



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VÝZKUM VLIVU MECHANICKÝCH VIBRACÍ NA STRUKTURU PÁJECÍ SLITINY

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF MECHANICAL VIBRATIONS ON THE STRUCTURE OF THE SOLDER
ALLOY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ľudovít Ščensný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2025



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Ludovít Sčensný

ID: 220854

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum vlivu mechanických vibrací na strukturu pájecí slitiny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte rešerši v oblasti změny struktury pájeného spoje v návaznosti na působení mechanických kmitů při procesu pájení a obecně vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti pájecí slitiny. Na základě získaných informací navrhnete experiment zahrnující volbu frekvence, amplitudy a výchylky mechanických vibrací, použité vzorky a výsledné testování, resp. ověření změny vnitřní struktury pájecí slitiny. Navržený experiment proveďte, vyhodnoťte a výsledky diskutujte s jinými vědeckými publikacemi. Vše zpracujte v diplomové práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 26.5.2025

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Predmetom tejto diplomovej práce je výskum vplyvu mechanických vibrácií na štruktúru a vlastnosti spájkovaných spojov počas procesu pretavenia a tuhnutia bezolovnatej spájkovacej zliatiny typu SAC. Podrobný rozbor odbornej literatúry naznačil potenciál tejto metódy na dosiahnutie riadeného formovania mikroštruktúry. V rámci experimentálnej časti bola navrhnutá a skonštruovaná testovacia aparátúra, vrátane návrhu DPS a metodiky, ktorá zahŕňa nastavenie frekvencie, amplitúdy a výchylky mechanických vibrácií. Výsledná metalografická analýza vzoriek odhalila zmeny v kryštalografickej orientácii zŕn cínu a ich morfológickom usporiadaní. Výsledky práce naznačujú pozitívny vplyv mechanických vibrácií na výslednú mechanickú spoľahlivosť spájkovaných spojov a zároveň poskytujú pevný základ pre ďalší výskum v oblasti vibračne podporeného spájkovania.

Kľúčové slová

Mechanické vibrácie, spájkovaný spoj, mikroštruktúra, morfológia zŕn cínu, kryštalografická orientácia, mechanické vlastnosti

Abstract

The objective of this master's thesis is to investigate the influence of mechanical vibrations on the structure and properties of solder joints during the reflow and solidification processes of a lead-free SAC solder alloy. A detailed review of scientific studies indicates the potential of this method to achieve controlled microstructure formation. In the experimental part, a dedicated test setup was designed and constructed, including a custom PCB design and a methodology that includes adjusting the frequency, amplitude, and displacement of the mechanical vibrations. Metallographic analysis of the samples revealed changes in the crystallographic orientation of the Sn grains and their morphological arrangement. The results indicate a positive influence of mechanical vibrations on the mechanical reliability of solder joints and provide a solid foundation for further research in vibration-assisted soldering.

Keywords

Mechanical vibrations, solder joint, microstructure, Sn grain morphology, crystallographic orientation, mechanical properties

Bibliografická citácia

SČENSNÝ, Ludovít. *Výzkum vlivu mechanických vibrací na strukturu pájecí slitiny*. Online, diplomová práce. Alexandr OTÁHAL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168689>. [cit. 2025-05-24].

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	Ľudovít Sčensný
VUT ID študenta:	220854
Typ práce:	Diplomová práca
Akademický rok:	2024/25
Téma záverečnej práce:	Výzkum vlivu mechanických vibrací na strukturu pájecí slitiny

Prehlasujem, že som svoju záverečnú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 26. máj 2025

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu záverečnej práce Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D. za cenné rady, účinnú metodickú a odbornú pomoc pri jej vypracovávaní. Zároveň vyjadrujem poďakovanie Ing. Pavel Kopřiva za čas venovaný pri tvorbe konštrukčnej časti záverečnej práce.

Taktiež ďakujem Ing. Jiří Starý Ph.D. za prístup k poloautomatickému brúsnemu zariadeniu a Ing. Jiří Fialka Ph.D. za snímky vyhotovené 3D optickým profilometrom.

V Brne dňa: 26. máj 2025

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. SPÁJKOVACÍ PROCES.....	12
1.1 REALIZÁCIA SPÁJKOVANÉHO SPOJA.....	12
1.1.1 <i>Povrchové úpravy DPS.....</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Spájkovacie zliatiny</i>	<i>13</i>
1.1.3 <i>Tavivá.....</i>	<i>14</i>
1.2 FORMOVANIE SPÁJKOVANÉHO SPOJA.....	14
1.2.1 <i>Zmäčavosť povrchu.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Difúzia.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Intermetalické zlúčeniny</i>	<i>17</i>
1.2.4 <i>Tuhnutie a kryštalizácia spájkovacej zliatiny.....</i>	<i>19</i>
1.2.5 <i>Vplyv povrchovej úpravy na formovanie štruktúry spájkovaného spoja.....</i>	<i>21</i>
2. FORMOVANIE A OPTIMALIZÁCIA ŠTRUKTÚRY SPÁJKOVANÉHO SPOJA	23
2.1 ZÁKLADNÝ PREHLAD METÓD RIADENIA MIKROŠTRUKTÚRY	23
2.2 FORMOVANIE MIKROŠTRUKTÚRY POD VPLYVOM PÔSOBENIA MECHANICKÝCH VIBRÁCIÍ A ULTRAZVUKU	24
2.2.1 <i>Ultrazvukové spájkovanie</i>	<i>25</i>
2.2.2 <i>Princíp ultrazvukového spájkovania</i>	<i>25</i>
2.2.3 <i>Mechanické vibrácie</i>	<i>26</i>
2.3 RIADENIE DYNAMIKY KVAPALÍN	27
2.4 AKTUÁLNE TRENDY A VÝSLEDKY V OBLASTI PÔSOBENIA VIBRÁCIÍ.....	29
2.4.1 <i>Vplyv ultrazvuku na mechanické vlastnosti a vývoj mikroštruktúry spájkovaných spojov SAC305</i>	<i>29</i>
3. METALOGRAFIA	32
3.1 PRÍPRAVA METALOGRAFICKÝCH VZORIEK.....	32
3.2 METÓDY VYHODNOTENIA METALOGRAFICKÝCH VZORIEK	33
4. NÁVRH A PRÍPRAVA EXPERIMENTU	35
4.1 PRÍPRAVA EXPERIMENTÁLNEJ APARATÚRY	35
4.1.1 <i>Výber prístrojov pre prenos mechanických vibrácií</i>	<i>36</i>
4.1.2 <i>Výroba výhrevného telesa</i>	<i>37</i>
4.1.3 <i>Konštrukčná časť testovacej zostavy.....</i>	<i>39</i>
4.1.4 <i>Návrh testovacej DPS</i>	<i>40</i>
4.2 TESTOVANIE PRÍPRAVKU	41
4.2.1 <i>Nastavenie teplotného profilu</i>	<i>41</i>
4.2.2 <i>Pozorovanie dynamiky spájkvy vplyvom mechanických vibrácií.....</i>	<i>42</i>
4.3 OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV BUDENIA MECHANICKÝCH VIBRÁCIÍ	46
4.3.1 <i>Postup merania a nastavenie frekvencie budenia.....</i>	<i>46</i>
4.3.2 <i>Stanovenie amplitúdy budenia</i>	<i>48</i>
4.3.3 <i>Výpočet výchylky mechanických kmitov.....</i>	<i>49</i>

5.	REALIZÁCIA EXPERIMENTU	50
5.1	PRÍPRAVA VZORIEK	50
5.1.1	<i>Pretavenie spájky bez pôsobenia vibrácií</i>	<i>50</i>
5.1.2	<i>Pretavenie spájky ovplyvnené pôsobením mechanických vibrácií</i>	<i>51</i>
5.2	VÝROBA METALOGRAFICKÝCH MIKROVÝBRUSOV	52
5.3	POZOROVANIE VNÚTORNEJ ŠTRUKTÚRY SPÁJKOVANÉHO SPOJA	54
6.	POROVNANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	56
6.1	POVRCHOVÁ ANALÝZA INTEGRITY SPÁJKOVANÝCH SPOJOV	56
6.2	ANALÝZA VZORIEK V HORIZONTÁLNO M REZE	57
6.3	ANALÝZA VZORIEK VO VERTIKÁLNO M REZE	58
6.4	ZHRNUTIE VÝSLEDKOV A DISKUSIA	61
	ZÁVER	65
	LITERATÚRA	67
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	71
	ZOZNAM PRÍLOH	72

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Charakteristiky zmáčania v závislosti na veľkosti uhla zmáčania θ [2]	15
1.2	Rovnovážny stav povrchových napätí: a) 3D model, b) Priečný rez štruktúrou	16
1.3	Intermetalické fázy na rozhraní medenej plôšky a spájky Sn/Ag/Cu	18
1.4	Výskyt intermetalických fáz v štruktúre spájkovaného spoja SAC305 [8]	18
1.5	Zobrazenie morfológického usporiadania zrn cínu [10]	19
1.6	Viaczrnná morfológická štruktúra typu <i>Beach Ball</i> [10,11]	20
2.1	Princíp spájkovania ultrazvukom [23]	25
2.2	Stĺpcový graf pre porovnanie pevností spájkovaného spoja v strihu [25]	27
2.3	Testovacia zostava pre vyvolanie a detekciu povrchových vln [26]	28
2.4	Dynamické režimy povrchových vln na povrchu kvapaliny [26]	28
2.5	Experimentálne usporiadanie spájkovania pri pôsobení ultrazvuku [24]	29
2.6	Analýza mikroštruktúry a IMC na rozhraní spájky a medeneho substrátu pre rôzne časy pôsobenia ultrazvuku (a) 0 s, (b) 1 s, (c) 5 s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 30 s [24]	30
2.7	Šmyková pevnosť v závislosti na dobe pôsobenia ultrazvuku [24]	31
2.8	Analýza mikroštruktúry a porovnanie veľkosti zrn pre rôzne časy pôsobenia ultrazvuku (a) 0 s, (b) 1 s, (c) 5 s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 30 s [24]	31
3.1	Postup prípravy metalografického výbrusu [28]	32
3.2	Modely metalografického mikrovýbrusu spájkovaného spoja	33
3.3	Mikroštruktúra spájkovacej guličky zobrazená pomocou krížovej polarizácie a bežného osvetlenia [30]	34
4.1	Testovacia aparátúra: a) Pohľad zhora, b) Pohľad z boku [25]	35
4.2	Testovacia zostava vhodná pre vibračné zariadenie: a) Rozložený 3D model, b) Vyrobená zostava	36
4.3	Vibračné zariadenie VT-50 a výkonový zosilňovač LA-100	37
4.4	Návrh motívu meandru pre výhrevné teleso [25]	38
4.5	Proces tlače TLV pasty: a) Upevnené sito s nanosenou pastou, b) Natlačený vodivý motív meandru	38
4.6	Výhrevné telesá po výpale TVL motívu	39
4.7	Návrh testovacej DPS	40
4.8	Vyrobená testovacia DPS	41
4.9	Zariadenie s radiacim obvodom pre spínanie výhrevných telies	41
4.10	Umiestnenie termočlánkov na DPS v testovacej aparátúre	42
4.11	Pracovisko pre meranie spájkovacích teplotných profilov	42
4.12	Prevedenie experimentu na keramickom substráte	43
4.13	Prenos vibrácií do spájkovaného spoja počas procesu pretavenia	43
4.14	Porovnanie rozpúšťania TLV plôšky pri pôsobení vibrácií	44
4.15	Testovacia aparátúra počas pretavenia spájkovacej pasty na DPS	45
4.16	Proces spájkovania pri pôsobení vibrácií: a) Zachytenie bubliny, b) Vytvorenie krátera pri tuhnutí	45
4.17	Dočasné deformácie roztavenej spájky pri nízkych frekvenciách	46
4.18	Pripojenie akcelerometra pre snímanie dynamickej odozvy aparátúry	46
4.19	Zaznamenaný priebeh zrýchlenia v čase pre rôzne frekvencie budenia	47
4.20	Zaznamenaný priebeh zrýchlenia v čase pre $f_0 = 2515$ Hz	48
4.21	Výkonové frekvenčné spektrum pre $f_0 = 2515$ Hz	48
5.1	Zostavené pracovisko pre prípravu testovacích vzoriek	50
5.2	Pretavenie spájky bez externých vplyvov vibrácií	51
5.3	Pretavenie spájky pri pôsobení mechanických vibrácií: a) 250 Hz, b) 2515 Hz	52

5.4	Referenčné vzorky pripravené pre zalievanie: a) Horizontálny rez, b) Vertikálny rez	52
5.5	Automatická metalografická brúska a leštička Saphir 530.....	53
5.6	Vyleštené mikrovýbrusy: a) Referenčné, b) 250 Hz a 30 W, c) Vertikálny rez, d) 2515 Hz a 20 W, e) 2515 Hz a 30 W.....	54
5.7	Optický mikroskop ZEISS Axio Imager.M2m.....	54
5.8	Vnútrotná štruktúra spájkovaného spoja: a) Kamera Axio Cam ICc5, b) Kamera mobilného telefónu	55
5.9	Úprava snímok v prostredí grafického editora: a) Pred korekciou, b) Po korekcii	55
6.1	Štruktúra povrchu spájky: a) Spoj s veľkosťou plôšky 8x8 mm, b) Spoje s veľkosťou plôšky 4x4 mm.....	56
6.2	Základné typy kryštalografických orientácií Sn zrn: a) Jednozrnné, b) Dvojrnné, c) Viaczrnné, d) Viaczrnné typu <i>Beach Ball</i> , e) Čiastočne prekladané, f) Prekladané	57
6.3	Štatistické zastúpenie morfológií Sn zrn v horizontálnom reze	58
6.4	Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze referenčných vzoriek	59
6.5	Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 250 Hz	59
6.6	Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 2515 Hz, 20 W...60	
6.7	Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 2515 Hz, 30 W...60	
6.8	Rozloženie intermetalických fáz v objeme spájkovaného spoja referenčných vzoriek	61
6.9	Rozloženie intermetalických fáz v objeme spájkovaného spoja vzoriek ovplyvnených pri frekvencii budenia 250 Hz	61

ZOZNAM TABULIEK

1.1	Porovnanie vplyvu zloženia zliatin a povrchových úprav substrátov na morfológiu zrn v rôznych veľkostiach spájkovacích guľičiek [10]	21
4.1	Parametre prístrojov YMC stanovené výrobcom [32,33].....	37
4.2	Namerané a vypočítané hodnoty frekvenčnej odozvy a výchylky mechanických kmitov	49

ÚVOD

Moderné elektronické zariadenia pozostávajú z množstva elektronických komponentov, ktoré sú do elektrického obvodu pripájané procesom spájkovania. Pretavenie a tuhnutie spájkovacej zliatiny vyžaduje presnú kontrolu procesných parametrov, pretože majú priamy vplyv na spoľahlivosť a životnosť výsledných spojov. V súvislosti s prijatím európskych smerníc na ochranu životného prostredia a vylúčením toxického olova zo spájkovacích zliatin nastal rozvoj v oblasti bezolovnatého spájkovania. S touto zmenou vzrástol dopyt po nových spájkovacích zliatinách a výrazne sa rozšíril výskum v oblasti bezolovnatých spájkovaných spojov.

Medzi najrozšírenejšie alternatívy patrí zliatina SAC (Sn-Ag-Cu), ktorá sa stala predmetom rozsiahlych štúdií zameraných na optimalizáciu jej vlastností. Napriek pokroku v oblasti výskumu bezolovnatých zliatin zostáva problematika formovania mikroštruktúry spájkovaných spojov pri zvyšujúcej sa úrovni integrácie a zmenšovaní vývodov stále aktuálna. Menšie spoje obsahujúce štruktúry s nižším počtom zŕn prispievajú k vzniku a šíreniu trhlín. Schopnosť cielene riadiť mikroštruktúru a kryštalografické usporiadanie zŕn cínu bez potreby pridávania nanočastíc predstavuje v moderných aplikáciách zásadný posun k zvyšovaniu spoľahlivosti a mechanickej odolnosti spájkovaných spojov.

Jednou z perspektívnych metód na optimalizáciu štruktúry a vlastností spájkovaných spojov je aplikovanie nízkofrekvenčných mechanických vibrácií počas pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny. Doterajšie výskumy naznačili potenciálny vplyv vibrácií na homogénnejšie rozloženie zŕn cínu, zníženie počtu dutín a zlepšenie mechanických vlastností. Cieľom tejto záverečnej práce bolo analyzovať, ako presná kontrola frekvencie, amplitúdy a výchylky mechanických vibrácií ovplyvňuje morfológické usporiadania zŕn cínu v objeme spájky s dopadom na výsledné vlastnosti. Uskutočnená bola analýza základného rozdelenia typov kryštalografických orientácií Sn zŕn z makroskopického hľadiska. Získané výsledky umožňujú zhodnotiť prínos metódy nízkofrekvenčných a vysokofrekvenčných vibrácií pre moderné spájkovacie aplikácie a ich potenciálny dopad na mechanické vlastnosti a spoľahlivosť spájkovacej zliatiny.

1. SPÁJKOVACÍ PROCES

Spájkovanie je technologický proces spájania kovových častí tavením prídavného materiálu. Prebieha pri teplotách nižších než teplota tavenia spájaných materiálov. Cieľom je vytvoriť pevné, spoľahlivé a elektricky vodivé prepojenie medzi elektronickými komponentmi. Typické aplikácie zahŕňajú spájanie vodičov, pripájanie konektorov alebo montáž súčiastok na dosky plošných spojov (DPS). Ako prídavný materiál sa používa spájkovacia zliatina, označovaná aj ako spájka. V modernom priemysle ide o neodmysliteľnú súčasť výrobného procesu elektronických zariadení.

Z hľadiska teploty tavenia spájkovacej zliatiny sa spájkovanie delí na mäkké a tvrdé. Spájkovanie štandardných elektronických komponentov sa radí do kategórie mäkkého spájkovania, kde pracovná teplota neprekračuje hodnotu 450 °C. V procese spájkovania dochádza k zmáčaniu povrchu roztavenou zliatinou. Ďalšími kľúčovými procesmi sú difúzia a vzájomná rozpustnosť atómov spájky a základného materiálu. Tieto procesy vedú k vytvoreniu pevného metalurgického spojenia. Po pretavení nasleduje ochladzovanie a vytvorenie spájkovaného spoja s požadovanými vlastnosťami. [1]

1.1 Realizácia spájkovaného spoja

Pre vytvorenie dlhodobo spoľahlivého spájkovaného spoja je nevyhnutné zabezpečiť dostatočné očistenie spájaných povrchov. Pre odstránenie väčších častíc a oxidov sa používa mechanické čistenie, ktoré zahŕňa abrazívne techniky, ako napr. kefovanie. Chemické čistenie, vrátane rozpúšťadiel ako izopropylalkohol (IPA) slúži k odstráneniu jemnejších nečistôt a masťô z povrchu. Dôležitou súčasťou procesu je voľba vhodnej spájkovacej zliatiny a taviva. Pri výbere sa zohľadňuje nie len teplota pretavenia spájky, ale aj vplyv na životné prostredie a environmentálne normy. Pri zahriatí (aktivácii) taviva dochádza k chemickým reakciám s oxidmi na povrchu spájaných materiálov, čím sa zlepšuje zmáčavosť povrchov. To umožňuje rovnomerné roztečenie spájky po povrchu. Ďalším zásadným krokom je nastavenie správnej teploty pretavenia, a teda nastavenie teplotného profilu. Výrobcovia spájkovacích zliatin uvádzajú odporúčané teplotné parametre a časy, v príslušných technických listoch. Po ochladnutí je vhodné výsledné spoje očistiť a zbaviť od tavivových zvyškov a reakčných produktov, ktoré majú korozívny účinok. Alternatívnou možnosťou je použitie tzv. bez oplachových tavív. [1,2]

1.1.1 Povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy vodivých častí dosiek plošných spojov predstavujú kľúčové rozhranie medzi spájkovacou plôškou a spájanou súčiastkou. Primárnou funkciou je ochrana medeného povrchu pred oxidačnými a koróznymi procesmi, čím zachovávajú dobrú spájkovateľnosť a zmáčavosť povrchu. Medené vodiče sú vďaka nízkej cene, dostupnosti a vynikajúcim elektrickým vlastnostiam najčastejšie používaným materiálom

na vytváranie vodivých motívov DPS. Nevýhodou je ich nízka chemická stálosť a preto je potrebná povrchová úprava, ktorá zabezpečí ochranu a funkčnosť počas skladovania a výroby. Povrchové úpravy zároveň vytvárajú difúziu bariéru, ktorá bráni rozpúšťaniu medených povrchov počas spájkovania a minimalizuje rast intermetalických zlúčenín. Tieto chemické zlúčeniny (viď. podkapitola 1.2.3) majú zásadný vplyv na spoľahlivosť a mechanickú pevnosť spojov. [1,3]

Povrchové úpravy prešli výrazným vývojom v snahe vyhovieť rozmanitým požiadavkám na funkčnosť, spoľahlivosť, opakovateľnú spájkovateľnosť, ekologickosť, skladovateľnosť a finančnú nákladovosť. Medzi najčastejšie používané povrchové úpravy vo výrobnom procese patria: [2]

- OSP (*Organic Solderability Preservative*) – chemická metóda nanášania organických inhibítorov oxidácie medi na odhalený povrch DPS.
- ENIG (*Electroless Nickel Immersion Gold*) – chemická metóda nanášania vrstvy niklu na medený motív DPS a pokrytie vrstvou zlata.
- HASL (*Hot Air Solder Leveling*) – metóda nanášania vrstvy spájky na medený povrch ponorením a následné odstránenie prebytočnej spájky horúcim vzduchom.
- ELNG (*Electrolytic Nickel Gold*) – elektrolytická metóda nanášania vrstvy niklu a zlata, ktorá umožňuje vytvárať hrubšie vrstvy než ENIG.

1.1.2 Spájkovacie zliatiny

Spájkovacie zliatiny sú zmesi kovov určené na spájanie materiálov pri nižších teplotách tavenia. Zloženie zliatiny významne ovplyvňuje teplotu tavenia, pevnosť, zmáčavosť a schopnosť vytvárať spoľahlivé spoje. Historicky dominovala eutektická zliatina Sn-Pb (63 % Sn, 37 % Pb) vďaka nízkej teplote tavenia (183 °C), výbornej spájkovateľnosti a pomalšiemu rastu intermetalických zlúčenín. Avšak legislatíva EÚ o ochrane životného prostredia (RoHS, WEEE) postupne obmedzila používanie olova kvôli jeho toxicite. [1]

Hlavným cieľom bezolovnatých zliatin bolo dosiahnuť vlastností porovnateľné s olovnatými spájkami pri zachovaní ekologickej bezpečnosti. Typickými zložkami bezolovnatých zliatin sú cín, striebro, meď, bizmut, zinok a ďalšie prvky, ktoré zlepšujú mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti spoja. Napriek tomu sú bezolovnaté zliatiny charakteristické vyššou teplotou tavenia a výraznejším rastom intermetalických zlúčenín, čo zvyšuje nároky na procesy spájkovania a kvalitu povrchových úprav. [1,2]

Jednou z najrozšírenejších bezolovnatých zliatin je SAC305 (Sn-Ag-Cu), pomenovaná podľa hmotnostného zloženia (96,5 % cínu, 3 % striebra a 0,5 % medi). Striebro zlepšuje zmáčavosť, znižuje teplotu tavenia (217 °C) a zvyšuje pevnosť spoja. Prídavok medi výrazne posilňuje mechanickú pevnosť. Zliatiny SAC sa stali globálnym štandardom pre bezolovnaté spájkovanie, hoci ich cena je násobne vyššia, ako pri Sn-Pb zliatinách. [1]

1.1.3 Tavivá

Tavivá zohrávajú kľúčovú úlohu v procese spájkovania. Odstraňujú oxidy a nečistoty z povrchov spájkovaného materiálu, pričom zabraňujú ich opätovnej oxidácii. Chemická reakcia taviva s oxidmi znižuje povrchové napätie, čím sa zlepšuje zmáčavosť povrchu. Okrem funkcie čistenia zlepšujú aj prenos tepla medzi substrátom a tepelným zdrojom.

Zloženie tavív zahŕňa nosič (živicu), rozpúšťadlá, aktivátory a rôzne aditíva. Rozpúšťadlá slúžia na rozpustenie nosiča a aktivátorov, pričom sa počas procesu spájkovania odparia a zabezpečia ich rovnomerné nanesenie po povrchu. Aktivátory sú chemické látky, ktoré pri zahriatí odstraňujú oxidy a nečistoty z povrchov. Aditíva zase zlepšujú zmáčavosť spájky, znižujú povrchové napätie a prispievajú k stabilite spájkovacej pasty. [1]

Najčastejšie sa používajú rozpúšťadlá na organickej báze obsahujúce prchavé organické látky (VOC). Tieto látky však môžu počas spájkovania produkovať emisie negatívne ovplyvňujúce životné prostredie. V súčasnosti sú stále populárnejšie bezoplachové (*No-Clean*) tavivá, ktoré minimalizujú množstvo zvyškov na povrchu po spájkovaní. Tieto tavivá neovplyvňujú elektrické vlastnosti spoja a vďaka nízkemu alebo nulovému obsahu VOC (*VOC-free*) sú environmentálne šetrnejšie. Z tohto dôvodu sa uprednostňujú v moderných spájkovacích procesoch. [2]

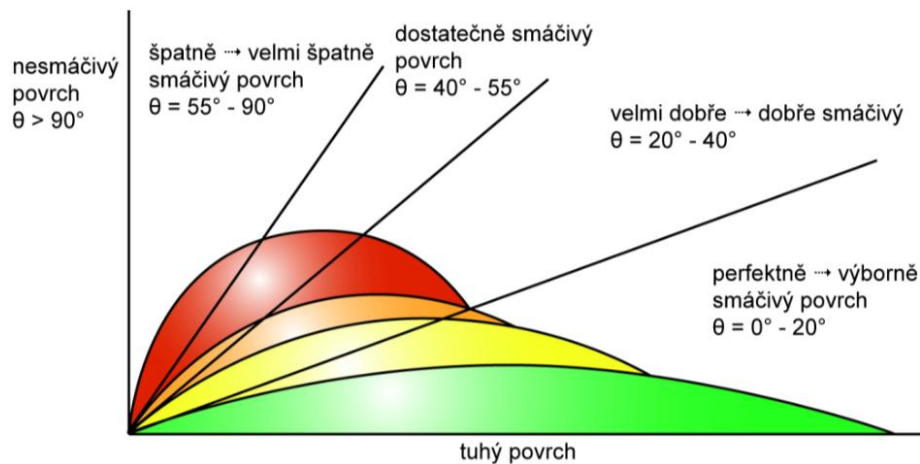
1.2 Formovanie spájkovaného spoja

Ako už bolo uvedené, spájkovanie zahŕňa aplikovanie roztavenej spájkovacej zliatiny na povrch spájaných častí. Po ochladení roztavenej spájkovacej zliatiny dochádza k tuhnutiu a vytvoreniu mechanicky pevného a elektricky vodivého spoja. Tento proces pozostáva z viacerých kľúčových mechanizmov, vrátane fyzikálnych procesov a chemických reakcií, ktoré zásadne ovplyvňujú výslednú kvalitu spojenia. Plochy spájaných kovových častí (vývody súčiastok, spájkovacie plôšky na DPS) sa počas tohto procesu netavia, ale sú zmáčané roztavenou spájkovacou zliatinou. Z tohto dôvodu dobrá zmáčavosť, patrí medzi najdôležitejšie podmienky pre vytvorenie kvalitného spojenia. Keďže definuje schopnosť tekutej spájky priľnúť k povrchu spájaného materiálu. Zmáčanie povrchu kovu nastáva, ak je povrchová energia substrátu väčšia, než je povrchová energia roztavenej spájkovacej zliatiny. Ide len o počiatočnú fázu tohto komplexného fyzikálne-chemického procesu pôsobenia atómov na povrchu spájaných kovov. V nasledujúcej fáze dochádza na rozhraní materiálov k spusteniu procesu rozpúšťania a difúzie medzi spájkovacou zliatinou a základným materiálom. Spúšťa sa proces formovania intermetalických zlúčenín. Tie sa tvoria v dôsledku chemických reakcií na rozhraní medzi spájkovacou zliatinou a spájaným povrchom. Intermetalické zlúčeniny sú kritické pre výslednú pevnosť a vodivosť spoja. V záverečnej fáze chladnutia spájkovacej zliatiny, dochádza ku kryštalizácii a tvorbe konečnej štruktúry spoja. Kryštalizačné zárodky vznikajúce počas tohto procesu umožňujú rast zrn

v štruktúre spájkovacej zliatiny. Konečná veľkosť týchto zŕn je značne závislá na rýchlosti (teplotnom gradiente) poklesu teploty a výrazne ovplyvňuje výsledné mechanické vlastnosti spoja. [1,3]

1.2.1 Zmäčavosť povrchu

Spájkovaný povrch musí umožniť zmáčanie základného materiálu roztavenou spájkovacou zliatinou. Zmäčaním tuhého povrchu dochádza k roztečeniu a príľnutiu spájky k povrchu materiálu. Tento proces je charakterizovaný snahou systému znížiť povrchovú energiu na minimum. Zmäčaním dochádza k interakcii medzi atómami spájky a povrchovými atómami základného materiálu. V jednotlivých miestach medzifázového rozhrania, tak postupne vznikajú väzby po celej styčnej ploche. Nastáva znižovanie voľnej povrchovej energie systému. Z pretavenej spájky a tuhého materiálu vzniká stabilné medzifázové rozhranie. V ňom dochádza k prechodu atómov roztavenej zliatiny do kryštalografickej mriežky základného materiálu. Vytvárajú sa kovové väzby, ktoré zabezpečujú dosiahnutie pevného a spoľahlivého spoja. Ak nedôjde k vytvoreniu spoločnej fázy na povrchu základného materiálu, nebola dosiahnutá požadovaná úroveň zmáčavosti. Kvalita zmáčania sa hodnotí pomocou kontaktného uhla zmáčania θ [°], ktorý definuje mieru roztekania spájky po povrchu materiálu. Na obrázku 1.1 sú znázornené jednotlivé stavy, ktoré definujú roztekanie spájky a určujú výslednú kvalitu zmáčavosti povrchu. Dosiahnutie požadovanej úrovne zmáčavosti si vyžaduje, aby boli povrchy spájaných materiálov zbavené nečistôt, oxidov a vlhkosti. [5,6]



Obrázok 1.1 Charakteristiky zmáčania v závislosti na veľkosti uhla zmáčania θ [2]

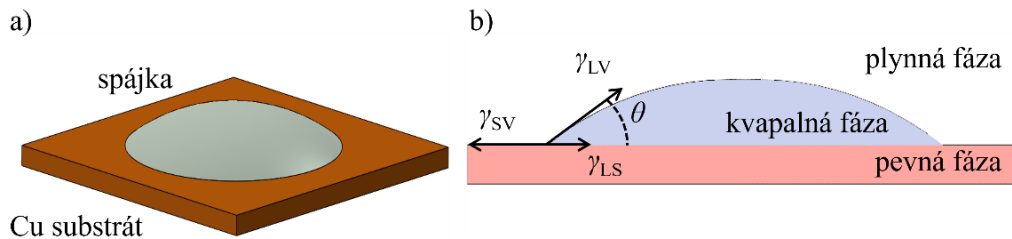
Kľúčovým faktorom, ktorý ovplyvňuje zmáčavosť povrchu, je povrchové napätie roztavenej spájky. Charakteristiky zmáčania sú výsledkom jednotlivých síl povrchového napätia na medzifázových rozhraniach. Ako bolo uvedené v podkapitole 1.2, k zmáčaniu povrchu dôjde, ak je povrchové napätie základného materiálu väčšie než povrchové napätie roztavenej spájky. Tento proces je sprevádzaný zmenou geometrie kvapky spájky, ktorá zníži svoju výšku a rozšíri sa do väčšej plochy. Daný jav je možné vysvetliť

pomocou vektorov síl pôsobiacich na rozhraní. Zmäčanie nastane, ak vektor povrchového napätia na rozhraní pevná fáza – plynná fáza (γ_{SV}) bude väčší než vektor povrchového napätia na rozhraní kvapalná fáza – pevná fáza (γ_{LS}). [5,6]

