

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



**Analýza nanokompozitní pasty na bázi
bismutu a cínu s nanočásticemi oxidu
titaničitého**

Analysis of the composite bismuth-tin solder paste filled
with titanium dioxide nanoparticles

Bakalářská práce

Bachelor's thesis

Vasyl Babets

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Iva Králová

Konzultant ekonomické části práce: Ing. Lukáš Janota

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Babets** Jméno: **Vasyl** Osobní číslo: **507225**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza kompozitní pájecí pasty na bázi bismutu a cínu s nanočásticemi oxidu titaničitého

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of the composite bismuth-tin solder paste filled with titanium dioxide nanoparticles

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou pájení v elektrotechnice a elektronice se zaměřením na používané pájecí slitiny.
- 2) Proveďte analýzu Bi-Sn pájecí pasty s příměsí TiO₂ s ohledem na pájitelnost a vlastnosti pájených spojů.
- 3) Výsledky provedených analýz vyhodnoťte.
- 4) Proveďte ekonomické zhodnocení využití nanočástic v pájecí pastě jako náhrady za pájení v dusíkové atmosféře.

Seznam doporučené literatury:

- [1] A. Pietriková, J. Ďurišin, and P. Mach, Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010.
- [2] T.-K. Lee, Fundamentals of lead-free solder interconnect technology: from microstructures to reliability. New York: Springer, 2015.
- [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. Iva Králová katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Iva Králová
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze, dne 24. května 2024

.....

Babets Vasył

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří jakkoli přispěli k realizaci této bakalářské práce. Především pak děkuji Ing. Ivě Králové za odborné vedení mé práce, vstřícnost, trpělivost a pomoc při provádění experimentů. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukášovi Janotovi za cenné rady a připomínky k ekonomické části této práce. Nemalé poděkování patří také prof. Ing. Bc. Karlovi Duškovi, Ph.D., a Ing. Petru Veselému, Ph.D., jejichž technické a technologické rady mi velmi pomohly při zpracovávání technologické části. Na závěr bych rád poděkoval svému okolí za podporu během celého studia.

ANOTACE

Cílem této práce je ověření vlivu nanočástic TiO_2 (oxidu titaničitého) na smáčitelnost bezolovnaté BiSn pájecí pasty na různých povrchových úpravách. Dále potom zhodnocení vlivu TiO_2 nanočástic na mechanické a termické vlastnosti této pasty. Na závěr byla hodnocena také mikrostruktura pájeného spoje. Experimentální část práce následuje ekonomické zhodnocení použití dané slitiny s nanočásticemi v provozní praxi. Použití nanokompozitní pasty bylo provedeno porovnáním s pájením v dusíkové atmosféře.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nanokompozitní pasta, nanočástice, pájený spoj, roztékavost, intermetalická vrstva, porovnání nákladů, NPV, OEE

ABSTRACT

The aim of this work is to investigate the effect of TiO_2 (titanium dioxide) nanoparticles on the solderability of BiSn solder paste on different surface finishes. Subsequently, the influence of the NPs on the mechanical and thermal properties of this solder paste was evaluated. Moreover, the microstructure of the composite solder joints was also assessed. This experimental part of the thesis is followed by an economic evaluation of the use of the composite BiSn solder alloy in industrial practice. The incorporation of TiO_2 nanoparticles was compared with soldering in a nitrogen atmosphere.

KEYWORDS

Nanocomposite paste, nanoparticles, solder joint, flowability, intermetallic layer, cost comparison, NPV, OEE

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM GRAFŮ	9
ÚVOD	10
1. PÁJENÝ SPOJ	11
1.1. Viskozita	11
1.2. Roztékavost	12
1.3. Intermetalická sloučenina (IMC)	12
1.3.1. Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn	13
1.3.2. Ag_3Sn	13
1.3.3. Ni_3Sn_4	13
1.4. Mechanické vlastnosti	14
1.4.1. Zkouška stříhem	14
2. PÁJECÍ PASTY	15
2.1. Složení pájecí pasty	15
2.2. Výroba pájecích past	16
2.3. Přetavení pájecí pasty	17
3. NANOKOMPOZITNÍ PASTY	18
3.1. Nanočástice TiO_2 v pájení	19
3.2. Souhrnný popis publikovaných výsledků o vlivů nanočástic TiO_2 na vlastnosti nanokompozitní pájky	20
4. ÚPRAVY POVRCHU DPS	21
4.1. Měděný povrch bez úpravy	21
4.1.1. OSP úprava	21
4.1.2. ENIG úprava	22
5. METODA NANESENÍ PASTY ŠABLONOVÝM TISKEM	23
6. PRAKTICKÁ ČÁST	23
6.1. Zkoušené pasty	23
6.1.1. Základní specifikace	24
6.2. Vmíchání nanočástic do pasty	24
6.3. Nanesení testovaných past na vzorky šablonovým tiskem	25
6.3.1. Nanesení pasty na DPS	25
6.4. Snímání plochy nanesených past	26

6.5.	Přetavení vzorků pomocí průběžné pájecí pece	26
6.6.	Mechanická zkouška pevnosti.....	27
7.	ZKOUMÁNÍ VRSTVY IMC A PRVKOVÁ ANALÝZA	29
7.1.	Příprava výbrusů.....	29
7.2.	Elektronová mikroskopie.....	30
7.3.	Zkoumání IMC	30
8.	PROBLÉM PŘI PŘETAVOVÁNÍ NANOKOMPOZITNÍ PASTY	30
9.	VÝSLEDKY PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	32
9.1.	Měření roztékavosti	32
9.2.	Mechanická zkouška pevnosti.....	33
9.3.	Zkoumání IMC a prvková analýza.....	35
9.4.	Prvková analýza IMC.....	38
10.	ZHODNOCENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	40
11.	EKONOMICKÁ ČÁST	41
11.1.	Analýza trhu	41
11.1.1.	Hodnocení nákladů na nanokompozitní pastu.....	41
11.1.2.	Hodnocení nákladů na dusík	41
11.2.	Výpočet NPV.....	42
11.2.1.	Vstupní data.....	42
11.3.	Citlivostní analýza.....	47
11.4.	OEE	49
11.4.1.	Faktory ovlivňující OEE.....	51
11.4.2.	Výpočet OEE	52
11.4.3.	Dusík jako parametr OEE	55
12.	ZHODNOCENÍ EKONOMICKÉ ČÁSTI	56
13.	ZÁVĚR	57
14.	SEZNAM ZDROJŮ A CITACÍ.....	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Závislost viskozity na teplotě přetavení [3]	11
Obrázek 2: Znázornění roztékavosti pájeného spoje (půdorys).....	12
Obrázek 3: Popis jednotlivých vrstev pájeného spoje [2].....	13
Obrázek 4: Typy umístění součástky v průběhu zkoušky stříhem	14
Obrázek 5: Složení pájecí pasty	16
Obrázek 6: Obecný teplotní profil [2].....	17
Obrázek 7: Závislost tloušťky IMC (vlevo) a smáčecích charakteristik (vpravo) testované nanokompozitní SAC pájky na koncentraci s nanočástic TiO ₂ [16], [20].....	20
Obrázek 8: Schématický diagram ukazující efekt přidání malého (levý sloupec) a velkého (pravý sloupec) množství nanočástic TiO ₂ do pájky – vliv na rozložení v mikrostruktuře pájky (a, d), smáčivost (b, e), a vliv na růst IMC (c, f) [16], [20].....	21
Obrázek 9: Fázový diagram slitiny Bi-Sn [25]	24
Obrázek 10: šablona, použitá při šablonového tisku pájecích past.....	25
Obrázek 11: Nanesená pasta: BiSn na měděném povrchu(vlevo), BiSn+TiO ₂ na měděném povrchu(vpravo).....	26
Obrázek 12: Připravený vzorek DPS pro mechanickou zkoušku.....	28
Obrázek 13: Postup přípravy metalografického výbrusu [28]	29
Obrázek 14: Porovnání přetavených vzorků BiSn pasty(vlevo) a BiSn pasty s přidáním nanočástic (vpravo).....	31
Obrázek 15: DPS po mechanické zkoušce, BiSn pasta s nanočásticemi.....	35
Obrázek 16: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu bez úpravy	35
Obrázek 17: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu s povrchovou úpravou OSP	36
Obrázek 18: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu s povrchovou úpravou ENIG.....	36
Obrázek 19: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu bez úpravy.....	37
Obrázek 20: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu s úpravou OSP.....	37
Obrázek 21: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu s úpravou ENIG.....	38
Obrázek 22: Struktura OEE [42].....	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Teplotní profil doporučený výrobcem použité pájecí pasty [26]	27
Graf 2: Měření roztékavosti	32
Graf 3: Průběh mechanické zkoušky pro BiSn pastu	33
Graf 4: Průběh mechanické zkoušky pro BiSn pastu s přidáním nanočástic oxidu titaničitého	34
Graf 5: Výsledky mechanické zkoušky	34
Graf 6: Prvková analýza IMC, měděný podklad, BiSn pasta	38
Graf 7: Prvková analýza IMC, měděný podklad, BiSn+TiO ₂ pasta	39
Graf 8: Závislost rozdílů NPV na počtu přetavených DPS ročně	48
Graf 9: Závislost Rozdílů NPV na nákladech pro jednu DPS při použití nanočástic	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Procentuální změna ploch vzorků testovaných past	33
Tabulka 2: Hmotnostní koncentrace prvků v IMC	39
Tabulka 3: Náklady na přetavení jedné DPS s použitím nanočástic	45
Tabulka 4: Náklady na přetavení jedné DPS s použitím dusíku	45
Tabulka 5: Vstupní data pro výpočet NPV jednotlivých nákladů	46
Tabulka 6: Výpočet NPV a RCF v případě použití nanočástic	47
Tabulka 7: Výpočet NPV a RCF v případě použití dusíku	47
Tabulka 8: Výsledky citlivostní analýzy	47
Tabulka 9: Výpočet faktoru využití pájecí pece	53
Tabulka 10: Výpočet plánovaného výstupu pájecí pece	54
Tabulka 11: Výpočet celkové efektivnosti pájecí pece	55
Tabulka 12: Porovnání OEE pájecí pece podle použití dusíku	55

ÚVOD

Bezolovnaté pájecí pasty jsou široce používány v elektronickém průmyslu pro spojovací aplikace. Jejich použití úplně nahradilo olovnaté pájecí pasty pro průmyslové využití kvůli restrikcím EU, konkrétním důvodem byla jeho toxicita. Vlivem zákazu používání olova došlo k přechodu na bezolovnaté pájecí slitiny.

Bezolovnatá pájecí pasta na bázi slitiny BiSn je používána v elektronice z důvodu snížení teploty přetavení, hodí se proto k pájení systémů citlivých na tepelné zatížení během pájení [1] Typickým příkladem vhodné aplikace je pájení miniaturních kamerových modulů.

V poslední době je novým „trendem“ v oblasti pájecích past přidání nejrůznějších aditiv ke zlepšení jejich výsledných vodivých a mechanických vlastností. Těmito aditivami jsou například měď, stříbro, zinek, bismut, antimon, indium, nikl, germanium a další. Každé aditivum je určeno k vylepšení určitých vlastností výsledného pájeného spoje.

Velký význam jako aditivum mají nanočástice jednotlivých materiálů, jež se přidávají za stejným účelem vylepšení vlastností pájecí pasty. Pasty s přídavkem nanočástic jsou v literatuře označovány jako pasty nanokompozitní.

V této práci je zkoumán vliv nanočástic oxidu titaničitého (TiO_2) na výsledné vlastnosti nízkotavitelné pájecí pasty na bázi bismut-cín (BiSn), jako jsou zejména roztékavost, mechanická odolnost a struktura intermetalické sloučeniny, která je součástí výsledného pájeného spoje. Následuje pak ekonomické vyhodnocení a porovnání dvou investic, konkrétně pájení v dusíkové atmosféře a pájení s použitím nanokompozitní pasty.

1. PÁJENÝ SPOJ

Pro montáž v mikroelektronice a elektrotechnice se nyní z drtivé většiny používá pájení v nejrůznějších jeho formách, jako je například pájení ruční, přetavením, vlnou a další. Při procesu pájení vzniká mnoho různých faktorů, které ovlivňují výsledné vlastnosti pájeného spoje.

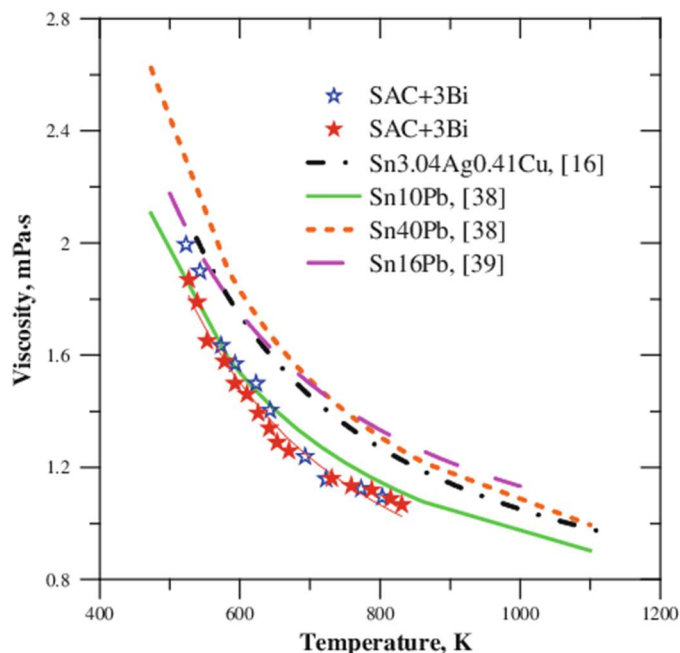
Nejdůležitějšími vlastnostmi pájeného spoje jsou jeho vodivost, roztékavost a viskozita, mechanické vlastnosti a následná odolnost vůči např. vnějším vlivům a oxidaci. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé z nich.

1.1. Viskozita

Viskozita pájecí slitiny je fyzikální veličina a parametr pájecí pasty a spočívá v měření jejího odporu proti proudění nebo její tekutosti. Jedná se o důležitý faktor při procesu pájení přetavením [2], protože správná viskozita pájecí slitiny ovlivňuje její aplikaci na desku plošných spojů (PCB) a následné spojování součástek.

Pájecí slitina by měla mít dostatečnou viskozitu, aby se dala správně aplikovat, ale zároveň by měla být dostatečně tekutá, aby se rovnoměrně rozprostřela a umožnila správné spojení součástek s deskou během procesu pájení přetavením.

Příliš vysoká viskozita by mohla způsobit obtíže při aplikaci pájecí pasty na desku, což by mohlo vést k neúplnému pokrytí příslušných míst na DPS. Naopak příliš nízká viskozita by mohla způsobit rozlití pájky mimo určené oblasti na desce [3].



Obrázek 1: Závislost viskozity na teplotě přetavení [3]

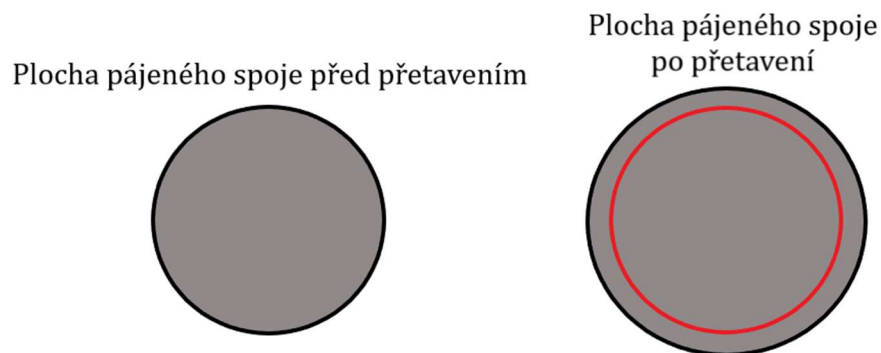
Výrobci pájecích past věnují velkou pozornost optimální viskozitě pasty pro různé aplikace a technologie. Pokud je viskozita mimo ideální rozmezí, může to

vést k vadám spojení nebo k nekvalitním spojům. Řízení viskozity pájecí pasty je klíčové pro dosažení kvalitních a spolehlivých spojů mezi součástkami a deskou plošných spojů během procesu pájení přetavením [3].

1.2. Roztékavost

Roztékavost pájecí pasty je klíčovým faktorem při procesu pájení. Jedná se o schopnost pasty roztékat se a spojovat se s povrchem kovů při zahřívání. Správná roztékavost je nezbytná pro vytvoření spolehlivého a pevného spoje.

Při správné teplotě tání pájecí slitiny a tavidla se pájecí pasta roztéká a zaplavuje mezery a nerovnosti na povrchu kovů, což umožňuje vytvoření spoje s vysokou pevností a elektrickou vodivostí [4].



Obrázek 2: Znázornění roztékavosti pájeného spoje (půdorys)

Roztékavost je tedy de-facto procentuální změna plochy výsledného přetaveného spoje oproti počátečnímu nepřetavenému stavu.

Nedostatečná roztékavost může vést k nedostatečnému spojení mezi součástkami nebo k vzniku studených spojů, kde není dostatečný kontakt mezi pájkou a povrchem kovu. Na druhou stranu přílišná roztékavost může vést k přetavení a následnému vytékání pájky ze spoje, což může způsobit poruchy a selhání zařízení.

1.3. Intermetalická sloučenina (IMC)

Intermetalické sloučeniny vznikají ve výsledném spoji v interakce prvků, které obsahuje pájecí slitina a povrchu DPS, které tento spoj formují. Její vznik je podmínkou dobré adheze mezi povrchem DPS a pájecí slitinou. Výsledky studií potvrzují růst intermetalických sloučenin v bezolovnatých pájecích pastách, obzvláště v Ag-Sn, Cu-Sn, Ni-Sn sloučeniny [5]. Nejvíce rozšířené jsou Cu_6Sn_5 , Ag_3Sn , Cu_3Sn , a Ni_3Sn_2 [6].

1.3.1. Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn

Jak bylo dřív zmíněno, u pájecích ploch ošetřených povrchovými úpravami, jako jsou často měď nebo nikl dochází k reakci materiálu povrchové úpravy s pájecí slitinou a tím je vytvořena intermetalická vrstva o tloušťce řádově desetin mikrometrů. Při reakci měděného povrchu DPS s pájecí slitinou, která obsahuje cín dochází k vytvoření intermetalické sloučeniny v chemickém tvaru Cu_6Sn_5 . Z průběhem času se na hranici vrstvy této intermetalické sloučeniny dochází k vytvoření další intermetalické vrstvy Cu_3Sn [7].

1.3.2. Ag_3Sn

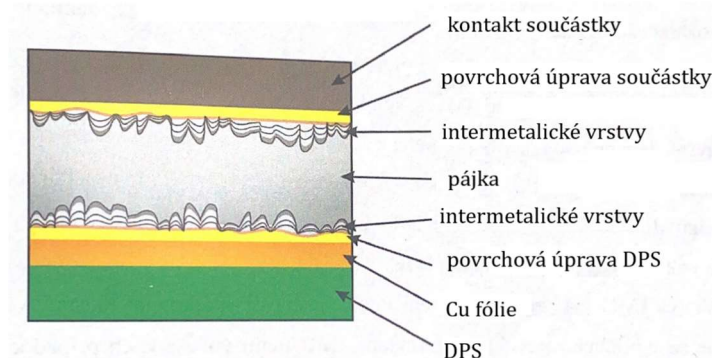
Vrstva této intermetalické sloučeniny vzniká v důsledku interakce povrchu DPS a bezolovnatých pájecích slitin s obsahem stříbra. Vrstva roste v objemu pájky, typickým příkladem bezolovnatých pájek s obsahem stříbra jsou pájky typu SAC. V doposud provedených výzkumů je potvrzený pozitivní vliv této intermetalické vrstvy na mechanické vlastnosti výsledného pájeného spoje [8].

1.3.3. Ni_3Sn_4

Tato intermetalická vrstva je výsledkem interakce pájecí slitiny a povrchové úpravy ENIG pájecí desky, obsahující nikl a imersní zlato [9].

