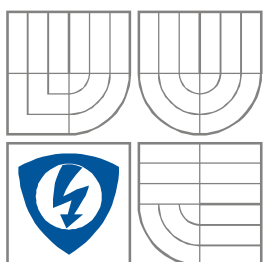


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu

Mounting of Leads by Brazing on Alumina substrate

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Petr Neradil

AUTHOR

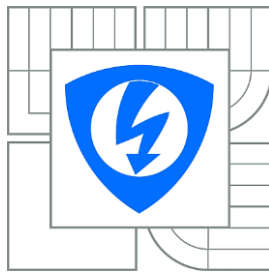
VEDOUcí PRÁCE

Ing. Alexandr Otáhal

SUPERVISOR

BRNO

2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Petr Neradil
Ročník: 3

ID: 146068
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte rešerši v oblasti způsobu propojení vývodů na keramický substrát. Zhotovte navržené testovací substráty pro provádění zkoušky teplotní odolnosti (do 500 °C), na které následně zapájejte vývody z materiálu vybraného v semestrálním projektu. Stanovte parametry technologického procesu pro správné zapájení a výsledné spoje otestujte, jak mechanicky, tak elektricky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynu vedoucího.

Termín zadání: 10. 2. 2014

Termín odevzdání: 5. 6. 2014

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

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 c.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce řeší problematiku realizace vývodů hybridních integrovaných obvodů pro výkonové aplikace. Dále uvádí výhody jednotlivých typů vývodů i jejich technologií. Rozebírá materiály používané pro tvrdé pájení a popisuje problematiku tvrdého pájení v elektrotechnickém průmyslu. Dále práce uvádí technologické postupy pro připájení vývodů pomocí tvrdé pájky na keramický substrát. V závěru práce obsahuje výsledky tepelných a mechanických testů výsledného spojení.

Klíčová slova

Výkonová elektronika, hřebínkové vývody, tvrdé pájení, hybridní integrované obvody

Abstract

Bachelor's thesis deals with the issue of implementation hybrid integrated circuit terminals for performance applications. It also states the advantages of each type of terminals and their technology. It discusses the materials used for brazing and describes problems of brazed in the electrical industry. The thesis also presents techniques for brazing of leads by brazers on the ceramic substrate. The conclusion contains the results of thermal and mechanical tests of the resulting connection.

Keywords

Power electronics, lead frame, brazing, hybrid integrated circuits

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramický substrát“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2014

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Řezníčkovi za cenné rady. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům Renatě a Petru Neradilovým za podporu při studiu.

V Brně dne 4. června 2014

.....
podpis autora

Bibliografická citace:

NERADIL, P. *Montáž vývodů pomocí tvrdých pájek na keramickém substrátu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Alexandr Otáhal.

Obsah

Úvod.....	7
1 Hybridní integrované obvody.....	8
1.1 Tlustovrstvá technologie.....	8
1.2 Tenkovrstvá technologie.....	8
2 Realizace vývodů HIO	9
2.1 Termokompresní kontaktování (Thermocompression Wire Bonding).....	9
2.1.1 Kulové spojení (Ball bonding)	9
2.1.2 Klínové spojení (wedge bonding)	10
2.2 Termosonické kontaktování (Thermosonic Wire Bonding)	11
2.3 Ultrazvukové kontaktování (Ultrasonic Wire Bonding).....	11
2.4 Laserové kontaktování (Laser Wire Bonding).....	12
2.5 Pulzně-teplotní termokompresní spojení	12
2.6 Automatické single-point páskové spojování	12
2.7 Připojení HIO hřebínekovými vývody	13
2.7.1 Hřebínekové vývody SIL (leadframe SIL)	14
2.7.2 Hřebínekové vývody DIL (leadframe DIL).....	14
2.7.3 Mosazné hřebínekové vývody (brass leadframe).....	15
2.7.4 Pinové hřebínekové vývody (Pin Lead Frame).....	15
2.7.5 Hřebínekové vývody s Au kontakty (lead frame with Au contact)	16
3 Pájení.....	17
3.1 Materiály pro tvrdé pájky	18
3.2 Aplikace používající tvrdé pájení	20
3.3 Způsoby tvrdého pájení	21
3.3.1 Pájení plamenem	21
3.3.2 Pájení v peci	23
4 Praktická část.....	25
4.1 Použité přístrojové vybavení	27
4.1.1 Sítotiskový poloautomat AUREL C 880 Screen Printer	27
4.1.2 Sterilizátor CHIRANA HS 62 A.....	28
4.1.3 Průběžná přetavovací pec BTU TFF51	28
4.1.4 HOTPLATE	29
4.1.5 Kyslíkovodíková svářečka	30
4.1.6 Laboratorní pec LMH LAC.....	30

4.1.7	Laboratorní zdroj MANSON	31
4.1.8	Zařízení pro měření síly v tahu u SMD.....	31
4.2	Technologický proces tvrdého pájení	32
4.2.1	Technologický proces tvrdého pájení pro pájecí pastu	32
4.2.2	Technologický proces tvrdého pájení pro drátovou pájku Ag15CuP	33
4.3	Návrh testovací struktury a zjišťování zasychavosti tavidla.....	34
4.4	Realizace pájení ve vypalovací peci pro tlusté vrstvy	36
4.5	Realizace pájení pomocí svářečky a HOTPLATE.....	37
4.5.1	Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty a hřebíkových vývodů..	38
4.5.2	Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty a vývodů s větší kontaktní plochou	38
4.5.3	Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty, hřebíkových vývodů a stojanu na mikroplamen.....	39
4.5.4	Realizace spoje pomocí Ag15CuP pájky a vývodů ze slitiny železa, chromu a niklu	40
4.5.5	Realizace spoje pomocí pájky Ag45CuZn a vývodů ze slitiny niklu, chromu a titanu	42
4.6	Zkoušky tepelné.....	43
4.7	Mechanické zkoušky tahem.....	44
4.7.1	Test pájky Ag45CuZn a vývodů ze slitiny niklu, chromu a titanu	45
4.7.2	Test pájky Ag15CuP a vývodů ze slitiny železa, niklu a chromu.....	46
4.7.3	Test stříbrné pájecí pasty a vývodů ze slitiny železa, niklu a chromu ...	48
	Závěr	50
	Použitá literatura	51
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	53
	Seznam zkratk	53
	Seznam rovnic.....	53

Úvod

Hybridní integrované obvody jsou v dnešní době nedílnou součástí našich životů. Většina elektronických přístrojů je vytvářena tímto typem technologie. Připojení Hybridních integrovaných obvodů do přístrojů nebo jiných systémů je jedním z nejdůležitějších aspektů jejich vytváření. Typ vývodu a způsob připojení hraje nemalý vliv na celkové vlastnosti a spolehlivost výsledného obvodu. Typ vývodu volíme takový, jehož vlastnosti splňují požadavky na danou aplikaci. Jedním ze základních způsobů připojení je pomocí pájení.