Obrázok 1.2 graficky znázorňuje rovnováhu síl pôsobiacich na kvapku spájky na medenom substráte. Rovnovážny stav medzi povrchovými napätiami na rozhraní troch fáz – pevná (substrát), kvapalná (spájka) a plynná fáza (tavivo a prostredie) popisuje Youngova rovnica (1.1) [7]

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta, \quad (1.1)$$

kde: γ_{SV} – povrchové napätie na rozhraní substrátu a prostredia (taviva) [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
 γ_{LS} – povrchové napätie na rozhraní pretavená spájka a substrát [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
 γ_{LV} – povrchové napätie na rozhraní pretavená spájka a prostredie [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
 θ – uhol zmáčania [$^\circ$]



Obrázok 1.2 Rovnovážny stav povrchových napätí: a) 3D model, b) Priečný rez štruktúrou

Youngova rovnica nezohľadňuje vplyv drsnosti povrchu substrátu, deformáciu kvapiek spájky spôsobenú gravitačnou silou a ani jej reakciu so substrátom. Rovnica opisuje teoretický ideálny stav zmáčania pevnej fázy spájkou. Keďže nezahŕňa mechanizmus reakcie medzi spájkou a substrátom, v praxi sa nedá plne aplikovať. Avšak stanovuje, že na dosiahnutie optimálnej zmáčavosti povrchu je nevyhnutné minimalizovať kontaktný uhol θ prostredníctvom zvýšenia γ_{SV} . Oxidy a nečistoty znižujú povrchovú energiu spájkovaného povrchu. V tomto procese má nezastupiteľnú úlohu tavivo, ktorého hlavnou funkciou je odstraňovanie vrstvy oxidov na povrchu spájkovaného predmetu, čím sa zvyšuje povrchová energia a zlepšuje zmáčavosť. [2]

1.2.2 Difúzia

V priebehu procesu reaktívneho zmáčania a roztekania spájky po povrchu dochádza k difúzii a rozpúšťaniu spájaných kovov. Tento dej zahŕňa prenikanie atómov spájky do tuhého kovu, ako aj rozpúšťanie tuhého kovu v pretavenej spájkke. Difúzia je charakterizovaná premiestňovaním atómov, a teda presunom hmoty vplyvom teplotného alebo koncentračného gradientu. Difúzny tok tekutej spájky, ktorá difunduje cez objem po určitý čas z oblastí s vyššou koncentráciou do oblastí s nižšou koncentráciou, je priamo úmerný koncentračnému gradientu. [7]

Difúzia prebieha u čistých kovov predovšetkým prostredníctvom tzv. vakantného mechanizmu. Vakencie sú voľné miesta v kryštálovej mriežke a s narastajúcou teplotou stúpa ich koncentrácia a pohyblivosť. Zvyšuje sa pravdepodobnosť presunov atómov v štruktúre. Atóm s dostatočne veľkou aktivačnou energiou, získanou z tepelných kmitov, sa môže premiestniť na miesto vakencie, ktorá sa následne posunie na pôvodnú pozíciu atómu. Dané miesto môže následne obsadiť ďalší atóm. [2,7]

Difúzia je v prípade pevných kovov ovplyvnená typom, štruktúrou a poruchami kryštálovej mriežky. Vyššia hustota porúch, ako sú dislokácie, vakencie a veľkosť zrna prispieva k zvýšeniu difúzneho koeficientu, čím sa urýchli proces difúzie. Veľkosť súčiniteľa difúzie D v čistých kovoch popisuje Arrheniova rovnica (1.2) [3]

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad (1.2)$$

kde: D_0 – difúzny koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q – aktivačná energia rastu vrstvy [J]
 k – Boltzmanova konštanta [$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$]
 T – absolútna teplota [K]

Prostredníctvom súčiniteľa difúzie je možné stanoviť hrúbku difúznej vrstvy, ktorá sa vytvorí za určitý čas podľa II. Fickovho zákona (1.3)

$$Z = \sqrt{D \cdot t}, \quad (1.3)$$

kde: Z – hrúbka difúznej vrstvy [m]
 D – súčiniteľ difúzie [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 t – čas [s]

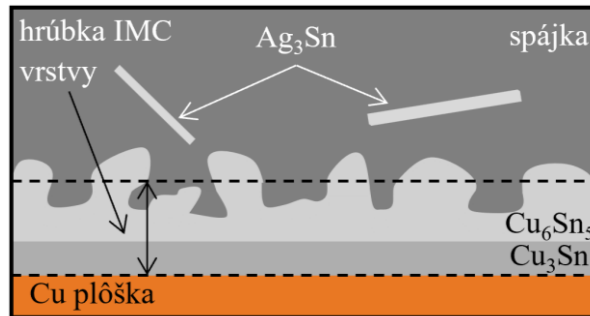
Vplyvom premiestňovania elementárnych častíc narastá difúzna vrstva na rozhraní spájaných materiálov s teplotou a časom spájovania. Tieto medzi-kovové zlúčeniny sú označované ako intermetalické vrstvy a ich prítomnosť má zásadný vplyv na výsledné vlastnosti a spoľahlivosť vytvoreného spojenia. [3]

1.2.3 Intermetalické zlúčeniny

Intermetalické zlúčeniny (IMC – *Intermetallic Compounds*) sú homogénne chemické zlúčeniny, ktoré vznikajú reaktívnym procesom zmáčania a roztekania spájky po povrchu substrátu. Tieto zlúčeniny, tvorené kombináciou aspoň dvoch kovov, zabezpečujú metalurgické prepojenie medzi spájkou a základným materiálom. IMC významne prispievajú k zvýšenej pevnosti a odolnosti spájkovaného spoja. Na druhej strane, bývajú krehkejšie než samotná spájka alebo základný materiál, čo môže ovplyvniť jeho dlhodobú spoľahlivosť. [3]

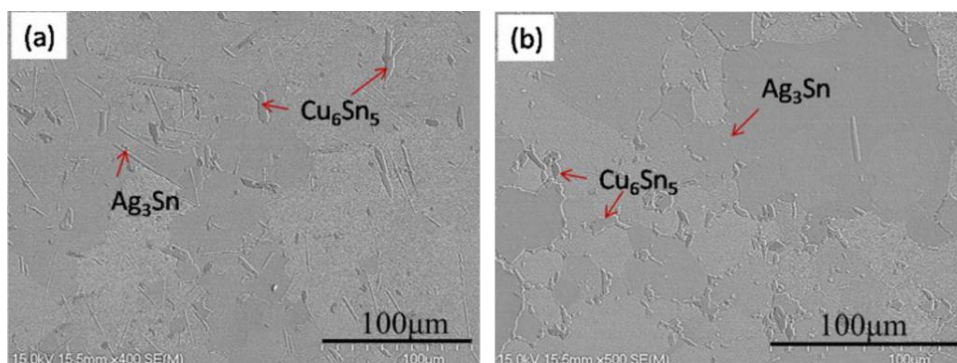
Tvorba intermetalických fáz prebieha kombináciou chemických reakcií a difúzie. Pri kontakte substrátu s roztavenou spájkou dochádza k rozpúšťaniu povrchovej vrstvy plôšky a následnej chemickej reakcii, ktorá vedie k tvorbe IMC. Reakcia na rozhraní

substrátu a spájky začína bezprostredne po kontakte a pokračuje počas celého procesu pretavenia. Typickým príkladom je formovanie fázy Cu_6Sn_5 na rozhraní medzi spájkou a medeným substrátom. Vplyvom starnutia dochádza vzájomnou difúziou medzi Cu_6Sn_5 a medeným substrátom k formovaniu fázy Cu_3Sn . Modelový rez spájkovaným spojom s vyznačenou štruktúrou IMC je zobrazený na obrázku 1.3. [3]



Obrázok 1.3 Intermetalické fázy na rozhraní medenej plôšky a spájky Sn/Ag/Cu

Rast a morfológiu IMC ovplyvňuje niekoľko faktorov. Vyššie teploty a dlhšia doba expozície vedú k hrubším vrstvám IMC, ktoré sú menej rovnomerné a krehké. Naopak, rýchle ochladenie podporuje tvorbu tenších a homogénnejších vrstiev. Dôležitú úlohu taktiež zohráva zloženie spájky a povrchová úprava substrátu. Napríklad prítomnosť striebra v cínových spájkach vedie k tvorbe sekundárnych fáz Ag_3Sn , ktoré prispievajú k vyššej pevnosti spoja. Na druhej strane, väčšie ihlicovité štruktúry Ag_3Sn podporujú šírenie trhlin a vedú k zníženiu výslednej pevnosti. Štúdia [8] preukázala, že ultrazvukové vibrácie počas spájkovania podporujú rovnomernejšie rozloženie IMC fáz Cu_6Sn_5 a Ag_3Sn v objeme štruktúry spoja. Toto zjemnenie mikroštruktúry by malo potenciálne viesť k zlepšeniu mechanických vlastností spoja. [2,5]



Obrázok 1.4 Výskyt intermetalických fáz v štruktúre spájkovaného spoja SAC305 [8]

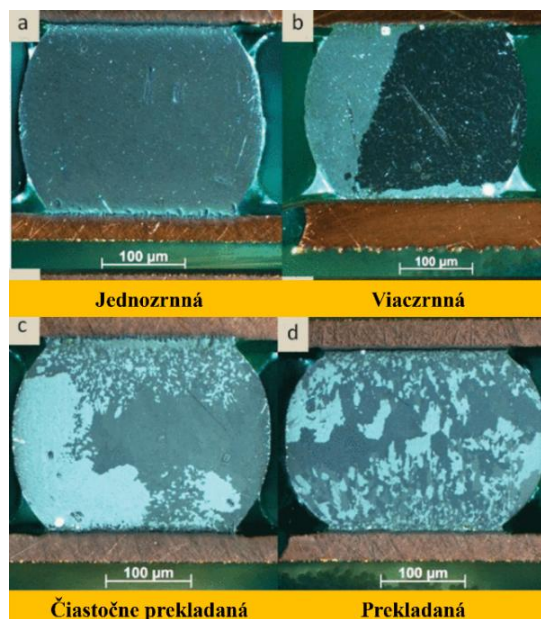
Intermetalické zlúčeniny významne ovplyvňujú spoľahlivosť spájkovaných spojov. S rastúcou hrúbkou intermetalickej vrstvy klesá flexibilita spoja, čo zvyšuje riziko zlyhania. Teplotné cyklovanie spôsobuje rozdiely v tepelnej rozťažnosti jednotlivých

častí spoja, čím vzniká mechanické napätie na rozhraní IMC, ktoré zvyšuje pravdepodobnosť jeho oslabenia. Ďalšie štúdium zamerané na pochopenie procesov tvorby a optimalizácie morfológie IMC je nevyhnutné, pre zabezpečenie spoľahlivosti v moderných technológiách spájkovania. [2]

1.2.4 Tuhnutie a kryštalizácia spájkovacej zliatiny

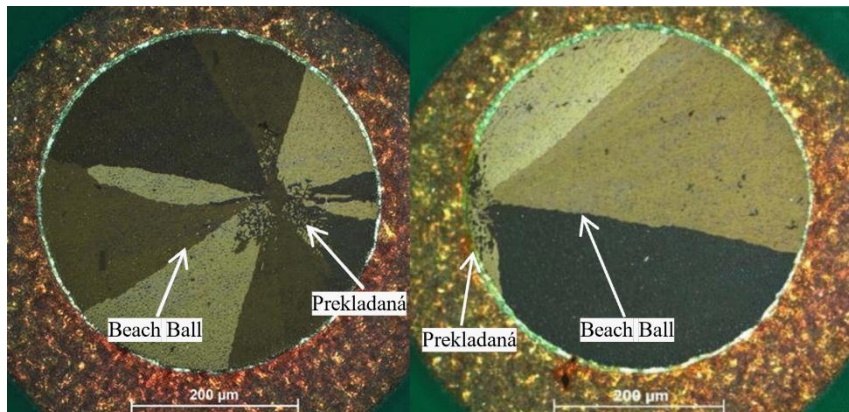
Záverečnou fázou v procese spájkovania je tuhnutie roztavenej spájky a následná kryštalizácia. Tento krok má významný vplyv na správne formovanie konečnej štruktúry a kryštalografickej orientácie spájkovaného spoja. Priamo ovplyvňuje jeho spoľahlivosť a mechanické vlastnosti. Zásadnú rolu pri formovaní výslednej orientácie, veľkosti a tvaru jednotlivých zŕn, ako aj β -Sn dendritov má nastavenie teplotného profilu. Veľkosť a rozmiestnenie zŕn je možné riadiť nastavením doby nad teplotou pretavenia, maximálnou teplotou spájkovacieho profilu a rýchlosťou chladnutia. V priebehu tuhnutia tekutej fázy dochádza k zhlukovaniu zŕn a rastu kryštálov. Rýchlosť ich rastu a veľkosť zŕn v priebehu tuhnutia závisí predovšetkým na teplotnom gradiente, medzi rovnovážnym stavom rozhrania a aktuálnou teplotou zliatiny a na kryštalografickej orientácii rozhrania. Vyššia rýchlosť chladnutia vedie k jemnejšej homogénnej štruktúre zŕn, zatiaľ čo pomalé chladnutie podporuje rast väčších zŕn a stabilizáciu kryštálovej mriežky. [2,10]

Na základe výsledkov vedeckých publikácií zameraných na skúmanie základného rozdelenia kryštalografických orientácií z makroskopického hľadiska sú definované štyri hlavné morfológie (viď. obrázok 1.5). Ide o jednozrnnú, viaczrnnú, čiastočne prekladanú a prekladanú morfológickú štruktúru zŕn cínu. Čiastočne prekladaná štruktúra sa vyznačuje podielom prekladanej štruktúry zŕn v úrovni menej ako 50 % a viac ako 10 % v celom objeme spoja. [9]



Obrázok 1.5 Zobrazenie morfológického usporiadania zŕn cínu [10]

Na obrázku 1.6 je zobrazená charakteristická viaczrnná morfológická štruktúra guľového spájkovaného vývodu, pripomínajúca plážovú loptu (z angl. „*Beach Ball*“). Ide o sférické usporiadanie dendritických kryštálov cínu sústredených okolo jedného bodu s indikáciou začiatku nukleácie. [9]



Obrázok 1.6 Viaczrnná morfológická štruktúra typu *Beach Ball* [10,11]

Porovnávanie rozdielov v mechanickej pevnosti, elektrickej vodivosti a spoľahlivosti spájkovaných spojov s rôznymi kryštalografickými orientáciami je predmetom odborného výskumu. Väčšina publikácií je zameraná na významné rozdiely v pevnosti štruktúry pre spájkovacia zliatina Sn-Ag-Cu (SAC). Z dostupných zdrojov [12,13] vyplýva, že jednozrnná štruktúra, pozostávajúca z jedného veľkého Sn zrna, vykazuje dobrú elektrickú vodivosť, avšak vyznačuje sa horšími mechanickými vlastnosťami, ako viaczrnné štruktúry. Dôvodom je homogénna orientácia, ktorá podporuje riziko šírenia prasklín. Značný vplyv má aj orientácia zrna voči substrátu. Vysoká hodnota koeficientu tepelnej rozťažnosti v smere s kolmou orientáciou Sn kryštálu voči substrátu vedie k vyššiemu napätiu. Spoj sa roztiahne a zmrští počas teplotných cyklov, čo spôsobuje praskliny a ich rýchle šírenie, ako potvrdzujú štúdie [13,14]. Naopak plne prekladaná štruktúra obsahuje vysoké zastúpenie viacerých orientácií β -Sn dendritov, ktoré sú navzájom prekladané, čím je dosahovaná vysoká mechanická pevnosť. V štúdiu [10], bola skúmaná tvrdosť a deformácia materiálu pri konštantnom tlaku (z angl. „*indentation creep*“) s cieľom porovnať mechanické vlastnosti spojov medzi jednozrnnou štruktúrou, prekladanou štruktúrou a viaczrnnou *Beach Ball* štruktúrou. Mechanické testy a štatistická analýza preukázali, že prekladaná štruktúra má najvyššiu tvrdosť a odolnosť voči deformáciám pri teplotných cykloch. Hranice medzi zrnami pôsobia ako bariéry proti šíreniu prasklín. Záver štúdie poukazuje aj na fakt, že v závislosti od spôsobu a veľkosti zaťaženia môže väčšia tvrdosť viesť k vyššiemu riziku vzniku prasklín v podložke (z angl. „*pad cattering*“) a k narušeniu intermetalických vrstiev.

V mikroštruktúre spájkovaného spoja pre spájkovacie zliatiny SAC je typická prítomnosť intermetalických fázy Ag_3Sn , ktoré boli popísané v predchádzajúcom texte časti 1.2.3. Štúdie [15,16] popisujú skúmanie vplyvu zloženia spájky a morfológie Sn zrn

na vývoj mikroštruktúry a dopad na mechanické vlastnosti spojov pri cyklickom teplotnom namáhaní. Závěry poukazujú na zlepšenie spoľahlivosti bezolovnatých spájk s vyšším obsahom striebra a jemným rozložením intermetalických zlúčenín Ag₃Sn. Tie pôsobia ako bariéry pre pohyb dislokácii, čím sa zvyšuje pevnosť a mechanická odolnosť spoja. Zároveň rovnomerné a jemné rozloženie Ag₃Sn prispieva ku schopnosti materiálu sa deformovať bez praskania (z angl. „ductility“). Na druhú stranu, počas teplotného cyklovania dochádza k hrubnutiu (z angl. „coarsening“) intermetalických Ag₃Sn fáz. To následne vedie k zvýšenej krehkosti spoja a jeho náchylnosti na praskanie. Výsledkom teplotných cyklov je pozorovanie, že rovnomernejšia a jemnejšia mikroštruktúra prispieva k vyššej spoľahlivosti spájkovaného spoja.

1.2.5 Vplyv povrchovej úpravy na formovanie štruktúry spájkovaného spoja

Ako bolo popísané v predchádzajúcej časti, tuhnutie roztavenej spájky a následná kryštalizácia má zásadný vplyv na výsledné vlastnosti spájkovaného spoja. Pričom pozornosť pri formovaní výslednej morfológie zŕn bola venovaná nastaveniu teplotného profilu. Výsledky štúdie [10] uvedené v tabuľke 1.1 naznačujú spojitosť medzi výberom povrchovej úpravy substrátu a výslednou štruktúrou spájkovaných spojov. Substráty s povrchovou úpravou ENIG preukázali vyšší podiel prekladanej štruktúry zŕn v porovnaní s inými povrchovými úpravami, ako sú meď alebo ELNG. Tento jav možno pripísať rozdielnym podmienkam tuhnutia spájky na povrchu jednotlivých substrátov, ktoré ovplyvňujú nukleáciu a rast β-Sn zŕn. Povrchová úprava ENIG pravdepodobne poskytuje homogénnejší povrch a stabilnejšie podmienky. Z výsledkov taktiež vyplýva, že výskyt prekladanej štruktúry bol častejší v spájke s vyšším obsahom striebra. [10]

Tabuľka 1.1 Porovnanie vplyvu zloženia zliatin a povrchových úprav substrátov na morfológiu zŕn v rôznych veľkostiach spájkovacích guľčiek [10]

Veľkosť spájkovacej guľčiky	Spájka	Substrát horná plôška	Substrát spodná plôška	Počet spojov	Jednozrnná/Viaczrnná štruktúra	Čiastočne prekladaná/Prekladaná štruktúra	Podiel prekladanej štruktúry [%]
12 mil	SAC105	Cu	ENIG	20	14	6	30
		ENIG	ENIG	20	5	15	75
		ENIG	Cu	20	18	2	10
		ENIG	ELNG	20	19	1	5
	SAC305	Cu	ENIG	20	17	3	15
		ENIG	ENIG	20	8	12	60
		ENIG	Cu	20	4	16	80
		ENIG	ELNG	18	14	4	22
		ELNG	ELNG	17	13	4	24
	SAC405	ENIG	ENIG	20	20	0	100
		ENIG	Cu	19	7	12	63
		ENIG	ELNG	20	18	2	10

Cieľom tejto časti bolo poukázať na komplexnosť a variabilitu procesov ovplyvňujúcich výslednú štruktúru a kryštalografickú orientáciu spájkovaného spoja. Výsledné vlastnosti sú dôsledkom mnohých interakcií medzi zložením spájky, veľkosťou spoja a povrchovou úpravou substrátu. Táto komplexnosť je hlavným dôvodom, prečo sa výskumné vedecké skupiny intenzívne zameriavajú na pochopenie a optimalizáciu procesov s cieľom dosiahnuť vyššiu spoľahlivosť a lepšie vlastnosti bezolovnatých spájkovaných spojov.

2. FORMOVANIE A OPTIMALIZÁCIA ŠTRUKTÚRY SPÁJKOVANÉHO SPOJA

Schopnosť riadiť mikroštruktúru spájkovaného spoja je v moderných aplikáciách zásadné pre dosahovanie vysokej spoľahlivosti a odolnosti voči zlyhaniu. Ako už bolo zmienené v predchádzajúcej kapitole, každé morfológické usporiadanie kryštálov má svoje výhody a nevýhody. Riadením kryštalografického usporiadania zŕn cínu a intermetalických fáz v spájkovanom spoji je možné optimalizovať jeho mechanické vlastnosti, čím sa výrazne zvýši odolnosť voči mechanickému namáhaniu, vibráciám a teplotným cyklom.

2.1 Základný prehľad metód riadenia mikroštruktúry

V súčasnosti sú zavedené a skúmané rôzne metódy, ako definovane ovplyvniť mikroštruktúru spájkovaného spoja. Jedným z overených a implementovaných prístupov je riadenie teploty. Štúdia [17] demonštruje, ako úprava teplotného profilu počas procesu tuhnutia ovplyvňuje morfológiu zŕn a mení výslednú mikroštruktúru spoja. Riadenie teplotného profilu bolo zamerané na teplotu tuhnutia, čo primárne ovplyvňuje počet zŕn a ich kryštalografickú orientáciu. Nedochádza však k priamej kontrole nad rozložením intermetalických zlúčenín (Ag_3Sn a Cu_6Sn_5) v mikroštruktúre spoja. Zmeny štruktúry sú zároveň značne závislé napríklad na veľkosti a geometrii analyzovanej vzorky, čo prispieva k nekonzistentným výsledkom.

Ďalším z možných prístupov pre riadenie morfológického usporiadania zŕn je homogénne integrovanie nanočastíc do spájkovacej zliatiny. Ako príklad je možné uviesť štúdiu [18], v ktorej bol skúmaný vplyv Ni_3Sn_4 nanočastíc pridaných v spájkovacej zliatine SAC305 na zjemnenie zŕn v BGA guličkách. Vo voľne stojacích guličkách bez substrátu mali vzorky s pridanými Ni_3Sn_4 nanočasticami rozdielnu morfológiu. Vzorky bez pridaných nanočastíc vykazovali jednozrnnú štruktúru a štruktúru typu *Beach Ball*, zatiaľ čo sa vzorky s ich obsahom vyznačovali charakteristickou viaczrnnou štruktúrou. Nanočastice plnili funkciu nukleačných centier počas tuhnutia, čo prispievalo k rovnomernejšiemu a jemnejšiemu rozloženiu zŕn. Avšak pri BGA guličkách prispájkovaných na medenom substráte, ktoré simulovali reálne zapojenie v praxi, neboli pozorované žiadne významné zmeny v mikroštruktúre spoja. Nakoľko došlo k rozpusteniu nanočastíc z dôvodu zvýšeného obsahu medi v spájkovanom spoji, ktoré nastalo rozpúšťaním podložky v tekutej spájke. Výsledky štúdií, zhrnuté v článku [19], poukazujú aj na technickú náročnosť daného procesu. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností spoja je nutné presne optimalizovať množstvo a typ nanočastíc v spájkovacej zliatine. Nesprávny pomer vedie k ich zhlukovaniu v dôsledku vysokej povrchovej energie. Tým sa naruší homogénna distribúcia nanočastíc v objeme spoja, čo prispieva k jeho zhoršeným vlastnostiam. Zároveň bolo zaznamenané zhoršenie zmáčavosti povrchu substrátu a zvýšený výskyt dutín (z angl. „voids”).

V oblasti zmeny štruktúry spájkovaného spoja sú predmetom výskumu aj účinky pôsobenia elektrického prúdu a magnetického poľa. Oba smery sú stále predmetom aktívneho výskumu. V štúdiu [20] bol predmetom skúmania účinok prúdovej hustoty na mechanické vlastnosti a mikroštruktúru spájky SAC305. Výsledky ukazujú, že vyššia prúdová hustota mala negatívny vplyv na pevnosť spoja. Nakoľko elektrický prúd prispieva k urýchľovaniu rastu intermetalických vrstiev a to viedlo k zhoršeniu výslednej spoľahlivosti. Výsledky sú primárne zamerané na elektromigráciu, ku ktorej dochádza počas aktívneho používania spoja pri prechode elektrického prúdu. V inej štúdiu [21] bol skúmaný vplyv rotujúceho magnetického poľa na vlastnosti spájkovacej zliatiny SAC205 počas tuhnutia. Výsledky ukázali značné zlepšenie vlastností, vrátane jemnejšej a homogénnejšie rozloženej mikroštruktúry. Závery práce naznačujú, že rotujúce magnetické pole aktívne prispieva k rovnomernému rozloženiu nukleačných centier. Obe metódy majú skôr experimentálne zameranie, nakoľko je vyžadovaná pomerne náročná a komplexná zostava.

Každý z prezentovaných prístupov pre riadené formovanie mikroštruktúry má isté výhody, ale aj obmedzenia. V ideálnom prípade by zvolená metóda mala byť schopná definovane ovplyvniť nukleáciu, rast a orientáciu zŕn. Tým prispieť k vytvoreniu jemnejšej a homogénnejšej štruktúry, s kontrolovaným vývojom intermetalických zlúčenín v spájkovanom spoji. Výsledkom by tak bol spájkovaný spoj s vysokou elektrickou vodivosťou, optimálnymi mechanickými vlastnosťami a odolnosťou voči teplotným cyklom. Neoddeliteľnou súčasťou výberu vhodnej metódy sú aj výsledné náklady a časová náročnosť na implementovanie do prípadného výrobného procesu. V komerčnom odvetví je nevyhnutné zohľadniť nielen technický prínos jednotlivých metód, ale aj praktickú realizovateľnosť.

2.2 Formovanie mikroštruktúry pod vplyvom pôsobenia mechanických vibrácií a ultrazvuku

Ako jednou z perspektívnych metód výskumu spájkovaných spojov sa javí využitie mechanických vibrácií a ultrazvuku. Najmä v súvislosti s ich pôsobením počas procesu pretavenia a tuhnutia kvapalnej fázy zliatiny. Tento prístup je stále predmetom intenzívneho výskumu, keďže sa jedná o pomerne nepreskúmanú oblasť. Napriek tomu existujú viaceré vedecké práce, ktoré poukazujú na prínosy aplikovania metódy ultrazvuku. Štúdie [19,22] zhrnújú doterajší výskum a dokazujú priaznivý efekt v podobe zjemnenia zŕn v cínovej matici, tvorbe tenšej intermetalickej vrstvy a zvýšenia pevnosti spoja. Rovnomernejšie rozloženie nukleačných centier prispievalo k zlepšeniu celkovej homogenity mikroštruktúry. Dôležitým pozorovaním bol aj pokles výskytu dutín (*voidov*) v objeme vytvoreného spoja. Tento efekt bol dôsledkom oscilácie bublín indukovaných kavitáciou, ktoré zlepšujú prenos hmoty a tepla v tavenine. Mechanizmus kavitáčnych efektov typický pre ultrazvukové spájkovanie je vysvetlený v podkapitole 2.2.2.

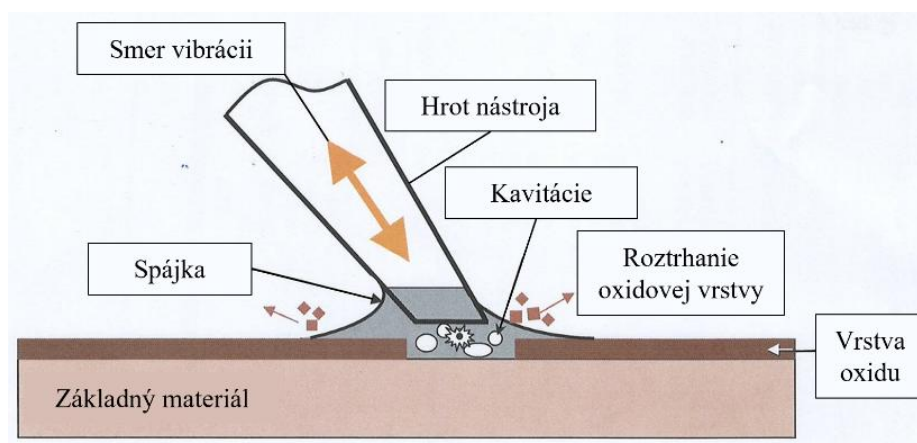
Napriek sľubným výsledkom štúdií zostáva optimálne nastavenie procesných parametrov, akými sú frekvencia, výkon a trvanie pôsobenia vibrácií stále predmetom výskumu. V podkapitole 2.4 sú podrobnejšie rozobraté jednotlivé experimenty s doposiaľ publikovanými výsledkami v danej oblasti. Zároveň platí, že drvivá väčšina zverejnených štúdií sa zameriava na využitie ultrazvukových frekvencií (nad 20 kHz).

