



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD

MECHANICKÉ VLASTNOSTI SPÁJKOVANÝCH SPOJOV

MECHANICAL PROPERTIES OF SOLDER JOINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ŠTUDIJNÍ PROGRAM: ELEKTROTECHNIKA, ENERGETIKA A MANAGEMENT

ŠTUDIJNÍ OBOR: ELEKTROTECHNIKA A MANAGEMENT

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Petr Veselý

ROMAN MARKO

PRAHA, 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marko** Jméno: **Roman** Osobní číslo: **465839**
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:

Mechanické vlastnosti pájených spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical properties of solder joints

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na tematiku pájení přetavením, metody a kritéria hodnocení kvality pájených spojů.
2. Navrhněte a proveďte experiment, který prověří mechanické vlastnosti pájených spojů různých slitin. Proveďte zkoušku stříhem a zkoušku tvrdosti.
3. Vyhodnoťte provedené zkoušky, srovnajte různé pájecí pasty a jejich intermetalické sloučeniny na rozhraní pájeného spoje.
4. Proveďte ekonomickou studii a porovnání použití různých pájecích slitin.

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.06.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2021**

Ing. Petr Veselý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne _____

Roman Marko

Pod'akovanie

Chcem sa poďakovať predovšetkým pánu Ing. Petrovi Veselému za vynaloženú trpezlivosť, odborné rady a aktívny prístup. Vrelá vďaka patrí aj pani Ing. Michaele Makešovej, ktorá tiež ochotne poskytla svoju pomoc. Okrem toho vďačím aj svojej rodine a blízkym za prejavenu podporu v doterajšom štúdiu.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá mechanickými vlastnosťami spájkovaných spojov. V prvej časti je v teoretickej rovine rozobraná problematika spájkovania. Je tu popísaný výrobný proces DPS, jej časté povrchové úpravy, zliatinové systémy spájok a metódy pretavenia. Po opise rôznych diagnostických metód výsledných spojov nasleduje praktická časť, v ktorej sú testované kombinácie viacerých spájok a povrchových úprav. Posledná časť rozoberá ekonomickú výhodnosť investičných projektov, ktoré su založené na jednotlivých kombináciach popísaných v predošlých častiach práce.

Kľúčové slová

spájkovanie, spájkovacia pasta, povrchová úprava DPS, intermetalická vrstva, testy mechanických vlastností, výrobné náklady

Abstract

The bachelor thesis deals with the mechanical properties of soldered joints. In the first part, the issue of soldering is discussed in theoretical terms. This section describes the production process of PCB, its frequent surface treatments, alloy solder systems and reflow methods. The description of various diagnostic methods of the resulting joints is followed by a practical part in which combinations of several solders and surface treatments are tested. The last part discusses the economic advantage of investment projects, which are based on individual combinations described in the previous sections.

Keywords

soldering, solder paste, PCB surface treatment, intermetallic layer, tests of mechanical properties, production cost

Obsah

ZOZNAM TABULIEK	viii
ZOZNAM OBRÁZKOV	viii
ÚVOD	1
1 SPÁJKOVANIE AKO TECHNOLOGIA	2
1.1 Doska plošného spoja (DPS)	2
1.2 Povrchová úprava DPS	4
1.2.1 Imerzný cín	4
1.2.2 ENIG/ENEPIG	5
1.2.3 HASL	6
1.2.4 OSP	7
1.3 Spájka	7
1.3.1 Olovnaté a bezolovnaté spájkovacie zliatiny	8
1.3.2 Spájkovacia pasta	9
1.3.3 Nanášanie pasty	10
1.4 Tavidlo	13
1.5 Metódy pretavenia spájky (spájkovanie REFLOW)	13
1.5.1 Spájkovanie v teplovzdušnej peci	14
1.5.2 Spájkovanie infračerveným žiaričom	14
1.5.3 Spájkovanie laserom	15
1.5.4 Spájkovanie v parách	15
1.6 Intermetalické zlúčeniny (IMC - InterMetallic Compound)	16
1.7 Diagnostika spájkovaných spojov	18
1.7.1 Skúška strihom (shear test)	18
1.7.2 Skúška studeným ťahom	19
1.7.3 Skúška horúcim ťahom	20
1.7.4 Skúška cyklickým ohýbaním DPS	20
1.7.5 Vickersova skúška tvrdosti	21
1.7.6 Brinellova skúška tvrdosti	22
1.7.7 Rockwellova skúška tvrdosti	23

1.7.8	Elektrónová mikroskopia	24
2	POPIS EXPERIMENTU	27
2.1	Tvorba testovacích vzoriek	27
2.2	Použité spájky	29
2.2.1	Spájka M705-GRN360-K2-V	29
2.2.2	Spájka NC257-2 SAC305	29
2.2.3	Spájka OZ63-330F-40-10	29
2.3	Tvorba metalografického výbrusu	30
2.4	Overenie výpovednej hodnoty nameraných hodnôt	31
3	VÝSLEDOK EXPERIMENTU	32
3.1	Skúška strihom (shear test)	32
3.2	Vickersova skúška tvrdosti	36
4	FINANČNÁ ANALÝZA	43
4.1	Metódy hodnotenia investícií	43
4.1.1	NPV (Net Present Value)	43
4.1.2	IRR (Internal Rate of Return)	44
4.1.3	RCF (Ročný ekvivalentný peňažný tok)	45
4.2	Zhodnotenie vlastných projektov	46
4.2.1	Popis simulácie výroby	46
4.2.2	Výsledok zhodnotenia projektov	49
	ZÁVER	55
	POUŽITÁ LITERATÚRA	56

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 - binárne eutektické systémy bezolovnatých zliatin spájok [12]	8
Tabuľka 2 - špecifiká spájky M705-GRN360-K2-V	29
Tabuľka 3 - špecifiká spájky NC257-2 SAC305	29
Tabuľka 4 - špecifiká spájky OZ60-330F-40-10	29
Tabuľka 5 - maximálne hodnoty síl.....	33
Tabuľka 6 – p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky	35
Tabuľka 7 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty.....	35
Tabuľka 8 - tvrdosti spájok	38
Tabuľka 9 - p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky	39
Tabuľka 10 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty.....	39
Tabuľka 11 - namerané uhlopriečky vpichov pri IMC	40
Tabuľka 12 - vypočítané hodnoty tvrdosti pri IMC	41
Tabuľka 13 - p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky.....	42
Tabuľka 14 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty.....	42
Tabuľka 15 - náklady na počiatočnú investíciu	46
Tabuľka 16 - náklad na spájkovacie pasty	48
Tabuľka 17 - náklad na spájkku vo forme drôtu.....	48
Tabuľka 18 - prehľad NPV, RCF a jednotkových cien na dosku pre každý projekt	49
Tabuľka 19 - výpočet ročných peňažných tokov za životnosť projektu (Sn99,3Cu0,7 + HASL).....	50

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 - tvorba FR4 [4]	3
Obrázok 2 - imerzné pokovenie cínom [5]	5
Obrázok 3 - imerzné pokovenie zlatom [5].....	6
Obrázok 4 - ideálny prípad úpravy HASL [7]	6
Obrázok 5 - nanášanie pasty cez sieťku [14]	12
Obrázok 6 - spájkovanie infračerveným žiaričom [16, p. 5].....	15
Obrázok 7 - spájkovanie v parách [16, p. 9]	16
Obrázok 8 - intermetalická zlúčenina (IMC) [2, p. 49].....	17
Obrázok 9 - skutočný snímok intermetalickej zlúčeniny [19].....	17
Obrázok 10 - trhačka	18

Obrázok 11 - typy narušenia spoju	19
Obrázok 12 - skúška studeným ťahom [2, p. 113]	20
Obrázok 13 - skúška horúcim ťahom [2, p. 114]	20
Obrázok 14 - skúška cyklickým ohýbaním DPS [2, p. 115]	21
Obrázok 15 - EMCO-TEST DuraScan G5	21
Obrázok 16 - geometria skúšky tvrdosti podľa Vickersa [21]	22
Obrázok 17 - geometria Brinellovej skúšky tvrdosti [20]	23
Obrázok 18 - geometria Rockwellovej skúšky tvrdosti [20]	24
Obrázok 19 – porovnanie princípu svetelného a elektrónových mikroskopov [22]	25
Obrázok 20 - doska plošných spojov	27
Obrázok 21 - SMT manipulátor	28
Obrázok 22 - pretavovacia pec [24]	29
Obrázok 23 - metalografický výbrus	30
Obrázok 24 - grafy časových priebehov síl pre spájky	32
Obrázok 25 - boxplot dát z testu strihom	34
Obrázok 26 - spájka Sn99.3Cu0.7	36
Obrázok 27 - spájka Sn96.5Ag3Cu0.5	37
Obrázok 28 - spájka Sn63Pb37	37
Obrázok 29 - boxplot dát tvrdosti spájok	38
Obrázok 30 - nameraná IMC pre Sn99,7Cu0,3	41
Obrázok 31 - boxplot dát tvrdosti IMC	42
Obrázok 32 - graf čistej súčasnej hodnoty [7, p. 33]	43
Obrázok 33 - vnútorné výnosové percento [7, p. 40]	44
Obrázok 34 - vzájomne sa vylučujúce investičné projekty [7, p. 41]	45
Obrázok 35 - Arduino Uno REV3 [29]	47
Obrázok 36 - vývoj peňažných tokov v čase	51
Obrázok 37 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene ceny energie	53
Obrázok 38 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene ceny spájok	53
Obrázok 39 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene mzdy	54

ÚVOD

Spájkovanie je neodmysliteľnou súčasťou elektrotechnického priemyslu. Od svojho vzniku až do dnešného dňa prešlo nespočetným množstvom zmien. Tento vývoj zaznamenal vývoj mnohých technológií spájkovania a aj materiálov, ktoré sa pri ňom využívajú. V značnej miere bol ovplyvnený zákazom používania olova, pre jeho škodlivý vplyv na zdravie človeka a životného prostredia. Olovo tvorilo veľký podiel najbežnejšie používanej spájky, ktorá mala unikátne postavenie medzi ostatnými pre jej pomerne nízku teplotu pretavenia a výborné mechanické vlastnosti. Preto bol po uplatnení direktívy EU o zákaze používania toxických látok vo výrobe nasledovný výskum nových kovových zmesí pre spájkovanie nevyhnutný.

Výslednú kvalitu spoju ovplyvňuje mnoho faktorov. Po elektrickej vodivosti výsledného spoju sú pre jeho aplikáciu v praxi veľmi dôležité aj jeho mechanické vlastnosti. Vo veľkej miere diktujú jeho celkovú spoľahlivosť. Preto sa budem v mojej práci venovať skúmaniu spájkovaných spojov z tohto pohľadu.

V experimentálnej časti porovnam mechanické vlastnosti nielen modernejších bezolovnatých spájok, ale do testovacej skupiny zahrniem aj typickú olovnatú spájku. Tieto spájky budú aplikované na rôzne povrchové úpravy DPS a následne testované mechanickými skúškami. Okrem toho sa moja práca bude zaoberať aj testovaním intermetalických vrstiev. Ide o vrstvy, ktoré sa vyskytujú pri každom vytvorenom spájkovanom spoji.

V poslednej časti práce budem rozoberať ekonomickú výhodnosť dvojíc konkrétnych spájok a povrchových úprav. Vytvorím model výroby, pri ktorom odhadnem celkové náklady. Pomocou rôznych metód hodnotenia investícií tieto náklady vyhodnotím a stanovím jednotkovú cenu výsledného produktu.

1 SPÁJKOVANIE AKO TECHNOLOGIA

Myšlienka vytvárania spojov kovmi ako sú olovo a cín je prastará, siaha do minulosti niekoľko tisícročí pred naším letopočtom. Nezachovalo sa však veľa archeologických dôkazov, lebo oba kovy ľahko skorodujú dlhotrvajúcim vplyvom vlhkosti. V dávnej mezopotámskej civilizácii sa používalo olovo na spájanie medených objektov, najmä kvôli svojej nízkej teplote tavenia a hojného výskytu v danej oblasti. Kelti a galovia ako prví začali využívať cín, čoho prirodzeným dôsledkom bolo vynájdenie zliatin pozostávajúcich z olova a cínu. Tieto zliatiny boli takisto používané na spájanie objektov z medi, alebo jej zliatin. Rimania zase využili znalosti o týchto zliatinách na výstavbu akvaduktov. Počas priemyselnej revolúcie v 19. storočí sa technológia spájkovania rozšírila do mnohých aplikácií, predovšetkým z dôvodu vynájdenia prenosných zdrojov tepla, ktoré ju umožnili vykonávať [1].

Spájkovanie je technologický proces, pri ktorom vzniká metalurgický spoj kovových alebo pokovených súčiastok za prítomnosti tekutej spájky. Jeho účelom je nielen vytvoriť vodivú cestu pre elektrický prúd, ale aj zaručiť mechanickú odolnosť spoja proti vonkajším vplyvom prostredia. Podľa teploty tavenia spájky rozdeľujeme spájkovanie na mäkké, do približne 450°C a tvrdé, od približne 450°C. Najtypickejšou spájkou používanou v minulosti pre mäkké spájkovanie a v určitých aplikáciách aj dnes je zliatina olova a cínu. Zliatiny obsahujúce olovo majú v porovnaní s bezolovnatými lepšie či už mechanické, alebo elektrické vlastnosti. Z dôvodu negatívneho vplyvu olova na zdravie ľudí a životné prostredie bolo nutné zahájiť výskum v oblasti hľadania alternatívnych materiálov pre výrobu spájok [2].

Vlastnosti výsledného spoja určujúce jeho kvalitu sú zapríčinené súhrou použitej spájky a tavidla, kontaktnými ploškami doskového plošného spoja a súčiastiek a aj samotným procesom spájkovania [2].

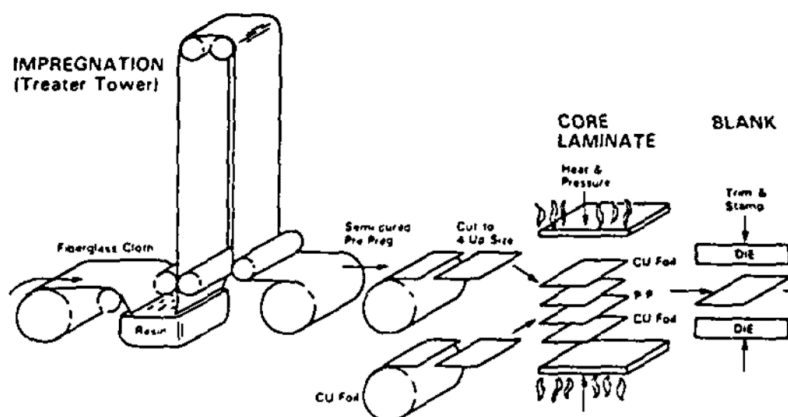
1.1 Doska plošného spoja (DPS)

Približne do roku 1950 boli elektrické obvody vytvárané pomocou káblového prepojenia jednotlivých komponentov. Takto spojené súčiastky sa pripevnili na dosku alebo iný podklad, ktorý spĺňal jedinou úlohu a to mechanickú. Technológia však bola náročná časovo aj finančne. Preto bola vyvinutá nová technológia, ktorej výstupom sú dosky plošných spojov, alebo len

skrátene DPS. Samotná doska neplní už len mechanickú úlohu upevnenia komponentov vrámci jedného celku, ale zároveň medzi nimi zabezpečuje elektricky vodivé spojenie. Vďaka tomuto je technológia časovo menej náročná, lacnejšia a aj výrazne spoľahlivejšia v porovnaní so svojim predchodcom [3].

Samotná DPS pozostáva z viacerých vrstiev. Nevodivú vrstvu tvorí materiál nazývaný FR4, ktorý tvorí jadro dosiek. Je to sklenená tkanina, ktorá sa impregnuje epoxidovou živicom a následne sa suší, aby sa nelepila a dalo sa s ňou pracovať v ďalších krokoch výroby. Vodivou zložkou je tenká vrstva medi. Najprv sa medzi dva pláty FR4 vloží Pre-Preg, plát nevytvrdenej živice. Následne sa na vrstvy aplikuje vysoký tlak a teplota, čím sa spoja do jedného celku. Med' sa pridáva z vrchnej aj spodnej strany, takáto DPS sa nazýva dvojvrstvový plošný spoj. Bežne sa vyrábajú a používajú v praxi aj viacvrstvé plošné spoje, pričom sa vždy len pridá z oboch strán ďalšia vrstva FR4 pokrytého vrstvou medi a opäť dôjde ku lisovaniu za tepla. Vodivá cesta medzi jednotlivými vrstvami medi je sprostredkovaná dierami nazývanými vias, ktorých priemer je rádovo v desiatkach μm [4].

V nasledujúcom kroku s z medeného povrchu odstránia nečistoty a nanesie sa naň fotorezist. Je to druh polyméru, ktorý mení svoju štruktúru po jeho vystavení svetlu. Žiadaný vodivý motív sa dosiahne využitím práve tejto vlastnosti v kombinácii s vhodnou maskou, ktorá umožní ožiarenie iba na požadovaných miestach. Fotorezist chránený maskou sa zmyje vývojkou a rovnaké miesta na doske sa zbavia medi nepokrytej fotorezistom leptaním. Posledným krokom je očistenie dosky od zvyšného fotorezistu, ktorý teraz pokrýva už len chcený vodivý motív. Na toto zvyčajne slúži prúd horúcej vody obsahujúcej malé množstvo etanolu [4].



Obrázok 1 - tvorba FR4 [4]

1.2 Povrchová úprava DPS

Najčastejšie používaným materiálom vodivých ciest medzi súčiastkami na doske plošných spojov je meď. Okrem veľkej výhody, ktorou je jej výborná elektrická vodivosť, so sebou prináša aj nevýhody. Významnou z nich je korózia, zapríčinená chemickou reakciou medi s kyslíkom. Po určitom čase môžeme pozorovať na medi tvoriacu sa vrstvu oxidu nazývanú patina. Jej farba vplyvom času prechádza z hnedej až do svetlo zelenej. Patina má negatívny dopad na spájkovateľnosť povrchu a preto boli vyvinuté technológie, ktoré túto negatívnu vlastnosť medi ošetrujú [5].

Nezanedbateľnou vlastnosťou spájkovaného povrchu je spájkovateľnosť. „*Spájkovateľnosť je schopnosť kovového povrchu byť rýchlo, rovnomerne a v danom čase na celej ploche zmáčaný spájkou*“ [2, p. 15]. Medzi dôležité faktory ovplyvňujúce spájkovateľnosť patrí jeho chemické zloženie, čistota a geometria spájkovaných povrchov [2].

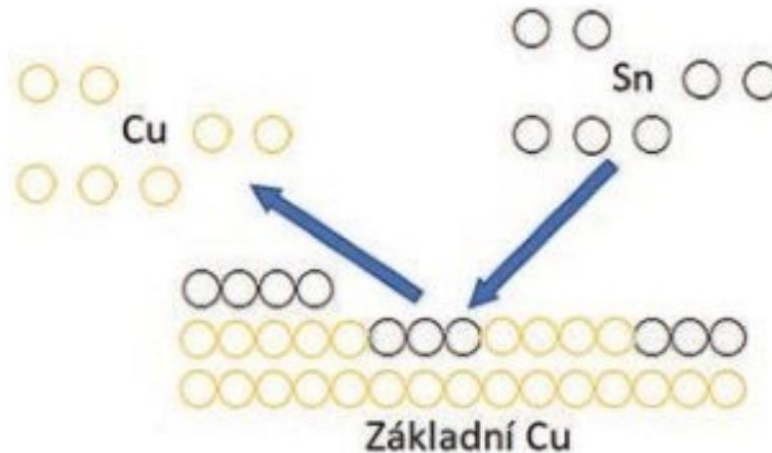
Vzhľadom na to, že povrchová úprava nám bude tvoriť spoj medzi doskou a spájkou, na ktorej už bude položená samotná súčiastka, je nutné starostlivo naplánovať výber povrchovej úpravy. Medzi dôležité kritéria patrí napríklad doba skladovania, olovnaté alebo bezolovnaté spájkovanie, konečné prostredie produktu a v neposlednom rade aj samotná cena. V dnešnej dobe je výborná spájkovateľnosť povrchu považovaná za štandard, kvôli čomu sa stávajú povrchové úpravy v mnohých aplikáciách nevyhnutnosťou [5].

1.2.1 Imerzný cín

Medzi hlavné benefity tejto povrchovej úpravy patrí dobrá súhra s bezolovnatými spájkami a nízke finančné požiadavky. Naopak, je treba dávať pozor pri jej použití na tvorbu tenkých cínových výrastkov, ktoré zvyšujú riziko nastania skratu, nazvaných whiskery. Okrem toho už od procesu výroby dochádza ku pomalej tvorbe intermetallickej vrstvy na rozhraní medi a cínu. Preto je dôležité mať na pamäti dobu skladovateľnosti týchto produktov približne 12 mesiacov. Vrstva cínu by z tohto dôvodu mala mať hrúbku aspoň 1 μm . Rýchlosť nárastu intermetallickej vrstvy do značnej miery ovplyvňuje okrem času vlhkosť a teplota prostredia [5].

Pri tomto druhu bezprúdového pokovenia dochádza ku výmene atómov medi z dosky za atómy cínu. Výsledný povrch má striebristú farbu. Táto metóda je využiteľná aj pri práci s nevodivými látkami, lebo nevyžaduje prítomnosť elektrického poľa v žiadnom kroku výroby.

Výroba je realizovaná pomocou kúpelu, ktorý obsahuje thiomčovinu, kyselinu fluoboritú, chelátové činidlo, kyselinu chlorovodíkovú, chlorid cínatý a iné látky, ktoré zabezpečia požadovanú chemickú reakciu. Kúpel musí mať pre splnenie požadovaného účelu vyššiu teplotu ako izbovú. Chemická reakcia je ilustrovaná značne zjednodušené na obrázku nižšie [6].