Tyto sloučeniny mají rozdílnou krystalickou strukturu a parametry krystalické mřížky. Z tohoto rozdílu je možné usoudit zásadní rozdíl v uspořádání a počtu vazebních atomů jednotlivých prvků sloučeniny s uspořádáním atomů samotného $\beta\text{-Sn}$, kdy IMC má větší počet atomů v buňce krystalické mřížky, je tím pádem tvrdší, ale i víc křehká. Vazba jednotlivých atomů je taky pevnější u IML v porovnání se samotnými kovy [2].

Z pohledu formování IMC a následně tedy i intermetalické vrstvy (IML) je pájení procesem difúze. Každá pájecí slitina má definovanou rozpustnost kovů, které se v ní vyskytují. V okamžiku, kdy roztavená pájecí slitina vchází do kontaktu s měděným povrchem dochází k vytvoření IMC na fázovém rozhraní [2]. Podle průběhu procesu přetavení a chemických vlastností jednotlivých prvků pájecí slitiny se určuje vzhled a homogenita výsledné IML. Na *Obrázku 3* jsou názorně popsány jednotlivé vrstvy výsledného pájeného spoje.



Obrázek 3: Popis jednotlivých vrstev pájeného spoje [2]

Intermetalická vrstva s časem roste, má v závislosti na její parametrech jak pozitivní, tak mnoho kdy i negativní vliv na výsledné vlastnosti pájeného spoje, jak na mechanické, tak i na vodivé [10], [11].

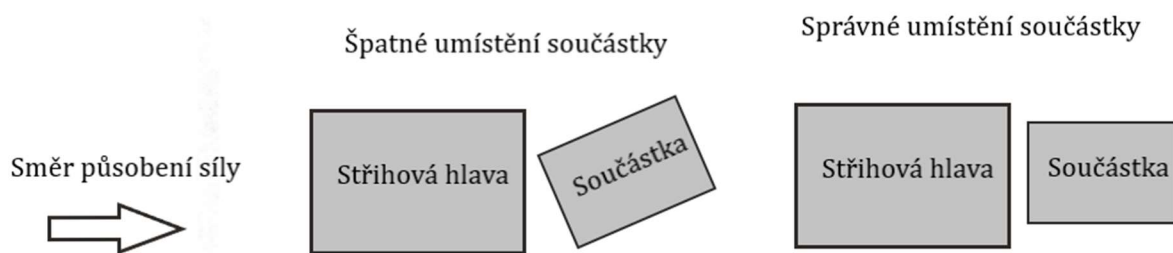
1.4. Mechanické vlastnosti

Neméně důležitými vlastnostmi pájeného spoje jsou mechanické vlastnosti jako např. výsledná mechanická odolnost nebo maximální síla potřebná k mechanickému narušení struktury spoje. Na ověření těchto vlastností existují různé normy, např. norma **IPC-TM-650 (Test Methods Development Packet)**, která zahrnuje testy tahem a stříhem, testy v ohybu a krutu, rázové testy a testy vibrační.

1.4.1. Zkouška stříhem

Tato metoda mechanického namáhání pájeného spoje je používána pro zjištění maximální síly potřebné k odtržení napájené součástky od povrchu DPS. Pro provedení zkoušky jsou většinou používány speciální přístroje jako je např. vertikální trhačka.

Při procesu zkoušky se zkoušená DPS upevní do čelistí a z vrchu je stlačována ve vertikálním směru dolů pomocí pohyblivých čelistí trhačky. Pro správný průběh testu je potřeba po celou dobu provádění zkoušky působit na pájený spoj konstantní rychlostí posuvu, aby bylo možné porovnat výsledky jednotlivých zkoušek a mít testovanou součástku přímo pod pohyblivou částí přístroje, jinak není dodržen konstantní poměr působené síly na celé ploše součástky [2]. Správné uchopení součástky je znázorněno na *Obrázku 5*.



Obrázek 4: Typy umístění součástky v průběhu zkoušky stříhem

Po uplynutí zkoušky je k dispozici graf jejího průběhu, ve výsledkové tabulce jsou potom k dispozici jak potřebná maximální síla, tak například Youngův modul pružnosti a další.

2. PÁJECÍ PASTY

Pájecí slitiny se používají při pájení přetavením pro vodivé spojení součástek povrchové montáže nebo technologie Flip-Chip [2]. Pájecí pasty se skládají minimálně ze dvou komponent, jimiž jsou pájecí slitina a tavidlo, někdy se jako další složky přidávají aditiva a plniva, která zlepšují určité vlastnosti pájecí pasty.

Obecně lze pájecí pasty rozdělit na olovnaté, obsahující jako hlavní složku pájecí slitiny cín a olovo, a bezolovnaté, u kterých je olovo nahrazeno například Ag, Cu a dalšími prvky. Nejčastěji používanou pájecí slitinou je v současné době SnAgCu (SAC), kde cín tvoří hlavní část slitiny, stříbro přispívá k pevnosti a měď pomáhá s prouděním při pájení.

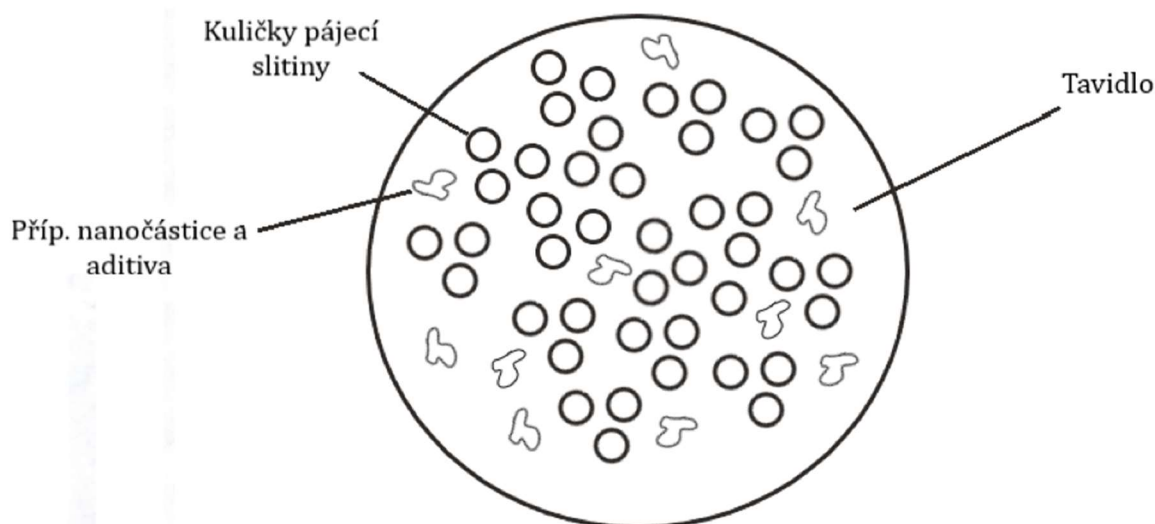
Další kategorií bezolovnatých pájecích past jsou pasty nízkotavitelné, které mají vlastnosti zahrnující nízkou viskozitu a přetavení při nižších teplotách (<200°C).

Do kategorie nízkotavitelných bezolovnatých pájecích slitin řadíme např. slitinu na bázi Bi a Sn. Pájení s BiSn, jak bylo zmíněno v úvodu, má hlavní rozdíl, resp. výhodu oproti jiným slitinám (zejména SAC) takovou, že má nižší teplotu přetavení, která činí 138°C. To je užitečné při pájení citlivých součástek, které by mohly být poškozeny vyššími teplotami. Další výhodou této pájecí slitiny je eliminace obsahu olova, což je v souladu s mnoha regulacemi a normami omezujícími obsah olova v elektronických zařízeních.

2.1. Složení pájecí pasty

Pájecí slitina, ve formě prášku známého jako prášková pájka, tvoří klíčovou součást pájecí pasty. Tato slitina se skládá z částic, které jsou převážně kulovitého tvaru, ale až 15 % může být ve formě elipsoidů a kolem 1 % částic má jiný tvar. Nejběžnějšími pájecími slitinami jsou slitiny bez olova, jako například cín-bismut nebo cín-stříbro-měď [12].

Další nedílnou složkou pájecí pasty je tavidlo, které má hned několik důležitých funkcí. Jeho hlavním úkolem je odstranění oxidů z povrchů kovů, což napomáhá lepšímu spojení pájky s povrchem kovu. Dále tavidlo urychluje a podporuje proces smáčení, který je jedním z klíčových faktorů při vytváření kvalitního pájeného spoje. Pájecí pasty bývají obvykle pastovité konzistence a mohou být vyrobeny na bázi přírodních pryskyřic (RO) nebo syntetických pryskyřic (RE). Tavidlo může být také roztokem různých chemikálií, jako je například resin a rosin.



Obrázek 5: Složení pájecí pasty

Některé pájecí pasty mohou obsahovat aditiva nebo plniva, jako jsou nanočástice TiO_2 (oxid titaničitý) nebo stříbro (Ag). Tyto přísady mohou vylepšit mechanické vlastnosti, tepelnou vodivost nebo další charakteristiky pájení. Pájecí pasty existují v různých viskozitách a typech v závislosti na konkrétní aplikaci. Pasty mohou být naneseny na desky plošných spojů pomocí různých metod, jako jsou šablonový tisk nebo sítotisk, nebo ruční aplikace pasty na povrch desky plošného spoje (DPS) [8].

Při pájení je pájecí pasta zahřívána, což způsobí tání pájky a její spojení s povrchem kovu. Tavidlo zajišťuje odstranění oxidů a čistý povrch pro spojení. Kvalita a správný výběr pájecí pasty jsou klíčové pro vytvoření spolehlivých a pevných pájených spojů.

2.2. Výroba pájecích past

Výroba pájecích past je složitý proces, který zahrnuje kombinaci několika klíčových složek za účelem vytvoření finálních produktů s požadovanými vlastnostmi. Prvním krokem je míchání a disperze, při kterém se pájka a tavidlo smíchají v přesně definovaném poměru. Pro dosažení homogenity a konzistence pasty se často využívají míchací zařízení a speciální techniky disperze, aby byly zajištěny rovnoměrné vlastnosti pájky.

Následuje přidání aditiv a přísad do téměř hotové pasty, přičemž tyto látky jsou přidávány v různých koncentracích podle požadovaných vlastností. Aditiva mohou zlepšovat mechanické, elektrické nebo tepelné vlastnosti pájky a další charakteristiky [13].

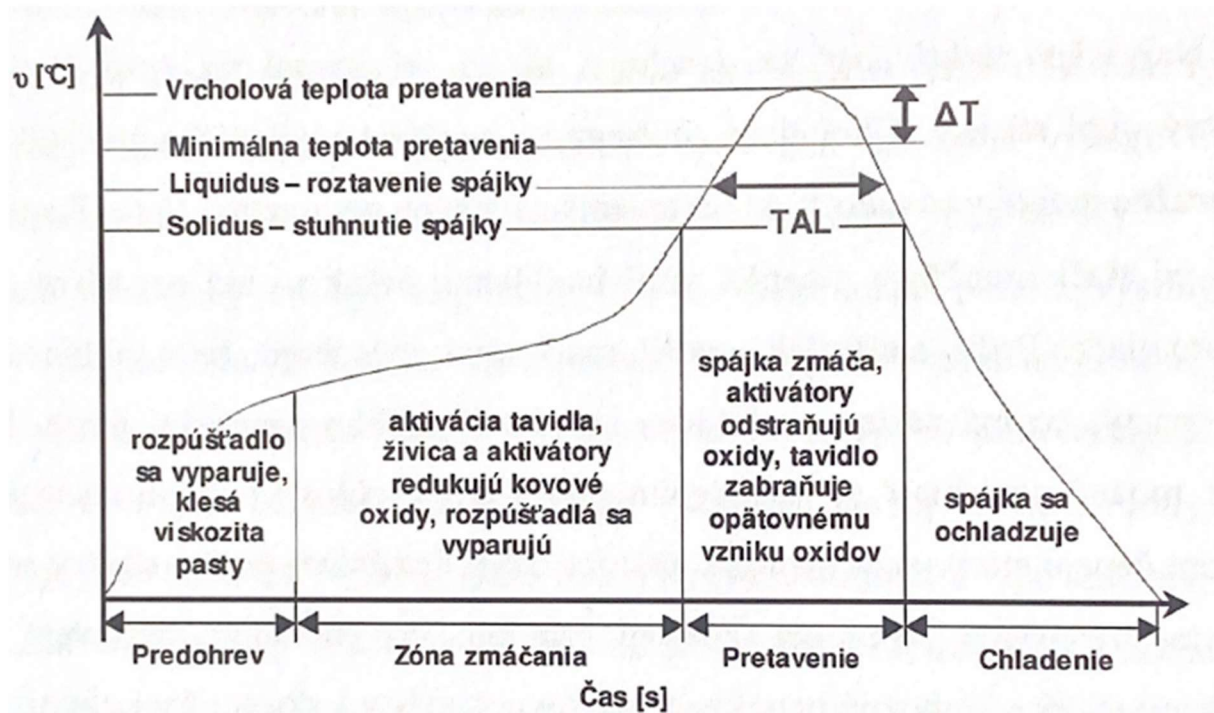
Během výroby jsou průběžně kontrolovány a testovány vzorky pájecí pasty, aby byla zajištěna kvalita, viskozita, tepelná stabilita a adheze pasty. Tyto kontrolní procesy pomáhají zajistit konzistenci a spolehlivost výsledného produktu [13].

Nakonec je hotová pasta balena do vhodných obalů a skladována podle specifických podmínek, jako je teplota a vlhkost, aby byly zachovány vlastnosti pájecí pasty co nejdéle. Celý proces výroby pájecích past může zahrnovat další specifické kroky podle potřeb konkrétních aplikací.

2.3. Přetavení pájecí pasty

Metoda zapájení pájecí pasty přetavením je jednou ze základních technologických kroků v oblasti montáže součástek v elektrotechnice. Tento proces významně ovlivňuje výsledné vlastnosti a mikrostrukturu pájeného spoje. Mikrostruktura spoje je ovlivněna jak složením pájecí pasty v průběhu přetavení, tak i povrchovou úpravou DPS, na kterou byla tato pasta nanesená [2].

Pájení přetavením je většinou prováděno pomocí průběžných pájecích pecí, které se řídí teplotním profilem a rychlostí posunu dopravníku.



Obrázek 6: Obecný teplotní profil [2]

Teplotní profil je složen ze zóny předehřevu, smáčení, přetavení a chlazení pájecí pasty.

Tvar teplotního profilu může být a je upravován podle jednotlivého složení pájecí pasty, druhu DPS, hustoty osazení součástek a dalších faktorů. Nejdůležitější účel teplotního profilu je dosažení maximální kvality a životnosti součástek, které jsou osazené na DPS.

První zónou, kterou projde pájecí pasta je **předehřev**, při kterém je celá DPS předehřívána na zvýšenou teplotu v rozmezí 100-150 °C [2]. Účelem této fáze je

zabránění teplotního šoku součástek a samotné DPS, přičemž se dbá na nárůst teploty cca (1-4)°C/s. Nedodržení této skutečnosti, čili prudký nárůst teploty by mohl způsobit poškození osazených součástek, nebo příliš rychlé odpaření tavidla, které zajišťuje plynulou roztékavost pájecí pasty na DPS.

Další stupeň je **smáčení**, neboli mokrý stupeň, kde účelem je dosažení rovnoměrného prohřátí celé DPS a na teplotu blízkou teplotě přetavení (100-200 °C) a tento stupeň trvá v rozmezí od 60 do 120, někdy i 180 vteřin [2]. Během procesu smáčení se s růstem teploty odpařuje rozpouštědlo v celé své výši, čímž se zajišťuje dobrá roztékavost pájecí pasty, v případě že tavidlo obsahuje aktivátory, tyto složky redukuje oxidy na povrchu pájeného spoje. Nedostatečná teplota v tomto stupni má za následek částečnou smáčivost nebo úplnou nesmáčivost pájky na DPS.

Při rychlém nárůstu teploty opět nastává problém s možností poškození osazených součástek, tavidlo nebude mít žádný účinek, a to se následně projeví i na kvalitě pájeného spoje [2].

V zóně **přetavení** se kuličky pájky přetavují do tekutého stavu a kvůli povrchovému napětí roztavené pájky je vytvořený pájený spoj. Tavidlo v tomto případě zabraňuje vytvoření oxidů. Pro dosažení správné teploty na povrchu DPS, například při přetavení pomocí proudění horkého plynu, je potřeba, aby nastavená teplota v této zóně byla přibližně o 20 °C větší než teplota přetavení pájecí slitiny. Důvodem je částečná absorpce teploty okolím pájky a DPS. Pájený spoj vytrvá v tomto stupni kratší dobu, přibližně 10 až 60 sekund [14]. Překročením dovoleného času přetrvání v tomto stupni je opět riziko poškození součástek (pro většinu součástek je kritická teplota 250 °C). Dalším rizikem může být menší vliv tavidla během přetavení a rychlý růst oxidů kovů. Na druhou stranu, při příliš nízké teplotě nedojde k dosažení potřebného přetavení a vytvoření kvalitního pájeného spoje.

Posledním krokem je zóna **chlazení**. Při tomto stupni se hotový pájený spoj postupně ochlazuje na teplotu mnohem nižší než teplota přetavení, opět kvůli riziku degradace součástek z důvodu působení na ně vysoké teploty po dlouhou dobu. Rychlost posuvu v tomto okamžiku je taky důležitá, protože např. pro některé druhy kondenzátorů je rychlá změna teploty důvodem vytvoření vnitřního termického napětí. Doporučená rychlost posuvu v tomto stupni je přibližně (2-5)°C/s [2].

3. NANOKOMPOZITNÍ PASTY

Využití nanomateriálů zahrnuje nanočástice, nanovlákna a nanofilmy. Z tohoto spektra se dnes nejčastěji využívají právě nanočástice. Nanomateriály jsou definovány jako látky obsahující částice o velikosti 1–100 nm minimálně ve dvou rozměrech. Většinou nejde o nové látky, ale o materiály vytvořené z upravených nanočástic v nanometrických rozměrech. Jejich povrchová struktura má nižší počet vazeb než atomy v objemu materiálu. Tato změna výrazně ovlivňuje vazebné

energie atomů a jejich prostorové uspořádání, což radikálně mění vlastnosti daných látek. Postupně převažují povrchové vlastnosti nad vlastnostmi objemu. S menšími rozměry částic se zvyšuje plocha povrchu, což způsobuje nárůst Gibbsovy energie. To vede k vyšší chemické reaktivitě a odlišným fyzikálním charakteristikám [15].

V odborné literatuře jsou pájky, do nichž byly přidány nanočástice, obvykle označovány jako nanokompozitní pájky. V současnosti se nejvíce zkoumají nanočástice pro přípravu těchto pájek, a to podle jejich složení a fyzikálních vlastností, které lze rozdělit do následujících tří oblastí:

- Kovové (reaktivní) nanočástice – použití nanočástic čistých kovů či prvků (např. Cu, Ag, Co, Ni, Al, Au, In, Sb, P atd.) [16].
- Keramické (inertní) nanočástice – anorganické látky skládající se z uhličitánů, fosforečnanů, karbidů a oxidu kovů (např. titan a vápník), přičemž mohou nabývat amorfní, polykrystalické, porézní nebo duté formy. Připravují se pomocí tepelné syntézy a postupného ochlazování. Díky své stabilitě se keramické nanočástice využívají především v biomedicinských aplikacích a také ve fyziologii a optoelektronice [17].
- Keramické nanočástice s kovovým povrchem spojují předchozí dvě skupiny. Příkladem jsou uhlíkové nanotrubičky s reaktivním kovovým povlakem (Ag, Cu), což výrazně zlepšuje schopnost integrovat keramické částice do mikrostruktury pájky [17].

Přidáním specifických nanočástic do existujících pájecích slitin nebo past lze významně zlepšit některé vlastnosti spoje. Toto zlepšení se týká zejména mechanických vlastností spoje, jako je zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti vůči stříhu, což přináší vylepšení plastických deformací. Většina nanočástic může ovlivnit i další parametry nanokompozitní pájky, včetně smáčivosti, teploty tání a tuhnutí, velikosti a rychlosti růstu intermetalických vrstev vytvořených během pájení. Specifický vliv částic TiO_2 je shrnut ve výsledku praktické části této práce [16].

3.1. Nanočástice TiO_2 v pájení

Nanočástice oxidu titaničitého jsou jedním z možných vylepšení bezolovnaté pájecí pasty. Jedná se o poměrně nový způsob vylepšení vlastností pájecí pasty a vliv těchto nanočástic je nejvíce zkoumaný na pastách typu SAC (Sn-Ag-Cu).