2.2.1 Ultrazvukové spájkovanie

Ultrazvukové spájkovanie predstavuje unikátnu technológiu, ktorá eliminuje potrebu použitia tavív. Inými slovami ide o čistý spájkovací proces, ktorý nevyžaduje agresívne chemické zlúčeniny slúžiace k očisteniu podkladových substrátov. Spájkovanie s využitím ultrazvukovej energie je obzvlášť vhodné pre materiály ako sklo, keramika a ťažko spájkovateľné kovy, ktoré nie sú kompatibilné s bežnými nástrojmi. V priemysle sa bežne využíva pre keramiky vo fotovoltaických paneloch, v medicíne a senzoroch. [2]

2.2.2 Princíp ultrazvukového spájkovania

Ultrazvukové spájkovanie je technológia, ktorá využíva fyzikálne javy, ako kavitácia (tvorba a kolaps mikro-bublín) a akustické prúdenie (pohyby kvapaliny spôsobené ultrazvukovými vlnami). Na obrázku 2.1 je znázornený základný princíp spájkovania ultrazvukom. Systém pozostáva z výhrevného telesa a hrotu, ktoré zabezpečujú pretavenie spájkovacej zliatiny a prenos ultrazvukových vibrácií do roztaveného materiálu. K tomuto účelu sú využívané tepelne izolované piezoelektrické kryštály, ktoré generujú vysokofrekvenčné (20 kHz – 60 kHz) akustické vlny. Tie sa prenášajú do roztaveného materiálu, kde mechanicky narúšajú oxidovú vrstvu, a tým umožňujú lepšie zmáčanie povrchu substrátu spájkou. [1,23]



Obrázok 2.1 Princíp spájkovania ultrazvukom [23]

Ultrazvuk sa šíri roztavenou spájkou vo forme pozdĺžnych tlakových vln, ktoré indukujú vibračný pohyb molekúl spájky. Molekuly sa striedavo stláčajú a roztáhajú v závislosti na zmenách tlaku v prostredí. Tým vzniká oscilácia okolo ich rovnovážnych polôh. Pri dostatočne vysokej intenzite ultrazvuku dochádza k prekonaniu bodu,

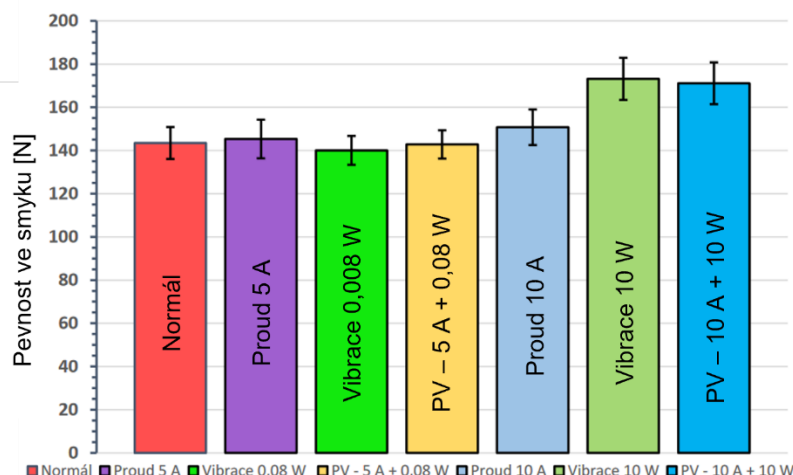
kde medzimolekulárne sily dokážu udržať molekuly v neporušenom stave. Nasleduje narušenie molekulárnej štruktúry a vytváranie kavít (dutín) v materiáli. Tieto dutiny, nazývané aj ako kavitačné bubliny, vznikajú a kolabujú (implózia) v extrémne krátkych časových intervaloch za uvoľnenia veľkého množstva energie. Tento jav, známy ako kavitácia, hrá kľúčovú úlohu pri mechanickom čistení povrchu a zlepšovaní difúzie spájky do základného materiálu. Okrem odstraňovania oxidov a kontaminantov, tieto vysoké tlaky a prudké kolapsy podporujú aj tvorbu a rovnomernejšie rozloženie nukleačných centier, čo prispieva k jemnejším zrnám v objemovej štruktúre. Pozorovaný bol aj výskyt homogénnejších intermetalických zlúčenín, čím sa zvyšuje celková kvalita a pevnosť spájkovaného spoja. [2,24]

2.2.3 Mechanické vibrácie

Metóda aplikovania nízkofrekvenčných mechanických vibrácií (do 5 kHz) počas pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny je doposiaľ relatívne málo preskúmanou oblasťou. Existuje pomerne málo výskumov zameraných na jej možný vplyv pri formovaní štruktúry spájkovaných spojov.

Pri nízkofrekvenčných vibráciách sú pozorované významné vplyvy na povrchové správanie častíc v kvapaline. Tieto mechanizmy súvisia so štruktúrou povrchovej vrstvy, pričom ich dosah na objemové vlastnosti materiálu napr. spájky, nebol dostatočne preskúmaný. Na rozdiel od ultrazvuku, kde dochádza akustickou kavitáciou a prúdením k objemovým zmenám vo forme tvorby, rastu a implózii mikrobublín v roztavenej zliatine. Nižšia intenzita mechanických vibrácií v porovnaní s ultrazvukom nevyklučuje vplyv na formovanie výslednej štruktúry spoja.

Potvrdením týchto tvrdení je bakalárska práca [25], ktorej predmetom bol výskum pôsobenia mechanických vibrácií a elektrického prúdu na kvalitu spájkovaného spoja. Hlavným cieľom bolo overiť vplyv danej metódy na mechanickú pevnosť spájkovaného spoja prostredníctvom skúšky v strihu (viď. obrázok 2.2). Výsledky ukázali, že aplikovanie nízkofrekvenčných vibrácií (616 Hz a 10 W) počas pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny, vedie k potenciólnemu zlepšeniu mechanických vlastností spojov. Z dosiahnutých výsledkov bolo pozorované zlepšenie pevnosti v strihu o približne 25 % v porovnaní s referenčnými vzorkami bez vibrácií. Z týchto experimentálnych výsledkov je možné usudzovať, že aplikovanie nízkofrekvenčných mechanických vibrácií malo pozitívny vplyv na zmenu štruktúry, pri formovaní spájkovaného spoja. Hoci bola objemová štruktúra spoja analyzovaná len okrajovo, rozbor vyhotovených snímok v danej práci naznačuje nárast hrúbky intermetalickej vrstvy. Výsledky tohto výskumu majú potenciál na praktické uplatnenie pri optimalizácii procesov spájkovania. Pre potvrdenie týchto zistení by však bolo potrebné vykonať hlbšiu analýzu, podrobenú štatistickým vyhodnotením výsledných dát.



Obrázok 2.2 Stĺpcový graf pre porovnanie pevností spájkovaného spoja v strihu [25]

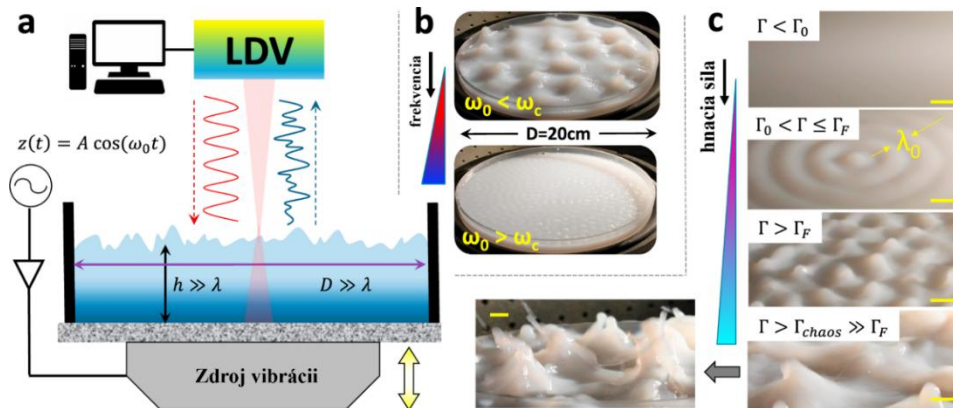
2.3 Riadenie dynamiky kvapalín

Analýza štúdií [26,27] poskytuje detailný prehľad o tom, ako môžu byť povrchové vlny využité pre riadené formovanie dynamických štruktúr na povrchu kvapalín. Cieľom tejto kapitoly je zhrnúť teoretické princípy a experimentálne výsledky uvedené v odborných textoch. Zároveň poukázať na ich potenciálny prínos vo výskume zameranom na formovanie štruktúry, počas aplikácie nízkofrekvenčných mechanických vibrácií v oblasti pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny.

Faradayove vlny vznikajú na povrchu kvapalín pri aplikovaní vertikálnych mechanických vibrácií, ak zrýchlenie presiahne kritickú hodnotu. Tieto vlny oscilujú s frekvenciou, ktorá je polovičná oproti frekvencii budiaceho signálu (tzv. subharmonické oscilácie). Tento jav sa nazýva parametrická rezonancia a vzniká prenosom energie z budiaceho signálu do stabilných oscilácií na povrchu kvapaliny. Vznik Faradayových vln sa odvíja od fyzikálnych parametrov, ako je povrchové napätie (sila udržiavajúca hladký povrch kvapaliny), viskozita kvapaliny (sila brániaca pohybu molekúl) a hustota kvapaliny, ktorá ovplyvňuje zotavovací mechanizmus po deformácií. Kľúčovým parametrom je uhlový kmitočet ω_c , ktorý stanovuje hraničnú hodnotu rozdeľujúcu dynamické režimy povrchových vln. Faradayove vlny sa môžu prejaviť ako gravitačné, kapilárne alebo gravitačno-kapilárne vlny v závislosti od veľkosti frekvencie budenia a odpovedajúcej vlnovej dĺžky. [26,27]

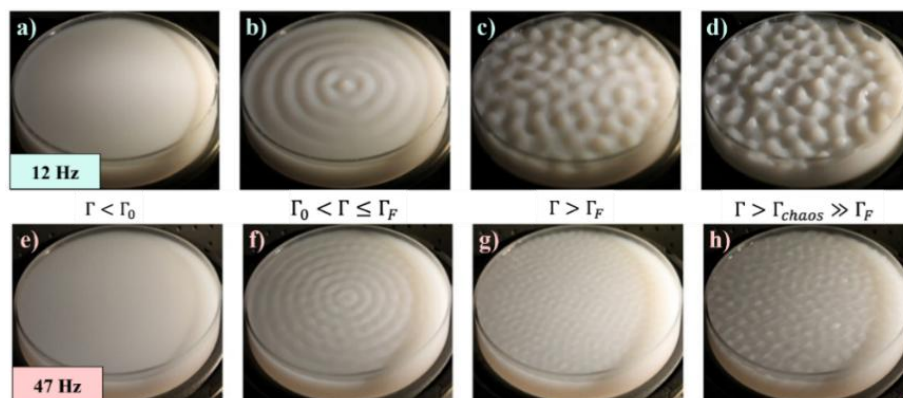
Na obrázku 2.3 je zobrazené experimentálne zariadenie, ktoré umožňuje skúmať dynamiku povrchových vln. Tento vertikálne kmitajúci systém vyvoláva v kvapaline povrchové vlny s vlnovou dĺžkou λ_0 . Tá sa nachádza v cylindrickej nádobe s veľkým priemerom $D \gg \lambda$ a hĺbkou $h \gg \lambda$, aby boli minimalizované okrajové efekty. Vibrácie s nastaviteľnou amplitúdou A a frekvenciou ω_0 budiaceho signálu vytvárajú na povrchu kvapaliny oscilácie vo forme rôznych pravidelných vzorov. Pri nižších frekvenciách dominuje vznik gravitačných vln a na povrchu sa formujú hexagonálne štruktúry.

Naopak, pri vyšších frekvenciách sa prejavuje vplyv povrchového napätia, čo podporuje vznik kapilárnych vln a tvorbu štvorcových mriežok. [26]



Obrázok 2.3 Testovacia zostava pre vyvolanie a detekciu povrchových vln [26]

Dynamika na povrchu kvapaliny je podrobnejšie zobrazená na obrázku 2.4. Snímky a) – d) zobrazujú správanie sa kvapaliny pri frekvencii budenia 12 Hz a snímky e) – h) pri 47 Hz. Jednotlivé obrázky zľava doprava znázorňujú, ako postupné zvyšovanie amplitúdy budenia vedie k prechodom od lineárnych deformácií až po chaotické režimy. Prvý snímok na obrázku 2.4 zachytáva povrch kvapaliny pri nízkej amplitúde budenia. Povrch v tomto prípade vykazuje lineárnu odozvu, pričom zostáva relatívne hladký a obsahuje len minimálne deformácie. Na ďalšej snímke je zobrazený povrch pri strednej amplitúde budenia, sústredené vlny sú ovplyvnené tvarom nádoby. Na treťom snímku je zachytený povrch kvapaliny pri amplitúde nad prahom Faradayových vln. Povrch v tomto prípade vykazuje nepravidelné, „roztrúsené“ zvlnenia. Posledný snímok zachytáva dynamiku kvapaliny pri extrémne vysokej amplitúde budenia, kde chaotické vlny vedú k vyhadzovaniu kvapiek. Detail je zobrazený v spodnej časti obrázku 2.3(c). [26]



Obrázok 2.4 Dynamické režimy povrchových vln na povrchu kvapaliny [26]

Tieto experimentálne výsledky predstavujú cenné poznatky pre ďalší výskum v oblasti nízkofrekvenčných mechanických vibrácií. Nakoľko predstavujú nástroj,

ktorý umožňuje ovplyvniť dynamiku taveniny a štruktúru výsledných fáz. Medzi hlavné výzvy patrí presná kontrola frekvencie, amplitúdy a výchylky mechanických vibrácií.

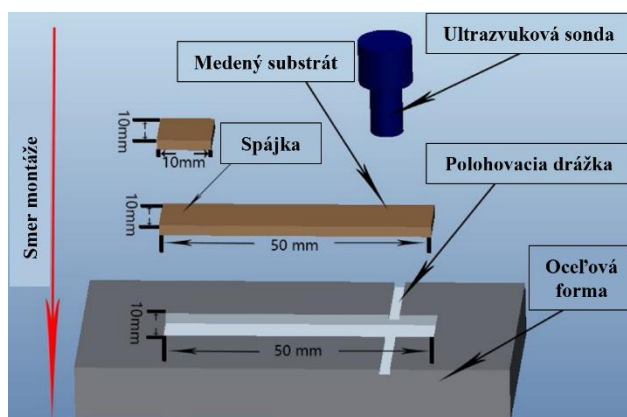
2.4 Aktuálne trendy a výsledky v oblasti pôsobenia vibrácií

Výskum vplyvu vibrácií na formovanie spájkovaného spoja je predovšetkým motivovaný snahou lepšie porozumieť mechanizmom, ktorým kontrolované vibrácie prispievajú k zlepšeniu kvality spojov a zvýšeniu spoľahlivosti elektronických zariadení. Aktuálne dostupné štúdie uvedené v podkapitole 2.2 potvrdzujú, že prenos vibrácií do štruktúry spoja významne ovplyvňuje procesy tuhnutia, nukleácie, difúzie a formovania intermetalických zlúčenín. Táto podkapitola sa zameriava nielen na prezentovanie dosiahnutých výsledkov, ale aj na metodiku návrhu experimentov.

2.4.1 Vplyv ultrazvuku na mechanické vlastnosti a vývoj mikroštruktúry spájkovaných spojov SAC305

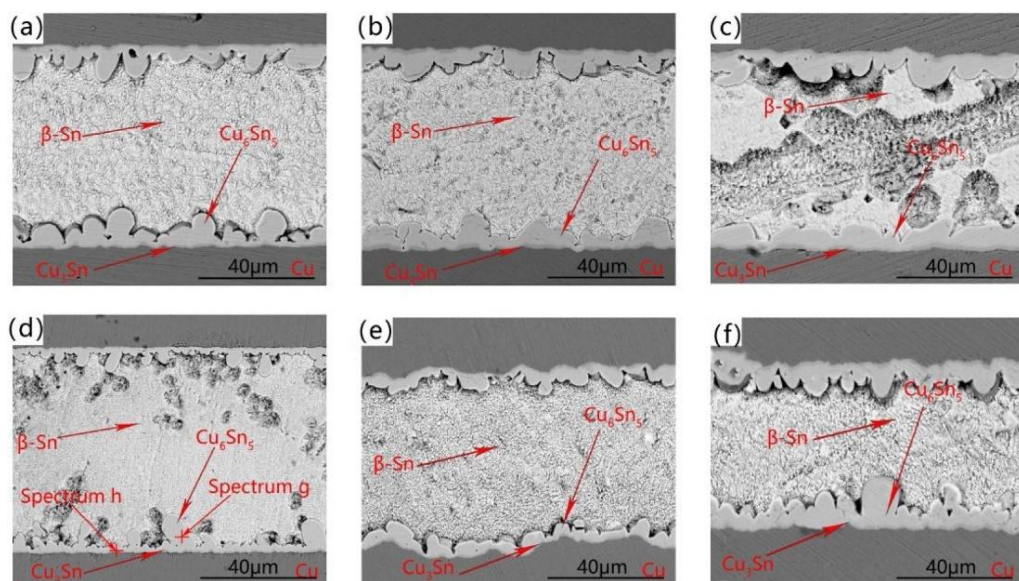
Predmetom štúdie [24] bolo preskúmať rozdielne doby pôsobenia ultrazvuku počas procesu spájkovania pretavením. Analyzovaný bol vývoj mikroštruktúry a mechanické vlastnosti spoja pre spájk SAC305 na medenom substráte. Cieľom bolo zistiť, ako ultrazvuk ovplyvňuje morfológiu IMC, veľkosť zŕn a šmykovú pevnosť spojov, v porovnaní s referenčnými vzorkami. K detailnej analýze mikroštruktúry vzoriek, bola použitá skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM).

Na obrázku 2.5 je znázornená experimentálna zostava použitá pre tvorbu vzoriek. Medený substrát s rovnomerne nanosenou spájkovacou pastou SAC305, bol umiestnený do oceľovej formy. Následne bola zostava položená na výhrevné teleso. Pretavenie prebiehalo pri teplote 290 °C po dobu 10 minút. Na konci procesu pretavenia bol aplikovaný ultrazvuk pre rôzne časy (0, 1, 5, 10, 15 a 30 sekúnd). Po ukončení definovanej doby, bola vzorka odstránená z výhrevného telesa a prirodzene vychladla. Pre realizáciu experimentu bola použitá ultrazvuková sonda s výkonom 350 W a frekvenciou 20 kHz. [24]



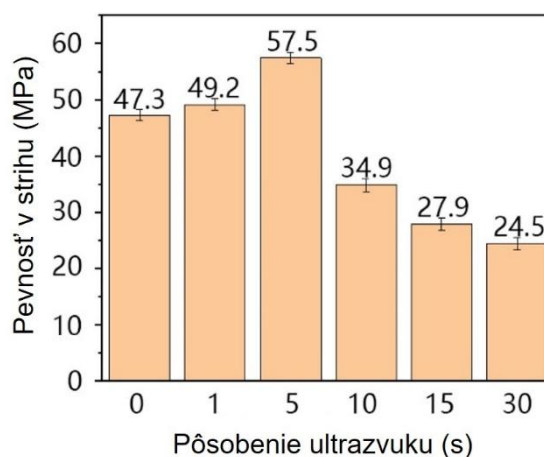
Obrázok 2.5 Experimentálne usporiadanie spájkovania pri pôsobení ultrazvuku [24]

Výsledky analýzy mikroštruktúry vzoriek prostredníctvom SEM sú znázornené na obrázku 2.6. Pozorované boli zmeny v morfológii intermetalických vrstiev Cu_6Sn_5 pri rôznych časoch pôsobenia ultrazvuku. Pre časy do 10 sekúnd boli vzorky porovnateľné s referenčnými výsledkami. Intermetalická vrstva si zachovala hrubý a nesúvislý tvar. V časovom rozmedzí 10 až 15 sekúnd pôsobenia ultrazvuku bola pozorovaná tenšia a súvislejšia vrstva Cu_6Sn_5 . Tento výsledok možno pripísať efektu akustického prúdenia, ktorý výrazne urýchľuje difúziu atómov medi a tým prispieva k vyššej homogenite vrstvy. Naopak, pri nadmernom vystavení spájkovaného spoja akustickému prúdeniu, dochádzalo k akumulácii voľných atómov medi, ktoré reagovali s atómami cínu v spájke. To viedlo k zhrubnutiu intermetalickej vrstvy a výsledkom bola zvýšená krehkosť a zhoršenie mechanických vlastností spoja. [24]



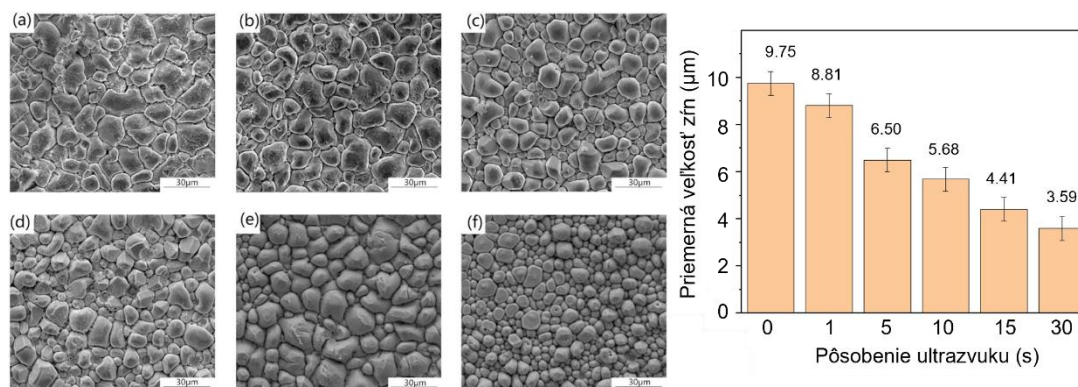
Obrázok 2.6 Analýza mikroštruktúry a IMC na rozhraní spájky a medeného substrátu pre rôzne časy pôsobenia ultrazvuku (a) 0 s, (b) 1 s, (c) 5 s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 30 s [24]

V štúdiu bola taktiež skúmaná maximálna šmyková pevnosť v závislosti na dobe pôsobenia ultrazvuku. Odrhnuté spoje boli následne analyzované pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie. Z výsledkov analýzy zobrazenej na obrázku 2.7 je možné pozorovať zvýšenie pevnosti pri krátkodobom pôsobení ultrazvuku. Tieto spoje vykazovali odtrh v mieste medzi spájkou a vrstvou IMC, čo naznačuje zlepšenie adhézie medzi IMC vrstvou a substrátom. Naopak, pri dlhšom intervale pôsobenia ultrazvuku šmyková pevnosť spájkovaného spoja výrazne klesla. Doba pôsobenia 30 sekúnd spôsobila pokles pevnosti takmer na polovicu v porovnaní s referenčnou vzorkou. Spoje so zhoršenými mechanickými vlastnosťami vykazovali odtrh na dvoch miestach: medzi spájkou a substrátom a medzi spájkou a intermetalickou vrstvou. Pokles v pevnosti je možné pripísať nadmernému rastu IMC vrstvy a oslabeniu väzieb na rozhraní spájky a substrátu. [24]



Obrázok 2.7 Šmyková pevnosť v závislosti na dobe pôsobenia ultrazvuku [24]

Vyhotovené vzorky boli podrobené analýze veľkosti zŕn v mikroštruktúre spájkovaného spoja. Na obrázku 2.8 je možné pozorovať relatívne veľké, nepravidelné mnohouholníkové zrná, formované bez prítomnosti ultrazvuku. So zvyšujúcim sa časom pôsobenia ultrazvuku sa v štruktúre spojov začali formovať menšie a zaoblenejšie zrná. Pôsobenie ultrazvuku, kombinujúc kavitačný efekt a akustické prúdenie aktívne ovplyvňovalo nukleáciu a rast zŕn, čím významne prispelo k zjemneniu a homogenizácii štruktúr v spájke. [24]



Obrázok 2.8 Analýza mikroštruktúry a porovnanie veľkosti zŕn pre rôzne časy pôsobenia ultrazvuku (a) 0 s, (b) 1 s, (c) 5 s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 30 s [24]

Prezentované výsledky štúdie potvrdzujú prínos využitia ultrazvuku pri riadení mikroštruktúry spájkovaného spoja, s cieľom zlepšiť jeho mechanické a elektrické vlastnosti. Správne nastavenie procesných parametrov, zdôraznené už v úvode podkapitoly 2.2, sa ukázalo ako kľúčové pre dosiahnutie zlepšených výsledkov. Jedným z ďalších smerov výskumu v oblasti pôsobenia vibrácií na spájkovaný spoj by mohlo byť štatistické vyhodnotenie vlastností spojov a optimalizácia nastavených parametrov.

3. METALOGRAFIA

Metalografia je vedecká disciplína zameraná na odhalenie a analýzu štruktúry kovových materiálov a ich zliatin. Základnou štruktúrnou jednotkou je fáza, pričom mikroštruktúra je charakterizovaná veľkosťou, tvarom, usporiadaním a množstvom týchto fáz. Cieľom metalografie je zviditeľniť štruktúru materiálu pre následnú analýzu pod mikroskopom. Táto metóda je nenahraditeľná pri optimalizácii výrobných procesov, diagnostike defektov a stanovení spoľahlivosti materiálu. Moderný výskum rozširuje uplatnenie metalografie aj mimo kovových materiálov, zahŕňajúc keramiky, polyméry a minerály. [28]

3.1 Príprava metalografických vzoriek

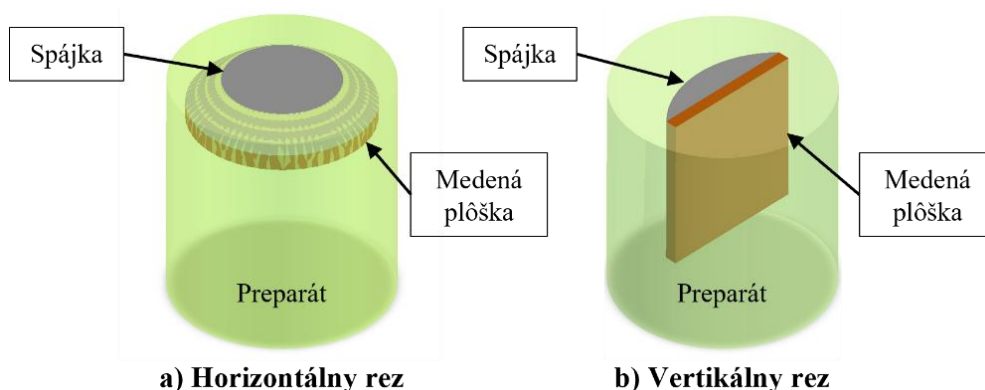
Analýza mikroštruktúry materiálu si vyžaduje precíznu prípravu vzoriek. Tvorba metalografickej vzorky zahŕňa presný postup, ktorý je prehľadne znázornený na obrázku 3.1. Každý procesný krok má významný vplyv na výslednú kvalitu výbrusu s dopadom na interpretáciu výsledkov pozorovanej štruktúry materiálu.



Obrázok 3.1 Postup prípravy metalografického výbrusu [28]

Prvým krokom je odber vzorky, ktorý musí byť vykonaný v mieste, ktoré reprezentuje celkovú štruktúru a vlastnosti skúmaného materiálu. Samotný odber môže byť realizovaný rôznymi metódami, ako rezanie, odlamovanie alebo strihanie. Výber metódy závisí od vlastností skúmaného materiálu. Nasleduje preparácia vzorky, ktorá zahŕňa upevnenie materiálu na pracovný podklad. Tento krok je dôležitý nielen na ochranu vzorky pred poškodením, ale aj na zväčšenie plochy pre lepšiu manipuláciu v ďalšom postupe. V praxi sa často využíva zalievanie vzorky do epoxidovej alebo akrylátovej živice za studena alebo pri zvýšenej teplote. Ďalším krokom je brúsenie a leštenie, ktoré sú zásadné pre odstránenie povrchových nerovností a prípravu materiálu na leptanie. Brúsenie sa realizuje v niekoľkých krokoch, pričom sa postupne používajú brúsne papiere s klesajúcou veľkosťou zŕn (napr. SiC papier). Leštenie, ktoré nasleduje po brúsení, zabezpečuje jemný a lesklý povrch pomocou diamantovej pasty alebo oxidov (napr. oxid

hlinitý). Po dokončení mechanickej prípravy vzoriek, nasleduje proces leptania, ktorého úlohou je zviditeľniť štruktúru materiálu. Leptanie sa realizuje pomocou chemických roztokov, ktoré selektívne reagujú s rôznymi zložkami mikroštruktúry. Tento krok však nie je vždy nevyhnutný. Moderná mikroskopická technika umožňuje vysoké rozlíšenie bez potreby leptania a taktiež pozorovanie pomocou krížovo polarizovaného svetla. Poslednou fázou celého procesu je analyzovanie štruktúry vzorky. Ukážka modelu metalografického výbrusu, vhodného pre analýzu mikroštruktúry spájkovaného spoja v dvoch rezoch, je znázornená na obrázku 3.2. [29]



Obrázok 3.2 Modely metalografického mikrovýbrusu spájkovaného spoja

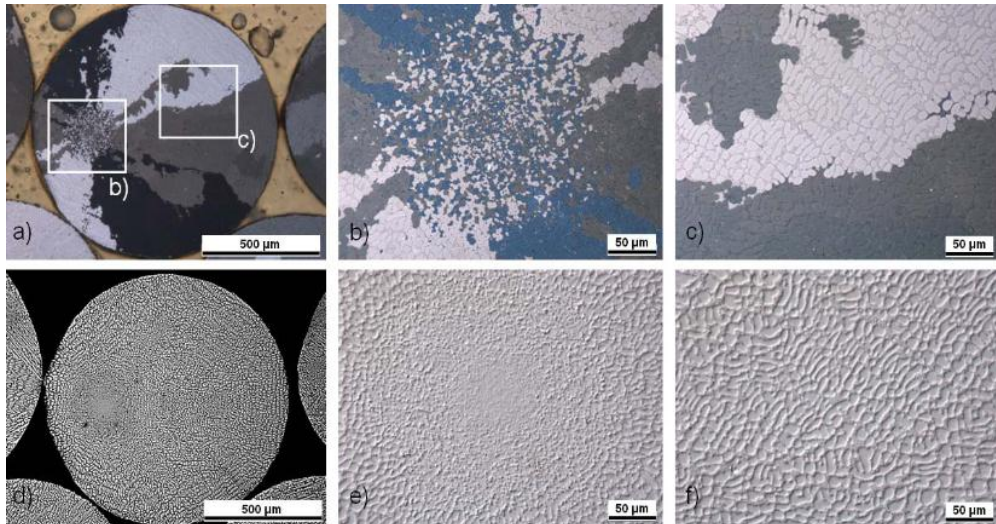
3.2 Metódy vyhodnotenia metalografických vzoriek

K analýze metalografických vzoriek sa najčastejšie využíva optická svetelná mikroskopia, ktorá umožňuje pozorovanie štruktúr v rozsahu desiatok až stoviek mikrometrov. Táto metóda poskytuje základné informácie o štruktúre materiálu, ako je tvar, veľkosť a rozloženie zŕn alebo intermetalických zlúčenín v spájkovanom spoji. Pri dosiahnutí fyzikálnych limitov optickej mikroskopie, sa používa elektrónová mikroskopia (SEM alebo TEM), ktorá poskytuje vyššie rozlíšenie a možnosť prvkovej analýzy. Táto metóda eliminuje potrebu leptania a umožňuje detailné pozorovanie materiálov na úrovni nanometrov. [29]

Alternatívou k elektrónovým mikroskopom, ktoré sú finančne nákladné a vyžadujú odbornú obsluhu, je krížovo polarizované svetlo. Ide o pokročilú techniku optickej mikroskopie, ktorá umožňuje pozorovanie mikroštruktúrnych vlastností materiálov. Na obrázku 3.3 je viditeľný rozdiel pri zobrazení mikroštruktúry spájkovacej guličky, pričom snímky a) – c) demonštrujú krížovú polarizáciu a snímky d) – f) štandardné osvetlenie. Výsledkom sú jasne viditeľné hranice zŕn a orientácie kryštálov, zvýraznené farebnými odtieňmi, ktoré vznikajú v dôsledku dvojlomu svetla. [30]

Krížovo polarizované svetlo funguje na princípe lineárnej polarizácie, pri ktorej svetelný lúč osciluje len v jednej rovine. Pri prechode anizotropným materiálom dochádza k dvojlomu, teda rozkladu lúča na dve zložky, čo spôsobuje zmenu smeru alebo fázy

svetla. Analyzátor prepúšťa iba tú časť svetla, ktorá zodpovedá novej polarizácii, čím sa zvýrazní kontrast medzi oblasťami s rôznou orientáciou kryštálov alebo fáz v materiáli. Táto metóda je obmedzená rozlišovacou schopnosťou optického mikroskopu, avšak poskytuje dostatočné informácie o orientácii zŕn, ich veľkosti a fázových rozhraniach v štruktúre materiálu. [31]



Obrázok 3.3 Mikroštruktúra spájkovacej guľičky zobrazená pomocou krížovej polarizácie a bežného osvetlenia [30]

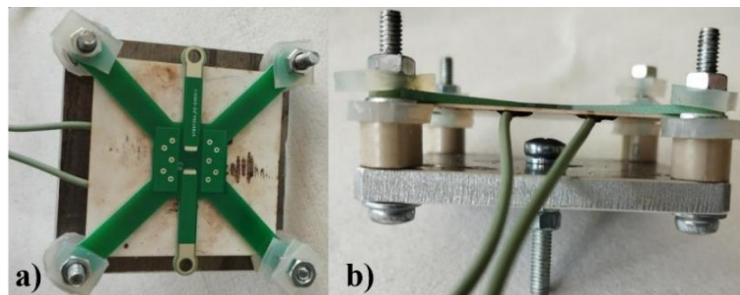
4. NÁVRH A PRÍPRAVA EXPERIMENTU

Táto kapitola je zameraná na návrh a prípravu experimentálneho pracoviska pre vytváranie spájkovaných spojov ovplyvnených pôsobením mechanických vibrácií. Experiment zahŕňal návrh a realizáciu konštrukčnej časti aparatury, optimalizáciu motívu testovacej DPS, výber vhodných prístrojov a stanovenie ich parametrov. Výsledkom bola funkčná aparatura, ktorá umožňuje skúmať vplyv procesných nastavení úpravou frekvencie, amplitúdy a výchylky mechanických vibrácií, na formovanie štruktúry spájkovaného spoja.