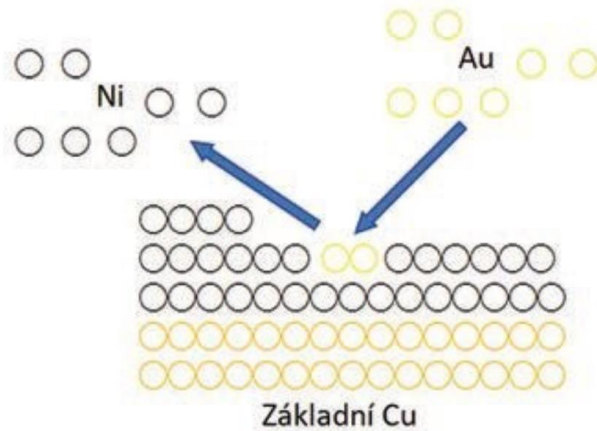


Obrázok 2 - imerzné pokovenie cínom [5]

1.2.2 ENIG/ENEPIG

Skratka pochádza z názvu *Electroless Nickel Immersion Gold* a *Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold*, teda jedná sa o dve rôzne technológie pokovenia zlatom. Motiváciou pre výber tejto metódy je opäť, dobrá kompatibilita s bezolovnatými spájkami a vysoká planarita. Zároveň je produkt odolný voči korózii a tvorbe intermetalických vrstiev. Na druhej strane je zase cenovo náročnejší [5].

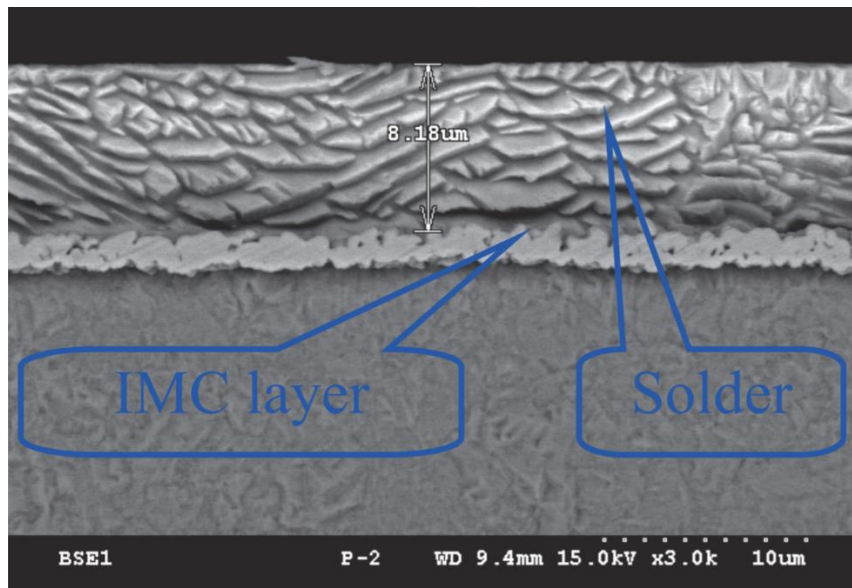
Na rozdiel od predošlej technológie sa najprv medený povrch leptá, čím sa pripraví na nanosenie vrstvy niklu. Po leptaní nasleduje katalyzačný kúpel, vďaka ktorému klesne hodnota aktivačnej energie meďi. Hrúbka vrstvy niklu sa pohybuje zvyčajne pohybuje medzi 3 a 6 μm . Až do neho sa následne imerzne vloží zlato, ktorého hrúbka je už výrazne menšia, pohybuje sa v stotinách μm . ENEPIG sa od ENIG líši imerzným paládiovým kúpelom pred samotným imerzným zlatým kúpelom. Medzivrstva paládia zaručí súvislé pokrytie niklu a tým zabráni jeho korózii [5].



Obrázok 3 - imerzné pokovenie zlatom [5]

1.2.3 HASL

Táto metóda úpravy povrchu DPS je jedna z najpoužívanějších v praxi za posledných niekoľko dekád. Proces HASL (hot air solder level) začína čistením povrchu DPS od oxidov a iných neželaných látok, pomocou tekutého tavidla rozpustného vo vode. Po tavidlovej sprche/kúpeli nasleduje ponor do roztavenej spájky. Tá môže pozostávať z cínu, prípadne cínu s prímiesou olova. DPS sa nechá ponorená po dobu niekoľkých sekúnd. Počas tohto kúpela sa vyformuje medzi vrstvou meďi a tekutou spájkou intermetalická vrstva, ktorá ich drží pohromade. Prebytočná spájka sa odstraňuje z povrchu DPS prudkým prúdom horúceho vzduchu. Následne sa nechá DPS vychladnúť a v poslednom kroku sa teplou vodou odstraňujú zvyšky tavidla [7].



Obrázok 4 - ideálny prípad úpravy HASL [7]

Hlavnou výhodou HASL boli nízke náklady na výrobu. Dnes sa už ale viac oplatí OSP (pozri nasledujúcu kapitolu). Medzi nevýhody patrí napríklad častý problém s planaritou, teda rovinatosťou vrstvy spájky nachádzajúcej sa na intermetallickej vrstve. Vrstva spájky zvyčajne nadobúda hrúbku v jednotkách až desiatkach μm . Na obrázku vyššie je ukážka úpravy HASL s vydarenou planaritou. Ďalším problémom býva slabá zmáčavosť medzi vrstvou medi a spájky, čo môže vyústiť až do nepokrytia celej plochy medi dostatočným množstvom spájky. Z tohto dôvodu vznikajú odhalené plochy intermetallickej vrstvy, ktoré budú oxidovať. Takisto situáciu komplikuje riziko vzniku trhlin v intermetallickej vrstve v dôsledku prílišného tepelného namáhania. Metóda sa neodporúča pri doskách s vysokou hustotou osadenia súčiastok, hrozí vytvorenie nechceného vodivého spojenia medzi dvoma kontaktami [7].

1.2.4 OSP

Technológia OSP (organic solder preservatives) sa líši od ostatných predovšetkým tým, že na povrch DPS nie je nanášaná žiadna ďalšia vrstva kovu. Namiesto toho sa na leptaný medený povrch chemicky nanášajú organické inhibítory. Tieto zamedzujú tvorbu oxidov na medi a zároveň ju chránia pred vlhkosťou prostredia a tepelným šokom. Hrúbka filmu sa pohybuje zhruba od 5 do 20 μm . Pred samotným spájkovaním je nutné ochranný film odstrániť pomocou tavidla. V prípade spájkovania rozdeleného do viacerých etáp treba mať na pamäti, aby po zmytí filmu tavidlom neboli časové úseky medzi jednotlivými etapami príliš dlhé. Mohlo by takto dôjsť ku znehodnoteniu povrchu medi oxidáciou [8], [9].

Výhoda technológie OSP oproti iným je nízka cena, vďaka absencii kovových zliatin pri výrobe. V porovnaní s HASL môže byť až o polovicu výhodnejšia. Okrem toho pri nej nedochádza ku tvorbe intermetalických vrstiev, ktoré by mohli spôsobiť krehkosť spoju. OSP je realizovaná pri izbovej teplote, takže nedochádza ku žiadnemu tepelnému namáhaniu DPS. Nevýhodou je kratšia odporúčaná doba skladovania. Povrchy ošetrené OSP sú náchylné na poškrabanie, takže je nevyhnutné s DPS manipulovať opatrne [8], [9].

1.3 Spájka

Materiály, z ktorých samotná spájka pozostáva, diktujú jej náchylnosť ku koróziám a oxidáciám, jej povrchové napätie v roztavenom stave a iné. Zmáčavosť a roztekavosť spájky v roztavenom stave závisí práve na jej povrchovom napätí. Okrem tohto majú na spájku vplyv aj rôzne nečistoty a oxidy, ktoré môžu napríklad zväčšiť jej povrchové napätie [2].

Spájka nadobúda viaceré formy, pričom každá je vhodná pre inú aplikáciu. Najviac sa používa ako pasta, prášok, páska alebo drôt. Pasta je vhodná napríklad pri spájkovaní pretavením, vo forme drôtu sa zase môže využiť pri ručnom spájkovaní [10].

Okrem formy spájky je dôležité rozlišovať aj spôsoby nanášania spájky na požadované miesto spoja. Spájka vo forme pasty sa zvyčajne nanáša pomocou sieťotlače, šablónotlače, injekčne alebo dávkovaním za použitia vysokého tlaku [2].

1.3.1 Olovnaté a bezolovnaté spájkovacie zliatiny

Olovnaté zliatiny spájok majú veľmi dlhú históriu siahajúcu až na počiatok nášho letopočtu. Jej bežné používanie v praxi vytrvalo až dodnes, práve vďaka bezkonkurenčným vlastnostiam pri práci s ňou a taktiež výsledných spájkovaných spojov. Vyznačuje sa nízkym bodom topenia, dobrou zmáčavosťou medi a jej zliatin, tvárnosťou, dostupnosťou a aj nízkou cenou. Vytvorený spoj má dobrú elektrickú vodivosť a aj mechanické vlastnosti. Najčastejšie používaná kompozícia pozostáva z 63% cínu a 37% olova, s teplotou topenia 183°C [11].

Až do dnešného dňa sa vynakladá úsilie na vynájdenie bezolovnatých zliatin pre spájkovanie, ktoré by sa vyrovnali vo všetkých ohľadoch tým olovnatým. Medzi najčastejšie problémy, ku ktorým dochádza pri práci s bezolovnatými zliatinami sú príliš vysoká teplota topenia, nedostupnosť prímiesových materiálov, nedostatočná zmáčavosť a zlé mechanické vlastnosti spojov. Vysoká teplota topenia môže spôsobiť poškodenie súčiastok ako kondenzátorov alebo iných. Nedostupnosť prímiesí zase zapríčiní vysokú cenu spájky, alebo v krajnom prípade úplné vylúčenie produkcie na celosvetovej škále. Nespôľahlivosť spojov z dôvodu ich krehkosti je takisto nežiadúci jav, na ktorý treba brať ohľad pri výbere spájky pre danú aplikáciu. Eutektikum je zliatina kovov, ktorej pomer zložiek má najnižšiu teplotu topenia zo všetkých možných pomerov. Tabuľka 1 obsahuje niektoré eutektické systémy bezolovnatých zliatin [11].

Systém	Eutektická teplota [°C]	Eutektická kompozícia
Sn–Cu	227	Sn–0.7Cu
Sn–Ag	221	Sn–3.5Ag
Sn–Au	217	Sn–10Au
Sn–Zn	199	Sn–9Zn
Sn–Bi	139	Sn–57Bi
Sn–In	120	Sn–51In

Tabuľka 1 - binárne eutektické systémy bezolovnatých zliatin spájok [12]

Vačšina zliatin neobsahujúcich olovo pozostáva najmenej zo 60% z cínu. Ostatné prvky pridávané do zliatin sú ušľachtilé kovy, ako napríklad zlato, striebro, meď alebo bizmut, zinok či indium. Každý zo spomenutých prímiesových prvkov sa prejaví vo výsledku inými vlastnosťami spájky a tým pádom sa spájky líšia aj v aplikácii [13].

Systémy Sn-Cu a Sn-Ag sú najvýznamnejšími zo systémov, lebo majú najlepšie vlastnosti, vďaka čomu sú najpoužívanejšími v praxi. Sb-Ag systém je dobre preskúmaný, eutektická teplota sa hýbe o niekoľko stupňov nižšie ako pri systéme Sn-Cu. Oba systémy majú vynikajúce mechanické vlastnosti. Využitie systému Sn-Cu vychádza lacnejšie ako Sn-Ag, je vhodný na spájkovanie vlnou. Meď v systéme Sn-Ag spôsobí zníženie eutektickej teploty približne o 4°C, čím sa stane touto vlastnosťou porovnateľným so systémom Sn-Au. Ten je však kvôli obsahu zlata výrazne drahší. Pridaním bizmutu do systému Sn-Ag vieme doceliť nielen zníženie eutektickej teploty, ale aj zlepšenie zmáčavosti. Obsah bizmutu by nemal prekročiť hranicu 3% hmotnosti spájky. Na druhej strane bizmut vykazuje zlú kompatibilitu s olovom, ktoré sa môže nachádzať v povrchovej úprave DPS. Vtedy výrazne znižuje spoľahlivosť výsledného spoja. Indium v tejto zlúčenine spôsobuje pri obsahu 16% a viac z celkovej hmotnosti čiastočné topenie spájky už pri teplote 113°C [11].

Pri využití bizmutu ako hlavného prímiesového prvku zliatiny dostávame systém Sn-Bi. Takáto kompozícia obsahuje napríklad až 57% bizmutu z celkovej váhy, výsledná zliatina sa roztopí už pri 139°C. Práve táto vlastnosť z nej robí ideálneho kandidáta pre aplikáciu, ktorá vyžaduje nízku teplotu spájkovania. V praxi sa používa viac ako 40 rokov. Aj tento systém vykazuje zníženú spoľahlivosť pri spojení s úpravou DPS obsahujúcou olovo [11].

1.3.2 Spájkovacia pasta

Pasta v sebe kombinuje zrníčka kovového prášku, tavidlá a ďalšie prvky, ktoré spolu tvoria homogénnu zmesku. Táto zmes je schopná jednoduchého roztierania po danom povrchu.

Kovový prášok má najväčší podiel na celkovom objeme pasty, čím je vyšší, tým ma vlastnosti podobnejšie olovnatej paste. Najčastejšie pozostáva z cínu, striebra a medi, pričom požadovaným tvarom zrníčok je guľa. Zároveň je dôležité, aby mali zrníčka použité vrávmi jednej pasty rovnakú veľkosť. Najčistejší spôsob výroby je pomocou elektrolytického vylučovania, ktorého nevýhodou je, že takto získané čiastočky nemajú požadovaný tvar. Inak sa

dá tento prášok produkovať mechanickým spracovaním pevného kovu, chemickou redukciou alebo rozprašovaním roztaveného kovu, v tomto prípade má výsledný tvar zrníčok najbližšie ku ideálnemu. Posledná zmienená technológia je zároveň aj najpoužívanejšou. Samotná veľkosť zrníčok je tiež veľmi dôležitým parametrom pasty. Závisí na nej typ prístroja, ktorý sa bude používať na nanosenie pasty a veľkosť motívu nanášaného na dosku plošného spoju. Veľkosť guličiek takisto ovplyvňuje aj samotnú výrobu, ak sú príliš malé, tak ich celkový povrch je väčší. Preto je potrebné aby sa vyrábali napríklad v prostredí s dusíkovou atmosférou, ktorá zredukuje tvorbu nechcených oxidov. Veľkosť guličiek sa pohybuje okolo 50 μ m [2].

Tavidlá (pozri ďalšiu kapitolu) zakomponované do pást su zvyčajne organického typu. Funkciou **ďalších prvkov**, ktoré sa pridávajú do pást je zaručenie viskozity a príľnavosti ku daným materiálom, s ktorými sa pracuje. Vďaka týmto vlastnostiam ostáva súčiastka, ktorú chceme prispájkovať na svojom mieste, až dokým sa pasta nepretaví a nevytvorí permanentný spoj s ploškou doskového plošného spoja. Tavidlo spolu s týmito prídavnými zložkami tvorí približne 11-13% celkovej hmotnosti pasty [2].

1.3.3 Nanášanie pasty

Optimálne nanosenie spájkovacej pasty je pre výslednú kvalitu spoja esenciálne. Pasta by sa mala nachádzať len na mieste, kde má ku spojeniu skutočne dôjsť. Kvalita tohto technologického kroku spájkovania je diktovaná výškou, plochou a z nich vychádzajúceho objemu depozitu, teda nanesej vrstvy pasty. Technologický pokrok vyvíja nátlak na kvalitu metód nanášania pást, lebo spájkované súčiastky sa neustále zmenšujú [2].

1.3.3.1 Nanášanie dispenzerom

Tento spôsob vyžaduje na realizáciu okrem spájkovacej pasty aj dávkovač, alebo inak dispenzer. Používa sa pri ručnom spájkovaní, napríklad pri opravách alebo výmenách určitých druhov súčiastiek na doskách plošných spojov. Najčastejšie princípy fungovania dispenzera sú popísané v texte nižšie [2].

Počas **tlakového nanášania s definovanou dobou** sa tlačí pasta cez otvor injekčnej striekačky po dopredu známu dobu. Otvor má fixný priemer a na piest injekčnej striekačky pôsobí

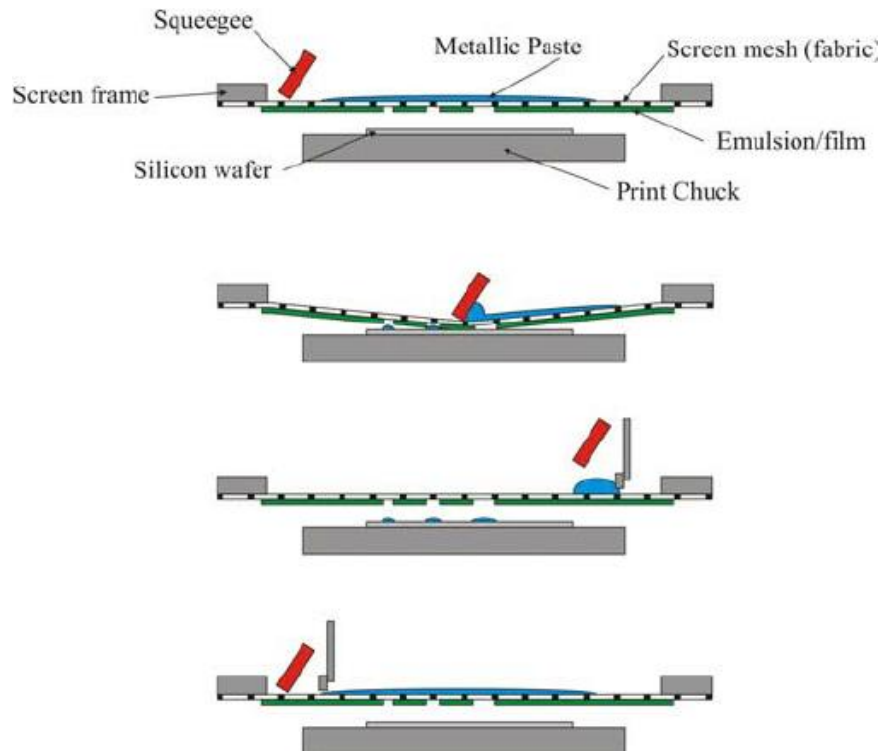
takisto konštantný tlak (zhruba v desatinách MPa). Pomocou týchto parametrov je možné pomerne presne určiť objem vytlačenej pasty pri jednej dávke [2].

Nanášanie dávkovačom s rotačnou pumpou býva aplikované pri práci s pastami, pri ktorých je nutné ich premiešavanie. Na pastu v zásobníku pôsobí konštantný tlak a posúva ju do hlavice. O premiešavanie sa stará vreteno umiestnené v tele hlavice. Pri vykonávaní rotačného pohybu vretena je pasta pretláčaná cez trysku na dosku plošného spoja. Objem vytlačenej pasty sa dá regulovať napríklad rýchlosťou alebo dobou otáčania vretena [2].

Ak je potrebné vytvoriť rovnomernú vrstvu určitého materiálu, je dobré využitie metódy **nanášania tryskaním kvapiek**. Pri tomto procese nedochádza ku kontaktu nanášacieho zariadenia a dosky plošného spoja ako v predošlých prípadoch. Kvapky nanášaného materiálu sú malé, takže je možné nimi vytvárať najrôznejšie útvary a dokonca pomerne rýchlym tempom práce. Po vytvorení kvapky sa miesto jej dopadu nastavuje pomocou elektrického poľa, ktoré na ňu počas letu pôsobí [2].

1.3.3.2 Nanášanie cez šablónu a sieťku

Táto metóda využívajúca na nanášanie spájkovacej pasty šablónu alebo sieťku je najčastejšie sa vyskytujúcou sa metódou v praxi. Šablóna je kovový plát určitej hrúbky, ktorý má v sebe vyrezané otvory odpovedajúce miestam, na ktoré má byť nanosená pasta. Kvalita výsledného spoja samozrejme závisí od presnosti rozmerov a polohy otvorov na šablóne. Alternatívou šablóny je sieťka, ktorá býva vyrobená zo sieťoviny. Materiálom tejto sieťoviny môže byť nehrdzavejúca oceľ, polyester alebo ich kombinácia. Ako šablóna, aj sieťka má presne vytvarované a umiestnené otvory, cez ktoré sa pasta pretláča. Samotná šablóna alebo sieťka (Screen mesh + Emulsion film) je zvyčajne uchytená v ráme (Screen frame), pre lepšiu manipuláciu. Princíp tohto nanášania je znázornený na obrázku 1, kde je však namiesto dosky plošného spoja znázornená kremíková doska (Silicon wafer) [2].



Obrázok 5 - nanášanie pasty cez sieťku [14]

Šablóna sa najprv priloží priamo na dosku plošného spoja tak, aby sa jej otvory zhodovali so spájkovacími plôškami dosky plošného spoja. Následne sa na ňu nanesie pasta a postupne sa rozotrie po jej povrchu tak, aby sa pasta dostala do všetkých otvorov. Na tento účel väčšinou slúži stierka (Squeegee) vyrobená napríklad z polyuteránového plastu, ktorej čepeľ musí byť dostatočne pružná ale zároveň aj tvrdá. Použitie sieťky sa od šablóny líši predovšetkým tým, že sieťka sa nepokladá na dosku plošného spoja, ale je v určitej výške nad ňou. Preto je nutné pre aplikáciu pasty, aby stierka pritlačila na sieťku a ohla ju dostatočne na to, aby sa pasta dostala na požadované miesto [2].

Využitie šablóny a sieťky so sebou prináša viacero výhod. Patrí medzi ne napríklad vysoká rýchlosť a precíznosť aj pri plošných spojoch s pomerne komplikovanými motívmi a značným počtom spájkovaných súčiastok. Na druhej strane, výroba šablón je ekonomicky náročná a pre každý motív treba vyrobiť novú. Najvýhodnejšie je teda použitie tejto metódy pri masovej výrobe daného produktu [2].

1.4 Tavidlo

Tavidlo je chemická látka používaná pri spájkovaní, ktorá slúži ako čistiaci prostriedok. Odstraňuje nečistoty a oxidy zo spájky a spájkovaných povrchov, vďaka čomu znižuje jej povrchové napätie a tým pádom sa zlepšuje zmáčavosť a iné vlastnosti. Používa sa napríklad ako tekutina vo forme živice, ako pevná látka vo forme rôznych organických látok alebo vo forme pást zložených z anorganických látok. Okrem pozitívnych vplyvov však môžu mať aj negatívne. Ak sa tavidlo dostane do spoja, spôsobuje zhoršenie vodivosti tohto spoja. Zníženie odolnosti voči korózií môže tavidlo zapríčiniť, ak sa nedohliadne na jeho odstránenie z daných miest. Tavidlo sa v určitých aplikáciach primiešava priamo do spájkovacej pasty [15].