Pájení je jednou z nejstarších metod spojování za tepla. I když je tato metoda známá již dlouhou dobu, rozsáhlé rozšíření bylo zaznamenáno teprve nedávno. Hybridní integrované obvody využívají pro připojení vývodů tzv. měkké pájení. Tvrdé pájení se pro připojení těchto vývodů využívá pouze výjimečně a jen na specifický druh aplikací. Metoda tvrdého pájení je především využívána v aplikacích, jako je letectví, automobilový průmysl, lékařství a elektrotechnika. Výhodou této metody je především vysoká pevnost spoje a možnost vysokého výkonového zatížení.

Úkolem této práce je zkoumání různých způsobů připojení vývodů na keramický substrát a zkoumání materiálů pro tyto vývody. První část práce poskytuje přehled různých technologických procesů jak z hlediska vývodu, tak z hlediska pájení.

Druhá část popisuje technologický postup připojení vývodů na keramický substrát pomocí tvrdé pájky a zkoušky výsledného spojení.

1 Hybridní integrované obvody

Hybridní integrované obvody (dále už jen HIO) jsou spojením vrstevových technologií (tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie), kterými jsou realizovány pasivní součástky, a aktivní součástky. Výsledný obvod může být zalit do pouzdra, které je následně použito do dalšího obvodu.

Původně byly HIO používány pro úsporu místa na plošném spoji díky tomu, že pasivní součástky byly přímo integrovány na substrátu. S postupným zmenšováním rozměru a dalších aspektů ztratil tento aspekt význam. Ale i nadále nalézají uplatnění v letectví, automobilovém průmyslu a jiných aplikacích, kde je velký nárok na přesnost, velkou mechanickou a tepelnou odolnost, vysokou spolehlivost, životnost a jiné. [1]

HIO můžeme rozdělit podle mnoha aspektů např.

- Podle použité technologie (tlustovrstvé a tenkovrstvé).
- Podle způsobu montáže součástek (se součástkami SMD nebo s čipy).

1.1 Tlustovrstvá technologie

Charakteristickým znakem tlustovrstvé technologie používané v elektronice pro realizaci vodivých, odporových a dielektrických vrstev je jejich amorfní struktura.

Vytváří se aditivním způsobem nevakuovými depozičními metodami (nejčastěji sítotiskem) a následným výpalem (sintrací) při teplotě kolem 850°C. Tloušťky vrstev se pohybují řádově v desítkách μm , tedy přibližně o dva řády více než u tenkých vrstev.

Materiály pro vytváření tlustých vrstev jsou dodávány ve formě past. Svým složením se pasty, jejichž viskozita má hodnotu pohybující se v rozsahu 50 až 80 Pa.s., skládají se ze tří základních složek:

- funkční,
- tavivové,
- pojivové.

Tlustovrstvé technologie mají o poznání horší parametry než tenkovrstvé ale jsou o poznání levnější.[1]

1.2 Tenkovrstvá technologie

Tloušťka tenkých vrstev se pohybuje v rozmezí desetin až jednotek μm , v důsledku čehož neplatí tytéž fyzikální konstanty a vlastnosti jako u běžných objemů materiálů. To předurčuje jejich mimořádné elektrické vlastnosti (vrstevový odpor, teplotní součinitel odporu apod.), což je právě v elektronice při realizaci struktur využíváno.

Pro vytváření tenkých vrstev se využívají vakuové procesy a proto je tato technologie plně slučitelná s polovodičovými technologiemi.

Na keramických substrátech jsou tenké vrstvy (podobně jako tlusté vrstvy) využívány pro realizaci především pasivních sítí, i když u některých materiálů lze pozorovat i polovodičové vlastnosti.

Tenkovrstvé pasivní sítě se vyznačují velmi dobrými elektrickými vlastnostmi a využívají se jak pro realizaci přesných odporových sítí, tak pro hybridní tenkovrstvé obvody.[1]

2 Realizace vývodů HIO

Vytvoření Hybridního integrovaného obvodu nezávisí pouze na druhu technologie, ale také na způsobu propojení tohoto zařízení s okolním světem. Materiály, respektive vlastnosti vodičů mají velký vliv na vlastnosti výsledného obvodu. Nejvýznamnější vlastností je asi vodivost, odolnost proti mechanickému a tepelnému namáhání, kapacita vývodů atd.

Podle toho, co se od daného obvodu očekává lze některé z parametrů upravit. Buď volbou materiálu, nebo nastavením tloušťky a délky vývodů. Například, potřebujeme-li minimalizovat impedanci a RC zkreslení musíme použít propojení co nejkratší. Pokud potřebujeme snížit odpor vývodů, zvolíme materiál s nízkým odporem. Nejpoužívanější materiály pro realizaci vývodu jsou zlato Au, Stříbro Ag a měď Cu. Každý z těchto materiálů má své specifické vlastnosti. Z těchto materiálů je nejlepším zástupcem pro snížení odporu měď, protože má výrazně nižší odpor než zlato a nese sebou méně komplikací než stříbro a je nákladově efektivní. Při snížení kapacity přívodu ale vzniká problém. Materiál s nízkou kapacitou může být porézní, hygroskopický a horší při nižších teplotách než materiál s mírnou nebo vysokou kapacitou. Takže musíme vždy zvolit kompromis mezi materiálem a RC účinkem.[2]

Často užívaným způsobem pro připojení vodičů k HIO jsou tzv. drátové spojení (wire bonding). Lze ho dělit podle použité technologie na:

- termokompresní kontaktování (Thermocompression Wire Bonding),
- termosonické kontaktování (Thermosonic Wire Bonding),
- ultrazvukové kontaktování (Ultrasonic Wire Bonding),
- laserové kontaktování (Laser Wire Bonding).

