

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

VÝVOJ METODY SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM VÝBOJEM NA KOMBINACI TENKOVRSŤVÝCH A TLUSTOVRSŤVÝCH STRUKTUR

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC SHOCK WELDING METHOD FOR A COMBINATION OF THIN-FILM AND THICK-FILM STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Hruška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Andrej Hruška

ID: 208641

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj metody svařování elektrickým výbojem na kombinaci tenkovrstvých a tlustovrstvých struktur

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte metody připojení vývodů na tenkou vrstvu a metody a materiály k tomuto účelu využívané. Vytvořte testovací vzorky navržené v semestrálním projektu pomocí metody vakuového napařování. Provedte experiment galvanického vytvoření měděné vrstvy na tenkovrstvých ploškách s následným ověřením metody připojení vývodů svařováním elektrickým výbojem a optimalizací tohoto procesu. Vytvořené spoje podrobte mechanickému testu a optické inspekci vnitřního rozhraní sváru. Dosažené výsledky popište v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

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

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Táto bakalárska práca sa na začiatku zaoberá rôznymi metódami pripojenia vývodov na hrubé a tenké vrstvy. Jednou z metód, na ktorú je táto práca najviac zameraná je metóda pripojenia vývodov zvaraním elektrickým výbojom. Cieľom praktickej časti bolo overiť, či sa táto metóda pripojenia vývodov dá uplatniť na kombinácii hrubovrstvových a tenkovrstvových aplikácií. Experiment zahrňoval vytvorenie šablóny na naparovanie, naparovanie tenkej vrstvy na substrát, následne jej galvanické zosilnenie a testovanie. Testovala sa mechanická pevnosť vytvorených zvarov v ťahu a na konci prebehla optická kontrola vnútorného rozhrania zvarov.

Kľúčové slová

Bodové zvaranie, tenké vrstvy, hrubé vrstvy, vývody, spájkovanie, galvanické pokovovanie, šablóna, naparovanie, mechanické testovanie, optická kontrola, výbrus

Abstract

At the start this bachelor thesis deals with connection methods of terminals on thick and thin-films. One of the methods, which this thesis is mostly orientated on, is a terminal connecting with the shock welding method. The point was to test, if this method of connecting terminals is suitable for a combination of the thick and thin-films applications. The experiment included making of template for vapour plating, vapour plating of thin-film on substrate, its galvanic plating and testing. Mechanical tensile strength of created welds was tested and in the end there was done the optical inspection of internal interface of welds.

Keywords

Spot welding, thin-films, thick-films, terminals, soldering, galvanic plating, template, vapour plating, mechanical testing, optical control, cut

Bibliografická citácia

HRUŠKA, Andrej. *Vývoj metody svařování elektrickým výbojem na kombinaci tenkovrstvých a tlustovrstvých struktur*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/130177>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	<i>Andrej Hruška</i>
VUT ID študenta:	<i>208641</i>
Typ práce:	<i>Bakalárska práca</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma záverečnej práce:	<i>Vývoj metody svařování elektrickým výbojem na kombinaci tenkovrstvých a tlustovrstvých struktur</i>

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som 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 vyhlasujem, 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 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 3.6.2021

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Alexandrovi Otáhalovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú, odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 3.6.2021

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	8
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. TENKÉ A HRUBÉ VRSTVY	12
1.1 TENKOVRSŤOVÉ TECHNOLOGIE	12
1.2 VÁKUOVÉ NAPAROVANIE	12
1.3 HRUBOVRSŤOVÉ TECHNOLOGIE	13
1.4 SIEŤOTLAČ	14
2. METÓDY PRIPOJENIA VÝVODOV PRE HRUBÉ A TENKÉ VRSTVY	15
2.1 SPÁJKOVANIE	15
2.1.1 Mäkké spájkovanie	15
2.1.2 Tvrdé spájkovanie	16
2.1.3 Spájkovanie pretavením	16
2.1.4 Laserové spájkovanie	16
2.1.5 Ultrazvukové spájkovanie	17
2.1.6 Výhody a nevýhody spájkovania	17
2.2 ZVÁRANIE	17
2.2.1 Ultrazvukové zváranie	17
2.2.2 Bodové zváranie	19
2.2.3 Výhody a nevýhody zvárania	20
3. PRAKTICKÁ ČASŤ	21
3.1 ÚPRAVA HROTOV RUČNÝCH ELEKTROD BODOVEJ ZVÁRAČKY	21
3.2 TESTOVANIE UPRAVENÝCH HROTOV RUČNÝCH ELEKTROD	25
3.3 NÁVRH TESTOVACEJ VZORKY S TENKOU VRSTVOU	27
3.4 VÝPOČET PARAMETROV POTREBNÝCH PRE GALVANICKÉ ZOSILNENIE TENKEJ VRSTVY	28
3.5 VYTvoreNIE MOTÍVU ŠABLÓNY	32
3.6 VÝMENA MEDENÝCH HROTOV RUČNÝCH ELEKTROD	34
3.7 NAPAROVANIE TENKEJ VRSTVY NIKELCHRÓMU	35
3.8 GALVANICKÉ POKOVOVANIE TENKEJ VRSTVY	38
3.9 NAPAROVANIE TENKEJ VRSTVY NIKELCHRÓMU A MEDI	40
3.10 GALVANICKÉ ZOSILNENIE NAPARENEJ TENKEJ VRSTVY MEDI A NIKELCHRÓMU	43
3.11 ZVÁRANIE VÝVODOV NA POKOVOVANÚ TENKÚ VRSTVU	45
3.12 MECHANICKÝ TEST V ŤAHU	51
3.13 VYTvoreNIE HRUBŠÍCH VRSTIEV MEDI A TESTOVANIE	52
3.14 OPTICKÁ KONTROLA VNÚTORNÉHO ROZHRAVIA ZVARU	57
ZÁVER	60
LITERATÚRA	62
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	65

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1 - Časti vákuového zariadenia [3].....	13
Obrázok 1.2 - Princíp sieťotlače [4].....	14
Obrázok 2.1 - Časti stroja na ultrazvukové zváranie [11]	18
Obrázok 2.2 - Princíp bodového zvárania [15]	19
Obrázok 3.1 - Bodová zvaračka Sunkko 709A: 1. Spínač pre spájkovanie a pre zváranie; 2. Konektor pre pripojenie pedálu; 3. Konektory pre pripojenie ručných elektród; 4. Elektródy umiestnené vo vnútri tela zvaračky; 5. Konektor pre pripojenie spájkovačky; 6. Regulátor teploty spájkovačky; 7. Nastavenie počtu pulzov zvárania; 8. Regulátor zvaracieho prúdu	22
Obrázok 3.2 - Opilovanie elektród pilníkom.....	23
Obrázok 3.3 - Hroty zvaracieho pera a) pred úpravou a b) po úprave	24
Obrázok 3.4 - Upravené hroty ručného zvaracieho pera pod mikroskopom	24
Obrázok 3.5 - Testovacia vzorka keramického substrátu so striebornou nepokovovanou hrubou vrstvou a železný pliešok pokovovaný niklom	25
Obrázok 3.6 - Zvary pri zvaracom prúde 360 A a 4 pulzoch.....	26
Obrázok 3.7 - Testovanie na vzorke: a) Zvar pri zvaracom prúde 420 A a 4 pulzoch; b) Diery v hrubej vrstve po odtrhnutí pliešku vplyvom leachingu	26
Obrázok 3.8 - Opálené medené elektródy po testovaní	27
Obrázok 3.9 - Navrhnutá testovacia vzorka s tenkou vrstvou.....	28
Obrázok 3.10 - Princíp galvanického zosilnenia medi	29
Obrázok 3.11 - Zariadenie s laserom CO ₂ od firmy Aurel typ ALS - 300.....	32
Obrázok 3.12 - Rezanie šablóny laserom	33
Obrázok 3.13 - Vyhotovená šablóna.....	33
Obrázok 3.14 - Zvaracie pero po vložení PVC materiálu.....	34
Obrázok 3.15 - Vľavo: Elektródy po upevnení do zvaracieho pera. Vpravo: Hroty elektród pod mikroskopom (zväčšenie 15-krát).....	34
Obrázok 3.16 - Vákuové naparovacie zariadenie.....	35
Obrázok 3.17 - Vnútna aparatúra: 1 - QCN senzor; 2 - miesto pre substrát; 3 - tieniaci prvok; 4 - elektródy s držiakmi	36
Obrázok 3.18 - Odtrhnutie šablón od substrátov.....	37
Obrázok 3.19 - Výsledné substráty s napareným motívom	37
Obrázok 3.20 - Pracovisko pre galvanické pokovovanie.....	38
Obrázok 3.21 - Výsledok galvanického pokovovania vzorky.....	39
Obrázok 3.22 - Výsledok galvanického pokovovania substrátu č.4.....	39
Obrázok 3.23 - Výsledky spektrálnej analýzy tenkej vrstvy substrátu č.4.....	40
Obrázok 3.24 - Pripevnenie substrátov so šablónami	41
Obrázok 3.25 - Elektródy a držiaky po vyčistení	42
Obrázok 3.26 - Naparené motívy tenkej vrstvy nikelchrómu a medi	42
Obrázok 3.27 - Vľavo: Substrát pred narezaním. Vpravo: Nalámané vzorky	43
Obrázok 3.28 - Vysušené galvanicky pokovované vzorky.....	44
Obrázok 3.29 - Vzorky pod mikroskopom: a) Nepokovovaná a b) pokovovaná tenká vrstva (zväčšenie 250x).....	44
Obrázok 3.30 - Hrubky pokovovanej medi: a) 10 μm, b) 20 μm a c) 30 μm.....	44
Obrázok 3.31 - Pracovisko pre pripojovanie vývodov bodovou zvaračkou.....	45
Obrázok 3.32 - Plôšky hrúbky 10 μm po zváraní: a) 250 A, 10 pulzov; b) 250 A, 14 pulzov; c) 225 A, 18 pulzov; d) 250 A, 18 pulzov (a), b), c) zväčšenie 20x a d) 1,5x).....	46

Obrázok 3.33 - Plôšky hrúbky 20 μm po zváraní 18 pulzmi a prúdmi a) 175 A a b) 200 A (a) zväčšenie 30x, b) zväčšenie 20x)	47
Obrázok 3.34 - Plôšky hrúbky 20 μm po zváraní 10 pulzmi a prúdmi a) 200 A a b) 175 A (zväčšenie 20x)	47
Obrázok 3.35 - Plôšky hrúbky 30 μm po zváraní 18 pulzmi a prúdmi a) 175 A a b) 225 A (zväčšenie 20x)	48
Obrázok 3.36 - a) Plôška hrúbky 30 μm po zváraní 14 pulzmi prúdom 175 A a b) spodná časť pliešku (zväčšenie 20x)	48
Obrázok 3.37 - Plôška hrúbky 30 μm po zváraní 14 pulzmi a prúdom 225 A (zväčšenie 20x).....	49
Obrázok 3.38 - a) Plôška hrúbky 30 μm po zváraní 10 pulzmi prúdom 175 A a b) spodná časť pliešku (zväčšenie 20x)	49
Obrázok 3.39 - Zariadenie pre meranie sily v ťahu [25]	51
Obrázok 3.40 - Vrstva hrúbky 55 μm pod mikroskopom	53
Obrázok 3.41 - Výbežky na plôške hrúbky 55 μm (zväčšenie 30x).....	53
Obrázok 3.42 - a) Zvyšky zosilnenej tenkej vrstvy plôšky hrúbky 55 μm a b) spodná časť pliešku s delaminovanou vrstvou (zväčšenie 20x)	54
Obrázok 3.43 - Vrstva hrúbky 80 μm pod mikroskopom	55
Obrázok 3.44 - a) Deformácia substrátu a b) prepálenie pliešku pri 18 pulzoch a prúde 275 A (a) zväčšenie 20x, b) zväčšenie 30x)	55
Obrázok 3.45 - a) Zvyšky zosilnenej tenkej vrstvy plôšky hrúbky 80 μm po delaminácii a b) pliešok s delaminovanou vrstvou (a) zväčšenie 20x, b) zväčšenie 30x)	56
Obrázok 3.46 - Vnútorne rozhranie zvaru pliešku č.1	58
Obrázok 3.47 - 1. zvar pliešku č.2	58
Obrázok 3.48 - 2. zvar pliešku č.2	59
Obrázok 3.49 - 3. zvar pliešku č.2	59

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 3.1 - Parametre zvaračky Sunkko 709A pre zváranie [22].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabuľka 3.2 - Doporučené hrúbky plieškov pre zváranie elektródami zvaračky Sunkko 709A [22]</i>	<i>23</i>
<i>Tabuľka 3.3 - Parametre balenia použitých plieškov pre testovanie.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabuľka 3.4 - Plocha a počet plôšok a vodivých ciest jednej dosky multimotívu</i>	<i>30</i>
<i>Tabuľka 3.5 - Nastavené parametre rezania</i>	<i>33</i>
<i>Tabuľka 3.6 - Výsledky testov bodového zvárania na tenkej vrstve.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabuľka 3.7 - Výsledné hodnoty mechanických testov v ťahu</i>	<i>52</i>
<i>Tabuľka 3.8 - Výsledky testov bodového zvárania na hrúbke vrstvy 55 μm</i>	<i>54</i>
<i>Tabuľka 3.9 - Výsledky bodového zvárania a mechanických testov zvarov v ťahu na hrúbke vrstvy 80 μm</i>	<i>56</i>

ÚVOD

Tenké a hrubé štruktúry sú v dnešnej dobe rozšírené v mnohých aplikáciách. Využívajú sa najmä v oblasti hybridných integrovaných obvodov vo forme pást s rôznym zložením závisiacim na charaktere pasty pre dané použitie napríklad vodivé (na vodivé spoje a štruktúry, plôšky), odporové (rôzne odporové vrstvy, rezistory), dielektrické a izolačné pasty (kapacity, krycie a izolačné vrstvy).

Po vytvorení daných hrubovrstvových a tenkovrstvových štruktúr na hybridné integrované obvody alebo aj iné obvody sa v mnohých prípadoch pripojujú vývody. Najznámejšia a najrozšírenejšia metóda pripojenia vývodov je pripojenie spájkovaním. Metóda má však svoje výhody aj nevýhody. U metódy spájkovania je veľkou nevýhodou tepelné namáhanie spoja, ktoré môže pôsobiť pri danej metóde aj viackrát v prípade zlého prispájkovania vývodu, pričom je potrebné znovu nahriatie spoja, a tým môže dôjsť k poškodeniu vodivej vrstvy substrátu. Existuje však aj mnoho iných metód. Jednou z nich je metóda bodového zvarovania.

Táto práca sa práve zaoberá metódou bodového zvarovania vývodov na galvanicky zosilnenú tenkú vrstvu. Je rozdelená na niekoľko častí.

Teoretická časť sa venuje známym metódam pripojovania vývodov, z ktorých hlavnou prioritou je metóda bodového zvarovania vývodov.

Praktická časť obsahuje časť úpravy zvaracieho zariadenia z pohľadu zmenšenia rozmerov a rozstupu elektród. Následne skúma problematiku tejto metódy a overuje jej vhodnosť použitia na striebornej hrubej vrstve pre overenie vhodnosti úpravy elektród. Hlavnou súčasťou praktickej časti je experiment, v ktorom bola overená možnosť použitia bodového zvarovania pre pripojovanie vývodov na galvanicky zosilnenú tenkú vrstvu.

1. TENKÉ A HRUBÉ VRSTVY

Vrstvové technológie sa rozdeľujú podľa hrúbky vrstvy na tenkovrstvové a hrubovrstvové.

Tenké vrstvy sa využívajú pre presné aplikácie alebo aplikácie s veľkou hustotou montáže. Tieto vrstvy sú drahé, čo sa týka vyrobiteľnosti a potrebnej vyššej kvalifikácie pracovníkov. [1]

Hrubé vrstvy sa používajú častejšie než tenké, kvôli tomu, že sú lacnejšie a sú jednoduchšie z hľadiska výroby. Využívajú sa pre aplikácie, ktoré vyžadujú väčšie výkonové zaťaženie. [1]

Ako materiály pre substrát sa najčastejšie používa korundová keramika Al_2O_3 . Odoláva mechanickým vplyvom, vysokým teplotám. Má výborné elektroizolačné vlastnosti a vysokú tepelnú vodivosť. Okrem keramiky sa používa aj sklo, kovy, fólie a aj textil.

1.1 Tenkovrstvové technológie

Tenké vrstvy sú vrstvy s hrúbkou menšou než niekoľko mikrometrov (10 nm až 1 μ m).

Existuje viacero technológií nanášania tenkých vrstiev na substrát. Najznámejšou je vákuové naparovanie.

1.2 Vákuové naparovanie

Hlavnou podstatou tejto technológie je uvoľňovanie molekúl naparovaného materiálu jeho zahrievaním v uzavretom systéme. V tomto systéme sa ustanoví rovnovážny tlak (tenzia nasýtených pár). Ak sa poruší termodynamická rovnováha v uzavretom systéme, t.j. v určitom mieste bude teplota nižšia, tak na tomto mieste dôjde ku kondenzácii pár. Týmto spôsobom sa prenáša nanášaný materiál z miesta s najvyššou teplotou (z výparníku, na ktorom je umiestnený nanášaný materiál) na chladnejšie miesto (substrát so šablónou). Na chladnejšom substráte dochádza ku kondenzácii pár a k rastu zárodkov odparovaného materiálu až k vytvoreniu samotnej tenkej vrstvy. [2]

Zariadenie vákuového naparovania má väčšinou zvonový tvar. Vnútri je umiestnený výparník s nanášaným materiálom a hore vo vhodnej vzdialenosti je umiestnený držiak, na ktorom sú uchytené substráty (viď Obrázok 1.1). [2]

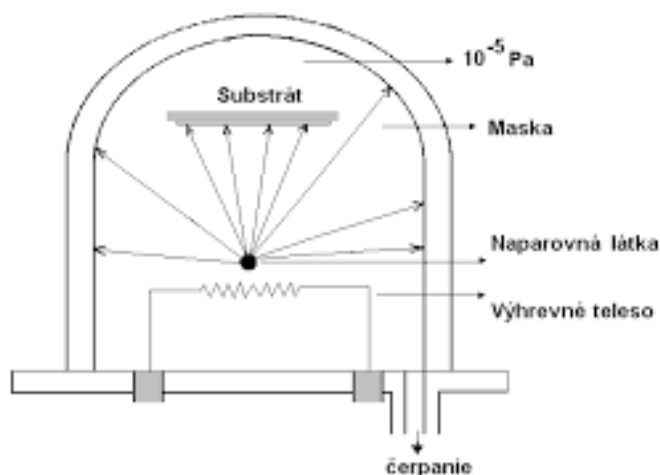
Aby sa dosiahla čo najdlhšia priamočiara a stredná dráha molekúl, tak celý proces prebieha vo vákuu (10^{-4} - 10^{-6} Pa). Odparovanie nanášaného materiálu sa uskutočňuje dodaním rôznych typov energie ako napr. odporovým ohrevom a ohrevom iónovým zväzkom. Počet odparených častíc z jednotkovej plochy za jednotku času je daný: [2]

$$N_v = 3,5 \cdot 10^{22} \cdot \frac{p_n}{(M \cdot T)^{\frac{1}{2}}} \quad [-; Pa, kg/mol, ^\circ C] \quad (1.1)$$

kde p_n je rovnovážny tlak nasýtených pár,
 M je mólová hmotnosť,
 T je teplota.

Po odstránení šablóny je dobré dať vytvorenú tenkú vrstvu žihať do pece pri teplotách okolo $250^\circ C$, aby došlo k stabilizácii vzniknutej vrstvy a eliminácii porúch v štruktúre. [2]

Ďalšími dôležitými parametrami, ktoré by sa mali v priebehu procesu kontrolovať sú tlak zvyškových pár, teplota a štruktúra podložky, rýchlosť odparovania a adsorpcia zvyškových plynov. Veľký dôraz sa kladie na čistotu a hladkosť povrchu naparovaného substrátu. [2]



Obrázok 1.1 - Časti vákuového zariadenia [3]

1.3 Hrubovrstvové technológie

Hrubou vrstvou je vrstva materiálu, ktorej hrúbka je minimálne 10 krát väčšia než stredná dráha elektrónu v danom materiály, čo je približne 1 mm. [1]

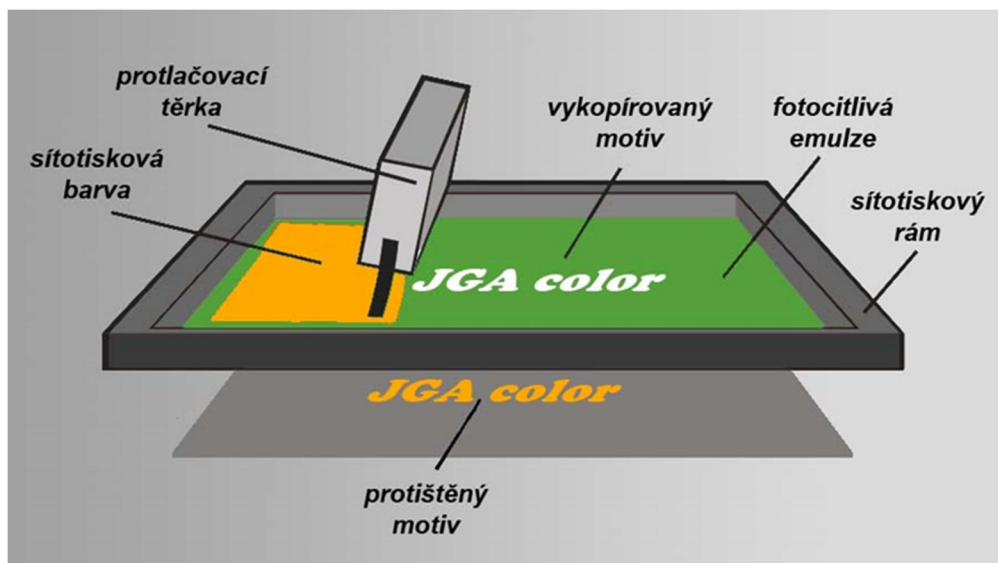
Tieto vrstvy sa vyrábajú nevákuovou technológiou. Funkčný materiál sa nanáša na substrát vo forme pasty aditívnym spôsobom. Týmto pastami je možné podľa ich charakteru vytvárať odporové, vodivé, dielektrické a izolačné vrstvy.