4.1 Príprava experimentálnej aparatury

Hlavným predpokladom pri realizovaní vedeckého výskumu je zabezpečenie prevediteľnosti a opakovateľnosti experimentu. V tomto prípade šlo o dosiahnutie rovnakých podmienok pre formovanie štruktúry spájkovaných spojov ovplyvnených mechanickými vibráciami. Kľúčovou výzvou bolo dosiahnuť efektívny prevod tepla do substrátu a zároveň prenos mechanických vibrácií do roztavenej spájkovacej zliatiny.

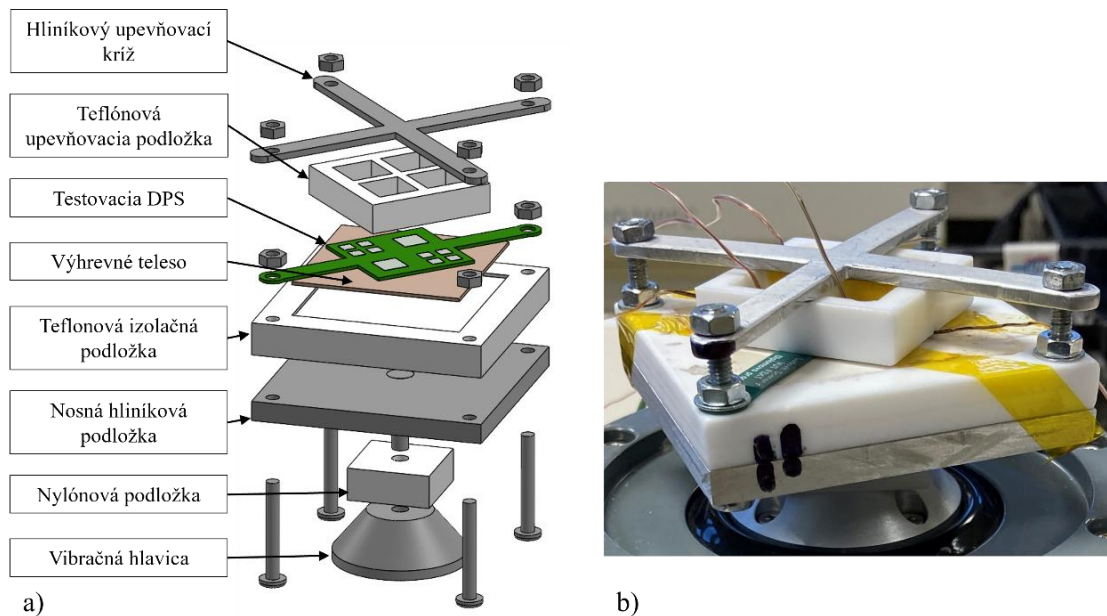
V rámci rešerše a spracovania vedeckých publikácií boli preskúmané rôzne realizácie experimentálnych aparátúr. Ako bolo uvedené v teoretickom rozbere v podkapitole 2.2, väčšina štúdií sa zameriava na formovanie spájkovaného spoja pri pôsobení ultrazvuku. Typický príklad testovacieho usporiadania s využitím tejto metódy bol rozobratý na obrázku 2.5. Táto aparatura prispôbená ultrazvukovej sonde bola vo väčšine publikovaných experimentoch [19,22] prikladaná externe na výhrevné teleso alebo testovaný substrát v aparatúre. Pre výskum zameraný na pôsobenie mechanických vibrácií, nie je takáto forma prenosu energie vhodná. Z tohto dôvodu bola na základe analýzy dostupných zdrojov zvolená, ako možná alternatíva pre rozkmitanie roztavenej spájky vibračná testovacia hlavica (viď. obrázok 4.3). Tieto zariadenia sa štandardne používajú na skúšky odolnosti a životnosti rôznych komponentov, ale ich konštrukcia umožňuje prispôbiť vibračnú hlavicu podľa potreby. Zdrojom inšpirácie bola záverečná práca [25], v ktorej bolo navrhnuté konštrukčné riešenie, umožňujúce prenos vibrácií počas pretavenia spájky (viď. obrázok 4.1). Prínosy tejto práce boli prezentované v podkapitole 2.2.3.



Obrázok 4.1 Testovacia aparatura: a) Pohľad zhora, b) Pohľad z boku [25]

Prednosťou predvedenej konštrukcie je uchytenie výhrevného telesa v štyroch bodoch, ktoré sú tepelne izolované od kovovej podložky. Nedochádzalo tak k priamemu odvodu tepla vedením do vibračného zariadenia. Naopak slabšou stránkou tohto usporiadania je uchytenie testovacieho prípravku pomocou silikónových podložiek, ktoré sú pružné a ovplyvňovali prenos vibrácií a tepla z výhrevného telesa do substrátu. Konštrukcia testovacej aparatury splnila požadované ciele v uvedenej práci, avšak jej koncepcia si vyžadovala ďalšie rozšírenie a zdokonalenie.

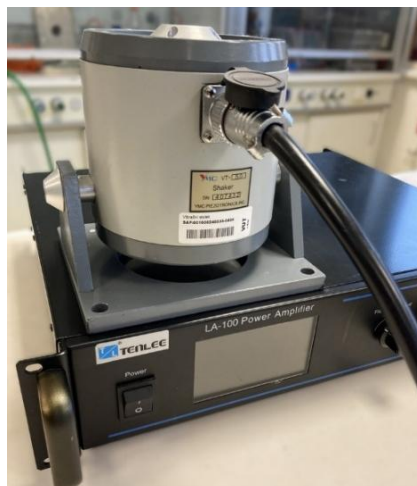
Postup výroby a príprava novej testovacej aparatury s implementovanými riešeniami predchádzajúcich nedostatkov, návrh testovacej DPS a výber použitých prístrojov sú popísané v nasledujúcich podkapitolách. Pri návrhu riešenia bol kladený dôraz najmä na spôsob uchytenia aparatury do vibračného zariadenia, zabezpečenie dostatočnej styčnej plochy pre prenos vibrácií a tepla do substrátu a na dostatočnú tepelnú izoláciu výhrevného telesa od vibračnej hlavice. Výsledná zostava s upevneným testovacím substrátom použitá pre realizovanie experimentu je zobrazená na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2 Testovacia zostava vhodná pre vibračné zariadenie:
a) Rozložený 3D model, b) Vyrobená zostava

4.1.1 Výber prístrojov pre prenos mechanických vibrácií

Ako zdroj vibrácií pre vyvolanie povrchových vln v roztavenej spájke počas procesu pretavenia bolo využité kompaktné magnetické vibračné zariadenie YMC VT-50 s permanentnými magnetmi. Tento prístroj bol riadený zosilneným sínusovým signálom, ktorý bol generovaný signálovým generátorom Agilent 33220A a následne zosilnený výkonovým zosilňovačom YMC LA-100. Použitie externého signálového generátora umožnilo presné nastavenie frekvencie a amplitúdy sínusového signálu, čím bolo možné riadiť výchylku mechanických vibrácií. Na obrázku 4.3 je zobrazené vibračné zariadenie VT-50 a výkonový zosilňovač LA-100.



Obrázok 4.3 Vibračné zariadenie VT-50 a výkonový zosilňovač LA-100

V tabuľke 4.1 sú uvedené parametre prístrojov, ktoré stanovil výrobca v príslušných katalógových listoch. Jedným z nosných parametrov pri tvorbe konštrukcie bolo dodržanie odporúčaného váhového limitu, ktorý nemal presiahnuť 250 g.

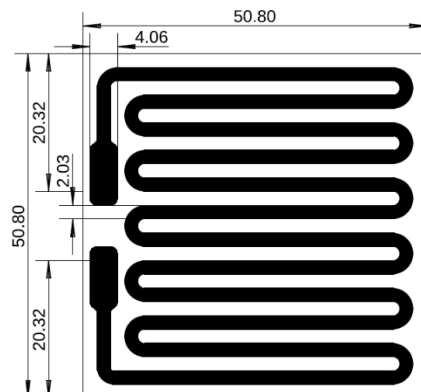
Tabuľka 4.1 Parametre prístrojov YMC stanovené výrobcom [32,33]

Magnetické vibračné zariadenie	YMC VT-50
Menovitá sila [N]	≥ 50
Max. zdvih [mm]	± 4
Max. zrýchlenie [g]	20
Max. vstupný prúd [Arms]	≤ 6
Frekvenčný rozsah [Hz]	10 – 10k
Efektívna pohyblivá hmotnosť [kg]	0,25
Typ montážneho otvoru	M5
Pridružený výkonový zosilňovač [W]	100
Výkonový zosilňovač	YMC LA-100
Menovitý výstupný výkon [VA]	100
Efektívna hodnota napätia [Vrms]	17
Efektívna hodnota prúdu [Arms]	6
Zosilnenie V/V \pm 2dB	10
Frekvenčný rozsah [Hz]	20 – 50k
Napájanie [V]	220

4.1.2 Výroba výhrevného telesa

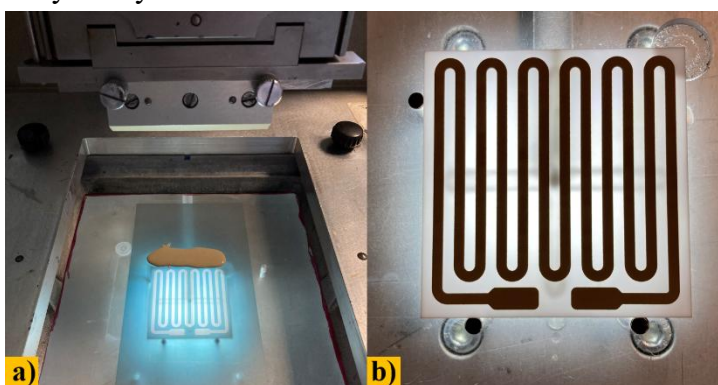
Nevyhnutnou súčasťou testovacej aparatury je výhrevné teleso určené k pretaveniu spájkovacej pasty, počas pôsobenia mechanických vibrácií. K tomuto účelu bol použitý keramický substrát s vypálenou vodivou TLV v tvare meandru. Zvolený motív meandru (viď. obrázok 4.4), bol optimalizovaný a otestovaný v záverečnej práci [25]. Jedným

z výstupov danej práce bolo vyrobené sito s motívom meandru, ktoré bolo možné opätovne použiť pre výrobu výhrevných telies metódou sieťotlače.



Obrázok 4.4 Návrh motívu meandru pre výhrevné teleso [25]

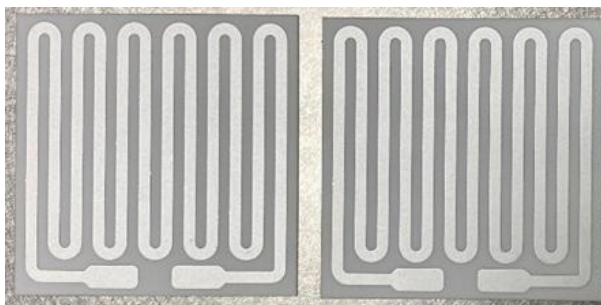
Zvolené sito bolo umiestnené do sieťotlačového rámu poloautomatického zariadenia AUREL C880. Po upevnení sita nasledovalo vloženie substrátu z korundovej keramiky Al_2O_3 na polohovací stolček. Použité boli substráty od spoločnosti ELCERAM s rozmermi 50,8x50,8 mm. Po vycentrovaní vzorky pomocou troch navádzacích kolíkov, nasledovalo zasunutie stolčeka, čím došlo k spusteniu vákuového prichytenia a vhodnými mikroposuvmi došlo k zo-súhlaseniu substrátu s motívom na site. V ďalšom kroku boli empiricky nastavené parametre prítlaku stierky a odsokku sita. Po nastavení všetkých parametrov tlače, bola po temperovaní na izbovú teplotu rozmiešaná (homogenizovaná) vodivá vypaľovacia TLV pasta Paron – W38 [34]. Aktívnu (vodivú) zložku tejto pasty tvorí striebro z 80 % celkového objemu. Pasta bola rovnomerne nanosená po celej šírke motívu na začiatku sita v smere posunu stierky. Nasledovalo spustenie procesu tlače a teda posunu stierky po site. Na obrázku 4.5 je znázornené nanosenie vodivej pasty na sito s motívom a výsledný substrát s natlačenou TLV v tvare meandru.



Obrázok 4.5 Proces tlače TLV pasty: a) Upevnené sito s nanosenou pastou, b) Natlačený vodivý motív meandru

Postup tlače bol opätovne opakovaný a celkovo bolo natlačených šesť substrátov. Pinzetou boli jednotlivé vzorky ukladané na kovovú nosnú lodičku, kde prebiehalo odstátie vzoriek a vyrovnanie pasty (z angl. „*leveling*“). Pred výpalom vrstiev bolo

potrebné umiestniť natlačené substráty do sušičky. Sušenie prebiehalo v programovateľnej vysušacej peci Memmert UF 75 plus pri odporúčanej teplote 125 °C po dobu 15 minút. Výpal TLV motívu prebiehal vo vypaľovacej peci so štyrmi zónami. Teploty v jednotlivých zónach boli nastavené na 600 °C, 720 °C, 840 °C a 860 °C. Rýchlosť dopravníkového pásu bola nastavená na 3 cm/min. a celý proces trval približne jednu hodinu. Na obrázku 4.6 sú zobrazené vypálené substráty, ktoré boli použité ako výhrevné telesá v experimentálnej zostave. Posledným krokom bolo pripojenie teplotne odolných vodičov pomocou spájky Pb₉₅Sn₅ s teplotou tavenia prevyšujúcou 300 °C.



Obrázok 4.6 Výhrevné telesá po výpale TVL motívu

4.1.3 Konštrukčná časť testovacej zostavy

Prvým krokom pri výrobe konštrukčnej časti zostavy bolo vymyslieť uchytenie testovacej aparatury na vibračné zariadenie YMC VT-50. Ako uvádza výrobca v tabuľke 4.1, vibračná hlavica má zabudovaný montážny otvor so závitom pre skrutku o veľkosti M5. Ako nosič pre rovnomerný a stabilný prenos vibrácií do celej aparatury bol zvolený hliníkový profil o hrúbke 6 mm. Pomocou pokosovej píly Metabo KGS 305 M bol tento profil upravený na rozmery 70x70 mm. Ďalej nasledovalo vyvrtanie 4 postranných dier v rohu o priemere 4 mm. Posledným krokom bolo vyvrtanie stredového otvoru pre zapustenie skrutky M5 do profilu, ktorá slúži k pripevneniu celej konštrukcie do vibračnej hlavice. Skrutka bola zaistená pomocou lepidla na závitoch LOCTITE 243 s teplotnou odolnosťou do 180 °C. Okótované rozmery nosnej hliníkovej konštrukcie sú uvedené v prílohe A.1.

Pre upevnenie výhrevného telesa do aparatury bola použitá teflónová doska s pracovným teplotným rozsahom do 260 °C. Teflón slúžil ako tepelná izolačná podložka, ktorá výrazne znižovala odvod tepla počas spájkovacieho procesu. Pomocou frézy OPTIMUM Optimill BF20V bola teflónová doska (hrúbka 8 mm) upravená na rozmery nosnej hliníkovej podložky (70x70 mm). Použitie frézy bolo potrebné pre dosiahnutie vzájomnej kolmosti a optimálnej presnosti s nosnou podložkou. Ďalej nasledovalo vyfrézovanie štvorcového otvoru do stredu materiálu o hĺbke 1 mm a rozmeroch 51x51 mm. Táto drážka slúžila k umiestneniu výhrevného telesa z keramického substrátu Al₂O₃ (viď. obrázok 4.2). Ďalším krokom bolo opätovné vyvrtanie 4 postranných dier v rohu o priemere 4 mm pre uchytenie do zostavy.

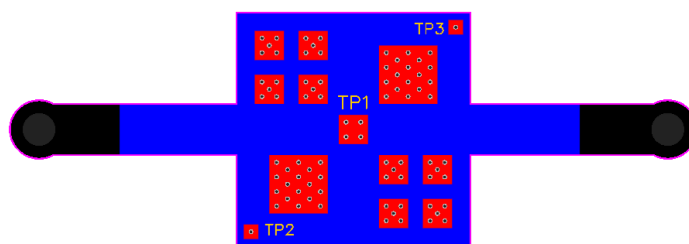
Nasledovala séria teplotných cyklov, kde bol testovaný prestup tepla z výhrevného telesa do hliníkovej podložky a vibračnej hlavice. Na základe tejto analýzy boli frézku vyhotovené drážky do spodnej časti teflónovej podložky, ktoré výrazne prispeli k zníženiu prestupu tepla do hliníku a optimalizácií spájkovacieho teplotného profilu (viď. Príloha B). Pre úplné tepelné odizolovanie vibračnej hlavice bola použitá nylonová podložka (30x30x10 mm) s vyvítanou dierou o priemere 5 mm (viď. obrázok 4.2). Okótované rozmery finálnej izolačnej podložky sú uvedené v prílohe A.2.

Ďalšie konštrukčné časti aparatury slúžiace k upevneniu testovacej DPS sú uvedené v prílohách A.3 a A.4. Celková hmotnosť výslednej funkčnej zostavy je 235 g, čím bola splnená odporúčaná hodnota uvedená výrobcom.

4.1.4 Návrh testovacej DPS

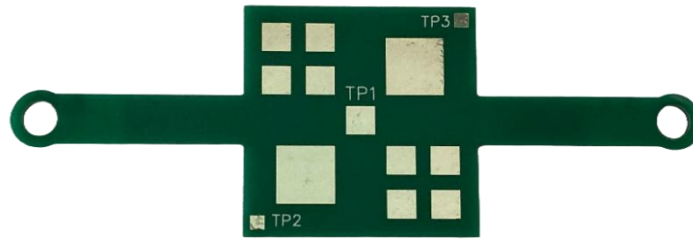
Pre analýzu a porovnanie štruktúry spájkovaného spoja bolo nevyhnutné navrhnuť testovaciu DPS. Pri návrhu bol kladený dôraz na veľkosť spájkovacích plôšok a ich maximálny počet na jednom substráte (viď. obrázok 4.7). Menšie vzorky spájkovaných spojov boli použité pre pozorovanie orientácie zŕn a vyhodnotenie morfológických štruktúr v horizontálnom reze. Na vzorkách s väčšou plochou bol vo vertikálnom reze pozorovaný vplyv prenosu povrchového vlnenia do objemu štruktúry spájkovaného spoja. Modelový príklad s naznačenými rezmi štruktúrou spájkovaného spoja bol uvedený a popísaný v teoretickej časti práce na obrázku 3.2.

Kritickou požiadavkou pri návrhu testovacej DPS bolo zaistenie dostatočnej tepelnej vodivosti pre pretavenie spájkovacej pasty. Riešením bolo pokrytie spodnej časti substrátu vrstvou medi (viď. modrá plocha na obrázku 4.7). Pre zvýšenie prenosu tepla z výhrevného telesa do spájkovacích plôšok, boli použité kovové prechody skrz dosku (z angl. „*through holes, vias*“). Poslednou požiadavkou bolo dokreslenie nosných ramien pre vycentrovanie a uchytanie do testovacej aparatury. Okótované rozmery navrhutej testovacej DPS sú uvedené v prílohe A.5.



Obrázok 4.7 Návrh testovacej DPS

Pre návrh testovacej DPS bol použitý softvér EasyEDA, ktorý umožňuje automatické presmerovanie a nahratie výrobných dát (Gerber dáta) na stránky výrobcu JLCPCB, z ktorej boli dosky zakúpené. Substráty boli vyrobené na lamináte FR-4 o hrúbke 0,8 mm. Povrchová úprava medených plôšok bola realizovaná technikou HASL. Vyrobená doska plošného spoja je zobrazená na obrázku 4.8.



Obrázok 4.8 Vyrobená testovacia DPS

4.2 Testovanie prípravku

Navrhnutú a vyrobenú testovaciu aparatúru bolo následne potrebné otestovať s cieľom overiť jej použiteľnosť pre realizáciu výskumu. Pre tento účel bolo potrebné navrhnuť riešenie napájania a regulovania výhrevného telesa veľkou hodnotou elektrického prúdu. Riešením bola zostava, ktorú tvorí riadiaca doska [35] výkonného obvodu umiestnená v boxe, pre pripojenie a spínanie výhrevných telies výkonovými MOSFET tranzistormi (viď. obrázok 4.9). Do vstupnej vetvy tohto zariadenia (viď. Príloha C) bol na optočlen pripojený programovateľný regulátor Smart rada R500 [36]. Tento regulátor by nezvládol spínať elektrický prúd presahujúci úroveň 2 A. Z tohto dôvodu slúžil, ako riadiaci prvok v zapojení spolu s výkonným obvodom, ktorý umožňoval spínanie elektrických prúdov väčších než 10 A. Potrebný výkon bol do výhrevného telesa dodávaný z nastaviteľného laboratórneho zdroja TTi QPX1200SP.

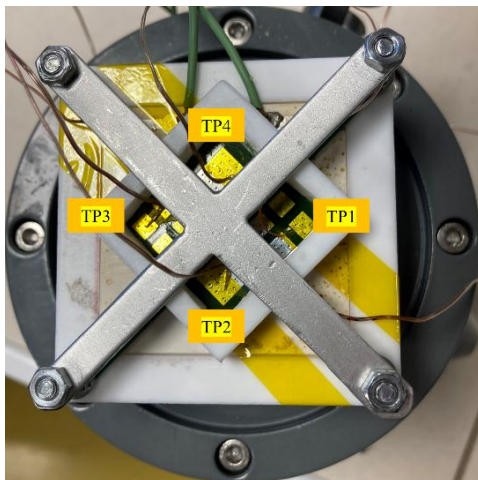


Obrázok 4.9 Zariadenie s riadiacim obvodom pre spínanie výhrevných telies

4.2.1 Nastavenie teplotného profilu

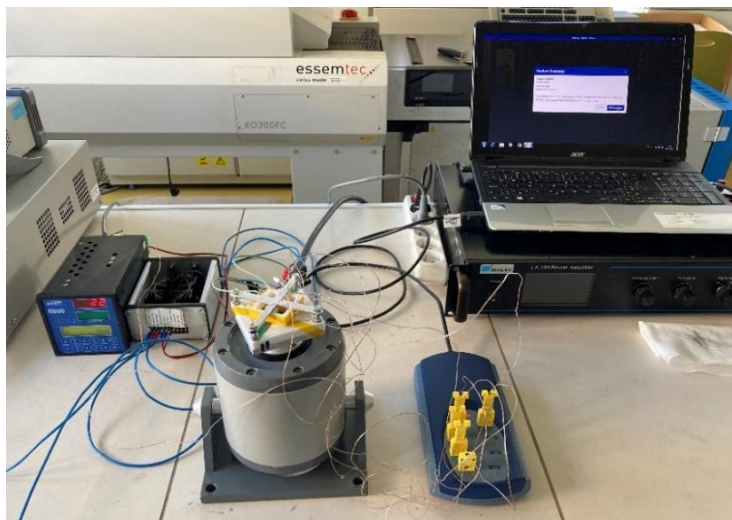
Po implementovaní riešenia pre napájanie a regulovanie výhrevného telesa bolo potrebné nastaviť vhodný teplotný profil na pretavenie spájkovacej pasty. Použitých bolo päť termočlánkov typu K, pričom štyri boli pripevnené na spájkovacie plošky. Piaty bol umiestnený na plošku v strede DPS spolu s ďalším termočlánkom pripojeným k regulátoru R500. Upevnenie pomocou kaptonovej pásky je zobrazené na obrázku 4.10.

Snímané teploty boli zaznamenávané v softvéri PicoLog 6.2.11 prostredníctvom osem kanálového modulu OMEGA TC-08 pripojeného cez USB port k notebooku.



Obrázok 4.10 Umiestnenie termočlánkov na DPS v testovacej aparátúre

Na prevedenie experimentov k overeniu zostaveného testovacieho pracoviska, bola použitá spájkovacia zliatina SAC305 od výrobcu NeVo PF606 – P30 – T4 [37]. Vzhľadom na parametre uvedené v katalógovom liste výrobcom spájkovacej pasty, bol nastavený a zaznamenaný teplotný profil pre pretavenie zliatiny (viď. Príloha D). Pripravené pracovisko pre nastavenie a meranie teplotných profilov je zobrazené na obrázku 4.11.

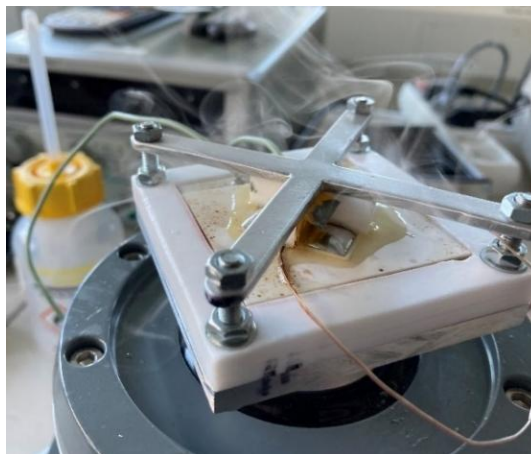


Obrázok 4.11 Pracovisko pre meranie spájkovacích teplotných profilov

4.2.2 Pozorovanie dynamiky spájky vplyvom mechanických vibrácií

Po dokončení funkčnej zostavy a nastavení teplotného spájkovacieho profilu bolo možné zahájiť sériu experimentov. Pre otestovanie aparátúry bol ako prvý použitý keramický substrát Al_2O_3 s TLV spájkovacou plôškou. V danom okamihu ešte neboli dostupné

testovacie DPS a keramický substrát predstavoval vhodnú alternatívu. Na plôšku substrátu s rozmermi 1x1 cm bolo nanesených 0,6 g spájkovacej pasty SAC305. Toto definované množstvo pasty bolo nanesené prostredníctvom tlakového dávkovača (dispenzor), kde počet stlačení pedálového spínača pri konštantnom tlaku reguloval objem použitej pasty. Nasledovalo umiestnenie substrátu na výhrevné teleso a jeho upevnenie v aparátúre. Použitá bola zjednodušená verzia teflónovej upevňovacej podložky vo forme kríža, nakoľko je keramický substrát pevný a neprehýba sa v žiadnom bode. Z tohto dôvodu nebolo potrebné pritlačenie po celej ploche, na rozdiel od testovacej DPS. Počas pretavenia spájkovacej pasty na plôškach substrátu bol zapnutý generátor sínusového signálu, nasledovalo zosilnenie výkonovým zosilňovačom a vybudenie vibračného zariadenia. Po pretavení došlo k postupnému ochladzovaniu spoja a prenos vibrácií bol vypnutý pri dosiahnutí teploty 150 °C. Vypnutie bolo načasované tak, aby došlo k uchovaniu procesov prebiehajúcich pri pôsobení mechanických vibrácií. Na obrázku 4.12 je znázornený proces pretavenia spájkovacej pasty na keramickom substráte pri zapnutom vibračnom zariadení.



Obrázok 4.12 Prevedenie experimentu na keramickom substráte

Počas pretavenia spájkovacej pasty bola na signálovom generátore plynulo menená amplitúda a frekvencia sínusového signálu. Súčasne bol pozorovaný vplyv intenzity mechanických vibrácií na povrch roztavenej spájky. Na obrázku 4.13 je detailne zobrazené povrchové vlnenie prenesené do roztavenej spájky. Vibračné zariadenie bolo pri vyhotovení snímku budené sínusovým signálom o frekvencii 250 Hz, amplitúde V_{p-p} 2,6 V a odpovedajúcemu efektívnemu výkonu 32 W.



Obrázok 4.13 Prenos vibrácií do spájkovaného spoja počas procesu pretavenia

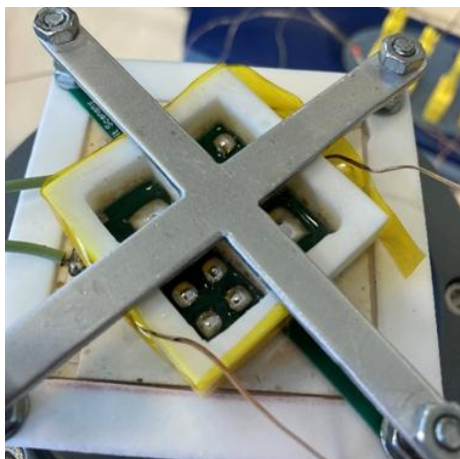
Práve frekvencia 250 Hz bola empiricky zvolená na základe pozorovania, ako najvhodnejšia pre vykonanie experimentov. Pri tejto hodnote bol povrch roztavenej spájky zvltný, ale súčasne bola zachovaná povrchová integrita spájkovaného spoja. Na obrázku 4.14 sú zobrazené spájkované spoje pri postupnom zvyšovaní intenzity mechanických vibrácií. Z výsledkov je možné pozorovať, že so zvyšujúcou sa amplitúdou bol povrch výsledných spojov nehomogénny s hrubou štruktúrou. Zároveň dochádzalo k postupnému rozpúšťaniu spájkovacej plôšky keramického substrátu v roztavenej spájke (z angl. „*leaching*“). Tento jav bol pravdepodobne spôsobený väčším množstvom spájky, ktoré bolo potrebné použiť pre daný experiment a agresivitou tavidla, ktorá je typická pre bezolovnaté SAC zliatiny. Ako však znázorňuje obrázok 4.14, vyššia intenzita vibrácií výrazne prispievala k tomuto efektu. V spodnej časti snímku je červeným znakom prečiarknutá vzorka, pri ktorej nedošlo k pretaveniu spájkovacej pasty. Tento výsledok bol spôsobený vplyvom nečistoty pod povrchom substrátu, čím bol zapríčinený nedostatočný prenos tepla do spájkovacej plôšky.



Obrázok 4.14 Porovnanie rozpúšťania TLV plôšky pri pôsobení vibrácií

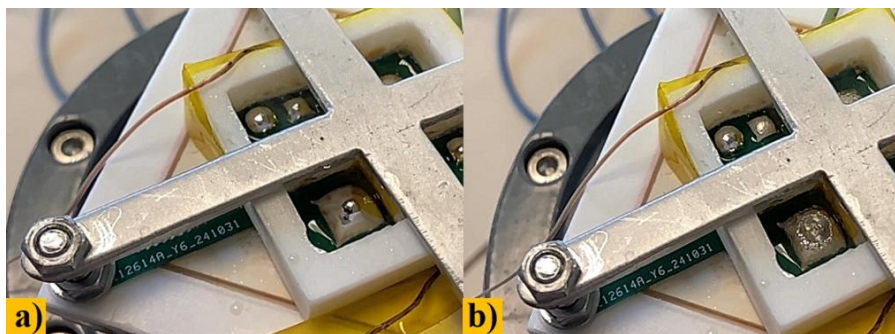
Z realizovaných experimentov s keramickými substrátmi boli získané cenné poznatky pri sledovaní dynamiky spájky na povrchu. Avšak rozpúšťaním TLV spájkovacej plôšky a nasatím spájkovaného spoja cudzími kovmi, mohla výsledná štruktúra obsahovať množstvo nedefinovaných intermetalických zlúčenín. Tento efekt je neželaný, pretože zanáša značnú nepresnosť pri vyhodnocovaní morfológických štruktúr spájkovaných spojov, ktoré sú formované pod vplyvom mechanických vibrácií. Preto boli pre ďalšie experimenty použité testovacie DPS z materiálu FR-4, ktorých návrh je uvedený v podkapitole 4.1.4.