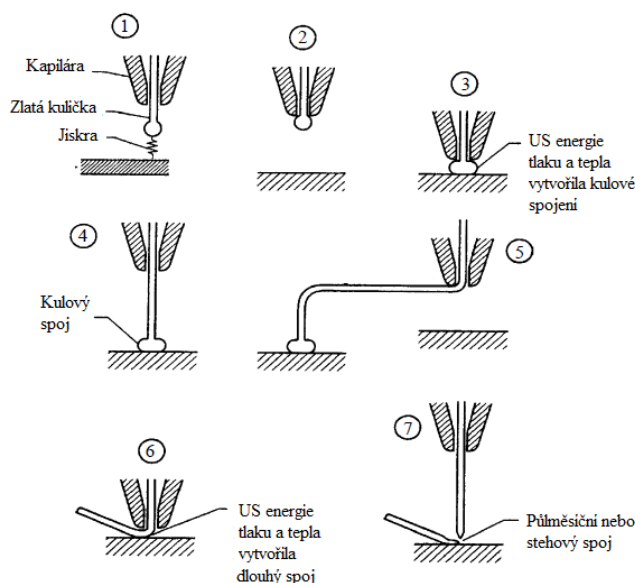
2.1 Termokompresní kontaktování (Thermocompression Wire Bonding)

Thermos je řecké slovo označující teplo a compression je komprese. Jinými slovy, při termokompresi drátového připojení je užíváno současně teploty i tlaku. Tlak je aplikován na místo na kontaktu, kde vytvoří metalurgickou vazbu, při teplotě, která je značně pod bodem tání materiálu. Nejpoužívanější materiál pro termokompresní připojení je zlato. Připojení pomocí termokompresce je flexibilní technika sloužící pro propojení čipů hybridního mikroobvodu a může se provádět třemi základními metodami:

- kulové spojení (ball bonding),
- stehové spojení (stitch bonding),
- klínové spojení (wedge bonding).

2.1.1 Kulové spojení (Ball bonding)

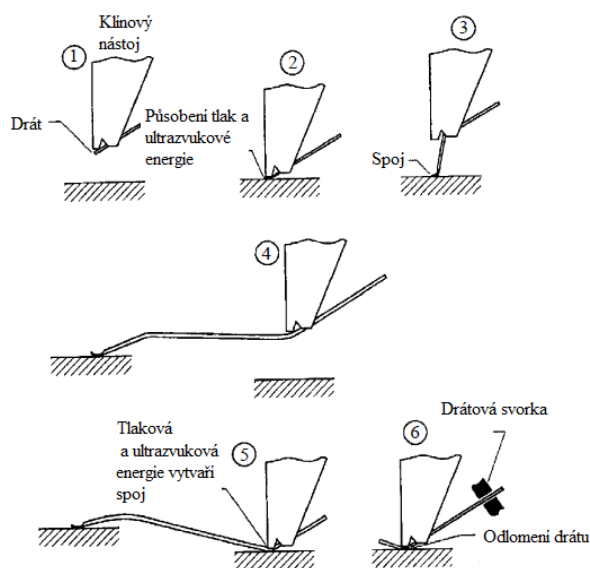
V této technice je zlatý drát, malého průměru (13-76 μm), přiváděn přes karbid-wolframovou kapiláru, která je zahřátá, a tím se tvoří na konci kulička. Ve většině případů, je substrát ohříván na 300°C, aby se dosáhlo správné teploty spojení. Po přiložení na substrát dojde k uvolnění kuličky a ta ulpí na substrátu. Následně se kapilára, obsahující zlatý drát, přisaje na pokovenou podložku a spoj je vytvořen bez kulovitého zakončení. Druhá vazba bez kulovitého zakončení se nazývá stehové spojení neboli stitch bonding. Způsob výroby je zobrazen na obr. 1.



obr. 1 Technologický proces výroby kulového spoje [3]

2.1.2 Klínové spojení (wedge bonding)

U tohoto spojení se karbido-wolframový nástroj klínovitého tvaru používá za normálního tlaku. Tato síla způsobuje plastickou deformaci drátu, jakož i soudržnost mezi vodičem a zemí. Tato síla někdy deformuje a oslabuje drát, což má za následek kratší životnost spoje. Způsob výroby je zobrazen na obr. 2.



obr. 2 Technologický proces výroby wedge bonding [3]

Termokompresní kontaktování vyžaduje vysokou úroveň čistoty. Plazmové čištění před drátovým spojením má za následek výrazné zvýšení přilnavosti kuličkových vazeb, kdyby byl povrch nečištěn, mělo by to za následek dutiny a předčasné selhání spoje během vytápění. Jedním z největších problémů, u jemné rozteče pájení, se týká pájení hardwaru. Konvenční 30° kapilára prostě nemůže splnit požadavky na spojení o velikosti 114 μm , aniž by nedošlo ke zničení sousedního spoje. Speciální kapiláry tzv. zúžené kapiláry by mohly být odpovědí. Tyto jemné kapiláry mají dostatek místa pro spoj, ale s užší kapilárou klesá její životnost. Nicméně termokompresní vazba je spolehlivá a velmi silná.[2]

2.2 Termosonické kontaktování (Thermosonic Wire Bonding)

Termokompresie nebo hot-wire ultrazvukové spojování využívá proměnnou termokompresi (tj. síla, teplota a čas), a kromě toho i vibrační pohyb. Využívá vytápění od 25°C do 600°C. Nevytápěná kapilára je připojena přímo k ultrazvukovému rohu, který využívá vibrační energii ze dvou ultrazvukových generátorů. Ultrazvukový generátor obsahuje 60kHz oscilátor, převodník a rychlostní spojovací systém (roh). Piezoelektrické převodníky převádějí elektrickou energii na vibrační pohyb hrotu. Spojovací systém s dvojitým upínáním pomáhá zajistit vyrovnání spojovacího nástroje přímo na části nebo podložce, která je určena k připojení. Teplota podkladu se měří termočlánkem, který je připojen k digitálnímu ukazateli. Magnetický snímač a osciloskop se používají pro kalibraci časové šířky, amplitudy ultrazvukové energie a frekvence. Velikost kuličky je udržována na přibližné hodnotě, která je 2,5 krát větší než průměr drátu (který má přibližně 0,06 mm). Výhody termosonického kontaktování oproti termokompresnímu spojování lze shrnout následujícím způsobem:

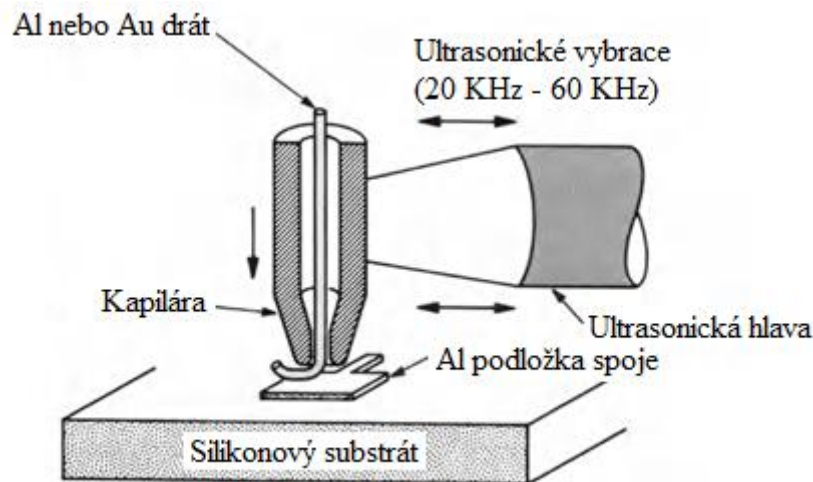
- Vazební síly potřebné k spojování termosonicky jsou relativně nízké než síly potřebné pro termokompresní kontaktování.
- Termosonické kontaktování může být prováděno při snížené teplotě podkladu.
- Termosonické kontaktování v podstatě eliminuje potřebu zvláštních metod čištění.
- Termosonické kontaktování vytváří velmi malou nebo žádnou změnu v pevnosti.

Termosonické kontaktování urychluje proces difundování zlata nebo hliníku. V době co nejkratší, během několika milisekund, vytváří silnou, svařovanou intermetalickou strukturu. Doba trvání ultrazvukové aplikace a úroveň absorpce energie mají významný vliv na reaktivitu a vlastnosti výsledného spoje. Použití Bonding wire je stále převládající způsob připojení hybridních obvodů. Připojování drátů od 18 μm po přibližně 76 μm s průměrem asi 25 μm je nejvíce populární.

Termokompresie a ultrazvukové spojování jsou dva hlavní procesy používané v hybridní mikroelektronice při spojení drátu s kovovým podkladem. Zlatého drátku je často používáno v termokompresním spojování naopak hliníku je zase využíváno u ultrazvukového spojování. Bylo prokázáno, že stříbrné vodiče mají spojování srovnatelné se zlatými vodiči a silové vazby drátových spojení provedených stříbrnými vodiči netrpí při vysoké teplotě stárnutím.[3]

2.3 Ultrazvukové kontaktování (Ultrasonic Wire Bonding)

U ultrazvukového spojení je ultrazvuková energie oscilátoru (20 až 60 kHz) aplikovaná na klín. Drát se přivádí kapilárou pod klín. Klín vibruje vlivem ultrazvukové energie a tím dochází ke tření drátu o kovový povrch, což způsobuje lokální vytápění a v konečném důsledku metalurgický svár. Ultrazvukový proces je zobrazen na obr. 3. Používá se obvykle hliníkový drát o průměru 25,4 μm , i když může být využit i zlatý drát s průměrem 18 μm . Každý oxid na hrotu hliníkového drátu je zničen a tendence oxidovat napomáhá třecímu procesu, který produkuje vysoce spolehlivé vazby. Kompatibilita ultrazvukového spoje závisí na několika faktorech (např. výkon ultrazvukového generátoru, síla, kterou působí kapiláry, délka ultrazvukových vibrací, a frekvence ultrazvukového generátoru).



obr. 3 Vytváření spoje pomocí ultrazvuku[3]

U ultrazvukového spojování se provádí vysokofrekvenční čištění, které snižuje drsnost povrchu a odstraňuje všechny povrchové oxidy, což usnadňuje molekulární kontaktování. Ultrazvukové vibrace také zlepšují okamžitou plasticitu a tažnost kovu, a je zvláště doporučován při pájení více početných terminálů současně při nízké teplotě. Ultrazvukové spojování nevyžadují žádné lokální vytápění.[3]

2.4 Laserové kontaktování (Laser Wire Bonding)

Laserové kontaktování se skládá z laserového paprsku (kontinuální Nd: YAG s vlnovou délkou 1,06 μm). Síla působící na horní straně drátu se pohybuje mezi 50 až 100g. Doba trvání impulsu je obvykle mezi 20 a 50 ms, a úroveň výkonu se pohybuje 20-50. Vzestup teploty mezi povrchem a drátem závisí na množství absorbované laserové energie. Zpočátku, drát absorbuje velmi málo záření a je vytápěn převážně vedením tepla od hrotu. Jakmile drát dosáhne vysoké teploty, převládající topné mechanismy přejdou na absorpci laserového záření, které pak způsobí velmi rychlý lokální ohřev a tavení.[3]

2.5 Pulzně-teplotní termokompresní spojení

Snaha výrobců je, aby mohly pracovat se „studeným“ substrátem. K tomu se využívá pulzní spojení, ve kterém dochází k odeslání impulsu proudu přes drát kapiláry, čímž dojde k zahřátí na určitém místě. Okamžitý proud poskytuje dostatek tepla na rozhraní mezi vodičem a ploškou a vznikne intermetalická vazba. U pulzního spojení je řezání drátu plamenem a formování míče stále nutností.[2]