Spájkovanie s bezolovnatými zliatinami prebieha pri vyšších teplotách ako pri olovnatých. Z tohto dôvodu su kladené na tavidlá v týchto aplikáciach vyššie nároky na odolnosť voči teplu. Pritom musia stále zlepšovať zmáčavosť spájok, ktoré majú dokonca vyššie povrchové napätie ako tie s olovom. Používajú sa napríklad VOC-free tavidlá (volatile organic compound/prchavá organická zlúčenina), ktoré obsahujú živicu a nevolňujú organické látky [15].

1.5 Metódy pretavenia spájky (spájkovanie REFLOW)

Technológia REFLOW je kapilárny typ spájkovania, pri ktorom sa pasta nanáša medzi dosku a súčiastku, teda iba na miesto, kde má vzniknúť požadovaný permanentný spoj. Ten vzniká až pri pretavení spájky jednou z mnohých metód. Použitá spájka má zvyčajne formu pasty. Táto forma prináša výhodu lepkavosti, vďaka ktorej súčiastka za bežných okolností vydrží na žiadanom mieste bez ďalších opatrení. Komplikovanejšia situácia nastáva, ak je nutné využiť pastu vo forme zrn, kedy sa zaisťujú súčiastky proti pohybu počas celého procesu pretavenia [16].

Spájkovacia pasta obsahuje tekuté zložky, ktoré je nutné pred pretavením odstrániť. Rovnako sa pred pretavením vyžaduje aktivácia tavidla. Oba tieto procesy sú vykonané počas sušenia pasty. Dosahuje sa ho pri teplote približne 120°C, závisí od zloženia spájky [16].

Výhodou samotnej technológie REFLOW je jej ľahké spojenie s technológiu SMT (technológia povrchovej montáže) vo výrobnom procese. Tá nám umožňuje dosiahnutie vysokej hustoty osadzovania súčiastok. Aj v prípade, keď sú súčiastky pomerne blízko pri sebe, tak je

riziko vznikanja nechcených vodivých prepojení minimálne. Okrem toho ponúka dobrú opakovateľnosť výroby a hospodárne využívanie spájky [16].

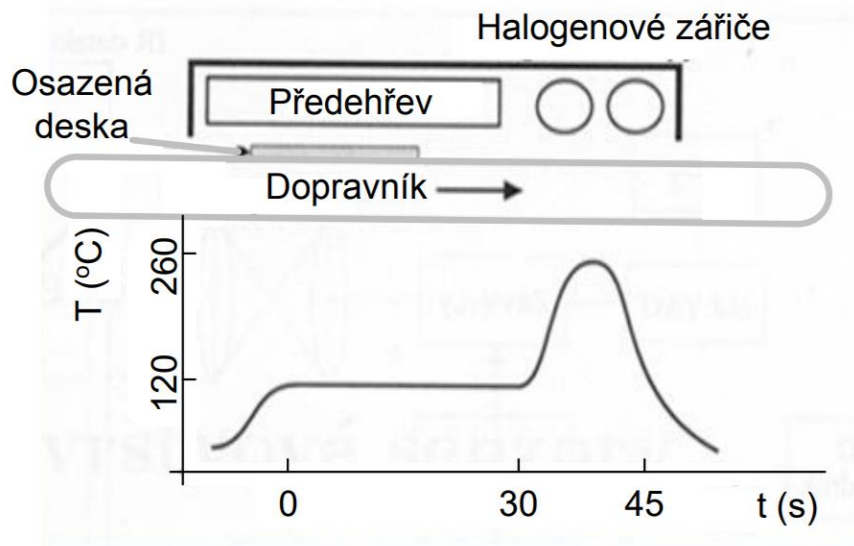
1.5.1 Spájkovanie v teplotovzdušnej peci

Pri tejto metóde pretavenia spájky je zohrievaný celý výsledný produkt. Z tohto dôvodu je nutné uvážiť, či sú zvyšné komponenty dostatočne odolné voči teplotnému zaťaženiu, lebo by mohlo dôjsť k ich zničeniu. Výhodou je rovnomerné otepľovanie a chladnutie produktu, vďaka čomu je vznik vnútorného pnutia a deformácií minimálny. Okrem toho sa dá presne nastaviť teplota prostredia a doba, počas ktorej sa v nej bude súčiastka nachádzať, toto vedie ku dobrej opakovateľnosti výroby. Takisto aj množstvo spojov a komplikovanosť tvaru obvodu niesú nijako limitované pri tomto druhu pretavenia. Samotné ohrievanie je častokrát zabezpečené výhrevnou odporovou špirálou ohrievajúcou vzduch. Ten je distribuovaný po peci pomocou ventilátoru. Pec môže mať jednu alebo viac teplotných zón, závisiac aj od toho, či sušenie pasty prebieha v nej, alebo ako samostatný proces [17].

Pece môžeme rozdeliť napríklad podľa atmosféry, s ktorou pracujú. Pri bežnej atmosfére je nutné použitie tavidla. Zároveň pri nej vznikajú na povrchu produktu oxidy, ktoré je nutné na konci výroby odstrániť aj s prebytočnými zvyškami tavidla. Pece s ochrannou atmosférou využívajú plyny ako napríklad argón, hélium, dusík a ich rôzne kombinácie. Tie zamedzujú vzniku nechcených povrchových oxidov. Už existujúce povrchové oxidy je možné odstrániť pri stálom prúde ochranného plynu a zaručení jeho vysokej teploty. Pece s redukčnou atmosférou sa používajú pri práci s nehrdzavejúcou, uhlíkovou a žiaruvzdornou oceľou [17].

1.5.2 Spájkovanie infračerveným žiaričom

Spájkovaná doska so súčiastkami cestuje po dopravníku. Najprv prejde prvotným zahriatím a až následne je vystavená halogénovému žiariču. Ten produkuje žiarenie o vlnovej dĺžke do 400 μm. Efektivita procesu závisí na drsnosti povrchu, jeho farbe a smeru dopadajúceho žiarenia, lebo nie všetko žiarenie je pohltené materiálom a neslúži na žiadaný ohrev. Značná časť je odrazená do okolia. Metóda nedokáže zaručiť rovnomerný ohrev a teda rovnakú kvalitu všetkých vytvorených spojov [16].



Obrázok 6 - spájkovanie infračerveným žiaričom [16, p. 5]

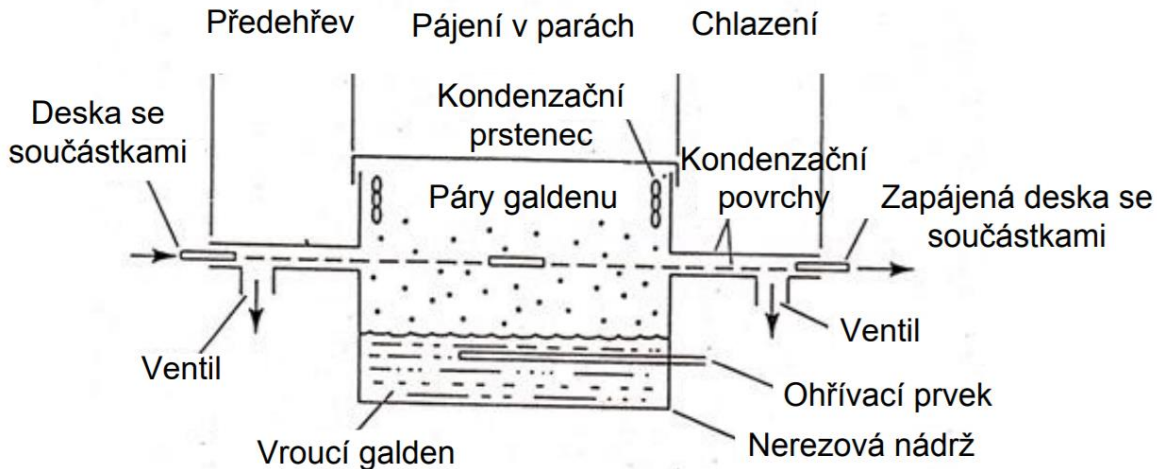
1.5.3 Spájkovanie laserom

Využitie laseru má oproti infračervenému ohrevu výhodu vyššej presnosti a kvality. Vďaka priamemu nasmerovaniu laseru len na požadované miesto spoju sa doska teplotne nenamáha. Zároveň je ohrev rovnomerný. Napriek pomerne vysokej rýchlosti pretavovania jednotlivých spojov, niekoľko za sekundu, je v porovnaní s ostatnými metódami v masovej výrobe stále výrazne časovo náročnejší. Okrem toho je aj cena samotného zariadenia vyššia. Preto sa používa najmä v prípadoch, kedy ostatné typy pretavenia niesú možné [16].

1.5.4 Spájkovanie v parách

Ako názov napovedá, metóda využíva proces kondenzovania pár a teplo, ktoré je pri ňom vymieňané. Na tvorbu pár slúži celá skupina pracovných kvapalín s názvom galden. Tieto kvapaliny majú niekoľko výhodných vlastností. Sú stabilné vo veľkom rozsahu teplôt. Chemicky nereagujú s látkami, ktoré sú im počas procesu výroby vystavené. Ich bod varu sa nachádza v rozmedzí od 55°C až do 270°C [16].

Doska sa najprv predhreje a následne vchádza do komory, kde sa uskutočňuje cyklus vyparovania a kondenzovania galdenu. Galden je zohrievaný v nádobe až do bodu varu. Jeho pary obklopiu dosku a svojím teplom a teplom kondenzácie, ktoré odovzdajú doske, spôsobia pretavenie spájky. Cyklus je ukončený skvapkaním skondenzovaného galdenu do ohrievacej nádoby, kde je znovu privedený do varu [16].



Obrázok 7 - spájkovanie v parách [16, p. 9]

1.6 Intermetalické zlúčeniny (IMC - InterMetallic Compound)

Intermetalické zlúčeniny vznikajú pri kontakte tekutej spájky s doskou plošného spoja. Formujú vrstvy, ktoré sa nachádzajú medzi týmito dvoma elementmi a sú podstatou spájkovania. Práve vďaka nim je permanentný spoj schopný vzniknúť a udržať pohromade spájku a dosku [18].

Jednou z komplikácií, ktorá nastáva pri práci s bezolovnatými spájkami, je nadmerná tvorba intermetalických zlúčenín. Kľúčovým prvkom pri ich tvorbe je cín, ktorý obsahuje väčšina týchto spájkov. Najpočetnejšími prípadmi sú dvojkombinácie kovov medi, zlata a niklu s cínom. Príliš veľké tempo rastu týchto tenkých vrstiev môže mať viacero negatívnych vplyvov na spoj. Týmto sú napríklad zhoršená vodivosť alebo rast tvrdosti a krehkosti spoja, čoho dôsledkom je menšia odolnosť proti opakovanému namáhaniu mechanického charakteru. Je to zapríčinené odlišujúcimi sa vlastnosťami intermetalických vrstiev oproti základným kovom. Samotné rozdiely sú spôsobené napríklad hustejším usporiadaním atómov v kryštalickej mriežke, iným stupňom ich väzbovosti a typom chemickej väzby [2].

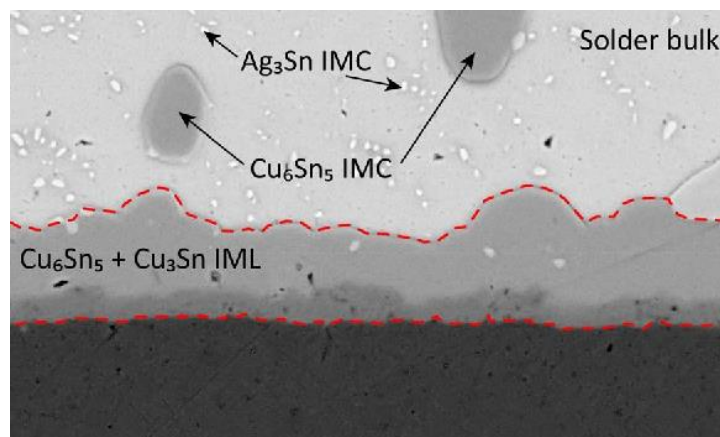
Ku nadmernému rastu dochádza napríklad, keď je teplota pretavenia vyššia ako určitá hranica, ak je chladnutie príliš pomalé, ak je samotný čas spájkovania príliš dlhý alebo ak je čistota spájkovaného povrchu nedostatočná. Najviac sa vrstvy nechcenej hrúbky tvoria v čase tavenia spájky [2].



Obrázok 8 - intermetalická zlúčenina (IMC) [2, p. 49]

Hrúbky týchto vrstiev sú rôzne, ale platí všeobecné pravidlo, že „celková hrúbka intermetalickej zlúčeniny nesmie byť väčšia ako polovica celkovej hrúbky povlaku spájky“ [2, p. 29]. Ak táto podmienka nie je splnená, dochádza ku značnému zníženiu spájkovateľnosti. Ako konkrétny príklad môžeme uviesť vrstvy intermetalickej zlúčeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn , ktoré vznikajú na rozmedzí vrstvy medi a spájky. Dosahujú hrúbky do $1\mu\text{m}$ [2].

Hrúbka intermetalickej zlúčeniny je schopná meniť sa v čase, pričom táto zmena závisí najmä od teploty. Pri teplote zhruba od 150°C v priebehu niekoľkých dní dochádza k nárastu hrúbky až o niekoľko μm , čo znamená niekoľkonásobné zväčšenie vrstvy. Nárast hrúbky vrstvy má za dôsledok aj príliš pomalé chladnutie roztavenej spájky [2].



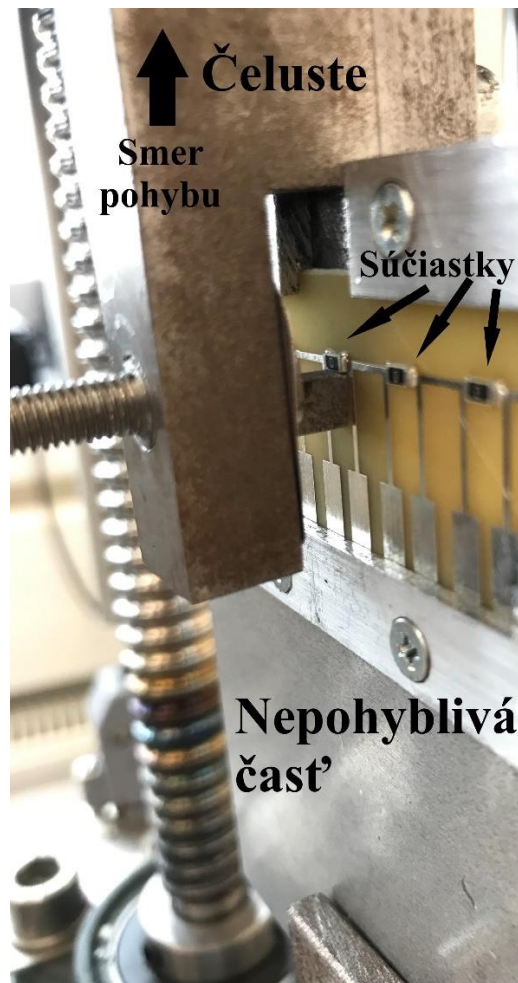
Obrázok 9 - skutočný snímok intermetalickej zlúčeniny [19]

Na obrázku 2 je vidno skutočnú intermetalickú vrstvu medzi vrstvou medi (spodná, tmavá vrstva) a spájkou (vrchná, svetlá vrstva).

1.7 Diagnostika spájkovaných spojov

1.7.1 Skúška strihom (shear test)

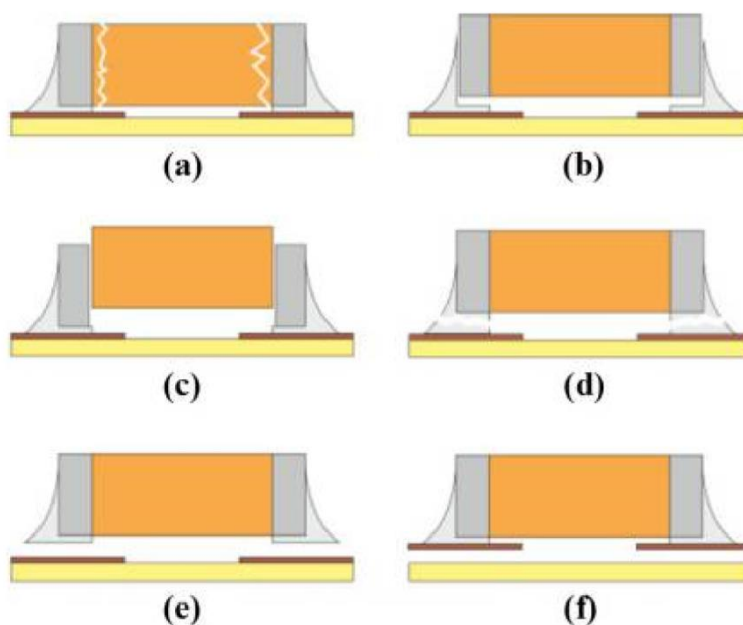
Jednou zo skúmaných mechanických vlastností výsledných spojov je veľkosť šmykovej sily, potrebnej na odtrhnutie súčiastky z dosky plošného spoja. Zariadenie, ktorým sa táto skúška vykonáva sa nazýva trhačka. Trhačka pozostáva z čelustí, ktoré sa konštantnou rýchlosťou vzdávajú od nepohyblivej časti trhačky. Pohyb je vykonávaný pomalou rotáciou tyče so závitom, na ktorej je čelusť uchytaná. V nepohyblivej časti je uchytaná doska plošného spoja. Čeluste sú zachytené o súčiastku prispájkovanú na túto dosku. Týmto spôsobom je na súčiastku vyvíjaná šmyková sila, pôsobiaca rovnobežne s doskou. Sila sa postupne zväčšuje, až dokým nedôjde ku odtrhnutiu súčiastky. V našom prípade sa jednalo o rýchlosť posuvu 1 milimeter za minútu. Testovanie sa riadi podľa normy IEC 62137-1-2.



Obrázok 10 - trhačka

Treba zmieniť, že ku samotnému odtrhnutiu nemusí dojsť pri maximálnej nameranej sile. Rozdiel medzi týmito dvomi silami sa dá ovplyvniť dobou teplotného starnutia spájky [2].

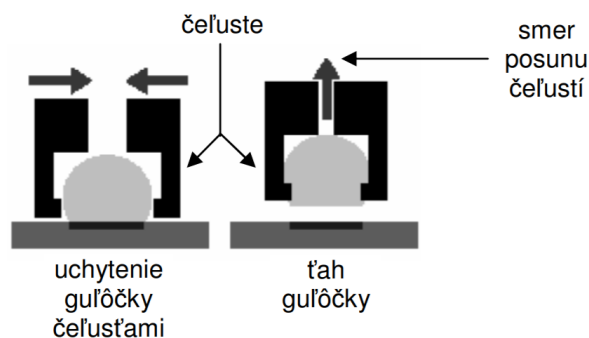
Ku narušeniu spoja môže dôjsť viacerými spôsobmi. Medzi typické patrí napríklad **tvárne porušenie** (porušenie sa nachádza v objeme spájky), **zdvih spájkovacej plôšky** (spájka so sebou odtrhne aj spájkovaciu plôšku, prípadne aj časť materiálu dosky), **zdvih spájky** (oddelenie spájky od spájkovacej plôšky) a **porušenie na rozhraní** (porušenie nastáva v mieste stredu dvoch fáz, spájky a intermetallickej vrstvy alebo intermetallickej vrstvy a spájkovacej plôšky) [2].



Obrázok 11 - typy narušenia spoju

1.7.2 Skúška studeným ťahom

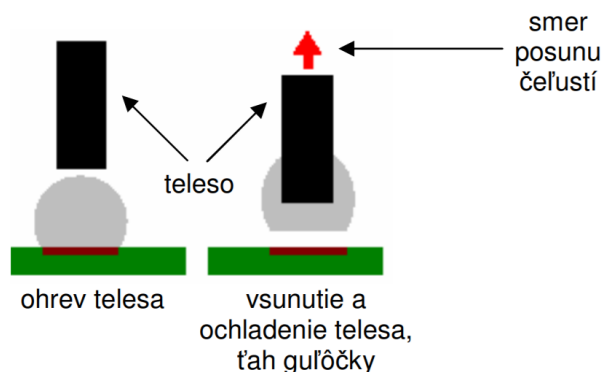
V tejto mechanickej skúške je možné využiť guľovitý tvar testovanej spájky. Narozdiel od predošlého testu majú čeluste iný tvar, ktorý im umožňuje uchopiť guľôčku spájky. Následne čeluste vykonajú pohyb kolmý na DPS, pri ktorom sa začnú od DPS vzdávať. Rýchlosť pohybu čelustí sa zvyčajne nachádza medzi hodnotami 40 až 5000 $\mu\text{m/s}$ a je pri každej testovanej vzorke rovnaká. Týmto je spájka namáhaná. Aj pre túto skúšku mechanických vlastností platia typy narušenia spoja, ako pri skúške strihom. Problémom, ktorý môže pri tejto metóde nastať, je vplyv deformácie spájky na zmerané hodnoty síl odtrhu spájky [2]. Situáciu ilustruje obrázok 12.



Obrázok 12 - skúška studeným ťahom [2, p. 113]

1.7.3 Skúška horúcim ťahom

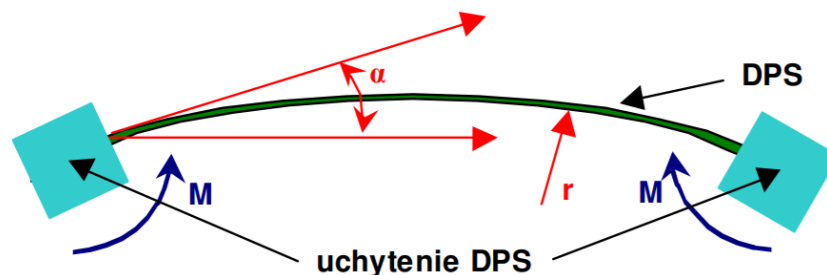
Pri skúške spájky horúcim ťahom je takisto využívaný tvar guľičky spájky. Aj tu je spájka najprv prispájkovaná na DPS. Namáhanie spájky je realizované pomocou telesa (napríklad drôt z medi), ktoré sa najprv zohreje na teplotu vyššiu, ako je teplota topenia spájky. Potom sa teleso priloží na povrch spájky, čím vnikne do jej objemu. Takto vznikne spoj. Vzniká tým nový typ narušenia spoja, a to na rozhraní telesa a spájky [2].