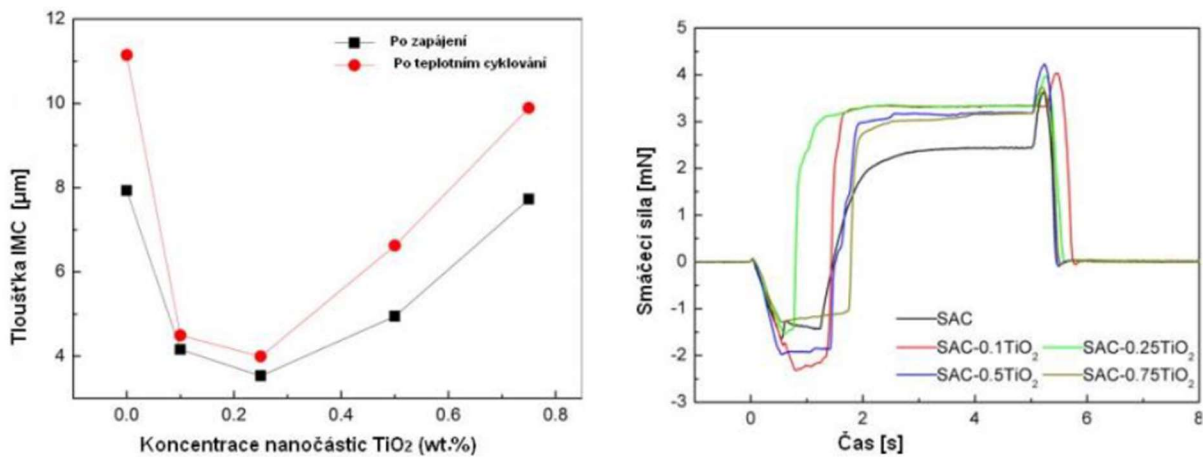
Z výrazných rozdílů ve výsledných vlastnostech jak pájecí pasty, tak i pájeného spoje je možné vyzdvihnout snížení teploty přetavení pájecí pasty o několik stupňů, změnu mikrostruktury pájeného spoje, ovlivnění tvrdosti, zlepšení pevnosti v tahu, nebo např. vyšší pevnost pájeného spoje [18].

3.2. Souhrnný popis publikovaných výsledků o vlivů nanočástic TiO₂ na vlastnosti nanokompozitní pájky

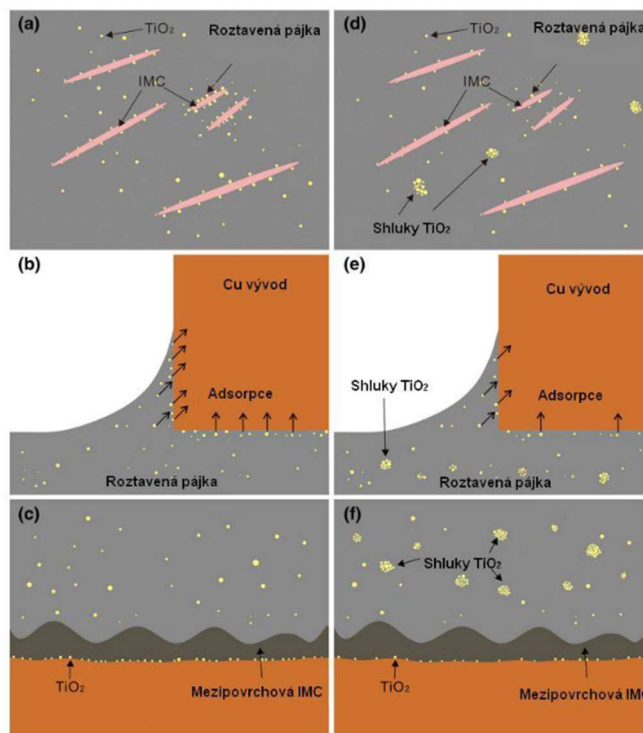
V práci [16] byla jako referenční pájecí slitina použita SAC305. Do pájecí pasty byly přidány nanočástice s průměrnou velikostí 23 nm v koncentracích 0,1-0,25-0,5-0,75 hmotnostních procent (hm. %). Nanočástice byly vždy pečlivě promíchány.

Vliv těchto nanočástic na teplotu tání nebyl zkoumán. Avšak, byl zkoumán jejich vliv na vznik intermetalických sloučenin. Při koncentracích 0,1-0,25 hm.% bylo pozorováno výrazné snížení tloušťky IMC po pájení a opakovaných tepelných cyklech.

Bylo zjištěno, že koncentrace částic TiO₂ hraje klíčovou roli v ovlivnění vlastností pájecí pasty. Ideální koncentrace se ukázala být kolem 0,25 hm.%, kde byl pozorován vyvážený efekt absorpce a shlukování částic. Absorpce aktivních nanočástic povrchově vylepšuje schopnost pasty zamezit růstu IMC a zlepšuje její schopnost dobře se spojit s povrchem pájených materiálů [16], [19].



Obrázek 7: Závislost tloušťky IMC (vlevo) a smáčecích charakteristik (vpravo) testované nanokompozitní SAC pájky na koncentraci s nanočástic TiO₂ [16], [20]



Obrázek 8: Schématický diagram ukazující efekt přidání malého (levý sloupec) a velkého (pravý sloupec) množství nanočástic TiO_2 do pájky – vliv na rozložení v mikrostruktuře pájky (a, d), smáčivost (b, e), a vliv na růst IMC (c, f) [16], [20]

4. ÚPRAVY POVRCHU DPS

4.1. Měděný povrch bez úpravy

Vrstva mědi je nanášena na DPS bez jakýchkoliv povrchových úprav, což znamená, že působením okolních vlivů se začíná objevovat postupná oxidace mědi, která má za následek nesmáčení povrchu. Pro komerční účely se ale stále používá díky své nejnižší ceně oproti ostatním úpravám a vlastnostem, které mnoho kdy vystačí pro potřeby jednotlivých aplikací [2].

Tento povrch se dá vylepšit nanášením např. takzvané organické vrstvy (OSP), která ve své podstatě zlepšuje odolnost proti oxidaci výsledného povrchu.

4.1.1. OSP úprava

Jedná se o organický ochranný povlak aplikovaný na měděný povrch desky. Účelem OSP úpravy je chránit měděný povrch DPS před oxidací a korozí během skladování a montáže. Tento tenký organický film se aplikuje na měděný povrch pomocí chemických procesů a chrání ho před vystavením vzduchu, který by mohl způsobit oxidaci.

OSP povlak poskytuje přípravu povrchu pro pájení součástek na desce. Zajišťuje, že povrch zůstává čistý a pájitelný během skladování a výrobních procesů. Tato úprava umožňuje správné pájení součástek bez potřeby dalších speciálních příprav, jako je předúprava pájecího místa nebo odstraňování povlaku před pájením [2], [18].

OSP je populární volbou pro mnoho výrobců PCB díky své schopnosti chránit měděný povrch před oxidací a zároveň poskytovat dobrou pájitelnost. Je však důležité dbát na správné skladování a manipulaci s deskami s OSP úpravou, protože příliš dlouhé vystavení vlhkosti nebo nepřiměřené teplotě může ovlivnit kvalitu a vlastnosti tohoto ochranného povlaku.

4.1.2. ENIG úprava

Tato úprava se používá pro ochranu a zlepšení pájitelnosti měděného povrchu desky.

Proces ENIG se skládá ze dvou hlavních kroků:

Depozice niklu (Electroless Nickel Deposition): Nejprve se na měděný povrch desky nanese tenká vrstva niklu prostřednictvím chemického procesu. Tato vrstva niklu slouží jako ochranná bariéra mezi mědí a vrstvou zlata, zajišťuje rovnoměrný a pevný základ pro následnou úpravu zlata [22].

Příprava zlata (Immersion Gold Deposition): Po depozici niklu následuje ponoření desky s vrstvou niklu do roztoku obsahujícího zlato. Zlato se naváže na povrch niklu a vytváří tenkou vrstvu zlata, která poskytuje ochranu proti oxidaci a zlepšuje pájitelnost [22].

Výhody ENIG úpravy zahrnují vysokou pájitelnost, ochranu proti oxidaci a rovnoměrné pokrytí. Vrstva zlata poskytuje vynikající pájitelnost pro elektronické součástky, což umožňuje spolehlivé a stabilní pájení. ENIG také vytváří rovnoměrné a tenké vrstvy, což je důležité pro vysokofrekvenční aplikace a pro aplikace vyžadující precizní pájitelnost [2], [22].

ENIG úprava poskytuje nejvyšší roztékavost pájecích past oproti OSP a měděnému povrchu bez úpravy, avšak má mnohem horší mechanické vlastnosti [23].

Významnou nevýhodou této povrchové úpravy je tzv. černání zlata (black pad effect). Černání zlata reprezentuje korozi a oxidaci niklu, které primárně začínají v niklových uzlinách a následně se rozšiřují s nárůstem koroze. Při větší tloušťce imersního zlata se oxidace niklu zrychluje. Tato vada je důsledkem horší pájitelnosti. Při působení mechanického tlaku jsou spoje jednoduše narušeny a ponechávají za sebou zkorodovanou vrstvu niklu na DPS, známou jako „black pad“ [24].

V porovnání s OSP úpravou jsou vlastnosti ENIG úpravy odlišné. OSP je lepší ze strany spolehlivosti pájeného spoje, např. při tepelném namáhání dochází u úpravy ENIG k praskání dříve a je závažnější než u OSP. Při použití úpravy OSP se v objemu pájky vytváří sloučenina Cu_6Sn_5 , která má zpevňující účinek na pájený spoj a zlepšuje jeho vlastnosti [21].

5. METODA NANESENÍ PASTY ŠABLONOVÝM TISKEM

Šablonový tisk se používá k aplikaci pájecí pasty na desku plošných spojů (DPS) prostřednictvím šablony s otvory odpovídajícími umístěním a velikostí komponentů na desce.

Šablona pro tisk pájení je obvykle vyrobena z oceli nebo jiného materiálu, který je odolný vůči opotřebení a zároveň umožňuje přesné aplikace pájecí pasty. Tato šablona má malé otvory, které odpovídají kontaktovacím plochám či nožičkám součástek na desce. Pájecí pasta je aplikována na desku pomocí této šablony, která je upevněna v určité vzdálenosti nad deskou a pasta je protlačena otvory na místa, kde mají být součástky osazeny. Tento proces umožňuje přesné a konzistentní umístění pájecí pasty na desku, což je klíčové pro správné spojení součástek během procesu pájení.

6. PRAKTICKÁ ČÁST

V následující kapitole bude popsána praktická část této práce. Cílem praktické části bylo provést porovnání vlastností (roztékavost, mechanická odolnost a vliv na růst intermetalických vrstev dvou testovaných BiSn pájecích past. Jednu pastu, referenční tvořila eutektická BiSn pájecí pasta. Druhou testovanou pastou byla tatáž pasta s nanočásticemi TiO_2 . Nanočástice byly v definovaném množství mechanicky vmíchány do komerčně dostupné BiSn pájecí pasty. Nanášení pasty na DPS se třemi různými povrchovými úpravami bylo provedeno pomocí šablonového tisku. Následovalo snímání nanesených nepřetavených vzorků pasty pomocí konfokálního mikroskopu, pro účely změření počáteční plochy a její následné porovnání s plochou přetavených vzorků.

Pro účely mechanické zkoušky byly pasty nanесeny na DPS s povrchovou úpravou OSP. Dále byly osazeny zkušební rezistory a po přetavení v průběžné pájecí peci byly vzorky otestovány pomocí předdefinované mechanické zkoušky na trhačce.

6.1. Zkoušené pasty

Zkoušenými pastami byly dvě Bi-Sn bezolovnaté pájecí pasty, přičemž jedna z past je ekvivalentem té druhé, s tím rozdílem, že do ní byly mechanickým vmícháním přidány nanočástice oxidu titaničitého (TiO_2).

6.1.1. Základní specifikace

1. Pájecí pasta **AIM NC273LT® NO CLEAN SOLDER PASTE**

Obsah: 58Bi42Sn (58 hm.% obsahu bismutu, 42 hm.% obsahu cínu)

Velikost částic v slitině: 20-32 μm – Typ 4, sférické částice

Obsah pájecí slitiny v pastě: 89,5 hm. %

Teplota přetavení: 138 °C

Tavidlo: NC273LT

2. Pájecí pasta **AIM NC273LT® NO CLEAN SOLDER PASTE** s přidáním nanočástic TiO_2

Obsah: 58Bi42Sn (58 hm.% obsahu bismutu, 42 hm.% obsahu cínu)

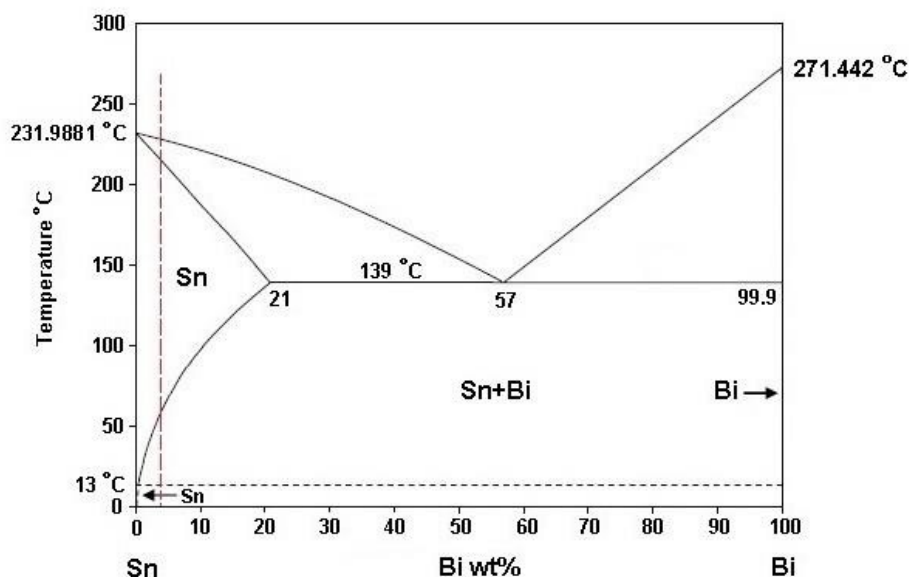
Velikost částic v slitině: 20-32 μm – Typ 4, sférické částice

Obsah pájecí slitiny v pastě: 89,5 hm. %

Teplota přetavení: 138 °C

Tavidlo: NC273LT

Obsah nanočástic TiO_2 : 0,1 hm. %



Obrázek 9: Fázový diagram slitiny Bi-Sn [25]

6.2. Vmíchání nanočástic do pasty

Existují dva hlavní způsoby jak přidat nanočástice do pájecí pasty. Jedním z nich je vmíchání nanočástic pomocí ultrazvuku, nebo jsou nanočástice mechanicky vmíchány. Přidání nanočástic do pájecí pasty v této práci proběhlo mechanickým vmícháním, po přesném zvážení potřebného množství aditiva, které

v tomto případě bylo 0,1 hm.%, bylo odměřeno 254 mg nanočástic při hmotnosti pasty 254 g.

Přidání nanočástic do pájecí pasty v této páci proběhlo mechanickým vmícháním. Po přesném zvážení potřebného množství aditiva, které v tomto případě bylo 0,1 hm.%, bylo odměřeno 254 mg nanočástic při hmotnosti pasty 254 g.

Po přidání nanočástic do pasty bylo potřeba pastu pečlivě rozmíchat pro dosažení co nejvíce homogenního rozložení aditiva v celém objemu pasty. Nejlepším způsobem v laboratorních podmínkách bylo použití centrifugy pro proces centrifugace, který sebou jeví rozdělení částic po objemu pomocí odstředivé síly.

Na protizávaží, které je potřebné pro správně průběh centrifugace byla zvolena jiná pasta o stejné hmotnosti. Proces centrifugace trval 15 minut.

6.3. Nanosení testovaných past na vzorky šablonovým tiskem

Nanosení obou past bylo provedeno pomocí metody šablonového tisku, která je popsána v *Kapitole 5*. Pro porovnání roztékavosti byly celkově nanoseny 72 testovacích bodů na třech různých površích DPS.

6.3.1. Nanosení pasty na DPS

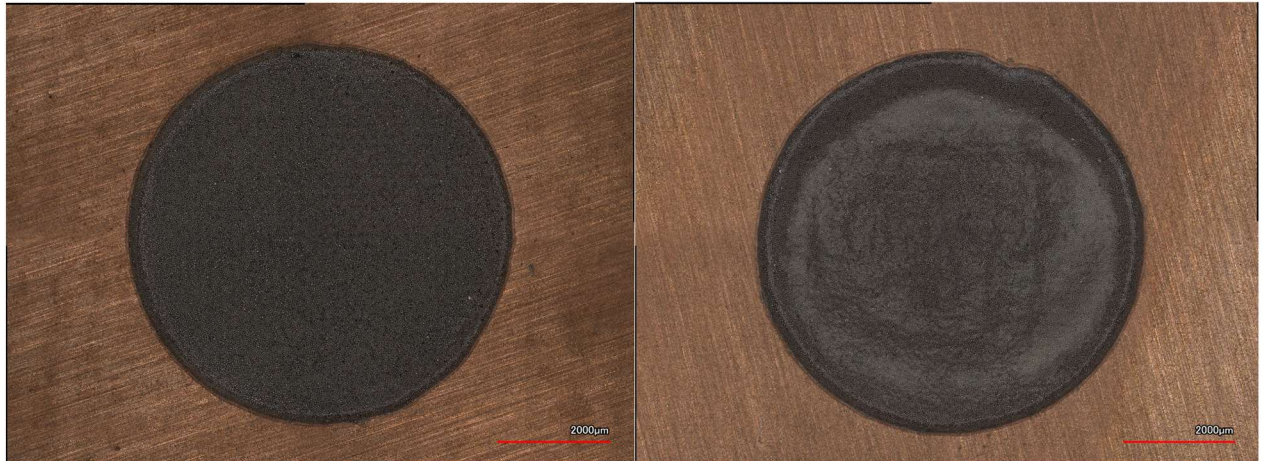
Pro zkušební vzorky byly v této práci použity různé povrchové úpravy. Testována byla roztékavost na **měděném povrchu bez úpravy, OSP** (Organic Solderability Preservatives) a **ENIG** (Electroless Nickel Immersion Gold).

Při procesu nanášení pasty na DPS se musí dbát na správné umístění šablony nad samotnou DPS, pro co nejpřesnější výsledek procesu. Pro proces nanosení pasty šablonovým tiskem byla použita šablona o tloušťce 2mm se čtyřmi kruhovými otvory, které byly rozmístěny symetricky od středu šablony. Šablona byla ručně upevněná na podložku, na kterou byly předem nalepeny omezující rohy ve tvaru čtverce, čili ve tvaru zkoušené desky.



Obrázek 10: šablona, použitá při šablonového tisku pájecích past

Po nanesení pasty na vzorek následuje očištění šablony pomocí izopropylalkoholu a opakování procesu pro následující vzorek. Pro obě pasty je tento proces shodný. V případě nedodržení postupu očištění šablony by se mohlo stát, že zbytky pasty zůstanou v otvorech a pro následující desku by to mohlo ovlivnit kvalitu nanesení pasty. V případě nehomogenního nanesení pasty je nutné proces opakovat, po očištění šablony a vzorku se pasta nanese na desku znovu.



Obrázek 11: Nanesená pasta: BiSn na měděném povrchu(vlevo), BiSn+TiO₂ na měděném povrchu(vpravo)

6.4. Snímání plochy nanesených past

Snímání bylo prováděno pomocí konfokálního mikroskopu VK-X1000 od Keyence(Japonsko) a softwaru MultiAnalyzer, pro účely práce byla použita čočka s 2,5x zvětšením. Snímek vzorku nanesené pasty je pokaždé složen ze 4. částí, pomocí funkce *Stitching*. Snímek je uložen do formátu VK6. Soubory byly potom převedeny do formátu TIFF s přidáním měřítka pro následné změření plochy každého vzorku pomocí softwaru NIS-Elements(Nikon Instruments Inc., USA).