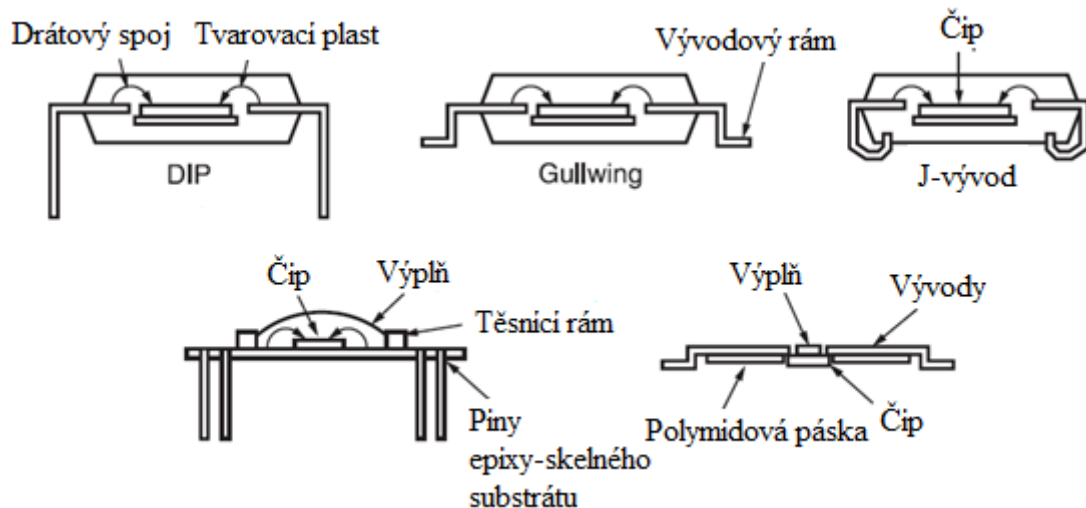
2.6 Automatické single-point páskové spojování

Páskové automatizované spojování (TAB) je další spojovací systém často používaný při výrobě hybridního mikroobvodu. Ve srovnání s wire bonding jsou TAB spoje schopné vytvářet spoje velmi blízko u sebe. I přes svou vyšší cenu za materiál a montáž jsou TAB spoje stále efektivnější volbou pro mnoho aplikací s vysokou hustotou. TAB se stává praktickým řešením pro vícevývodová zařízení, protože wire bonding dosahuje limitu vývodu s roztečí 152 μm .

Nevýhody TAB jsou:

- Vyrábí se kruhové vazby s nepravidelnou roztečí.
- Proces je pomalý, a to zejména v případě jednobodového TAB.
- Není to levná metoda.

TAB je považován jako náhrada za wire bonding. V některých případech je TAB považován jako jediné fungující technické řešení pro vícepinové součástky. Na obr. 4 jsou různé druhy používaných vývodů pro TAB.



obr. 4 Druhy pinů pro TAB [3]

Speciální dvouvrstvé pásky mají výhodu oproti jednovrstvým páskám. Tenká páska se používá pro nízký počet pinů a silná páska pro vícepinová zařízení.[3]

2.7 Připojení HIO hřebíkovými vývody

Hřebíkové vývody jsou nejčastěji užívaným způsobem pro připojení Hybridního integrovaného obvodu pomocí měkkého pájení. V anglickém jazyce jsou tyto vývody označovány jako Lead frame což znamená vývodové rámy. Vývodové rámy mohou být různého typu. Mezi základní patří vývodové rámy typu SIL (single in line) a DIL (dual in line).

Výhod ochranného rámu je hned několik:

- Chrání vývody před poškozením.
- Zajišťuje přesné rozestupy mezi jednotlivými vývody.
- Usnadňuje zacházení.
- Urychluje proces při automatické výrobě.

Výroba hřebíkových vývodů se zpravidla provádí z plochého tabulového plechu, buď lisováním, nebo leptáním.

Lisování je vysoce automatizovaný mechanický proces, který používá razidlo. Požadovaného tvaru vývodu se dosahuje postupnými údery sérií razidel. Jeden z možných provedení lisovacího stroje je zobrazen na obr. 5.

Leptání se skládá ze selektivního pokrytí plechu fotorezistem v souladu se vzorem montážním rámečkem. Plech je potom vystaven chemickým leptadlům, odstraňující oblasti, které nejsou pokryty fotorezistem. Po dokončení procesu leptání, jsou "leptané" rámy rozděleny na proužky.

Po lisování nebo leptání následuje dokončení vývodů čistěním a stříbřením. Stříbření se provádí pro zvýšení kvality vývodů a pro zlepšení jejich pájitelnosti. Před balením a odesláním zákazníkovi jsou vývodové rámce pečlivě kontrolovány.



obr. 5 Vysokorychlostní automat LIYE MT-60 [4]

Typů hřebíkových vývodů je celá řada. Většina výrobců Hybridních integrovaných obvodů používá tvar hřebíkového vývodu, který je nejvhodnější pro jejich požadovanou aplikaci.

2.7.1 Hřebíkové vývody SIL (leadframe SIL)

Hřebíkové vývody typu SIL jsou neodmyslitelnou součástí integrovaných obvodů. Pro jejich výrobu se používá celá řada materiálů např. měď, nikl, stříbro, bronz. Tento materiál je nadále pokryt vrstvou kovu, která zvětšuje jeho pevnost a vodivost. Mezi materiály na pokovování patří hlavně slitiny cínu. Na obr. 6 je zobrazen jeden z představitelů tohoto typu vývodu.



obr. 6 Hřebíkové vývody SIL [6]

2.7.2 Hřebíkové vývody DIL (leadframe DIL)

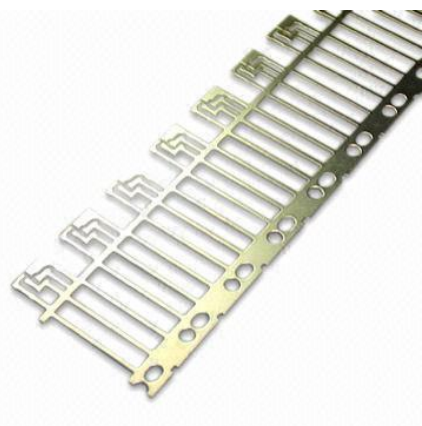
Hřebíkové vývody typu SIL jsou také velmi používané pro integrované obvody. Stejně jako pro předchozí typ vývodu i zde se používá celá řada materiálů (hlavně převládá bronz). Pokovování toho typu materiálu probíhá ještě před jeho vychladnutím. Nejčastějším materiálem na pokovení je cín. Na obr. 7 je zobrazen jeden z představitelů tohoto typu vývodu.