Existuje veľa spôsobov nanášania hrubých pást na substrát. Najčastejšie sa používa nanášanie sieťotlačou.

1.4 Sieťotlač

Pri tejto metóde sa cez sito s tkaninou opatrenou šablónou stierkou nanáša dané množstvo pasty na substrát (viď Obrázok 1.2).

Hlavnými parametrami určujúcimi hrúbku natlačenej vrstvy sú viskozita a povrchové napätie pasty, nasiakavosť podložky a vlákien tkaniny, sklon, rýchlosť a prítlačná sila stierky, odtrh (t.j. vzdialenosť tkaniny sita od povrchu substrátu). Odtrh zabezpečuje, aby sa nanášaná pasta nezachytávala pri nanášaní na substrát v okách sita. Pri zachovaní odtrhu sa pri nanášaní pasty cez sito tkanina sita vychýli z napnutej polohy a po pôsobení prítlačnej sily sa vráti naspäť do rovnovážnej a pasta zostane naviazaná na substráte, a nie v okách sita.



Obrázok 1.2 - Princíp sieťotlače [4]

2. METÓDY PRIPOJENIA VÝVODOV PRE HRUBÉ A TENKÉ VRSTVY

Pri vytvorení aplikácii na báze tenkovrstvových a hrubovrstvových technológií, napr. HIO je častokrát potrebné tieto aplikácie prepojiť s ďalšími aplikáciami. Spoľahlivosť prepojenia závisí na materiáloch a vlastnostiach vývodov (teplotná rozťažnosť, mechanická a elektrická odolnosť, tepelné namáhanie) a na spôsobe pripojenia vývodov.

Existuje viacero metód pripojenia vývodov ako napr. spájkovanie, kontaktovanie, zváranie.

2.1 Spájkovanie

Spájkovanie je proces, pri ktorom dochádza k vodivému spojeniu dvoch alebo viacerých kovov pomocou ľahko taviteľných zliatin. Táto zliatina musí mať nižšiu teplotu tavenia než spojovaný materiál. Tento proces je najznámejší a najpoužívanejší pri spojovaní súčiastok, vývodov v oblasti elektrotechniky. Pri procese spájkovania dochádza k chemickým reakciám, ktoré sú výsledkom zmáčania danej zliatiny kovov (spájky) a tvorby intermetalických zlúčenín medzi spájkou a spájaným materiálom.

Výsledný spoj musí byť kvalitný a musí mať dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Kvalitu spoja zaručuje vytvorenie vhodnej intermetalickej zlúčeniny, správnu aplikáciou spájky, voľbou vhodného tavidla. Tavidlo je látka, ktorá môže byť v rôznych skupenstvách. Znižuje povrchové napätie použitej spájky a tým zabezpečí vhodné zmáčanie so spájkovaným povrchom. Vyrába sa buď samostatne alebo je súčasťou spájky dodanej vo forme trubičiek, guličiek, tyčí, fólií atď.

Zlyhanie niektorých uvedených faktorov môže mať za následok vznik nekvalitného spoja so zhoršenými vlastnosťami.

Spájkovanie sa delí z hľadiska použitej spájky na tvrdé a mäkké spájkovanie.

2.1.1 Mäkké spájkovanie

Mäkkým spájkovaním je možné spájať všetky kovy, ktoré nie sú vystavené príliš veľkému zaťaženiu [5]. Sú to všetky druhy spájkovania s teplotou menšou ako 450°C [6]. Ako materiály spájky sa najčastejšie používa cín s teplotou topenia 232°C alebo jeho zliatiny s olovom (teplota tavenia 327°C), zinkom alebo striebrom. Ďalej sa používajú spájky na báze zinku a kadmia, spájky na báze bizmutu a iných nízkotaviteľných kovov. Donedávna sa používala zliatina cínu a olova v eutektickom zložení (63%Sn a 37%Pb s prípadnými prísadami bizmutu, antimónu a meďi) [7]. Teplota tavenia tejto zliatiny je v rozsahu 183-189°C (závisí od koncentrácie Sn a Pb). Cín má dobré zmáčacie charakteristiky a jeho oxidy je možné ľahko odstrániť voľbou vhodného málo reaktívneho tavidla [8].

Dnes sa z ekologických dôvodov upúšťa od týchto spájok obsahujúcich olovo a uprednostňuje sa používanie bezolovnatých spájok, ktoré sa ale vyznačujú horšími mechanickými vlastnosťami. Obsahujú vyšší podiel cínu v zliatine a tým je potrebná vyššia teplota spájkovania. Oproti olovnatým spájkam majú bezolovnaté spájky väčšie povrchové napätie, čo spôsobuje že sa tvorí guľička spájky. Najznámejšími bezolovnatými spájkami sú spájky SAC (obsahujú Sn-Ag-Cu v rôznych pomeroch v percentách), SN100C (99,3%Sn-0,7%Cu-0,05%Ni-0,005%Ge) a SnCu. Spájka SN100C má podobné vlastnosti ako olovnatá spájka SnPb. [8]

Spoje spájkované mäkkým spájkovaním majú obecnú malú pevnosť v ťahu (20- 80 MPa) [6]. Používajú sa najmä v oblasti klampiarstva, pri mäkkom spájkovaní hliníka, v elektrotechnike pri výrobe spojov [7].

2.1.2 Tvrde spájkovanie

Naopak tvrde spájkovanie sa používa pre aplikácie, ktoré sú vystavené veľkému zaťaženiu. Ako materiály spájky sa pri tvrdom spájkovaní používajú spájky s teplotou tavenia nad 450°C. Najmä zliatiny na báze striebra (strieborné spájky) s prídavkami kovov ako Zn, Cu, Cd a Mn. Strieborné spájky sa vyznačujú veľkou pevnosťou a sú vhodné na spájkovanie viacerých kovov ako napr. mosadze, medi, bronzu a niklu. Okrem strieborných spájok sa používajú aj mosadzné, medené a hliníkové spájky. [9]

Tvrde spájkovanie je vhodné na spájkovanie dvoch rovnakých ale aj odlišných kovov s teplotou tavenia nad 1000°C s požiadavkami na vyššiu mechanickú a tepelnú odolnosť. [9]

V elektrotechnike sa používa najmä na spájkovanie puzdier.

2.1.3 Spájkovanie pretavením

Tento spôsob spájkovania je vhodný pre pripojenie vývodov na hrubé vrstvy. Súčiastky alebo aj vývody sa osadzujú do spájkovacej pasty, ktorá sa následne pretaví pri vyššej teplote. Pri procese pretavenia pasty sú súčiastky vplyvom povrchového napätia vycentrovane na plošky. Aby vznikol kvalitný a vodivý spoj, tak treba nastaviť vhodný teplotný profil taviacej pece. [8]

Táto metóda má výhody oproti ručnému spájkovaniu a spájkovaniu vlnou a to, že dochádza k šetrnému využitiu tavidla a spájkovacej pasty aplikovaním len na potrebné miesta, na ktorých má vzniknúť spoj. Ďalej pri procese nedochádza k nekontrolovateľnej prítomnosti nečistôt a spájkovací proces prebieha bez teplotných nárazov. [8]

2.1.4 Laserové spájkovanie

Na spájkovanie sa používa fokusovaný laserový lúč koherentného elektromagnetického žiarenia pracujúceho v spektre vlnových dĺžok medzi UV a IR. laserovým lúčom sú ohrievané miesta, kde sa pretavuje spájkovacia pasta aj trubičková spájka. [8]

Táto metóda sa používa pre tvrdé aj mäkké spájkovanie, pre spájkovanie teplotne citlivých súčiastok a súčiastok citlivých na vlhkosť. Je to bezkontaktná metóda spájkovania. Používajú sa rôzne typy laserov ako CO₂ laser, Nd: YAG laser a diódový laser. [8]

2.1.5 Ultrazvukové spájkovanie

Je to proces využívajúci jav vibrácie a kavitácie. Ultrazvuk sa prenáša prostredím (spájkou) pomocou pozdĺžnych tlakových vln, tým, že indikujú vibračný pohyb molekúl, ktoré striedavo stlačujú alebo predlžujú molekulovú štruktúru podľa toho ako sa s časom mení tlak prostredia. Molekuly oscilujú okolo rovnovážnych polôh a pri väčšej dávke ultrazvuku dôjde k prerušeniu medzimolekulových síl a tým sa poruší štruktúra spájky a vytvorí sa kavitačná bublina. Na hranici medzi základným materiálom a roztavenou spájkou sa vytvárajú dutiny z kavit vo forme peny ako výsledok kavitácie. Touto metódou spájkovania sa môžu spájať kovy aj nekovy. [8]

2.1.6 Výhody a nevýhody spájkovania

Výhodou metódy spájkovania je vytvorenie spoľahlivého a pevného spoja voľbou vhodného materiálu spájky a tavidla, vhodnej metódy spájkovania, teploty spájkovačky a spájky.

Nevýhodu čo sa týka spájkovania na tenké vrstvy je, že voľbou nevhodnej spájky a teploty procesu spájkovania dôjde k difúzii tenkej vrstvy do spájky. U hrubej vrstvy je problémom jav leaching, pri ktorom dôjde k odzmačaniu vrstvy do roztavenej spájky. Je to spôsobené najmä nekompatibilitou spájky alebo agresívnym tavidlom.

Ďalším problémom je, že pri nesprávnej aplikácii spájky vznikajú studené spoje a voidy (diery). Pri prekročení doporučenej teploty spájkovacieho procesu dochádza k rastu vytvoreného intermetalického spoja, ktorý prispieva k zníženiu odolnosti spoja. Pri nesprávnom spájkovaní spoja je nutné spoj znovu nahriať spájkovačkou. Viacnásobné nahrievanie môže prispieť k termomechanickému namáhaniu spoja a vývodu.

2.2 Zváranie

2.2.1 Ultrazvukové zváranie

Princíp zvárania je založený na premene vysokofrekvenčnej elektrickej energie na mechanické vibrácie sústredené do zvárannej oblasti. Ultrazvuková zváračka sa skladá zo 4 častí (viď Obrázok 2.1). [10]

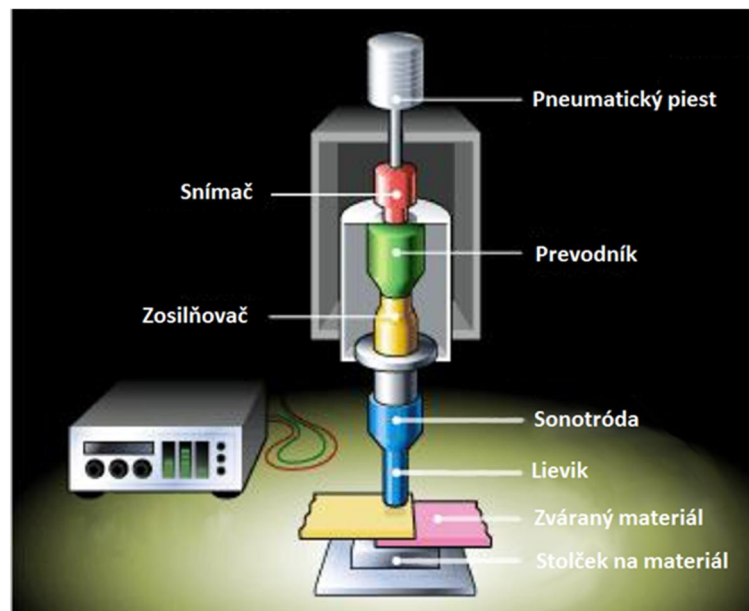
Napájací zdroj prevádza nízkofrekvenčný elektrický signál (50-60 Hz) na vysokofrekvenčnú elektrický signál (20-40 kHz). Prevodník zmení tento vysokofrekvenčný elektrický signál na ultrazvuk (buď prostredníctvom magnetostríckie alebo piezomeniča). Zosilňovač zosilňuje vibrácie ultrazvuku. Nakoniec sonotróda sústredí ultrazvukové vibrácie na materiály, ktoré sa majú zvärať. Vibrácie spôsobia

v mieste dotyku dvoch zváraných materiálov trenie, pri ktorom vzniká teplo, oba materiály sa natavia a vytvorí sa zvarový spoj. [11]

Táto metóda sa používa na zváranie termoplastových vrstiev alebo ľahkých kovov ako napr. hliník. Tiež sa používa pri kontaktovaní čipov (ultrasonic wire bonding). [12]

Výhody tejto metódy sú, že nedochádza ku kontaminácii výsledného spoja (tvorbe intermetalických zlúčenín ako u spájkovania), keďže sa na vytvorení spoja nepoužívajú chemikálie ani lepidlá. Umožňuje zváranie tenkých a hrubých vrstiev a zváranie rôzne odlišných kovov. Keďže pri procese zvárania spojom netečie prúd, teplota zvárania je pomerne nízka. Preto je tento proces vhodný pre zváranie teplotne citlivých súčiastok. [12]

Nevýhodou je obmedzenie v hrúbke zvaru. Maximálna hrúbka zvaru pre hliník je 2,5 mm a 1 mm pre ťažšie materiály. [12]



Obrázok 2.1 - Časti stroja na ultrazvukové zváranie [11]

Táto metóda zvárania (tiež nazvaná thermo-compression bonding) využíva princíp vytvorenia zvaru nepriamym zahrievaním. Zvárané časti sa spoja na základe vytvorenia zvaru pôsobením sily a tepla. Plôška a drôt sa umiestnia medzi elektródy, elektródy pritlačia drôt k plôške a elektrický prúd prejde od jednej elektródy cez drôt a plôšku až k druhej elektróde. Ide o takzvané difúzne zváranie. Spoj sa nevytvorí natavením častí materiálov ale iba difúziou kovovej pevnej fázy. Najčastejšie používaným materiálom je zlato kvôli jeho odolnosti proti oxidácii a hliník. [13; 14]

Výhodami tejto metódy pripojovania sú nízke teploty a krátky čas zahrievania, žiadna kontaminácia spoja (nedochádza k nataveniu materiálu a vzniku krehkých intermetalických zlúčenín, ktoré by oslabili pevnosť spoja), vhodná metóda pre použitie

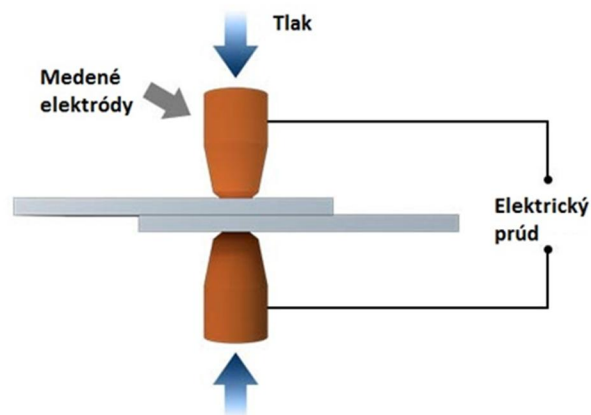
na kontaktovanie čipov alebo tam kde nie je vhodné spájkovanie. Zvar je dostatočne pevný v ťahu. [13]

2.2.2 Bodové zváranie

Bodové zváranie je forma odporového bodového zvárania. Je to jeden z najstarších zváracích procesov. Používa sa na zváranie dvoch alebo viacerých kovových dosiek bez plniaceho materiálu. Princípom metódy zvárania je vytvorenie zvaru pomocou tlaku a tepla vyvolaných pretekajúcim prúdom cez medené elektródy a zváraným materiálom. Zvárané materiály sa roztavia a zlúčia sa dokopy, materiálom prestane tiecť prúd ale tlak elektród neprestane pôsobiť dokým roztavený nestuhne a nevytvorí spoj (viď Obrázok 2.2). [15]

Teplota zvárania závisí na čase t pretekajúceho prúdu I zváraným materiálom s odporom R [16]. Rovnica (2.1) pre teplotu zvárania je teda:

$$\text{Teplota zvárania} = I^2 \cdot t \cdot R \quad [^{\circ}\text{C}; A, s, \Omega] \quad (2.1)$$



Obrázok 2.2 - Princíp bodového zvárania [15]

Meď sa ako materiál pre elektródy používa pre svoju vysokú tepelnú vodivosť (395 W/m.K) a malý elektrický odpor ($1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$) v porovnaní s ostatnými materiálmi. Tieto dve vlastnosti zabezpečujú, že teplo potrebné na vytvorenie zvaru sa bude generovať vo zváranom materiáloch a nie v elektródach. [15; 17; 18]

Typickými materiálmi používanými na bodové zváranie sú oceľové materiály vďaka svojej malej teplotnej vodivosti a vysokého elektrického odporu. Pokovované ocele potrebujú na zváranie vyššie zváracie prúdy než nepokovované ocele. Najmä pri zváraní zinkových zliatin medené elektródy rýchlejšie degradujú a vytvárajú nekvalitný spoj. Pri zváraní týchto zliatin je potrebné meniť medené elektródy alebo očistiť ich povrch opracovaním. Ďalšími materiálmi používanými pre bodové zváranie sú nerezové ocele, titán a zliatiny niklu. Hliník je vhodný adept na bodové zváranie, pretože má podobnú

tepelnú vodivosť a merný elektrický odpor ako meď a malú teplotu tavenia. Avšak kvôli jeho malého merného odporu sú potrebné vyššie prúdy pri zváraní a tým pádom podobne ako zinok degraduje medené elektródy, preto sa hliník používa iba pri niektorých aplikáciách bodového zvárania. Meď a jej zliatiny sa pre zváranie nepoužívajú, pretože elektródy a zváraný materiál majú rovnakú tepelnú vodivosť. [15]

2.2.3 Výhody a nevýhody zvárania

Ultrazvukové a termokompresné zváranie sa používajú na kontaktovanie čipov na vodivé plôšky. Ich výhodami sú, že na rozdiel od spájkovania pri vytváraní spoja nevzniká krehká intermetalická zlúčenina (vznikajúca spojením spájky a spojovaných materiálov), ktorá oslabuje a znižuje vlastnosti spoja. Proces ultrazvukového a termokompresného zvárania prebieha pri nízkych teplotách (okolo 150-200°C [19]) a v krátkych časových intervaloch než pri ručnom spájkovaní, kedy je pre vytvorenie spoja potrebné zvýšiť teplotu a viackrát spoj nahriať. Výhodou u bodového zvárania je, že sa môžu zvärať materiály s vyššou teplotou tavenia napr. niklové vývody s teplotou tavenia niklu 1453°C [20] a nedochádza k teplotnému namáhaniu vývodu.

Nevýhodou u bodového zvárania je, že pri nepokovovaných tenkých a hrubých vrstvách materiálov plôšok dochádza vplyvom vysokej teploty pravdepodobne k odpareniu vrstvy alebo jej difúzii do roztaveného materiálu zvaru. Práve touto problematikou sa zaoberá praktická časť semestrálnej práce.

3. PRAKTICKÁ ČASŤ

Táto časť bakalárskej práce sa zaoberá návrhom a realizáciou experimentu na testovanie metódy bodového zvárania na hrubej vrstve a na tenkej vrstve. Kroky experimentu sú nasledovné:

1. Úprava zváracích hrotov ručných elektród bodovej zväračky
2. Otestovanie upravených hrotov na pripojení vývodových plieškov na vzorku so striebornou nepokovovanou hrubou vrstvou
3. Návrh vzorky s motívom tenkej vrstvy
4. Výpočet parametrov potrebných pre galvanické zosilnenie tenkej vrstvy
5. Vytvorenie tenkej nikelchrómovej vrstvy metódou vákuového naparovania
6. Galvanické pokovovanie tenkej vrstvy meďou
7. Testovanie pripojenia vývodových plieškov bodovým zváraním na galvanicky pokovovanej tenkej vrstve
8. Testovanie ťahu pripojených vývodov a analýza mikrovýbrusu vytvoreného pripojenia na pokovovanej tenkej vrstve (mechanický test a výbrus pre optickú kontrolu prevedenia vytvoreného zvaru)

3.1 Úprava hrotov ručných elektród bodovej zväračky

Bodová zväračka Sunkko 709 A sa používa na bodové zváranie koncov akumulátorov do batériových aku packov. Používa sa najmä pre svoje výhody oproti spájkovaniu, pretože nedochádza k teplotnému namáhaniu akumulátorov a batérii, a tým k ich poškodzovaniu. Batéria je zvarená v okamihu a nie je potrebné nahrievať celý kontakt s batériou. [21]

Zväračku tvorí jeden pár zváracích elektród umiestnených v tele zväračky (viď. obrázok 5-4) a ručné zväracie pero. Súčasťou stanice je aj integrovaná mikros pájka s reguláciou teploty 150-450°C a výkonom 50W pre priame spájkovanie vodičov k vývodom batérii. Rozstup elektród v tele zväracej stanice sa dá nastaviť od 4 do minimálne 2 mm. K zopnutiu zväračky dôjde pri pritlačení akumulátoru k zväracím hrotom. Tlak k zopnutiu zväračky sa dá nastaviť pomocou regulátoru na vrchnej šasi stanice. Na zväračke sa taktiež dá nastaviť veľkosť zväracieho prúdu (viď. obrázok 5-8) a počet pulzov pre jeden zvar (4, 6 a 8 pulzov) (viď. Obrázok 3.1). [21]

U ručného zväracieho pera je rozstup elektród nastaviteľný od 4 do 10 mm. Zvárajú sa ním najmä väčšie batérie a akumulátory. Ručné pero sa pripojuje k telu zväračky pomocou pozlátených konektorov. Prívodné vodiče majú prierez o veľkosti 6 mm. K zopnutiu zväračky dôjde stlačením nožného pedálu. [21]



Obrázok 3.1 - Bodová zváračka Sunkko 709A: **1.** Spínač pre spájkovanie a pre zváranie; **2.** Konektor pre pripojenie pedálu; **3.** Konektory pre pripojenie ručných elektród; **4.** Elektródy umiestnené vo vnútri tela zváračky; **5.** Konektor pre pripojenie spájkovačky; **6.** Regulátor teploty spájkovačky; **7.** Nastavenie počtu pulzov zvárania; **8.** Regulátor zváracieho prúdu

Parametre zváračky Sunkko 709A sú uvedené dole (viď Tabuľka 3.1).