6.5. Přetavení vzorků pomocí průběžné pájecí pece

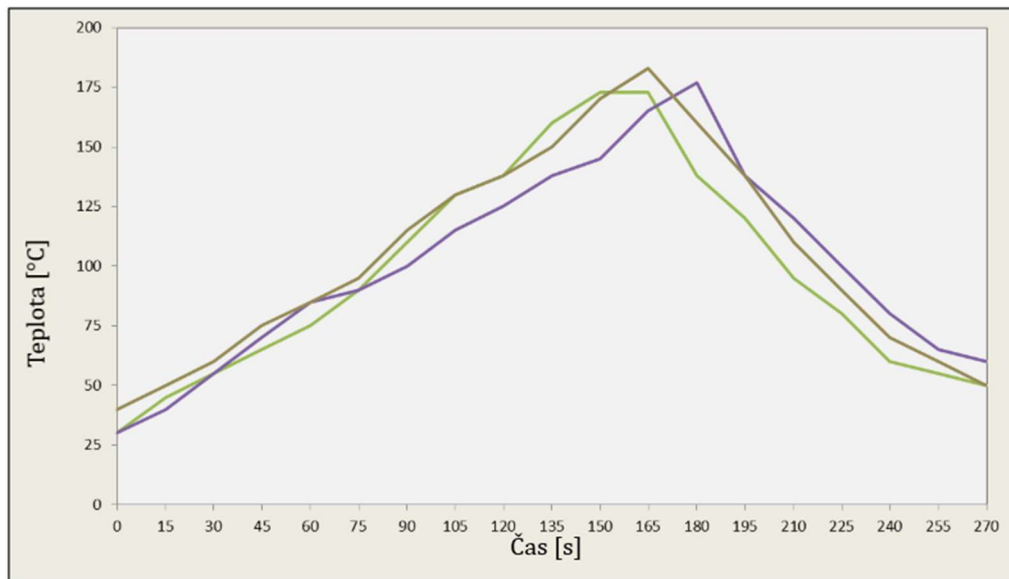
Po nanesení a nasnímání nepřetavených vzorků následovalo jejich přetavení v průběžné pájecí peci MISTRAL 560.

Nastavené hodnoty teplotního profilu

- **Preheat 1:** 100 °C
- **Preheat 2:** 175 °C
- **Reflow:** 175 °C
- **Rychlost posunu dopravníku:** 20 cm/min

Průběžná pájecí pec použitá v tomto experimentu má 3 zóny a to 2 zóny předehřevu a sekci přetavení, přes které je pásovým zásobníkem dopravovaná DPS. Proces přípravy vzorků zkoumaných past na DPS zahrnoval jejich správné umístění

na střed pásového dopravníku, pro rovnoměrný ohřev všech částí DPS. Proces přetavení pájecí pasty v průběžné peci je popsán v kapitole 2.3.



Graf 1: Teplotní profil doporučený výrobcem použité pájecí pasty [26]

Hotové přetavené vzorky byly následně očištěny od tavidla pomocí speciálního kartáče a izopropylalkoholu, potom bylo provedeno snímání jejich výsledné plochy konfokálním mikroskopem.

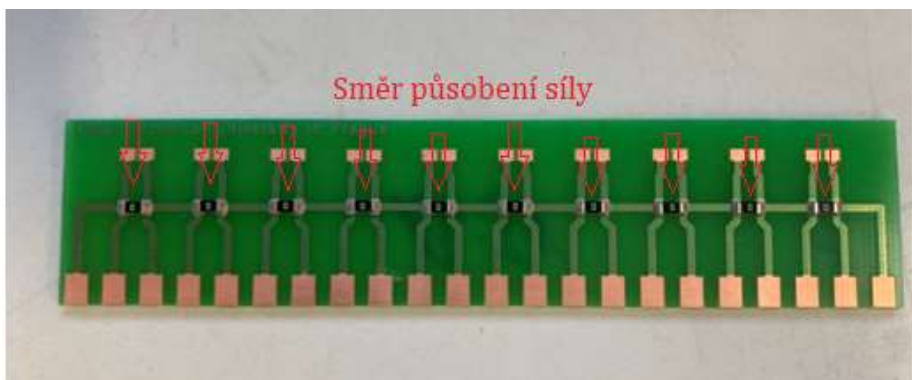
6.6. Mechanická zkouška pevnosti

Přípravu a průběh mechanické zkoušky pevnosti lze popsat v těchto bodech:

- 1) Nanesení pasty na DPS – způsob nanesení zkušebních past na DPS probíhal metodou šablonového tisku, stejnou jako u zkoušky měření roztékavosti. Šablona byla tvořena nerezovou ocelí o tloušťce 200 μm a uprostřed byly vyřezány otvory potřebné k nanesení testovaných past na konkrétní místa (plošky), určené k následnému osazení rezistory.
- 2) Vizuální kontrola kvality tisku pasty – tento krok byl velmi důležitý, protože při nedostatečné kvalitě nanesení pasty, která se může projevovat například nedostatečným množstvím nanesené pasty nebo naopak množstvím přebytným, je výsledný pájený spoj nedostatečně mechanicky odolný a to zásadně ovlivňuje průběh samotné zkoušky. Proto kontrola homogenity nanesené pasty je nutná.
- 3) Osazení rezistorů – osazení rezistorů proběhlo pomocí vakuové pinzety, která pomocí podtlaku uchopí potřebný rezistor a pomocí možnosti ručního polohování se součástky osadí na plošky, pokryté pájecí pastou. Důležitá je při tomto procesu

kontrola usazení kontaktů rezistoru na plošku, jelikož nesprávné osazení součástky může vést např. k efektu nahrobního kamene (tombstone effect) [27].

- 4) Zapájení DPS – zapájení DPS proběhlo v průběžné pájecí peci MISTRAL260, s nastaveným stejným teplotním profilem jako u zkoušky měření roztékavosti. Pro kvalitní pájený spoj je potřeba dodržení správného teplotního profilu, pro příliš vysokou teplotu by se snížila účinnost tavidla a došlo by ke zvýšení oxidace na povrchu pájky. Pro teplotu nižší než je potřebná by mohlo dojít jen k částečnému a nedostatečnému přetavení pájecí pasty, což by následně způsobilo velmi malou kvalitu výsledného spoje.
- 5) Výsledné očištění DPS – po přetavení následovalo očištění DPS od zbytku tavidla a vyloučených nanočástic pomocí izopropylalkoholu pro zajištění stejných podmínek pro mechanickou zkoušku pro DPS s oběma pastami. Hlavní důvodem byly vyplavené nanočástice okolo přetavené nanokompozitní pasty které by mohly následně ovlivnit tuto zkoušku.



Obrázek 12: Připravený vzorek DPS pro mechanickou zkoušku

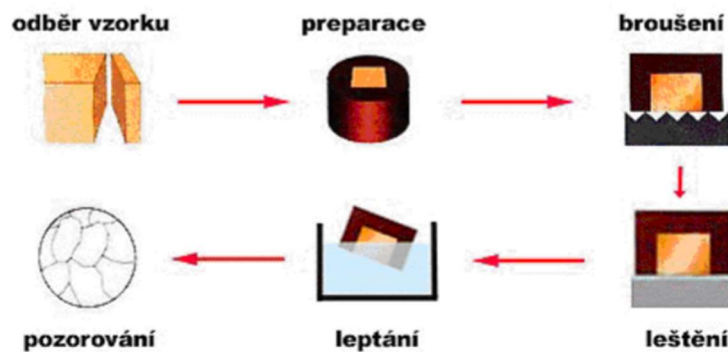
Nejprve je připravená DPS správně upevněná do nepohyblivé části trhačky a dbá se na to aby zkoušený rezistor, resp. pájený spoj mezi vývody rezistoru a povrchem DPS byl přesně v rovině a pod trhačí pohyblivým trnem. Směrem působení síly, naznačeným v *Obrázku 12* se pohyblivá hlava blíží k rezistoru konstantní rychlostí 1mm za minutu a po přímém styku s rezistorem na něj působí silou s lineárním zvětšením, po tom co je dosaženo mechanického poškození spoje, do tabulky výsledků softwaru spojeného s trhačkou je zapsána velikost síly, při které k tomuto poškození dojde.

Podle hodnot naměřené síly bylo v práci provedeno porovnání střední hodnoty mechanické pevnosti v případě pasty bez nanočástic a nanokompozitní pasty.

7. ZKOUMÁNÍ VRSTVY IMC A PRVKOVÁ ANALÝZA

7.1. Příprava výbrusů

Pro vytvoření výbrusů potřebných k prozkoumání rozdílů v intermetalických vrstvách výsledných pájených spojů je nejprve potřeba nařezat DPS na kterých jsou hotové pájené spoje na velikost potřebnou k jejich následnému zalití do epoxidové pryskyřice. Pro tento účel byla použita pásová pila, jejíž přesnost je pro experiment dostačující.



Obrázek 13: Postup přípravy metalografického výbrusu [28]

Po vyřezání potřebné velikosti vzorků následuje jejich očištění od zbytků DPS, které se usadili na vzorcích v průběhu řezání a jejich zalití do speciální válcové formy s pomocí epoxidové pryskyřice.

Zalití do válcové formy je běžná praxe pro metalografické výbrusy, důvodem je zlepšení pevnosti vzorku, zachování jeho struktury, se vzorky zalitými do metalografického výbrusu se pracuje mnohem lépe [29]. Také je nutné dodat že při použití právě válcového tvaru zalévací formy je dosaženo určité automatizace procesu výzkumu výbrusu, protože tento tvar je jedním z definovaných pro úchopy do určitých měřících přístrojů.

Zalití je provedeno za studena, pomocí epoxidové pryskyřice. Důvod použití právě této technologie zalití vzorků je v rozdílu zalévacích teplot v průběhu procesu, které se pohybují okolo 40-190°C v závislosti na druhu použité pryskyřice [30].

Po zalití následuje broušení vzorku, během kterého se odebírá nadbytečná pryskyřice až do roviny řezu zkoumané plochy. Pro tento účel se používají různé brusné kotouče, postupuje se od kotoučů s největší velikosti zrn až po ty s nejmenší velikostí [30].

Po potřebném vybroušení následuje leptání vzorků, tento krok je potřebný ke zviditelnění mikrostruktury pájeného spoje a vytvoření kontrastu mezi jednotlivými materiály výbrusu, které by byly jinak nerozlišitelné pro posléze použitý mikroskop [29].

Následuje finální očištění vzorku od zbytků abrazivu a pryskyřice a finální leštění, po kterém je vzorek připraven k měření.

7.2. Elektronová mikroskopie

Namísto viditelného světla využívá elektronová mikroskopie svazek elektronů, což umožňuje dosáhnout mnohem lepšího rozlišení a detailního zobrazení objektů. Principy elektronové mikroskopie spočívají v generování elektronového paprsku, jeho fokusaci na vzorek, interakci s materiálem a detekci vzniklých signálů.

Elektronový paprsek je vytvořen v elektronovém kanónu a urychlován k vzorku. Tam je fokusován pomocí elektromagnetických čoček, aby se vytvořil ostrý obraz. Když elektronový paprsek narazí na vzorek, dochází k různým interakcím s atomy materiálu. To zahrnuje rozptyl elektronů, absorpci a emisi sekundárních částic, jako jsou zpětně rozptýlené elektrony nebo rentgenové záření [31].

Signály vzniklé interakcemi elektronů s vzorkem jsou detekovány různými typy detektorů. Zaznamenané informace jsou poté zpracovány a zobrazeny na monitoru nebo zaznamenány digitálně. To umožňuje získání obrazů s vysokým rozlišením, které poskytují detailní informace o struktuře, povrchu a chemickém složení materiálů [31].

7.3. Zkoumání IMC

Jak bylo uvedeno v dřívějších kapitolách, intermetalická sloučenina vzniká na rozhraní pájka-povrch desky a je nedílnou součástí pájecího procesu. Na rozhraní Sn-Cu vzniká sloučenina Cu_6Sn_5 , velikost a mikrostrukturu intermetalické vrstvy tvořené touto sloučeninou lze přehledně vyhodnotit pomocí elektronové mikroskopie [32]. Pomocí této metody lze provést také prvkovou analýzu intermetalické sloučeniny.

Pro zkoumání intermetalické vrstvy vytvořené v průběhu přetavení pájecí pasty bylo použito elektronového mikroskopu. Kvůli nevodivé pryskyřici, ve které byly zalité zkoumané výbrusy byla použita testovací hlava. Proběhlo nasnímání všech výbrusů, následná analýza a porovnání intermetalických vrstev vytvořených v průběhu přetavování testovacích pájecích past.

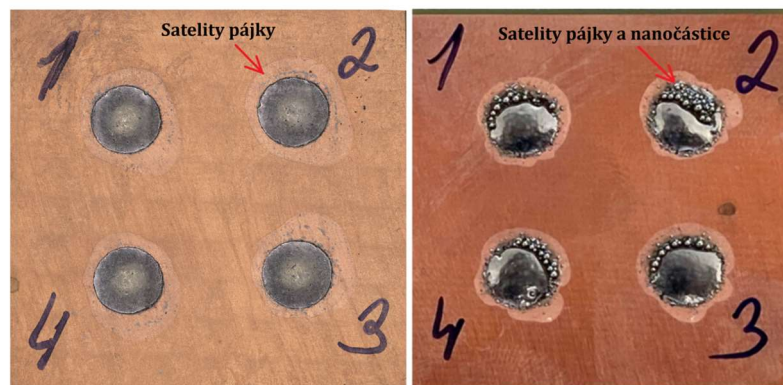
8. PROBLÉM PŘI PŘETAVOVÁNÍ NANOKOMPOZITNÍ PASTY

Jak je známo z předchozích studií vliv nanočástic na chování pájecích past v průběhu přetavování je význačný např. změnou teplotního profilu v konkrétních fázích a to ve větší míře v závislosti na koncentraci nanočástic ve zkoumané pastě [20], [33], [34].

V průběhu přetavování DPS s nanokompozitní pastou jak pro měření roztékavosti, tak pro mechanickou zkoušku se podle vizuálního zhodnocení pájených spojů zjistilo, že nanočástice jsou v průběhu přetavení pájecí pasty vytlačovány tavidlem na povrch vytvářejícího se pájeného spoje a dochází tak k jejich usazování okolo hotového spoje spolu se zbytky tavidla.

Možnou příčinou tohoto jevu je velmi špatná interakce tavidla, které je součástí pájecí pasty s přidanými nanočásticemi. Tavidlo je nejpravděpodobnějším důvodem toho, že se nanočástice během fáze přetavení nespojují s kuličkami pájky a jsou vytlačovány. Kuličky tvořené z části s pájky a nanočástic po vytvoření zoxidují a nadále není možné jejich spojení se zbytkem pájeného spoje.

Také z vizuálního posuzování je možné usoudit že tyto nanočástice přispívají k vybudování mnohem většího množství satelitů pájky než u pájky bez nanočástic. Porovnání vzorků pasty na měděném povrchu bez úpravy je znázorněno na *Obrázku 15*.



Obrázek 14: Porovnání přetavených vzorků BiSn pasty (vlevo) a BiSn pasty s přidáním nanočástic (vpravo)

Po zkoumání vlivu nanočástic z ostatních studií bylo rozhodnuto pokusit se změnit teplotní profil v jednotlivých sekcích průběžné pece pro možné zlepšení výsledné kvality pájeného spoje. teplotní profil sebou jeví v podstatě velikost dodání energie potřebné k přetavení pájecí pasty. Lze tedy usoudit že změnou rychlosti posuvu dopravníků nebo změnou teploty v jednotlivých sekcích se dosáhne dodání potřebného množství energie, které přispěje k lepšímu průběhu přetavení.

Po změně teplotního profilu v různé výši pro celkově 10 zkoumaných DPS bohužel nedošlo ke zlepšení výsledné kvality přetaveného spoje. Lze tedy usoudit že nejpravděpodobnější příčinou výsledné kvality pájeného spoje je tavidlo použité ve zkoumané pastě. Případně použití jiného typu tavidla, např. méně agresivního, by mohlo vyřešit tento problém.

9. VÝSLEDKY PRAKTICKÉ ČÁSTI

V následující kapitole je provedeno zhodnocení zkoušky roztékavosti, mechanické zkoušky a vlivu nanočástic na IMC.

9.1. Měření roztékavosti

Výsledky z měření roztékavosti jsou vyobrazeny na *Grafu 2*. Z naměřených ploch pájecí pasty před přetavením a po přetavení jsem následně pomocí následujícího vzorce vypočítal procentuální změnu plochy pájecí slitiny.

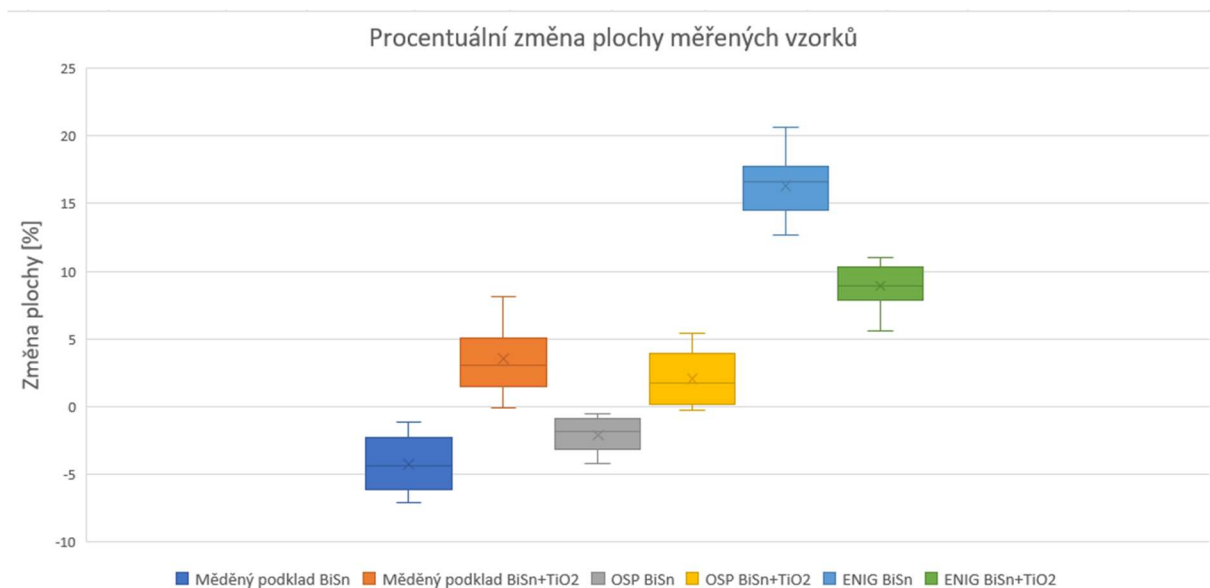
$$\Delta S = \frac{S_{\text{výsledná}} - S_{\text{počáteční}}}{S_{\text{počáteční}}} \quad (1)$$

Kde

ΔS – procentuální rozdíl ploch [%]

$S_{\text{výsledná}}$ – plocha přetavené pájecí pasty [mm²]

$S_{\text{počáteční}}$ – plocha nanesené pájecí pasty [mm²]



Graf 2: Měření roztékavosti

Dle *Grafu 2 a Tabulky 1* lze vidět že procentuální změna plochy na povrchu mědi u pasty bez nanočástic vychází v záporných číslech, tedy výsledná plocha přetavené pasy je menší než počáteční plocha před přetavením.

U povrchu OSP je tato hodnota také záporná, čímž se může usoudit stejné chování roztékavosti pájecí pasty jako u povrchu měděného a potvrzuje se tím tak to, že daná povrchová úprava je určena především k ochraně měděného povrchu před oxidací a neovlivňuje další parametry.

Pro povrch ENIG je procentuální změna skoro 20%, roztékavost pájecí pasty je na tomto povrchu největší. Jedná se tedy o povrch s nejlepší roztékavostí a pájitelností pro použitou pastu bez nanočástic.