obr. 7 Hřebínkové vývody DIL [5]

2.7.3 Mosazné hřebínkové vývody (brass leadframe)

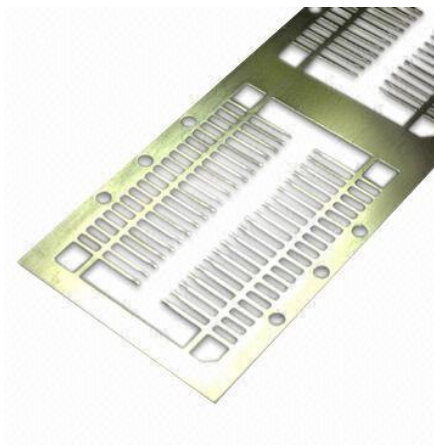
Nejčastěji se užívají pro připojení led diod. Jsou vyrobené z mosazi a potaženy vrstvičkou stříbra. Mosaz zaručuje vysokou pevnost vývodu a stříbro zvětšuje jeho celkovou vodivost. Typ vývodu je zobrazen na obr. 8.



obr. 8 Mosazné hřebínkové vývody [7]

2.7.4 Pinové hřebínkové vývody (Pin Lead Frame)

Tento typ vývodu se velmi často používá pro integrované obvody. Je vyroben z fosforové mosazi nebo ze speciální slitiny niklu a železa. Pro zvýšení jeho pevnosti jsou vývody pokryty 0,7-2 μ m niklu a na tuto strukturu je následně nanese 3 μ m silná vrstva cínu. Na obr. 9 Pinové hřebínkové vývody[7] je zobrazen výše uvedený typ vývodu.



obr. 9 Pinové hřebínkové vývody[7]

2.7.5 Hřebíkové vývody s Au kontakty (lead frame with Au contact)

Hřebíkové vývody se zlacenými kontakty jsou hlavně využívány na vývody telefonů. Jsou vyrobeny z fosforové mosazi, která je následně v místě pro kontakt pokryta zlatem, v místě pro pájení pokryta cínem a zbytek plochy je pokryt niklem. Typ vývodu je zobrazen na obr. 10.



obr. 10 Hřebíkové vývody se zlatými kontakty [7]

Mezi nejhlavnější výhody hřebíkových vývodů patří:

- Snadná instalace.
- Jednoduché pájení.
- Jejich připojení vykazuje vysokou pevnost a odolnost vůči mechanickému poškození.
- Nízká cena.

Materiálů na výrobu hřebíkových kontaktů je celá řada. Zejména se jedná o materiály s vysokou teplotou tání a vysokou vodivostí. Nejčastěji používaným materiálem je nikl a jeho slitiny.

3 Pájení

Pájení má v dnešní době největší vliv na kvalitu a životnost výsledného obvodu. Je to nejpoužívanější a nejrozšířenější způsob spojování součástek, drátů a dalších komponentů používaných v elektronice pomocí roztaveného kovu, který má menší teplotu tavení než spojovaný materiál. Má největší vliv na výsledný obvod, co se týče spolehlivosti a životnosti. Při ručním pájení spojů se dosahuje přesnosti přibližně $5 \cdot 10^{-9}$, což bylo nevyhovující pro sériovou výrobu tak bylo zavedeno tzv. strojní pájení, u něhož se dosahuje přesnosti o několik řádů lepší.

Do 1.7.2006 byly používány hlavně olovnaté pájky. Svůj název získaly podle hlavní příměsi, kterou bylo olovo. V dnešní době nesmí být podle EU v konvenční technice olovnaté pájky používány. Mohou být užity jen na speciální aplikace v letectví, kosmonautice nebo lékařství, kde je brán velký důraz na kvalitu. V konvenční technice byly olovnaté pájky nahrazeny pájkami bezolovnatými. Změna nebyla jen v pojivém materiálu, ale díky tomu, že bezolovnaté pájky mají odlišné vlastnosti, než olovnaté, muselo dojít i ke změně celého pájecího procesu, což vedlo k řadě problémů.

Z důvodu větší teploty přibližně o 40°C musely být upraveny ohřívací moduly, které nebyly schopny vyvinout požadovanou teplotu. Plastové díly uvnitř pájecích soustav byly díky vysoké teplotě na hranici své odolnosti. I u dalších součástí uvnitř strojů, jako jsou dopravníky, těsnění a jiné, musela být zvýšena tepelná odolnost při dlouhodobém působení vysokých teplot.

U pájky sledujeme vlastnosti, podle kterých pájky posuzujeme:

- Dobrou roztékavost a vzlínavost.
- Vyhovující mechanické vlastnosti.
- Malý rozdíl elektrického potenciálu vůči základnímu materiálu.
- Nízkou cenu.

Pájení lze rozdělit podle mnoha kritérií:

- Z hlediska použité technologie:
 - pájení vlnou,
 - selektivní pájení,
 - pájení přetavením.
- Z hlediska použité pájky:
 - měkké pájení,
 - tvrdé pájení.

Měkkým pájením lze označit všechny druhy pájení při teplotě nižší než 450°C (840°F). Je to vlastně spojení dvou kovů prostřednictvím neželezného přípravku. Nejčastěji se při měkkém pájení využívá cín, který má teplotu tání 232°C , nebo častěji jeho slitiny s olovem, zinkem nebo stříbrem. Pro speciální druhy aplikací, jako je například pájení hliníku se používají i speciální pájky např. Sn70-Zn. Měkké pájky se dodávají v různých tvarech, jako jsou zrna, tyčky nebo trubičky s tavidlovou náplní.