Po doručení testovacích DPS výrobcom bola zahájená ďalšia séria testov, podobne ako pri keramických substrátoch. Proces, ktorý bude použitý pre vytváranie vzoriek určených na analýzu štruktúry je zobrazený na obrázku 4.15. Tento spôsob prípravy eliminoval externé vplyvy na formovanie vnútornej štruktúry spájkovaných spojov, okrem žiadaného pôsobenia mechanických vibrácií. Z tohto dôvodu bude táto metóda aplikovaná v experimentálnej časti diplomovej práce. Takto pripravené testovacie vzorky umožnili vo forme metalografických mikrovýbrusov skúmanie a vyhodnotenie morfológickej štruktúry na základe kryštalografickej orientácie zŕn cínu.



Obrázok 4.15 Testovacia aparátúra počas pretavenia spájkovacej pasty na DPS

Počas prípravy hlavného experimentu a realizácie série testov zameraných na pretavenie spájkovacej pasty počas pôsobenia vibrácií, bolo pozorované zadržiavanie plynových inklúzií v objeme roztavenej spájky. Tento efekt, znázornený na obrázku 4.16 a), vznikol pri spustení vibrácií pred úplným pretavením spájkovacej pasty. Vysoké povrchové napätie spájky v kombinácii s povrchovými vlnami, ktoré sú indukované vibráciami pravdepodobne zabránili úniku týchto inklúzií. Pri ochladzovaní a tuhnutí taveniny následne dochádzalo ku kolapsu dutín, čo viedlo k vzniku tzv. kráterových defektov (viď. obrázok 4.16 b)). Tento nežiadúci jav bol eliminovaný aplikovaním mechanických vibrácií, až po pretavení spájkovacej pasty a odparení zložiek tavidla.



Obrázok 4.16 Proces spájkovania pri pôsobení vibrácií: a) Zachytenie bubliny, b) Vytvorenie kráteru pri tuhnutí

V rámci experimentov pri sledovaní dynamiky pretavenej spájky bol pozorovaný aj jav známy ako „*Cymatics*“, ktorý skúma vplyv mechanických vibrácií na štruktúru a správanie kvapalín. Experiment prebiehal pri frekvencií 60 Hz a amplitúde V_{p-p} 1,1 V. Na obrázku 4.17 je znázornený výsledok interakcie medzi povrchovým napätím roztavenej spájky, jej hustotou a externým pôsobením vibrácií. Predvedený jav nemá priamy dosah na výsledky tohto výskumu. Predstavuje skôr zaujímavú fyzikálnu ilustráciu správania sa roztavených kovov, pod vplyvom mechanických vibrácií. Podobné pozorovania môžu poskytnúť inšpiráciu pre budúci výskum dynamiky roztavenej spájky a pri optimalizácii procesov spájkovania.



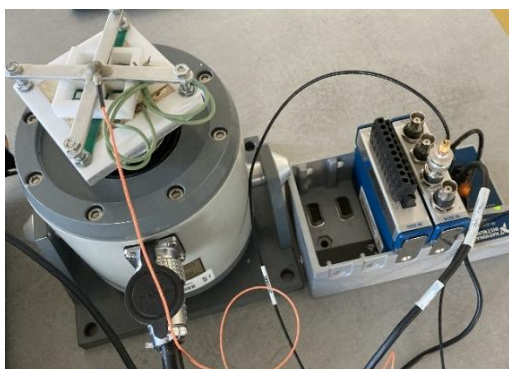
Obrázok 4.17 Dočasné deformácie roztavenej spájky pri nízkych frekvenciách

4.3 Optimalizácia parametrov budenia mechanických vibrácií

Po vyrobení konštrukčnej aparatúry a úspešnom otestovaní funkčného prípravku, nasledovala fáza optimalizácie parametrov budenia mechanických vibrácií. Cieľom bolo určiť optimálne nastavenie frekvencie a amplitúdy sínusového signálu pre dosiahnutie maximálnej odozvy systému na vibračné zariadenie YMC VT-50.

4.3.1 Postup merania a nastavenie frekvencie budenia

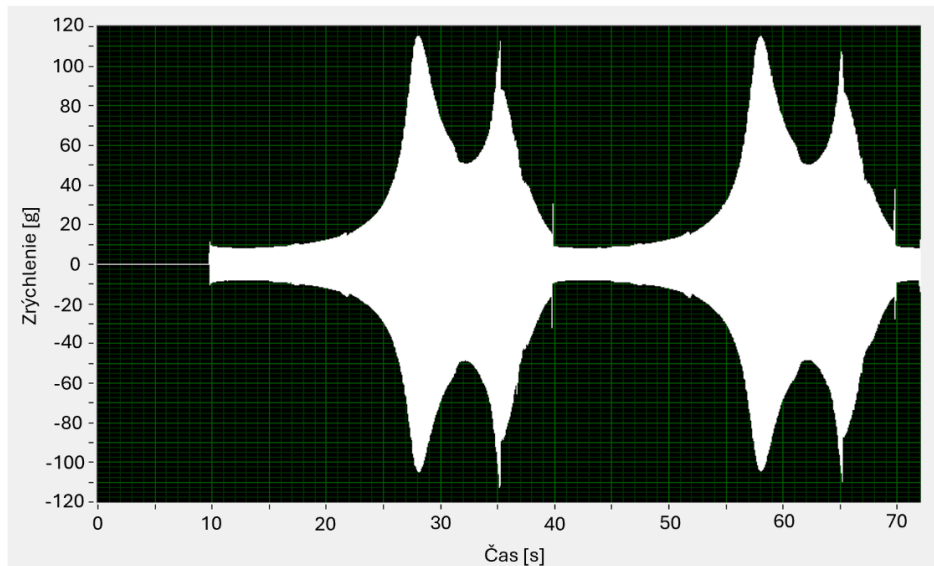
Testovacie pracovisko bolo zostavené podľa postupu uvedeného v podkapitole 4.1.1. Pre generovanie riadiaceho sínusového signálu s amplitúdou 3,8 V, bol použitý programovateľný signálový generátor Siglent SDG6022X s funkciou lineárneho frekvenčného prechodu („*sweep*“). Na generátore bolo nastavené postupné krokovanie jednotlivých frekvencií signálu v rozsahu od 200 Hz do 4 kHz v rozmedzí 30 sekúnd. Dynamická odozva testovanej aparatúry bola zaznamenávaná pomocou akcelerometra, ktorý bol pevne pripevnený včelím voskom ku konštrukčnej časti. Signál z akcelerometra bol spracovaný multikanálovým meracím modulom NI-9234 od National Instruments (NI) a zaznamenávaný v programe SignalExpress 2015 NI. Testovacie pracovisko pre snímanie dynamickej odozvy testovacej aparatúry je zobrazené na obrázku 4.18.



Obrázok 4.18 Pripojenie akcelerometra pre snímanie dynamickej odozvy aparatúry

Po pripravení testovacieho pracoviska a nastavení prístrojov bol zapnutý výstup signálového generátora. Záznam priebehu zrýchlenia (z angl. „*acceleration*“) v čase umožnil identifikovať frekvencie, pri ktorých amplitúda snímaných vibrácií dosahovala maximálne hodnoty.

Na obrázku 4.19 je zobrazený zaznamenaný priebeh zrýchlenia v čase pri lineárnom frekvenčnom prechode. Časová os je relatívna, pričom $t = 0$ s predstavuje začiatok merania v programe SignalExpress. Výstup generátora bol aktivovaný 10 sekúnd po spustení záznamu. Z grafickej závislosti je možné identifikovať dva výrazné vrcholy. Tieto špičkové hodnoty akcelerácie naznačujú, že pri daných frekvenciách dochádzalo k zosilnenej mechanickej odozve systému, čo býva typickým prejavom rezonancie. Naopak, medzi týmito vrcholmi sú fázy, kde je odozva nižšia a dochádza k menej efektívnemu budeniu.



Obrázok 4.19 Zaznamenaný priebeh zrýchlenia v čase pre rôzne frekvencie budenia

Pre presnejšie určenie hodnôt týchto vrcholov z grafickej závislosti bol použitý vzorec:

$$f(t) = f_{start} + \frac{f_{stop} - f_{start}}{T} \cdot (t - 10), \quad (4.1)$$

kde: f_{start} – počiatočná frekvencia lineárneho frekvenčného prechodu [Hz]
 f_{stop} – konečná frekvencia lineárneho frekvenčného prechodu [Hz]
 T – celkový čas lineárneho frekvenčného prechodu [s]
 t – aktuálny časový okamih merania [s]

Pomocou tohto vzťahu bolo stanovené rozmedzie frekvencií v okolí prvého vrcholu, pri ktorom systém vykazoval stabilnejšiu odozvu. Tieto krajné frekvencie boli následne použité pre opakované meranie funkciou *sweep* pre užší frekvenčný rozsah v okolí daného maxima.

Príklad výpočtu:

Pre časový okamih $t = 25$ s:

$$f_{01,min} = f_{start} + \frac{f_{stop} - f_{start}}{T} \cdot (t - 10) = 200 + \frac{4000 - 200}{30} \cdot (25 - 10) = 2100 \text{ Hz}$$

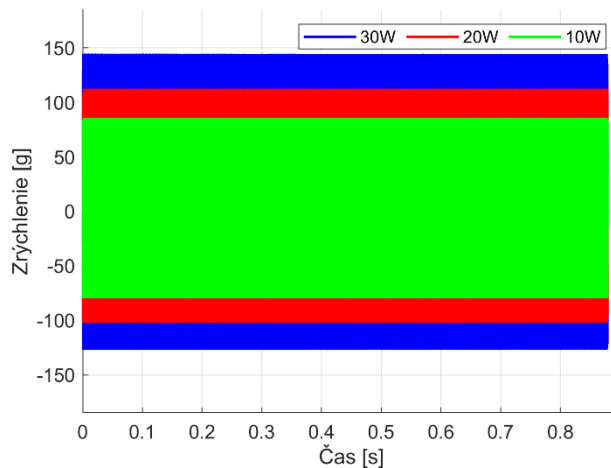
Pre časový okamih $t = 30$ s:

$$f_{01,max} = f_{start} + \frac{f_{stop} - f_{start}}{T} \cdot (t - 10) = 200 + \frac{4000 - 200}{30} \cdot (30 - 10) = 2733 \text{ Hz}$$

Následným opakovaným meraním v užšom frekvenčnom rozsahu a zjemnením kroku *sweep* analýzy, bola identifikovaná frekvencia $f_0 = 2515$ Hz, pri ktorej dosahovala odozva systému vrcholové hodnoty zrýchlenia.

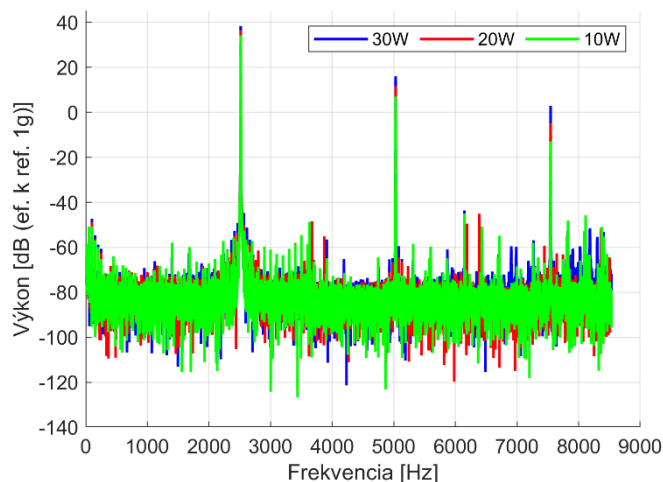
4.3.2 Stanovenie amplitúdy budenia

Po identifikovaní frekvencie budenia f_0 nasledovala optimalizácia veľkosti amplitúdy vstupného signálu do vibračného zariadenia. Amplitúda sínusového priebehu bola postupne menená v troch úrovniach. Ako prvé bol nastavený efektívny výkon výstupného signálu zo zosilňovača na 10 W, pričom bola zaznamenávaná odozva systému. Ďalej nasledovalo nastavenie na 20 W a 30 W, čím boli získané tri sady údajov pre jednu frekvenciu budenia. Na obrázku 4.20 sú znázornené priebehy zrýchlenia, ktoré predstavujú odozvu systému na zvyšovanie amplitúdy riadiaceho signálu.



Obrázok 4.20 Zaznamenaný priebeh zrýchlenia v čase pre $f_0 = 2515$ Hz

Zároveň bola prevedená Fourierova transformácia (FFT) pre zaznamenané úseky signálu, čím bolo získané výkonové spektrum. Výsledné priebehy rozloženia amplitúd v závislosti od frekvencie sú zobrazené na obrázku 4.21.



Obrázok 4.21 Výkonové frekvenčné spektrum pre $f_0 = 2515$ Hz

4.3.3 Výpočet výchylky mechanických kmitov

Na základe nameraných hodnôt dynamickej odozvy systému, bolo možné vypočítať výchylku (amplitúdu vychýlenia) mechanických kmitov pre vibračné zariadenie YMC VT-50 a testovaciu aparatúru. Z grafických závislostí frekvenčnej odozvy systému na rôzne intenzity signálu, boli zaznamenané hodnoty zrýchlenia v jednotkách g (viď. obrázok 4.20) a výkon (viď. obrázok 4.21) vyjadrený v dB (efektívna hodnota s referenciou 1 g). Namerané hodnoty a vypočítané výchylky sú uvedené v tabuľke 4.2. Pre výpočet bol použitý vzťah vychádzajúci z rovnice harmonického kmitania:

$$x = \frac{A}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}, \quad (4.2)$$

kde: x – je amplitúda výchylky [m]
 A – je amplitúda zrýchlenia [m/s^2]
 f – je frekvencia budenia [Hz]

Tabuľka 4.2 Namerané a vypočítané hodnoty frekvenčnej odozvy a výchylky mechanických kmitov

P [W]	f_0 [Hz]	Výkon [dB (ef. k ref. 1g)]	$a_{ef.}$ [g]	A [g]	x [μm]
10	2515	34,2	51,3	72,5	2,8
20	2515	36,4	66,1	93,4	3,7
30	2515	38,4	83,2	117,6	4,6

Príklad výpočtu:

Výpočet efektívneho zrýchlenia pomocou výkonu vyjadreného v dB (ref. 1g):

$$Výkon [dB] = 20 \cdot \log_{10}(a_{ef.})$$

$$a_{ef.} = 10^{\frac{Výkon [dB]}{20}} = 10^{\frac{34,2}{20}} = 51,3 g$$

Výpočet amplitúdy zrýchlenia:

$$A = \sqrt{2} \cdot a_{ef.} = \sqrt{2} \cdot 51,3 = 72,5 g$$

Výpočet výchylky mechanických kmitov pomocou rovnice (4.2) s prepočtom na [m/s^2]:

$$x = \frac{A \cdot 9,81}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} = \frac{72,5 \cdot 9,81}{(2 \cdot \pi \cdot 2515)^2} = 2,8 \mu m$$

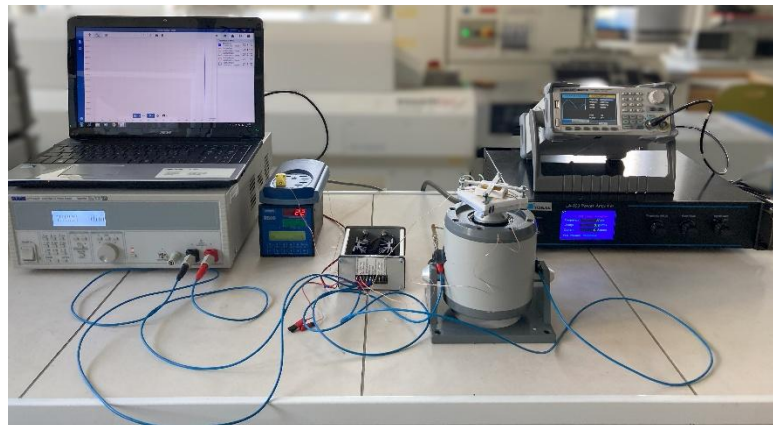
5. REALIZÁCIA EXPERIMENTU

Táto kapitola popisuje metodiku prípravy testovacích vzoriek s cieľom skúmať vplyv mechanických vibrácií na vnútornú štruktúru spájkovaného spoja. Experiment bol realizovaný na základe údajov a meraní uvedených v prechádzajúcej kapitole. Pripravená bola kontrolná séria referenčných vzoriek bez pôsobenia vibrácií a tri experimentálne série vzoriek, pri ktorých bol počas pretavenia a tuhnutia spájky aplikovaný vertikálny kmitavý pohyb. Vzorky boli následne spracované vo forme metalografických mikrovýbrusov, čo umožnilo pozorovanie štruktúry spájkovaného spoja. Skúmané boli zmeny v kryštalografickej orientácii prostredníctvom optickej svetelnej mikroskopie.

5.1 Príprava vzoriek

Metodika prípravy vzoriek a výber použitých prístrojov vychádzali z postupov uvedených v kapitole 4. Podrobne popísaný bol aj spôsob ich zapojenia a použitia v realizovaných experimentoch tejto záverečnej práce.

Pre zabezpečenie konzistentnosti pri vytváraní vzoriek bolo na spájkovacie plôšky DPS (viď. obrázok 4.8) nanášané definované množstvo spájkovacej pasty SAC305 PF606 – P30 – T4. K tomuto účelu bol použitý tlakový dávkovač, pričom objem vytlačenej pasty bol regulovaný počtom stlačení pedálového spínača pri konštantnom tlaku. Na spájkovacie plôšky s rozmermi 4x4 mm bolo nanesených 0,1 g spájkovacej pasty a na plôšky s rozmermi 8x8 mm bolo aplikovaných 0,4 g. Hmotnosť nanesej pasty bola overená použitím presnej laboratórnej váhy RADWAG WPS 360/C/2 s rozlíšením 1 mg. Následne bol substrát upevnený do testovacej aparatury na pretavenie spájkovacej pasty. Obrázok 5.1 znázorňuje zostavenie testovacieho pracoviska.

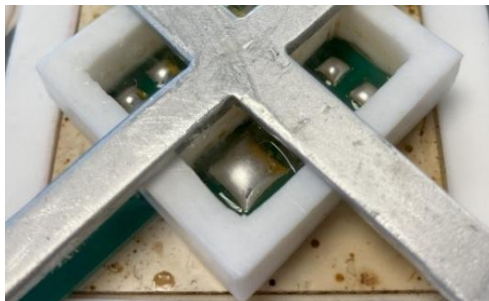


Obrázok 5.1 Zostavené pracovisko pre prípravu testovacích vzoriek

5.1.1 Pretavenie spájky bez pôsobenia vibrácií

Postup prípravy referenčných vzoriek zahŕňal kontrolované pretavenie spájky na výhrevnom telese spínanom výkonovým obvodom (viď. obrázok 4.9). Ten bol riadený

programovateľným regulátorom Smart R500 s presne nastaveným teplotným profilom. Proces merania a nastavenia teplotného profilu pre použitú spájkovaciu pastu je uvedený v podkapitole 4.2.1. Požadovaný výkon pre výhrevné teleso bol dodávaný nastaviteľným laboratórnym zdrojom TTi QPX1200SP. Proces pretavenia spájky bez externých vplyvov mechanických vibrácií je zobrazený na obrázku 5.2.



Obrázok 5.2 Pretavenie spájky bez externých vplyvov vibrácií

5.1.2 Pretavenie spájky ovplyvnené pôsobením mechanických vibrácií

Príprava spájkovaných spojov formovaných počas pôsobenia mechanických vibrácií zahŕňala použitie vibračného zariadenia YMC VT-50. Počas procesu pretavenia spájkovacej pasty na plôškach DPS bol aktivovaný generátor sínusového signálu Siglent SDG6022X, ktorého výstup bol zosilnený výkonovým zosilňovačom LA-100. Zosilnený signál bol následne použitý na vybudenie vibračného zariadenia. Po pretavení nasledovalo postupné ochladzovanie spájkovaných spojov, pričom mechanické vibrácie boli vypnuté pri dosiahnutí teploty 150 °C. Deaktivovanie prenosu vibrácií bolo načasované s cieľom zachovať procesy prebiehajúce počas pôsobenia mechanických vibrácií a umožniť ich následnú analýzu.

Pre nastavenie vibračného zariadenia boli na signálovom generátore zvolené dve frekvencie budenia. Prvý signál s frekvenciou 250 Hz, amplitúdou V_{p-p} 3 V a odpovedajúcim efektívnym výkonom 30 W bol stanovený empiricky na základe experimentálnych výsledkov uvedených v podkapitole 4.2.2. Druhý signál s frekvenciou 2515 Hz bol zvolený na základe analýzy maximálnej odozvy systému na mechanické kmitavé budenie. Podrobný popis tohto merania je uvedený v podkapitole 4.3. Pre jednu sériu vzoriek bol nastavený sínusový signál s frekvenciou 2515 Hz, amplitúdou V_{p-p} 3,8 V a efektívnym výkonom 20 W. Pre ďalšiu sériu bol použitý signál s rovnakou frekvenciou, vyššou amplitúdou V_{p-p} 5 V a efektívnym výkonom 30 W. Na obrázku 5.3 je zobrazený proces pretavenia spájkovacej pasty na testovacej DPS pri zapnutom vibračnom zariadení a oboch frekvenciách budenia. Snímok a) zachytáva prenos povrchového vlnenia do roztavenej spájky pri zachovaní povrchovej integrity na rozdiel od pozorovaného javu typu *Cymatics* (viď. obrázok 4.17). Na snímke b) je zobrazený neporušený hladký povrch pri vysokej frekvencii budenia, ktorá odpovedá mechanickej výchylke vibračného zariadenia v rozsahu jednotkách mikrometrov (viď. podkapitola 4.3.3).

Po ukončení procesu spájkovania boli z povrchu DPS a spájkovaných spojov odstránené zvyšky tavidla pomocou izopropylalkoholu (IPA). Vzorky boli následne označené a zdokumentované. Príloha E poskytuje detailný pohľad na finálnu sériu vzoriek určených na ďalšie spracovanie a detailnú analýzu.

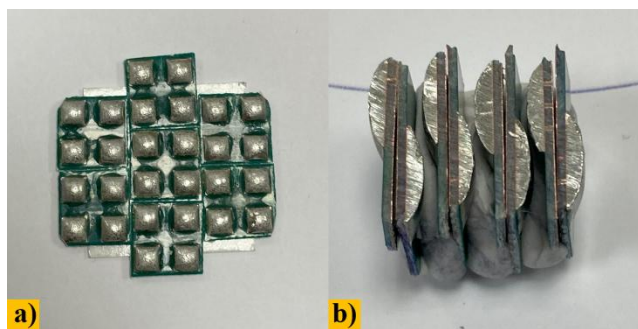


Obrázok 5.3 Pretavenie spájky pri pôsobení mechanických vibrácií: a) 250 Hz, b) 2515 Hz

5.2 Výroba metalografických mikrovýbrusov

Pre vykonanie detailnej analýzy vnútornej štruktúry spájkovaného spoja bola potrebná precízna príprava vzoriek. K tomuto účelu bolo nevyhnutné pripraviť metalografické mikrovýbrusy, ktoré umožnili skúmanie mikroštruktúry pod mikroskopom. Správny technologický postup prípravy je vysvetlený v teoretickej časti práce v podkapitole 3.1.

V prvom kroku bolo potrebné vyhotovené vzorky na DPS rozdeliť na menšie časti, tak aby sa dali umiestniť do odlievacích foriem s priemerom 4 cm. K tomuto účelu bol použitý diamantový rezný kotúč chladený vodou, čím sa minimalizoval tepelný vplyv na skúmaný materiál. Ako už bolo uvedené v podkapitole 4.1.4 pri návrhu testovacej DPS, menšie vzorky boli použité na analýzu orientácie zŕn a morfológie v horizontálnom reze. Na väčších vzorkách bol vo vertikálnom reze skúmaný vplyv povrchového vlnenia na formovanie štruktúry cez celý prierez spájkovaného spoja. Vhodne upravené vzorky určené na preparáciu sú zobrazené na obrázku 5.4.



Obrázok 5.4 Referenčné vzorky pripravené pre zalievanie: a) Horizontálny rez, b) Vertikálny rez

V ďalšom kroku sa takto pripravené vzorky umiestnili do odlievacích foriem. Súčasne bola pripravená zmes dvojzložkovej metakrylátovej živice Dentacryl určenej na zalievanie vzoriek v objemovom pomere 2:1 – dve odmerky prášku a jedna odmerka tvrdidla. Počas rozmiešavania zmesi v odsávacej komore prebiehala exotermická reakcia. Po nadobudnutí požadovanej medovej konzistencie boli vzorky starostlivo zaliate tak, aby nevznikali vzduchové dutiny. Zaliate vzorky boli ponechané na vytvrdenie po dobu 24 hodín.

Vytvrdené vzorky boli vybraté z odlievacích foriem a nasledoval proces brúsenia a leštenia, ktorý prebiehal na Ústave elektrotechnológie. Na tento účel bola použitá automatická metalografická brúska a leštička Saphir 530 od spoločnosti ATM (viď. obrázok 5.5). Tento prístroj umožňuje presnú kontrolu parametrov, ako prítláčná sila, počet otáčok za minútu, smer otáčania a doba opracovania.

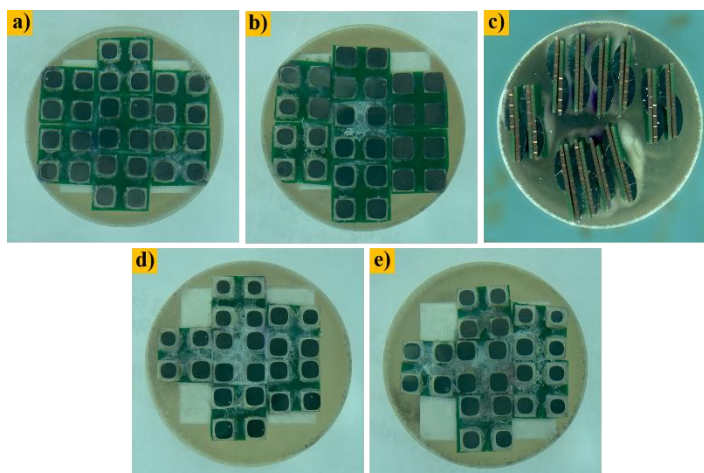


Obrázok 5.5 Automatická metalografická brúska a leštička Saphir 530

Brúsenie prebiehalo v niekoľkých fázach, pričom vzorky boli fixované v brúsnej hlave s otočným kotúčom a opracovávané postupne so zrnitosťou papiera P600. Počas tohoto procesu boli priebežne upravované parametre prístroja (dĺžka brúsenia, prítláčná sila v rozmedzí 8 N až 10 N a otáčky kotúča) na základe vizuálnej kontroly, aby sa predišlo prebrúseniu analyzovanej oblasti. Brúsenie prebiehalo za stáleho prítoku vody a po odhalení požadovanej oblasti bol brúsny papier vymenený za jemnejšiu zrnitosť P800. Medzi jednotlivými výmenami brúsnych papierov bolo potrebné jednotlivé výbrusy starostlivo opláchnuť od zvyškov abrazívnych častíc s vyššou zrnitosťou.

Po opracovaní vzoriek jemnozrnným brúsnym papierom P1200 nasledovalo leštenie. Pre tento proces bol použitý textilný leštiaci kotúč navlhčený izopropylalkoholom (IPA). Ďalej boli aplikované diamantové leštiace suspenzie na vodnej báze Dia-COMplete od spoločnosti ATM, obsahujúce abrazívne častice s veľkosťou 3 μm a 1 μm . Po strojovom preleštení boli vzorky skontrolované pod optickým mikroskopom. Miesta so zreteľnými škrabancami boli následne dodatočne ručne doleštené diamantovými leštiacimi pastami DIMAPA s veľkosťou abrazívnych častíc 3,5 μm , 1 μm a 0,25 μm . Pre dosiahnutie zrkadlového efektu bola v poslednom kroku aplikovaná leštiaca suspenzia na báze oxidu hlinitého Eposal s veľkosťou abrazívnych častíc 0,06 μm .

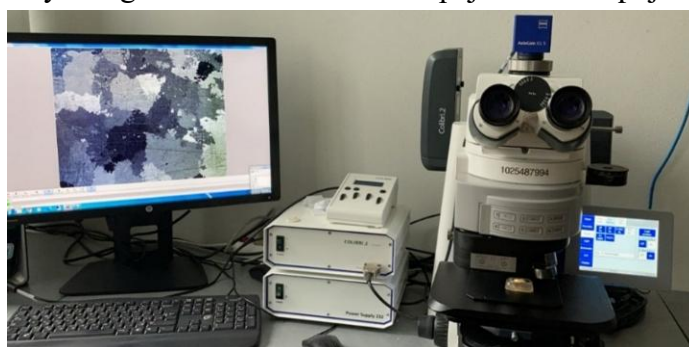
Vyleštené a očistené mikrovýbrusy s odhalenou plochou spájkovaného spoja, boli následne pripravené na analýzu vnútornej štruktúry. Finálne vzorky sú zobrazené na obrázku 5.6.



Obrázok 5.6 Vyleštené mikrovýbrusy: a) Referenčné, b) 250 Hz a 30 W, c) Vertikálny rez, d) 2515 Hz a 20 W, e) 2515 Hz a 30 W

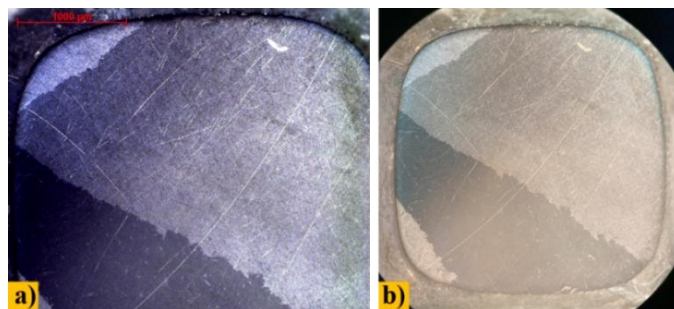
5.3 Pozorovanie vnútornej štruktúry spájkovaného spoja

Vyleštené mikrovýbrusy boli analyzované s cieľom identifikovať a porovnať zmeny vnútornej štruktúry spájkovacej zliatiny SAC305. Na obrázku 5.7 je zobrazený optický mikroskop Axio Imager.M2m od spoločnosti ZEISS, ktorý bol použitý pre pozorovanie vzoriek. Prostredníctvom krížovej polarizácie došlo k zvýrazneniu kontrastu medzi oblasťami s rôznou kryštalografickou orientáciou v spájkovanom spoji.



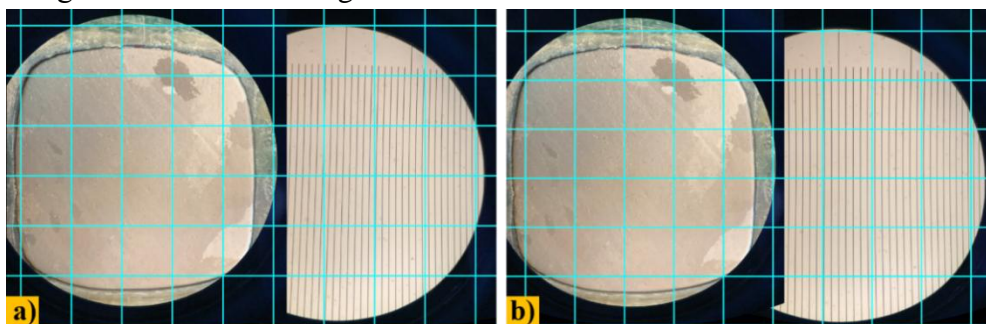
Obrázok 5.7 Optický mikroskop ZEISS Axio Imager.M2m

Na obrázku 5.8 je pri 5-násobnom zväčšení zobrazený rozdiel medzi snímku vyhotovenou kamerou ZEISS Axio Cam ICc5 a snímku zachytenou mobilným telefónom cez okulár mikroskopu. Snímky vyhotovené mobilným telefónom pri zachovaní rozlíšenia, umožnili zachytiť celú oblasť pozorovanej vzorky, čím poskytli makroskopický pohľad na jej morfológickú štruktúru. Z tohto dôvodu bola táto metóda zvolená pre záznam dát v horizontálnom reze. Spolu so skúmanými vzorkami bolo vyfotené aj kalibračné pravítko s meracím rastrom 100 μm (viď. obrázok 5.9).