Tabuľka 3.1 - Parametre zváračky Sunkko 709A pre zváranie [22]

Zváračka Sunkko 709A		
Parametre	Hodnoty	Jednotky
Vstupné napätie	AC 110/220 ± 10%	V
Zvárací prúd	50 ~ 800	A
Čas jedného pulzu	5	ms
Max. množstvo pulzov	18	-
Max. výstupný výkon	3,2	kW

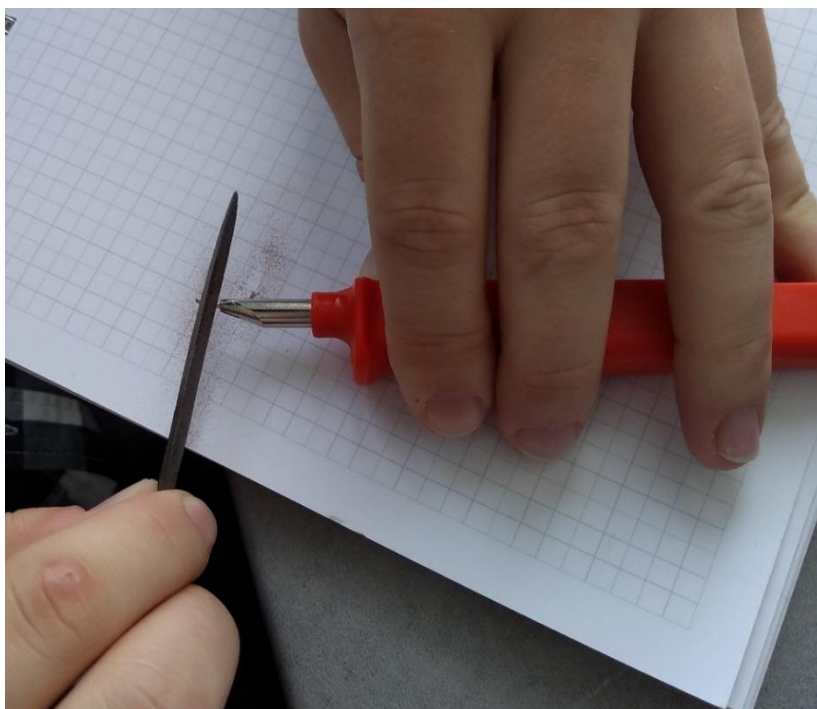
Zváračka je vhodná aj na zváranie niklových plieskov s hrúbkou 0,05 až 0,3 mm pre oceľ pokovovanú niklom a s hrúbkou 0,05 až 0,25 mm pre pliesky z čistého niklu. Nemôže sa použiť pre zváranie plieskov z medi a hliníka, keďže elektródy zváračky sú z medi a materiály pre zváranie musia mať väčší merný odpor než materiál elektród (v tomto prípade meď). [22]

Hrúbky plieškov pre zváranie fixnými elektródami a pre zváranie ručnými elektródami sú uvedené dole (viď Tabuľka 3.2).

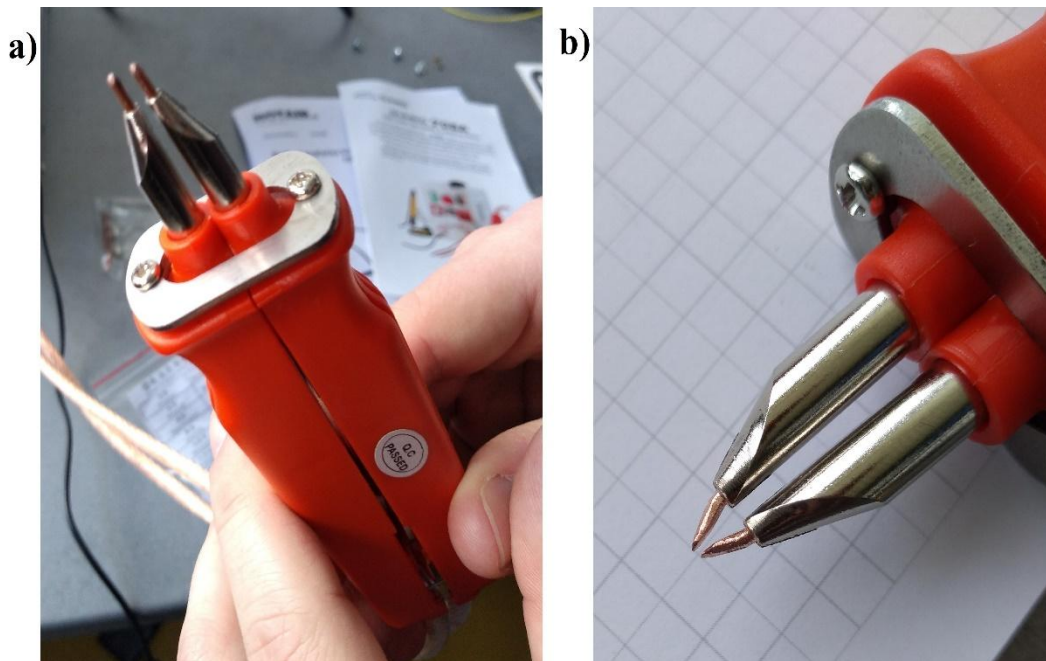
Tabuľka 3.2 - Doporučené hrúbky plieškov pre zváranie elektródami zváračky Sunkko 709A [22]

Hrúbky Ni plieškov pre zváranie			
Pliešky	Elektródy		Jednotky
	Fixované	Ručné	
Oceľové (pokovované niklom)	0,05 ~ 0,3	0,05 ~ 0,2	mm
Niklové (bez pokovovania)	0,05 ~ 0,25	0,05 ~ 0,15	mm

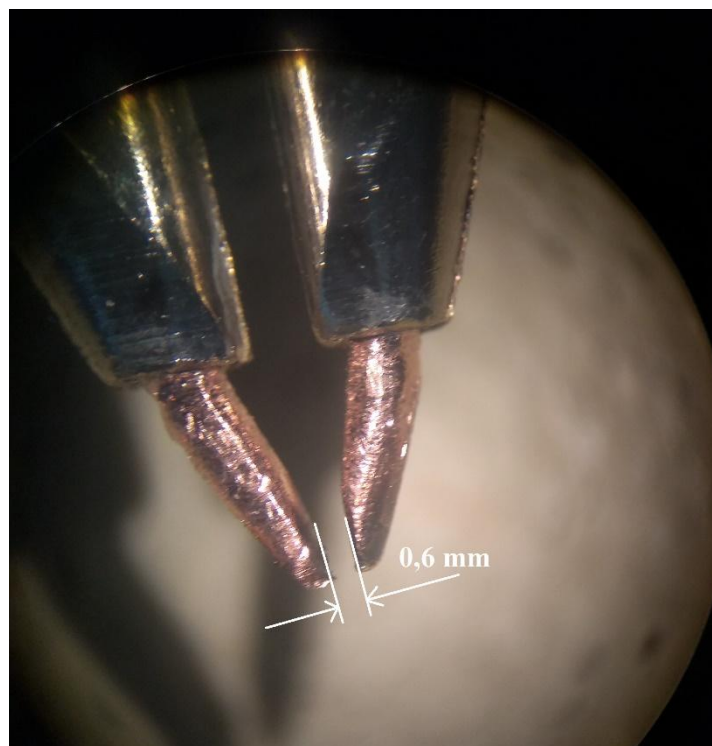
Rozstup hrotov ručného zváracieho pera bodovej zváracej stanice Sunkko 709A bolo potrebné zmenšiť, keďže minimálny nastaviteľný rozstup bol 4 mm (minimálna vzdialenosť vnútorných stien ručných elektród bola 1,95 mm), aby bolo možné zvärať vývody na menšie plošky tenkých a hrubých vrstiev o rozmeroch 2 mm x 2mm. Pôvodné rozmery elektród boli 1,5 x 7 mm [22]. Hroty ručného zváracieho pera sa najprv ohlí k sebe. Vzdialenosť vnútorných strán elektród sa tým zmenšila na 1 mm, čo však stále nebolo dostačujúce pre zváranie vývodov na menšie plošky. Preto sa pristúpilo k zbrúseniu povrchu elektród pilníkom (k zmenšeniu priemeru) (viď Obrázok 3.2). Po finálnej úprave je vzdialenosť vnútorných stien hrotov 0,6 mm (viď Obrázok 3.4). Vzhľad hrotov pred a po úprave (viď Obrázok 3.3).



Obrázok 3.2 - Opilovanie elektród pilníkom



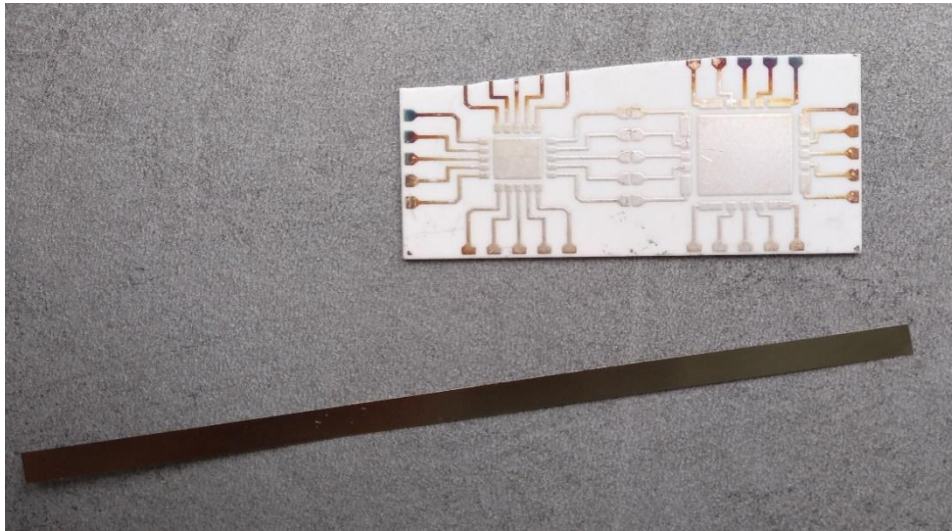
Obrázok 3.3 - Hroty zváracieho pera a) pred úpravou a b) po úprave



Obrázok 3.4 - Upravené hroty ručného zváracieho pera pod mikroskopom

3.2 Testovanie upravených hrotov ručných elektród

Testovanie upravených hrotov prebiehalo na vzorke s keramickým substrátom so striebornou nepokovovanou hrubou vrstvou a ako zvárané vývody sa použili železné pliešky pokovované niklom (vid'. obrázok 9). Parametre plieškov sú uvedené dole (vid' Tabuľka 3.3).



Obrázok 3.5 - Testovacia vzorka keramického substrátu so striebornou nepokovovanou hrubou vrstvou a železný pliešok pokovovaný niklom

Tabuľka 3.3 - Parametre balenia použitých plieškov pre testovanie

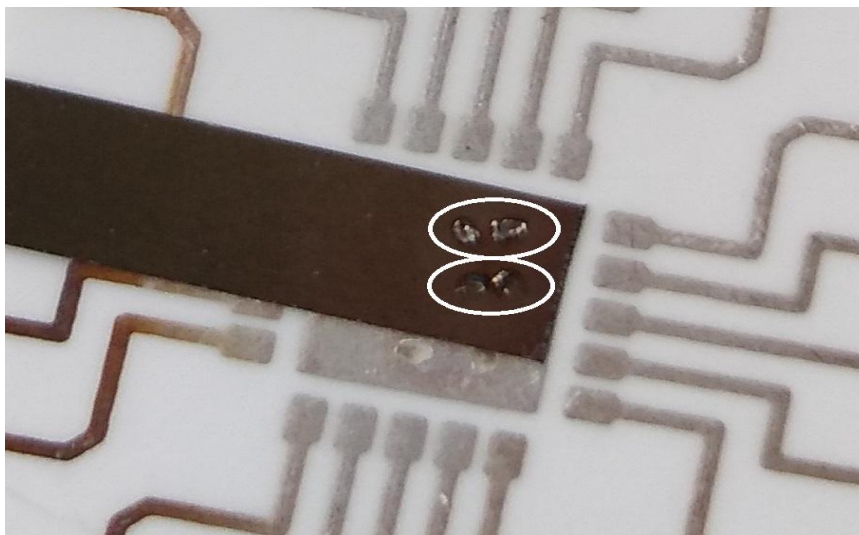
Balenie plieškov	
Produkt:	Poniklované pliešky
Materiál:	Poniklované železo
Rozmery:	0,1 x 4 x 100 mm
Množstvo:	30
Merný odpor:	31,3 mΩ/100 mm
Prechádzajúci prúd:	1 ~ 3 A
Odolnosť proti oxidácii:	obyčajná

Pri prvom teste sa na zváracíj stanici nastavili 4 pulzy zváracieho prúdu a hodnota prúdu 360 A. Zváralo sa po krajoch väčšej plôšky aby sa ušetrilo miesto pre ďalšie testy. Vytvorený spoj mal malú pevnosť v ťahu v smere x-ovej osi a ešte menšiu pevnosť v ťahu do strany (- a + y-ovej osi) (vid' Obrázok 3.6). Dĺžka jedného pulzu je 5 ms podľa výrobcu. Takže pri nastavení 4 pulzov tečie zváraným materiálom prúd 360 A 20 ms.

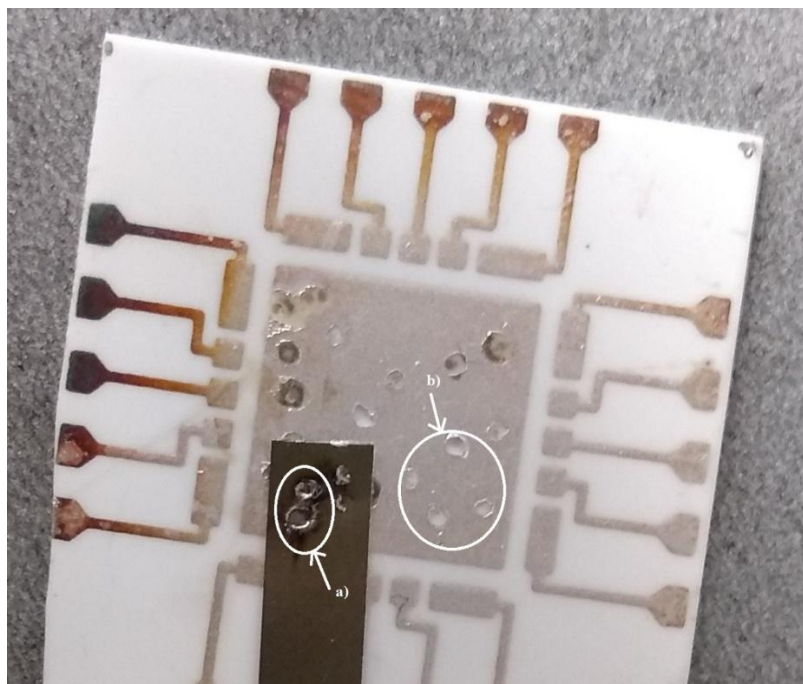
Pri druhom teste sa nastavili 4 pulzy zváracieho prúdu a hodnota prúdu 400 A. V tomto teste došlo už k značnému leachingu hrubej vrstvy s nastaveným plieškom

a pri menšej sile v ťahu v x-ovej osi sa pliešok odtrhol. Na odtrhnutom pliešku boli viditeľné stopy po hrubej vrstve.

Pri poslednom teste sa nastavili 4 pulzy a hodnota prúdu 420 A. Po zopnutí zväračky došlo na substráte k úplnému leachingu hrubej vrstvy (viď Obrázok 3.7). Vplyvom teploty prechádzajúceho prúdu v mieste zvaru sa v pliešku vytvorili diery a pliešok sa bez pôsobenia sily v ťahu odtrhol.



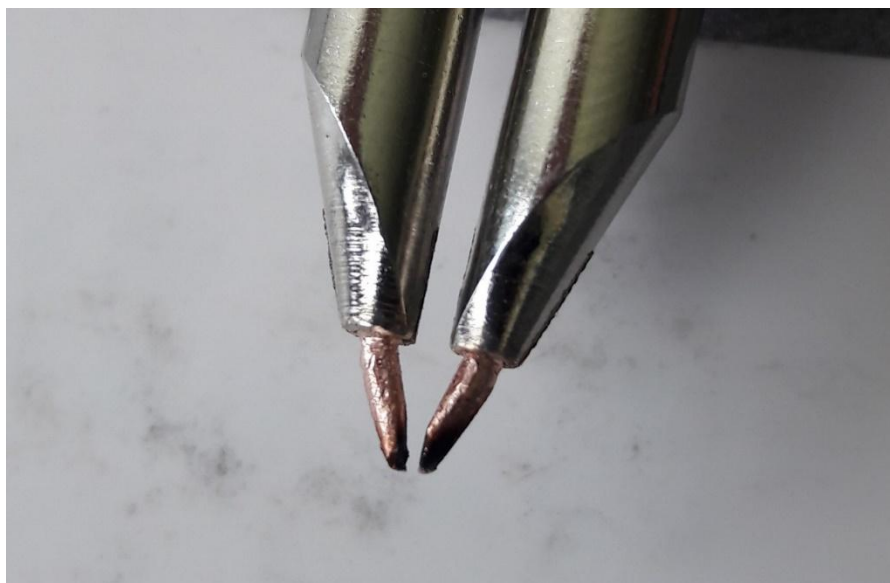
Obrázok 3.6 - Zvary pri zväračom prúde 360 A a 4 pulzoch



Obrázok 3.7 - Testovanie na vzorke: a) Zvar pri zväračom prúde 420 A a 4 pulzoch; b) Diery v hrubej vrstve po odtrhnutí pliešku vplyvom leachingu

Pri testovaní upravených hrotov na vzorke došlo k opáleniu medených hrotov zväracieho pera (viď. Obrázok 3.8). Preto by bolo vhodné vyskúšať elektródy z odolnejších materiálov ako napr. molybdén alebo volfrám.

Volfrám a molybdén vykazujú tvrdosť pri vysokej teplote (bodové zváranie sa uskutočňuje pri teplote 1200°C a viac). Pri týchto teplotách je dôležitá pevnosť materiálu. Dobrú pevnosť má volfrám. Čo sa týka molybdénu, tak ten má väčšiu odolnosť proti nárazu a má lepšiu tvárnosť, ale nemá takú pevnosť pri vyšších teplotách ako volfrám. Volfrám je tiež lepší z hľadiska nižšej oxidácie než molybdén. [23]



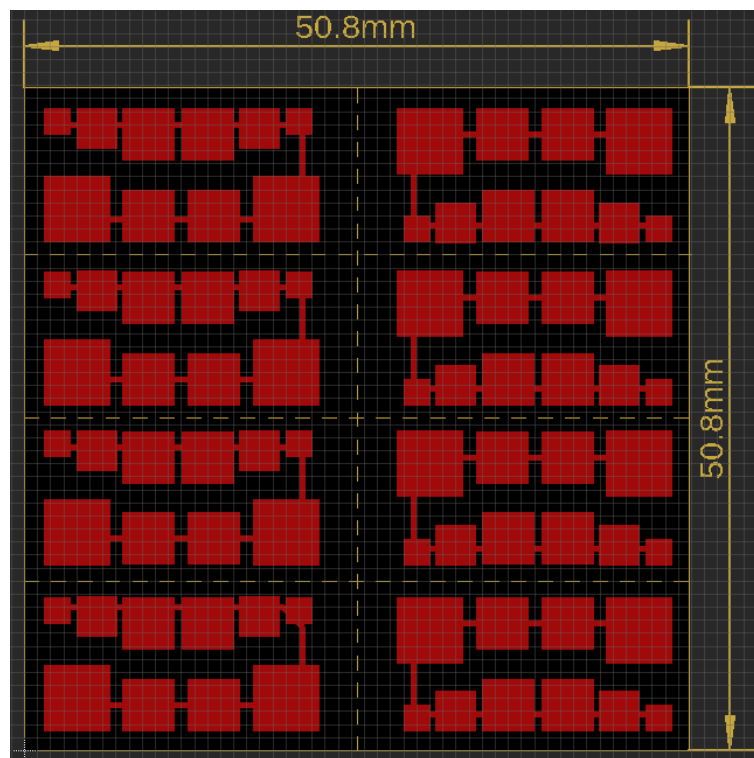
Obrázok 3.8 - Opálené medené elektródy po testovaní

3.3 Návrh testovacej vzorky s tenkou vrstvou

Na testovanie sa navrhol motív tenkej vrstvy na keramickom substráte Al_2O_3 so štandardnými rozmermi 50,8 x 50,8 mm (viď Obrázok 3.9). Testovať sa bude na nikelchrómových plôškach s rôznymi rozmermi, aby sa otestovali veľké aj malé rozpätia zväracieho pera. Rozmery plôšok a medzery medzi nimi a medzi okrajom substrátu sa uvažujú z hľadiska prevedenia so šablónou, ktorá bude pri procese naparovania slúžiť ako tienidlo. Rozmery medzier medzi plôškami a ich vzdialenosťami od okraju substrátu sa navrhli podľa návrhových pravidiel hrubých vrstiev. Medzery medzi plôškami sú 0,5 až 1 mm široké. Medzery medzi plôškami a okrajom substrátu sú 1,5 mm (podľa návrhových pravidiel by mala byť min. 0,25 mm). Najmenšie plôšky majú rozmery 2 x 2 mm. Na tieto veľkosti sa upravovalo rozpätie elektród ručného zväracieho pera v podkapitole 3.1. Najväčšie plôšky majú rozmery 5 x 5 mm. Uvažuje sa, že hrúbka vytvorenej tenkej vrstvy bude v rozmedzí 50 až 100 nm.