Obecně jsou měkké pájky určeny na spoje malé pevnosti v tahu (20-80 MPa) a ve stříhu (do 40 MPa). Většinou se měkké pájení využívá pro výrobu spotřební elektroniky.[8]

Tvrdé pájení je proces, který bývá často zaměňován za svařování, přestože jsou mezi nimi velké rozdíly. U svařování jsou spojeny dvě části kovových materiálů. Jako pojidlo slouží roztavená část jednoho z materiálů. Tenhle proces se nazývá fúze. Na druhou stranu u tvrdého pájení dochází ke spojení dvou materiálů pomocí přídavného materiálu, který má teplotu tání vyšší než 450°C (840 ° F) ale nižší než teplota tání základního materiálu. I z hlediska vlastností je mezi svařováním a tvrdým pájením podstatný rozdíl. U svařeného spoje jsou výsledné vlastnosti dány příměsemi, které jsou obsaženy v elektrodě a procesem, kterým je daný spoj vytvořen. U tvrdého pájení jsou vlastnosti závislé na pájeném materiálu i pájce. Může nastat případ, kdy pájka splňuje požadavky na pevnost a odolnost, ale výsledné spojení je křehké nebo ke spojení vůbec nedojde. To je způsobeno tím, že každý materiál pájky je určený na spojení určitého typu a při spojení s materiálem jiného typu dochází ke zhoršení vlastností spoje. Výrobce v dokumentaci u každé pájky uvádí výčet prvků, pro které je určena.[8]

3.1 Materiály pro tvrdé pájky

Při výběru pájky se musí dát pozor, aby daný materiál byl sloučitelný s kovem základního materiálu z metalurgického hlediska. Některé pájky by neměly být spojeny s určitým typem základního materiálu např. Ag15CuP by neměla být užívána při spojení s železem či slitinami niklu kvůli tvoření křehkých intermetalických sloučenin, které mohou způsobit selhání spoje.

U pájkových materiálů se setkáváme se stejnými požadavky na vlastnosti jako u obecných materiálů. Mezi základní parametry patří síla, odolnost proti korozi, odolnost proti oxidaci a teplota zpracování. Navíc k těmto vlastnostem musí pájka splňovat požadavky na smáčivost a průtokovou charakteristiku, mít kompatibilní tavící vlastnosti s nízkou těkavostí a ukázat minimální nebo žádnou nepříznivou metalurgickou reakci při teplotách pájení.

Kritéria pro výběr pájky:

- Teplotní požadavky na základní materiál a spoj.
- Smáčecí charakteristika.
- Teplotní koeficient.
- Síla při provozní teplotě.
- Odpor proti poruše.
- Galvanická odolnost proti korozi.
- Odpor při namáhání.
- Elektrické vlastnosti.
- Přestup tepla.
- Cena materiálu.

Pájené slitiny tvoří několik skupin. Slitiny ve stejné skupině mají podobné vlastnosti a použití. Výčet skupin je uveden v Tab. 1.

Tab. 1 Skupiny pájek a jejich vlastnosti [12]

Skupiny pájek	Vlastnosti a použití
Čisté kovy	Nelegované. Často drahé kovy (stříbro, zlato, palladium).
Ag-Cu	Dobré vlastnosti tání. Stříbro zvyšuje průtok. Je vhodná pro pájení v peci.
Cu-Zn	Universální, používá se pro spojení ocelí a litin. Odolnost proti korozi může být nedostačující pro měď, měď-nikl, a nerezovou ocel. Nevhodné pro pájení v peci v důsledku velkého tlaku, který vzniká těkavými parami zinku.
Ag-Zn	Podobné vlastnosti jako u Cu-Zn. Používá se ve šperkařství díky vysokému obsahu stříbra. Odolné proti amoniaku s obsahem stříbra čištění kapalin.
Ag-Cu-Zn	Nižší bod tání než Ag-Cu se stejným obsahem stříbra. Kombinuje výhody Ag-Cu a Cu-Zn. Slitiny s obsahem stříbra nad 67,5% se používají ve šperkařství a slitiny s nižším obsahem stříbra se používají pro inženýrské účely.
Cu-P	Široce používané pro měď a slitiny mědi. Nevyžaduje tavidlo při pájení mědi.
Ag-Cu-P	Podobný jako Cu-P s lepším tokem. Lepší pro větší mezery. Je více tvárná, má lepší elektrickou vodivost.
Au-Ag	Vzácné kovy. Používá se v klenotnictví.
Au-Cu	Často se používá ve šperkařství. Rychle smáčí většinu kovů včetně žáruvzdorných. Nikl zlepšuje kujnost. Stříbro snižuje bod tání, ale zhoršuje odolnost proti korozi. Pevnost a odolnost proti korozi může zlepšit další legování např. chromem, palladiem, manganem nebo molybdenem.
Au-Ni	Širší rozmezí bodu tání než slitiny Au-Cu, ale lepší odolnost proti korozi a lepší smáčení. Často legované s jinými kovy. Používá se obvykle méně než 35% niklu.
Au-Pd	Lepší odolnost proti korozi než Au-Ni a Au-Cu slitiny. Používá se pro spojení vysoce legovaných slitin a žáruvzdorných kovů pro vysokoteplotní aplikace, např. proudových motorů.
Pd	Dobrý výkon při vysoké teplotě, vysoká odolnost proti korozi (méně než zlato), vysoká pevnost (více než zlato). Obvykle legované niklem, mědí nebo stříbrem.
Ni	Vysoká pevnost, nižší náklady než slitiny stříbra, dobrý výkon pro vysoké teploty, dobrá odolnost proti korozi v mírně agresivním prostředí. Často se používá pro nerezové ocele a pro tepelně odolné slitiny.
Co	Dobrá vysokoteplotní odolnost proti korozi. Jednoduchá zpracovatelnost při nízkých teplotách.

Skupiny pájek	Vlastnosti a použití
Al-Si	Pro pájení hliníku.
Aktivní slitiny	Obsahují aktivní slitiny, např. titan nebo vanad. Používají se při pájení nekovových materiálů, např. grafitu nebo keramiky.

3.2 Aplikace používající tvrdé pájení

Automobilové aplikace užívají tvrdé pájení velmi často, zvláště při tvrdém pájení topných těles hliníkem, který užívají trubkovitých spojů. Topné těleso je oddělené od svárového materiálu, který je taven při teplotě tvrdého pájení pro vytvoření celistvého spoje. Vakuového procesu je často využíváno při pájení hliníku, protože není vyžadováno chemického tavidla.[12]

Nedávné výzkumy v řízení atmosféry uvedly možnost pájení hliníku v pecích při tzv. „agresivní“ atmosféře. Tyto sloučeniny jsou obvykle chloridy nebo fluoridy a ty zanechávají korozní zbytky na částech, které mají být čisté pro suchou dusíkatou atmosféru. Další využití hliníku v automobilovém průmyslu je na písty, bloky motorů, výměníky tepla a odpařovače.