Obrázok 5.8 Vnútorňa štruktúra spájkovaného spoja: a) Kamera Axio Cam ICc5, b) Kamera mobilného telefónu

Nakoľko sú objektív integrovanej kamery mikroskopu a okulár opticky prispôsobené, nevýhodou fotografií zaznamenaných kamerou telefónu, bolo mierne geometrické skreslenie. Pre korekciu skreslenia bol použitý voľne dostupný softvér Hugin, ktorý automaticky rozpoznáva vertikálne línie v obrázku a pridaním kontrolných bodov priamky umožňuje kalibráciu objektívu. Zadaná ohnisková vzdialenosť pre iPhone SE (2020) bola 28 mm. Na obrázku 5.9 je znázornené porovnanie snímok pred a po korekcii v prostredí grafického editora Hugin.



Obrázok 5.9 Úprava snímok v prostredí grafického editora: a) Pred korekciou, b) Po korekcii

Po vygenerovaní upravených obrázkov bola do každého pridaná kalibračná mierka (viď. Príloha F), ktorá odpovedá $0,469 \text{ pixel}/\mu\text{m}$. Pre tento účel bol použitý taktiež voľne dostupný 64-bitový program ImageJ. Softvérovou korekciou geometrického skreslenia sa podarilo znížiť meranú odchýlku z pôvodných vyšších desiatok na jednotky mikrometrov. Tieto výsledky boli získané porovnaním viacerých náhodne vybraných snímok vyhotovených kamerou ZEISS s automaticky pridanou mierkou a upravených fotografií získaných kamerou mobilného telefónu. Tieto výsledky odchýlok neboli štatisticky vyhodnocované, nakoľko analýza morfológického usporiadania zrn cínu nevyžadovala presné meranie rozmerov.

V rámci analýzy vnútornej štruktúry spájkovaných spojov v horizontálnom reze boli všetky vzorky postupne zdokumentované a snímky následne softvérovo upravené. Príloha F obsahuje kompletne výsledky analýzy. Vyhodnotenie vplyvu pôsobenia mechanických vibrácií na vnútornú štruktúru a povrchovú integritu spojov je podrobne uvedené v kapitole 6.

6. POROVNANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

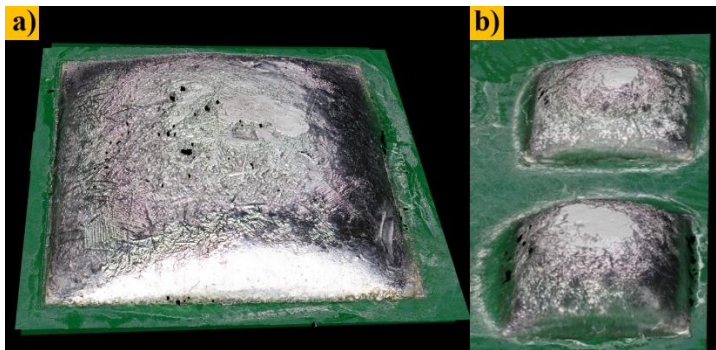
Táto kapitola je zameraná na experimentálnu analýzu vyhotovených vzoriek, ktorej cieľom bolo overiť vplyv mechanických vibrácií na proces formovania štruktúry spájkovaného spoja. Pozornosť bola venovaná identifikácii a vyhodnoteniu morfológických zmien v mikroštruktúre. Výsledky boli porovnávané s referenčnými vzorkami bez vibrácií. Jednotlivé analýzy sú rozčlenené do podkapitol podľa použitej analytickej metódy. V poslednej podkapitole boli diskutované jednotlivé mechanizmy zmien a ich potenciálny dopad na mechanické vlastnosti výsledných spájkovaných spojov.

6.1 Povrchová analýza integrity spájkovaných spojov

Analýza integrity spájkovaného spoja bola realizovaná s cieľom identifikovať vplyv mechanických vibrácií na celistvosť a zmeny povrchovej vrstvy výsledného spoja. Príloha E obsahuje detailné snímky povrchov jednotlivých sérií vzoriek pripravených v experimentálnej časti práce, ktoré boli následne spracované vo forme mikrovýbrusov.

Pri skúmaní referenčných vzoriek a vzoriek vyhotovených pri vyššej frekvencii budenia 2515 Hz neboli pozorované výrazné rozdiely v štruktúre povrchu. Výsledné spoje vykazovali typicky matnejší a mierne drsný povrch, charakteristický pre bezolovnaté zliatiny typu SAC. Naopak, u vzoriek vytvorených pri frekvencii budenia 250 Hz, kde boli v roztavenej spájke indukované viditeľné povrchové vlny, bol okrem rastu hrubšej kryštalickej štruktúry pozorovaný aj opakovane sa vyskytujúci jav. Na obrázkoch uvedených v prílohe E.2 sú v centrálnej časti (stred) spájkovaných spojov pri jednotlivých vzorkách viditeľné horizontálne plochy stuhnutej spájky.

Pre detailné znázornenie tohto javu bol použitý 3D optický profilometer VR-6000 series od firmy KEYENCE. Táto detailná analýza povrchu spájkovaného spoja prebiehala na Ústave automatizácie a meracej techniky. Výsledné snímky, ktoré detailne zachytávajú uvedený jav sú zobrazené na obrázku 6.1 a v prílohe G.2. Detailný pohľad na typickú štruktúru referenčných vzoriek je uvedený prílohe G.1.

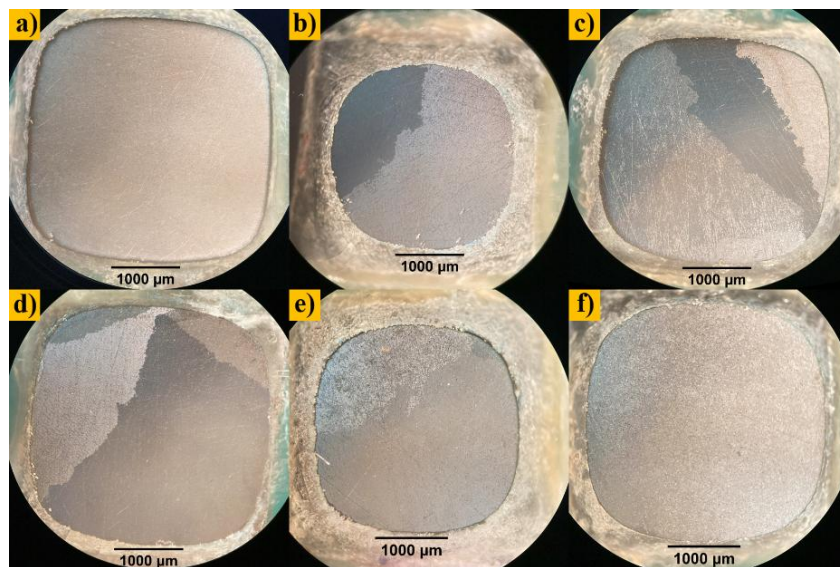


Obrázok 6.1 Štruktúra povrchu spájky: a) Spoj s veľkosťou plôšky 8x8 mm, b) Spoje s veľkosťou plôšky 4x4 mm

6.2 Analýza vzoriek v horizontálnom reze

V rámci analýzy spájkovaných spojov v horizontálnom reze bolo celkovo vyhodnotených 68 vzoriek. Pripravené boli štyri série pri rôznych podmienkach vplyvu vibrácií počas pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny. Podrobný popis prípravy analyzovaných vzoriek bol uvedený v podkapitole 5.1.

Príloha F obsahuje spracované výsledky, ktoré preukázali, že mechanické vibrácie sa významne podieľali na ovplyvnení morfológie zŕn spájkovacej zliatiny. Makroskopická analýza spájkovaných spojov v horizontálnom reze odhalila prítomnosť šiestich rôznych typov kryštalografických usporiadaní (viď. obrázok 6.2). Tie boli identifikované a klasifikované na základe publikovaných výsledkov vedeckých štúdií, ktoré sú uvedené v teoretickom rozbere v podkapitole 1.2.4.

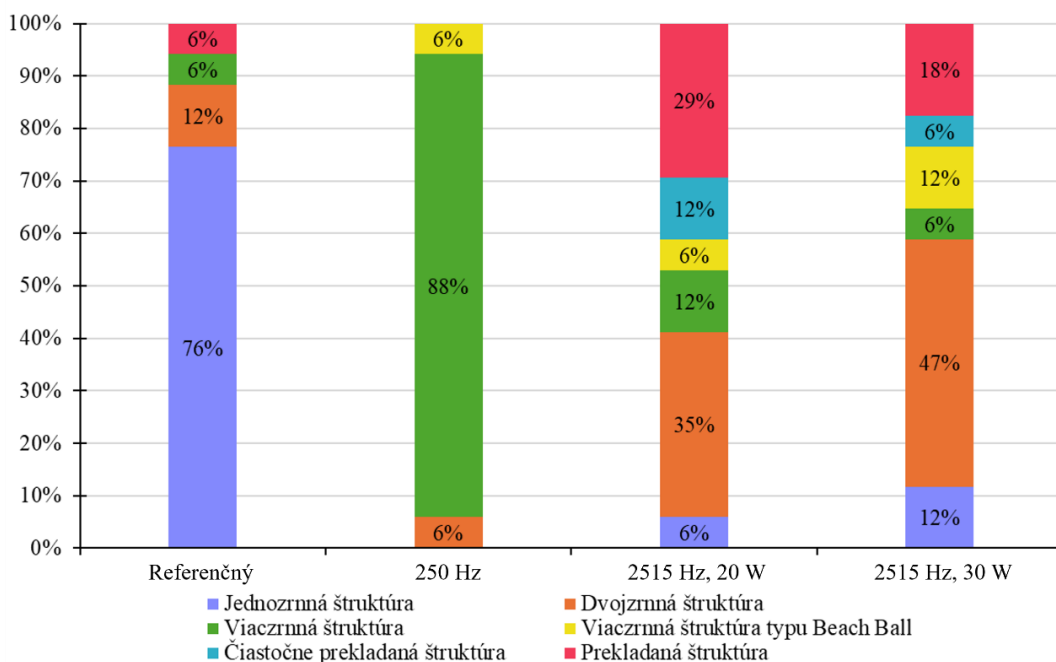


Obrázok 6.2 Základné typy kryštalografických orientácií Sn zŕn: a) Jednozrnné, b) Dvojrnné, c) Viaczrnné, d) Viaczrnné typu *Beach Ball*, e) Čiastočne prekladané, f) Prekladané

Na základe zadefinovania kryštalografických usporiadaní bolo možné výsledky štatisticky vyhodnotiť. Na obrázku 6.3 je zobrazený stĺpcový graf, ktorý zobrazuje percentuálne zastúpenie jednotlivých typov morfológie zŕn cínu v rámci štyroch experimentálnych sérií. Prvá séria reprezentuje referenčné vzorky pripravené bez pôsobenia vibrácií. Druhá séria zodpovedá vzorkám spracovaným pri nízkofrekvenčných vibráciách s frekvenciou 250 Hz. Tretia a štvrtá séria predstavuje vzorky vytvorené pri pôsobení vysokofrekvenčných vibrácií (2515 Hz) a efektívnych výkonoch 20 W a 30 W. Takto spracované výsledky umožnili vykonať analýzu vplyvu rôznych vibračných podmienok na vývoj mikroštruktúry a identifikovať trend v oblasti orientácie a rastu cínových zŕn.

Z výsledkov analýzy vyplýva, že u kontrolných referenčných vzoriek dominoval výskyt jednozrnej štruktúry (76 %). Okrem prítomnosti jedného veľkého Sn zrna,

bol pozorovaný aj výskyt prekladanej, dvojzrnej a viaczrnej štruktúry, čo poukazuje na prirodzenú variabilitu komplexných procesov prebiehajúcich počas spájkovania. V prípade druhej série vzoriek, pripravenej pri nízkofrekvenčnom kmitaní (250 Hz) bolo pozorované 100 % zastúpenie štruktúr s viac ako jedným zrnom. Dominantný podiel (88 %) malo viaczrnné kryštalografické usporiadanie s náhodnou orientáciou a veľkosťou Sn zrn. Minoritne zastúpenie mala dvojzrnná štruktúra a morfológia typu *Beach Ball*. Analýza tretej série vzoriek vyhotovených pri maximálnej odozve systému (2515 Hz, 20 W) odhalila prítomnosť všetkých šiestich definovaných typov kryštalografického usporiadania. V porovnaní s referenčnými vzorkami bol výskyt jednozrnej štruktúry značne minimalizovaný (6 %). Významne sa zvýšil podiel prekladanej štruktúry (29 %) a dvojzrnej štruktúry (35 %). Zároveň bola zaznamenaná aj prítomnosť čiastočne prekladanej štruktúry (12 %), ktorá bola pozorovaná len pri vyššej frekvencii budenia a viaczrnná štruktúra typu *Beach Ball*. Zvýšenie hodnoty efektívneho výkonu na 30 W viedlo k poklesu v podiele výskytu prekladanej štruktúry (18 %) a naopak výraznejšiemu nárastu dvojzrnej štruktúry (47 %). Zvýšený výkon vibračného budenia naznačuje zmenu v mechanizme rastu zrn, avšak kľúčové je zachovanie trendu pri formovaní morfológie vnútornej štruktúry.



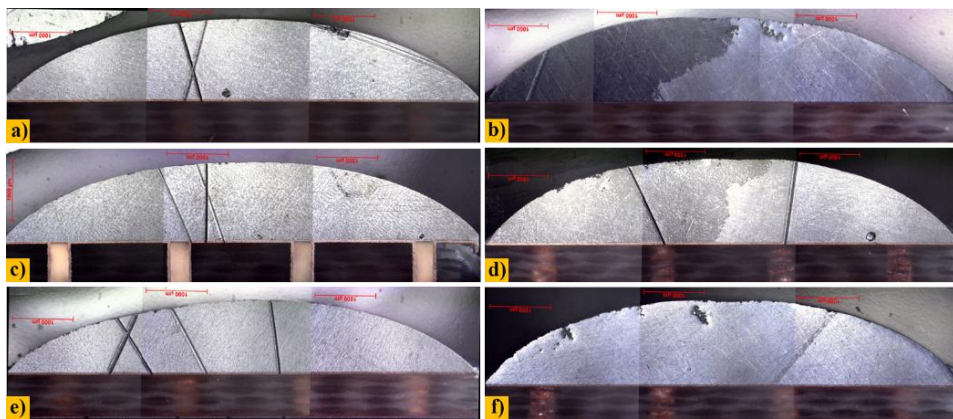
Obrázok 6.3 Štatistické zastúpenie morfológií Sn zrn v horizontálnom reze

6.3 Analýza vzoriek vo vertikálnom reze

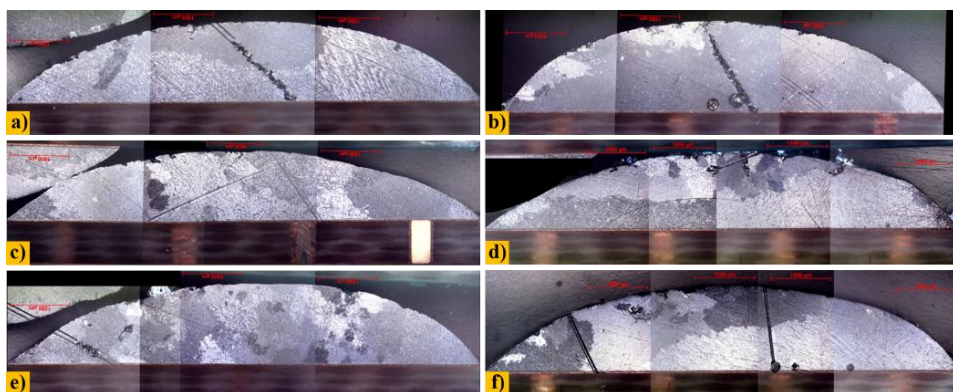
Pre doplnenie skúmania vplyvu mechanických vibrácií na formovanie štruktúry spájkovaného spoja bola realizovaná aj analýza vo vertikálnom reze. Postup bol analogický ako pri pozorovaní vzoriek v horizontálnom reze. Použitý bol optický mikroskop Axio Imager.M2m a pre záznam snímok kamera ZEISS Axio Cam ICc5.

Pri skúmaní referenčných vzoriek zobrazených na obrázku 6.4 boli pozorované jednozrnné a dvojrnné kryštalografické usporiadania. Takmer identická morfológia bola formovaná aj pri vzorkách vyhotovených pre frekvenciu budenia 2515 Hz. Na obrázku 6.6 sú zobrazené jednozrnné a dvojrnné usporiadania u vzoriek pripravených s efektívnym výkonom 20 W. Obrázok 6.7 zachytáva výsledné jednozrnné usporiadania pri vyššej hodnote efektívneho výkonu 30 W. Výsledky tejto reprezentatívnej série vzoriek naznačujú, že pri rozmeroch spájkovacích plôšok 8x8 mm, nedosahovalo budenie vibračného zariadenia vyššou frekvenciou požadovanú energiu na vyvolanie zmien v štruktúre spájkovaného spoja.

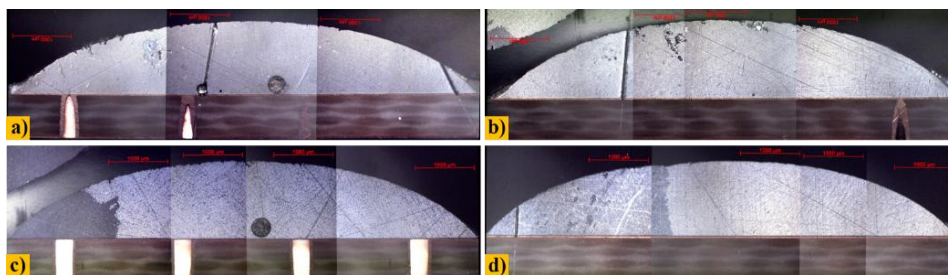
Naopak pri vzorkách vytváraných pri nižšej hodnote frekvencie budenia 250 Hz boli zaznamenané výrazné zmeny v morfológii a v kryštalografickom usporiadaní Sn zrn. Snímky 6.5 a), b), d) a f) zachytávajú pravdepodobný vplyv povrchových vln, ktoré vznikali počas pretavenia spájkovacej pasty na povrchu taveniny. Zrná v objeme analyzovaných spojov (pri povrchu spájkovacej plôšky) sa vyznačujú jednou kryštalografickou orientáciou. U vzoriek zobrazených na obrázku 6.5 c) a e) bolo pozorované náhodné rozloženie, orientácia a veľkosť jednotlivých Sn kryštálov.



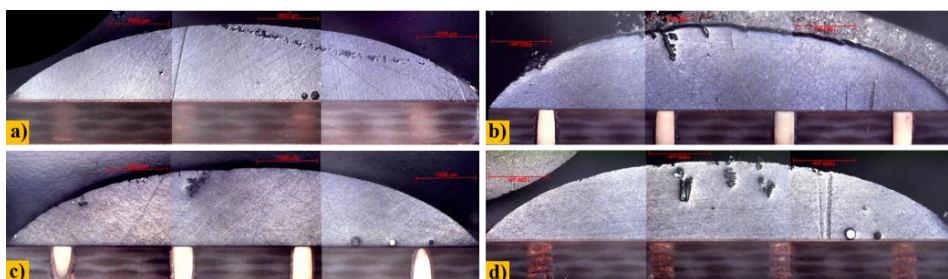
Obrázok 6.4 Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze referenčných vzoriek



Obrázok 6.5 Kryštalografické rozloženie zrn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 250 Hz



Obrázok 6.6 Kryštalografické rozloženie zŕn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 2515 Hz, 20 W



Obrázok 6.7 Kryštalografické rozloženie zŕn cínu vo vertikálnom reze s frekvenciou budenia 2515 Hz, 30 W

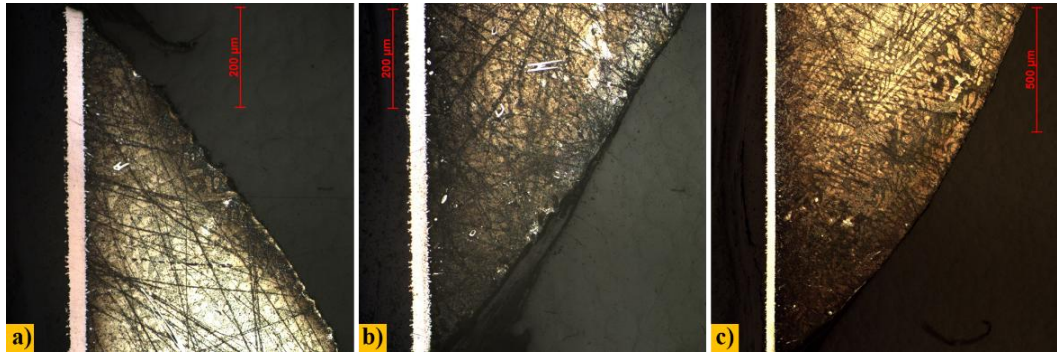
K zvýrazneniu mikroštruktúry spájkovaných spojov bola použitá metóda chemického leptania. Pre komplexné zobrazenie mikroštruktúry bez straty informácií a s vysokým kontrastom medzi β -Sn dendritmi a eutektickou časťou bol pripravený leptací roztok [38] so zložením 94 % etanol, 4 % kyselina dusičná (HNO_3) a 2% kyselina chlorovodíková (HCl). Vhodnou kombináciou kyselín dochádzalo k oxidačno-redukčnej reakcii, ktorá definovala selektivitu daného roztoku. Jedna kyselina oxiduje povrch materiálu a druhá zabezpečuje rozpustenie tohto vzniknutého oxidu. Reaktivita mikroleptadla bola upravená etanolom.

Príprava leptacieho roztoku a následná manipulácia prebiehala za dodržania všetkých bezpečnostných opatrení, ako ochranné gumené rukavice, okuliare a odev. Aplikovanie mikroleptadla bolo realizované pod odsávacou komorou v kontrolovanom prostredí pri teplote 23 °C. Analyzovaná plocha mikrovýbrusu bola ponorená do leptacieho roztoku po dobu 10 sekúnd. Následne bol leptací proces prerušený „špinavým“ oplachom v deionizovanej vode a zakončený „čistým“ oplachom. Po osušení stlačeným vzduchom bol výsledok leptania skontrolovaný pod optickým mikroskopom. Nakoľko nedošlo k očakávanému kontrastu, tak bol celý proces opätovne zopakovaný ďalším ponorením do mikroleptadla na 15 sekúnd. Týmto opakovaným postupom bol aj napriek miernemu podleptaniu Sn matrice dosiahnutý požadovaný kontrast.

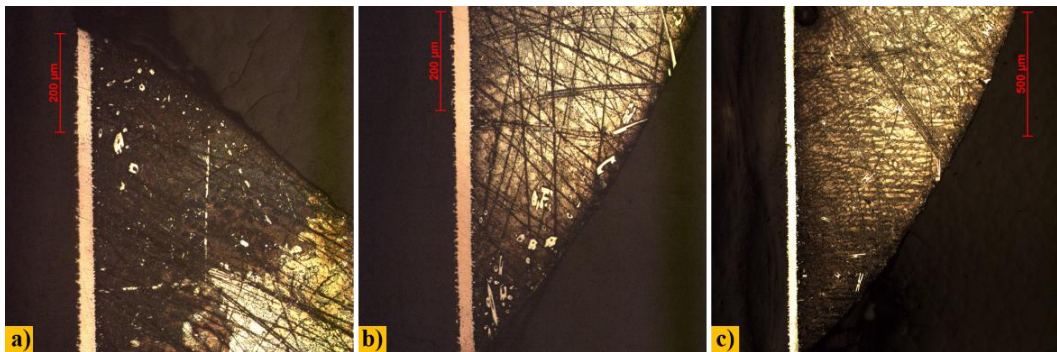
Analýza zvýraznenej mikroštruktúry leptaných vzoriek odhalila zaujímavé rozloženie intermetalických fáz Cu_6Sn_5 v objeme cínovej matrice. U vzoriek ovplyvnených pôsobením mechanických vibrácií s frekvenciou budenia 250 Hz boli jednotlivé fázy pozorované pri okrajoch spájkovaných spojov a v blízkosti povrchu. Tento efekt

je zaznamenaný na obrázku 6.9, pričom najvýraznejšie rozloženie zachytáva snímok b). V porovnaní s referenčnými vzorkami zobrazenými na obrázku 6.8 tento efekt pozorovaný nebol, resp. nebol natoľko výrazný.

Tieto výsledky smerového rozloženia intermetalických fáz boli získané na základe analýzy reprezentatívnych vzoriek, bez štatistického vyhodnotenia. Z tohto dôvodu je dané pozorovanie možné interpretovať len ako potenciálne dôsledky pôsobenia mechanických vibrácií, kde pri pretavení spájky bolo viditeľné zvlnenie povrchu taveniny.



Obrázok 6.8 Rozloženie intermetalických fáz v objeme spájkovaného spoja referenčných vzoriek



Obrázok 6.9 Rozloženie intermetalických fáz v objeme spájkovaného spoja vzoriek ovplyvnených pri frekvencii budenia 250 Hz

6.4 Zhrnutie výsledkov a diskusia

Experimentálna časť práce preukázala vplyv mechanických vibrácií s rôznou frekvenciou a intenzitou na proces formovania štruktúry bezolovnatej spájkovacej zliatiny SAC305. Na základe pozorovaní prostredníctvom optickej mikroskopie boli identifikované zmeny v integrite povrchovej vrstvy, vnútornej kryštalickej štruktúre a rozložení intermetalických fáz. Dosiahnuté výsledky poukazujú na komplexné pôsobenie dynamických podmienok počas procesu tuhnutia spájky. Zároveň bol naznačený aj potenciálny vplyv zmien v kryštalografickom usporiadaní Sn zŕn na výsledné mechanické vlastnosti spájkovaných spojov.

V podkapitole 6.1 boli zaznamenané zmeny v povrchovej integrite spájkovaných spojov pri nízkofrekvenčnom buzení (250 Hz). V centrálnej oblasti spoja bol opakovane pozorovaný vznik horizontálnej súvislej roviny. Tento jav pravdepodobne súvisel s nehomogénnym tuhnutím, pri ktorom stredná časť spoja tuhla neskôr než jeho okraje v dôsledku zvýšenej mobility taveniny. Jedným z možných vysvetlení ovplyvnenia rýchlosti kryštalizácie je vznik interferencie povrchových vln počas vibračného pôsobenia. Pri vyšších frekvenciách budenia (2515 Hz) nebolo zaznamenané významné narušenie povrchovej štruktúry v porovnaní s referenčnými vzorkami. To môže súvisieť s nižšou amplitúdou výchylky a absenciou makroskopického zvlnenia povrchu roztavenej spájkovacej zliatiny. Horizontálne roviny boli pozorované opakovane vo viacerých vzorkách série pri 250 Hz. Vzhľadom na obmedzený počet vzoriek neboli výsledky štatisticky vyhodnocované. Avšak opakovaný výskyt naznačuje, že ide o systematický efekt spojený s konkrétnym nastavením parametrov vibračného budenia. Presné stanovenie miery výskytu tohto javu v závislosti od výkonu a geometrie spájkovaného spoja by si vyžadovalo rozšírenú analýzu, ktorá by mohla byť predmetom ďalšieho výskumu.

Analýzou vzoriek v horizontálnom reze (viď. podkapitola 6.2) bolo potvrdené, že aplikovanie mechanických vibrácií počas pretavenia a tuhnutia spájkovacej zliatiny významne ovplyvňuje vývoj morfológie kryštalickej štruktúry. U referenčných vzoriek bol zaznamenaný dominantný výskyt jednozrnej štruktúry. V teoretickej časti práce (viď. podkapitola 1.2.4), bolo na základe publikovaných vedeckých štúdií zistené, že morfológia pozostávajúca z jedného veľkého Sn zrna sa vyznačuje veľmi dobrou elektrickou vodivosťou, ale zároveň vykazuje horšie mechanické vlastnosti v porovnaní s viaczrnnými štruktúrami. Nakoľko homogénna orientácia podporuje riziko vzniku a šírenia prasklín. Naopak, hranice medzi zrnami pri viaczrnných štruktúrach pôsobia ako účinné bariéry proti ich šíreniu. Pri nízkofrekvenčnom buzení (250 Hz) bolo pozorované narušenie preferovaného rastu jedného dominantného zrna. Výsledkom bol výskyt viaczrnej štruktúry s náhodne orientovanými zrnami rôznych veľkostí. K tomuto efektu pravdepodobne dochádzalo pri tuhnutí spájkovaného spoja, kde boli vplyvom vibrácií narúšané jednotlivé rozhrania, čo viedlo k viacnásobnej nukleácii a formovaniu viaczrnného kryštalografického usporiadania. Najkomplexnejšie rozloženie mikroštruktúry bolo zachytené pri buzení vysokofrekvenčným signálom (2515 Hz), pri ktorom bola nameraná maximálna odozva systému na vibračné zariadenie. Zaznamenané boli všetky typy štruktúr zadefinované na obrázku 6.2, pričom výrazne stúpol podiel prekladaných štruktúr, ktoré sa vyznačujú vysokou mechanickou pevnosťou a odolnosťou voči deformáciám. Zvýšením intenzity budenia pri procese spájkovania z 20 W na 30 W došlo k pozorovateľnému posunu v rozložení zrn, podiel prekladanej štruktúry klesol a dominantnejšie sa prejavila dvojrzná štruktúra. Tento posun je možné interpretovať ako dôsledok vyššej amplitúdy vibrácií, ktorá mohla podporiť vznik dvoch dominantných zrn v dôsledku rozdelenia taveniny na viac stabilných oblastí nukleácie.

Z analyzovaných výsledkov vyplýva, že nízkofrekvenčné vibrácie (250 Hz) podporili úplnú dezorganizáciu rastu zŕn a prispeli k tvorbe chaotickej viaczrnej mikroštruktúry. Naopak, vibrácie pri maximálnej odozve systému (2515 Hz) prispeli k výraznej komplexnosti mikroštruktúry vytváraním viacerých typov morfológií vrátane prekladaných štruktúr a usporiadaní typu *Beach Ball*, ktoré sa vyznačujú zvýšenou dlhodobou spoľahlivosťou spájkovaného spoja.