Obrázok 13 - skúška horúcim ťahom [2, p. 114]

1.7.4 Skúška cyklickým ohýbaním DPS

V rámci tejto skúšky je testovaná DPS upevnená v zariadení, ktoré na ňu aplikuje moment. Aplikácia tohto momentu sa deje v cykloch definovanej časovej dĺžky. Vplyvom momentu sa doska prehýba a spoj na DPS je namáhaný. Výrazný vplyv na výsledok skúšky má umiestnenie spojov a ich rozmer. Ohybom vznikajú praskliny a trhliny, ktoré sa po vykonaní skúšky vyhodnocujú. Medzi nastavované veličiny skúšky patrí minimálny a maximálny uhol ohybu a minimálny a maximálny moment. Taktiež záleží aj na dĺžke času pôsobenia, nárastu a poklesu týchto momentov.

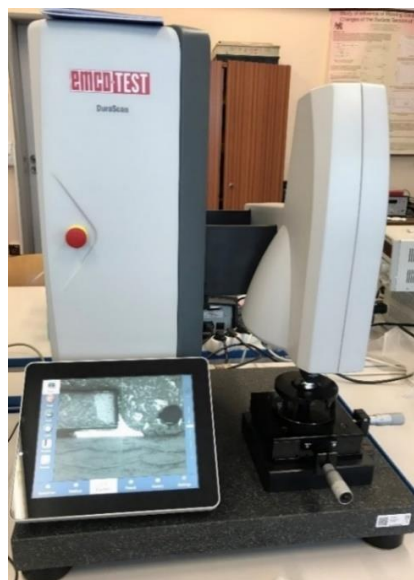


Obrázok 14 - skúška cyklickým ohýbaním DPS [2, p. 115]

1.7.5 Vickersova skúška tvrdosti

Vickersova metóda testovania tvrdosti materiálov patrí medzi statické metódy. Je veľmi flexibilná, umožňuje merať v celej škále aplikovaných síl. Nie je obmedzená na žiadnu skupinu materiálov, je možné ju aplikovať na prakticky každý materiál. Poskytuje aj nedeštruktívnu možnosť testovania. Na druhej strane je pomerne náročná na úpravu testovaného povrchu, ktorý musí byť čo najhladší. Toto sa docieľuje jeho dôkladným brúsením. Okrem tohto požiadavku je nevyhnutné, aby počas celej doby merania bola vzorka pevne uchopená v násadci prístroja. Proces merania nesmú narúšať vonkajšie mechanické vplyvy, ako napríklad silné vibrácie. V porovnaní s inými metódami môže byť pomalý. Taktiež, cena zariadenia je pomerne vysoká [20].

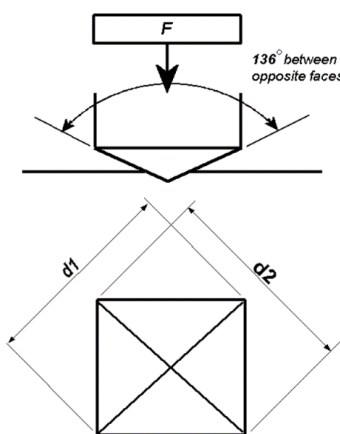
Konkrétnym príkladom zariadenia na výkon tejto skúšky je zariadenie zo série DuraScan G5, ktoré funguje nielen ako mikroskop, ale zároveň realizuje skúšku tvrdosti.



Obrázok 15 - EMCO-TEST DuraScan G5

Na jeho ovládanie slúžil tablet, ktorým sa jednoducho prepína medzi jednotlivými zväčšeniami snímaného obrazu a násadcom s diamantovým hrotom. Hrot má tvar štvorbokého ihlana s určitým vrcholovým uhlom medzi protíahlými stenami. S týmto násadcom sa vykonáva samotná Vickersova skúška tvrdosti materiálu. V jej priebehu sa hrot zapichne definovanou silou a trvaním do určeného miesta, čím vzniká v materiáli priehlбина. Následne prístroj zmeria uhlopriečky vzniknutého tvaru v rovine a vypočíta výslednú tvrdosť ako pomer vtláčovacej sily a povrchu priehlbiny podľa vzťahu:

$$HV = 2 \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right) \cdot \frac{F}{d_{str}^2} \quad \left[\frac{kgf}{mm^2}\right]$$

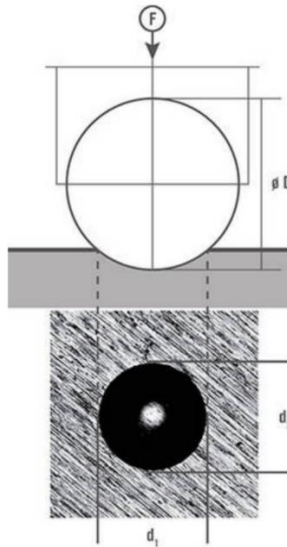


Obrázok 16 - geometria skúšky tvrdosti podľa Vickersa [21]

Jednotka sily, ktorú uvádzajú výrobcovia na svojich prístrojoch pre Vickersovu skúšku, je tradične kilpond (kgf). Pre konverziu do jednotiek SI je nutné vypočítané hodnoty vynásobiť gravitačným zrýchlením, čím dostaneme jednotku MPa. Uhlopriečky d_1 a d_2 je takisto nutné prepočítať z milimetrov na metre [21].

1.7.6 Brinellova skúška tvrdosti

Brinellova skúška tvrdosti patrí tiež medzi statické metódy testovania tvrdosti materiálov. Dá sa ňou testovať so silami v strednom rozmedzí, teda približne od 1 do 3000 kgf. Ako aj Vickersova metóda, aj Brinellova je optická, takže vyžaduje zariadenie, ktoré opticky zmeria rozmery priehlbiny. V tomto prípade je priehlбина vytvorená sférickým telesom [20].



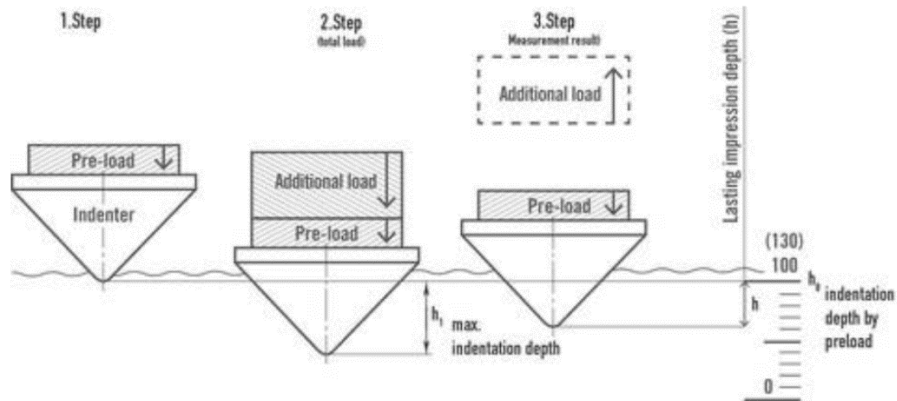
Obrázok 17 - geometria Brinellovej skúšky tvrdosti [20]

Týmto telesom môže byť napríklad guľa o priemere 1 až 10 milimetrov, vyrobená z karbidu wolframu. Kvalita povrchu skúmanej vzorky musí byť rovnako vysoká, ako aj pri Vickersovej metóde. Takisto aj záber materiálov, vhodných na tento typ testovania je užší. Vhodnými kandidátmi sú ľahké kovy, olovo alebo cín alebo aj tvrdšie kovy ako oceľ alebo železo. Metóda takisto tradične využíva jednotku kilopond pre vyjadrenie sily. Oproti Vickersovej metóde sa hodí aj na testovanie nehomogénnych materiálov, lebo využíva sférický tvar priehlbiny s pomerne veľkým priemerom. Toto zaručuje vo výsledku priemernú hodnotu tvrdosti väčšieho množstva kryštálov testovanej látky. Väčší rozmer priehlbiny robí meranie jej rozmerov omnoho jednoduchším. Limitáciou metódy je jej rizikové využitie pri vzorkách s vysokou tvrdosťou a malou hrúbkou. V tomto prípade hrozí jej zničenie. Metóda je takisto časovo náročná, testovací cyklus sa odhaduje od minúty dlhšie [20].

1.7.7 Rockwellova skúška tvrdosti

Aj táto skúška tvrdosti je statická, od predošlých dvoch sa líši v procese tvorby priehlbiny a aj hodnotenia tvrdosti materiálu. Aplikácia celkovej pôsobiacej sily sa delí na dve štádiá. V prvom sa hrot vťahovacieho telesa vplyvom počiatočného zaťaženia (pre-load) dostane do referenčnej hĺbky vrámci vzorky h_0 . V druhom štádiu na teleso zapôsobí prídavné/hlavné zaťaženie (additional/main load), ktoré spôsobí jeho vnik hlbšie do vzorky, na úroveň h_1 . Toto je zároveň hodnota maximálnej hĺbky dosiahnutej pri testovaní. Následne sa celková záťaž odstráni a vzhľadom na určitú mieru elasticity materiálu je teleso vytlačené do zvyškovej hĺbky h . Pomocou

tejto hodnoty a vzťahu definovaného v norme ČSN EN ISO 6508-1 sa vypočíta výsledná tvrdosť [20].



Obrázok 18 - geometria Rockwellovej skúšky tvrdosti [20]

Pre dosiahnutie čo najširšieho záberu uplatnenia tejto metódy sa využíva vtláčovacích telies viacerých tvarov. V tomto prípade sa nejedná o štvorboký hranol, ale o sférické alebo kuželovité teleso vytvorené z rôznych materiálov. Pomocou hodnoty aplikovanej záťaže rozlišujeme medzi testom Rockwell (počiatočná záťaž je vždy 10 kgf a hlavná od 60 do 150 kgf) a Super Rockwell (počiatočná záťaž je vždy 3 kgf a hlavná od 15 do 45 kgf). Metóda sa využíva najmä v Amerike [20].

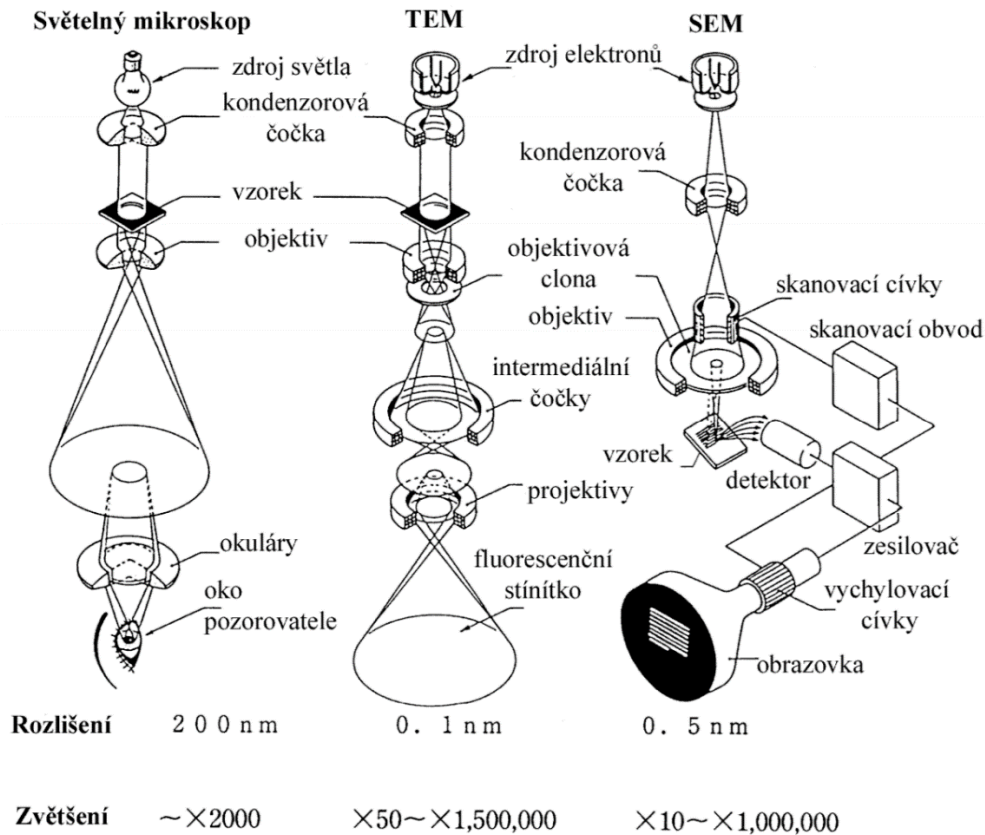
Jednou z hlavných výhod je, že testovaná vzorka nevyžaduje precíznu úpravu povrchu ako predošlé dve metódy. Hodnota zvyškovej hĺbky sa odčíta priamo, nevyžaduje žiaden optický prístroj. Kvôli tomuto je cena zariadenia výrazne nižšia. Merací cyklus je takisto vďaka tomu kratší. Na druhej strane sa však jedná menej presnú metódu. Aj veľmi malá nepresnosť pri stanovení hodnoty zvyškovej hĺbky vyústi do značnej chyby pri výpočte výslednej tvrdosti [20].

1.7.8 Elektrónová mikroskopia

Elektrónové mikroskopy patria do skupiny optických prístrojov, ako aj klasické svetelné mikroskopy, využívajúce pre zobrazovanie lúč fotónov. Narozdiel od svetelného lúču však využívajú zväzok elektrónov. Elektróny sa urýchľujú prítomnosťou elektrického poľa. Magnetické pole slúži zase na tvarovanie ich trajektórie. Aby zväzok elektrónov nebol narušený svojím prostredím, musí sa nachádzať vo vákuu. Namiesto sklenených šošoviek obsahuje elektrónový mikroskop elektromagnetické. Jednoduchým príkladom takejto šošovky je cievka navinutá na dutý

válec z magneticky mäkkého materiálu. Pri priechode takto vzniknutého solenoidu prúdom vzniká magnetické pole [22].

Elektrónové mikroskopy dosahujú značne vyššieho rozlíšenia oproti svetelným. Pomocou technologicky najpokročilejších je možné identifikovať jednotlivé atómy a objekty podobných rozmerov. Sú to všestranné prístroje, ktoré nám dokážu poskytnúť informáciu o mikroštruktúre a kryštálografii látok [22].



Obrázok 19 – porovnanie princípu svetelného a elektrónových mikroskopov [22]

Pri určitých zjednodušeníach rozdeľujeme elektrónové mikroskopy do dvoch kategórií a to tranzmisívne elektrónové mikroskopy (TEM) a riadkovacie/skenovacie elektrónové mikroskopy (SEM) [23].

Vplyvom rozdielu potenciálov medzi anódou a katódou získavajú elektróny svoje zrýchlenie. Anóda ma dieru kruhového prierezu, cez ktorú výsledny zväzok elektrónov pokračuje do ďalšej časti mikroskopu. Pomocou TEM sa skúma vnútorná štruktúra materiálov. Zväzok elektrónov pritom prechádza priamo cez vzorku a ďalej pokračuje na fluorescenčné tienitko. Z neho sa

následne získava informácia o vlastnostiach materiálu. Preto je nevyhnutné, aby mala vzorka vyhovujúcu hrúbku, čo zvyčajne býva v rozpätí od 10 do 500 nanometrov. V praxi slúži táto kategória napríklad na skúmanie vzniku a vlastností porúch kryštalickej štruktúry látok [23].

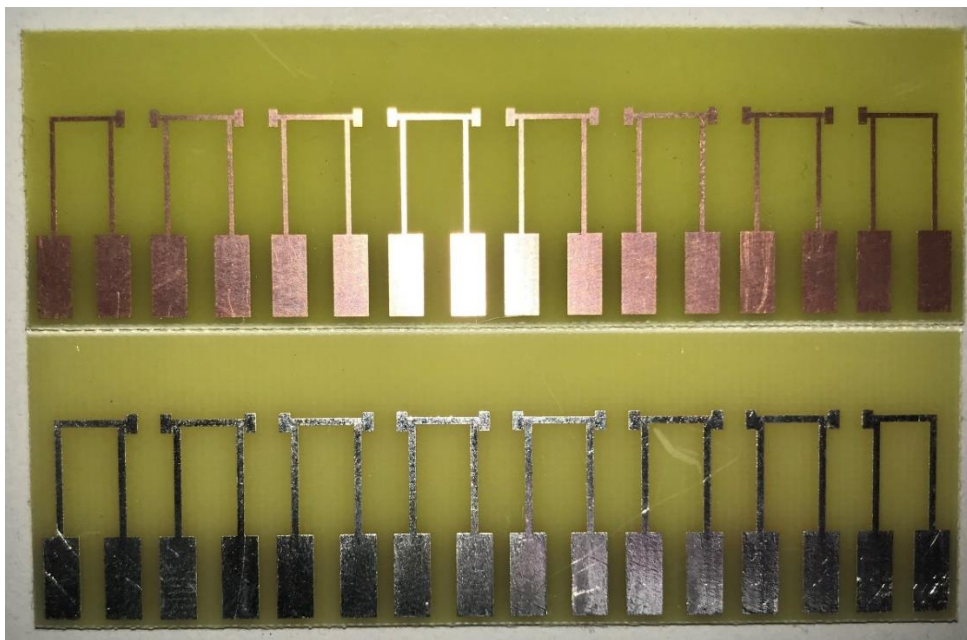
Ako aj v predošlom prípade, aj v SEM sú elektróny na začiatku urýchľované rovnakým princípom. Následne vletia do sústavy elektromagnetických šošoviek. Jej účelom je zúženie priemeru elektrónového zväzku na čo najmenšiu hodnotu. Predtým ako dopadne takto upravený zväzok na vzorku, tak je ešte upravený do riadkov, ktoré pokryjú danú plôšku. Riadkov môže byť od desiatok až do tisícok. Elektróny dopadnú na povrch vzorky, odrazia sa a informácia ktorú nesú sa odovzdáva detektoru. Medzi nepriaznivé javy pri tejto kategórii mikroskopov patrí napríklad nabíjanie povrchu vzorky. K nim dochádza, pokiaľ nie je skúmaný materiál dostatočne vodivý. Týmto spôsobom je možné skúmať aj biologické vzorky, pri urýchľovacom napätí do 25kV. Pokiaľ je vzorka nevodivá, musí prejsť úpravami ako sušenie, pokovenie, odstránenie elektrického náboja z jej povrchu a ďalšími, čím sa uspôsobí na toto skúmanie. Medzi výhody metódy patrí jej všestrannosť, obmedzená je rozmerom vzorky len z pohľadu veľkosti vákuovej komory [23].

2 POPIS EXPERIMENTU

Táto časť práce obsahuje namerané hodnoty a výsledky samotného experimentu. V rámci experimentu som vytvoril určitý počet spájkovaných spojov za použitia rôznych pást. Následne som testoval pomocou niekoľkých testov ich mechanické vlastnosti, pevnosť v ťahu a tvrdosť nielen samotnej spájky, ale aj intermetalickej vrstvy. Všetky použité materiály a prístroje boli poskytnuté pracoviskom na pôde školy.

2.1 Tvorba testovacích vzoriek

Testovacie vzorky som vyhotovil z dosiek plošných spojov, zobrazených na obrázku 9. Na každú dosku je možné prispájkovať 7 súčiastiek.



Obrázok 20 - doska plošných spojov

Testoval som 3 spájkovacie pasty na medenom povrchu a povrchovej úprave HASL. Ich vzájomným kombinovaním som vytvoril celkom 210 spojov. Na každú dosku som naniesol danú pastu pomocou šablóny a stierky. Táto metóda umožnila rovnomernú dávku spájky pre každý spoj a tým aj rovnaké podmienky pre testovanie spojov. Potom som osadil jednotlivé súčiastky, použil som nulové odpory. Bolo dôležité, aby boli súčiastky osadené, pokiaľ možno čo najpresnejšie. Preto som využil z časti pinzetu a z časti prístroj, manipulátor zobrazený na obrázku 10.



Obrázok 21 - SMT manipulátor

Jednou z funkcií manipulátora je osádzanie súčiastiek na dosky plošných spojov. Toto je sprostredkované pohyblivým ramenom, ktoré je ovládať manuálne pomocou ruky. Výhodou je stabilizácia prirodzeného chvenia rúk a teda zvýšená presnosť a pohodlie pri manipulácii so súčiastkami. Na konci pohyblivého ramena je dutá, tupá ihla, ktorá nasáva vzduch pod určitým tlakom a tým je schopná uchopiť a zodvihnúť súčiastku, ktorá je ňou „nasatá“. Následne sa súčiastka položí na spájkovaciú pastu nanesenú na dosku plošného spoja. Súčiastka ostane ležať na požadovanom mieste, vďaka lepivosti spájky. Inou funkciou manipulátora môže byť napríklad aj nanášanie spájky, ak sa na pohyblivé rameno pripevní okrem sacej ihly aj injekcia so spájkou.

Ďalším krokom bolo pretavenie spájky, teda vytvorenie permanentného spoju. Na tento účel bola využitá pretavovacia pec Mistral 260. Obsahuje 3 nezávislé teplotné zóny, ktoré spolu vytvoria teplotný profil spájkovacieho procesu. Pretavenie je sprostredkované horúcim vzduchom vnášaným do jednotlivých zón. Cez tieto zóny prechádza celá doska plošných spojov definovanou rýchlosťou, v našom prípade 15 centimetrov za minútu a na konci by mali byť všetky kontakty pretavené.



Obrázok 22 - pretavovacia pec [24]

2.2 Použité spájky

2.2.1 Spájka M705-GRN360-K2-V

Typ	Výrobca	Zloženie	Veľkosť častíc	Teplota pretavenia
Bezolovnatá	Senju	Sn99.3/Cu0.7	20 - 45 μm	227 °C

Tabuľka 2 - špecifická spájky M705-GRN360-K2-V

Teplotný profil: 150 °C; 180 °C; 260 °C;

2.2.2 Spájka NC257-2 SAC305

Typ	Výrobca	Zloženie	Veľkosť častíc	Teplota pretavenia
Bezolovnatá	AIM	Sn96.5/Ag3/Cu0.5	25 - 45 μm	218 °C

Tabuľka 3 - špecifická spájky NC257-2 SAC305

Teplotný profil: 150 °C; 180 °C; 260 °C;

2.2.3 Spájka OZ63-330F-40-10

Typ	Výrobca	Zloženie	Veľkosť častíc	Teplota pretavenia
Olovnatá	Senju	Sn63/Pb37	15 - 30 μm	183 °C

Tabuľka 4 - špecifická spájky OZ60-330F-40-10

Teplotný profil: 120 °C; 150 °C; 230 °C;

2.3 Tvorba metalografického výbrusu

Vrámci druhého testu boli z testovacích dosiek vyhotovené metalografické výbrusy. Tieto boli následne podrobené Vickersovej skúške tvrdosti. Výbrus je zobrazený na obrázku 8.