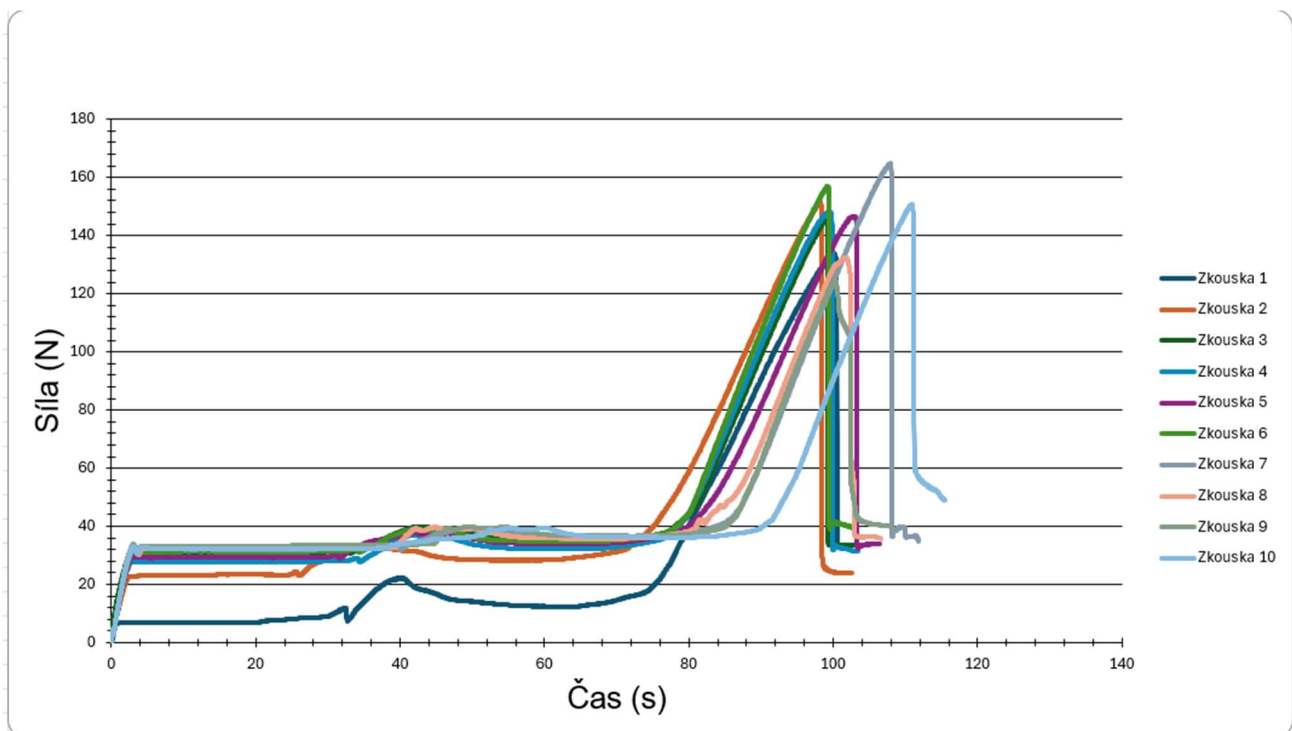
Co se týče pasty nanokompozitní, hodnoty procentuální změny na povrchu jak měděném, tak OSP jsou výrazně lepší v porovnání s pastou bez nanočástic. Pro povrchovou úpravu ENIG je tato hodnota nižší než u pasty bez nanočástic, zřejmě kvůli špatné interakci nanočástic s prvky této úpravy.

Celkově je tedy možné konstatovat pozitivní vliv nanočástic na výslednou roztékavost pájecí pasty po povrchu DPS na čisté mědi a s OSP povrchovou úpravou. U povrchové úpravy ENIG je tento efekt negativní z výše uvedeného důvodu.

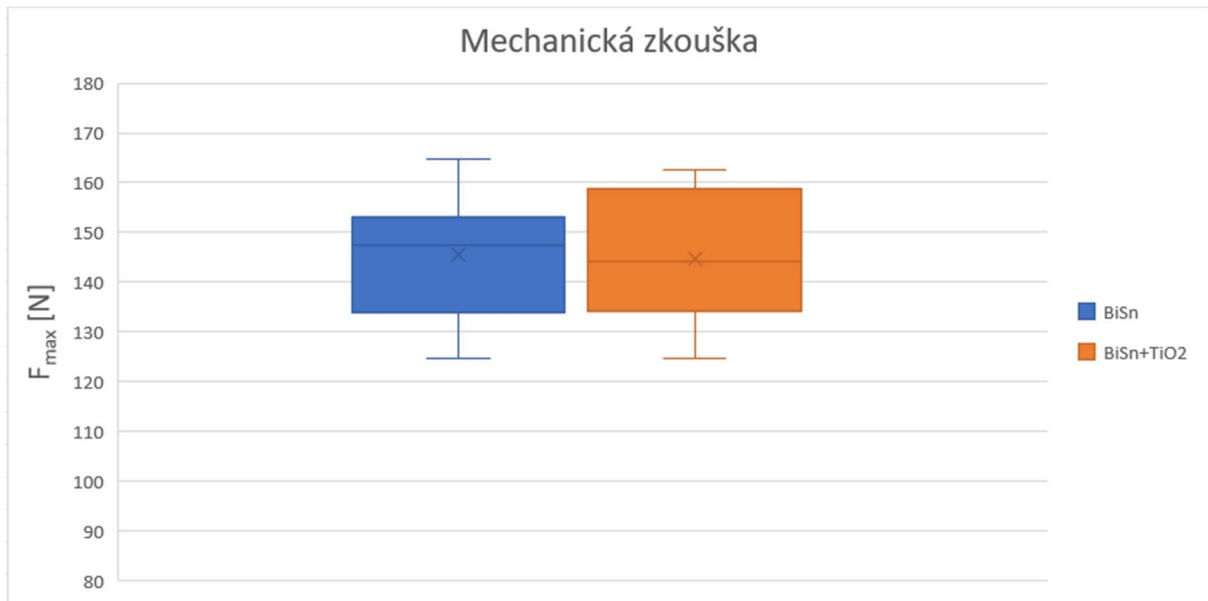
Procentuální rozdíl ploch [%]						
Úprava DPS	BiSn			BiSn+TiO2		
	Měď	OSP	ENIG	Měď	OSP	ENIG
Střední hodnota	-3,72	-3,64	19,98	4,23	2,43	8,77

Tabulka 1: Procentuální změna ploch vzorků testovaných past

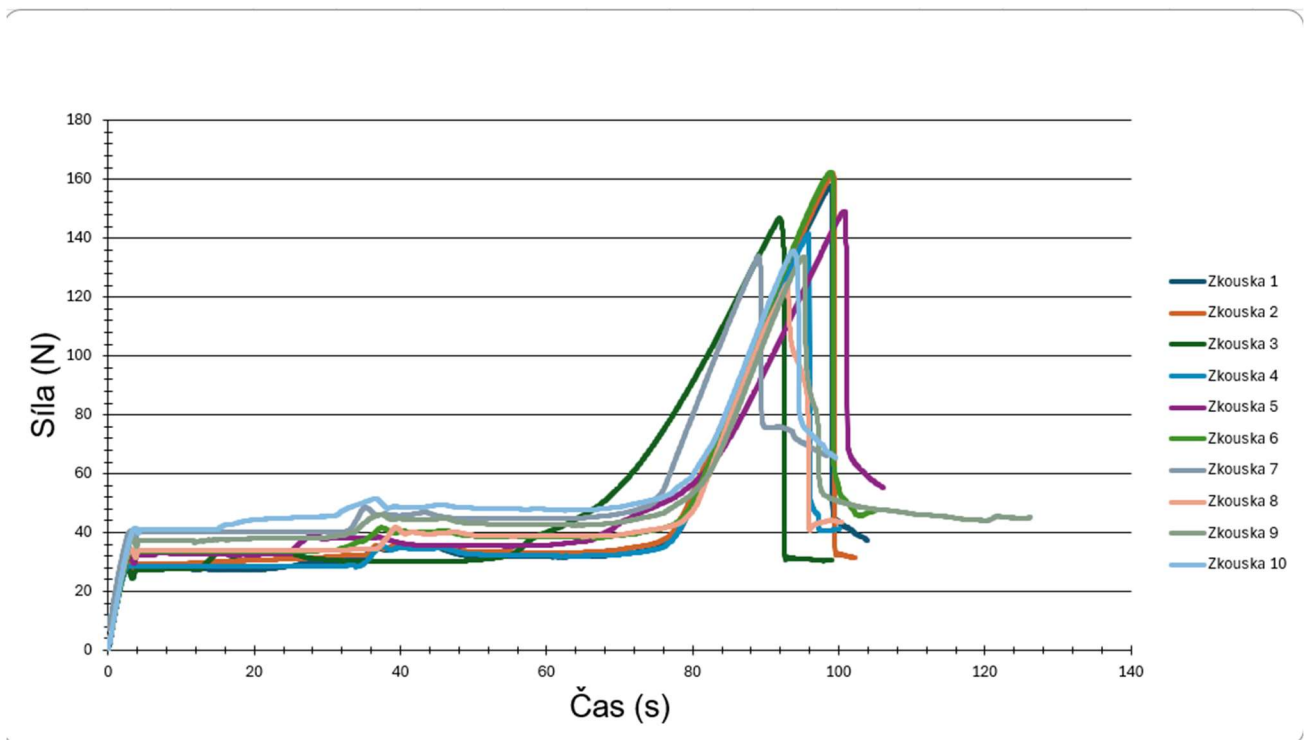
9.2. Mechanická zkouška pevnosti



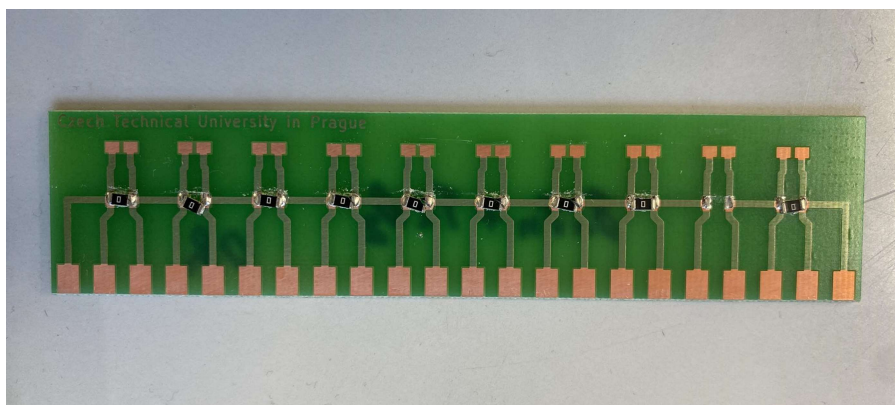
Graf 3: Průběh mechanické zkoušky pro BiSn pastu



Graf 5: Výsledky mechanické zkoušky



Graf 4: Průběh mechanické zkoušky pro BiSn pastu s přidáním nanočástic oxidu titaničitého



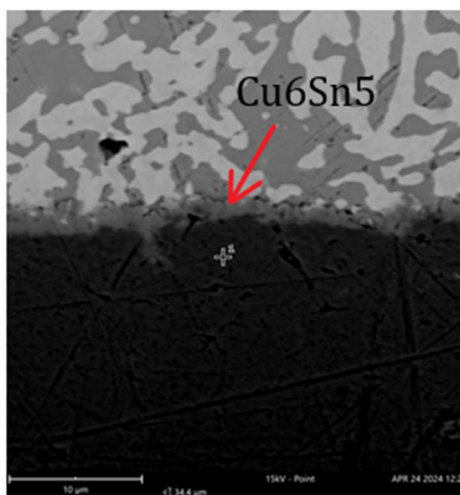
Obrázek 15: DPS po mechanické zkoušce, BiSn pasta s nanočásticemi

Z výsledných grafů a tabulky je vidět, že po nanesení stejného množství testovaných past na připravené DPS a osazení zkušebních rezistorů, po následném přetavení je střední hodnota maximální tlakové síly, při které dojde k mechanickému narušení pájeného spoje, je u obou past 145 N, vzorky byly testovány hned po přetavení pájecích past.

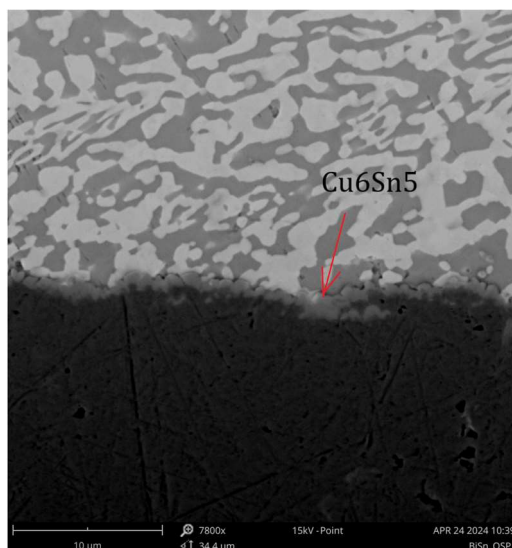
Je možné tedy říct, že pro nestárnuté vzorky je mechanická pevnost výsledného spoje pro obě testované pasty stejná, čili nanočástice nemají vliv na její mechanické vlastnosti.

9.3. Zkoumání IMC a prvková analýza

Jak je vidět z *Obrázku 16* vrstva sloučeniny Cu_6Sn_5 ve spoji na Cu bez povrchové úpravy je ve větší míře nehomogenní Intermetalická sloučenina má hrbolatý tvar na vrchní hranici spojení s vrstvou pájecí pasty. Oproti tomu na *Obrázku 17* je jasně vidět, že velikost intermetalické vrstvy na úpravě OSP je oproti intermetalické vrstvě na samotném měděném povrchu značně menší. Vrstva má taktéž hrbolaté zakončení, nehomogenita je ještě větší, způsobeno to je ale nejspíše nehomogenní vrstvou mědi na kterou intermetalická vrstva navazuje.

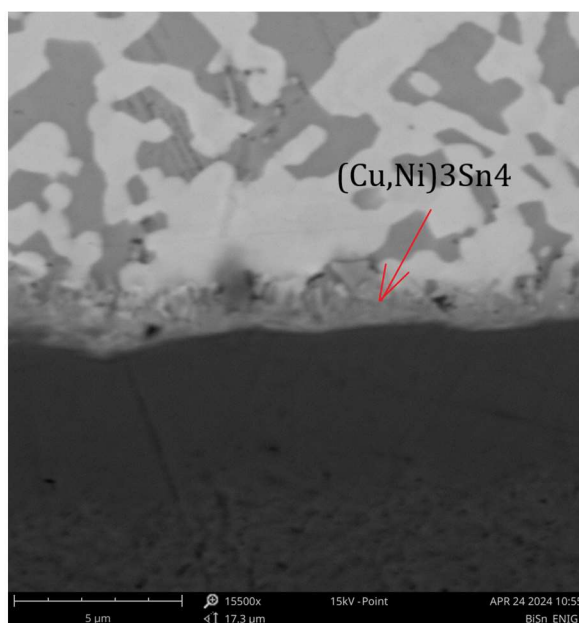


Obrázek 16: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu bez úpravy



Obrázek 17: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu s povrchovou úpravou OSP

Jak je vidět na *Obrázku 18*, zvětšení elektronového mikroskopu je 2x vyšší než u měření předchozích povrchových úprav. Toto zvětšení bylo zvoleno z toho důvodu, že IML u povrchové úpravy ENIG je velmi tenká. Tloušťka intermetalické vrstvy je přibližně dvojnásobně menší než u ostatních povrchových úprav, důvodem je nikl, který je součástí povrchové úpravy ENIG. Je tedy možné usoudit že nikl v této povrchové úpravě tvoří difuzní bariéru, která zpomaluje růst IML. Vrstva je více homogenní, vrchní hranice má špičaté zakončení.

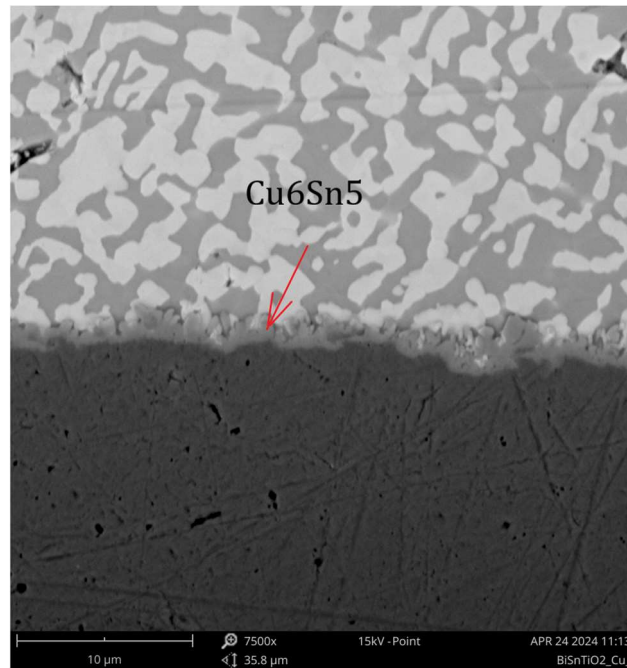


Obrázek 18: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty bez nanočástic na měděném povrchu s povrchovou úpravou ENIG

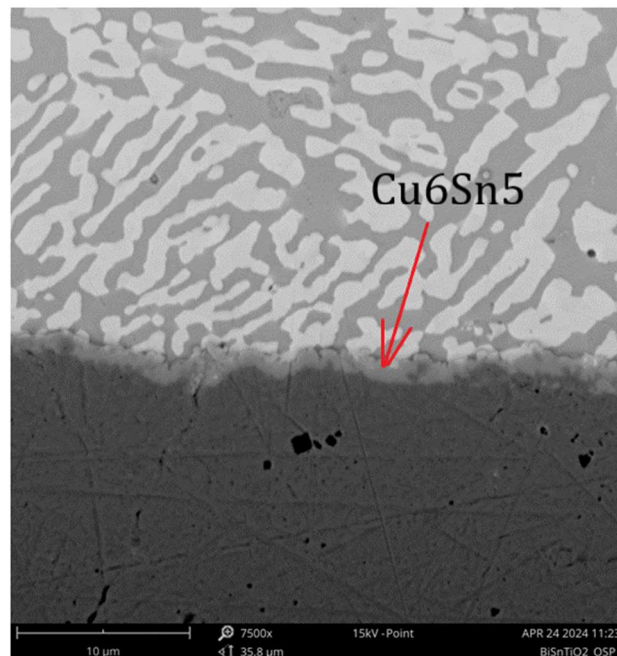
Při porovnání *Obrázků 16 a 19* je možné usoudit, že přidané nanočástice do pájecí pasty nijak významně neovlivňují chování IML po přetavení. Možným důvodem toho je předpoklad, že v pájecí slitině přidané nanočástice buď vůbec nejsou, nebo jich tam je velmi málo. Po přetavení bylo totiž velké množství tavidlem

vyplaveno okolo pájeného spoje; pravděpodobně z důvodů špatné interakce tavidla s použitými nanočásticemi.

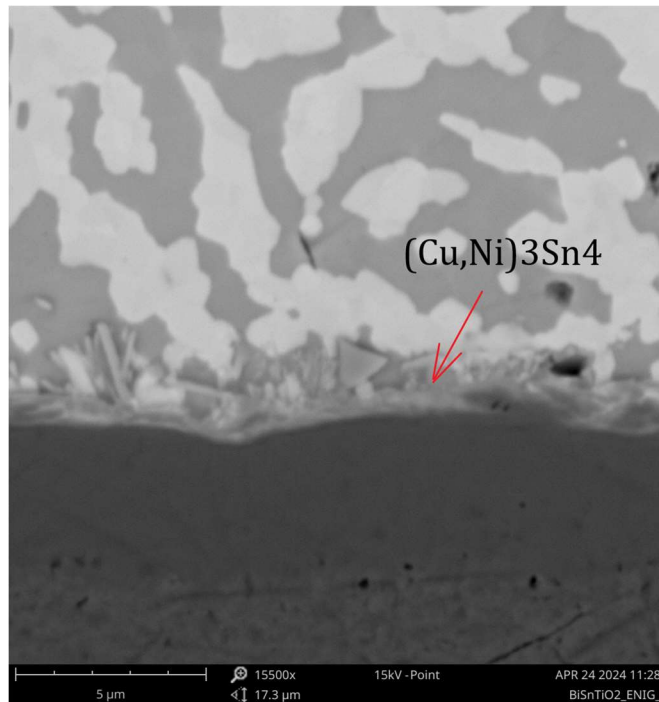
IML je stejné tloušťky jako u pasty bez nanočástic a její tvar je také podobný.