Pri analýze vzoriek vo vertikálnom reze (viď. podkapitola 6.3) bolo zistené, že vysokofrekvenčné budenie (2515 Hz) nemalo pri väčších spájkovacích plôškach s rozmermi 8x8 mm dostatočný účinok na zmenu vnútornej štruktúry. Vzorky vykazovali kryštalografické usporiadanie odpovedajúce referenčnej sérii. Táto nízka mechanická odozva, rádovo v jednotkách mikrometrov (viď. podkapitola 4.3.3) nedosahovala efektívny prenos energie do objemu zliatiny, na rozdiel od menších vzoriek s plôškami 4x4 mm analyzovaných v horizontálnom reze. Naopak, pri nízkofrekvenčnom budení (250 Hz) boli pozorované nepravidelné štruktúry so stopami vplyvu povrchového vlnenia a nerovnomerným rastom kryštálov na povrchu. Pri analýze boli v objeme spájkovaných spojov v blízkosti povrchu plôšky DPS pozorované väčšie Sn zrná, ktoré sa vyznačujú jednou kryštalografickou orientáciou. Tento efekt možno interpretovať ako dôsledok smerového tuhnutia, pri ktorom zrno vytvorené pri rozhraní so substrátom rástlo smerom do objemu spájky. Pôsobenie vibrácii a zvlnenie povrchu počas tohto procesu pravdepodobne narušilo ustálený rast a dochádzalo k viacnásobnej nukleácii a formovaniu viaczrnej štruktúry v okolí povrchu spájkovaných spojov. Výsledkom bola štruktúra s jedným dominantným Sn zrnom, ohraničeným viaczrnnou štruktúrou s jemne rozptýlenými intermetalickými zlúčeninami Cu_6Sn_5 , ktoré sa zhluchovali v okrajových oblastiach spájkovaného spoja. Tieto IMC fázy boli odhalené metódou chemického leptania cínovej matrice pomocou mikroleptadla. Takto formovaná štruktúra by pravdepodobne mohla prispieť k zlepšeniu mechanických vlastností spojov vďaka synergickému efektu medzi homogénnym zrnom a bariérovým pôsobením viaczrnej štruktúry v jeho okolí. Overenie tejto hypotézy by vyžadovalo rozsiahlejší výskum, ktorý presahuje zadanie tejto práce, nakoľko sa jedná o netypické kryštalografické usporiadanie, ktoré zatiaľ nie je dostatočne opísané v odbornej literatúre. Avšak pre podporenie tejto hypotézy je možné poukázať na dosiahnuté výsledky [25], kde bol zaznamenaný nárast sily pri skúškach v strihu spájkovaných spojov, vytváraných pri mechanických vibráciách s výkonom 10 W a frekvenciou 616 Hz.

Dosiahnuté výsledky prezentované v tejto kapitole odrážajú dôslednú prípravu a prevedenie experimentov. Počas procesu spájkovania bol dosiahnutý stabilný teplotný profil a zároveň minimalizovaný vplyv externých rušivých faktorov. Ako bolo uvedené v teoretickej časti práce, zásadnú rolu pri formovaní výslednej orientácie, veľkosti a tvaru jednotlivých zŕn a β -Sn dendritov má najmä nastavenie spájkovacieho profilu. Zabezpečenie pomerne stálych podmienok počas experimentálnej fázy prispelo k nižšej variabilite pozorovaných výsledkov. Toto tvrdenie potvrdzujú závery analýz

v horizontálnom a vertikálnom reze. V horizontálnom reze bolo štatisticky preukázané dominantné zastúpenie jednozrnej štruktúry, ktorá je typická pre pomalé ochladzovanie bez rušivých vonkajších vplyvov. Pomalé ochladzovanie bolo cielené a vychádzalo z konštrukčného riešenia testovacej aparatury, ktorá počas procesu spájkovania akumulovala značné množstvo tepla. Stále podmienky prostredia pri spájkovacom procese dokazujú aj výsledky získané pri pôsobení vysokofrekvenčného budenia (2515 Hz) pri dvoch rôznych úrovniach výkonu. Štatistická analýza zastúpenia jednotlivých typov morfológií Sn zrn (viď. obrázok 6.3) poukazuje na vysokú mieru reprodukovateľnosti medzi sériami. Pre objektívne vyhodnotenie a porovnanie výsledkov šlo o kľúčový predpoklad.

Pri interpretácii dosiahnutých výsledkov je potrebné zdôrazniť, že väčšina dostupných vedeckých štúdií sa primárne zameriava na charakterizáciu mechanických vlastností BGA guličiek pre spájkku typu SAC. Z tohto dôvodu nebolo možné výsledky štatistickej analýzy výskytu jednotlivých typov morfológie priamo porovnať s výsledkami uvedenými v odbornej literatúre v kvantitatívnom zmysle. Cieľom tohto základného výskumu nebolo identifikovať ideálne kryštalografické usporiadanie s maximálnou mechanickou spoľahlivosťou, ale experimentálne overiť účinok mechanických vibrácií na formovanie vnútornej štruktúry spájkovaných spojov.

ZÁVER

V rámci tejto diplomovej práce bol navrhnutý, realizovaný a vyhodnotený experiment zameraný na skúmanie vplyvu mechanických vibrácií na formovanie vnútornej štruktúry spájkovaných spojov. Mechanické budenie bolo cielene aplikované počas procesu pretavenia a tuhnutia bezolovnatej spájkovacej zliatiny SAC305. Dôraz bol kladený na optimalizáciu procesných parametrov so zámerom zistiť, či riadené vibrácie môžu cielene ovplyvniť morfológiu zŕn cínu a rozloženie intermetalických fáz. Takáto kontrola mikroštruktúry by mohla prispieť k zlepšeniu mechanických vlastností výsledných spájkovaných spojov.

V rámci rešerše odbornej literatúry (viď. podkapitola 1.2.4) bola popísaná súvislosť medzi spoľahlivosťou spájkovaných spojov a morfológickým usporiadaním zŕn cínu. Teoretický rozbor potvrdil, že mechanické vibrácie predstavujú perspektívny nástroj pre riadené formovanie vnútornej štruktúry spájky. Zároveň sa ukázalo, že v danej oblasti existuje obmedzený počet dostupných vedeckých štúdií. To podporilo význam a potenciálny prínos tohto výskumu. Doteraz publikované výsledky spracované v podkapitole 2.2.3 naznačovali, že nízkofrekvenčné vibrácie prispievajú k zvýšenej pevnosti spojov. Predpokladané boli významné zmeny na povrchu štruktúry s možným presahom do objemových vlastností spájkovaného spoja. Tento mechanizmus pôsobenia nízkofrekvenčného budenia zatiaľ dostatočne objasnený nebol, ale je pravdepodobne spojený so šírením povrchových vln v kvapalinách, tak ako bolo vysvetlené v podkapitole 2.3. Na rozdiel od ultrazvukových vibrácií, kde vedecké štúdie preukázali priamy dosah mechanizmov kavitácie a akustického prúdenia na objemové zmeny v štruktúre spájky (viď. podkapitola 2.4).

Na základe získaných poznatkov bola v kapitole 4 navrhnutá experimentálna metodika zahŕňajúca voľbu frekvencie, amplitúdy a výpočet výchylky mechanických kmitov. Súčasťou bol aj návrh a výroba funkčnej experimentálnej aparatury vrátane testovacej DPS. V rámci prípravy experimentálnej časti bola uskutočnená početná séria testov (viď. podkapitola 4.2), ktorých cieľom bolo overiť navrhnutú metodiku a efektivitu prenosu mechanických vibrácií do roztavenej spájkovacej zliatiny. Následne bol v kapitole 5 realizovaný hlavný experiment, ktorý zahŕňal prípravu kontrolnej série referenčných vzoriek bez pôsobenia vibrácií a troch experimentálnych sérií. Výstupom boli metalografické mikrovýbrusy referenčných vzoriek a vzoriek ovplyvnených mechanickými vibráciami pri dvoch frekvenciách (250 Hz a 2515 Hz) s rôznymi intenzitami budenia. Vnútorňa štruktúra spájkovaných spojov bola následne analyzovaná prostredníctvom optického mikroskopu v režime krížovo polarizovaného svetla.

Výsledky metalografickej analýzy vzoriek prezentované v kapitole 6 preukázali štatisticky významné zmeny v kryštalografickej orientácii zŕn cínu a ich morfológikom usporiadaní. Pri nízkofrekvenčnom budení (250 Hz) bolo pozorované narušenie rastu dominantného zrna a vznik chaotickej viaczrnej štruktúry. Naopak, vysokofrekvenčné

budenie (2515 Hz) pri rôznych intenzitách budenia podporilo formovanie komplexných štruktúr vrátane prekladanej a typu *Beach Ball*, ktoré sú v odbornej literatúre považované za výhodné z hľadiska mechanických vlastností. Výsledky analýzy vzoriek vo vertikálnom reze zároveň potvrdili, že veľkosť spájkovacích plôšok a množstvo použitej spájkovacej pasty ovplyvňuje účinnosť prenosu mechanických vibrácií. Podrobné vyhodnotenie výsledkov a interpretácie mechanizmov sú uvedené v záverečnej diskusii v podkapitole 6.4.

Výsledky realizovaných experimentov potvrdzujú, že vhodne zvolenými parametrami vibrácií je možné cielene ovplyvniť kryštalografické usporiadanie zrn cínu a dosiahnuť tak potenciálne pozitívny vplyv na mechanické vlastnosti spájkovacej zliatiny SAC305. Táto diplomová práca prispieva k hlbšiemu porozumeniu procesov formovania štruktúry spájky a poukazuje na nové možnosti v oblasti optimalizácie spájkovacích procesov.

Na tento základný výskum je možné nadviazať aplikovaným výskumom zameraným na štatistické vyhodnotenie mikroštruktúry BGA spojov v kombinácii s mechanickými skúškami. Tieto komponenty zohrávajú kľúčovú úlohu v moderných elektronických zariadeniach. Výskum v tejto oblasti by mohol prispieť k optimalizácii spájkovacích procesov pre vysoko spoľahlivé systémy v automobilovom, zdravotníckom alebo leteckom priemysle. Ďalším perspektívnym smerom by mohlo byť doplnenie experimentálnych výsledkov o numerické simulácie rozloženia mechanických vibrácií v použitej aparatúre.

LITERATÚRA

- [1] F. COOMBS, Clyde. *Printed Circuits Handbook* [online]. Sixth Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008 [cit. 2024-12-04]. ISBN 0-07-151079-6. Dostupné z: https://electrovolt.ir/wp-content/uploads/2018/03/Clyde_Coombs_Printed_Circuits_Handbook-ElectroVolt.ir_.pdf
- [2] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno, 2017 [cit. 2024-12-04]. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [3] HWANG, Jennie S. *Environment-Friendly Electronics: Lead-free Technology*. Electrochemical Publications, 2001. ISBN 0901150401.
- [4] NOVÁK, Tomáš. *Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://dspace.zcu.cz/bitstream/11025/10731/1/Disertacni_prace_Novak%20Tomas.pdf. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [5] WIRTH, Václav. *Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/u56gsd/>. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [6] PLAČEK, Martin. *Sledování vlastností bezolovnatých pájených spojů* [online]. Praha, 2019 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84647/F3-D-2019-Placek-Martin-Disertace_Placek_final.pdf. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie.
- [7] MANKO, Howard H. *Solders and Soldering*. 3rd Edition. McGraw-Hill, 1992. ISBN 0070399700.
- [8] Effects of ultrasonic irradiation and cooling rate on the solidification microstructure of Sn–3.0Ag–0.5Cu alloy. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **2014**(214), 8 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613002392?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=8dc5ad62cda16e98
- [9] OTÁHAL, Alexandr. *Optimalizace faktorů ovlivňujících spolehlivost pájení moderních elektronických pouzder* [online]. Brno, 2020 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/125750>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky.
- [10] Improving the thermomechanical behavior of lead free solder joints by controlling the microstructure. *13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* [online]. 2012, 7 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6231456>

- [11] The effect of nickel microalloying on thermal fatigue reliability and microstructure of SAC105 and SAC205 solders. *IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* [online]. 2014, 16 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6897320>
- [12] On the 3-D Shape of Interlaced Regions in Sn-3Ag-0.5Cu Solder Balls. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS* [online]. 2021, **50**(3), 10 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-020-08508-w>
- [13] The effect of Sn grain number and orientation on the shear fatigue life of SnAgCu solder joints. *58th Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2008, 7 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4550012>
- [14] Influence of Sn grain size and orientation on the thermomechanical response and reliability of Pb-free solder joints. *56th Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2006, 6 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1645849>
- [15] Failure mechanism and microstructural evolution of Pb-free solder alloys in thermal cycling tests: Effect of solder composition and Sn grain morphology. *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* [online]. 2015, 9 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7159580>
- [16] Critical Review of Size Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Solder Joints for Electronic Packaging. *Applied Sciences* [online]. 2019, 9 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/2/227>
- [17] Dependence of Sn Grain Morphology of Sn-Ag-Cu Solder on Solidification Temperature. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2012, **41**(2), 13 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-011-1756-0>
- [18] Effect of Ni₃Sn₄ Nanoparticles on Grain Refinement in SAC305 Freestanding Solder Balls and SAC305/Cu BGA Joints. *22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)* [online]. 2021, 4 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9568027>
- [19] Effect of ultrasonic vibration time on the Cu/Sn-Ag-Cu/Cu joint soldered by low-power-high-frequency ultrasonic-assisted reflow soldering. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2017, 10 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417716302401#b0035>
- [20] Effect of Electric Current on Constitutive Behaviour and Microstructure of SAC305 Solder Joint. *IEEE 20th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)* [online]. 2018, 5 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331853879_Effect_of_Electric_Current_on_Constitutive_Behaviour_and_Microstructure_of_SAC305_Solder_Joint

- [21] Impact of rotating magnetic field on the microstructure, thermal properties, and creep behavior during the solidification of Sn–2.0Ag–0.5Cu solder alloy. *Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2022 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14644207221111453>
- [22] Ultrafine-Grain and Isotropic Cu/SAC305/Cu Solder Interconnects Fabricated by High-Intensity Ultrasound-Assisted Solidification. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2014, 12 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-014-3113-6>
- [23] Ultrasonic soldering technology center. In: *MBR Electronics* [online]. 2020 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <http://www.sonicbonder.com/>
- [24] Effects of ultrasonic treatment on mechanical properties and microstructure evolution of the Cu/SAC305 solder joints. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, 7 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521000803>
- [25] NOHEL, David. *Návrh experimentu pro výzkum vlivu mechanických vibrací a elektrického proudu při procesu pájení* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160219>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.
- [26] Moulding hydrodynamic 2D-crystals upon parametric Faraday waves in shear-functionalized water surfaces. *Nature Communications* [online]. 2021, 11 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-21403-0?fromPaywallRec=false#citeas>
- [27] Wave-based liquid-interface metamaterials. *Nature Communications* [online]. 2021, 9 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/ncomms14325#Sec9>
- [28] SČENSNÝ, Ľudovít. *Vliv rozdílných mikroleptů na pozorování morfologie intermetalických vrstev* [online]. Brno, 2022 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/142334>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [29] VANDER VOORT, GEORGE F. *Metallography Principles and Practices* [online]. ASM International. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1999 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://www.academia.edu/59159129/Metallography_Principles_and_Practices_1_
- [30] Effect of Composition and Cooling Rate on the Microstructure of SnAgCu-Solder Joints. *Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2007, 10 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4250092>
- [31] Základní metody světelné mikroskopie. *Optoteam, s.r.o.* [online]. Brno, 2004, 66 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi4070/um/zaklady103U.pdf>

- [32] *Small Exciter*. Online. YMC PIEZOTRONICS INC. 2018. Dostupné z: <http://www.chinaymc.com/upload/202401/1705543555351855.png>. [cit. 2024-12-15].
- [33] *Linear Power Amplifiers*. Online. YMC PIEZOTRONICS INC. 2018. Dostupné z: <http://www.chinaymc.com/upload/202401/1705542915755807.png>. [cit. 2024-12-15].
- [34] *Conductive pastes*. Online. YUMPU. 2012. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/5171519/conductive-pastes>. [cit. 2024-12-15].
- [35] TOUFAR, M. *Zjišťování spolehlivosti pájených spojů v ochranné atmosféře*. Online, Bakalářská práce, vedoucí doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87683. [cit. 2024-12-18].
- [36] SMART, SPOL. S R.O. *R500 – popis a servisní návod k obsluze, v. 0.04*. Online. POPIS A SERVISNÍ NÁVOD K OBSLUZE PROGRAMOVATELNÉHO REGULÁTORU ŘADY R500. Dostupné z: <http://www.smartbrno.cz/navod/R500-n.pdf>. [cit. 2024-12-18].
- [37] LEAD-FREE SOLDER PASTE PF 606-P30. *SHENMAO TECHNOLOGY*. Online. NeVo. 2015. Dostupné z: https://linkhamson.com/wp-content/uploads/2019/08/TDS_PF606-P30.pdf. [cit. 2024-12-18].
- [38] OTÁHAL, Alexandr; SKÁCEL, Josef a SZENDIUCH, Ivan. Investigation of Metallographic Etchants Selectivity for Tin Solder Alloys. Online. *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. 2020, s. 6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9121138>. [cit. 2025-04-04].

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

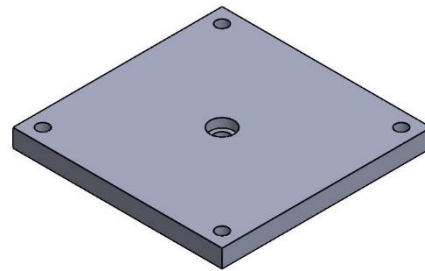
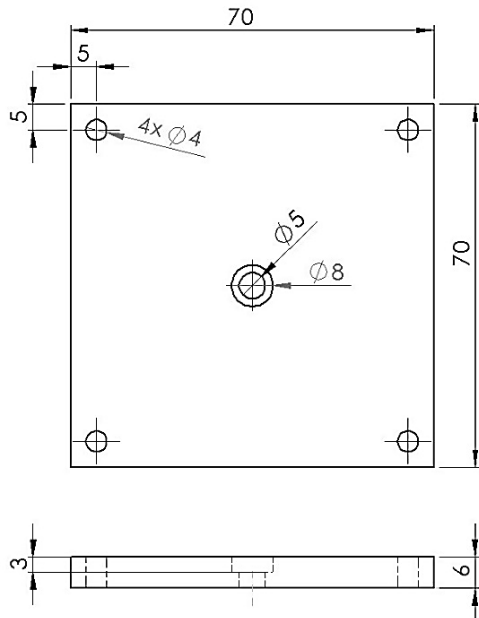
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
Cu	Meď – chemický prvok
Sn	Cín – chemický prvok
Pb	Olovo – chemický prvok
Ag	Striebro – chemický prvok
RoHS	<i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i> – Európska smernica o obmedzení používania určitých nebezpečných látok
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i> – Európska smernica o odpade z elektrických a elektronických zariadení
SAC305	Bezolovnatá spájkovacia zliatina Sn96,5/Ag3/Cu0,5
EÚ	Európska únia
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> – Organické prchavé zlúčeniny
IMC	<i>Intermetallic Compound</i> – Intermetalická zlúčenina
V	<i>Vapour</i> – Tavo + Prostredie
L	<i>Liquid</i> – Roztavená spájkovacia zliatina
S	<i>Solid</i> – Substrát
TLV	Hrubá vrstva – „Tlustá vrstva“
FR-4	Vrstvený materiál zo sklenenej tkaniny a epoxidu v samo-zhášajúcom prevedení
BGA	<i>Ball Grid Array</i> – Elektronické puzdro s guľôčkovými vývodmi

ZOZNAM PRÍLOH

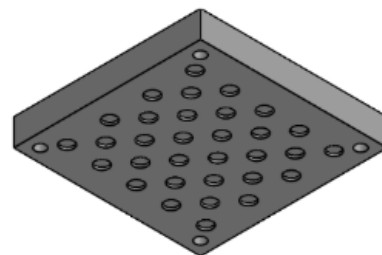
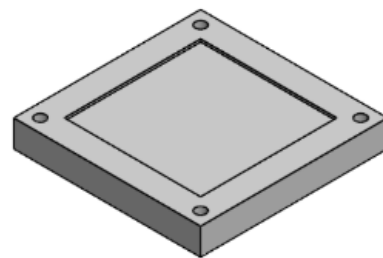
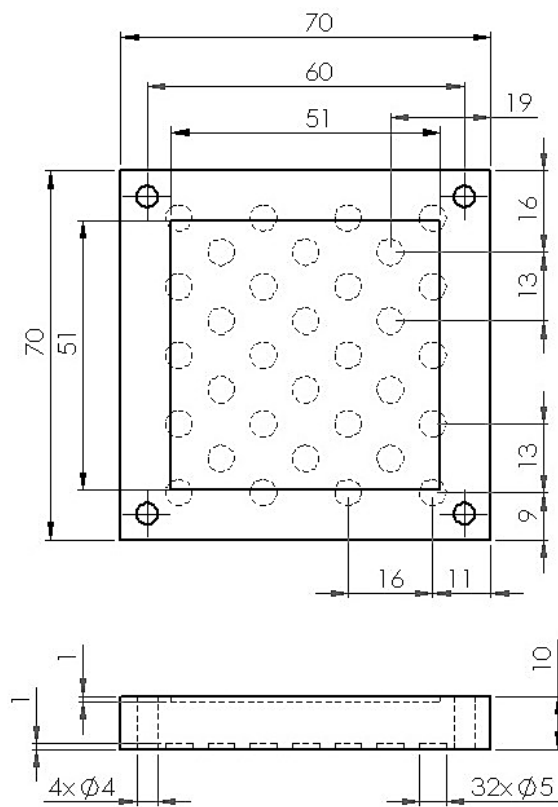
PRÍLOHA A – KONŠTRUKČNÉ ROZMERY APARATÚRY	73
PRÍLOHA B – TESTOVANIE TEPELNEJ VODIVOSTI.....	76
PRÍLOHA C – SCHÉMA ZAPOJENIA PRE SPÍNANIE VÝHREVNÝCH TELIES [35].....	77
PRÍLOHA D – SPÁJKOVACÍ TEPLTNÝ PROFIL	78
PRÍLOHA E – POVRCHOVÁ INTEGRITA SPÁJKY	79
PRÍLOHA F – VÝSLEDKY ANALÝZY VNÚTORNEJ ŠTRUKTÚRY	82
PRÍLOHA G – POROVNANIE ŠTRUKTÚRY POVRCHU SPÁJKY	86

Príloha A – Konštrukčné rozmery aparatury

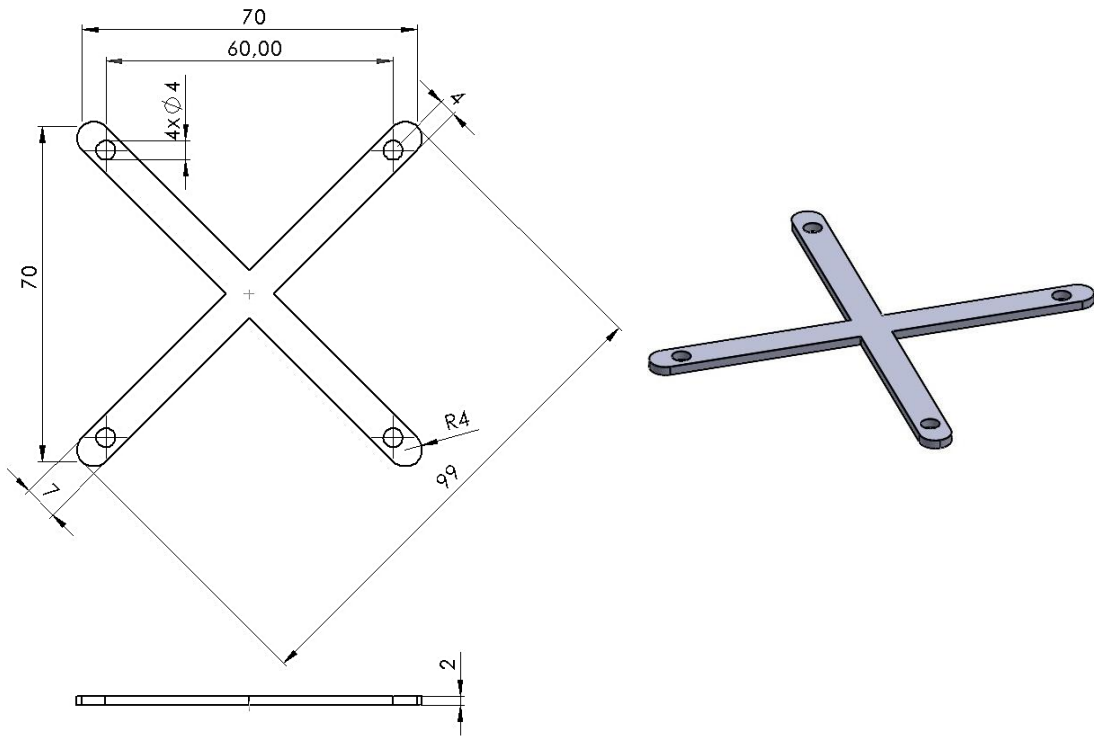
A.1 Nosná hliníková podložka



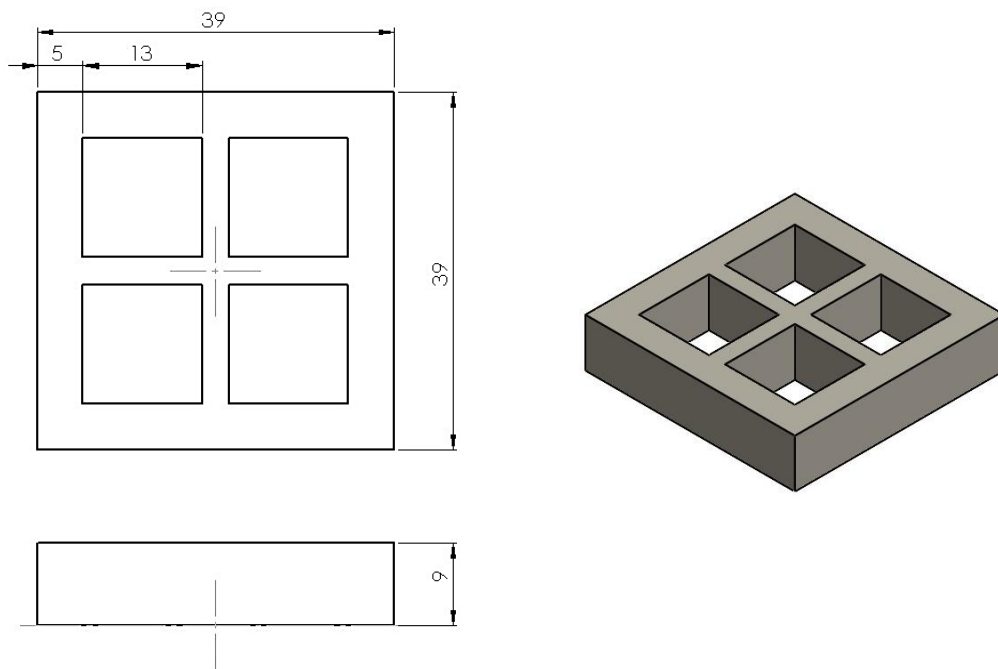
A.2 Izolačná podložka



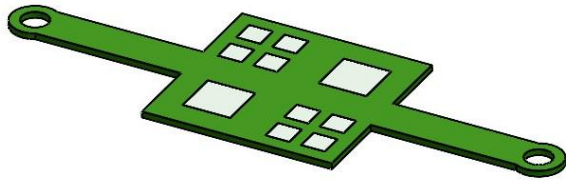
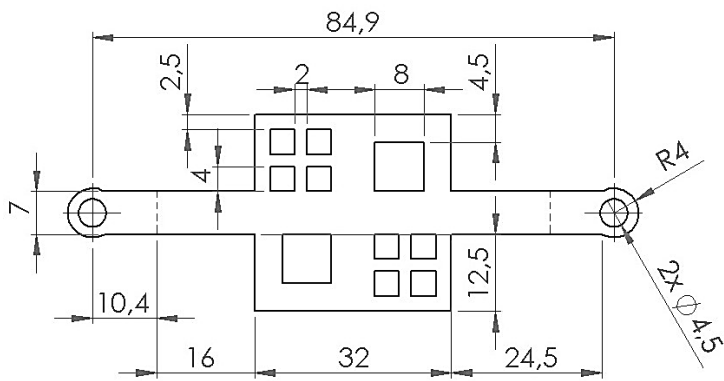
A.3 Upevňovací kríž



A.4 Distančná upevňovacia podložka

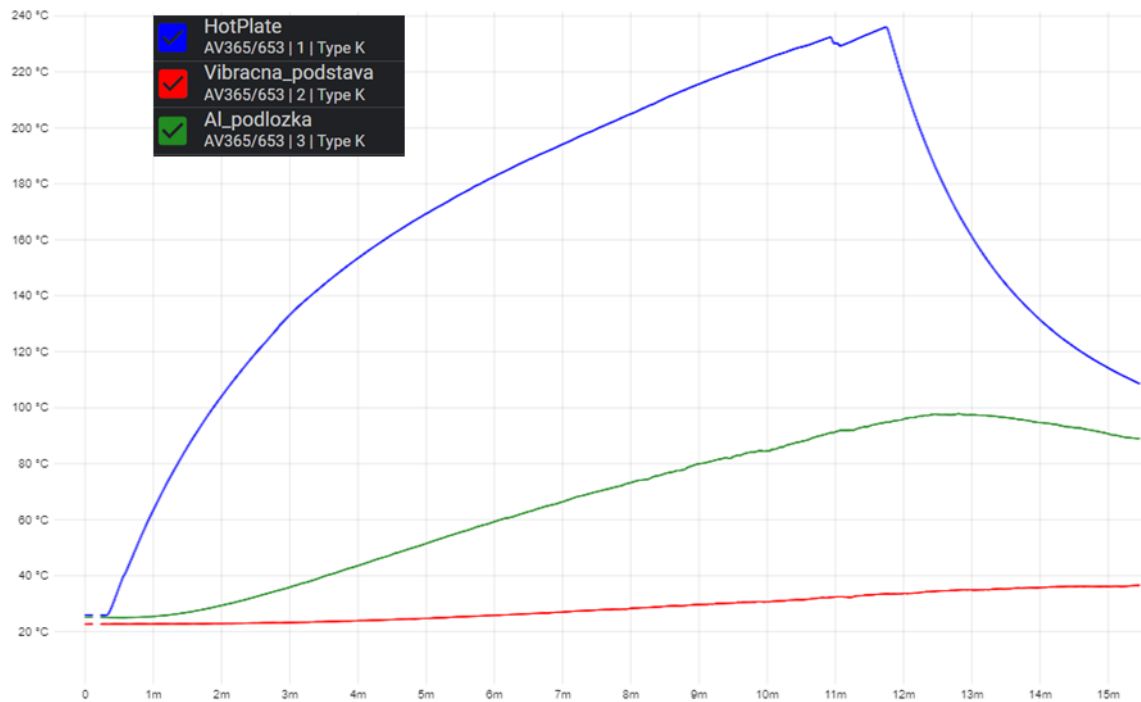


A.5 Testovacia DPS

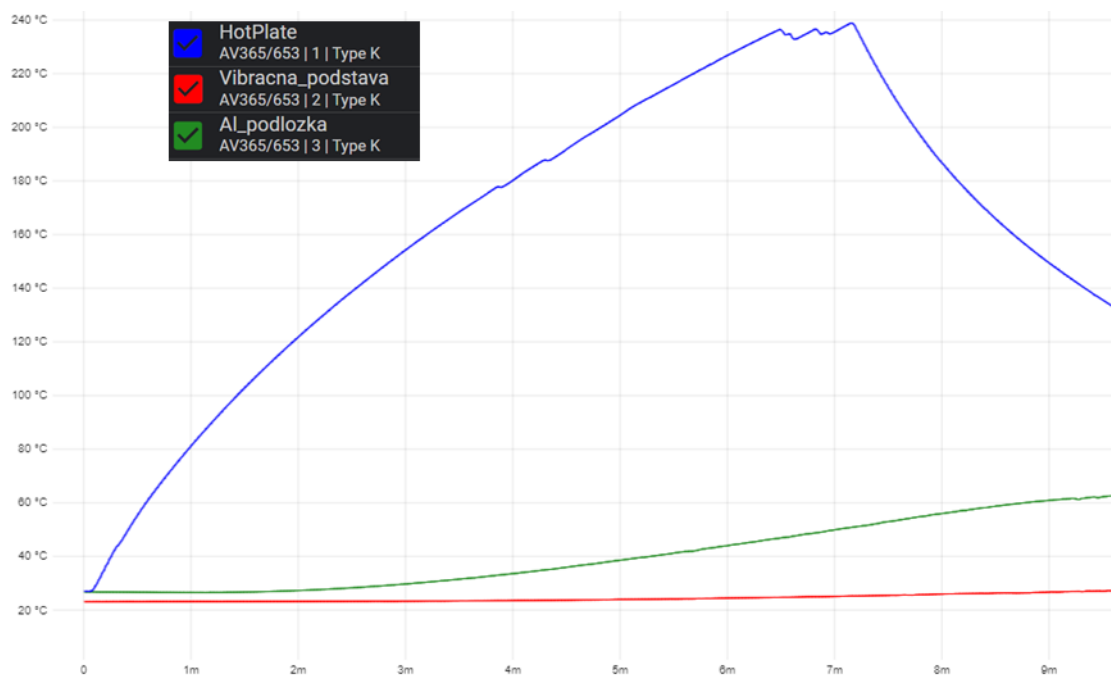


Príloha B – Testovanie tepelnej vodivosti

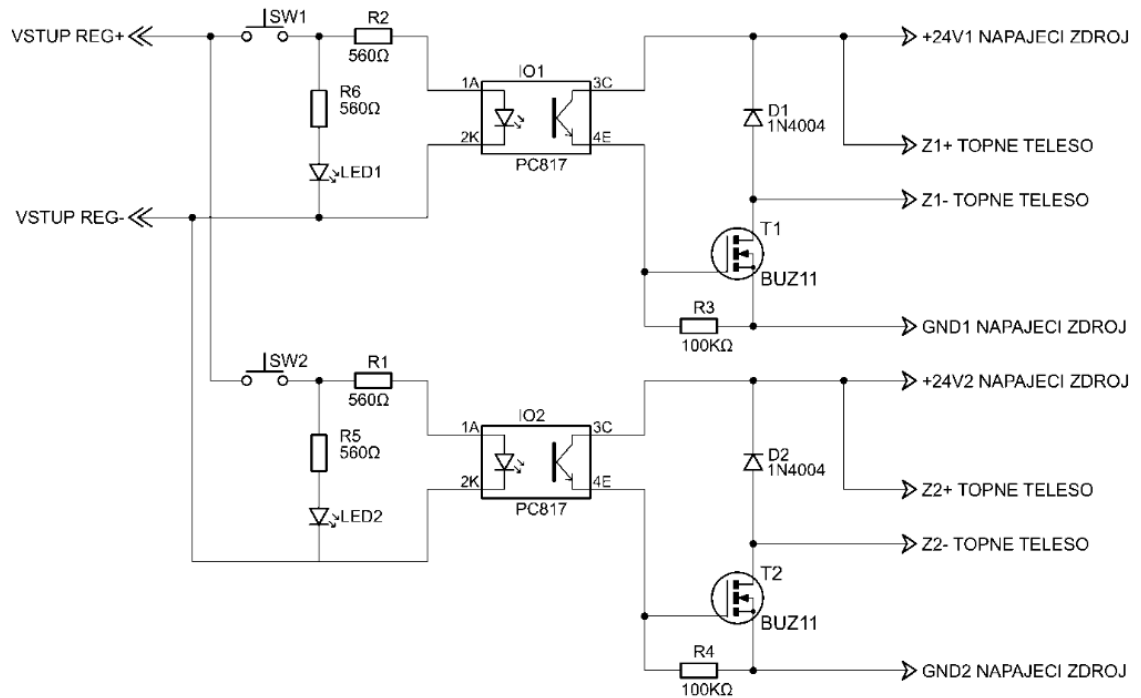
B.1 Zaznamenaný teplotný profil pre izolačnú podložku bez úprav