Po návrhu vzorky sa naniesie na vzorku tenká vrstva nikelchrómu vo vákuovom naparovacom zariadení a vytvoria sa navrhnuté plôšky. Technológiou vákuového

naparovania a jej dôležitými parametrami, na ktoré je treba dbať, sa zaoberá podrobne podkapitola 1.2.



Obrázok 3.9 - Navrhnutá testovacia vzorka s tenkou vrstvou

Po vyhotovení vzorky v naparovacom zariadení sa bude testovať pripojenie niklových vývodov (uvedených v podkapitole 3.2) na rôzne rozmery vytvorených plôšok. Predpokladá sa, že test bude neúspešný a niklové vývody nebudú pripojené po aplikácii bodového zvarovania. Kvôli malej hrúbke tenkej vrstvy pravdepodobne dôjde k jej odpareniu.

3.4 Výpočet parametrov potrebných pre galvanické zosilnenie tenkej vrstvy

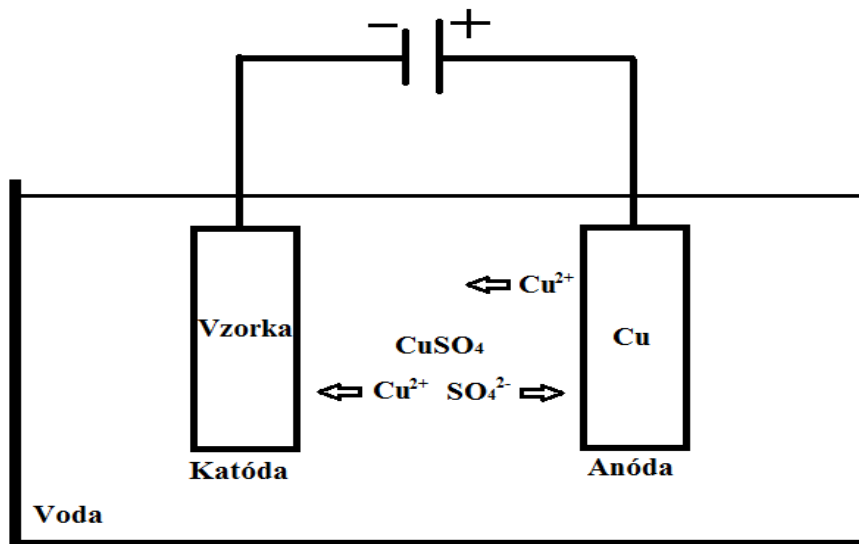
Galvanické pokovovanie je elektrolytický proces, pri ktorom sa pri prechode elektrického prúdu na povrchu vodivého materiálu vytvorí jednotný priľnavý povlak. Substrátom môže byť kov, ale aj nekov. [24]

Pokovovaná vzorka tvorí katódu (elektroda pripojená na záporný pól el. zdroja). Anóda môže byť rozpustná alebo trvalá (inertná). Rozpustné anódy obsahujú materiál, ktorým sa má pokovovať vzorka. Elektrolyt tvorí prepojenie medzi elektródami a zdrojom a prechádza ním prúd. Pôsobením elektrického prúdu sa kladné ióny pohybujú smerom ku katóde a záporné ióny smerom ku anóde. Kladne nabité ióny kovových solí

sú teda priťahované ku katóde, na ktorej sa usadzujú a vytvárajú tak pokovovanú vrstvu. [24]

Vzorka s nikelchrómovou tenkou vrstvou sa galvanicky pokovuje meďou a to tak, že sa pripojí do galvanickej linky ako katóda. Ako elektrolyt sa použije roztok síranu meďnatého (CuSO_4). Anódu bude tvoriť meď. Roztok sa vo vode rozpustí a vzniknú kladné ióny medi Cu^{2+} a záporné ióny SO_4^{2-} . Po pripojení zdroja sa kladné ióny medi začnú pohybovať smerom ku katóde pripojenej na zápornú svorku zdroja a vytvoria na substráte zosilnenú vrstvu. Záporné ióny elektrolytu sa budú pohybovať smerom k medenej anóde pripojenej ku kladnej svorke zdroja. Na anóde sa tým pádom vytvorí nové množstvo síranu meďnatého, ktoré sa následne rozpustí vo vode. [24]

Princíp galvanického pokovovania meďou (viď Obrázok 3.10).










Obrázok 3.10 - Princíp galvanického zosilnenia medi

Pre vytvorenie požadovanej hrúbky medi na tenkej vrstve treba dbať na čas pokovovania (čas prechodu el. prúdu) a veľkosť prechádzajúceho prúdu galvanickým kúpeľom.

Na výpočet hrúbky vytvorenej vrstvy medi na tenkej vrstve je potrebné poznať rozmery pokovovaných vodivých plôšok a cestičiek medzi nimi (viď Tabuľka 3.4).

Tabuľka 3.4 - Plocha a počet plôšok a vodivých ciest jednej dosky multimotívu

Plôšky a vodivé cesty	Plocha [mm ²]	Počet
	25	2
	16	4
	9	2
	4	2
	0,5	3
	0,25	5
	1,63	1
Celkom	56,38	19

Pre výpočet objemu pokovovanej tenkej vrstvy sa použije vzťah (3.1):

$$V = S \cdot h \quad [m^3; m^2, m] \quad (3.1)$$

Celková plocha vodivých plôšok a ciest je:

$$S_c = 56,38 \cdot 19 \cong 1071,22 \text{ mm}^2$$

Na vytvorenie hrúbky 10 μm galvanickým zosilnením je výpočet parametrov nasledovný:

$$V_{10 \mu m} = 1071,22 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cong 1,07 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

Zo vzťahu (3.2) pre hustotu medi ($\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3$) sa vypočíta hmotnosť nanesenej medi:

$$m = \rho \cdot V \quad [kg; kg/m^3, m^3] \quad (3.2)$$

Pre hrúbku 10 μm je hmotnosť:

$$m_{10 \mu\text{m}} = 8,96 \cdot 10^3 \cdot 1,071 \cdot 10^{-8} \cong 0,1 \text{ g}$$

Pre výpočet času, za ktorý sa zosilní tenká vrstva o hrúbku 10 μm je potrebné si určiť hodnotu el. prúd v galvanickej vani. Hodnota el. prúdu sa stanovila na 1 A. Následne sa vypočíta približný čas trvania galvanického procesu pokovovania podľa rovnice (3.3) z Faradayových zákonov elektrolýzy:

$$t = \frac{m \cdot N_A \cdot e \cdot v}{M \cdot I} \quad [s; \text{kg}, -, -, -, \text{kg/mol}, \text{A}] \quad (3.3)$$

$$t_{10 \mu\text{m}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,355 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \cong 5 \text{ min}$$

V galvanickej vani bude použitý roztok modrej skalice CuSO_4 . Atómová hmotnosť medi je $M = 63,55 \text{ g/mol}$. Oxidačné číslo medi je 2^+ (preto $v = 2$). Z rovnice (1.5) vidieť, že čas pokovovania je nepriamo úmerný pretekajúcemu prúdu v galvanickej vani.

Vypočítané hodnoty pre galvanické zosilnenie tenkej vrstvy o hrúbkach 20 μm , 30 μm a 40 μm sú:

$$V_{20 \mu\text{m}} = 1071,22 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cong 2,14 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_{30 \mu\text{m}} = 1071,22 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cong 3,21 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_{40 \mu\text{m}} = 1071,22 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cong 4,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$m_{20 \mu\text{m}} = 8,96 \cdot 10^3 \cdot 2,14 \cdot 10^{-8} \cong 0,19 \text{ mg}$$

$$m_{30 \mu\text{m}} = 8,96 \cdot 10^3 \cdot 3,21 \cdot 10^{-8} \cong 0,29 \text{ mg}$$

$$m_{40 \mu\text{m}} = 8,96 \cdot 10^3 \cdot 4,28 \cdot 10^{-8} \cong 0,38 \text{ mg}$$

$$t_{20 \mu\text{m}} = \frac{0,19 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,355 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \cong 9 \text{ min}$$

$$t_{30 \mu\text{m}} = \frac{0,29 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,355 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \cong 15 \text{ min}$$

$$t_4 \text{ } \mu\text{m} = \frac{0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,355 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \cong 19 \text{ min}$$

Po zosilnení medenej vrstvy sa na nej bude testovať bodové zváranie niklových vývodov. Po otestovaní sa urobí estetická kontrola spoja (zvaru) tým, že sa urobí spojom priečny rez diamantovou rezačkou, ktorý sa následne dobrúsi brúsnymi papiermi a doleští sa diamantovými pastami.

3.5 Vytvorenie motívu šablóny

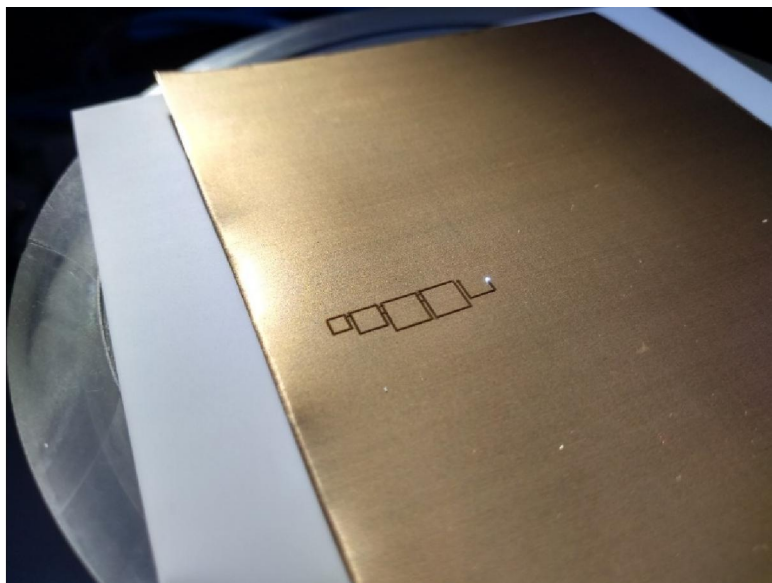
Pred procesom naparovania bolo potrebné vytvoriť šablónu s navrhnutým motívom v Eagli (podkapitola 3.3). Ako materiál šablóny sa použil mosadzný plech s hrúbkou 150 μm , do ktorého sa vyrezal požadovaný motív laserom CO₂.

Laser ALS – 300 pracuje s vlnovou dĺžkou 1064 nm, s výkonom 5 W v kontinuálnom režime a 25 W v impulznom režime. Súčasťou zariadenia je ovládacia jednotka, ktorou sa nastavujú požadované parametre lasera ako hodnota prúdu pri rezaní, začiatkový a koncový bod rezania, frekvencia a rýchlosť rezania. Vo vnútri zariadenia je stolček na umiestnenie substrátu, dve meracie elektródy a kamera (vid' Obrázok 3.11).



Obrázok 3.11 - Zariadenie s laserom CO₂ od firmy Aurel typ ALS - 300

Motív sa do šablóny narezal po druhom rezaní laserom (vid' Obrázok 3.13). Aby bolo možné využiť celý priestor naparovacieho prístroja, tak sa vyrobili ešte ďalšie tri šablóny. Po vytiahnutí šablón z prístroja, sa vylúpili pinzetou narezané časti motívu jednotlivých šablón. Nastavené parametre lasera pri rezaní sú uvedené v tabuľke (vid' Tabuľka 3.5).



Obrázok 3.12 - Rezanie šablóny laserom



Obrázok 3.13 - Vyhotovená šablóna

Tabuľka 3.5 - Nastavené parametre rezania

Frekvencia (Hz)	1000
Prúd (A)	18
Rýchlosť (mm/s)	0,5

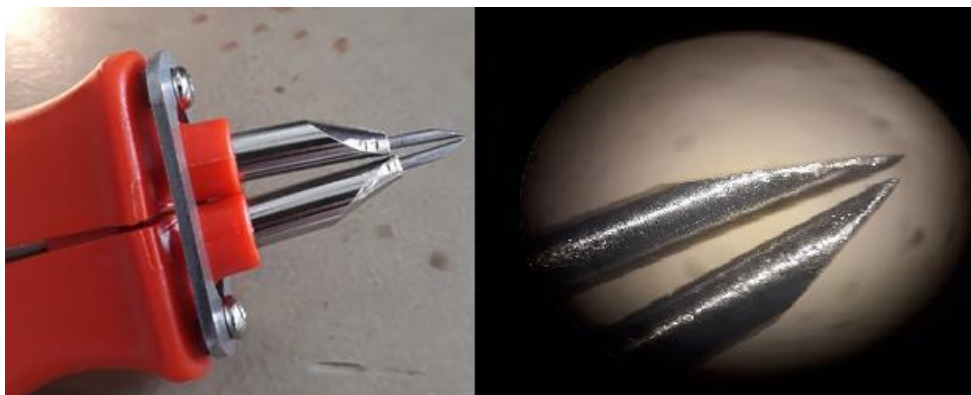
3.6 Výmena medených hrotov ručných elektród

Medený hroty bolo potrebné kvôli ich opáleniu vymeniť za nové. Ako materiál pre nové elektródy sa zvolil volfrám. Je odolnejší a tvrdší, ale jeho nevýhodou je väčšia krehkosť než meď.

Opotrebované medené elektródy sa vytiahli von z úchytovej ruky ručného zvaracieho pera. Volfrámové elektródy sa zlomili na požadovanú dĺžku, obrúsili sa konce zlomených častí a hroty elektród sa pilníkom a brúskou vybrúsili do požadovaného tvaru. Následne sa elektródy vložili a pripevnili do úchytovej ruky zvaracieho pera. Po upevnení elektród bolo potrebné nastaviť vhodnú vzdialenosť medzi elektródami, aby bolo možné zvärať vývody na menšie plošky. Elektródy sa preto nastavili tak, aby boli k sebe, čo najbližšie a medzi ramená zvaracieho pera sa vložil obdĺžnik z PVC materiálu, ktoré sa uchytili o ramená obojstrannou lepiacou páskou (viď Obrázok 3.14 a Obrázok 3.15).



Obrázok 3.14 - Zvaracie pero po vložení PVC materiálu



Obrázok 3.15 - Vľavo: Elektródy po upevnení do zvaracieho pera. Vpravo: Hroty elektród pod mikroskopom (zväčšenie 15-krát)

Vzdialenosť hrotov sa určila pomocou kalibračnej mierky a mikroskopu. Kalibračná mierka sa položila pod mikroskop so zväčšením približne 18-krát a urobil sa jej snímok pod mikroskopom. Potom sa dali pod mikroskop hroty zváracieho pera, nastavilo sa to isté zväčšenie ako pri kalibračnej mierke a znovu sa urobil snímok pod mikroskopom. Následne sa pomocou programu AmScope skalibrovala veľkosť kalibračnej mierky na obrázku v pixeloch na mikrometre a na obrázku s hrotmi ručného zváracieho pera sa určila vzdialenosť hrotov, ktorá bola približne 0,3 mm.

3.7 Naparovanie tenkej vrstvy nikelchrómu

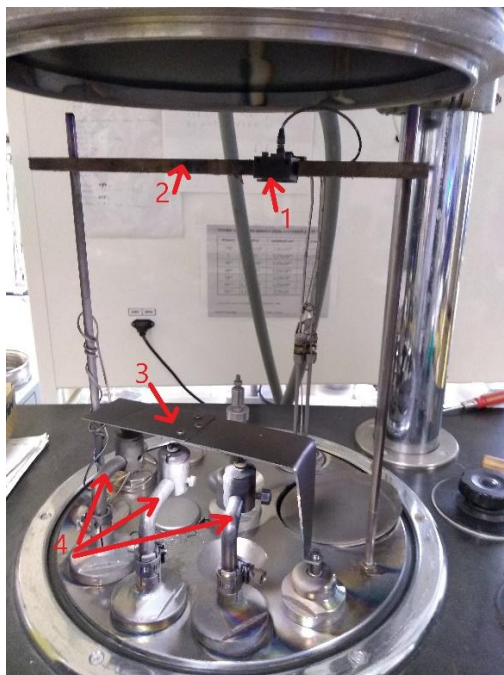
Pred samotným naparovaním sa šablóny pripevnili obojstrannou lepiacou páskou na štyri substráty rozmeru 50,8x50,8 mm. Bolo potrebné uchytiť k substrátu najmä tenké časti šablóny, aby pri procese naparovania nedošlo k naprášaniu materiálu pod šablónu. Následne sa ešte substráty s prilepenými šablónami prilepili na veľký keramický substrát aby sa využilo celé miesto v naparovacom zvone.

Naparovacie zariadenie tvoril zvon, v ktorom boli po okrajoch vedené medené trubky (viď Obrázok 3.16).



Obrázok 3.16 - Vákuové naparovacie zariadenie

Po vytiahnutí zvonu bola vidieť vnútorná aparatúra naparovacieho zariadenia, ktorej súčasťou boli tri volfrámové elektródy, tieniaci prvok, QCN senzor a miesto na umiestnenie keramického substrátu (viď Obrázok 3.17).



Obrázok 3.17 - Vnútorná aparatúra: 1 - QCN senzor; 2 - miesto pre substrát; 3 - tieniaci prvok; 4 - elektródy s držiakmi

Na volfrámových elektródach sa nachádzali držiaky, do ktorých sa umiestnila volfrámová lodička o rozmeroch 50x13x0,3 mm. Do lodičky sa nasypal naparovací materiál. V tomto prípade sa jednalo o nikelchróm s čistotou 99,95 % v pomere Ni/Cr 80/20 vo forme granúl. Na hornú časť aparatúry, ktorú tvorí vodorovná tyč, sa pri QCN senzore upevnil zospodu veľký substrát, ktorý držal prilepené substráty so šablónami. Upevnenie substrátu o vodorovnú tyč sa previedlo kaptonovou páskou, ktorá má väčšiu odolnosť pri vyšších teplotách. Následne sa nastavili požadované hodnoty pre proces naparovania, a to hrúbka nanášanej vrstvy a el. prúd prechádzajúci elektródami.

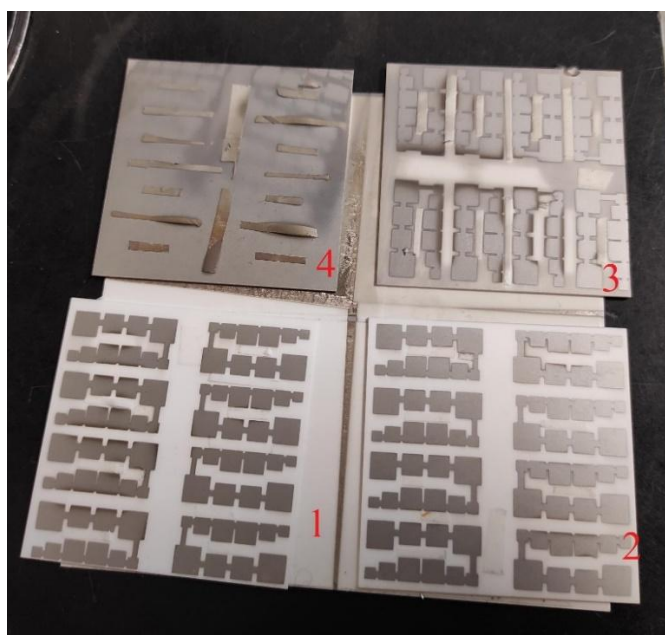
Samotný proces naparovania prebieha tak, že sa najprv vytvorí pod naparovacím zvonom vákuum. Tento proces trvá najdlhšie a uskutočňuje sa tým, že sa do medených trubiek naparovacieho zvona privedie voda, ktorá sa následne ohreje. Ohriata voda uvoľní a odstráni molekuly plynu spolu s vlhkosťou vo vnútri zvonu. Hodnota tlaku vo vnútri zvona sa pomaly začne znižovať. Do trubiek zvona sa pustí ochladená voda, ktorá potom umožní dosiahnutie hodnoty tlaku vákua. Následne po vytvorení vákua sa privedie na elektródy el. prúd, ktorý tečie cez lodičku umiestnenú medzi držiakmi na elektródach. Lodička sa vplyvom tečúceho prúdu zahrieva, uložený naparovací materiál sa vnútri lodičky odparuje a kondenzuje na keramickom substráte z dôvodu rozdielu teplôt. Na meranie hrúbky nanesej vrstvy je použitý QCN senzor. Tento senzor tvorí piezoelektrický kremenný kryštál umiestnený medzi dvomi elektródami. Zmenou hrúbky piezoelektrického kryštálu sa mení frekvencia oscilujúceho kryštálu. Tento jav sa práve využíva pri meraní hrúbky naneseného materiálu, a to tak, že sa pri naparovaní zmení

hrúbka povrchu kryštálu a zachytáva sa zmena jeho frekvencie. Tým sa zistí hmotnosť nanesej vrstvy a jej prepočítaním sa získa hodnota hrúbky vrstvy. O metóde vákuového naparovania pojednáva podkapitola 1.2.

Po ukončení procesu naparovania bola dosiahnutá hodnota tlaku vnútri zvonu $2,9 \times 10^{-2}$ Pa a hrúbka nanesej vrstvy nikelchrómu 90,9 nm. Obojstranná páska však nevydržala pôsobenie tepla vo vnútri zvonu počas naparovania a šablóny sa uvoľnili od substrátov. Došlo taktiež ku poškodeniu volfrámovej lodičky. Ako vzorky sa dali použiť tri keramické substráty s motívom (viď Obrázok 3.18 a Obrázok 3.19).



