf?last-modified=638351172197783576&ext=.pdf
- [31] „206/2010 Sb. Sdělení Českého statistického úřadu o zavedení Klasifikace zaměstnání (CZ-ISCO)", Zákony pro lidi. Viděno: 16. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2010-206/zneni-20180101>
- [32] „Katalog povolání - pomocní a nekvalifikovaní pracovníci", Národní soustava povolání. Viděno: 16. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://nsp.cz/isco/pomocni-a-nekvalifikovani-pracovnici>
- [33] „Skupiny prací", Ministerstvo práce a sociálních věcí. Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://ppropo.mpsv.cz/narizeni_vlady_567_2006
- [34] „Minimální mzda", Ministerstvo práce a sociálních věcí. Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.mpsv.cz/minimalni-mzda>
- [35] „Průměrné mzdy 2020 podle odvětví", Český statistický úřad. [Online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/11350/122733562/pmz030821_2.xlsx/46fec02-f680-4033-866b-687e3f20ce11?version=1.0
- [36] „Průměrné mzdy 2023 podle odvětví", Český statistický úřad. [Online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/11350/190537026/pmz030524_2.xlsx/4101f9f6-2cab-45b4-9bea-a6f7b40b6629?version=1.0
- [37] „Výroční zpráva firmy Rohde&Schwarz", Veřejný rejstřík a Sběrka listin. Viděno: 19. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://or.justice.cz/ias/ui/vypis-sl-firma?subjektId=68827>

Seznam obrázků

Obr. 1: Intermetalická vrstva (vlastní)	17
Obr. 2: Interakce primárního elektronu s atomem prvku (překresleno podle [14]).....	20
Obr. 3: Výběr analyzovaných vývodů (vlastní)	24
Obr. 4: Povrch vývodu referenčního vzorku (vlastní)	24
Obr. 5: Spektrum referenčního vzorku (vlastní)	24
Obr. 6: Závislost koncentrace olova na době máčení (vlastní).....	26
Obr. 7: Analyzátor DELTA (vlastní)	27
Obr. 8: Analyzovaná oblast (vlastní).....	27
Obr. 9: Výbrus vzorku máčeného 10 sekund (vlastní).....	28
Obr. 10: IMC na rozhraní vývod-pájka (vlastní).....	28
Obr. 11: Pájecí lázeň QUICK 100-4C (převzato z [17])	30
Obr. 12: Základní vybavení pro přecínování (vlastní).....	31
Obr. 13: Odstranění vrstvy oxidů (vlastní).....	31
Obr. 14: Očištění vývodů v tavidle (vlastní).....	31
Obr. 15: Přecínování (vlastní)	31
Obr. 16: Zastoupení nákladů v kalkulaci při přecínování 1 000 součástek (vlastní).....	42
Obr. 17: Grafická metoda určení bodu zvratu pro REF 01 (vlastní).....	45

Seznam tabulek

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti mědi, cínu a jejich IMC (upraveno podle [12])	17
Tab. 2: Seznam připravených vzorků (vlastní)	23
Tab. 3: Cena REF 01 v závislosti na zakoupeném množství dle [19].....	33
Tab. 4: Vývoj mezd v elektrotechnice (zpracováno dle [32], [35], [36])	37
Tab. 5: Parametry kalkulace (vlastní)	38
Tab. 6: Kalkulace na přecínování jedné součástky při 1 000 ks (vlastní).....	41
Tab. 7 Náklady na přecínování jedné součástky pro vybrané počty součástek (vlastní)	41
Tab. 8: Citlivostní analýza na změnu mzdy a ceny pájecí slitiny (vlastní).....	43
Tab. 9: Citlivostní analýza na změnu zmetkovitosti (vlastní).....	44
Tab. 10: Vyčíslení úspor/ztrát při procesu přecínování (vlastní).....	44

Přílohy

A. Tabulky naměřených hodnot

Zastoupení prvků na povrchu vývodu referenčního vzorku [hm. %]			
Sn	FIT	Pb	FIT
71,53	1,00	28,47	1,00
70,10	1,00	29,90	1,00
74,57	1,00	25,43	1,00
71,91	0,99	28,09	0,98
72,21	0,99	27,79	0,97
75,48	1,00	24,52	0,97
74,89	0,99	25,11	0,97
průměr [hm. %]		průměr [hm. %]	
72,96		27,04	