Obrázek 19: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu bez úpravy



Obrázek 20: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu s úpravou OSP

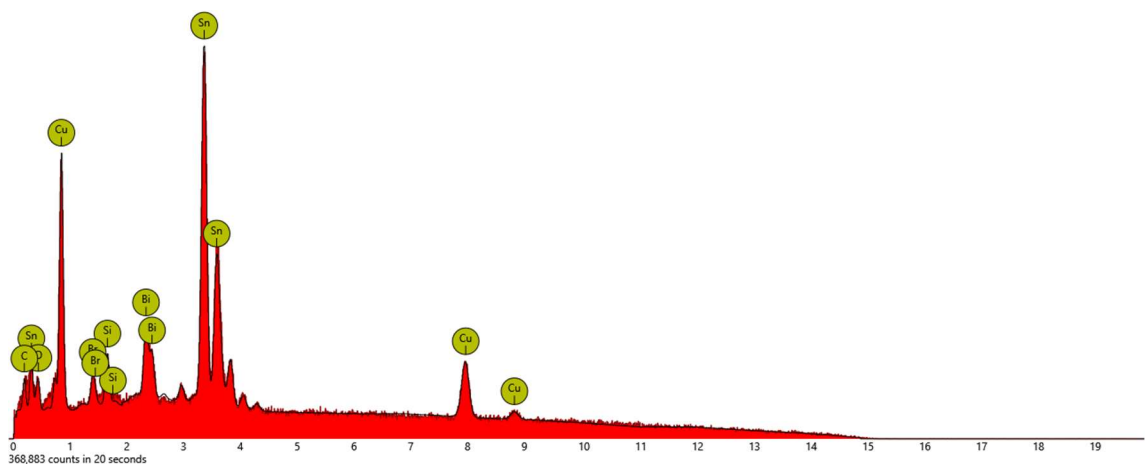


Obrázek 21: Vrstva IMC výbrusu pájecí pasty s přidáním nanočástic na měděném povrchu s úpravou ENIG

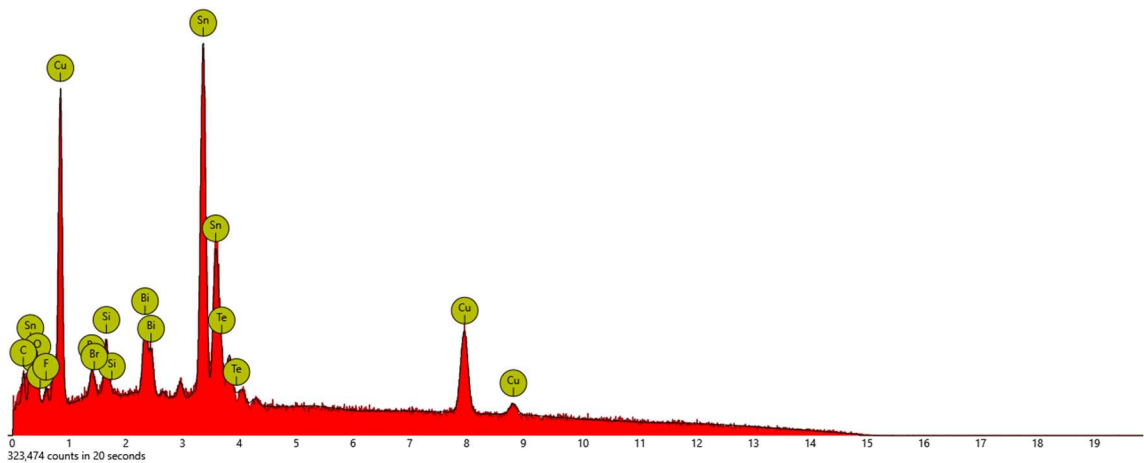
V porovnání IML na povrchových úpravách OSP a ENIG je zřejmé, že vzhled i tloušťka intermetalické vrstvy se nemění s přidáním nanočástic oxidu titaničitého do pájecí pasty. Nanočástice nepřispívají ke zpomalení růstu IML podle provedeného experimentu.

9.4. Prvková analýza IMC

Poslední provedenou analýzou byla prvková analýza IML, která byla součástí zkoumání IMC pomocí elektronové mikroskopie. Vytvořená vrstva IMC u bezolovnatých slitin na bázi cínu ve spojení s měděným povrchem DPS tvoří intermetalickou sloučeninu Cu_6Sn_5 , tato sloučenina je tedy složena z cínu a mědi. Vliv nanočástic na její růst byl zkoumán v této analýze.



Graf 6: Prvková analýza IMC, měděný podklad, BiSn pasta



Graf 7: Prvková analýza IMC, měděný podklad, BiSn+TiO₂ pasta

U obou grafů uvedených výše je vidět, že prvkové složení intermetalické vrstvy je totožné, tj. skládá se z cínu a mědi, ostatní prvky jako jsou například brom, kyslík a uhlík jsou prvky obsažené v nečistotách na povrchu výbrusu z broušení a leštění.

Prvková analýza IMC	BiSn	BiSn+TiO ₂
	Hmotnostní koncentrace [%]	
Bi	17,28	16,88
Sn	52,25	50,31

Tabulka 2: Hmotnostní koncentrace prvků v IMC

V Tabulce 2 jsou uvedené jednotlivé hmotnostní koncentrace prvků, které tvoří intermetalickou sloučeninu v jednotlivých pastách a tyto koncentrace jsou velmi podobné. Lze tedy konstatovat že přidané nanočástice významně neovlivňují rozdělení mědi a cínu ve vytvořené intermetalické vrstvě.

10. ZHODNOCENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Vliv nanočástic na výsledné pájecí pasty je předmětem výzkumu posledních let, tato technologie v pájecím průmyslu je poměrně nová.

Po provedení experimentů, konkrétně zkoušky roztékavosti, mechanické zkoušky a prvkové analýzy IML bylo zjištěno, že nízkoteplotní bezolovnatá pájecí pasta od firmy AIM s označením NC273LT není pro vmíchání nanočástic TiO_2 vhodná. Roztékavost pasty je sice po přidání nanočástic lepší, avšak po přetavení jsou nanočástice tavidlem vyplaveny buď v plném objemu, nebo jenom z části. Jejich plný vliv na tuto vlastnost tedy nebyl zcela prozkoumán. Výsledkem mechanické zkoušky bylo zjištění, že nanočástice téměř neovlivňují mechanickou odolnost pájeného spoje ve střihu, navíc i u této zkoušky nastal problém vyplavení nanočástic okolo zapájených rezistorů na DPS. Prvková analýza ukázala, že nanočástice významně neovlivňují strukturu IML v pájeném spoji.

Pro očištění pájeného spoje od tavidla s nanočásticemi je potřeba dalšího zařízení do pájecí linky, které nanočástice odstraní. V opačném případě je kvalita pájených spojů velmi nízká. Možné řešení tohoto problému je použití jiného tavidla než toho, které je do pasty vmícháno výrobcem.

11. EKONOMICKÁ ČÁST

Táto časť práce je zaměřená na ekonomické porovnání a zhodnocení využití nanočástic v pájecí pastě jako náhrada za pájení v dusíkové atmosféře z dat přednostně získaných od firmy používající pájecí linky ve své výrobě.

Změna pájecí linky je s tomto ohledu velice jednoduchá, protože jediným rozdílem v pájecím procesu je použití stejné pájecí pasty, doplněné o nanočástice TiO_2 a eliminace potřeby dusíku pro pájecí proces.

11.1. Analýza trhu

Analýza trhu v této práci spočívá ve zjištění nákladů pro použití obou variant ekonomického zhodnocení s ohledem na skutečné ceny uvedené na trhu pro jednotlivé prvky potřebné k realizaci těchto variant respektující určité slevy pro obchodníky.

11.1.1. Hodnocení nákladů na nanokompozitní pastu

Pro zhodnocení nákladů na výrobu DPS pomocí pájecí linky, konkrétně jejich přetavení v průběžní pájecí peci je potřeba zvážit jednotlivé náklady na provoz samotné pece a na použitou pájecí pastu. Při použití nanočástic oxidu titaničitého se zlepšují její jednotlivé vlastnosti, jako je roztékavost a mechanickou pevnost, tedy pasta má přibližně stejné vlastnosti jako BiSn pasta bez přidání nanočástic při pájení v dusíkové atmosféře.

Nejprve je potřeba zjistit cenu pájecí pasty používané pro obecnou pájecí linku. S předpokladem použití pasty zkoumané v této práci, čili nízkoteplotní bezolovnatou pájecí pastu od firmy AIM s označením NC273LT. Cena této pasty se na trhu pohybuje okolo 2022 Kč za 500 g pro soukromé osoby [35]. Firmy v elektrotechnickém průmyslu pro potřeby výroby objednávají pájecí pasty (slitiny) ve velkém objemu. Z dat poskytnutých od firmy, která se tímto průmyslem zabývá bylo zjištěno, že při velkoobjemovém odběru mají firmy slevu přibližně 30% z ceny na trhu. Výslednou cenu konkrétní pájecí pasty tedy uvažujeme 1415 Kč za 500 g pasty, která je v procesu pájení použita.

Dalším kritériem pro výpočet výsledných nákladů je určení ceny nanočástic, které se do pasty zmíněné výše přidávají. V této práci byly použity nanočástice od firmy Sigma-Aldrich, se jednalo o mix rutilu a anatasu s velikostí nanočástic menší než 100 nm. Cena těchto nanočástic na trhu je 7060 Kč za 100 g nanočástic [36]. Při uvažování stejné slevy pro velkoobjem je výsledná cena za 100 g nanočástic 4942 Kč.

11.1.2. Hodnocení nákladů na dusík

Pro pájení v dusíkové atmosféře je potřeba samotný dusík, který se v průběhu procesu přidává do procesu pájení pro zvýšení efektivity procesu vytlačněním kyslíkové atmosféry a smáčivých vlastností použité pájecí pasty.

Podle informací získaných od firmy pohybující se v tomto průmyslovém odvětví, ceny dusíku pro firmy se pohybují okolo 7500 Kč za 1000 kg, čili za 860m³.

11.2. Výpočet NPV

NPV (*Net Present Value*) je metoda hodnocení investic a informuje, kolik finančních prostředků zvolená investice přinese za svoji předpokládanou dobu životnosti. Pro účel ekonomické části této práce budou porovnávány jednotlivé NPV nákladů na přetavení DPS v průběžné pájecí peci pomocí pasty s přimíchanými nanočásticemi a přetavení DPS v průběžné pájecí peci s použitím dusíkové atmosféry.

11.2.1. Vstupní data

Pro výpočet NPV neboli čisté současné hodnoty je nejprve určit jednotlivé náklady k určení výsledného hotovostního toku za jednotlivé roky (CF), z kterého se NPV počítá.

Náklady na použitý materiál

Z dat získaných od průmyslového partnera je pro přetavení jedné „průměrné“ DPS v průběžné pájecí peci potřeba 3,1g pájecí pasty. Při nákupní ceně pasty zkoumané v této práci 1415,33 Kč za 500 g pasty [35], do které je zahrnuta sleva pro velkooběr pro průmyslové firmy, je výsledná cena pasty potřebné k přetavení jedné DPS **8,78 Kč**.

$$N_{pasta} = \frac{C_{500}}{500} \cdot Q_{pasta} = \frac{1415,33}{500} \cdot 3,1 = 8,78 \text{ Kč} \quad (2)$$

Kde

C_{500} – nákupní cena pasty za 500 g [Kč]

N_{pasta} – náklady na použitou pastu [Kč]

Q_{pasta} – množství potřebné pasty [g]

Při použití dusíkové atmosféry je průtok dusíku průběžnou pecí přibližně 28m³ za hodinu. Čas potřebný k přetavení jedné DPS je 12,5 vteřiny, tedy množství dusíku potřebné pro přetavení jedné DPS je přibližně 0,097 m³. Cena tohoto množství dusíku podle dat získaných od firmy působící v tomto odvětví je **0,85 Kč**.

$$N_{dusik} = \frac{C_{860}}{860} \cdot Q_{dusik} = \frac{7500}{860} \cdot 0,037 = 0,85 \text{ Kč}$$

Kde

N_{dusik} – náklady na použitý dusík [Kč]

Q_{dusik} – množství potřebného dusíku [m³]

C_{860} – cena za 860 m³ dusíku [Kč]

Při použití nanočástic do pájecí pasty pro zlepšení její vlastností je určeno množství 0,1 hm. %, čili pro 3,1 g pasty pro jednu DPS je potřeba 0,031 g nanočástic. Ve výpočtu se předpokládá, že výrobní firma disponuje průmyslovou centrifugou pro vmíchání nanočástic do pájecí pasty, investice do tohoto zařízení je tedy nulová. Dalším předpokladem je že náklady na pájecí pastu vzrostou jen o cenu použitých nanočástic. Výsledná cena použitých nanočástic pro přetavení jedné DPS je při odhadu ceny nanočástic pro průmyslové firmy přibližně 4942 Kč za 100 g [36] **8,78 Kč**.

$$N_{nano} = \frac{C_{100}}{100} \cdot Q_{nano} = \frac{4942}{100} \cdot 0,031 = 0,153 \text{ Kč} \quad (3)$$

Kde

N_{nano} – náklady na použité nanočástice [Kč]

Q_{nano} – množství potřebných nanočástic [g]

C_{100} – cena za 100g nanočástic [Kč]

Mzdové náklady

Pro určení těchto nákladů byla zvolena hodnota průměrného platu pracovníka v elektrotechnickém průmyslu v ČR **44868 Kč** za pracovní měsíc na moment zpracování této práce [37]. Při respektování času potřebného k přetavení jedné DPS (12,5 s) je možné vypočítat mzdové náklady pro toto přetavení:

$$N_{mzvodé} = \frac{P}{T} \cdot T_p = \frac{44868}{576000} \cdot 12,5 = 0,97 \text{ Kč} \quad (4)$$

Kde

P – průměrný plat v elektrotechnickém průmyslu [Kč]

$N_{mzdové}$ – mzdové náklady [Kč]

T – časová délka trvání pracovního měsíce zaměstnance [s]

T_p – čas potřebný pro přetavení jedné PDS [s]

Náklady na energii

Při určení ceny elektřiny pro přetavení jedné DPS byla zvolena cena podle nabídky tarifů pro podnikatele od firmy PRE as. pro lokalizaci výrobní produkce v Praze pro rok 2024, tedy **7461,85 Kč/MWh** s použitím tarifu CO2d [38]. Při přibližné spotřebě průmyslové pájecí pece, která činí 11kWh je spotřeba energie pro přetavení jedné DPS 38,19 Wh. Cena elektřiny potřebná pro přetavení jedné PDS v průběžné pájecí peci je tedy **0,285 Kč**.

$$N_{energie} = \frac{C_{MWh}}{1000000} \cdot Q_e = \frac{7461,85}{1000000} \cdot 38,19 = 0,285 \text{ Kč} \quad (5)$$

Kde

C_{MWh} – cena energie za jednu MWh [Kč]

$N_{energie}$ – náklady na energii [Kč]

Q_e – množství energie potřebné k přetavení jedné DPS [Wh]

Celkové náklady

Celkové náklady pro jednotlivé varianty se spočítají jako součet nákladů dílčích, čili

$$N_{celkove_nano} = N_{pasta} + N_{nano} + N_{mzdové} + N_{energie} \quad (6)$$

$$N_{celkove_dusik} = N_{pasta} + N_{dusik} + N_{mzdové} + N_{energie} \quad (7)$$

$$N_{celkove_nano} = 8,78 + 0,153 + 0,97 + 0,285 = \mathbf{10,19 \text{ Kč}}$$

$$N_{celkove_dusik} = 8,78 + 0,85 + 0,97 + 0,285 = \mathbf{10,88 \text{ Kč}}$$

Následující tabulky znázorňují celkovou výši nákladů jednotlivých variant

NANOČÁSTICE - NÁKLADY NA VÝROBU	
Použito nanočástic	0,0031 g/ks
Použito pasty	3,1 g/ks
Cena nanočástic pro jednu DPS	0,15 Kč/ks
Cena pasty pro jednu DPS	8,78 Kč/ks
Cena za materiál pro přetavení jedné DPS	8,93 Kč/ks
Mzdové náklady na jednu DPS	0,97 Kč/kus
Elektrická energie spotřebovaná pro přetavení jedné DPS	38,19 Wh
Cena elektřiny na přetavení jedné DPS	0,29 Kč/kus
Náklady na přetavení jedné DPS	10,19 Kč/kus

Tabulka 3: Náklady na přetavení jedné DPS s použitím nanočástic

DUSÍK- NÁKLADY NA VÝROBU	
Použito dusíku	0,10 m ³ /ks
Použito pasty	3,1 g/ks
Cena dusíku pro jednu DPS	0,85 Kč/ks
Cena pasty pro jednu DPS	8,78 Kč/ks
Cena za materiál pro přetavení jedné DPS	9,62 Kč/ks
Mzdové náklady na jednu DPS	0,97 Kč/kus
Elektrická energie spotřebovaná pro přetavení jedné DPS	38,19 Wh
Cena elektřiny na přetavení jedné DPS	0,29 Kč/kus
Náklady na přetavení jedné DPS	10,88 Kč/kus

Tabulka 4: Náklady na přetavení jedné DPS s použitím dusíku

Po získání potřebných dat následuje výpočet samotného NPV s použitím následujícího vzorce

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} = \sum_{i=0}^n DCF_i \quad (8)$$

Kde

NPV – čistá současná hodnota nákladů [Kč]

r – diskont [%]

CF – hotovostní tok v daném roce [Kč]

DCF – diskontovaný hotovostní tok v daném roce [Kč]

n – doba životnosti nákladů [let]

Pro výpočet NPV jsou zvoleny následující údaje:

Diskont r – 7%, je to součet diskontu určeného podle odhadu rizika v elektrotechnickém odvětví průmyslu ve výši 4,25% a míry inflace pro duben 2024, která činí 2,9% [40].

Doba životností investice n – 5 let.

Předpokládaný růst nákladů pro přetavení DPS s nanokompozitní pastou stejně tak jako pro pájení v dusíku – **3%**.

Počet DPS který projde pecí ročně – **2 522 880 ks**. Při rychlosti přetavení pasty na jedné DPS rovné 12,5 s při 24-hodinovém provozu je tato hodnota relevantní.

Doba trvání investice	5 let
Diskont	7%
Růst nákladů na výrobu s nanočásticemi ročně	3%
Růst nákladů na výrobu s dusíkem ročně	3%
Délka přetavení jedné DPS	0,21 min
Počet DPS	2 522 880 Ks

Tabulka 5: Vstupní data pro výpočet NPV jednotlivých nákladů

Pro porovnání nákladů varianty s použitím nanočástic a varianty s použitím dusíku je také vhodné spočítat *RCF* neboli **roční ekvivalentní hotovostní tok**, který ukazuje čistou současnou hodnotu nákladů podělenou anuitním faktorem. Určuje rovnoměrné rozdělení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let životnosti investice, v tomto případě nákladů.

$$RCF = NPV \cdot a \quad (9)$$

Kde

NPV – čistá současná hodnota nákladů [Kč]

a – anuitní faktor [-]

RCF – roční ekvivalentní hotovostní tok v daném roce [Kč]

Výpočet anuitního faktoru:

$$a = \frac{q^T \cdot (q - 1)}{q^T - 1} \quad (10)$$

Kde *q* – diskontní sazba [-]

$$q = 1 + r \quad (11)$$

Z výsledku počtů *NPV* a *RCF* jednotlivých metod bylo zjištěno že za určeného diskontu, doby životnosti investic, počtu přetavených DPS ročně, růstu nákladů na nanočástice a dusík jsou průměrné náklady na přetavení jedné DPS při použití nanočástic **nižší** než při použití dusíku, a to o **0,74 Kč**, rozdíl *NPV* jednotlivých nákladů je potom **7517 tis. Kč** pro roční výrobu.