Obrázok 3.18 - Odtrhnutie šablón od substrátov

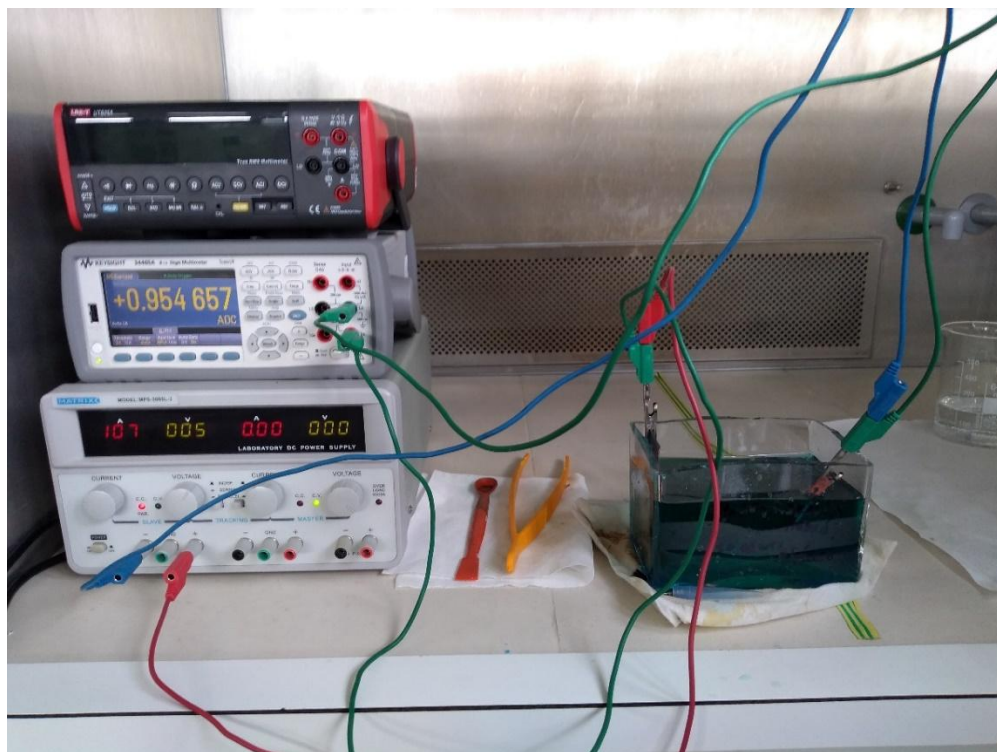


Obrázok 3.19 - Výsledné substráty s napareným motívom

3.8 Galvanické pokovovanie tenkej vrstvy

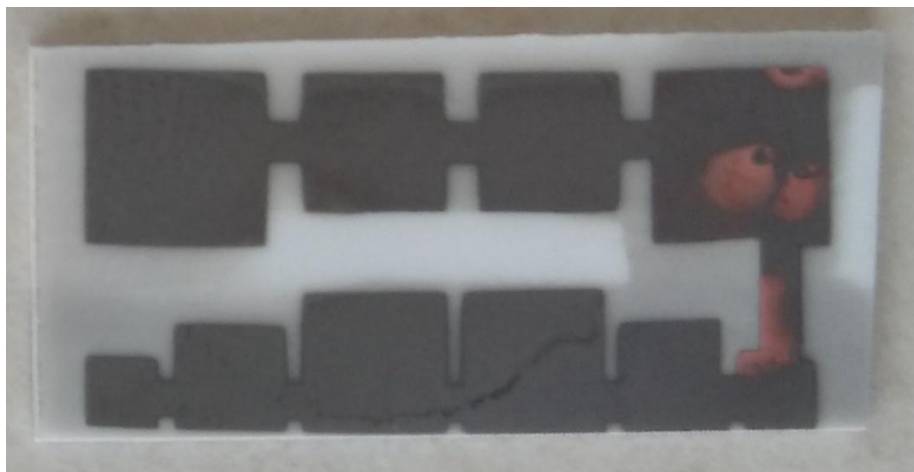
Pred galvanickým pokovovaním sa keramické substráty s naparenými tenkými vrstvami narezali diamantovým hrotom a vytvorili sa malé vzorky.

Pracovné prostredie pre galvanické pokovovanie tvorila sklenená nádoba s obsahom kyseliny sírovej H_2SO_4 , modrej skalice a pridanej destilovanej vody. Ďalej súčasťou pracoviska bol jednosmerný 30 V zdroj MPS-3005L-3 MATRIX a multimeter Keysight 34465A použitý ako ampérmeter. Ako kladná katóda sa použil medený plech a pokovovanie prebiehalo na anóde, ktorú tvorila pripojená vzorka. Zapojenie galvanického obvodu zobrazuje Obrázok 3.20.



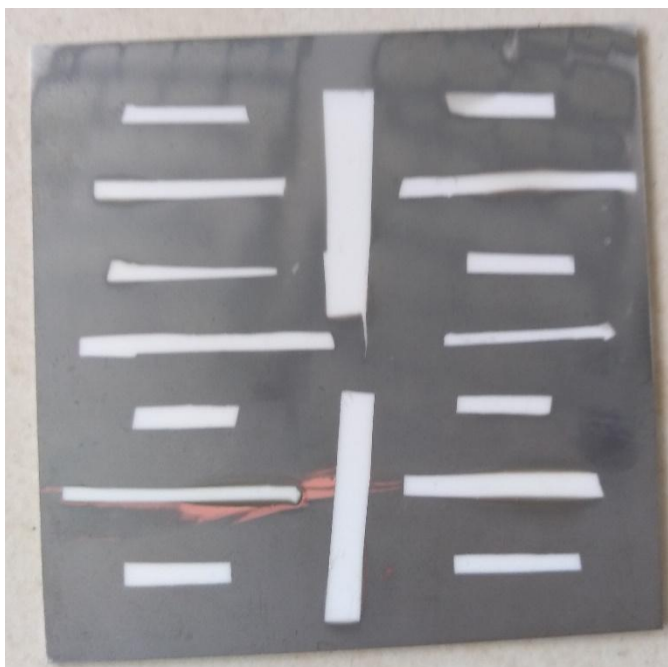
Obrázok 3.20 - Pracovisko pre galvanické pokovovanie

Pre nastavenie galvanického pokovovania sa použila vzorka z rozrezaného substrátu č. 3. Pri nastavenom napätí 0,7 V, hodnote prúdu 1,23 A a čase 1 min. sa vzorka po vložení do galvanického kúpeľa nepokovovala. Hodnota napätia sa teda zvýšila na 1,5 V, odpovedajúci prúd na 2,21 A a čas vzorky v kúpeli na 1 min. a 30 s. Po vytiahnutí vzorky bolo vidieť pokovovanie iba v oblasti uchytienia vzorky svorkou káblu. Povrch vzorky tenkej nikelchrómovej vrstvy sa celý nepokovoval (vid' Obrázok 3.21)



Obrázok 3.21 - Výsledok galvanického pokovovania vzorky

Nepokovovanie mohlo byť spôsobené slabou vodivosťou vrstvy vzorky. Preto sa vyskúšal ešte pokovovať substrát č. 4, na ktorom sa pri napařovaní uvoľnila šablóna a tenká vrstva sa napařila takmer po celej ploche substrátu (viď Obrázok 3.22). Po pripojení tohto substrátu do galvanického obvodu s napätím 1,7 V a prechádzajúcim galvanickým prúdom 3,11 A sa opäť vrstva pokovovala iba v mieste uchytenia svorkou káblu. Pri nižších hodnotách napätia a prúdu ku pokovovaniu nedošlo.



Obrázok 3.22 - Výsledok galvanického pokovovania substrátu č.4

Uvažovalo sa, že dôvodom nepokovovania nikelchrómovej tenkej vrstvy by mohla byť prítomnosť volfrámu v tenkej vrstve z poškodenej lodičky pri naparovaní. Preto sa použil spektrálny analyzátor na analýzu prvkov obsiahnutých v nikelchrómovej vrstve. V tenkej vrstve sa nezistila prítomnosť volfrámu (viď Obrázok 3.23). Prítomnosť prvkov hliníka a kremíka bola zaznamenaná z dôvodu preniknutia spektrálneho analyzátoru až do materiálu substrátu (korundová keramika). Odmeral sa aj odpor tenkej vrstvy substrátu č.4, ktorého hodnota bola približne 3 k Ω .

Zadna jakost pro srovnani		
PRVEK	%	+/-
Mg	2.33	0.36
Al	94.09	0.30
Si	3.47	0.06
Cr	0.078	0.006
Fe	0.008	0.002
Ni	0.019	0.002
Hf	0.005	0.001

Obrázok 3.23 - Výsledky spektrálnej analýzy tenkej vrstvy substrátu č.4

Nikelchróm (80/20) je odporový materiál, ale v tenkej vrstve mal vyšší odpor než sa predpokladalo, čo bolo následkom nedostatočnej vodivosti vytvoreného motívu pre zosilnenie galvanickým pokovovaním meďou.

3.9 Naparovanie tenkej vrstvy nikelchrómu a medi

Po neúspešnom pokuse o pokovovanie tenkej vrstvy nikelchrómu sa znovu očistili, pripravili a nalepili šablóny na ďalšie čisté keramické substráty. Tentokrát sa naparoval materiál nikelchróm ako predtým, ale spolu s meďou, aby sa vytvorila vodivejšia tenká vrstva s menším odporom, vhodná pre galvanické pokovovanie.

Všetky štyri substráty s nalepenými šablónami sa opäť nalepili na väčší substrát a ten sa pomocou kaptonovej pásky pripevnil zospodu k vrchnej časti naparovacej aparatúry (viď Obrázok 3.24).



Obrázok 3.24 - Pripevnenie substrátov so šablónami

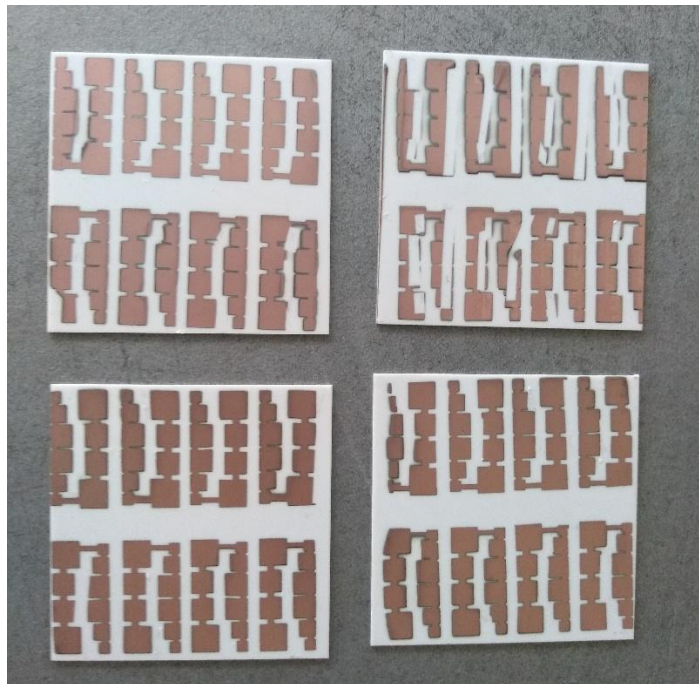
Pre naparovanie sa využili všetky tri elektródy aparatury. Medzi elektródy sa vložili a pripevnili dve volfrámové lodičky. Do jednej z nich sa pridali tri malé granule nikelchrómu obsahujúce nikel a chróm v pomere 80/20 s čistotou 99,95 % ako pri prvom naparovaní. Do druhej lodičky sa vložili nastrihané kúsky medených tyčiniek s 99,9 % obsahom medi bez kyslíku. Rozmer medených tyčiniek pred nastrihaním bol ϕ 1,0 x 170 mm.

Pri procese naparovania nastali komplikácie a nebolo možné vytvoriť vzorky. Problém bol pri prechode elektrického prúdu cez elektródy. Maximálna hodnota elektrického prúdu, ktorá sa dala pri naparovaní nastaviť bola hodnota okolo 32 A. Avšak na ohrev a odparenie materiálu bola potrebná vyššia hodnota prúdu a to až okolo 40-45 A. Proces naparovania sa preto zastavil a zistilo sa, že pri prechode el. prúdu elektródami dochádzalo na jednej z elektród ku jej veľkému ohrevu vplyvom nanosených nečistôt a zvyškov iných materiálov z minulých naparovacích procesov. Dochádzalo tu ku stratám el. prúdu v podobe tepla. Tento problém sa však odstránil uvoľnením a vytiahnutím držiakov lodičiek na jednotlivých elektródach a následným vyčistením povrchov elektród a držiakov šmirgl'ovým papierom a pilníkom. Obrázok 3.25 ukazuje vyčistené elektródy s držiakmi a umiestené lodičky s materiálmi.



Obrázok 3.25 - Elektródy a držiaky po vyčistení

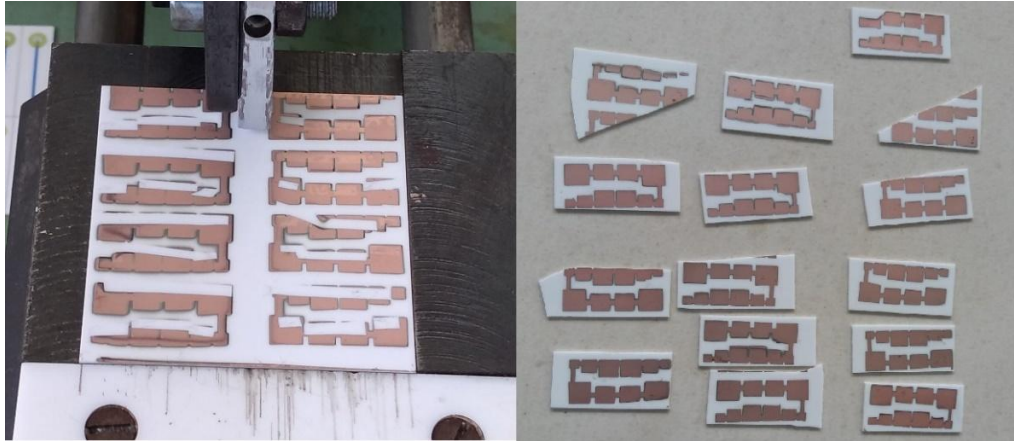
Po vyčistení proces napařovania prebiehal v poriadku. Najprv sa napařila vrstva nikelchrómu s hrúbkou 100 nm pri tlaku $3,1 \times 10^{-2}$ Pa a následne sa napařila vrstva medi o hrúbke 150 nm pri tlaku $5,4 \times 10^{-2}$ Pa. Obojstranná lepiaca páska opäť dlho nevydržala ale kaptonova páska držala substráty veľmi dobre. Na niektorých miestach substrátoch došlo však vplyvom uvoľnenia obojstrannej lepiacej pásky k nadvihnutiu šablóny od substrátu, čo sa prejavilo na vytvorených motívoch. Vytvorené motívy zobrazuje Obrázok 3.26.



Obrázok 3.26 - Naparené motívy tenkej vrstvy nikelchrómu a medi

3.10 Galvanické zosilnenie naparenej tenkej vrstvy medi a nikelchrómu

Substráty s motívmi tenkej vrstvy sa narezali pomocou diamantového hrotu a nalámali sa na menšie vzorky (viď Obrázok 3.27)

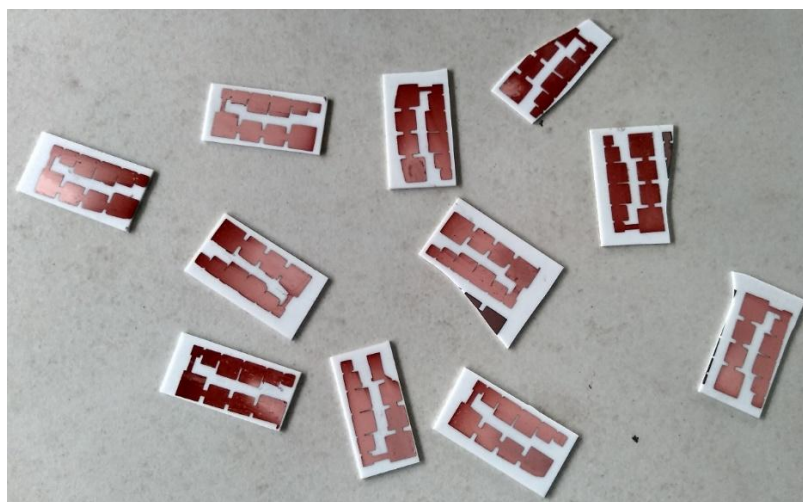


Obrázok 3.27 - Vľavo: Substrát pred narezaním. Vpravo: Nalámané vzorky

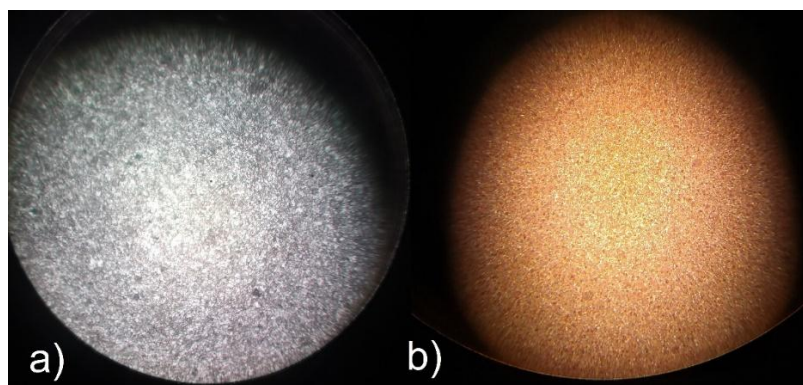
Pokovovanie opäť prebiehalo na pripravenom pracovisku (viď Obrázok 3.20). Vypočítané časové dĺžky trvania pokovovania pre jednotlivé hrúbky vrstiev sú uvedené v podkapitole 3.4. Tieto výpočty sa však líšia od skutočných pri optimalizácii parametrov pokovovania. Počiatočná hrúbka naparenej medi na nikelchrómovej vrstve bola 150 nm. Vrstva sa zosilňovala na hrúbky 10 μm , 20 μm a 30 μm . Pokovovanie hrúbky 10 μm najprv prebiehalo pri napätí zdroja 0,4 V, el. prúde 1 A a čase 9 min. Aby sa znížil čas trvania pokovovania tak sa zvýšil prúd na hodnotu 1,5 A (napätie 0,6 V). Pri tomto nastavení trvalo pokovovanie hrúbky 10 μm približne 2 min. Ďalšie hrúbky 20 a 30 μm sa pokovovali pri tejto optimalizácii. Pokovovanie na hrúbku medi 20 μm trvalo približne 8 min. a pokovovanie na hrúbku 30 μm trvalo približne 15 min.

Pokovované vzorky sa vždy po pokovovaní vložili do nádoby s destilovanou vodou, kde sa nechali ležať dvojnásobok dĺžky času pokovovania. Následne sa odtiaľ vybrali a vysušili sa pod prúdom teplého vzduchu (viď Obrázok 3.28). Na obrázku 3.28 vidieť, že jednotlivé pokovované vrstvy nie sú uniformné. Zosilnená meď je na niektorých miestach substrátu tmavšia a na iných svetlejšia. Dôvodom je nedostatočná optimalizácia parametrov galvanického pokovovania.

Správnosť nanosenia požadovanej hrúbky medi pri pokovovaní sa kontrolovala pod mikroskopom. Táto metóda nie je veľmi efektívna a najmä presná, preto sú výsledné hodnoty hrúbok medených vrstiev a parametrov pokovovania (najmä dĺžky trvania procesu pokovovania) približné a nie je ich možné považovať za presné. Snímky nepokovovanej a pokovovanej vrstvy pod mikroskopom zobrazuje Obrázok 3.29.

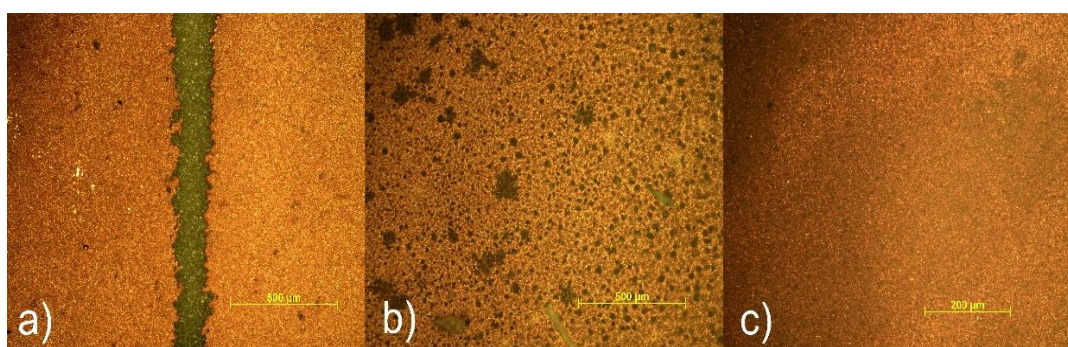


Obrázok 3.28 - Vysušené galvanicky pokovované vzorky



Obrázok 3.29 - Vzorky pod mikroskopom: a) Nepokovovaná a b) pokovovaná tenká vrstva (zväčšenie 250x)

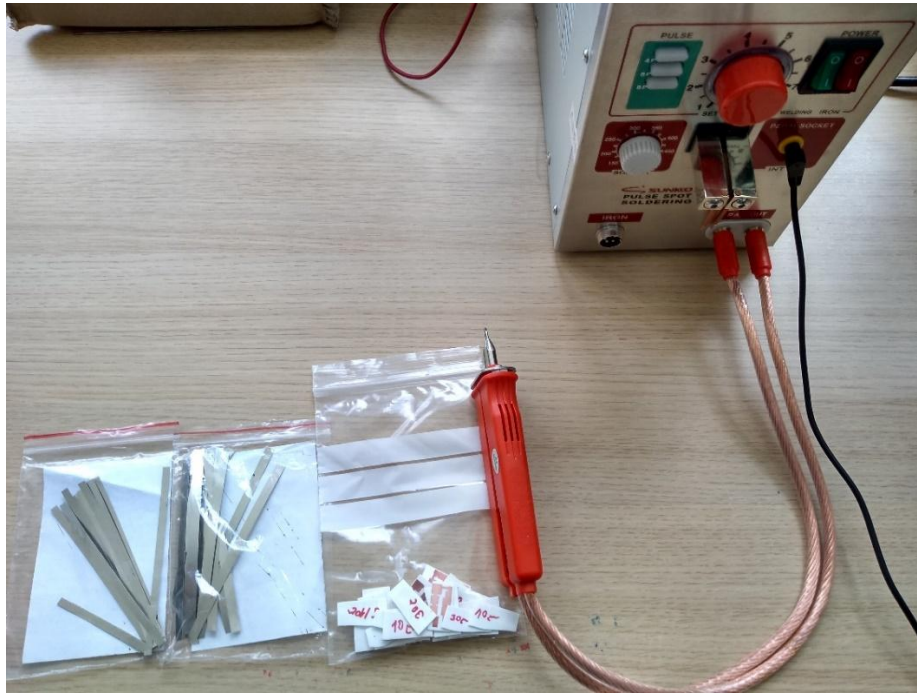
Na nasledujúcom obrázku 3.30 vidieť jednotlivé pokovované hrúbky medi pod mikroskopom.