Tab. A1: Zastoupení prvků na povrchu vývodu referenčního vzorku

Zastoupení prvků na povrchu vývodu vzorku máčeného v SAC 305 po dobu 0,5 s [hm. %]							
Sn	FIT	Pb	FIT	Ag	FIT	Cu	FIT
90,81	1,00	5,59	0,96	2,76	0,96	0,85	0,82
90,99	1,00	5,03	0,95	2,99	0,96	0,99	0,84
92,36	1,00	4,63	0,95	2,71	0,95	0,30	0,44
96,81	1,00	1,07	0,78	1,68	0,92	0,44	0,60
90,50	1,00	6,35	0,96	2,77	0,95	0,39	0,52
96,27	1,00	0,78	0,68	2,15	0,94	0,80	0,78
88,95	1,00	6,18	0,96	4,06	0,97	0,81	0,81
94,20	1,00	1,53	0,85	3,27	0,96	1,00	0,82
93,42	1,00	2,86	0,92	3,01	0,96	0,71	0,75
95,49	1,00	1,85	0,87	2,38	0,95	0,28	0,35
92,69	1,00	3,29	0,92	3,22	0,96	0,80	0,77
84,90	1,00	11,97	0,98	3,13	0,96	0,00	1,00
93,37	1,00	2,80	0,91	2,58	0,95	1,25	0,84
90,56	1,00	6,01	0,95	2,21	0,94	1,23	0,84
93,87	1,00	3,33	0,92	2,81	0,95	0,00	1,00
91,08	1,00	5,05	0,95	2,93	0,95	0,94	0,81
95,86	1,00	2,27	0,88	1,87	0,92	0,00	1,00
94,03	1,00	2,79	0,91	2,53	0,94	0,65	0,70
96,96	1,00	1,24	0,79	1,80	0,92	0,00	1,00
95,20	1,00	1,09	0,77	2,84	0,95	0,88	0,79
91,56	1,00	5,05	0,94	2,70	0,94	0,70	0,68
88,05	1,00	6,43	0,96	4,46	0,97	1,06	0,82
průměr všech naměřených hodnot [hm. %]							
92,63		3,96		2,77		0,64	
průměr naměřených hodnot pro FIT ≥ 0,85 [hm. %]							
92,63		4,61		2,77		0,68	

Tab. A2: Zastoupení prvků na povrchu vzorku máčeného 0,5 s

Zastoupení prvků na povrchu vývodu vzorku máčeného v SAC 305 po dobu 5 s [hm. %]							
Sn	FIT	Pb	FIT	Ag	FIT	Cu	FIT
96,54	1,00	0,22	0,03	3,25	0,96	0,00	1,00
96,32	1,00	0,00	1,00	3,68	0,96	0,00	1,00
96,20	1,00	0,00	1,00	3,61	0,96	0,92	0,61
95,01	1,00	0,00	1,00	4,24	0,97	0,75	0,76
94,72	1,00	0,00	1,00	4,36	0,97	0,92	0,79
95,77	1,00	0,00	1,00	3,50	0,96	0,73	0,79
93,85	1,00	0,00	1,00	4,66	0,97	1,49	0,89
87,14	1,00	7,94	0,97	4,01	0,97	0,91	0,83
94,35	1,00	0,00	1,00	4,29	0,97	1,36	0,87
průměr všech naměřených hodnot [hm. %]							
94,43		0,91		3,96		0,79	
průměr naměřených hodnot pro FIT ≥ 0,85 [hm. %]							
94,43		0,99		3,96		0,71	