Obrázok 23 - metalografický výbrus

Pri tvorbe výbrusu v prípade malých vzoriek, ako v našom prípade, je výhodné ich vložiť do formy, zaliť zalievacou hmotou a nechať stvrdnúť. Tento proces sa nazýva zalievanie za studena. Formy sa vyrábajú z rôznych materiálov. Jednorázové môžu pozostávať z hliníku, skla alebo fenolu. Pre opakované použitie sa vyrábajú napríklad zo silikónu. Ďalším parametrom pre voľbu typu formy je samotná zalievacia hmota. Hmota je zvyčajne tvorená tekutou epoxidovou živicom. V našom prípade boli do nej pridané vodivé sadze, aby bolo možné skúmať vzorky pod elektrónovým mikroskopom. Doba tvrdnutia, respektíve polymerizácie, sa pohybuje v závislosti od zloženia zalievacej hmoty od rádo niekoľko minút, až po niekoľko desiatok hodín. Pre zlepšenie kvality vzoriek prebieha zalievanie vo vákuu, kedy hmota najlepšie vyplní formu, je obmedzený vznik dutín [25].

Po stvrdnutí hmoty je nutné vzorku obrobit', aby bolo umožnené jej ďalšie skúmanie. Medzi bežné postupy sa radí rezanie, brúsenie, leštenie a leptanie. Najprv sa zo vzorky odoberalo postupným rezaním tenkých vrstiev. Pri brúsení a leštení sa následne vyhladil povrch vzorky. Zrnitosť brúsnych papierov sa podľa normy FEPA pohybuje od 60 do 2400, pričom každým papierom je nutné brúsiť v jednom smere. Počas výmeny papiera s nižšou zrnitosťou je dôležité vzorku očistiť vodou a pokračovať v brúsení kolmým smerom na predošlý smer. Alternatívou ručného brúsenia je mechanizované, prostredníctvom metalografickej brúsky. Pozostáva z rotujúceho kotúča vo vodorovnej polohe, na ktorom je upevnený brúsny papier. Opracovávaná

vzorka je prítlačaná na tento kotúč, ktorý sa točí rýchlosťou od asi 30 do 150 otáčok za minútu. Pri vyšších otáčkach sa zvykne vzorka chladiť vodou, aby sa predišlo jej znehodnoteniu [25].

2.4 Overenie výpovednej hodnoty nameraných hodnôt

Aby bolo možné prehlásiť o nameraných hodnotách, že majú výpovednú hodnotu, je nutné ich podrobiť vhodnej štatistickej skúške. Pre tento účel bol vybraný dvojvýberový študentov t-test, ktorý podáva informáciu o rozdieli stredných hodnôt dvoch skupín meraní. Je možné ho aplikovať práve v našom prípade, kedy potrebujeme rozhodnúť, či sa napríklad zmerané hodnoty pre danú spájkku na dvoch rôznych povrchových úpravách DPS štatisticky významne líšia [26].

Ako aj v iných štatistických testoch, aj tento pozostáva z dvoch súperiacich hypotéz. Pomocou nulovej hypotézy (ďalej len hypotéza) predpokladáme, že rozdiel stredných hodnôt dvoch skupín meraní je nulový, respektíve že sa stredné hodnoty rovnajú. Alternatívna hypotéza (ďalej len alternatíva) predpokladá opak, teda že rozdiel je nenulový, nadobúda hodnotu nejakej konštanty, závisiac od očakávaného výsledku [26].

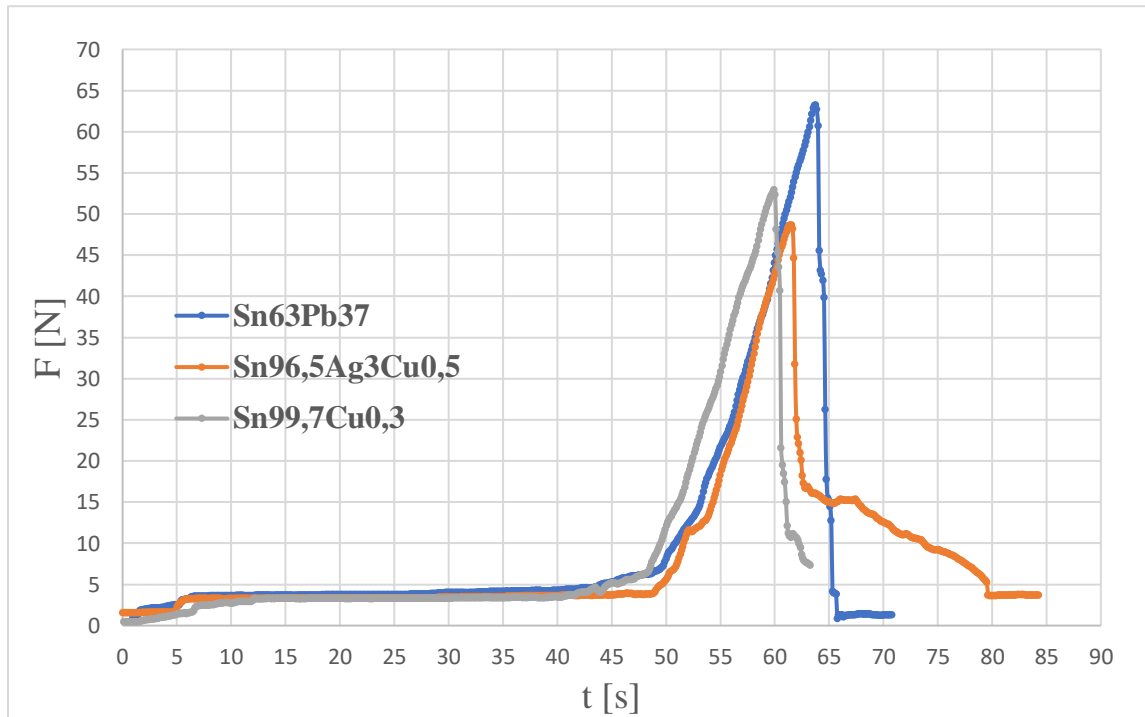
Testovanie má niekoľko predpokladov. Skúmaná náhodná veličina musí byť spojená (namerané dáta naberajú ľubovoľné hodnoty z určitého intervalu) a zároveň musí mať približne normálne rozdelenie. Taktiež by nemala obsahovať namerané hodnoty, ktoré sa príliš líšia svojou veľkosťou od väčšiny ostatných. Toto môže spôsobiť jej nepresnosť. Okrem tohto sa predpokladá, že jednotlivé pozorovania sú na sebe nezávislé [26].

Výstupom tohto testu je p-hodnota, na základe ktorej vieme rozhodnúť, či je hodnota štatistiky významná. Zároveň je to pravdepodobnosť, že získame hodnotu testovacej štatistiky, ktorá je väčšia alebo rovná ako skutočne získaná hodnota za predpokladu, že je hypotéza pravdivá [27, p. 10]. P-hodnotu porovnáваме s hodnotou hladiny významnosti testu α , ak nám vyjde že p-hodnota je menšia, tak potom hypotézu zamietame v prospech alternatívy na danej hladine významnosti [27].

3 VÝSLEDOK EXPERIMENTU

3.1 Skúška strihom (shear test)

Na nasledujúcom obrázku sú typické časové priebehy síl skúmaných spájok.



Obrázok 24 - grafy časových priebehov síl pre spájky

Každý zmeraný priebeh sa dá pomyselne rozdeliť na viac častí. V prvej časti grafu, v rozmedzí väčšinou od nulovej pôsobiacej sily po silu asi 5 N, dostáva čelusť trhačky sústavu do pnutia. V tejto časti prechádza doska plošného spoju zo stavu kedy voľne visí z čelustí do stavu, kedy na ňu začína pôsobiť sila rastúca v čase. Zachovanie určitej vôľe je nutné pre pohodlnú manipuláciu s testovacími vzorkami na začiatku a konci merania. Druhá časť grafu pozostáva z rapidného vzrastu aplikovanej sily na súčiastku až do dosiahnutia maximálnej hodnoty. V tejto časti sa doposiaľ približne konštantné hodnoty síl začínú prudko meniť. Nedokonalosti krivky v oblasti nárastu síl môžu byť zapríčinené napríklad nerovnomerným rozložením sily na spoj, kedy sú čeluste umiestnené bližšie k jednému z okrajov súčiastky. Iným dôvodom by mohlo byť nesprávne relatívne natočenie súčiastky na doske plošného spoja voči čelustiam trhačky. Pre tretiu a poslednú časť grafu ostáva oblasť od maximálnej hodnoty sily po jej návrat, v ideálnom prípade, do nulovej hodnoty. Vtedy by malo dôjsť ku kompletnému odtrhnutiu súčiastky v danej vrstve

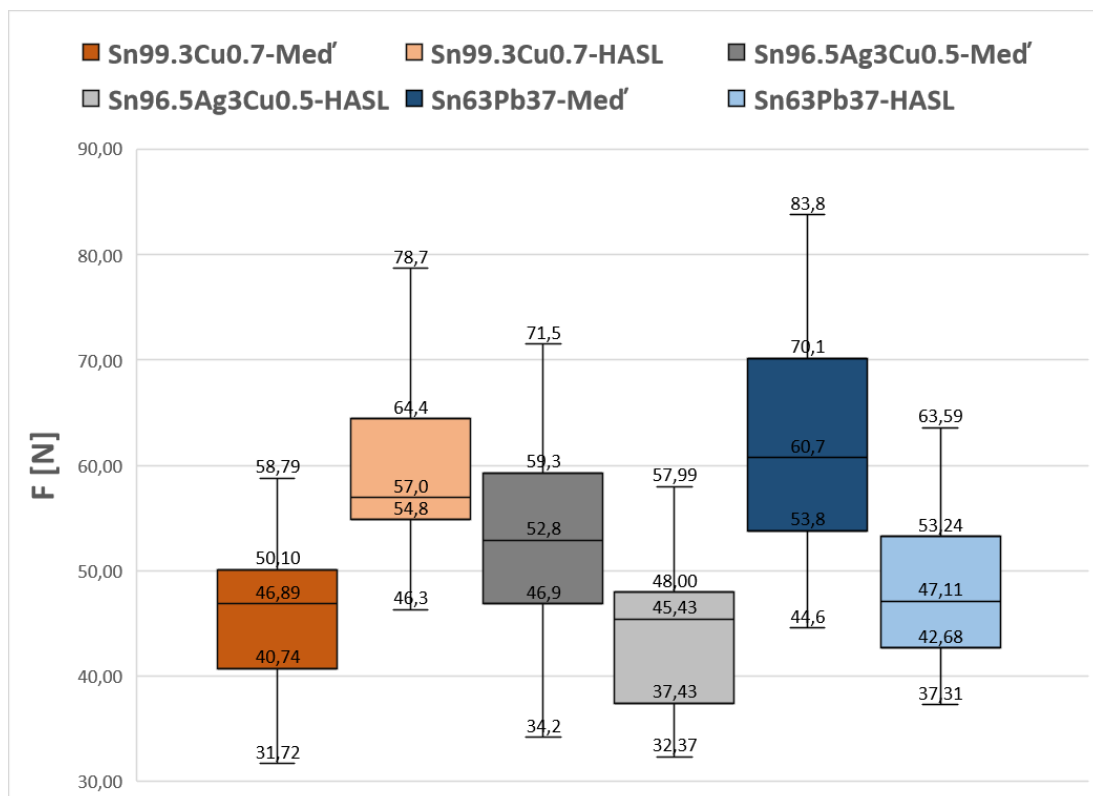
spoja. Príkladom je priebeh sily zmeraný na spájke Sn63Pb37 zachytený na obrázku X. Vidno na ňom, že po dosiahnutí maximálnej hodnoty krivka grafu skoro okamžite dosiahla nulovú hodnotu. Pri realizácii experimentu však viackrát došlo ku čiastočnému odtrhnutiu súčiastky, kedy sa uvoľnila len z jedného spájkovaného spoju a na druhom ostala visieť. Toto spôsobilo podobné deformácie krivky, aké v tejto oblasti vidno na priebehu sily spájky Sn96.5Ag3Cu0.5. Priebeh sily pre spájku Sn99.3Cu0.7 zase zachytáva prípad, kedy nedošlo ku návratu krivky do nulovej hodnoty vôbec.

Použitá pasta	Sn99.3Cu0.7		Sn96.5Ag3Cu0.5		Sn63Pb37	
Povrchovová úprava	Med'	HASL	Med'	HASL	Med'	HASL
F _{MAX} [N]	58,79	78,7	71,5	57,99	83,8	63,59
	58,44	73,0	70,2	56,67	76,9	59,31
	56,08	70,6	68,8	51,77	74,2	56,69
	55,22	64,9	64,5	51,27	74,2	56,20
	54,44	64,7	61,2	50,58	73,8	55,52
	50,66	64,6	60,2	48,34	70,4	55,35
	50,20	64,5	59,6	48,11	70,4	53,70
	49,81	64,2	58,3	47,67	69,5	51,83
	49,57	62,4	57,1	47,50	69,3	50,17
	49,27	60,7	56,8	46,50	65,9	49,41
	49,00	59,9	56,5	45,94	65,0	49,29
	48,34	58,6	53,9	45,86	63,6	49,24
	47,69	57,9	53,7	45,54	63,3	48,11
	47,12	57,2	53,0	45,54	61,9	47,21
	46,66	56,8	52,7	45,31	59,5	47,00
	45,64	56,4	50,9	43,91	58,1	45,46
	44,29	56,1	50,1	41,45	58,0	45,44
	42,43	55,5	50,0	41,03	57,6	45,15
	42,03	55,5	49,4	38,34	56,3	44,31
	41,31	55,0	48,5	38,23	55,8	44,21
	41,10	55,0	48,3	37,87	55,2	43,46
	40,62	54,8	46,4	37,28	53,3	42,42
	40,13	54,6	45,9	37,18	53,1	42,30
39,47	51,1	45,9	37,03	52,8	42,12	
37,95	49,7	44,8	35,60	51,3	41,86	
37,25	48,7	43,4	33,23	46,4	37,96	
33,44	46,4	39,9	32,83	46,0	37,57	
31,72	46,3	34,2	32,37	44,6	37,31	
Priemerná hodnota [N]	46,0	58,7	53,4	43,6	61,8	47,9
Smerodatná odchyľka [N]	7,0	7,5	8,8	6,8	9,9	6,6

Tabuľka 5 - maximálne hodnoty síl

Ďalším krokom bolo nájdenie hodnôt, pri ktorých došlo ku trvalému narušeniu spoja. Toto boli zároveň maximálne hodnoty, ktoré sa podarilo zachytiť. V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené zistené maximálne hodnoty síl. Boli z nich vypočítané priemerné hodnoty a aj smerodajné odchylky.

Podľa boxplotu môžeme skonštatovať, že na medenom povrchu jednoznačne najlepšie obstála spájka Sn63Pb37. Približne 50% nameraných síl má hodnotu viac 60 N, čo výrazne preyšuje spájku Sn96.5Ag3Cu0.5, tá má v tomto intervale iba asi 25% nameraných hodnôt síl. Pri spájke Sn99.3Cu0.7 na medenom povrchu neboli dokonca namerané žiadne hodnoty vyššie ako 60 N. Na povrchovej úprave HASL zaznamenala najvyššie namerané hodnoty spájka Sn99.3Cu0.7. Od hodnoty 57 N vyššie sa nachádza približne polovica jej hodnôt, pričom spájka Sn96.5Ag3Cu0.5 na rovnakej povrchovej úprave, má v tomto rozmedzí len jedinú hodnotu. Spájka Sn63Pb37 síce obstála na úprave HASL lepšie ako Sn96.5Ag3Cu0.5, ale aj tak sa nedá porovnávať so spájkou Sn99.3Cu0.7.



Obrázok 25 - boxplot dát z testu strihom

Testované vzorky boli ďalej preskúmané za účelom určenia typu odtrhu súčiastky z dosky. Pri prevažnej väčšine spojov, nezávisle od spájkovacej zliatiny a povrchovej úpravy DPS, sa na spájkovacej plôške zachovala spájka v plnom objeme. Jej tvar verne kopíroval súčiastku, ktorú predtým držala na doske. Preto môžeme zhodnotiť, že ku najväčšiemu počtu odtrhov došlo na rozhraní medzi súčiastkou a spájkou. Ku zvyšným zisteným odtrhom došlo s veľkou pravdepodobnosťou v objeme spájky, kedy bolo vidno, že časť spájky na spoji chýba. Takýchto prípadov bolo pri každej zliatine len niekoľko.

Vypočítané p-hodnoty všetkých kombinácií povrchových úprav dosiek so spájkami sú roztriedené v tabuľkách nižšie. Prvá tabuľka obsahuje porovnanie spájok na rozdielnych povrchových úpravách. Vidíme, že p-hodnoty sú omnoho menšie ako hladina významnosti 5 %, na ktorej boli testy vykonané. Toto platí pre všetky spočítané p-hodnoty. To znamená, že hodnoty mechanickej pevnosti sú štatisticky odlišné pre každú skúmanú kombináciu spájky a povrchovej úpravy a určenie kombinácie s či už najvyššou, alebo najnižšou hodnotou vierohodné.

	Sn99.3Cu0.7	Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn63Pb37
Med' vs HASL	2,01E-22	5,32E-17	4,18E-18

Tabuľka 6 – p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky

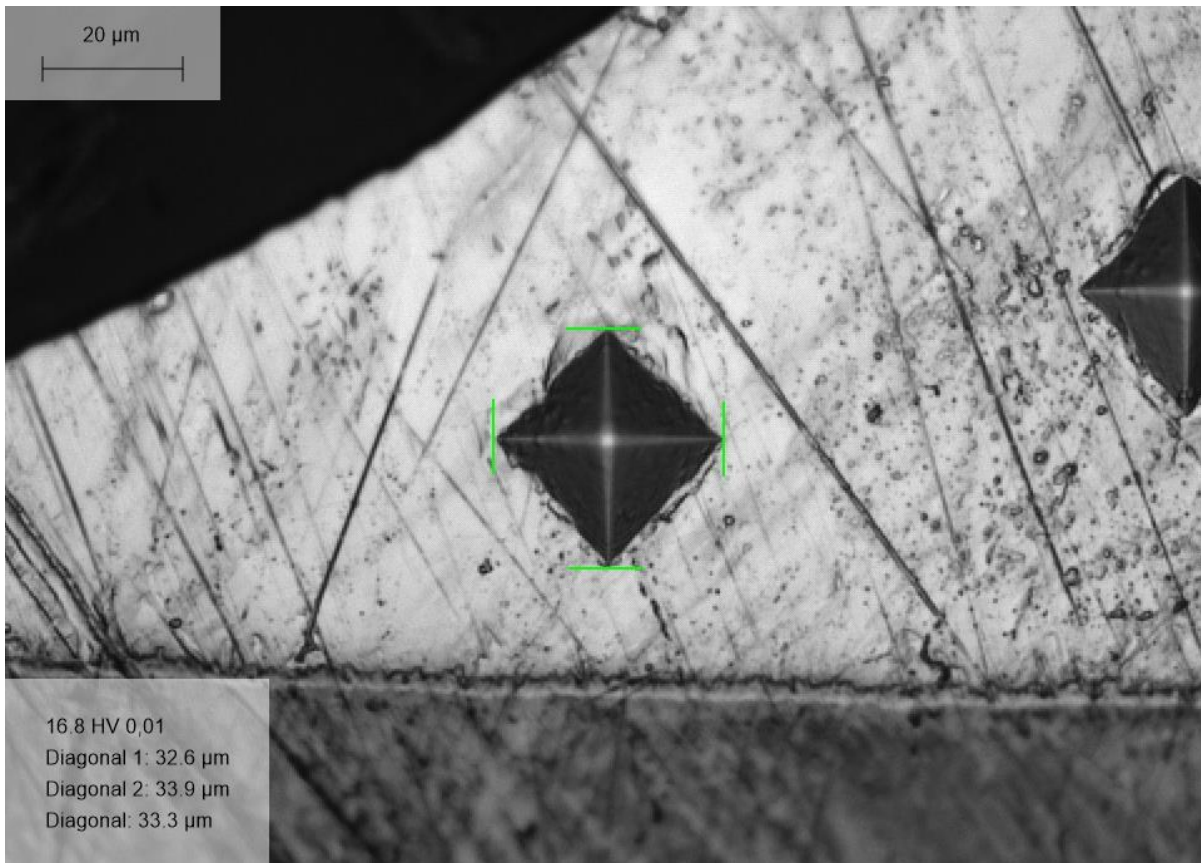
Druhá tabuľka obsahuje porovnanie rôznych spájok na rovnakých povrchových úpravách.

	Sn99.3Cu0.7 vs Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn99.3Cu0.7 vs Sn63Pb37	Sn96.5Ag3Cu0.5 vs Sn63Pb37
Med'	4,22E-16	5,12E-20	2,01E-17
HASL	8,17E-24	2,17E-23	5,03E-14

Tabuľka 7 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty

3.2 Vickersova skúška tvrdosti

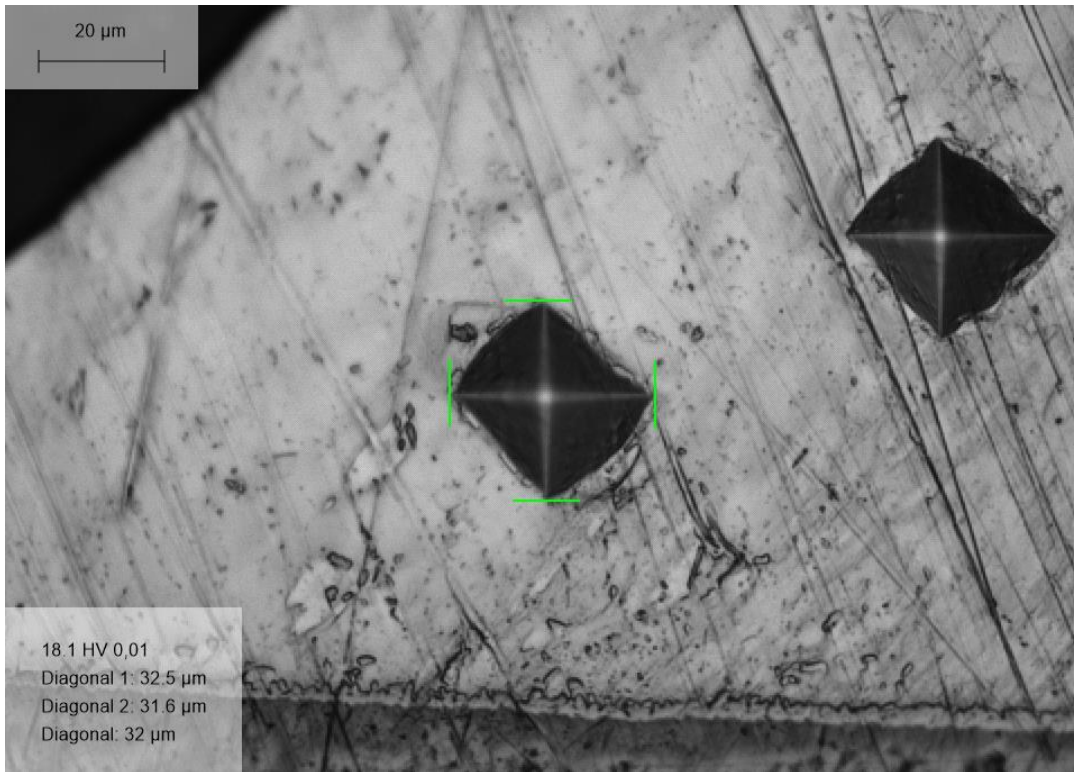
Nasledovné tri obrázky boli nasnímané pri skúške tvrdosti, z každej pasty jeden.