Obrázok 3.30 - Hrúbky pokovovanej medi: a) 10 μm, b) 20 μm a c) 30 μm

3.11 Zváranie vývodov na pokovovanú tenkú vrstvu

Zváranie prebiehalo na pracovisku (viď Obrázok 3.31). Zváralo sa upraveným zväracím perom bodovej zväračky Sunkko 709 A s vymenenými volfrámovými hrotni elektród. Ako vývody sa použili železné poniklované pliešky. Testovalo sa pripojenie plieškov o rozmeroch 0,1x4x100 mm².



Obrázok 3.31 - Pracovisko pre pripojovanie vývodov bodovou zväračkou

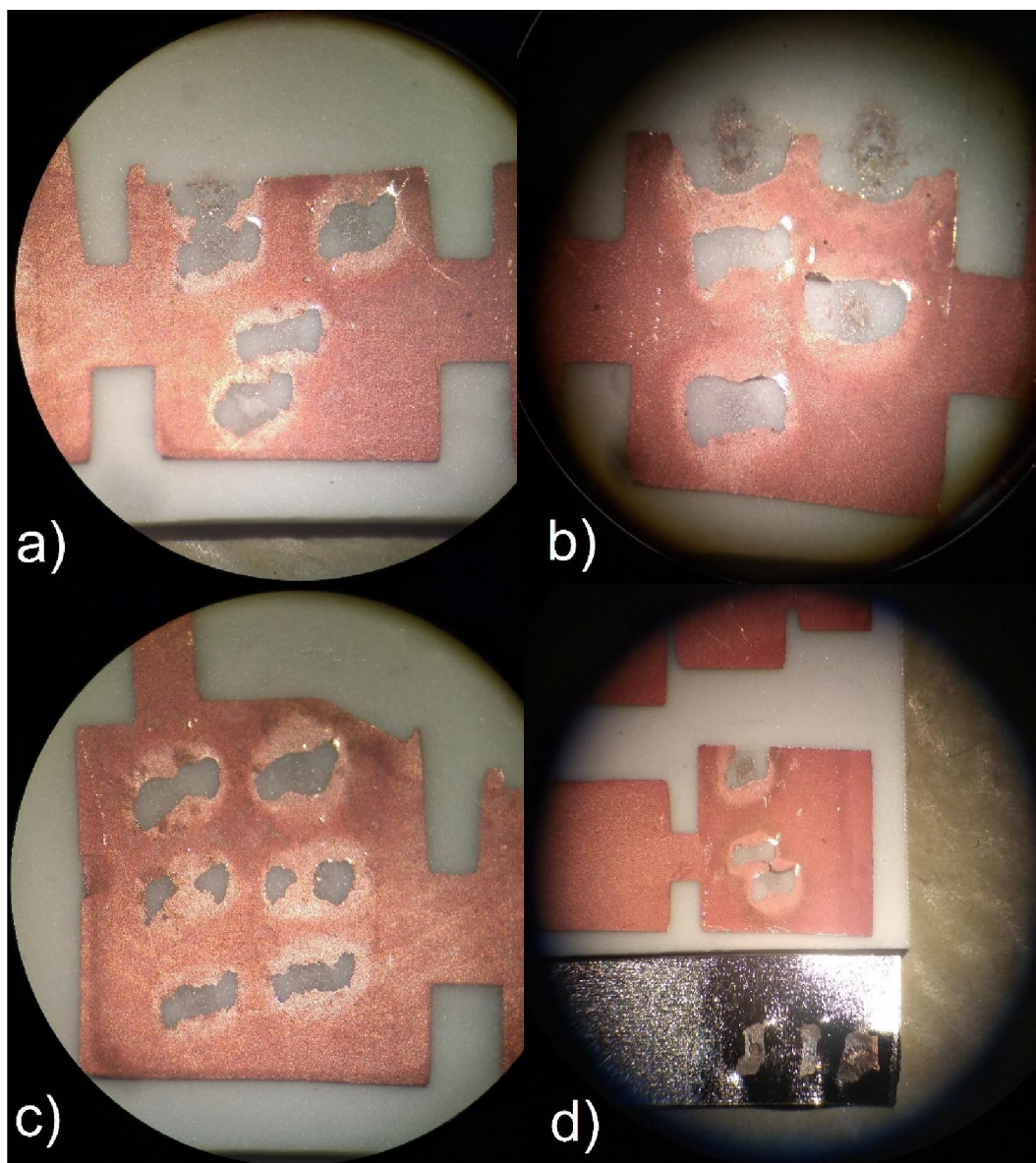
Pri zváraní na nepokovovanej tenkej vrstve došlo k odpareniu tenkej vrstvy ako sa predpokladalo. Ďalšie testy sa už na nepokovovanej tenkej vrstve nekonali.

Optimalizácia procesu zvárania sa postupne uskutočňovala pre galvanicky zosilnené hrúbky 10 μm , 20 μm a 30 μm . Vychádzalo sa z hodnôt pre optimalizáciu procesu zvárania na hrubej striebornej vrstve pokovovanej meďou, kde najlepší zvar bol vytvorený pri hodnote zväracieho prúdu 250 A a pri počte pulzov 18.

Testovanie pripojenia pliešku na zosilnenú vrstvu hrúbky 10 μm sa uskutočnilo postupne pre parametre zvárania: pre zvärací prúd 250 A a pre počet pulzov 10 (viď Obrázok 3.32 a)), pre zvärací prúd 250 A a 14 pulzov (viď Obrázok 3.32 b)), pre prúd 225 A a 18 pulzov (viď Obrázok 3.32 c)) a pre zvärací prúd 250 A a 18 pulzov (viď Obrázok 3.32 d)). Tieto testy prebiehali na plôškach rozmeroch 4x4 mm² a 5x5 mm².

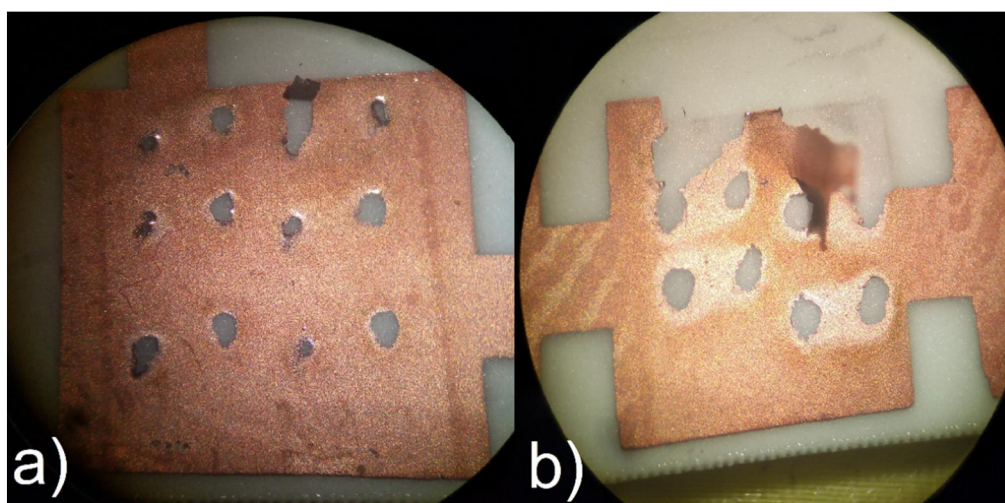
Vo všetkých prípadoch došlo pravdepodobne k difúzii galvanicky zosilnenej tenkej vrstvy do materiálu pliešku, čo možno najmä vidieť na obrázku 3.32 d) na spodnej strane pliešku. V miestach zvárania vidieť na plôškach materiál substrátu a v niektorých miestach aj jeho opálenie. Je možné, že na týchto miestach mohlo dôjsť

asi aj k čiastočnému odpareniu vrstvy vplyvom veľkého tepla pri prechode prúdu (viď Obrázok 3.32 b)).



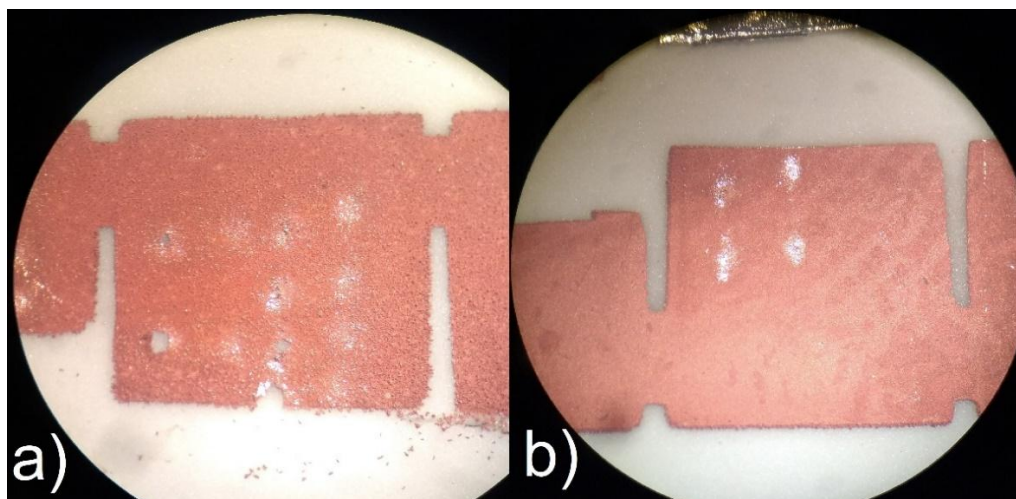
Obrázok 3.32 - Plôšky hrúbky 10 µm po zvaraní: a) 250 A, 10 pulzov; b) 250 A, 14 pulzov; c) 225 A, 18 pulzov; d) 250 A, 18 pulzov (a), b), c) zväčšenie 20x a d) 1,5x)

Zváranie na hrúbku tenkej vrstvy 20 µm prebiehalo pri rôznych parametroch zvarania. Najprv sa zvaralo pri 18 pulzoch a rôznych hodnotách prúdu. Pri hodnote zvaracieho prúdu 175 A došlo znovu k difúzii zosilnenej tenkej vrstvy do materiálu pliešku ako pri zosilnených vrstvách hrúbky 10 µm. Pri hodnote 200 A sa časť zosilnenej tenkej vrstvy plôšky delaminovala zo substrátu (viď Obrázok 3.33). Spoj sa však podaril vytvoriť pri prúde 225 A.



Obrázok 3.33 - Plôšky hrúbky 20 µm po zvaraní 18 pulzmi a prúdmi a) 175 A a b) 200 A (a) zväčšenie 30x, b) zväčšenie 20x)

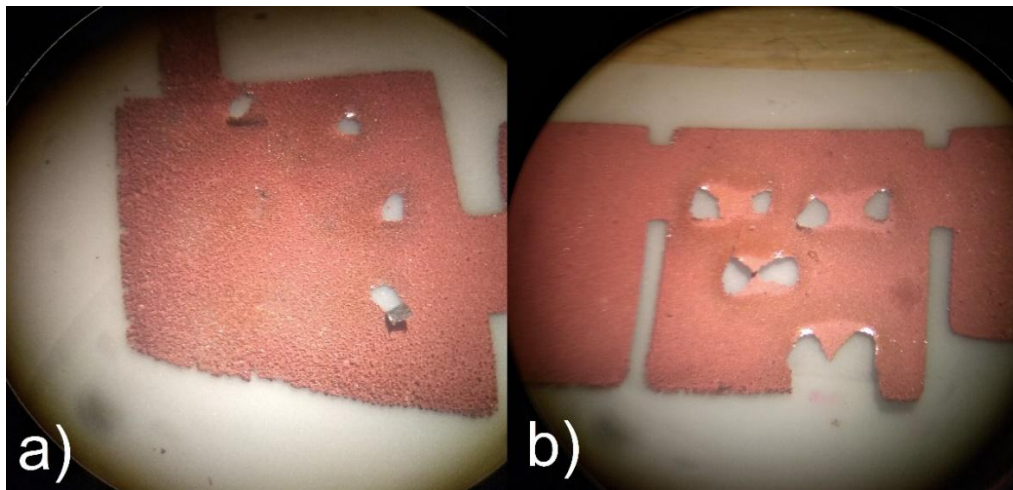
Zváralo sa aj pri nižších pulzoch ako 14 a 10. Pri 14 pulzoch sa uskutočnili 2 pokusy o zvary pri hodnotách prúdov 175 A a 200 A. Pri 175 A sa podarilo vytvoriť spoj so 6 zvarmi. Pri 200 A opäť došlo k delaminácii zosilnenej tenkej vrstvy. Pri 10 pulzoch boli úspešné 2 pokusy o zváranie a to pri hodnotách prúdov 225 A a 250 A. Pri hodnotách prúdov 175 A a 200 A k vytvoreniu zvaru nedošlo z dôvodu nízkych hodnôt prúdov. Na daných plôškach vidieť iba zvyšky niklu z pliešku (viď Obrázok 3.34).



Obrázok 3.34 - Plôšky hrúbky 20 µm po zvaraní 10 pulzmi a prúdmi a) 200 A a b) 175 A (zväčšenie 20x)

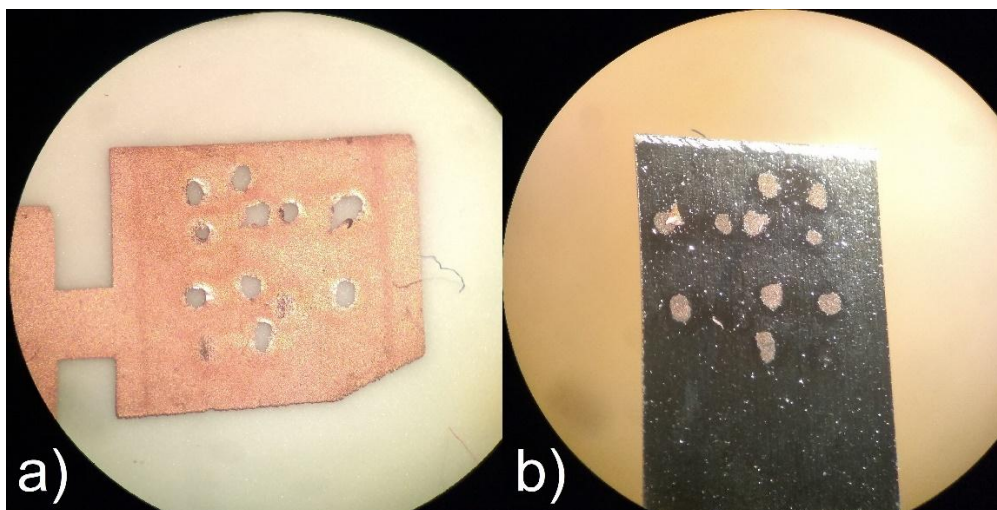
Ako posledné prebiehalo zváranie na plôškach tenkej vrstvy hrúbky 30 µm. Opäť sa najprv testovalo pri 18 pulzoch. Uskutočnili sa 3 testy pri prúdoch 175 A,

200 A a 225 A. Spoj sa podarilo vytvoriť pri 200 A so 6 zvarmi. Avšak už pri 175 A došlo k čiastočnej delaminácii zosilnenej tenkej vrstvy zo substrátu. Pri 225A vidieť na obrázku 3.35 b), že delaminácia vrstvy bola rozsiahlejšia.



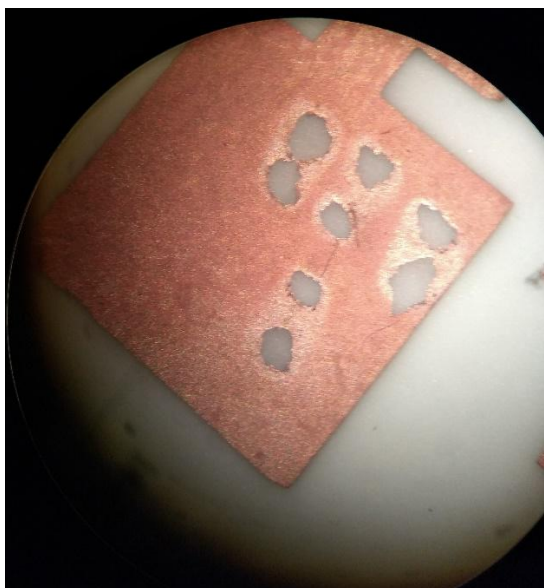
Obrázok 3.35 - Plôšky hrúbky $30\ \mu\text{m}$ po zvaraní 18 pulzmi a prúdmi a) 175 A a b) 225 A (zväčšenie 20x)

Ďalšie zváranie plieškov prebiehalo pri 14 pulzoch a to pri prúdoch 175 A, 200 A a pri 225 A. Spoj sa podarilo vytvoriť iba pri prúde 200 A. Pri prúde 175 A sa vytvoril spoj, ktorý ale nebol dostatočne silný a rozpadol sa. Po rozpade bolo vidieť, že došlo k difúzii zosilnenej tenkej vrstvy do materiálu pliešku (viď Obrázok 3.36).



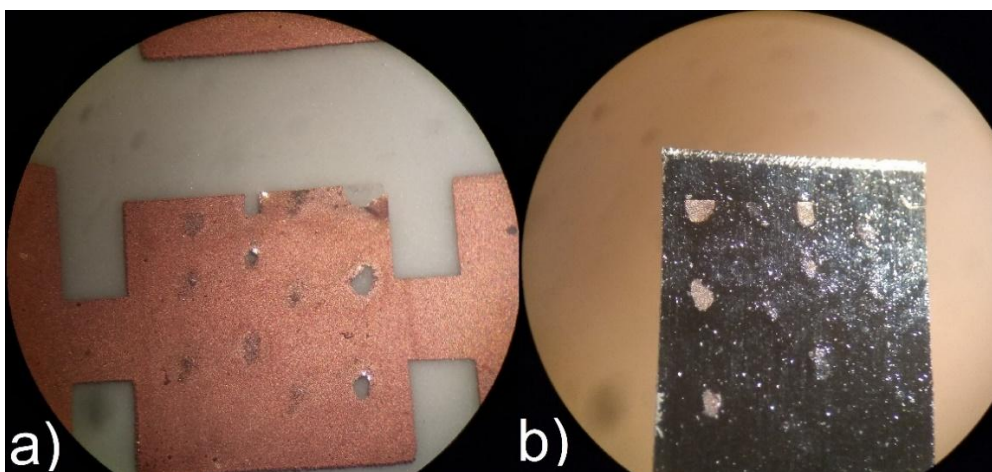
Obrázok 3.36 - a) Plôška hrúbky $30\ \mu\text{m}$ po zvaraní 14 pulzmi prúdom 175 A a b) spodná časť pliešku (zväčšenie 20x)

Obrázok 3.37 ukazuje plôšku po zváraní prúdom 225 A a 14 pulzmi, pri ktorom došlo pravdepodobne k delaminácii zosilnenej tenkej vrstvy.



Obrázok 3.37 - Plôška hrúbky 30 μm po zváraní 14 pulzmi a prúdom 225 A (zväčšenie 20x)

Nakoniec prebehlo zváranie pri 10 pulzoch pri prúdoch 175 A, 200 A, 225 A a 250 A. Spojenie sa vytvorilo pri všetkých hodnotách prúdov, avšak pri hodnote 175 A spoj nebol dostatočne pevný a došlo k jeho rozpadu. Na obrázku 3.38 vidieť, že došlo opäť k difúzii vrstvy do materiálu pliešku.



Obrázok 3.38 - a) Plôška hrúbky 30 μm po zváraní 10 pulzmi prúdom 175 A a b) spodná časť pliešku (zväčšenie 20x)

V tabuľke 3.6 sú uvedené parametre, pri ktorých sa zväralo na tenkú vrstvu. Červená farba výplne v tabuľke znamená, že sa spoj nevytvoril pri daných parametroch a zelená znamená, že sa spoj vytvoril.

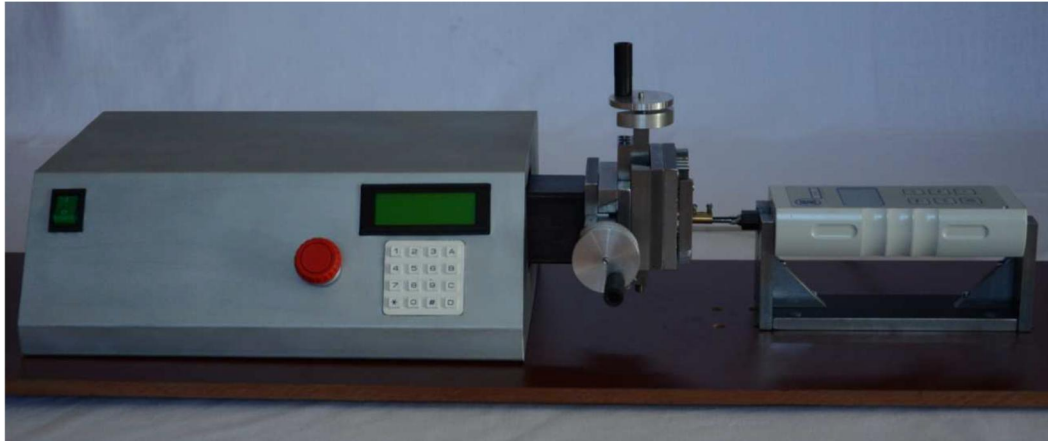
Tabuľka 3.6 - Výsledky testov bodového zvárania na tenkej vrstve

Č. pliešku vzorky	Hrúbka galv. pokovovania	Počet pulzov	Zvárací prúd	Typ nikl. pliešku	Vytvorenie prepojenia
[-]	[μm]	[-]	[A]	[-]	
1	10	18	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
2	10	18	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
3	10	18	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
4	10	18	250	0,1x4x100 (1-3 A)	
5	10	14	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
6	10	14	250	0,1x4x100 (1-3 A)	
7	10	10	250	0,1x4x100 (1-3 A)	
8	20	18	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
9	20	18	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
10	20	18	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
11	20	14	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
12	20	14	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
13	20	10	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
14	20	10	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
15	20	10	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
16	20	10	250	0,1x4x100 (1-3 A)	
17	30	18	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
18	30	18	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
19	30	18	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
20	30	14	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
21	30	14	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
22	30	14	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
23	30	10	175	0,1x4x100 (1-3 A)	
24	30	10	200	0,1x4x100 (1-3 A)	
25	30	10	225	0,1x4x100 (1-3 A)	
26	30	10	250	0,1x4x100 (1-3 A)	

Následne sa vzorky s vytvorenými spoji podrobili mechanickému testu v ťahu.