NPV - NÁKLADY NANOČÁSTICE						
Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	0	0	0	0	0	0
Náklady na výrobu [tis. Kč]	0	25700	26471	27266	28084	28926
CF [tis. Kč]	0	25700	26471	27266	28084	28926
KCF [tis. Kč]	0	25700	52172	79438	107521	136447
DCF [tis. Kč]	0	23930	22949	22009	21107	20243
KDCF [tis. Kč]	0	23930	46879	68888	89995	110238
NPV (nanočástice) [tis. Kč]				110238		
RCF (nanočástice) [tis. Kč]				27175		
Náklady na přetavení jedné DPS (nanočástice) [Kč]				10,77		

Tabulka 7: Výpočet NPV a RCF v případě použití dusíku

NPV - NÁKLADY DUSÍK						
Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	0	0	0	0	0	0
Náklady na výrobu [tis. Kč]	0	27453	28277	29125	29999	30899
CF [tis. Kč]	0	27453	28277	29125	29999	30899
KCF [tis. Kč]	0	27453	55730	84854	114853	145752
DCF [tis. Kč]	0	25561	24514	23510	22547	21623
KDCF [tis. Kč]	0	25561	50076	73586	96132	117755
NPV (nanočástice) [tis. Kč]				117755		
RCF (nanočástice) [tis. Kč]				29028		
Náklady na přetavení jedné DPS (dusík) [Kč]				11,51		
ROZDÍL NPV [tis. Kč]				7 517,34		

Tabulka 6: Výpočet NPV a RCF v případě použití nanočástic

11.3. Citlivostní analýza

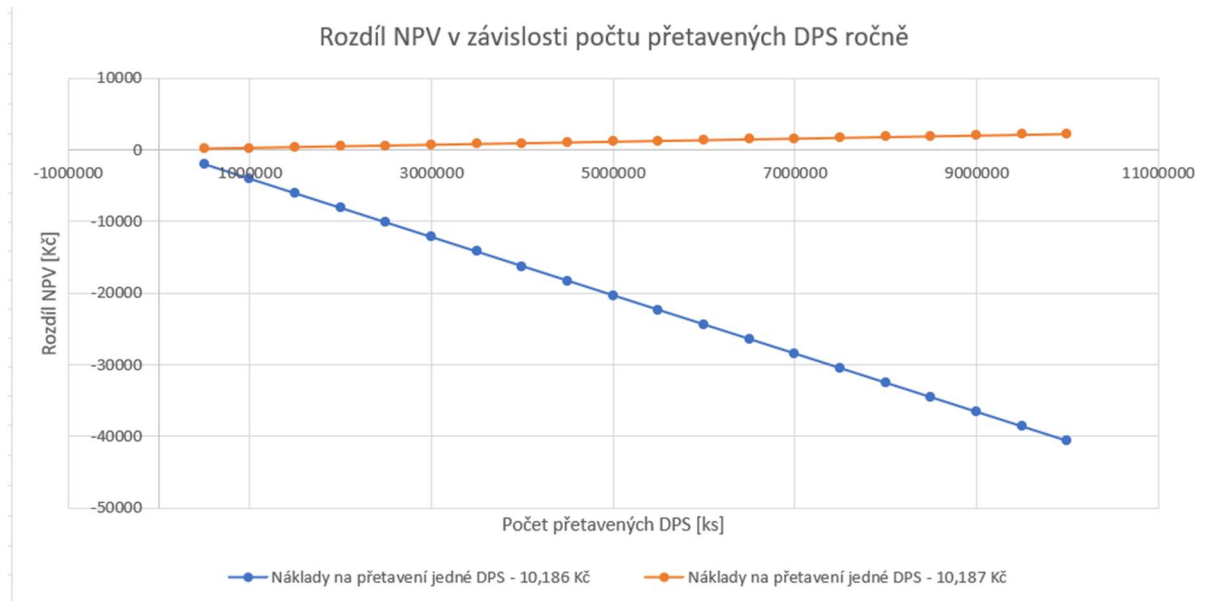
Pro provedení citlivostní analýzy je potřeba určit podle jakých položek se tato analýza bude řídit. Počet je proveden pro přesný počet 2 522 880 ks DPS, které projdou pájecí pecí ročně a hodnota měněná v analýze je rozdíl NPV při použití dusíku a NPV při použití nanočástic, který pro daný počet DPS stanoví **7517,3 tis. Kč**. Měnné pomocné veličiny v analýze jsou potom celkový roční počet DPS, které pájecí pecí projdou a hodnota nákladů pro přetavení jedné DPS s použitím dusíku.

Počet přetavených DPS	Náklady na přetavení DPS s použitím dusíku									
	10,183	10,184	10,185	10,186	10,187	10,188	10,189	10,19	10,191	10,192
500000	-8465	-6321	-4176	-2031	113	2258	4403	6547	8692	10837
1000000	-16931	-12641	-8352	-4063	227	4516	8805	13095	17384	21674
1500000	-25396	-18962	-12528	-6094	340	6774	13208	19642	26076	32510
2000000	-33861	-25283	-16704	-8125	454	9032	17611	26190	34768	43347
2500000	-42327	-31603	-20880	-10156	567	11290	22014	32737	43460	54184
3000000	-50792	-37924	-25056	-12188	680	13548	26416	39284	52152	65021
3500000	-59257	-44244	-29232	-14219	794	15806	30819	45832	60845	75857
4000000	-67722	-50565	-33408	-16250	907	18064	35222	52379	69537	86694
4500000	-76188	-56886	-37584	-18282	1020	20323	39625	58927	78229	97531
5000000	-84653	-63206	-41760	-20313	1134	22581	44027	65474	86921	108368
5500000	-93118	-69527	-45936	-22344	1247	24839	48430	72021	95613	119204
6000000	-101584	-75848	-50112	-24375	1361	27097	52833	78569	104305	130041
6500000	-110049	-82168	-54288	-26407	1474	29355	57236	85116	112997	140878
7000000	-118514	-88489	-58463	-28438	1587	31613	61638	91664	121689	151715
7500000	-126980	-94810	-62639	-30469	1701	33871	66041	98211	130381	162551
8000000	-135445	-101130	-66815	-32501	1814	36129	70444	104759	139073	173388
8500000	-143910	-107451	-70991	-34532	1928	38387	74846	111306	147765	184225
9000000	-152376	-113771	-75167	-36563	2041	40645	79249	117853	156457	195062
9500000	-160841	-120092	-79343	-38594	2154	42903	83652	124401	165150	205898
10000000	-169306	-126413	-83519	-40626	2268	45161	88055	130948	173842	216735

Tabulka 8: Výsledky citlivostní analýzy

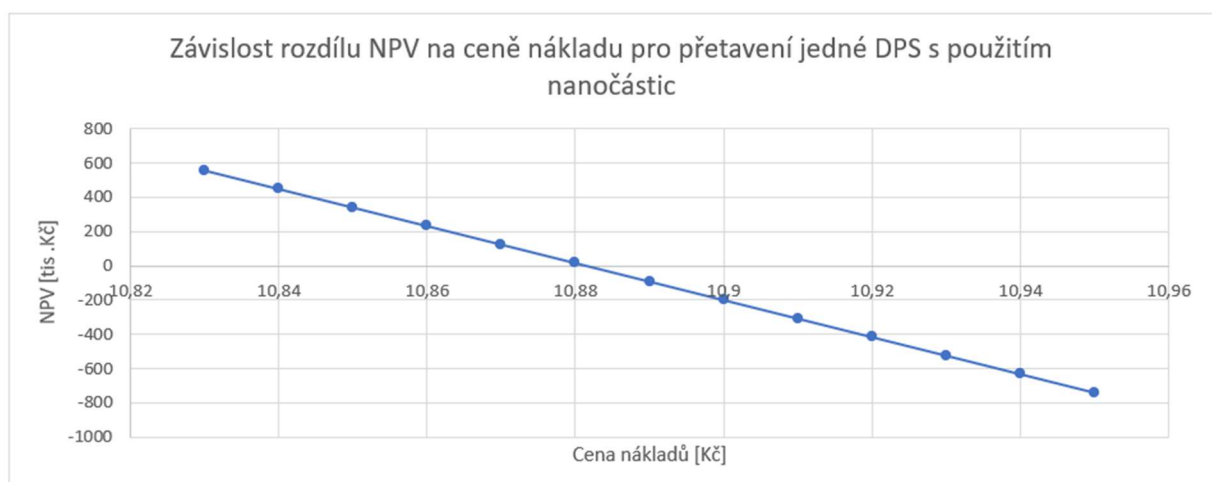
V případě, kdy je rozdíl NPV jednotlivých nákladů je záporný, vyplatí se víc použití dusíku, pro kladný rozdíl potom použití nanočástic. Jak je naznačeno v *Tabulce 8*, při ceně nákladů přetavení s použitím dusíku rovné **10,187 Kč** se už víc vyplatí použití nanočástic pro všechny počty DPS uvedené v prvním sloupci tabulky. Při spočítané ceně nákladů pomocí *RCF* (*Tabulka 7*) ve výši 11,51 Kč je tento posudek analýzy velmi vhodný.

Dalším krokem bylo vynesení grafu závislosti rozdílu NPV na počtu přetavených DPS ročně.



Graf 8: Závislost rozdílu NPV na počtu přetavených DPS ročně

Z *Grafu 8* je vidět, že i při přetavení jenom 500 000 ks ročně je hodnota rozdílu NPV kladná, znamená to tedy že je výhodnější přidat po do procesu přetavení DPS nanočástice.



Graf 9: Závislost Rozdílů NPV na nákladech pro jedu DPS při použití nanočástic

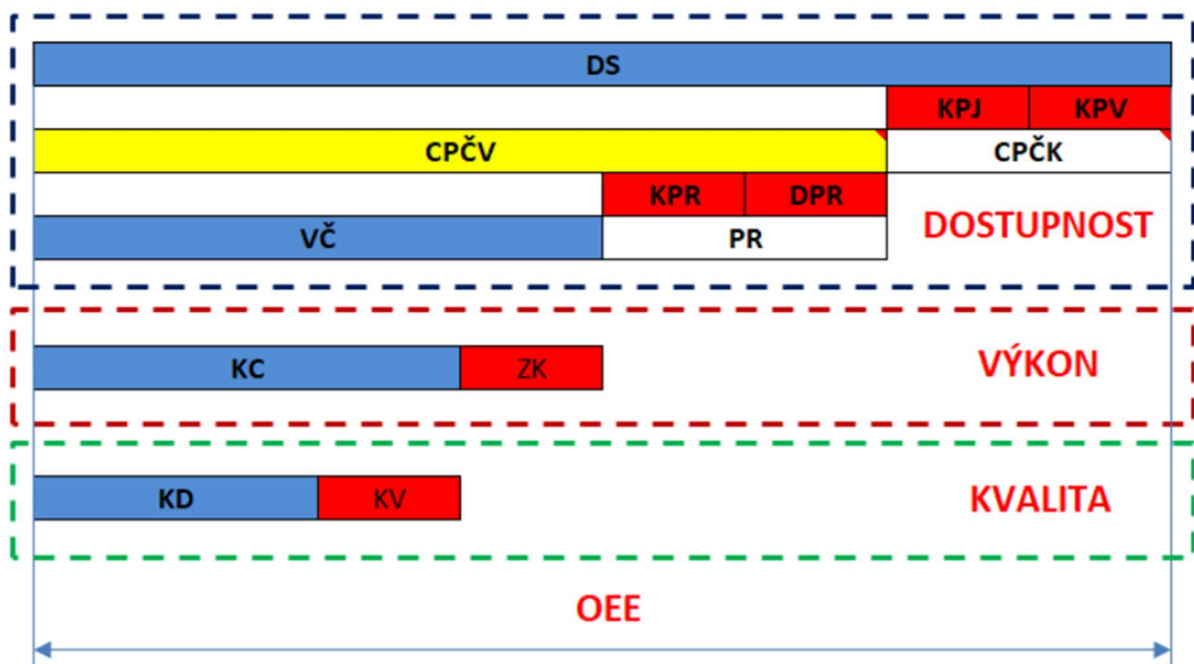
Graf 9 zobrazuje závislost rozdílů NPV nákladů při použití nanočástic a dusíkové atmosféry na nákladech na jednu přetavenou DPS s použitím nanočástic.

Záporné hodnoty rozdílu *NPV* jsou na grafu po dosažení hodnoty přibližně **10,89 Kč/ks**. Při větší hodnotě nákladů spojených s použitím nanočástic se tato varianta nevyplatí.

11.4. OEE

OEE je zkratka od anglického pojmu *Overall Equipment Effectiveness*, čili je to **kvantitativní ukazatel efektivity** neboli **celková efektivnost zařízení**. Jedná se o posouzení výrobní produktivity výrobních procesů, ale také i konkrétních zařízení. Podle této metody hodnocení je možné jednoduše posoudit kolik času při výrobě je skutečně pro ni využito, s předpokladem určitého ideálního časového průběhu výroby [41].

OEE v sobě zahrnuje hodně kritérií, které ovlivňují výrobní proces z časového hlediska a jeho výsledná struktura je znázorněná na *Obrázku 22*.



Obrázek 22: Struktura OEE [42]

Popis podle [42]:

DS – délka trvání směny, čili provozní čas [min]

KPJ – přestávky na jídlo [min]

KPV – plánované přestávky [min]

CPČK – celkový čas odstavení nebo klidu zařízení [min]

CPČV – celkový plánovaný čas výroby [min]

KPR – krátké přestávky, prostoje (neplánované) [min]

DPR – dlouhé přestávky, prostoje (neplánované) [min]

PR – přestávky (neplánované) [min]

$V\check{C}$ – výrobní čas (produktivní) [min]
 KC – celkový počet vyrobených kusů [ks]
 ZK – ztráčené kusy vlivem menší rychlosti výroby [ks]
 KD – celkový počet dobrých vyrobených kusů [ks]
 KV – celkový počet vadných vyrobených kusů [ks]
 OEE – celková efektivnost zařízení [%]
 AF – faktor využití stroje [%]
 ARV – skutečná rychlost výroby [ks/min]
 IRV – ideální rychlost výroby [ks/min]
 PF – faktor výkonu [%]
 PKC – celkový počet plánovaných vyrobených kusů [ks]
 QF – faktor kvality [%]
 $V\check{C}$ – produktivní výrobní čas [min]
 ZRV – ztráta rychlosti výroby [ks/min]

Pro výpočet jsou potom zavedeny vzorce:

Faktor využití zařízení

$$CP\check{C}K = KPJ + KPVP \quad (12)$$

$$CP\check{C}V = DS - KPJ - KPVP \quad (13)$$

$$PR = KPR + DPR \quad (14)$$

$$V\check{C} = CP\check{C}V - PR \quad (15)$$

$$AF = VC / CP\check{C}V \quad (16)$$

Plánovaný výstup

$$PKC = IRV \cdot V\check{C}$$

$$ARV = \frac{KC}{PKC} \cdot IRV \quad (17)$$

$$ZRV = IRV - ARV \quad (18)$$

$$ZK = PKC - KC = ZRV \cdot V\check{C} \quad (19)$$

Faktor výkonu zařízení

$$KD = KC - KV \quad (20)$$

$$PF = \frac{KC}{V\check{C} \cdot IRV} \quad (21)$$

Faktor kvality

$$QF = \frac{KD}{KC} \quad (22)$$

Celková efektivnost zařízení

$$OEE = AF \cdot PF \cdot QF \quad (23)$$

Pro lepší představu je potřeba význam některých pojmů vysvětlit.

11.4.1. Faktory ovlivňující OEE

Plánované krátké výrobní přestávky (*KPV*) – čas, který ztratíme v průběhu výroby, je předem přibližně známý a je nedílnou součástí výrobního procesu. Do těchto přestávek můžeme zahrnout například změnu nastavení zařízení, zastavení v důsledku nedostatku materiálu nebo operátorů, zastavení v důsledku uvedení stroje do provozu atd.

Neplánované krátké přestávky (*KRP*) – čas, který se ztratí v důsledku neplánovaných chyb nastalých v průběhu výroby. Většinou je tento čas 1-5 minut. Ztráty času tímto způsobem jsou například zastavení zařízení na dobu nezbytně nutnou pro jeho menší opravu v důsledku nesprávného podávání materiálu, nesprávného toku materiálu, chyb v nastavení zařízením čištění a kontroly a další.

Neplánované dlouhé přestávky (*DPR*) – je to zastavení zařízení na dobu delší než 5 minut a pro vyřešení příčiny tohoto zastavení je potřeba specializovaný personál. Jde o zastavení nucené, čili i při požadovaném provozu je zařízení mimo

provoz. Příklady těchto zastávek jsou obecné poruchy zařízení, neplánované údržby, poruchy vybavení a další.

Ztráta rychlosti výroby (ZRV) – jedná se o poruchy které ovlivňují rychlost zařízení, čili znemožňují jeho provoz na rychlost maximální. Nejrozšířenější příčinou těchto poruch je například provoz zařízení v režimu přetížení, velké opotřebením zařízení, nedostatečně zaškolená obsluha zařízení atd.

11.4.2. Výpočet OEE

Při výpočtu faktoru využití zařízení, v tomto případě pájecí pece je provozní čas zařízení celých 24 hodin, poněvadž uvažujeme velkou průmyslovou firmu s třísměnným provozem. Podle ministerstva práce a sociálních věcí je zaměstnavatel povinen poskytnout zaměstnanci nejdéle po 6 hodinách nepřetržité práce přestávku v práci na jídlo a oddech v trvání nejméně 30 minut [43]. Pro třísměnný 8-mi hodinový provoz je tedy celkový čas na jídlo nebo oddech 90 minut. Další položkou je kalibrace a čištění pece, procesy nezbytně nutné pro správný a spolehlivý (v rámci možností) provoz pájecí pece, který podle firmy zabývající se kalibrací zařízení tohoto druhu činí v průměru 40 minut za 24 hodin. Celkový čas na odstavení pájecí pece je dán součtem těchto jednotlivých faktorů a činí 130 minut za 24 hodin provozu.

Čas který je potřeba pro kalibraci pájecí pece závisí na nastaveném teplotním profilu, kterého pájecí pes dosáhne za určitý čas. V praktické části této práce u pájecí pece MISTRAL 560 trvalo nastavení teplotního profilu potřebného k přetavení zkoumaných pájecích past přibližně 22 minuty. S ohledem na rozdíl průmyslové průběžné pájecí pece uvažované v ekonomické části práce, zejména její větší rozměry, dosažitelnou teploty a další parametry byl čas kalibrace odhadnut na 27 minut.

Odstávka senzoru je taky faktor ovlivňující produktivní výrobní čas pájecí pece, s ohledem na jeho odvětví použití je možné, že se senzor působením vysoké teploty pece nebo opotřebením zničí. V pájecích pecích jsou hroty senzorů nebo čidel umístěny v prostoru pece kde se nastavuje potřebný teplotní profil, řídicí jednotky jsou potom umístěny na místě přístupném pro obsluhu pro možnou výměnu. Výměna senzoru se neprovádí každý den, proto je zvolena přibližná časová hodnota průměrného času, který tato výměna za 24 hodin zabere, a to 9 minut.

Vliv používání dusíku – při použití dusíku pro zlepšení procesu v pájecím procesu je nezbytně nutná kontrola jeho objemu v průběhu přetavování DPS. Příliš nízká úroveň dusíku zapříčiní zhoršení kvality vlivem oxidace pájených spojů v DPS způsobené podílem kyslíku. Příliš vysoká úroveň dusíku je příčinou zejména ekonomických ztrát pro průmyslovou organizaci, protože překročení nastavené úrovně dusíku nezpůsobí další vylepšení vlastností pájeného spoje v průběhu přetavení. Při poruše zařízení, které dusík do pájecí pece dodává se může stát, že plyn je do pece vpouštěn v nekontrolovaném množství. To zapříčiní spouštění čidla, které úroveň dusíku kontroluje a následuje vyřazení zařízení na dobu nezbytně nutnou pro stabilizaci úrovně plynu. Pro větší průmyslové pece je tento

čas, podle údajů získaných od firmy působící v tomto průmyslu, přibližně **15 minut**.

Poslední položkou která je zahrnuta do výsledných ztrát jsou neplánované prostoje pájecí pece kvůli například větší poruše nebo nedostatečné odborné způsobilosti obsluhujícího personálu. Tyto prostoje se neobjevují příliš často v pracovním procesu, jejich výskyt je ale důvodem časově delších prostojů pájecí pece, které se mohou pohybovat v rozmezí až několika hodin, v průměru za 24 hodin je tedy zvolena hodnota 90 minut.

Celkové neplánované prostoje jsou dány součtem jednotlivých položek popsaných výše, tedy 141 minut.

Výsledný produktivní výrobní čas je dán rozdílem plánovaného času výroby a neplánovaných prostojů pece, což činí **1169 minut** za 24 hodin.

Faktor využití pájecí pece je **89,24 %**, je dán poměrem produktivního výrobního času ku plánovanému času výroby.