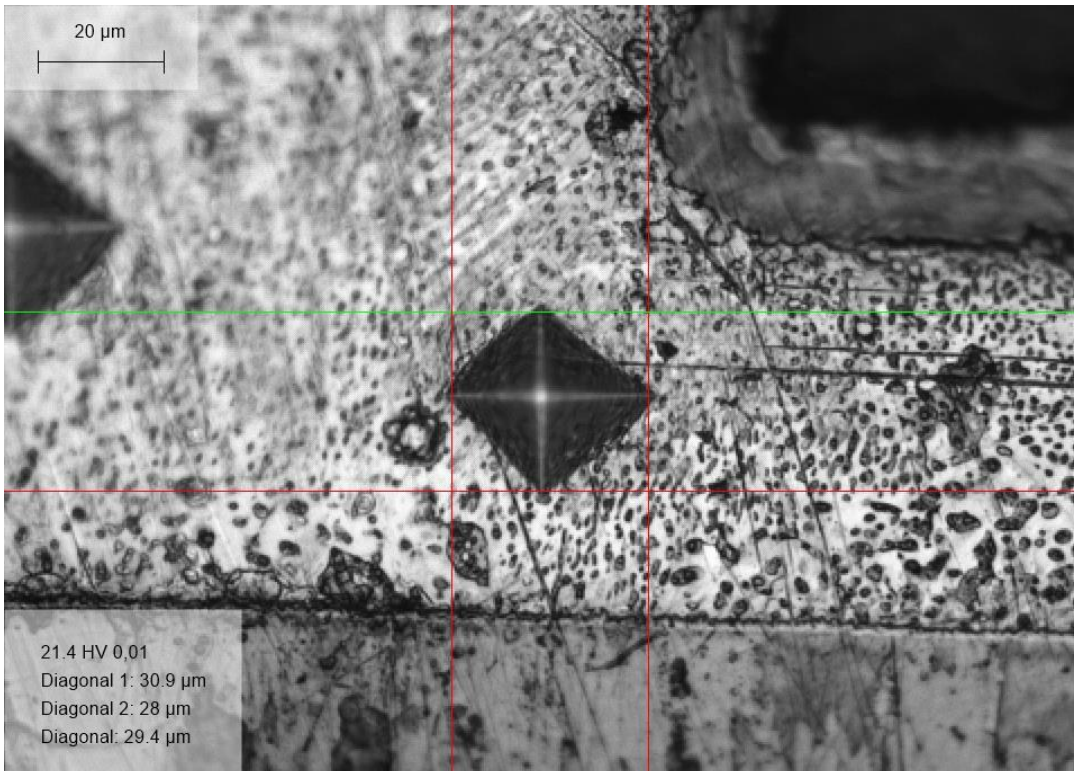
Obrázok 26 - spájka Sn99.3Cu0.7

Na obrázku 24 je možno vidieť prípad, kedy sa podarilo vytvoriť diamantovým hrotom priehľbinu pomerne štvorcovitého tvaru. Vďaka tomuto bol prístroj schopný sám identifikovať rohy vzniknutého útvaru a následne dopočítať hodnotu tvrdosti. V niektorých iných prípadoch bolo nevyhnutné využiť manuálne ostrenie obrazu a posúvanie čiar na určenie rohov útvaru.

Na obrázku 25 je pekne vidno intermetalickú vrstvu medzi spájkou a doskou plošného spoja. Na obrázku 26 je zobrazená spájka Sn63Pb37, má pórovitejšiu štruktúru, ako zvyšné dve spájky. Počas vykonávania tejto skúšky nebolo neobvyklé naraziť aj na voidy.



Obrázok 27 - spájka Sn96.5Ag3Cu0.5

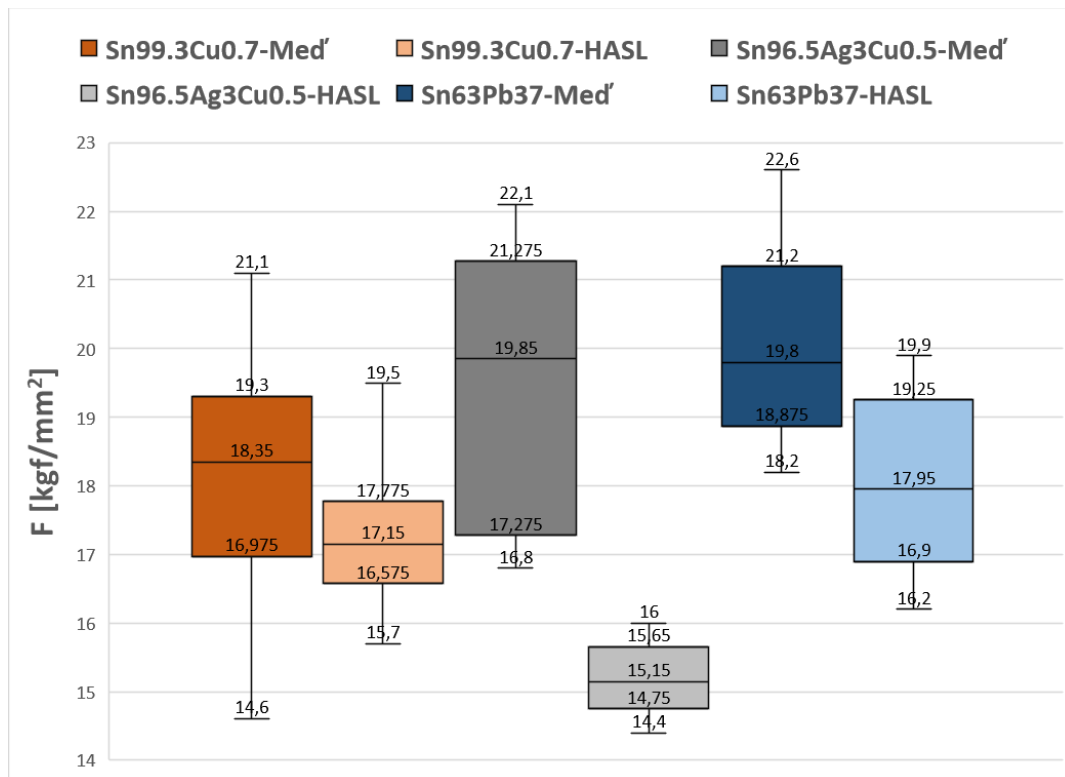


Obrázok 28 - spájka Sn63Pb37

V tabuľke 2 sú uvedené namerané hodnoty tvrdosti spájok. Aj tu sú doplnené o priemerné hodnoty a smerodatné odchýlky pre každú spájk.

Použitá pasta	Sn99.3Cu0.7		Sn96.5Ag3Cu0.5		Sn63Pb37	
Povrchovová úprava	Med'	HASL	Med'	HASL	Med'	HASL
Namerané hodnoty [kgf/mm ²]	18,9	17,8	16,8	14,9	21,5	16,9
	19	18,2	16,8	16	22,6	17,2
	20	15,7	18,1	14,4	19,1	19,9
	18,9	17,7	19,7	15,3	20,5	19,1
	19,4	16,8	19	15,5	18,7	17,6
	21,1	19,5	21,4	15,5	18,8	18,3
	16,3	17,2	17	14,4	19,7	16,9
	14,6	17,1	20,9	14,9	19,8	18,8
	16,8	16,8	20	14,7	21,4	16,3
	17,5	16,3	20,5	15	20,6	19,3
	17,8	17,4	22,1	15,7	18,2	16,2
	17,8	16,5	21,5	16	19,8	19,5
Priemerná hodnota [kgf/mm ²]	18,2	17,3	19,5	15,2	20,1	18,0
Smerodatná odchyľka [kgf/mm ²]	1,7	0,9	1,8	0,5	1,3	1,3

Tabuľka 8 - tvrdosti spájok



Obrázok 29 - boxplot dát tvrdosti spájok

Z boxplotu vyššie vidíme, že rozdiel v nameraných hodnotách jednotlivých spájok, nebol až tak významný ako pri predošlej mechanickej skúške. Napriek tomu, že povrchová úprava by nemala mať vplyv na výsledok, môžeme zhodnotiť, že spájky zaznamenávali nižšie hodnoty na úprave HASL. Na medenom povrchu sú hodnoty mediánu a aj maximálne hodnoty tvrdosti spájky Sn96.5Ag3Cu0.5 a Sn63Pb37 skoro identické. Výraznejšie sa líšia len v druhom kvartili a minimálnej hodnote. Spájka Sn99.3Cu0.7 na medi zaostáva za zvyšnými dvoma, ktorých približná polovica hodnôt sa nachádza v rozpätí 19,8 kfg/mm² a vyššie. V danom rozpätí má asi len štvrtinu zo všetkých hodnôt. Anomáliou tohto merania je spájka Sn96.5Ag3Cu0.5 na povrchu HASL, kedy dosiahla maximálnu hodnotu len 16 kfg/mm².

Spočítané p-hodnoty pre tvrdosti spájok so sebou priniesli neočakávaný výstup. Pri spájke Sn99.3Cu0.7 bola testom potvrdená rovnakosť jej tvrdostí na oboch povrchoch. V prípade zvyšných dvoch spájok sa však tento predpoklad nenaplnil, lebo p-hodnota vyšla menšia ako 5 %. Toto môže byť zapríčinené rozdielnym procesom difúzie častíc spájky a spájkovacej plôsky medzi medeným povrchom DPS a úpravou HASL. Pri dostatočne tenkej vrstve spájky by mohol tento rozdiel zapríčiniť zmenu vlastností spájky. V prípade povrchu HASL by mohla už existujúca intermetalická vrstva čiastočne brániť difúzii, preto v prípade medeného povrchu by bola difúzia výraznejšia. Ďalším faktorom, ktorý by mohol potenciálne ovplyvniť vlastnosť spájky, je vplyv povrchovej úpravy na prenos tepla v rámci spájkovaného spoja. Z tohto dôvodu by mohlo dôjsť ku odlišnému teplotnému profilu v objeme spájky oproti nastavenému profilu na peci.

	Sn99.3Cu0.7	Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn63Pb37
Med' vs HASL	0,0835	4,82E-06	0,0045

Tabuľka 9 - p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky

	Sn99.3Cu0.7 vs Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn99.3Cu0.7 vs Sn63Pb37	Sn96.5Ag3Cu0.5 vs Sn63Pb37
Med'	0,1309	0,0174	0,4979
HASL	9,55E-06	0,1972	3,10E-05

Tabuľka 10 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty

Nekonzistencia p-hodnôt sa prejavila aj druhej tabuľke. Napriek očakávaniu p-hodnôt nižších ako 5 %, aj tu sa v závislosti na povrchovej úprave vlastnosti spájok líšia. Hoci boli porovnané rozdielne spájky, v niektorých prípadoch boli výsledky zhodnotených akoby pochádzali z merania jednej a tej istej spájky.

Priebeh merania tvrdosti intermetalickej vrstvy sa od merania tvrdosti spájok líšil. Tvrdosť bola meraná takisto Vickersovou metódou, avšak na vyhodnotenie tvrdosti bolo potrebné využitie elektrónového mikroskopu. Je to preto, lebo intermetalická poskytuje výrazne menšiu plochu, v ktorej sa dá vyhotoviť priehlbina. Z tohto dôvodu nebolo možné stanovenie tvrdosti prístrojom DuraScan G5, ktoré nedokázalo dostatočne zaostriť na obrysy priehlbiny. S pomocou elektrónového mikroskopu, pri 6000-násobnom zväčšení, bolo možné zmerať uhlopriečky vpichov a následne dopočítať hodnoty tvrdosti podľa vzťahu uvedeného v predošlej časti práce. Urýchlovacie napätie bolo 15kV. Tabuľka vyššie obsahuje zmienené veľkosti uhlopriečky pre 12 vpichov pre každú spájkovú a povrchovú úpravu, okrem spájky Sn63Pb37 na medi. V tomto prípade bola intermetalická vrstva tak tenká, že s danými prístrojmi sa nepodarilo odmerať jej tvrdosť.

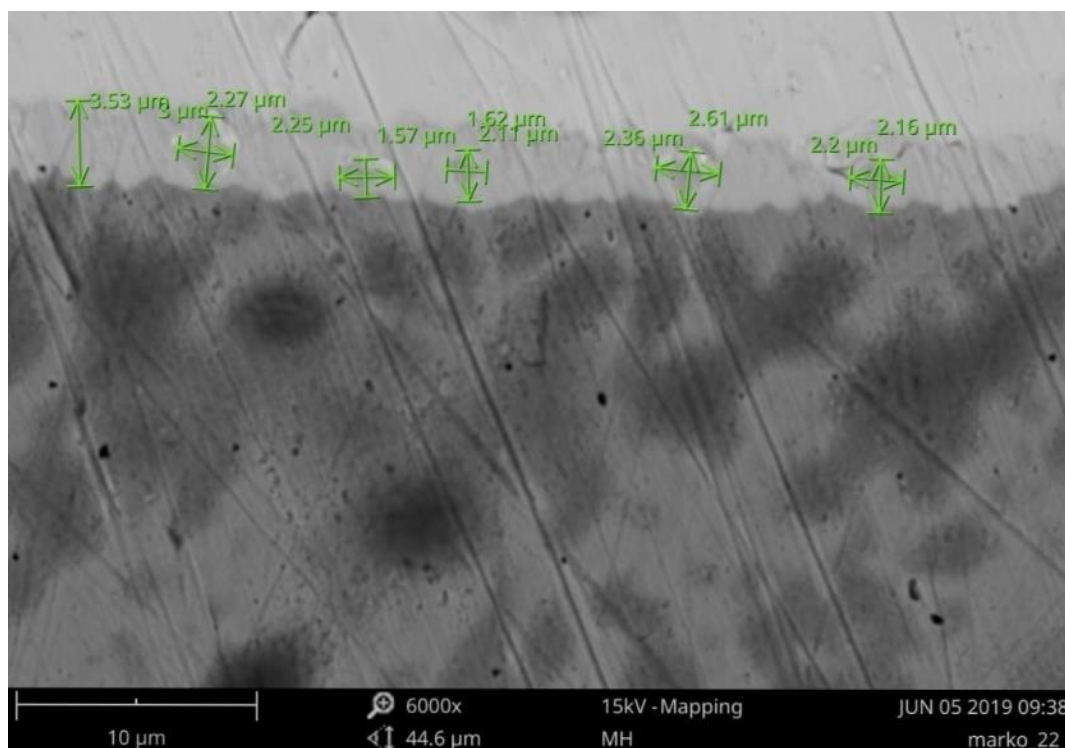
		Sn99.3Cu0.7		Sn96.5Ag3Cu0.5		Sn63Pb37	
		Med'	HASL	Med'	HASL	Med'	HASL
Uhlopriečky vpichov [μm]	1	2,47	2,94	1,62	2,1	-	1,47
		2,31	2,59	1,81	2,13	-	1,47
	2	1,83	1,91	2,25	1,99	-	1,86
		1,62	1,42	1,57	1,84	-	2,36
	3	1,83	2,32	1,62	2,2	-	2,46
		1,79	2,49	2,11	1,99	-	2,53
	4	2,44	2,06	2,36	2,28	-	2,68
		2,74	2,16	2,61	2,47	-	2,73
	5	1,65	1,47	2,2	2,02	-	1,71
		1,51	1,81	2,16	2,12	-	1,59
	6	2,28	1,81	2,3	1,55	-	1,59
		2,31	1,97	2,01	1,41	-	1,61
	7	1,34	2,35	2,12	1,56	-	2,11
		1,39	1,52	2,46	1,45	-	1,8
	8	1,55	2	2,06	2,33	-	2,43
		1,5	1,79	1,76	2,01	-	2,41
	9	2,4	1,61	2,4	1,99	-	2,3
		2,31	1,96	1,33	1,92	-	2,59
	10	2,32	1,66	2,3	1,85	-	2,25
		2,22	2,2	2,11	1,75	-	2,07
	11	1,82	2,16	2,71	1,93	-	1,58
		1,76	2,16	2,59	1,89	-	1,66
	12	1,52	1,89	1,77	1,48	-	1,44
		1,58	2,31	2,17	1,62	-	1,64

Tabuľka 11 - namerané uhlopriečky vpichov pri IMC

Použitá pasta	Sn99.3Cu0.7		Sn96.5Ag3Cu0.5		Sn63Pb37	
Povrchovová úprava	Med'	HASL	Med'	HASL	Med'	HASL
Namerané hodnoty [kgf/mm ²]	162,29	121,25	315,17	207,23	-	428,99
	311,53	334,39	254,10	252,78	-	208,22
	282,96	160,27	266,52	211,21	-	148,92
	138,19	208,22	150,12	164,34	-	126,69
	371,33	344,66	195,06	216,34	-	340,50
	176,00	259,51	199,61	423,21	-	362,11
	497,52	247,58	176,77	409,27	-	242,54
	398,60	258,14	254,10	196,86	-	158,29
	167,15	290,94	266,52	242,54	-	155,07
	179,90	248,87	190,66	286,11	-	198,69
	289,32	198,69	132,00	254,10	-	353,22
	385,85	210,20	238,86	385,85	-	390,88
Priemerná hodnota [kgf/mm ²]	280,1	240,2	220,0	270,8	-	259,5
Smerodatná odchylka [kgf/mm ²]	111,6	62,8	52,0	84,0	-	103,9

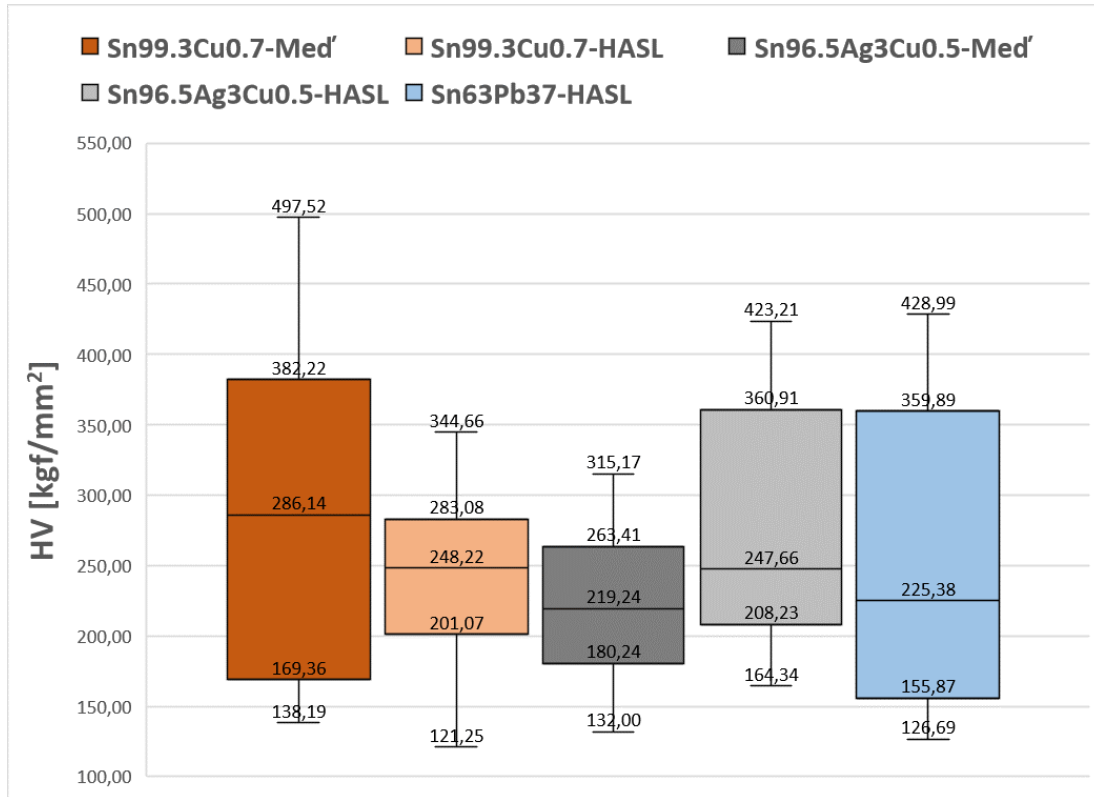
Tabuľka 12 - vypočítané hodnoty tvrdosti pri IMC

Tabuľka vyššie obsahuje dopočítané hodnoty tvrdosti pre IMC. Môžeme skonštatovať, že vyšli o rád vyššie ako hodnoty tvrdosti jednotlivých spájkov. Toto potvrdzuje fakt, že sú síce tvrdšie, ale na druhej strane ich to robí krehkejšími voči spájke.



Obrázok 30 - nameraná IMC pre Sn99,7Cu0,3

Podľa boxplotu nižšie môžeme povedať, že mediány jednotlivých variant sa líšia pomerne málo. Vyzerá, že napriek využitiu rôznych spájkovacích zliatin a povrchových úprav majú intermetalické vrstvy podobnú tvrdosť.