Tab. A3: Zastoupení prvků na povrchu vzorku máčeného 5 s

Zastoupení prvků na povrchu vývodu vzorku máčeného v SAC 305 po dobu 10 s [hm. %]							
Sn	FIT	Pb	FIT	Ag	FIT	Cu	FIT
92,66	1,00	0,69	0,70	5,22	0,97	1,43	0,87
94,39	1,00	0,00	1,00	4,69	0,97	0,92	0,80
94,63	1,00	0,25	0,20	4,54	0,97	0,58	0,69
95,70	1,00	0,00	1,00	3,16	0,96	1,14	0,83
93,84	1,00	1,02	0,76	4,01	0,96	1,12	0,82
95,97	1,00	0,00	1,00	4,03	0,96	0,00	1,00
94,55	1,00	1,05	0,75	3,22	0,96	1,18	0,88
94,31	1,00	0,00	1,00	3,93	0,97	1,77	0,85
95,55	1,00	0,00	1,00	4,20	0,95	0,25	0,70
96,29	1,00	0,00	1,00	3,23	0,95	0,47	0,57
95,99	1,00	0,00	1,00	4,01	0,96	0,00	1,00
93,37	1,00	1,40	0,83	5,12	0,97	0,72	0,50
95,59	1,00	0,00	1,00	3,66	0,95	0,75	0,70
95,28	1,00	0,00	1,00	3,78	0,96	0,94	0,77
93,99	1,00	1,07	0,76	4,31	0,96	0,62	0,66
97,86	1,00	0,00	1,00	2,14	0,92	0,00	1,00
95,39	1,00	0,00	1,00	4,19	0,96	0,41	0,48
94,90	1,00	0,00	1,00	4,45	0,97	0,65	0,69
95,07	1,00	0,00	1,00	3,90	0,96	1,02	0,80
96,55	1,00	0,00	1,00	2,97	0,95	0,48	0,60
95,92	1,00	0,00	1,00	3,48	0,96	0,60	0,66
95,76	1,00	0,00	1,00	3,73	0,96	0,51	0,61
93,76	1,00	0,82	0,70	4,58	0,97	0,84	0,76
93,84	1,00	0,62	0,62	4,36	0,97	1,17	0,83
95,17	1,00	0,00	1,00	4,12	0,96	0,71	0,69
93,39	1,00	2,30	0,87	3,32	0,95	0,98	0,79
93,71	1,00	0,70	0,63	4,81	0,97	0,79	0,73
96,31	1,00	0,00	1,00	3,17	0,95	0,52	0,62
95,00	1,00	0,00	1,00	4,21	0,96	0,79	0,73
95,94	1,00	0,00	1,00	3,01	0,95	1,05	0,81
96,94	1,00	0,00	1,00	3,06	0,96	0,00	1,00
91,78	1,00	0,44	0,45	3,92	0,96	0,87	0,78
průměr všech naměřených hodnot [hm. %]							
94,98		0,32		3,89		0,73	
průměr naměřených hodnot pro FIT ≥ 0,85 [hm. %]							
94,98		0,10		3,89		0,63	