FAKTOR VYUŽITÍ ZAŘÍZENÍ		
Provozní čas - DS	Data	Jednotka
	1440	[min]
ZTRÁTY ČASU		
Přestávky na jídlo - KPJ	90	[min]
Kalibrace a čištění pece- KPV	40	[min]
Celkový čas odstavení pece - CPČK	130	[min]
Plánovaný čas výroby - CPČV	1310	[min]
Kalibrace - KPR	27	[min]
Odstávka senzoru -KPR	9	[min]
Stabilizace úrovně dusíku - DPR	15	[min]
Neplánované prostoje, dlouhé - DPR	90	[min]
Neplánované prostoje -PR	141	[min]
Produktivní výrobní čas - VČ	1169	[min]
FAKTOR VYUŽITÍ - AF	89,24	[%]

Tabulka 9: Výpočet faktoru využití pájecí pece

Pro výpočet plánovaného výstupu zařízení, v tomto případě myšleném jako rychlost výroby přetavených DPS pomocí průběžné pájecí pece, je ze začátku potřeba zjistit, za jaký čas se v průběhu přetaví jedna DPS. Podle informací od velkoobchodní firmy (VF) v tomto průmyslu je průměrný čas přetavení 12,5 sekundy, což činí po zaokrouhlení 5 DPS za minutu. Plánované množství přetavených DPS se vypočítá vynásobením průměrné rychlosti výroby přetavených DPS za minutu (*IRV*) produktivním výrobním časem (*VČ*).

S ohledem na faktory, zmenšující velikost ideální rychlosti výroby se podle VF uvádí omezení výrobního množství přibližně o 0,1 %. S ohledem na tuto skutečnost se výsledné množství vyrobených kusů mění.

Skutečná rychlost výroby (ARV) je dána podílem vyrobených kusů (KC) produktivním výrobním časem ($VČ$). Ztrátou rychlostí výroby (ZRV) je potom rozdíl IRV a ARV .

Ztracené kusy vlivem redukce rychlosti výroby (ZK) se vypočítají rozdílem PKC a KC .

PLÁNOVANÝ VÝSTUP		
Ideální rychlost výroby - IRV	Data	Jednotka
		5 [ks/min]
Plánované kusy celkem - PKC		5845 [ks]
Vyrobeneé kusy celkem - KC		5787 [ks]
Skutečná rychlost výroby - ARV		4,95 [ks/min]
ZTRÁTY VE VÝROBĚ Vlivem ZTRÁTY RYCHLOSTI		
Ztráta rychlostí výroby - ZRV		0,05 [ks/min]
Ztracené kusy vlivem redukce rychlosti výroby - ZK		58 [ks]

Tabulka 10: Výpočet plánovaného výstupu pájecí pece

Posledním krokem pro výpočet OEE je určení faktoru výkonu a kvality. První položkou tohoto faktoru je počet vyrobených vadných kusů (KV), který se v oblasti průmyslového pájení přetavením pohybuje přibližně okolo **0,25 %** z celkového počtu vyrobených kusů podle VF.

Počet dobrých kusů (KD) se určí jednoduše pomocí rozdílu KC a KV . Tyto hotové kusy jsou vhodné k následujícím úpravám pájecí linky.

Výsledný faktor výkonu je vypočítán pomocí vzorce (21), respektujícího počet přetavených DPS, produktivní výrobní čas a ideální rychlost výroby. Pro průběžnou pájecí pec zkoumanou v této práci je tato hodnota rovná **99,01 %**, což znamená velmi dobrou produktivitu dané pece.

Faktor kvality, jak je možné odvodit z jeho názvu, respektuje DPS, které po průběhu přetavování v průběžné peci neprošly kontrolou kvality, jsou tedy vadné. Tento faktor je dán podílem DPS, které splňují po přetavení kritérium dostatečné kvality, ku celkovému počtu přetavených DPS.

Z vypočítaných dílčích faktorů pomocí jejich součinu lze vypočítat výslednou celkovou efektivnost zařízení, která pro danou průběžnou pec činí **88,14 %**.

FAKTOR VÝKONU		
Vyrobené vadné kusy - KV	Data	Jednotka
		14 [ks]
Vyrobené dobré kusy - KD		5773 [ks]
Faktor výkonu - PF		99,01 [%]
Faktor kvality - QF		99,76 [%]
CELKOVÁ EFEKTIVNOST ZAŘÍZENÍ		
Celková efektivnost zařízení - OEE		88,14 [%]

Tabulka 11: Výpočet celkové efektivnosti pájecí pece

11.4.3. Dusík jako parametr OEE

Jak bylo zmíněno výše, dusík je jedním z ovlivňujících faktorů celkové efektivnosti zařízení kvůli jeho možnému nadbytečnému množství v průběhu přetavování DPS v průběžné pájecí peci. Za předpokladu že bude dusík nahrazen použitím nanokompozitní pasty, výsledný OEE pájecí pece o **1,1 %**. Tímto krokem dojde k redukci prostojů na pájecí lince, které stojí čas a peníze.

ZÁVISLOST OEE NA POUŽITÍ DUSÍKU	
Použití dusíku	OEE
ANO	88,14 [%]
NE	89,25 [%]

Tabulka 12: Porovnání OEE pájecí pece podle použití dusíku

12. ZHODNOCENÍ EKONOMICKÉ ČÁSTI

Použití nanočástic jako náhradu za pájení v dusíkové atmosféře sebou jeví jako jedna z možností snížení nákladů na přetavování DPS v pájecí lince.

V ekonomické části této práci bylo provedeno porovnání nákladů pro varianty použití nanočástic nebo dusíku metodou *NPV* a *RCF*, které respektují časovou hodnotu peněžních prostředků, následně byla provedena citlivostní analýza závislosti rozdílů *NPV* obou variant v závislosti na množství přetavených DPS a ceně nákladů na přetavení DPS v dusíkové atmosféře.

Podle výsledků provedených hodnocení a analýz bylo zjištěno, že použití nanočástic jako aditivum do pájecí pasty při přetavení v pájecí peci je za podmínek určeného diskontu, inflace, nákladů na jednotlivé materiály, mzdy a elektřinu a doby životnosti vychází výhodnější variantou než použití téhož postupu přetavení ve variantě použití dusíkové atmosféry. Vliv nanočástic na vlastnosti pájecí pasty je v tomto případě samozřejmě předpokládán stejný, jako vliv dusíku.

Citlivostní analýza ukázala, že už při ceně nákladů na přetavení jedné DPS přibližně 10,187 Kč se víc vyplatí použití nanočástic od počtu přibližně 500 000 přetavených PDS ročně.

Hodnota rozdílů *NPV* je podle *Grafu 9* závislá také na ceně nákladů na přetavení DPS v pájecí peci pomocí nanočástic. Při ceně 10,88 Kč za jedno přetavení DPS je rozdíl rovný nule, což znamená to, že při následném zvyšování ceny nákladů s použitím nanočástic na jednu přetavenou DPS se jejich použití již nevyplatí.

Nakonec podle celkové efektivnosti zařízení, v tomto případě pájecí pece, byl zkoumán vliv dusíku na její výslednou hodnotu. Pro hodnoty určené pro jednotlivé parametry OEE bylo zjištěno, že při vyřazení dusíku jako součásti přetavení DPS v pájecí peci je možné zvýšit jeho OEE o **1,11%**, čímž je možné ušetřit na prostojích na lince, které jsou pro průmyslové firmy ztrátovými, u větších firem se tato hodnota může pohybovat v řádech milionů Kč za minutu.

13. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zkoumání vlivu nanočástic TiO_2 na vlastnosti nízkoteplotní bezolovnaté pájecí pasty na bázi BiSn a následné ekonomické porovnání a zhodnocení nákladů na přetavování DPS v průběžné pájecí peci, která je součástí pájecí linky v průmyslové výrobě pomocí variant s použitím nanočástic a pájení v dusíkové atmosféře.

V praktické části práce bylo provedeno zkoumání výsledné roztékavosti pájecí pasty s použitím nanočástic a bez. Výsledky ukázali, že nanočástice přispívají k významnému vylepšení roztékavosti na DPS bez povrchové úpravy a s úpravou OPS, pro úpravu ENIG je tento vliv negativní. Podle mechanické zkoušky bylo zjištěno, že nanočástice jen nevýznamně ovlivňují mechanické vlastnosti pájecí pasty. Poslední porovnání bylo provedeno z pohledu prvkové analýzy IML a její struktury, kde se ukázalo že na tento parametr výsledného pájeného spoje nemají nanočástice významný vliv.

Hlavním problémem ve výsledných pájených spojích, kde byly použity nanočástice byla jejich špatná interakce s tavidlem, které bylo součástí pájecí pasty od výrobce. No povrchů spojů byla většina objemu nanočástic vyplavená ve formě zoxidovaných kuliček spolu se zbytky tavidla. Tento problém za jistého předpokladu je možné vyřešit použitím jiného, tj. méně agresivního tavidla, které bude s nanočásticemi interagovat mnohem lépe. Pro tuto možnost řešení jsou potřeba další studie.

V ekonomické části práce byl proveden výpočet rozdílů NPV nákladů pro varianty s nanočásticemi a dusíkem. Zvolené hodnoty vstupních údajů a doba životnosti ve výši 5 let byly zvoleny s ohledem na celodenní provoz pájecí pece v průběhu celého roku, výpočty s jinými vstupními daty tento výsledek samozřejmě ovlivní.

Výsledkem provedeného výpočtu je ekonomická převaha použití nanočástic místo dusíkové atmosféry. Zvolení varianty nanočástic by se průmyslové firmě vyplatilo už při roční výrobě jenom 500 000 ks přetavených DPS, což se jeví jako velmi dobrá možnost. Toto samozřejmě bude platit za předpokladu, že přidání nanočástic do pájecí pasty mají stejný vliv na její vlastnosti jako pájení v dusíkové atmosféře.

Posledním aspektem ekonomické části bylo hodnocení *OEE* pájecí pece a výsledek ukázal, že vyřazením dusíku jakožto komponentu procesu přetavení DPS v pájecí peci a použití nanočástic do složení pájecí pasty se hodnota celkové efektivnosti zařízení zvýší o 1,11%, což pro průmyslovou firmu tedy znamená zmenšení finančních ztrát, způsobených nadbytečnou koncentrací dusíku v průběhu přetavovacího procesu.

Použití nanočástic se tedy jeví jako velmi perspektivní pro pájení v elektrotechnickém průmyslu, pro jistější úvahu je však potřeba prozkoumat tuto problematiku více.

14. SEZNAM ZDROJŮ A CITACÍ

- [1] H. Fu *et al.*, „iNEMI Project on Process Development of BiSn-Based Low Temperature Solder Pastes Part III: Mechanical Shock Tests on POP BGA Assemblies”, in *2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS PACKAGING AND IMAPS ALL ASIA CONFERENCE (ICEP-IAAC)*, New York: IEEE, 2018, s. 13–18. Viděno: 7. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000851394800005>
- [2] S. spol s r o Bratislava, „Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike”. Viděno: 7. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.infogate.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=EB5EDAF757071EAF6E0C534DC5>
- [3] T. Gancarz, J. Pstrus, W. Gąsior, a H. Henein, „Physicochemical Properties of Sn-Zn and SAC + Bi Alloys”, *J. Electron. Mater.*, roč. 42, úno. 2012, doi: 10.1007/s11664-012-2336-7.
- [4] H. R. Kotadia, P. D. Howes, a S. H. Mannan, „A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 54, č. 6, s. 1253–1273, čer. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.02.025.
- [5] D. R. Frear a P. T. Vianco, „Intermetallic growth and mechanical behavior of low and high melting temperature solder alloys”, *Metall. Mater. Trans. A*, roč. 25, č. 7, s. 1509–1523, čvc. 1994, doi: 10.1007/BF02665483.
- [6] H. Flandorfer, U. Saeed, C. Luef, A. Sabbar, a H. Ipsier, „Interfaces in lead-free solder alloys: Enthalpy of formation of binary Ag–Sn, Cu–Sn and Ni–Sn intermetallic compounds”, *Thermochim. Acta*, roč. 459, č. 1, s. 34–39, čvc. 2007, doi: 10.1016/j.tca.2007.04.004.
- [7] P. Jiří, „STRUKTURA SPOJŮ PÁJENÝCH PÁJKAMI BEZ OLOVA A JEJÍ VLIV NA VNĚJŠÍ VZHLED SPOJE”.
- [8] M. Iwasaki, A. Yamauchi, a M. Kurose, „Influence of intermetallic compounds on tensile strength of lead-free solder”, in *2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, dub. 2014, s. 770–773. doi: 10.1109/ICEP.2014.6826785.
- [9] C. Schmetterer, R. Ganesan, a H. Ipsier, „Interaction of Sn-Based Solders with Ni(P) Substrates: Phase Equilibria and Thermochemistry”, in *Lead-Free Solders: Materials Reliability for Electronics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, s. 71–118. doi: 10.1002/9781119966203.ch4.
- [10] H.-T. Lee a M.-H. Chen, „Influence of intermetallic compounds on the adhesive strength of solder joints”, *Mater. Sci. Eng. A*, roč. 333, č. 1, s. 24–34, srp. 2002, doi: 10.1016/S0921-5093(01)01820-2.
- [11] X. Hu, Y. Li, Y. Liu, Y. Liu, a Z. Min, „Microstructure and shear strength of Sn37Pb/Cu solder joints subjected to isothermal aging”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 54, č. 8, s. 1575–1582, srp. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.04.003.
- [12] F. Zrubecký, „Pájecí slitiny v elektrotechnice”, *Soldering alloys in electrical engineering*, 2015, Viděno: 29. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/18858>
- [13] J. Starý a P. Bača, „Plošné spoje a povrchová montáž, ID nosiče: ETE002”.
- [14] J. Gao, Y. Wu, a H. Ding, „Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 19, č. 1, s. 28–33, led. 2007, doi: 10.1108/09540910710748131.
- [15] J. Liu, S. Chen, a L. Ye, „Development and Characterization of Nano-Composite Solder”, in *Lead-Free Solders: Materials Reliability for Electronics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, s. 161–177. doi: 10.1002/9781119966203.ch6.
- [16] Y. Li, X. Zhao, Y. Liu, Y. Wang, a Y. Wang, „Effect of TiO₂ addition concentration on the wettability and intermetallic compounds growth of Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu–xTiO₂ nano-composite solders”, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 25, zář. 2014, doi: 10.1007/s10854-014-2094-9.
- [17] M. Zaman, E. Ahmad, A. Qadeer, G. Rabbani, a R. H. Khan, „Nanoparticles in relation to peptide and protein aggregation”, *Int. J. Nanomedicine*, roč. 9, s. 899–912, úno. 2014, doi: 10.2147/IJN.S54171.
- [18] L. C. Tsao, C. H. Huang, C. H. Chung, a R. S. Chen, „Influence of TiO₂ nanoparticles addition on the microstructural and mechanical properties of Sn_{0.7}Cu nano-composite solder”, *Mater. Sci. Eng. A*, roč. 545, s. 194–200, kvě. 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.03.025.

- [19] M. Rui, X. Lu, S. Chen, L. Ye, a J. Liu, „TiO₂ nanoparticles functionalized Sn/3.0Ag/0.5Cu lead-free solder“, in *2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, srp. 2012, s. 203–207. doi: 10.1109/ICEPT-HDP.2012.6474601.
- [20] Bc. M. Dosedla, „Trendy v oblasti pájecích pasta vliv nanočástic“. Vysoké učení technické v Brně, 8. červen 2016.
- [21] H.-K. Lee, S.-H. Son, H.-Y. Lee, a J.-M. Jeon, „A Study on the ENIG Surface Finish Process and Its Properties“, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, roč. 40, č. 1, s. 32–38, 2007, doi: 10.5695/JKISE.2007.40.1.032.
- [22] W. H. Zhu *et al.*, „Drop reliability study of PBGA assemblies with SAC305, SAC105 and SAC105-Ni solder ball on Cu-OSP and ENIG surface finish“, in *2008 58th Electronic Components and Technology Conference*, kvě. 2008, s. 1667–1672. doi: 10.1109/ECTC.2008.4550202.
- [23] K. Johal, S. Lamprecht, a A. Deutschland, „Study of the mechanism responsible for ‚Black pad‘ defect on PWB’s using electroless nickel / immersion gold as final finish“.
- [24] Y. Xia a X. Xie, „Reliability of lead-free solder joints with different PCB surface finishes under thermal cycling“, *J. Alloys Compd.*, roč. 454, č. 1, s. 174–179, dub. 2008, doi: 10.1016/j.jallcom.2006.12.098.
- [25] S. Abdelaziz, H. Zahran, a Dr. A. Abd El-Rehim, „Microstructure and mechanical properties of tin-bismuth solder alloy reinforced by antimony oxide nanoparticles“, *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, roč. 10, s. 73–83, led. 2017.
- [26] admin, „Technical Data Sheets“, AIM Solder. Viděno: 12. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://aimsolder.com/technical-data-sheets>
- [27] K. Dušek, V. Straka, M. Brejcha, a I. Beshajová Pelikánová, „Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect“, in *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2013, s. 132–135. doi: 10.1109/ISSE.2013.6648229.
- [28] „Metalografie - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem - PDF Stažení zdarma“. Viděno: 13. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43749171-Metalografie-priprava-vzorku-pro-pozorovani-mikroskopem.html>
- [29] K. Geels, D. Fowler, W.-U. Kopp, a M. Rückert, *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2007. doi: 10.1520/MNL46-EB.
- [30] „PACE Technologies Metallographic Products for Material Analysis“. Viděno: 13. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.metallographic.com/>
- [31] R. F. Egerton, *Physical Principles of Electron Microscopy*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-39877-8.
- [32] L. Sun, M. Chen, a L. Zhang, „Microstructure evolution and grain orientation of IMC in Cu-Sn TLP bonding solder joints“, *J. Alloys Compd.*, roč. 786, s. 677–687, kvě. 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.01.384.
- [33] H. Al-sorory, M. S. Gumaan, a R. M. Shalaby, „Effect of TiO₂ nanoparticles on the microstructure, mechanical and thermal properties of rapid quenching SAC355 lead-free solder alloy“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 35, č. 1, s. 18–27, led. 2022, doi: 10.1108/SSMT-01-2022-0003.
- [34] A. M. Yassin, H. Y. Zahran, a A. F. Abd El-Rehim, „Effect of TiO₂ Nanoparticles Addition on the Thermal, Microstructural and Room-Temperature Creep Behavior of Sn-Zn Based Solder“, *J. Electron. Mater.*, roč. 47, č. 12, s. 6984–6994, pro. 2018, doi: 10.1007/s11664-018-6624-8.
- [35] „AIM NC273LT SN42/BI58-T3 Lead Free No Clean Solder Paste, 500 Gram Jar“, SMT Supplies. Viděno: 20. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://smtsupplies.com/products/aim-lead-free-no-clean-solder-paste-nc273lt-sn42-bi58-t3-500-gram-jar>
- [36] „Titanium(IV) oxide, mixture of rutile and anatase nanopowder, particle size 100nm BET, 99.5 trace metals 13463-67-7“. Viděno: 20. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/>

- [37] „Nabídka práce Elektrotechnik | Volná místa pro elektrotechniky - Personálka.cz". Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://personalka.cz/prace/elektrotechnik>
- [38] „Ceník elektřiny pro podnikatele platný od 1. 1. 2024 na distribučním území EG.D, a. s." [Online]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/Files/firmy/elektrina/archiv-produktu/2024/01/pre-proud-basic-egd/>
- [39] „Inflace, spotřebitelské ceny", Inflace, spotřebitelské ceny. Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/inflace_spotrebitelske_ceny
- [40] P. Muchiri a L. Pintelon, „Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion", *Int. J. Prod. Res.*, roč. 46, č. 13, s. 3517–3535, čvc. 2008, doi: 10.1080/00207540601142645.
- [41] „FORMÁNEK, Ivo, and Alan VÁPENÍČEK. ‚OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS CELKOVÁ EFEKTIVNOST ZAŘÍZENÍ.‘ VŠPP Entrepreneurship studies: 40." [Online]. Dostupné z: https://www.peuni.cz/studium/dokumenty/fvspp/v%C5%A1pp_enterpreneurship_studies_2019_ro%C4%8D.8_no_01-02-final-v10.pdf#page=42
- [42] „Zákon č. 262/2006 Sb., zákoník práce".