Obrázok 31 - boxplot dát tvrdosti IMC

	Sn99.3Cu0.7	Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn63Pb37
Med' vs HASL	0,2656	0,1438	-

Tabuľka 13 - p-hodnoty pre rôzne povrchové úpravy, rovnaké spájky

	Sn99.3Cu0.7 vs Sn96.5Ag3Cu0.5	Sn99.3Cu0.7 vs Sn63Pb37	Sn96.5Ag3Cu0.5 vs Sn63Pb37
Med'	0,1467	-	-
HASL	0,3285	0,6391	0,7238

Tabuľka 14 - p-hodnoty pre rovnaké povrchové úpravy, rozdielne pasty

V prípade štatistického testovania nameraných hodnôt tvrdosti intermetalických vrstiev dávajú všetky testy jednoznačnú odpoveď. Tieto testy boli taktiež realizované pri hladine významnosti 5 %. P-hodnoty testov všetkých dvojíc spájok a povrchových úprav vyšli o jeden rád vyššie ako stanovená hladina významnosti. Preto môžeme zhodnotiť, že sa podľa testov jedná o jednu a tú istú intermetalickú vrstvu, ktorá vznikla napriek rozdielnym spájkovacím zliatinám.

4 FINANČNÁ ANALÝZA

4.1 Metódy hodnotenia investícií

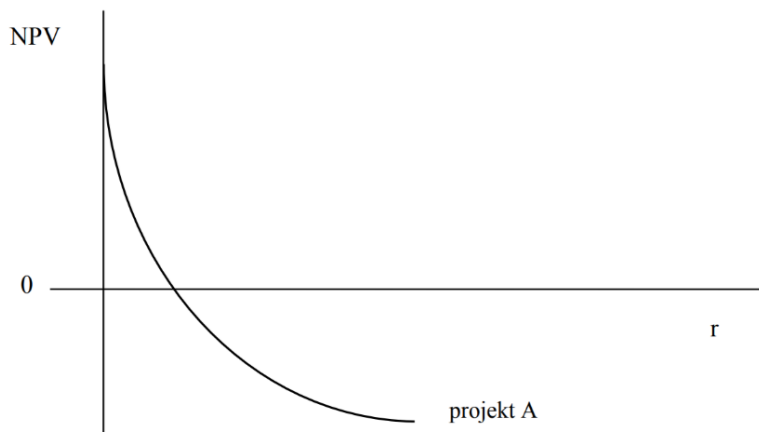
Pri výbere investičného projektu je potrebné dôkladne zvážiť, či je pre investora ekonomicky výhodný. Na tento účel slúžia metódy, ktoré analyzujú jeho parametre a vyhodnocujú ho. V nasledujúcom texte sú popísané metódy, ktoré sa uchytili v praxi pre ich dobrú výpovednú hodnotu a zároveň jednoduchosť, s ktorou sa s nimi pracuje.

4.1.1 NPV (Net Present Value)

Metóda čistej súčasnej hodnoty (NPV) je dobrou voľbou nielen z akademického pohľadu, pomocou nej môžeme zaručiť najvyššiu tržnú hodnotu firmy. Vďaka tomuto je zároveň maximalizované bohatstvo vlastníka firmy. Táto metóda narába s časovou hodnotou peňazí, berie do úvahy všetky hotovostné toky vrámci celej doby existencie projektu. Okrem toho sa pri nej uvažuje aj alternatívna investícia, ktorá je vyjadrená alternatívnym nákladom. Čistú súčasnú hodnotu vypočítame pomocou vzťahu: [28]

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} [28]$$

Hodnoty CF_0 až CF_n reprezentujú hotovostné toky v rokoch 0 až n, pričom n je počet rokov existencie projektu. Hotovostný tok CF_0 zvyčajne reprezentuje prvotné investície pri projekte, preto býva záporný. Alternatívny náklad je vyjadrený číslom r. Na obrázku nižšie je zobrazený graf funkcie NPV v závislosti na alternatívnom náklade. Podľa tejto metódy by mal byť projekt zrealizovaný v prípade, ak je hodnota $NPV > 0$ [28].

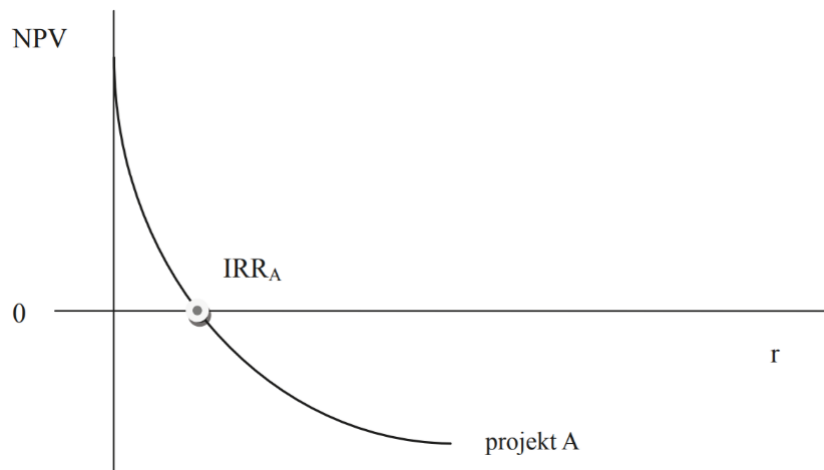


Obrázok 32 - graf čistej súčasnej hodnoty [7, p. 33]

4.1.2 IRR (Internal Rate of Return)

Metóda vnútorného výnosového percenta IRR sa odvíja od vyššie zmenej NPV. Každý investičný projekt môže byť charakterizovaný mierou výnosnosti. „Je to taková výnosová miera, pri ktorej se současná hodnota z budoucích očekávaných příjmů z investice rovná nutným kapitálovým výdajům na investici“ [28, p. 39]. Pre výpočet IRR je potrebné položiť vzťah pre NPV rovný nule a vyjadriť IRR [28].

$$0 = CF_0 + \frac{CF_1}{1+IRR} + \frac{CF_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+IRR)^n} \quad [28]$$

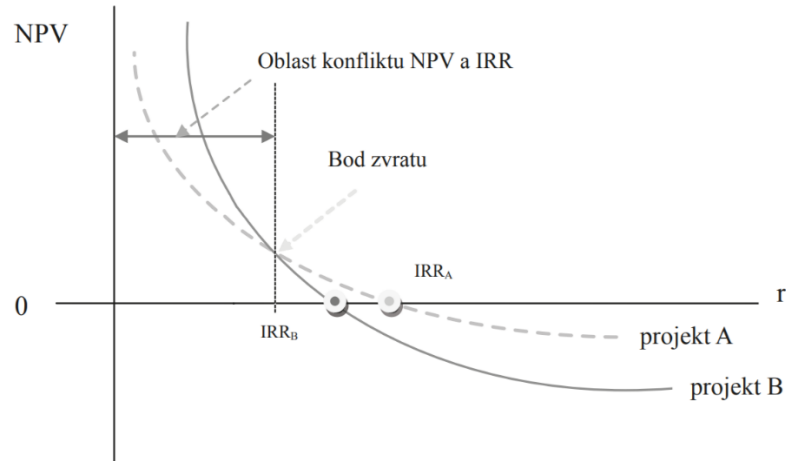


Obrázok 33 - vnútorné výnosové percento [7, p. 40]

Výpočtom IRR získame informáciu o vnútornej charakteristike projektu. Následne sa porovnajú hodnoty IRR s alternatívnym nákladom r . Ak platí, že $IRR > r$, tak sa odporúča daný investičný projekt realizovať. V porovnaní s NPV nieje alternatívny náklad zahrnutý priamo do vzťahu, ale pracuje sa s ním až po získaní IRR [28].

Ako aj pri NPV, tvar krivky závisí na vlastnostiach rovnice, z ktorej vychádzame. V prípade kvadratickej rovnice bude, napríklad, krivka pretínať os x v dvoch miestach. V tomto prípade sa jedná o nekonvenčné hotovostné toky a metóda poskytuje nejednoznačné riešenie. Preto je treba zobrať do úvahy aj to, či je hodnota samotného NPV v danej oblasti kladná alebo záporná. Jednoznačná odpoveď je daná oblasťou, kde nedochádza ku konfliktu medzi týmito dvoma metódami [28].

Pri rozhodovaní sa medzi viacerými, navzájom sa vylučujúcimi investičnými projektami, môže takisto dôjsť ku konfliktom metód.



Obrázok 34 - vzájomne sa vylučujúce investičné projekty [7, p. 41]

Obrázok vyššie ilustruje spomínanú situáciu konfliktu. Dôležitým bodom je bod zvratu, ktorý sa nachádza v priesečníku kriviek NPV projektu A a B. Naľavo od neho, vychádza podľa metódy NPV projekt B ekonomicky výhodnejší. V oblasti na pravej strane však vychádza projekt A výhodnejší. Z pohľadu metódy IRR sú obe strany ekvivalentné až do bodu IRR_B . Ľavá oblasť je teda oblasťou konfliktu. Tento spor sa rieši výberom toho investičného projektu, ktorý má pri daných alternatívnych nákladoch vyššiu hodnotu NPV. Je tomu tak preto, lebo cieľom podnikania má byť dosiahnutie najvyššej tržnej hodnoty firmy, čomu presne metóda NPV slúži [28].

4.1.3 RCF (Ročný ekvivalentný peňažný tok)

Aj táto metóda sa odvíja od metódy NPV. Je vhodná na porovnávanie vzájomne sa vylučujúcich projektov, ktoré majú počiatok v rovnakom roku. Výpočet vyjadruje vzťah uvedený nižšie. Vynásobením hodnoty NPV projektu X anuitným faktorom získame ročný ekvivalentný peňažný tok, pričom tento tok je rovnomerným rozdelením peňažných tokov vrámci celkovej doby existencie projektu. Anuitný faktor reprezentuje hodnota a . Hodnota q sa nazýva kvocient, zahŕňa v sebe diskont. Hodnota T je doba životnosti investičného projektu udávaná v rokoch. Diskont je vyjadrený hodnotou r [28].

$$RCF_X = a \cdot NPV_X = \frac{q^T \cdot (q - 1)}{q^T - 1} \cdot NPV_X = \frac{[1 + r]^T \cdot ([1 + r] - 1)}{[1 + r]^T - 1} \cdot NPV_X$$

4.2 Zhodnotenie vlastných projektov

V tejto časti práce sú rozobrané ekonomické hodnotenia za použitia vyššie zmienených metód vlastných projektov. Jadrom týchto projektov sú kombinácie dvoch povrchových úprav a troch spájkovacích pást, s ktorými som pracoval a skúmal ich mechanické vlastnosti. Následne boli prenesené do roviny simulácie výroby reálnych DPS. Takto som vytvoril šesť rôznych investičných projektov, ktoré som navzájom porovnal na základe odhadu ich nákladov.

4.2.1 Popis simulácie výroby

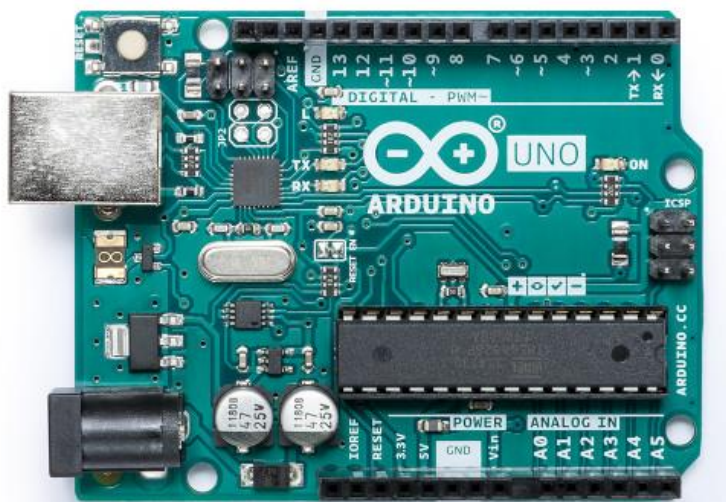
Na začiatku som stanovil podobu výroby. Tá zahŕňa dvoch pracovníkov, ktorých hodinová mzda je 250 korún. Dvaja pracovníci zaručia pomerne efektívnu výrobu v prípade nášho výberu a počtu zariadení. Kým jeden pracovník by bol konštantne vyťažený a nikdy by nevyprodukoval toľko dosiek čo dvaja, pri troch pracovníkoch by už nemohol každý vykonávať užitočnú prácu v každom okamihu pracovnej doby. Dĺžka pracovného času je štandardne 8 hodín, pričom pauza na obed povinná zo zákona trvá hodinu. Počet pracovných dní vrámci jedného roku som určil na 250. Samotnú pracovnú dobu 8 hodín som skrátil o čas potrebný na úkony, pri ktorých sa dosky neprodukuje. Medzi ne patrí napríklad prvotné nastavenie šablónovej tlače, rozohriatie pretavovacej pece, jej chladnutie na konci dňa, uskladnenie vyprodukovaných dosiek, čistenie a údržba zariadení a iné. Týmto som získal čas (približne 6,5 hodiny), ktorý slúži čisto na kontinuálnu výrobu. Počas nej pracovník A nanáša spájkovaciu pastu na dosky pomocou šablónovej tlače. Pracovník B následne osádza dosky súčiastkami určenými na povrchovú montáž a vkladá ich do pretavovacej pece. Vzhľadom na výrazne dlhšiu dobu trvania osadenia dosky pracovníkom B oproti dobe naniesenia pasty na dosku pracovníkom A, získava pracovník A čas na dodatočné osadenie dosky súčiastkami s drôtovými vývodmi a ich ručné spájkovanie.

Zariadenia + Príslušenstvo	
Šablónová tlač	49 470,00 CZK
Šablóna	1 168,50 CZK
Stierka	1 500,00 CZK
SMT Manipulator	54 450,00 CZK
Pretavovacia pec	260 150,00 CZK
Spájkovacia stanica	7 230,00 CZK
Čistiace potreby a ochranné rukavice	900,00 CZK
celkom	374 868,50 CZK

Tabuľka 15 - náklady na počiatočnú investíciu

Druhým krokom bolo určenie referenčnej dosky, ktorá bola základom odhadovania nákladov. Na tento účel poslúžila populárna programovateľná doska Arduino Uno REV3. Zo svojej rodiny produktov je najčastejšie kupovaná a zároveň aj najlepšie zdokumentovaná. Slúži predovšetkým na vzdelávacie účely žiakom a entuziastom.

Spôsobom zmieneným v prvom odstavci, za použitia referenčnej dosky, by podľa odhadu bolo možné vyprodukovať približne 19950 dosiek za rok. Od tohto čísla sa ďalej odvíjajú všetky ostatné náklady na výrobu.



Obrázok 35 - Arduino Uno REV3 [29]

Pomocou rozmerov referenčnej dosky bolo možné naceniť výrobu samotných dosiek, ktorých povrch bol upravený technológiou OSP alebo HASL. Medzi ďalšími parametrami, ktoré ovplyvnili výslednú cenu jednej dosky bol počet vrstiev (v našom prípade dvojvrstvová), hrúbka dosky (1,55 mm), hrúbka plátovania medi (18 μm) a priemer vŕtaných dier ($>0,5$ mm). Okrem toho cenu ovplyvnil aj počet zakúpených dosiek (1665 kusov za mesiac) a doba ich výroby (4 týždne). Táto doba výroby bola zvolená preto, lebo sa pri nej znížila výsledná cena jednej dosky. Z tohto dôvodu sa dosky nakupujú v mesačných intervaloch. Výsledná cena jednej dosky vyšla v prípade povrchovej úpravy HASL na 37,6 koruny a v prípade OSP na 29,8 koruny. Vynásobením týchto cien počtom vyprodukovaných dosiek za rok som získal ročný náklad na výrobu samotnej dosky.

Objem spotrebovanej spájky bol odhadovaný na základe počtu a typov súčiastiek obsiahnutých na referenčnej doske. Doska obsahuje nielen spájkovacie plošky určené pre povrchovú montáž, ale aj diery určené na osadzovanie súčiastkami s drôtovými vývodmi. Preto bolo nutné do kalkulácie nákladov zahrnúť aj náklad na spájku vo forme drôtu a čas navyše, ktorý si vyžaduje ručné spájkovanie takýchto súčiastiek. Odhadnutý objem spájkovacej pasty spotrebovanej na jednu dosku vyšiel približne na $15,6 \text{ mm}^3$ a spájke vo forme drôtu na $132,5 \text{ mm}^3$. Opať aj tu, vynásobením týchto hodnôt počtom vyprodukovaných dosiek za rok som získal odhad spotrebovaného objemu oboch typov spájok. Na základe neho som dopočítal aj ročný náklad na spájky. Ostatné údaje sú uvedené v dvoch tabuľkách nižšie.

Spájkovacie pasty (500g balenie)	
<i>zliatina Sn99.3/Cu0.7</i>	
cena za kus (kč)	3 025,00 CZK
objem balenia (mm^3)	100000,00
potrebných balení na rok (ks)	4,00
<i>zliatina Sn96.5/Ag3/Cu0.5</i>	
cena za kus (kč)	2 904,00 CZK
objem balenia (mm^3)	100000,00
potrebných balení na rok (ks)	4,00
<i>zliatina Sn63/Pb37</i>	
cena za kus (kč)	2 178,00 CZK
objem balenia (mm^3)	86400,00
potrebných balení na rok (ks)	4,00

Tabuľka 16 - náklad na spájkovacie pasty

Spájky vo forme drôtu	
<i>zliatina Sn99.3/Cu0.7 (800g)</i>	
cena za kus (kč)	1 090,00 CZK
objem balenia (mm^3)	180000,00
potrebných balení na rok (ks)	15,00
<i>zliatina Sn96.5/Ag3/Cu0.5 (750g)</i>	
cena za kus (kč)	1 936,00 CZK
objem balenia (mm^3)	168750,00
potrebných balení na rok (ks)	16,00
<i>zliatina Sn63/Pb37 (800g)</i>	
cena za kus (kč)	847,00 CZK
objem balenia (mm^3)	146738,70
potrebných balení na rok (ks)	18,00

Tabuľka 17 - náklad na spájku vo forme drôtu

Poslednou naceňovanou zložkou produkovaných dosiek sú samotné osadzované súčiastky. Pri odhade nákladov na ne, som vždy vyhľadal priamo cenu danej súčiastky, alebo ak to nebolo možné, tak cenu podobnej súčiastky. Následne som ich ceny sčítal a vyšiel mi náklad na súčiastky na jednu vyprodukovanú dosku (približne 88,7 koruny). Táto hodnota je konštantná pre všetky investičné projekty.

Vzhľadom na rozdielne teplotné profily, pri ktorých jednotlivé spájky pretavovali, som do celkových ročných nákladov započítal aj cenu spotrebovanej energie pretavovacou pecou. Vychádzal som z vlastného merania spotreby pece. Premeral som dva teplotné profily, pričom jeden bol využitý pri olovnatej spájke a druhý pri dvoch bezolovnatých spájkach. Pri každom z nich som zaznamenal približne 700 hodnôt okamžitého výkonu. Z nich som dopočítal ich priemer a previedol na kWh. Pri olovnatej spájke vyšla priemerná spotreba energie pece na 9,3 kWh za deň a pri bezolovnatých spájkach na 11,6 kWh za deň. Tento rozdiel je zapríčinený nižšou teplotou topenia olovnatej spájky.

4.2.2 Výsledok zhodnotenia projektov

Všetky ročné náklady spomenuté v predošlej kapitole práce som sčítal a vytvoril kalkuláciu ročných ekvivalentných peňažných tokov na celú dobu životnosti projektov. Do nákladov boli ešte pridané náklady na príslušenstvo potrebné pri práci, technický benzín na čistenie zariadení od pasty a ochranné rukavice. Okrem toho som odhadol ceny opráv zariadení hodnotou 40 000 CZK, pričom sa budú vykonávať každé tri roky.

Následne som vypočítal čistú súčasnú hodnotu pre každý projekt a pomocou nej ročný ekvivalentný peňažný tok. Ten som predelil počtom dosiek vyrobených za rok a vyšiel mi finálny údaj, jednotková cena na výsledný produkt. Tieto údaje sú zobrazené v tabuľke nižšie.

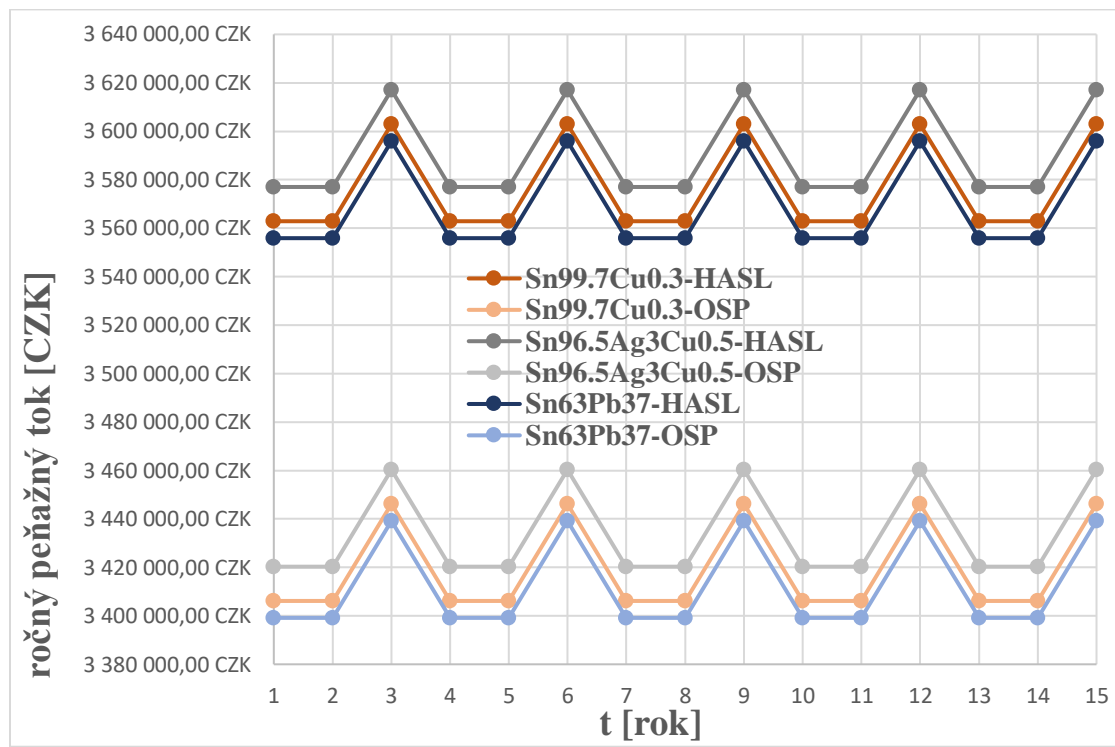
		NPV	RCF	Jednotková cena na dosku
Sn99.3Cu0.7	HASL	41 808 546 CZK	3 502 159 CZK	175,55 CZK
	OSP	39 991 986 CZK	3 349 992 CZK	167,92 CZK
Sn96.5Ag3Cu0.5	HASL	41 972 455 CZK	3 515 889 CZK	176,24 CZK
	OSP	40 155 895 CZK	3 363 722 CZK	168,61 CZK
Sn63Pb37	HASL	41 727 559 CZK	3 495 375 CZK	175,21 CZK
	OSP	39 910 999 CZK	3 343 208 CZK	167,58 CZK

Tabuľka 18 - prehľad NPV, RCF a jednotkových cien na dosku pre každý projekt

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7
počítacná investícia	374 868,50 CZK							
mzdy pracovníkov		1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK
výroba dosiek		751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK
spájkovacia pasta		12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK
spájka vo forme drôtu		16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK
sučiasťky		1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK
energie		12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK
príslušenstvo		900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK
opravy zariadení		40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK
celkom	374 868,50 CZK	3 562 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 602 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 602 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK
Rok	8	9	10	11	12	13	14	15
mzdy pracovníkov	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK	1 000 000,00 CZK
výroba dosiek	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK	751 380,00 CZK
spájkovacia pasta	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK	12 100,00 CZK
spájka vo forme drôtu	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK	16 350,00 CZK
sučiasťky	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK	1 769 565,00 CZK
energie	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK	12 586,00 CZK
príslušenstvo	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK	900,00 CZK
opravy zariadení	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK	40 000,00 CZK
celkom	3 562 881,00 CZK	3 602 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 602 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 562 881,00 CZK	3 602 881,00 CZK

Tabuľka 19 - výpočet ročných peňažných tokov za životnosť projektu (Sn99,3Cu0,7 + HASL)

Vzorový výpočet ročných peňazných tokov je uvedený na obrázku na predchádzajúcej strane, jedná sa o kombináciu spájkovacej pasty Sn99,7Cu0,3 a povrchovej úpravy HASL.