3.12 Mechanický test v ťahu

Mechanický test v ťahu prebiehal na prístroji (viď Obrázok 3.39), ktorý sa skladal z motorizovanej časti, ktorá slúžila k uchyteniu vzorku a jeho posúvaním v smere dopredu a dozadu 3 možnými rýchlosťami. Držiak na substrát na motorizovanej časti bolo možné posúvať aj do strán ale ručne. Na ovládanie rýchlosti pohybu a na kalibráciu slúžil ovládací panel. Druhou časťou prístroja bol digitálny merací prístroj, ktorý zaznamenával silu v ťahu v jednotkách Newtonoch.



Obrázok 3.39 - Zariadenie pre meranie sily v ťahu [25]

Prístroj sa po zapnutí najprv skalibroval stlačením príslušného tlačidla na ovládacom paneli a následne bolo možné pomocou tlačidiel ovládať posuv motorizovanej časti. Na testovanie sa používala stredná rýchlosť posuvu 3,5 mm/min. Pred začatím testu sa substrát vzorky umiestnil do držiaku na motorizovanej časti a pliešok sa opatrne prichytil druhým držiakom na meracom prístroji. Po uchytení vzorky s plieškom sa vzorka posúvala motorizovanou časťou smerom dozadu od meracieho prístroja až kým nedošlo k odtrhnutiu pliešku od plôšky tenkej vrstvy. Hodnoty síl v ťahu pre jednotlivé vytvorené zvary sú uvedené v tabuľke 3.7.

Tabuľka 3.7 - Výsledné hodnoty mechanických testov v ťahu

Č. pliešku vzorky	Hrúbka galv. pokovovania	Počet pulzov	Zvárací prúd	Typ nikl. pliešku	Test v ťahu
[-]	[μm]	[-]	[A]	[-]	[N]
10	20	18	225	0,1x4x100 (1-3 A)	14,2
11	20	14	175	0,1x4x100 (1-3 A)	3
15	20	10	225	0,1x4x100 (1-3 A)	5,3
16	20	10	250	0,1x4x100 (1-3 A)	10,7
18	30	18	200	0,1x4x100 (1-3 A)	13,3
21	30	14	200	0,1x4x100 (1-3 A)	10
25	30	10	225	0,1x4x100 (1-3 A)	6,7
26	30	10	250	0,1x4x100 (1-3 A)	5,1

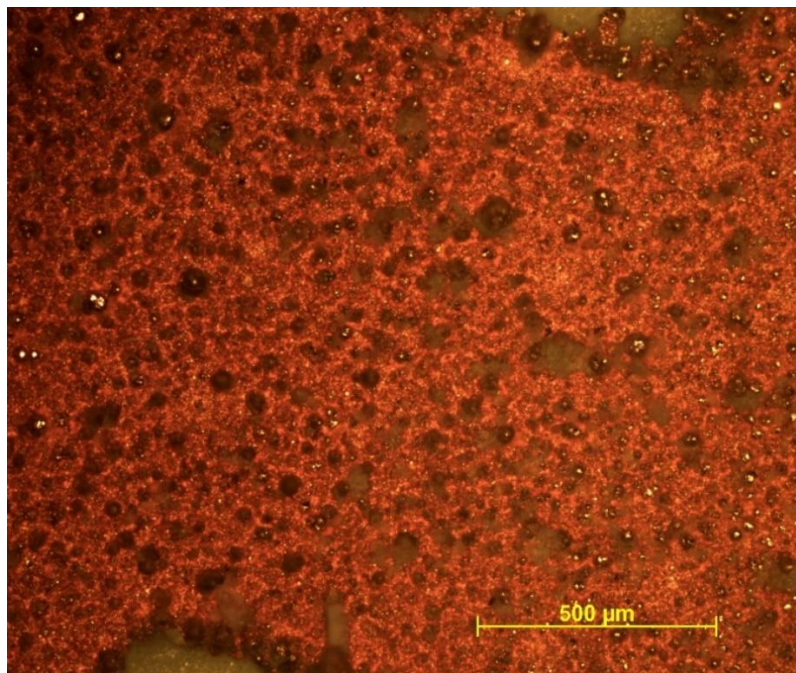
Z tabuľky 3.7 je vidieť, že zvary na tenkej vrstve veľmi nedržia. Najvyššia dosiahnutá sila v ťahu je 13,3 N pri pliešku č. 18. Najnižšia hodnota sily v ťahu je pri pliešku č. 11 a to 3 N.

Viac mechanických testov sa nepodarilo uskutočniť z dôvodu slabého vytvorenia spoja, ktorý sa často pri jemnom dotyku poškodil a pliešok odpadol. Z tohto dôvodu nebolo možné uskutočniť mechanické testy v peele.

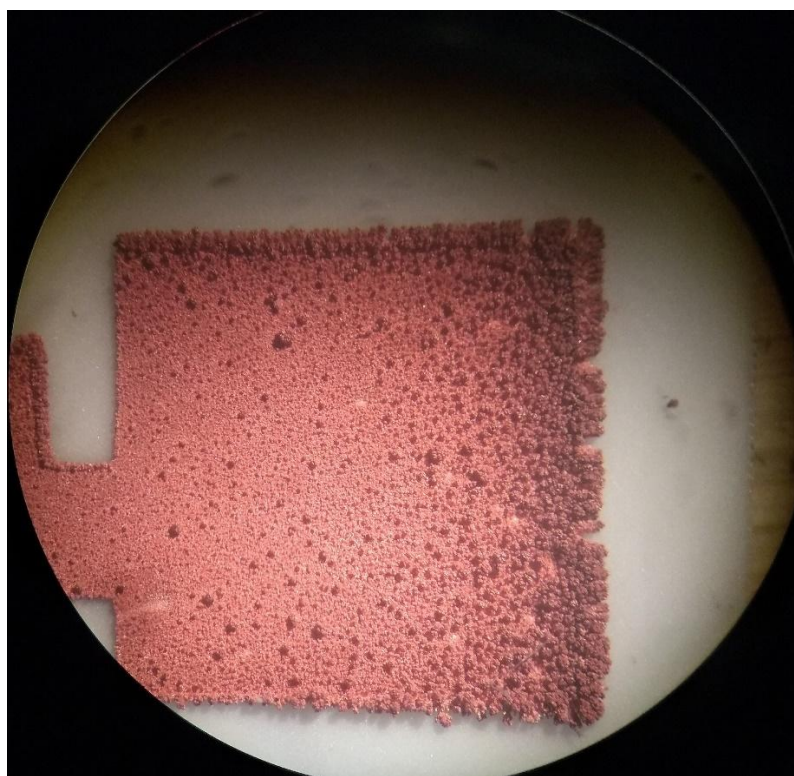
3.13 Vytvorenie hrubších vrstiev medi a testovanie

Galvanickým pokovovaním sa vytvorili vzorky s hrubšími vrstvami než 30 μm . Nevytvárali sa nové tenké vrstvy, pretože nebol dostatok času a preto sa zobrali vzorky s hrúbkami vrstiev 20 μm a zosilnili sa na hrubšie vrstvy galvanickým pokovovaním.

Prvá vzorka sa zosilnila pri prúde 1,5 A a napätí 0,8 V s časom 30 min. Vznikla vrstva medi hrúbky približne 55 μm (viď Obrázok 3.40). Táto vrstva však nebola uniformná a vznikli na nej rôzne výbežky v podobe ostrovčekov, čo bolo spôsobené pravdepodobne nastavenými nevhodnými parametrami pokovovania (viď Obrázok 3.41). V niektorých častiach plôšky bolo dokonca pod mikroskopom možno odhadnúť hrúbku vrstvy až na 100 μm . Na tejto vzorke sa testovalo bodové zváranie iba pri 18 pulzoch, keďže z tabuľky 3.7 je vidieť, že najsilnejšie boli zvary vytvorené pri tomto počte pulzov a to pri plieškoch č. 10 a 18. Zváralo sa pri prúdoch od 175 A po 250 A s krokom 25 A (viď Tabuľka 3.8).



Obrázok 3.40 - Vrstva hrúbky 55 µm pod mikroskopom

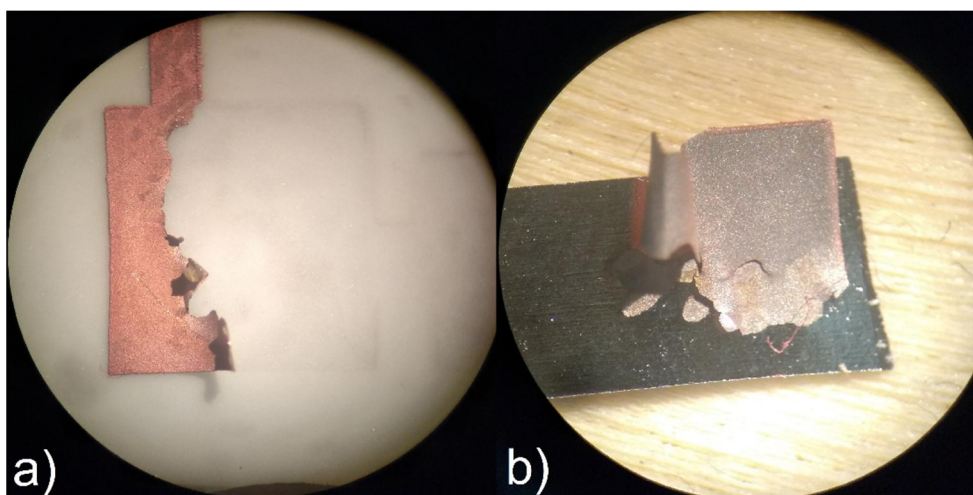


Obrázok 3.41 - Výbežky na ploške hrúbky 55 µm (zväčšenie 30x)

Tabuľka 3.8 - Výsledky testov bodového zvarovania na hrúbke vrstvy 55 μm

Č. pliešku	Hrúbka galv. pokovovania	Počet pulzov	Zvárací prúd	Vytvorenie prepojenia
[-]	[μm]	[-]	[A]	
1	55	18	175	
2	55	18	200	
3	55	18	225	
4	55	18	250	

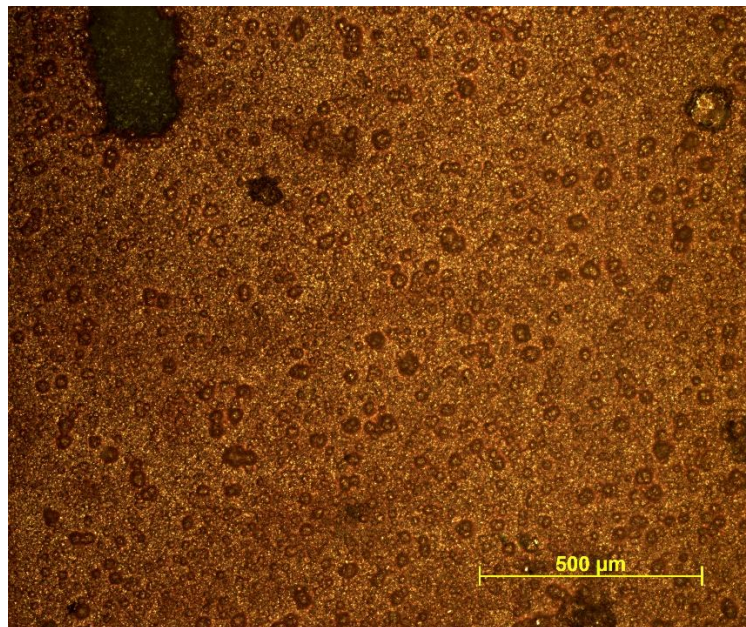
Z tabuľky 3.8 je možné vidieť, že sa zvary vytvorili pri hodnotách prúdov 225 A a 250 A. Pri hodnotách prúdov 175 A a 200 A nedošlo k vytvoreniu zvaru z dôvodu malých hodnôt prúdu, kedy boli vidieť pod mikroskopom na plôškach tenkej vrstvy iba zvyšky materiálu niklu z plieškov. Pevnosť zvarov plieškov č. 3 a 4 bola odskúšaná testom ťahu rukou. Pliešky na plôške držali až do vyvinutia väčšej sily ruky v ťahu, kde došlo k odtrhnutiu plieškov od plôšky. V oboch prípadoch plieškov došlo k delaminácii zosilnenej tenkej vrstvy plôšky zo substrátu a jej prichytenie o spodnú časť plieškov. Obrázok 3.42 ukazuje delamináciu vrstvy plôšky po ťahu pliešku rukou. Je to vzorka so zvarovým plieškom č.4 z tabuľky 3.8.



Obrázok 3.42 - a) Zvyšky zosilnenej tenkej vrstvy plôšky hrúbky 55 μm a b) spodná časť pliešku s delaminovanou vrstvou (zväčšenie 20x)

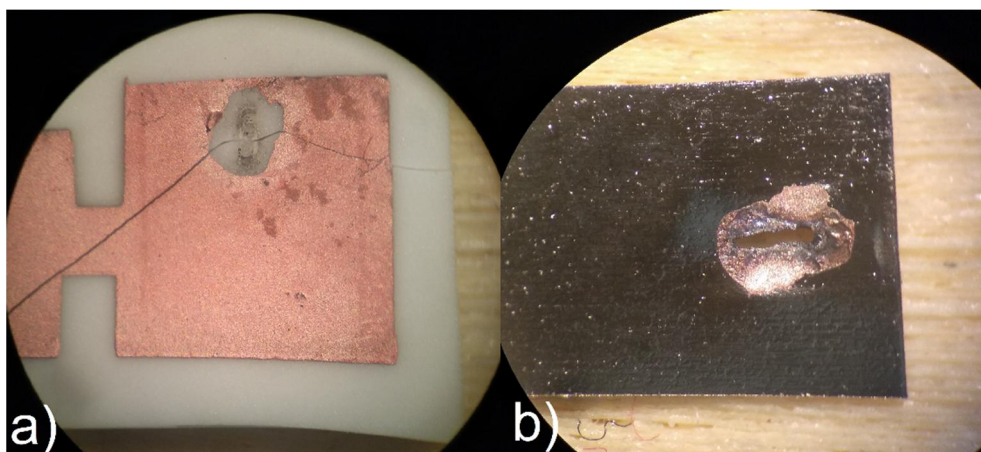
Nasledoval pokus o optimalizovanie galvanického pokovovania, aby bolo možné vytvoriť zosilnenú uniformnú tenkú vrstvu väčších hrúbok. Na to, aby sa na vrstvách spomalila tvorba výbežkov a ostrovčekov bolo potrebné znížiť hodnotu galvanického prúdu a zvýšiť dĺžku trvania zosilnenia. Elektródový potenciál medi je 0,337 V. Preto sa vyskúšalo pokovovanie pri napätí 0,4 V a hodnote prúdu 1 A. Z nedostatku času sa dĺžka trvania galvanického zosilnenia nechala opäť na 30 min. Pri týchto hodnotách

parametrov sa vytvorila uniformnejšia vzorka zosilnenej tenkej vrstvy s menším počtom materiálových výbežkov než pri predošlých parametroch. Hrúbka vrstvy bola približne až 80 μm (viď Obrázok 3.43).



Obrázok 3.43 - Vrstva hrúbky 80 μm pod mikroskopom

Zváralo sa opäť iba pri 18 pulzoch. Tentokrát sa zváralo prúdmi od 200 A až po 275 A s krokom 25 A. Na každom pliešku sa previedli 4 zvary. Spojenie sa vytvorilo u všetkých hodnôt zváracieho prúdu okrem hodnoty 275 A, kedy došlo ku prepáleniu pliešku až k deformácii substrátu z korundovej keramiky (viď Obrázok 3.44).

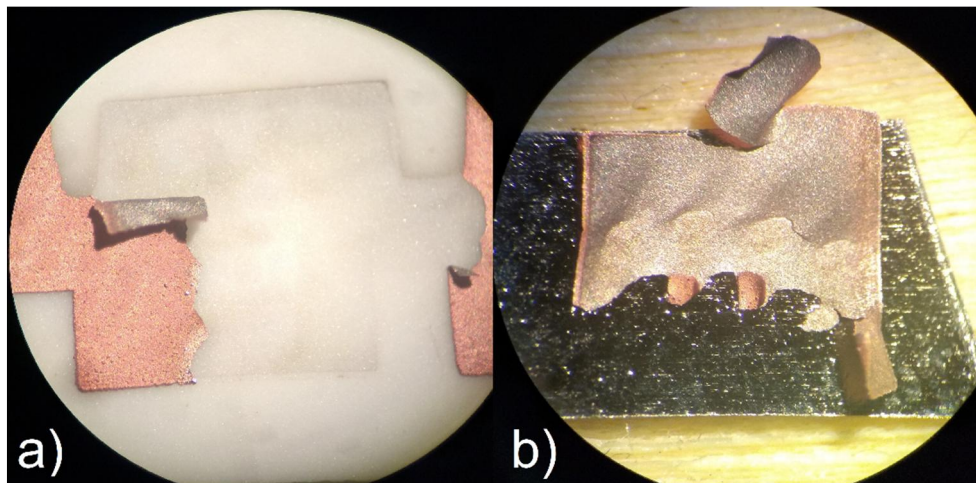


Obrázok 3.44 - a) Deformácia substrátu a b) prepálenie pliešku pri 18 pulzoch a prúde 275 A (a) zväčšenie 20x, b) zväčšenie 30x)

Tabuľka 3.9 ukazuje výsledky po zváraní spolu s výslednými hodnotami mechanických testov v ťahu. Vidieť, že najväčšiu silu v ťahu mal zvarový pliešok č.3 a to 18 N. Pri prúde 200 A nedošlo k vytvoreniu zvaru. Na plôške boli viditeľné iba stopy po nikli z pliešku. Pri hodnotách prúdov 250 A a 225 A bolo po teste v ťahu vidieť odlúpnutie resp. delamináciu zosilnenej vrstvy a jej uchytenie na spodnú stranu plieškov. Túto skutočnosť zobrazuje Obrázok 3.45. Jedná sa o fotku vzorky zvarového pliešku č. 3 z tabuľky 3.9. Z dôvodu delaminácie vrstiev sa urobil test pevnosti vrstvy nechtom prstu po vrstve bez zvarového pliešku a so zvarovým plieškom. Vrstva sa v oboch prípadoch držala a neodlúpila sa.

Tabuľka 3.9 - Výsledky bodového zvárania a mechanických testov zvarov v ťahu na hrúbke vrstvy 80 μm

Č. pliešku	Hrúbka galv. pokovovania	Počet pulzov	Zvárací prúd	Vytvorenie prepojenia	Test v ťahu
[-]	[μm]	[-]	[A]		[N]
1	80	18	275		-
2	80	18	250		11,4 N
3	80	18	225		18 N
4	80	18	200		-



Obrázok 3.45 - a) Zvyšky zosilnenej tenkej vrstvy plôšky hrúbky 80 μm po delaminácii a b) pliešok s delaminovanou vrstvou (a) zväčšenie 20x, b) zväčšenie 30x)

3.14 Optická kontrola vnútorného rozhrania zvaru

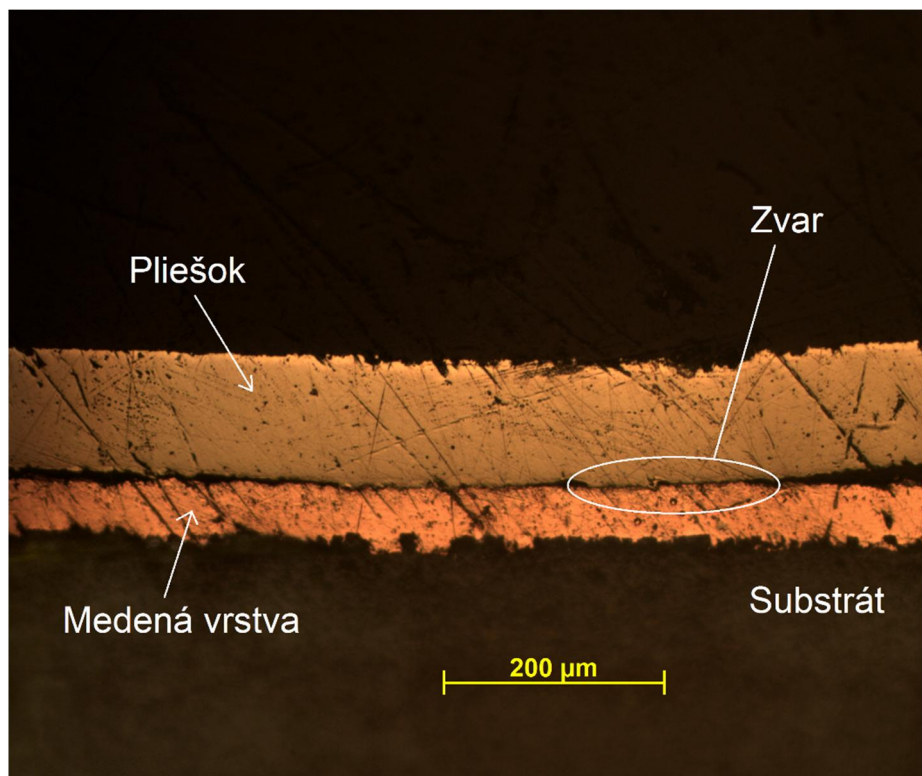
V predošlej podkapitole sa podarilo vytvoriť zvary na väčších zosilnených hrúbkach tenkej vrstvy medi a to na 55 μm a 80 μm . Pre kontrolu týchto zvarov sa vytvorila ešte posledná hrubšia vrstva z 20 μm na 55 μm , na ktorej sa vytvorili 4 zvary na každom z 2 plieškoch pri 18 pulzoch a pri prúdoch 225 A a 250 A. Pliešok, na ktorom sa vytvorili zvary pri prúde 225 A sa označil číslom 1 a pliešok, na ktorý sa zvárало prúdom 250 A sa označil číslom 2.