Tab. A4: Zastoupení prvků na povrchu vzorku máčeného 10 s

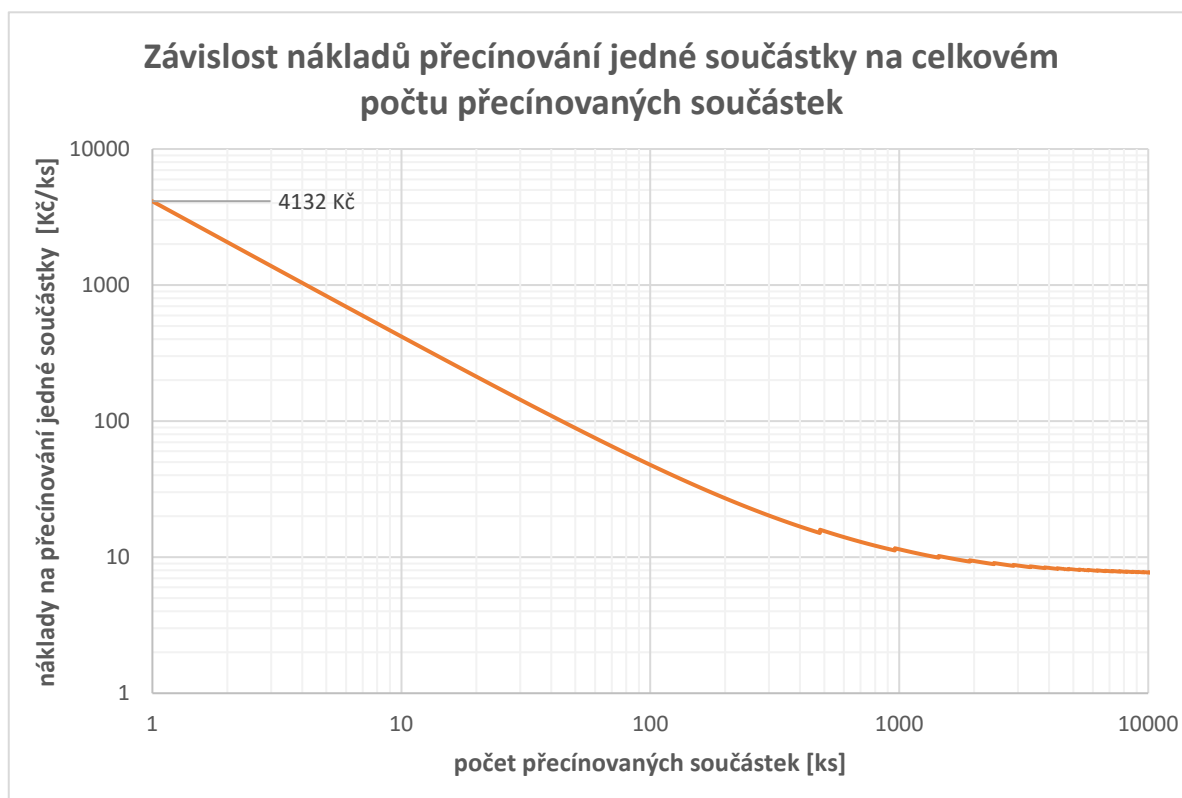
Zastoupení prvků ve výbrusu vývodu vzorku máčeného v SAC 305 po dobu 10 s [hm. %]							
Sn	FIT	Pb	FIT	Ag	FIT	Cu	FIT
99,50	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,93	0,59
95,03	1,00	0,00	1,00	3,71	0,96	1,25	0,83
94,37	1,00	0,00	1,00	2,81	0,96	2,81	0,93
93,94	1,00	0,00	1,00	3,20	0,96	2,86	0,92
93,30	0,99	0,00	1,00	3,54	0,96	3,16	0,93
87,21	1,00	0,00	1,00	3,63	0,96	9,39	0,97
86,16	1,00	0,00	1,00	1,43	0,90	12,41	0,97
75,64	1,00	0,00	1,00	2,74	0,95	21,62	0,98
75,18	1,00	0,00	1,00	6,61	0,98	18,20	0,98
73,53	1,00	0,00	1,00	25,31	0,99	1,16	0,83
64,81	1,00	0,00	1,00	1,57	0,92	33,62	0,99
48,44	0,99	0,00	1,00	1,31	0,91	50,25	0,99
45,64	1,00	0,00	1,00	1,26	0,90	53,10	0,99

Tab. A5: Zastoupení prvků ve výbrusu vývodu vzorku máčeného 10 s

	doba máčení v SAC 305 [s]			
	0 (referenční)	0,5	5	10
průměrná koncentrace Pb na povrchu vývodů [hm.%]	27,04	4,61	0,99	0,10
pokles koncentrace Pb vůči referenčnímu vzorku [%]	-	82,95	96,33	99,61
pokles koncentrace Pb vůči referenčnímu vzorku [p.b.]	-	22,43	26,05	26,94
pokles koncentrace Pb vůči vzorku máčenému 0,5 s [%]	-	-	78,48	97,73
pokles koncentrace Pb vůči vzorku máčenému 0,5 s [p.b.]	-	-	3,62	4,51
pokles koncentrace Pb vůči vzorku máčenému 5 s [%]	-	-	-	89,47
pokles koncentrace Pb vůči vzorku máčenému 5 s [p.b.]	-	-	-	0,89

Tab. A6: Koncentrace olova na povrchu vývodů v závislosti na době máčení

B. Grafy



Obr. B1: Závislost nákladů přecínování jedné součástky na celkovém počtu přecínovaných součástek