Obrázok 36 - vývoj peňažných tokov v čase

Najvýraznejšie cenový rozdiel medzi doskami vyšiel medzi variantmi s odlišnými povrchovými úpravami. Vidíme, že rozdiel nákladov na samotné spájky a energie s nimi spojené zapríčinil cenový rozdiel medzi výslednými doskami rádovo v desatinách halierov. Aj takýto malý rozdiel, by z dlhodobého hľadiska pri väčšom objeme produkcie mohol byť vo výsledku významný.

Podľa očakávaní, spájka Sn63Pb37 vyšla najlacnejšie v prípade oboch povrchových úprav. Vzhľadom na skutočnosť, že dosiahla najlepšie výsledky aj v oboch mechanických skúškach, by bola ideálnym kandidátom spomedzi testovaných zliatin do praxe. Toto potvrdzuje teoretické poznatky uvedené v predošlých častiach práce, podľa ktorých sa bezolovnatým zliatinám stále nepodarilo vyrovnáť všetkými vlastnosťami tým olovnatým. Zákaz olova v spájkovaní však znemožňuje využitie tejto spájky a preto je potrebné zvážiť zvyšné dve zliatiny.

Podľa oboch mechanických testov záleží aj na povrchovej úprave dosky. Oba sa zhodnú v tom, že lepšie vlastnosti na medenom povrchu preukázala spájka Sn96.5Ag3Cu0.5 a na úprave

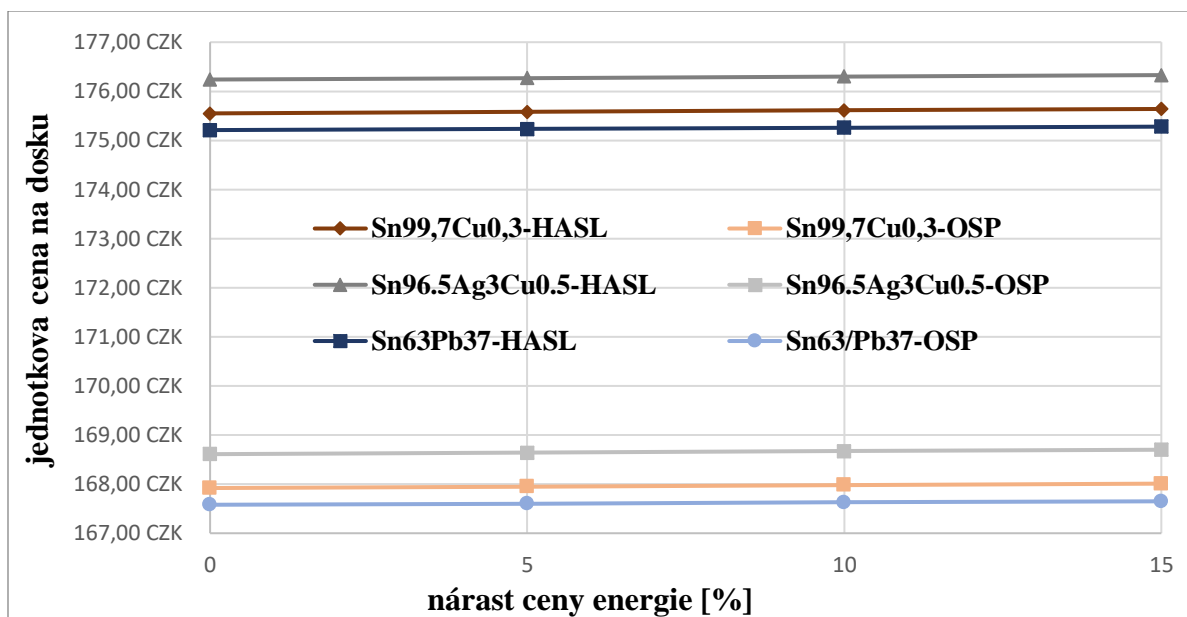
HASL zase $Sn99,7Cu0,3$. V našom prípade môžeme zanedbať zmenu vlastností povrchov DPS vplyvom dlhšieho skladovania, lebo nikdy nám nebudú nevyužité stáť dlhšie ako mesiac. Vďaka tejto krátkej dobe skladovania môžeme kombinácie spájk hodnotiť predovšetkým na základe ekonomického a mechanického hľadiska. Ekonomicky výhodnejšie vyšiel povrch OSP.

Napriek tomu, že je úprava HASL výrazne drahšia ako OSP, boli v prípade spájky $Sn96.5Ag3Cu0.5$ zistené lepšie mechanické vlastnosti práve na medenom povrchu. Toto robí kombináciu spájky $Sn96.5Ag3Cu0.5$ a úpravy OSP jednoznačne lepšou voľbou ako variant $Sn96.5Ag3Cu0.5$ a úpravy HASL. V prípade spájky $Sn99,7Cu0,3$ je situácia mierne komplikovanejšia, lebo pri teste strihom preukázala lepšie vlastnosti na povrchovej úprave HASL a pri teste tvrdosti na medenom povrchu.

S väčším ohľadom na kritérium mechanické, by som určil najvhodnejšieho kandidáta na zastúpenie olovnatej spájky, kombináciu spájky $Sn99,7Cu0,3$ na povrchovej úprave HASL. Je to z toho dôvodu, že v teste strihom obstála jednoznačne lepšie ako $Sn96.5Ag3Cu0.5$. V teste tvrdosti za touto spájkou síce mierne zaostáva, ale predpokladám, že test strihom reprezentuje namáhanie, ktoré je skutočnému namáhaniu v bežnej praxi podobnejšie ako to, v teste tvrdosti. Ak by som sa mal rozhodnúť pre najlepšiu voľbu predovšetkým na základe finančného zhodnotenia, tak by som vybral variant $Sn96.5Ag3Cu0.5$ a úpravy OSP. Ten obstál v teste strihom na druhom mieste a v skúške tvrdosti dokonca na prvom, vďaka čomu je vhodný aj po tejto stránke.

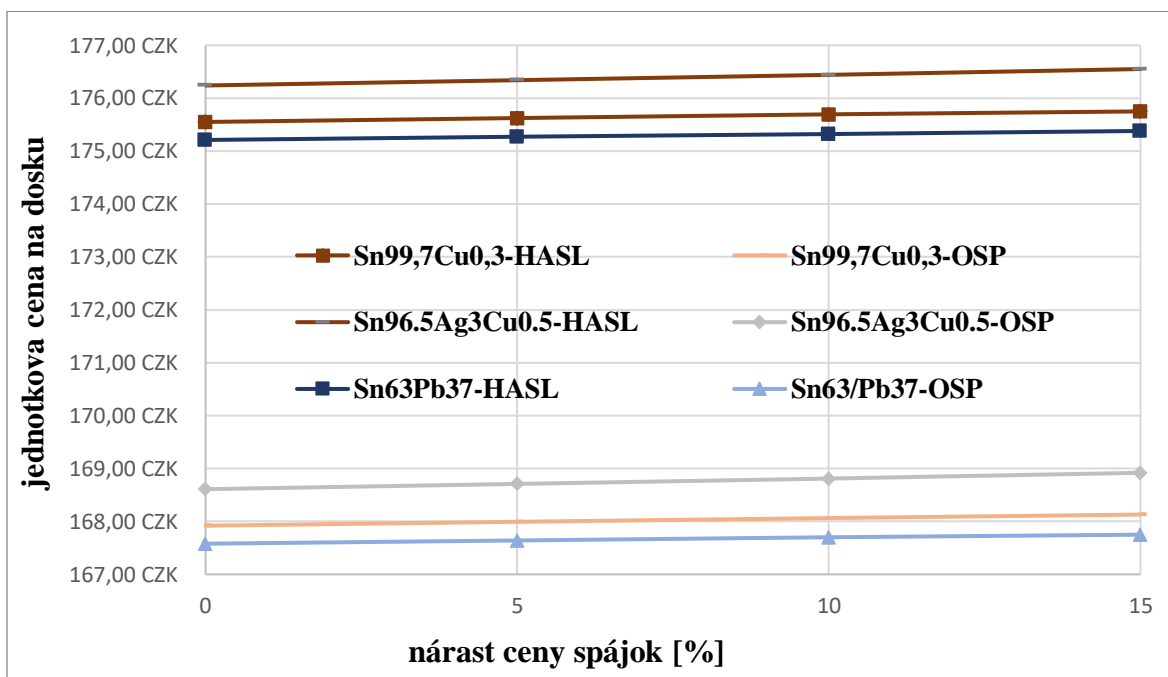
Ďalej som skúmal situácie, pri ktorých by došlo ku zmene určitých nákladov na výrobu. Vplyv týchto zmien na jednotkovú cenu výslednej DPS ilustrujú obrázky 34, 35 a 36. Konkrétne som spočítal, ako sa prejaví zdrazenie energie, spájk a do kontrastu k týmto dvom som zaradil zdrazenie pracovnej sily.

Obrázok 34 reprezentuje nárast ceny energie. Vzhľadom na to, že z celkového ročného peňažného toku tvoria energie len veľmi malú zložku, sa aj zvýšené náklady spojené s nimi prejavajú len málo. Zdrazenie 5 % sa premietne do hodnoty približne 3 halierov pre každú kombináciu. Túto skutočnosť vidno aj z obrázku, priebehy zaznamenávajú len veľmi pomalý nárast.



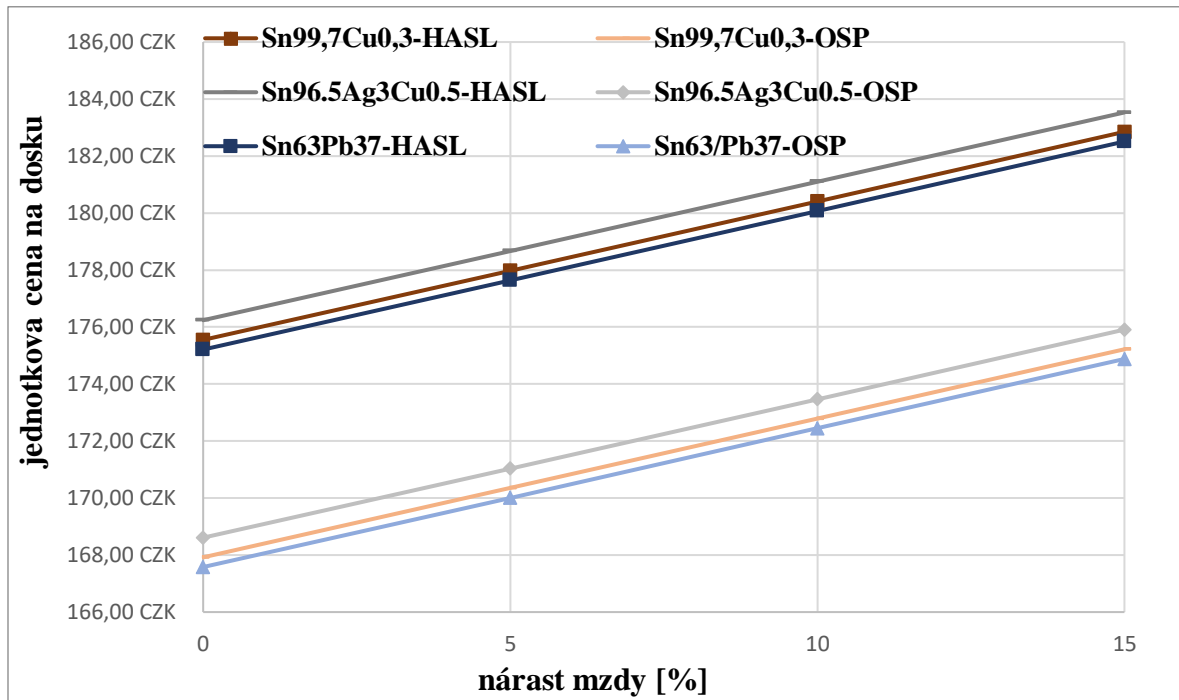
Obrázok 37 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene ceny energie

Na obrázku 35 je vyobrazené zdraženie spájkovacích zliatin. Spájky tvoria z ročného peňažného toku zložku, ktorá je v prípade spájky $Sn99,7Cu0,3$ približne 2-krát väčšia ako zložka energie. Spájka $Sn96.5Ag3Cu0.5$, ktorá je výrazne drahšia, je približne 3-krát väčšia. Napriek tomu nemusí byť ani zdraženie týchto položiek aj o 15 % pre potenciálneho investora zastrašujúce. Stále sa hýbeme rádovo v jednotkách halierov.



Obrázok 38 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene ceny spájok

Na poslednom obrázku 36 je zaznamenaný najväčší nárast jednotkovej ceny DPS zo skúmaných zložiek ročného finančného toku. Hodnota miezd pracovníkov je o dva rády vyššia ako cena energie, či spájkovacích zliatin. Preto sa jej zvýšenie aj najviac prejaví na zmene jednotkovej ceny.



Obrázok 39 - závislosť jednotkovej ceny dosky na zmene mzdy

Z predošlých troch grafov vyplýva, že najvýraznejší nárast jednotkovej ceny za DPS zapríčiní zdraženie pracovnej sily, prípadne súčiastiek, ktoré majú ešte väčší percentuálny podiel na ročnom ekvivalentnom toku. Zdraženie energií a spájok 15 % nám zdvihne ročný peňažný tok o približne 1 800 a 4 000 korún. Zdraženie pracovnej sily približne o 150 000 korún. Preto je zvýšenie nákladov prvých dvoch položiek skoro zanedbateľné.

ZÁVER

Na začiatku práce bola popísaná teória, ktorá priblížila problematiku spájkovania vo všeobecnosti. Počas jej písania som sa sám obohatil o množstvo poznatkov. Dôležitými časťami boli povrchové úpravy DPS a spájkovacie zliatiny, od ktorých sa odvíjali ďalšie časti práce. Okrem jednotlivých aspektov spájkovania ako procesu, bola ďalej popísaná realizácia mechanických skúšok výsledných vzoriek.

Počas tohto semestra sa mi úspešne podarilo vytvoriť vzorky pozostávajúce z kombinácií troch rôznych spájkovacích pást a dvoch povrchových úprav. V experimentálnej časti som tieto varianty podrobil mechanickému testovaniu. Overil som teoretické poznatky o vynikajúcich parametroch olovnatých spájok v porovnaní s bezolovnatými. Tým sa ukázalo, že tie bezolovnaté čaká ešte dlhý vývoj, kým sa vo všetkých aspektoch vyrovnajú olovnatým a preto je to aj naďalej aktuálnym problémom modernej elektrotechnike. Neočakávaným zistením bola skutočnosť, že vlastnosti spájky a tým pádom aj výsledného spoja, by mohli pri určitých podmienkach byť ovplyvnené rozdielnou povrchovou úpravou DPS. Ku ich zmene by malo prísť pri pretavení.

V teste strihom obstála po olovnatej spájke Sn63Pb37 najlepšie spájka Sn99.3Cu0.7 na úprave HASL. Medián odmeraných hodnôt na tejto úprave dosiahol hodnotu 57 N. Na medi klesol o približne 10 N. V skúške tvrdosti naopak viedla spájka Sn96.5Ag3Cu0.5 na medenom povrchu a dokonca sa vyrovnala olovnatej. V tomto prípade bol zaznamenaný takmer štvrtinový pokles mediánu z hodnoty 19,85 kgf/mm² v porovnaní s úpravou HASL.

V poslednej časti práce som vytvoril model výrobného procesu, ktorý zdieľal niektoré pracovné podmienky s prostredím, v ktorom som sám pracoval. Takto som bol schopný ekonomicky porovnať varianty medzi sebou. Ekonomicky najvýhodnejšie vyšiel z bezolovnatých spájok variant Sn99.3Cu0.7 na úprave OSP, ktorého jednotková cena na dosku je 167,92 koruny. Cenový rozdiel medzi variantmi s rozdielnou povrchovou úpravou vyšiel 7,63 koruny.

Poznatky vyplývajúce z experimentálnej časti by bolo pre mňa určite zaujímavé overiť ďalšou sériou meraní. Týmto by bolo možné závery vychádzajúce z experimentálnej časti buď potvrdiť, alebo vyvrátiť. Okrem toho by mohlo byť taktiež prínosom zaradiť do testovacej skupiny ďalšie spájkovacie zliatiny a povrchové úpravy DPS.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] K. A. S. Karl J. Puttlitz, *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. CRC Press, 2004.
- [2] Juraj Ďurišin, Alena Pietriková, and Pavel Mach, *Diagnostika a optimalizácia pre vodivé spájanie v elektronike*. Praha: Technická Univerzita v Košiciach, 2010.
- [3] “Plosne_spoje_vyvoj.pdf.” [Online]. Available: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76875/mod_resource/content/1/Plosne_spoje_vyvoj.pdf. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [4] “Postup při výrobě plošných spojů.” [Online]. Available: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76874/mod_resource/content/1/Vyroba_plosnych_spoju.pdf. [Accessed: 03-Jan-2020].
- [5] “Povrchové úpravy desek plošných spojů.” [Online]. Available: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [6] Yawata Shigefumi Nishimura, Takatsuki Masao Fukuda, and Higashiosaka Yoshiji Shimizu, “BATH FOR IMMERSION PLATING TN-LEAD ALLOYS,” 5160422.
- [7] Y. Bin, L. Yudong, and L. Daojun, “Key failure modes of solder joints on HASL PCBs and root cause analysis,” in *2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2013, pp. 742–745, doi: 10.1109/ICEPT.2013.6756572.
- [8] “OSP – organic solder preservatives.” [Online]. Available: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6248/osp-organic-solder-preservatives>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [9] “Organic Solderability Preservative (OSP) - PCB Manufacturing Information -PCBway.” [Online]. Available: https://www.pcbway.com/blog/PCB_Manufacturing_Information/Organic_Solderability_Preservative__OSP_.html. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [10] Petr Veselý, “Risk analýza pájení čipů,” Bakalárska práca, České Vysoké Učení Technické, Praha, 2015.
- [11] Katsuaki Suganuma, “Advances in lead-free electronics soldering,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 5, no. 1, pp. 55–64, Jan. 2001, doi: 10.1016/S1359-0286(00)00036-X.
- [12] C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, and L. Wang, “Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 44, no. 1, pp. 1–44, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.mser.2004.01.001.
- [13] Ivan Szendiuch, “Pájení a bezolovnaté pájky.” [Online]. Available: <https://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>. [Accessed: 03-Jan-2020].
- [14] L. J. Caballero, “Contact Definition in Industrial Silicon Solar Cells,” in *Solar Energy*, 2010.
- [15] Martin Kozák, “Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek na vznik dutin v pájených spojích,” Diplomová práca, České Vysoké Učení Technické, Praha, 2018.

- [16] “Pájení.pdf.” [Online]. Available: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76879/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [17] Viliam Ruža, *Pájení*. Praha: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1988.
- [18] P. L. Tu, Y. C. Chan, and J. K. L. Lai, “Effect of intermetallic compounds on the thermal fatigue of surface mount solder joints,” *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, vol. 20, no. 1, pp. 87–93, Feb. 1997, doi: 10.1109/96.554534.
- [19] O. Krammer, T. Hurtony, and Á. Hadarits, “Investigating intermetallic layer growth in Innolot solder alloy,” *2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/ISSE.2017.8000920.
- [20] “Theory of hardness testing.” [Online]. Available: <https://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/hardness-know-how/theory-of-hardness-testing/vickers-52/advantages-and-disadvantages-of-the-vickers-method-240/>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [21] “Vickers Hardness Test.” [Online]. Available: <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [22] “mikroskopie.pdf.” [Online]. Available: http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [23] “Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura | Fyzikální ústav Akademie věd ČR.” [Online]. Available: <https://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [24] “maxresdefault.jpg (1280×720).” [Online]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/-ZaFGgAO094/maxresdefault.jpg>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [25] Hana Šebestová, “Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii.” [Online]. Available: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>. [Accessed: 03-Jan-2020].
- [26] “Paired Sample T-Test - Statistics Solutions.” [Online]. Available: <https://www.statisticssolutions.com/manova-analysis-paired-sample-t-test/>. [Accessed: 01-Jan-2020].
- [27] “testovanie hypotez.” [Online]. Available: <https://www.math.sk/mpm/wp-content/uploads/2017/11/testyHypotez2.pdf>. [Accessed: 03-Jan-2020].
- [28] Petra Růčková and Michaela Roubíčková, *Finanční management*. Praha: GRADA Publishing, a.s., 2012.
- [29] “Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store.” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. [Accessed: 01-Jan-2020].