Vzorka pre optickú kontrolu sa vložila do plastovej nádoby na tvorbu ľadu a podložila sa lepiacou páskou, aby vzorka ležala v strede nádoby mierne nad jej dnom. Do plastového pohára sa nasypala dvojzložková metylmetakrylátová odlievacia živica v podobe prášku a doliala sa tekutinou. Pomer tekutiny a prášku bol v pomere 2:1. Následne sa prášok s tekutinou miešal až kým nedošlo k rozpusteniu a vytvoreniu hmoty s vyššou viskozitou. Touto hmotou sa následne zaliala vzorka umiestnená v nádobe na ľad. Hmota sa nechala zatuhnúť po dobu 2-3 hodín.

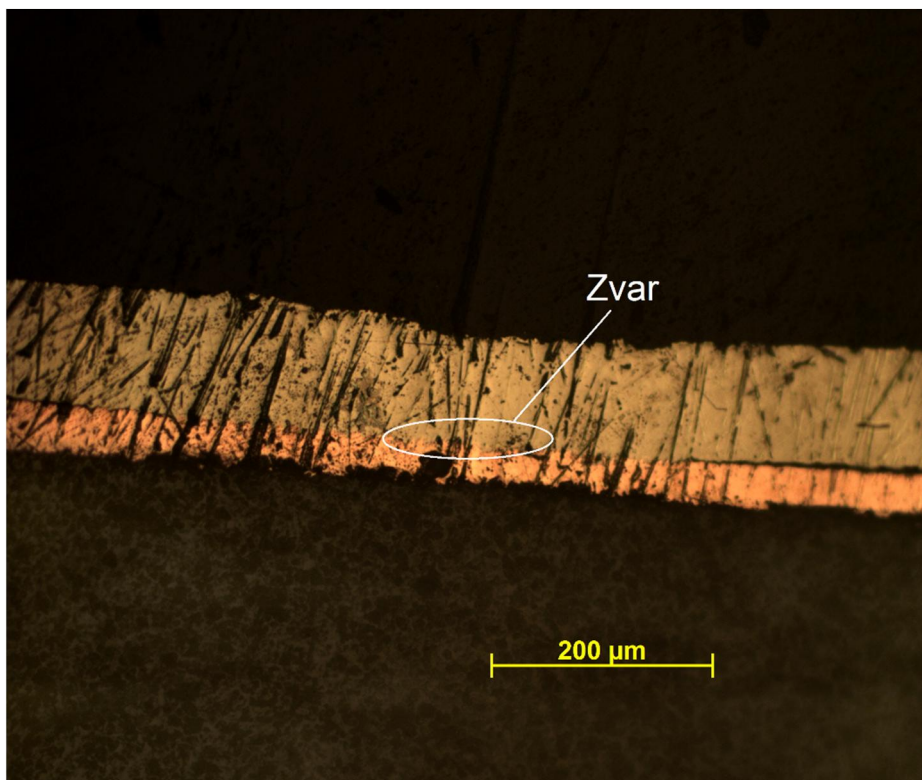
Po zatuhnutí sa vzorka vybrala a bolo potrebné ju zbrúsiť na brusnom kotúči, aby sa dosiahlo vnútorného rozhrania zvaru. Pliešky sa zvarili na plôšky tak, aby sa po zaliatí dala vzorka brúsiť z oboch koncov strán a bolo tak možné sa dostať k obom zvarom. Po hrubom brúsení na brusnom kotúči sa brúsila vzorka jemným brúsením brusným papierom P1000. V priebehu brúsenia sa kontrolovalo dosiahnutie rozhrania zvaru pod mikroskopom. Na záver sa oba vybrúsené rozhrania zvarov zaliatej vzorky vyleštili leštiacimi pastami postupne s veľkosťami zrn 5 μm , 2,5 μm a 0,5 μm , aby bolo možné čo najlepšie vidieť rozhranie pod mikroskopom.

Následne sa uskutočnila optická kontrola vytvorených zvarov pod mikroskopom. Ako prvé sa kontrolovalo vnútorné rozhranie zvarov pliešku č.1. Pod mikroskopom sa našiel jeden zvar (viď Obrázok 3.46). Polohu zvaru je možné odhadnúť podľa zdeformovanej hornej časti pliešku a jeho mierneho ohnutia pri priložení a pritlačení elektród bodovej zvaračky. Na rozhraní vidieť malé ryhy v podobe čiernych čiar. To je spôsobené leštením leštiacimi pastami s rôznymi hrúbkami zrn. Nie je ale vidieť, žeby došlo k delaminácii vrstvy zo substrátu.

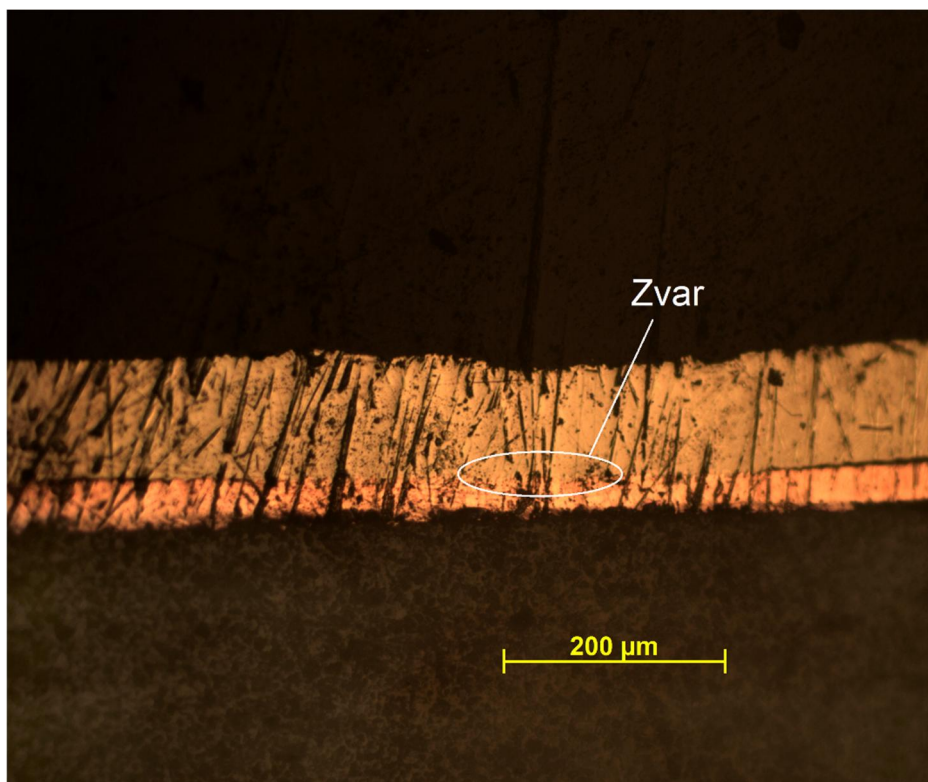
Na vnútornom rozhraní pliešku č. 2 možno vidieť pod mikroskopom 2 zvary (viď Obrázok 3.47 a Obrázok 3.48). Obrázok 3.49 ukazuje náznak vytvorenia možného 3. zvaru pliešku č.2. Nie je však možné potvrdiť, či sa jedná o zvar z dôvodu, že nie je na pliešku vidieť deformácia pri pritlačení elektród, ale je možné vidieť malý ohyb pliešku. Opäť nie je vidieť, žeby došlo k delaminácii vrstvy zo substrátu.



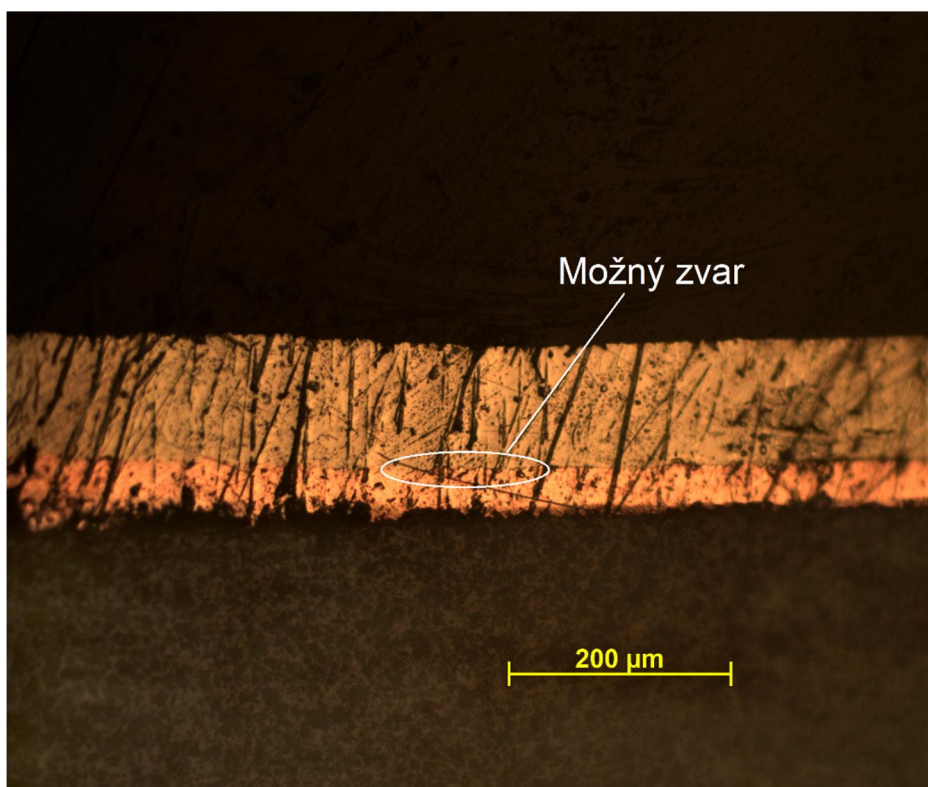
Obrázok 3.46 - Vnútorné rozhranie zvaru pliešku č.1



Obrázok 3.47 - 1. zvar pliešku č.2



Obrázok 3.48 - 2. zvar pliešku č.2



Obrázok 3.49 - 3. zvar pliešku č.2

ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť spoje bodovým zváraním na tenkej vrstve a overiť ich pevnosť mechanickými testami a optickou kontrolou vnútorného rozhrania spojov.

Pred vytvorením spojov zváraním sa navrhol motív tenkej vrstvy v programe Eagle. Po návrhu sa vytvorili šablóny vyrezaním motívu laserom do mosadzného plechu hrúbky 150 μm . Šablóny sa pripevnili na substráty z korundovej keramiky a dali sa naparovať do naparovacieho prístroja pre vytvorenie tenkých vrstiev z materiálu nikelchrómu. Vytvorené tenké vrstvy sa galvanicky pokovovali meďou. Avšak problém nastal hneď pri pokuse o pokovovanie, kedy sa tenké vrstvy NiCr nepokovovali. Za problém sa považovala možná prítomnosť materiálu volfrámu z dôvodu deformácie lodičky v naparovacej komore. Spektrálnou analýzou sa ale nezistila prítomnosť volfrámu. Problém bol nakoniec v tom, že naparená tenká vrstva NiCr nemala dostatočnú vodivosť. Z tohto dôvodu sa nechali vytvoriť ďalšie vzorky naparovaním, ale tentokrát sa tenká vrstva vytvorila nanosením 100 nm materiálu NiCr a 150 nm materiálu medi.

Vzorky s naparenou tenkou vrstvou sa rozrezali na menšie časti diamantovým hrotom. Tenká vrstva medi sa následne zosilnila galvanickým pokovovaním postupne na hrúbky 10 μm , 20 μm a 30 μm . Vrstvy ale neboli uniformné a vznikali na nich po pokovovaní rôzne materiálové výbežky, čo sa prejavilo rôznym zafarbením zosilnenej medi na jednotlivých častiach vzoriek. Meď bola na niektorých miestach motívu tmavšia a na iných svetlejšia. Vypočítané parametre galvanického pokovovania nesesedeli so skutočnými hodnotami. Optimalizácia pokovovania bola preto veľmi náročná najmä z časového hľadiska a proces pokovovania sa nepodarilo úplne zoptimalizovať.

Na vytvorených vzorkách následne prebiehali pokusy o vytvorenie spojov bodovým zváraním železných poniklovaných plieškov. K dispozícii boli 3 typy poniklovaných železných plieškov, ktoré sa líšili rozmermi. Pri pokusoch sa používal typ plieškov s rozmermi 0,1x4x100 mm². Na zosilnených tenkých vrstvách hrúbky 10 μm sa nepodarilo vytvoriť žiadny zvar. Zosilnená tenká vrstva po priložení hrotov a pri toku zväracích prúdov difundovala do materiálu pliešku. Na zosilnených tenkých vrstvách hrúbok 20 μm a 30 μm sa podarilo vytvoriť zopár zvarov. Zvary však neboli dostatočne silné a veľa zvarov plieškov sa odtrhlo ešte pred mechanickými testami v ťahu. Po odtrhnutí bolo vidieť u veľa vzoriek, že došlo znovu k difúzii alebo k delaminácii tenkej vrstvy plôšok a uchytenie vrstvy o spodné časti plieškov. Uskutočnili sa preto testy, pri ktorých sa nechťom prstov zisťovala pevnosť vrstvy na substráte. Na naparenej vrstve a aj na pokovovanej nedošlo k odlúpeniu vrstvy. Takisto nedošlo k odlúpeniu ani pri teste pevnosti vrstvy na zvarenom pliešku.

K delaminácii vrstvy mohlo pravdepodobne dôjsť pri zváraní vplyvom veľkej teploty pri prechode zväracím prúdom, a tým mohlo dôjsť k zoslabeniu alebo až porušeniu

mechanických Van der Waalsových síl medzi substrátom a zosilnenej tenkej vrstvy. Vplyv mohla mať aj nedostatočná uniformnosť pokovovanej vrstvy.

Z dôvodu neúspechu vytvorenia zvarov pri menších pokovovaných hrúbkach tenkej vrstvy sa vyskúšalo zosilniť vrstvu na väčšiu hrúbku. Preto sa vytvorili pokovované vzorky s hrúbkami 55 μm a 80 μm . Na týchto vrstvách boli úspešné zvary na dvoch plieškoch a to pri vytvorení 4 zvaroch na každom pliešku s počtom pulzov 18 a hodnotami prúdov 250 A a 225 A. Zvary sa podrobili mechanickým testom v ťahu. Najsilnejší zvar mal hodnotu sily v ťahu 18 N. Po ťahu bolo opäť vidieť delamináciu tenkej vrstvy plôšky a jej uchyteniu o spodnú časť pliešku.

Vzorka s týmito dvomi zvarenými plieškami sa zaliala do zmesi zo živice a nechala sa vytvrdiť. Vzorka sa následne vybrúsila a vyleštila, aby sa dosiahlo vnútorného rozhrania oboch plieškov so zvarmi. Z vnútorného rozhrania zvarov sa pod mikroskopom dali viditeľne rozoznať spolu 3 zvary. Z obrázkov v podkapitole 3.14 je možné rozoznať vytvorenie zvarov podľa ohybu pliešku a jeho čiastočnou deformáciou na povrchu.

Z týchto všetkých poznatkov vyplýva, že je možné vytvoriť spoje bodovým zvaraním na galvanicky zosilnených tenkých vrstvách. Táto metóda má potenciál pre pripojovanie vývodov na tieto vrstvy. Je však potrebné zoptimalizovať parametre galvanického zosilnenia vrstiev, aby bolo možné vytvoriť uniformnejšie zosilnené vrstvy s väčšími hrúbkami než 30 μm . Taktiež je potrebné zoptimalizovať a nájsť vhodné parametre bodového zvarania pre tieto vrstvy. Zatiaľ sa ako najvhodnejšie ukazujú v tejto práci parametre zvarania 18 pulzov a hodnoty prúdov 225 A a 250 A.

LITERATÚRA

- [1] *Hybridní integrované obvody, tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie a jejich využití* [online]. , 1-5 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol_III-1tlus_a_tenk.pdf
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *Moderní mikroelektronické technologie - základ elektronického hardware*. Brno: NOVAPRESS s.r.o, 2015. ISBN 978-80-214-5293-0.
- [3] *Technologie výroby polovodičů* [online]. , 196 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fei-kte/slovak/subjects/ZIM/Kapitola%2011%20-%20Technologie%20vyroby%20polovodicov.pdf>
- [4] Sítotisk. *Jgacolor* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.jgacolor.cz/technologie/sitotisk>
- [5] Pájení, pájení mědi, tvrdé pájení, měkké pájení, pájky, páječky, tavidla, pájení hliníku. *Schinkmann* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/pajeni-1>
- [6] NERADIL, Petr. *Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] Měkké a tvrdé spájkování. *Matnet* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=376>
- [8] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno, 2017. Skriptá. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] Tvrdé pájení. *CHEM-WELD* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/http/eshop-chemweld-cz/tvrde-pajeni-b4050-htm>

- [10] COUCOULAS, Alexander. *Ultrasonic Welding of Aluminum Leads to Tantalum Thin Films*. Dostupné také z: https://5fef37f9-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/coucoulasthermosonicbondalta/home/ThermosonicBond%20Al%20to%20Ta%20thin%20films%20pp.3.pdf?attachauth=ANoY7cq_qBKnv5JiDbOrzfEY42vL9XYdnJhENIYE8-1btPL6PZru42ZKoyD5m19FcGvQkEwE7OLBtveTYCEpyUdi7tND3lSwsY1wxP4Z2Gglt_WDk85n0LBtssxfQBdZXKlAhlfKIp_1-JJ4lkGneYfEir1D6D2OpmePdKZGqDQHZx4isYs1Ft-gp2fmrFji0s1EmoNFJSDBD8RHKZllbCNzB71N8OrFRWiNp6Wt8R9NQmlQwKv6TCTyUF7l2D2VYhIqWku6UqHV-ZKgnDCKsRFyGHcY1g-qlQ%3D%3D&attredirects=1
- [11] ULTRA SOUND. *Whelanwise* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://whelanwise.blogspot.com/2012/07/ultra-sound.html>
- [12] Ultrasonic Welding. *Slideshare* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ArvindChavan/ultrasonic-welding-72257872>
- [13] Thermocompression Welding. *Amadaweldtech* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.amadaweldtech.eu/knowledge-base/thermocompression-welding>
- [14] ANDERSON, Lynda. *Method for making and testing thermocompression bonds*. Uděleno Feb. 18, 2003. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US6520026B1/en>
- [15] WHAT IS SPOT WELDING? (A COMPLETE WELDING PROCESS GUIDE). *Twi-global* [online]. 2020 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding>
- [16] SPOT WELDING TECHNICAL INFORMATION. *Titespot* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.titespot.com/spot-welding-technical-information/>
- [17] Tepelná vodivost. *Av-equen* [online]. 2020 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.av-equen.cz/znalosti/tepelna-vodivost/>

- [18] Electrical Resistivity Table for Common Materials. *Electronics-notes* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/basic_concepts/resistance/electrical-resistivity-table-materials.php
- [19] Fundamental of IC assembly Chapter 9. In: *Apachepersonal* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://apachepersonal.miun.se/~gorthu/goran/kurs%20nov%20dec%202013/Chapter_9%20131107%20lecture%20%20.pdf
- [20] Nikl. *Prvky* [online]. c2009-2017 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>
- [21] Bodová svářečka kontaktů baterií a aku packů Sunkko 709A s mikropájkou. *Hotair* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pajeni/tvrde-pajeni/bodova-svarecka-kontaktu-baterii-a-aku-packu-sunkko-709a-s-mikropajkou.html>
- [22] *Sunkko Model: 709A Battery Spot Welder with Soldering Function* [online]. , 2-3 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.sunkko.net/content/JFHSW/709A-MANUAL.pdf>
- [23] Choosing the Right Material for Spot Welding Electrodes. *Metalcutting* [online]. 2020 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://metalcutting.com/knowledge-center/choosing-the-right-material-for-spot-welding-electrodes-2/>
- [24] *POKOVOVÁNÍ POLYETYLENTEREFALÁTU MĚDÍ A REALIZACE VODIVÝCH STRUKTUR* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68413. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [25] *Návrh a realizace zařízení pro měření síly v tahu u SMD*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
HIO	hybridný integrovaný obvod
Sn	chemická označenie cínu
Pb	chemická označenie olova
Cu	chemická označenie medi
NiCr	chemické označenie zliatiny nikelchróm
SAC	spájka obsahujúca rôzne pomery cínu, striebra a medi
SN100C	spájka obsahujúca 99,3% cínu, 0,7% medi, 0,05% niklu a 0,005% germánia
Zn	chemická označenie zinku
Mn	chemická označenie mangánu
Cd	chemická označenie kadmia
UV	ultrafialové žiarenie
IR	infračervené žiarenie
CO ₂	oxid uhličitý
Nd: YAG	Yttrium Aluminium Granát dopovaný iónmi neodýmu
QCN	kremenná nanováha (Quartz Crystal Nanobalance)

Symboly:

I	prúd	[A]
p _n	rovnovážny tlak nasýtených pár	[Pa]
M	mólová hmotnosť	[kg/mol]
T	teplota	[°C]
m	hmotnosť látky	[kg]
t	čas	[s]
v	počet elektrón, ktoré sa pri elektrolýze odovzdajú alebo získajú	[-]
V	objem zosilnenej tenkej vrstvy	[m ³]
S	celková plocha vodivého povrchu substrátu	[m ²]
N _A	Avogadrova konštanta	[-]
ρ	hustota	[kg/m ³]
e	veľkosť náboja 1 elektrónu	[C]