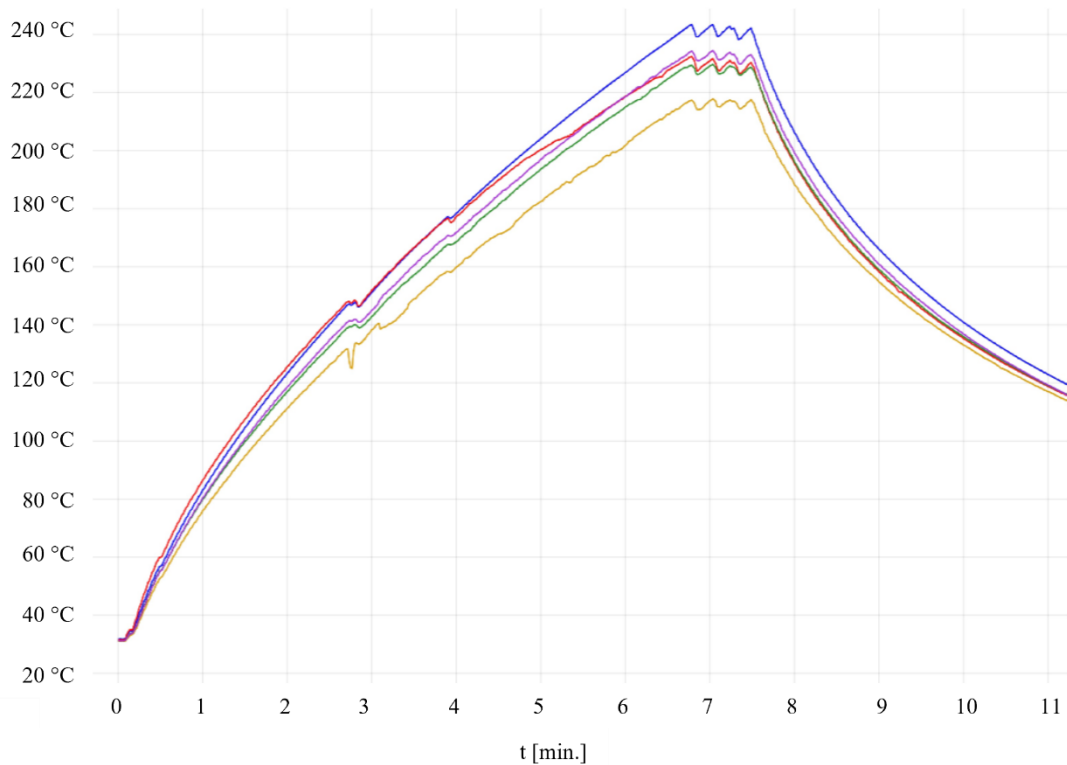
B.2 Zaznamenaný teplotný profil pre izolačnú podložku s úpravami



Príloha C – Schéma zapojenia pre spínanie výchrevných telies [35]



Príloha D – Spájkovací teplotný profil

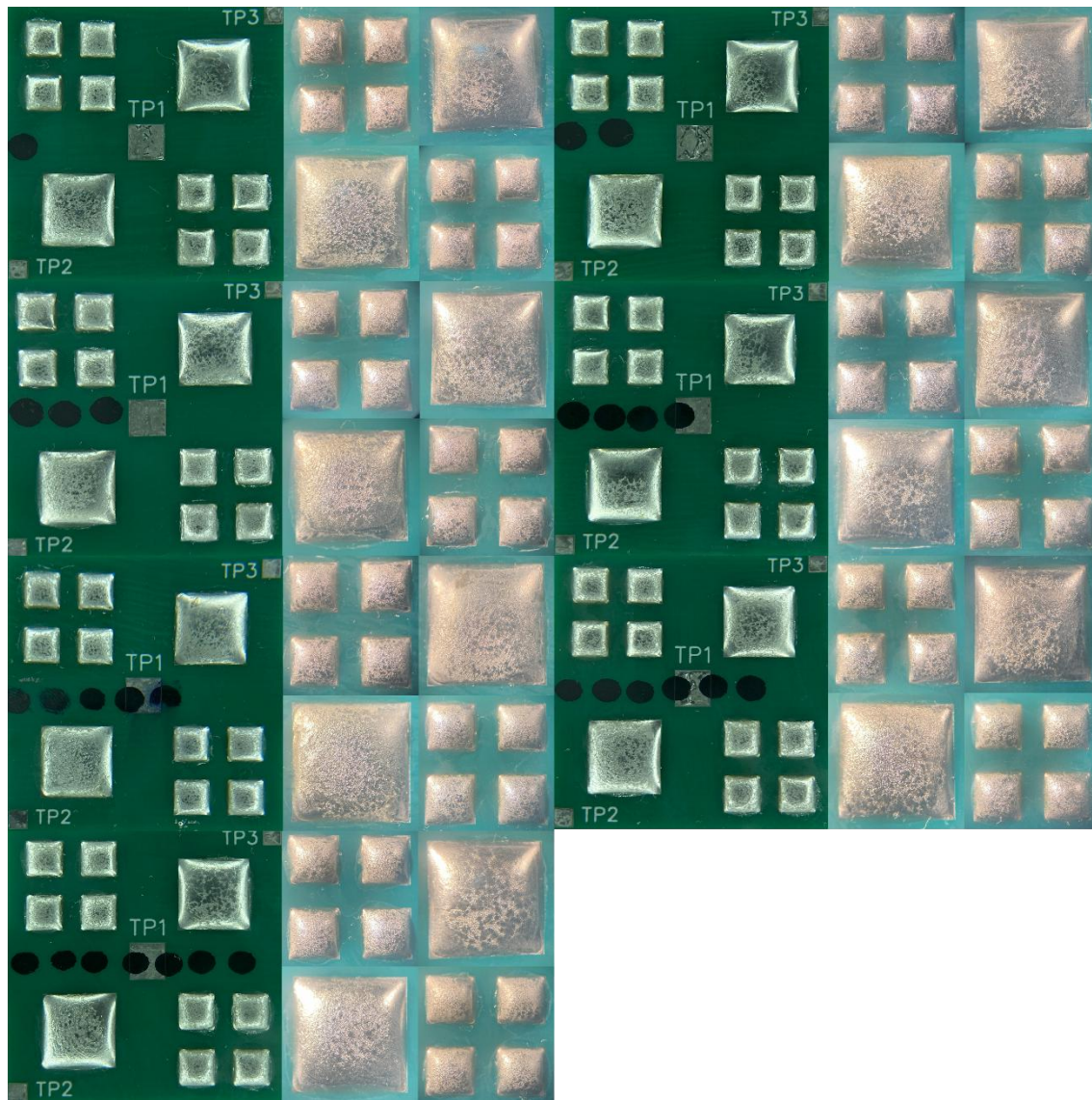


Channel configuration

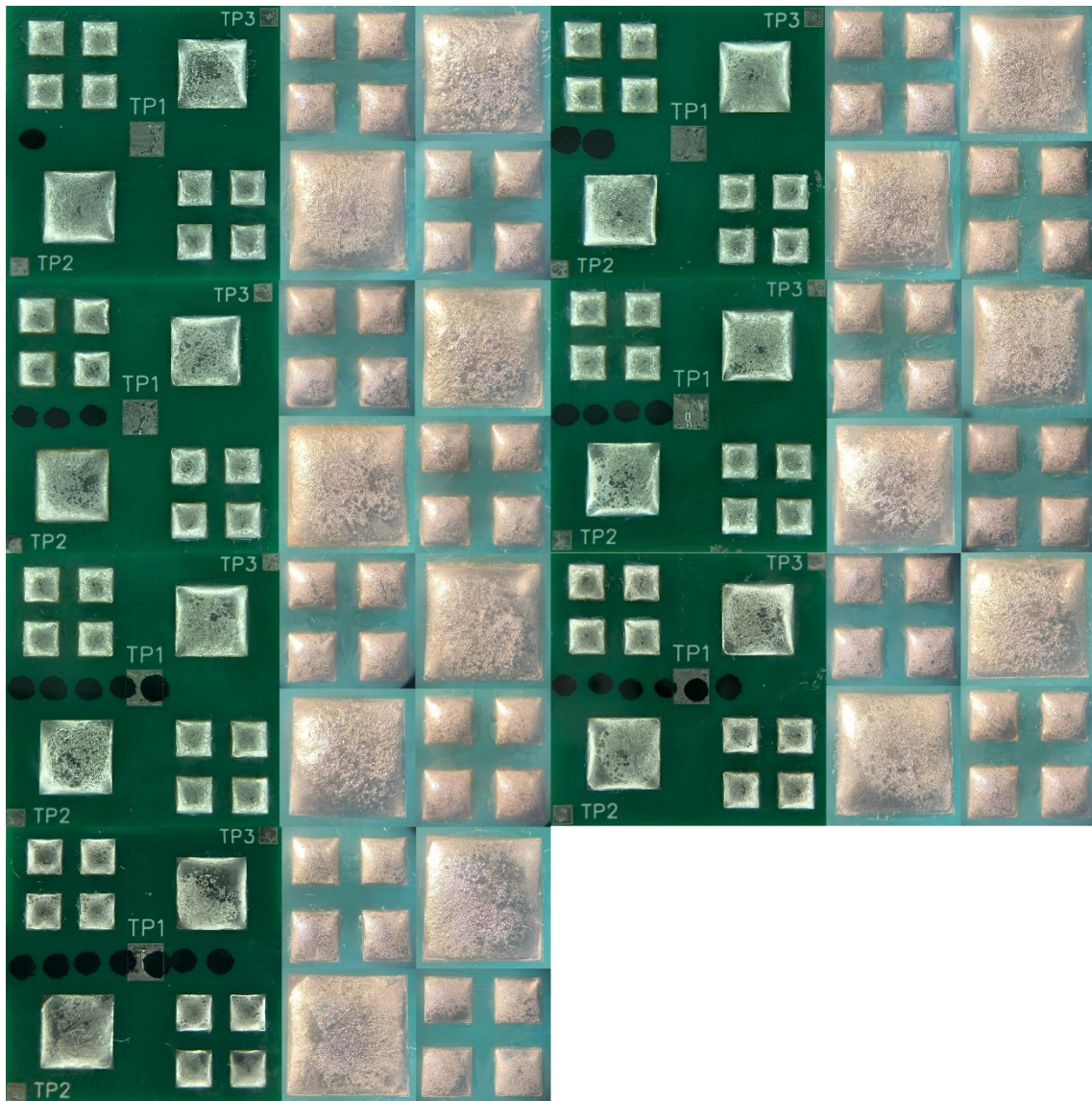
■	Regulator	AV365/653 1 Type K
■	SolderPad1	AV365/653 2 Type K
■	SolderPad3	AV365/653 3 Type K
■	SolderPad4	AV365/653 4 Type K
■	SolderPad2	AV365/653 5 Type K

Príloha E – Povrchová integrita spájky

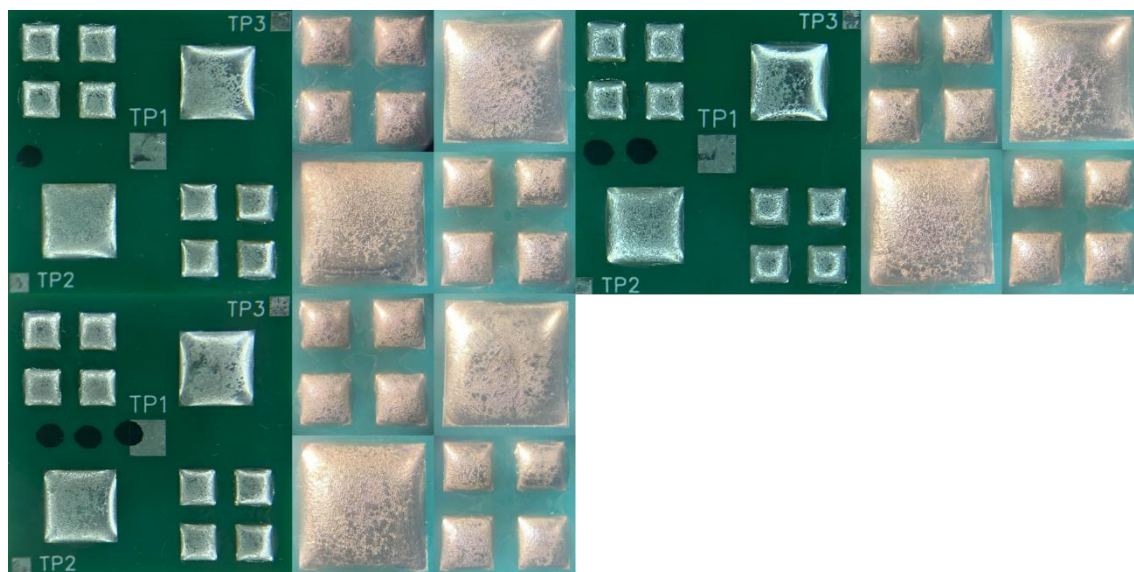
E.1 Referenčné vzorky



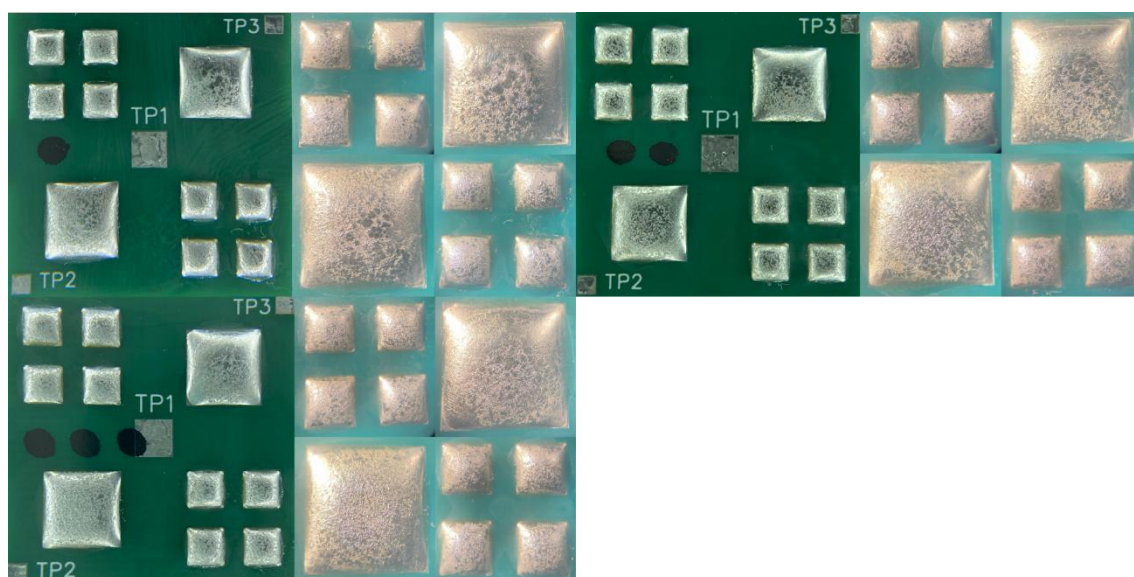
E.2 Vzorčky ovplyvnené pôsobením vibrácií 250 Hz



E.3 Vzorok ovplyvnené pôsobením vibrácií 2515 Hz, 20 W



E.4 Vzorok ovplyvnené pôsobením vibrácií 2515 Hz, 30 W

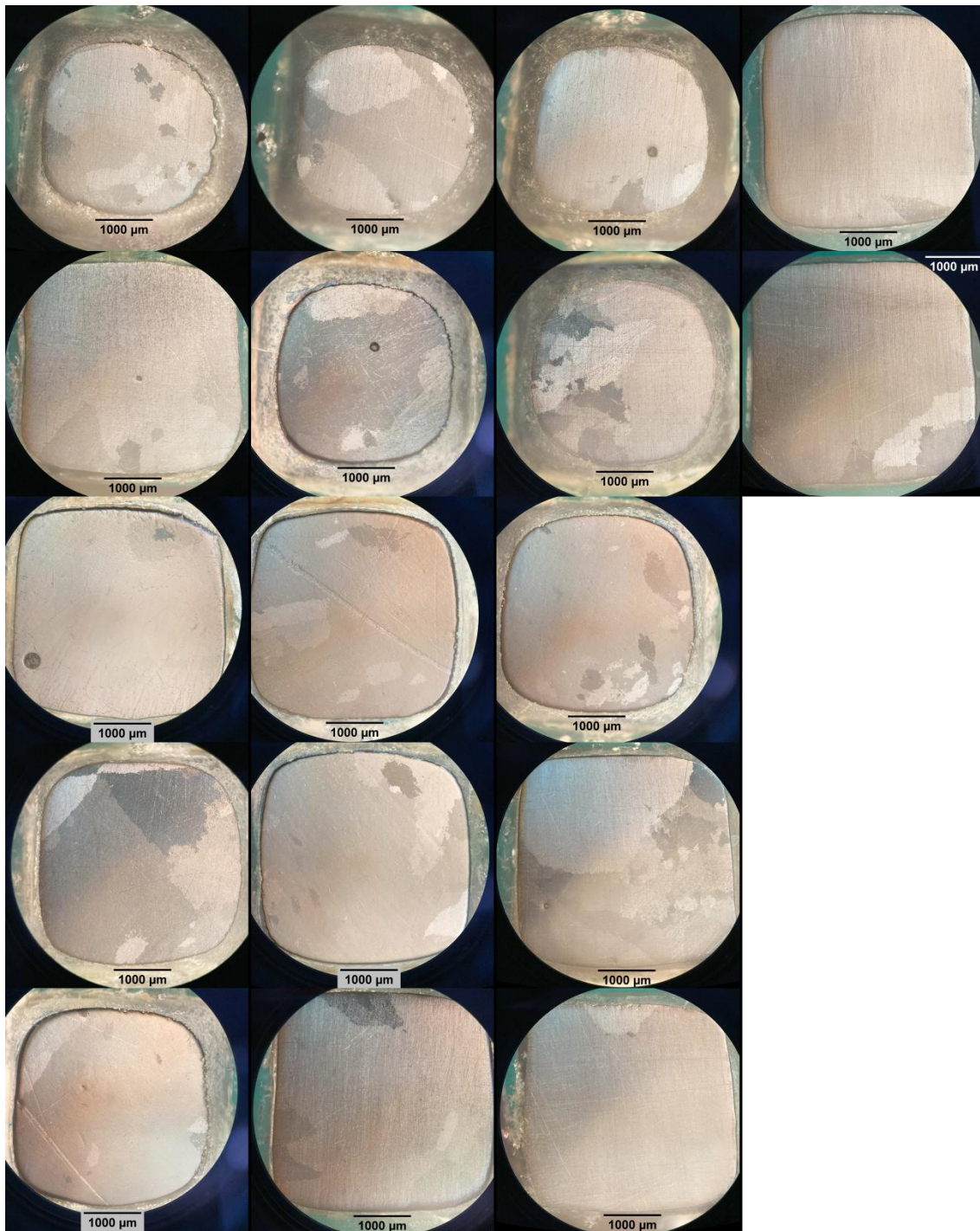


Príloha F – Výsledky analýzy vnútornej štruktúry

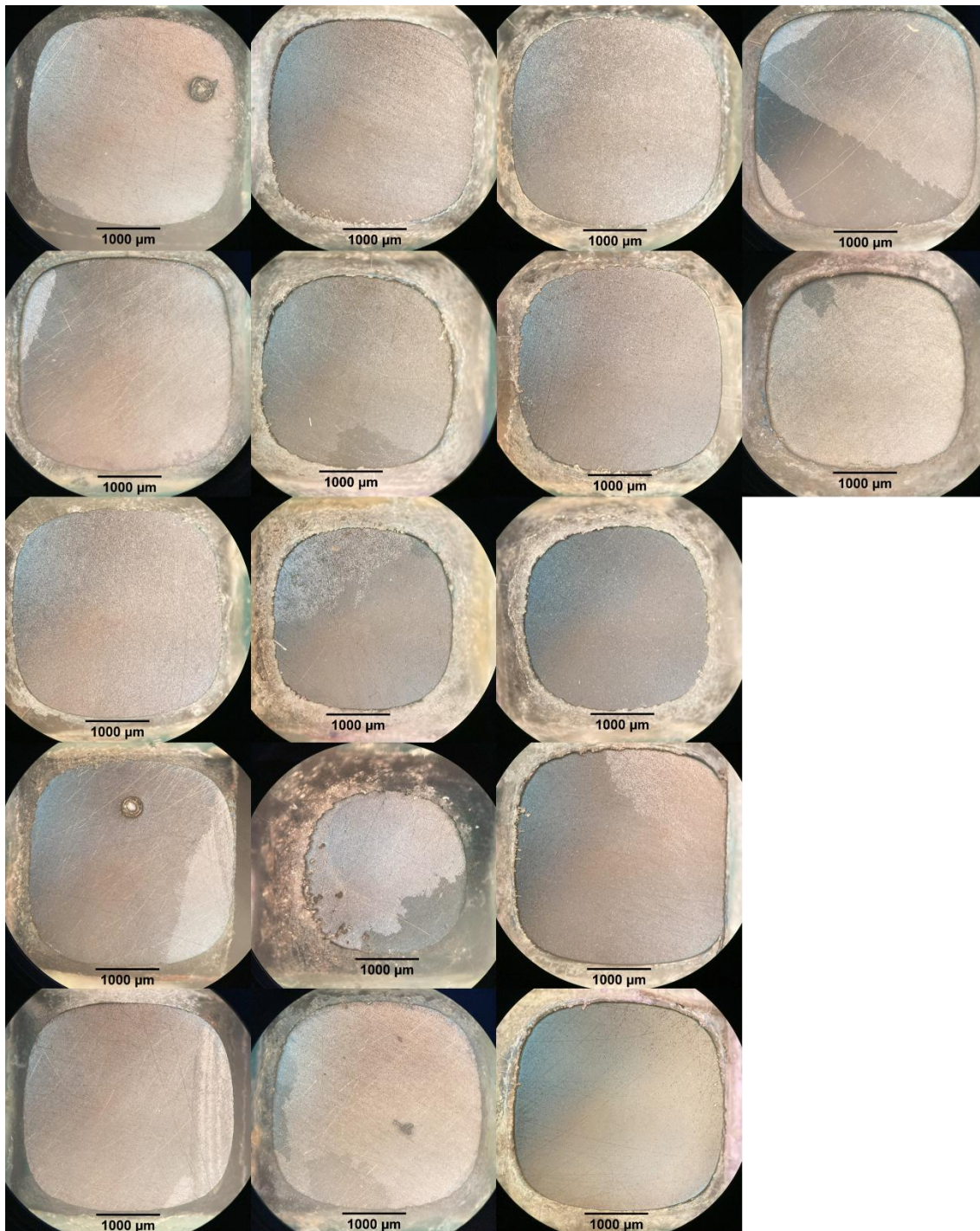
F.1 Referenčné vzorky



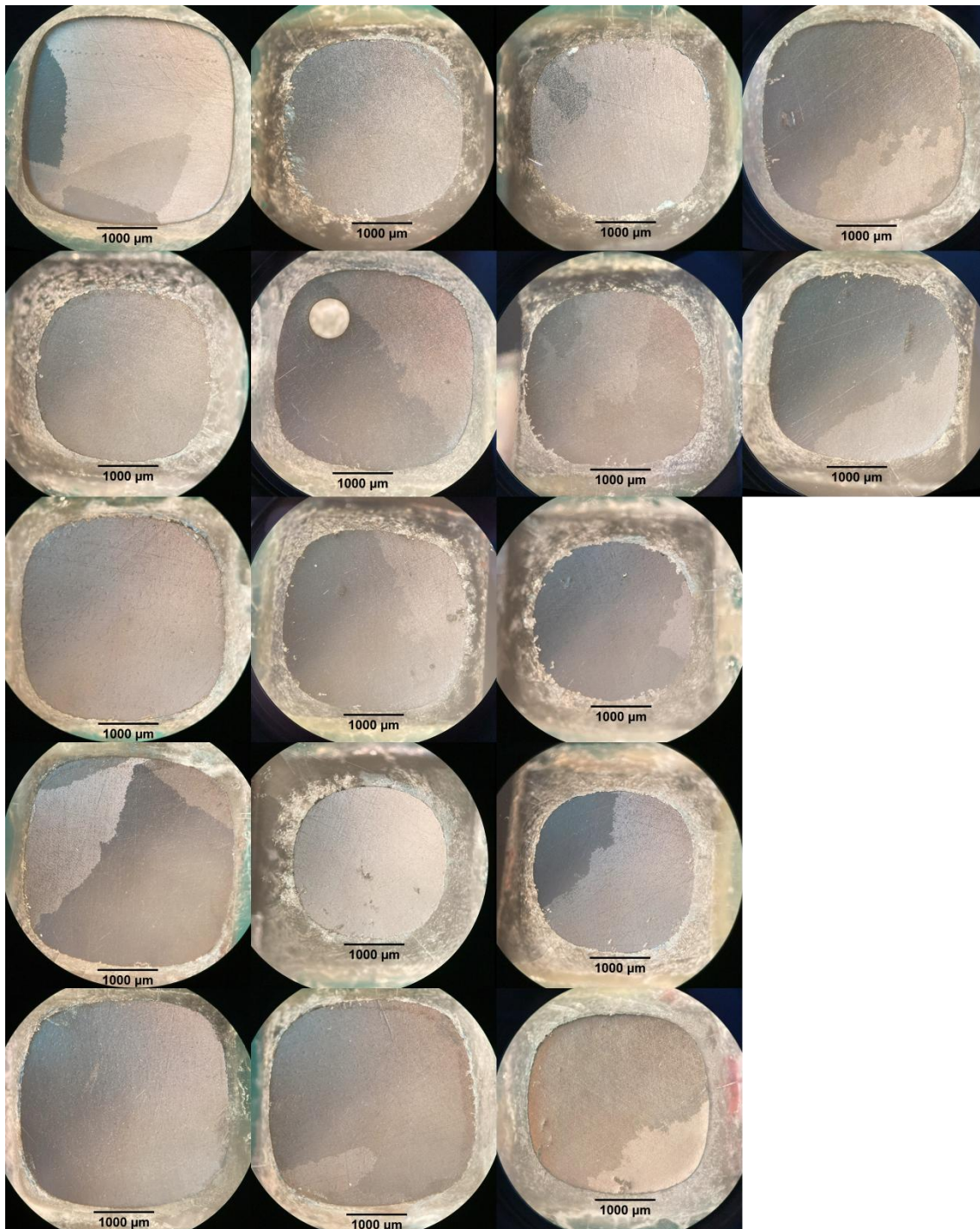
F.2 Vzorok ovplyvnené vibráciami pri frekvencii 250 Hz



F.3 Vzorok ovplyvnené vibráciami pri frekvencii 2515 Hz a výkone 20 W

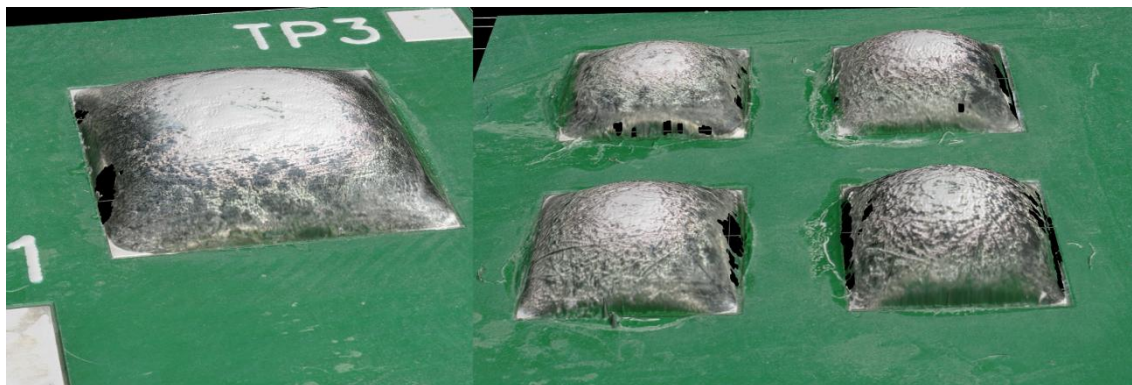


F.4 Vzorok ovplyvnené vibráciami pri frekvencii 2515 Hz a výkone 30 W



Príloha G – Porovnanie štruktúry povrchu spájky

G.1 Referenčné vzorky



G.2 Vzorky ovplyvnené vibráciami pri frekvencii 250 Hz