V letectví a v kosmickém průmyslu je hlavním materiálem mosaz pro svoje silo-hmotnostní vlastnosti. Jiné součásti zahrnující křídla a součásti motoru proudového letadla jsou vyrobeny z niklu, slitiny kobaltu, nerezové oceli a titanu.

Tvrdé pájení je v široké míře použito v potrubních a trubkových aplikacích na rozšíření délky, vytvoření tvaru, připojení nestejných materiálů a pro vytvoření vodotěsného spoje. K tomu využívají základní materiály jako hliník, měď, ocel, nerezová ocel a jejich slitiny.

V elektronickém průmyslu se tvrdé pájení využívá na spoje kov-keramika a kov- sklo, které jsou využívány na elektronky a snímače. Mikrovlnné reflektory, satelity, kamery a sofistikované nástroje jsou aplikace, kde hraje tvrdé pájení také důležitou roli. Využívají základní kovy jako kyslíkatou měď, slitiny mědi s niklem, nerezovou ocel, železo-nikl-kobalt slitiny, molybden a wolfram. Žáruvzdorné hmoty zahrnují oxid hlinitý, fosfority a safírové keramiky.

Tvrdé pájení je často užívané pro připojení karbidů kovů, které byly spojeny s kobaltem či niklem, jako karbid wolframu, karbid titanu, karbid tantalu a karbid chromu.

Speciální aplikací tvrdého pájení je pokrytí keramiky mosazí. Toho je využíváno na pokojové lampy, elektrické kartáčky některých motorů, zapalovače svíček a na pouzdření součástek. Je použit proces pomocí spékání prášku kovů, občas nazývaný mol-manganový či Mo – Mn proces, který slouží k pokovování povrchu keramického dílu. Ostatní technologie zahrnují nános kovu na keramiku pomocí páry před tvrdým pájením nebo používání tzv. „aktivních“ svářecích kovů, které jsou speciálně legované k tomu, aby byly smáčivé na keramikách. Pájení tuhy, čili grafitu, je také velmi obtížné, ale byli vyvinuty speciální technologie, které pokrývají její povrch kovem či intermetalickou látkou, aby bylo umožněno její pájení. Protože tuha oxiduje při velmi nízkých teplotách (cca. 400°C), musí být pokryta mosazí ve vakuu nebo ve velmi čistých prostředích.

Další aplikace tvrdého pájení, která se stává stále víc populární, je tzv. „spékání tvrdým pájením“. V tomto procesu jsou části, které byly stlačeny současně, spájeny

a slinuty v horké zóně pece. Typickou aplikací tvrdého pájení, která využívá spékání, je připojování os ke kolům převodovky.[12]

3.3 Způsoby tvrdého pájení

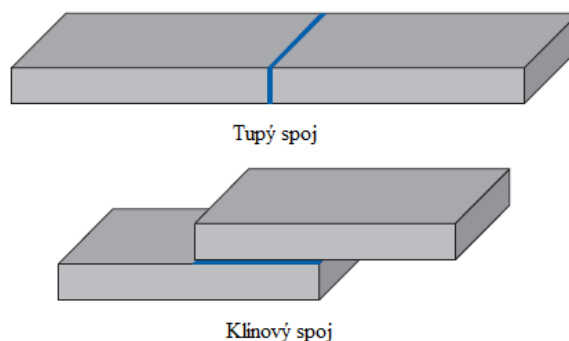
Volba správného pájecího způsobu je nedílnou součástí pájecího procesu. Způsob bývá zvolen podle náročnosti dané aplikace na materiál, cenu nebo spolehlivost. Rozlišujeme dva základní druhy pájení:

- Pájení plamenem.
- Pájení v peci.

3.3.1 Pájení plamenem

Tvrdé pájení plamenem je proces, ve kterém je teplo, potřebné k roztavení materiálu, aplikováno lokálně do místa spoje pomocí plamene hořlavého plynu, obvykle skládajícího se ze zemního plynu, acetylenu, vodíku nebo propanu. Tvrdé pájení plamenem vyžaduje chemické tavidlo, aby nedošlo k oxidaci, která by způsobila necelistvost vazby a napomáhala smáčivosti. Použití chemického tavidla vyžaduje po pájecí čištění, což je sekundární operace, která není vyžadována u pájení v pecích.

Pro jednoduchost můžeme uvažovat dva druhy spojů např. tzv. „tupý (butt)“ spoj nebo „klínový (lap)“ spoj. Způsoby připojení jsou zobrazeny na obr. 11. Vhodný přídavný materiál je nanášen podél švu nebo je aplikován přímo do spoje spolu s tavidlem. Celek se pak zahřívá na teplotu, kdy dojde ke zkapalnění přídavného materiálu a jejím vyplněním mezery pomocí vztlínání. Po vypnutí hořáku se celek chladí na teplotu okolí před dalším zpracováním.



obr. 11 Dva základní druhy spojů [8]

Tvrdé pájení plamenem je nejčastěji využíváno v potrubních a trubkových aplikacích. Typ plynů a nastavení plamene závisí na potřebné pájecí teplotě, typu pájky, typu pájeného materiálu a tloušťce stěny. Málo výkonný zdroj tepla neúměrně prodlužuje dobu ohřevu, vznikají další a další oxidy a přesycené tavidlo ztratí účinnost. Oxidaci způsobí i plamen s přebytkem kyslíku a zatěžuje navíc páječe hlukem. Pro tvrdé pájení je obvyklý ohřev kyslíko-acetylenovým plamenem, zejména pak u pájek s vyšší pracovní teplotou (mosaz, pájky s nízkým obsahem stříbra) a při velké tloušťce. Používá se plamen neutrální, nebo s mírným přebytkem acetylenu. Výjimkou je výplňové pájení pozinkovaných rozvodů, kdy se nastavuje plamen s mírným přebytkem kyslíku. Pro tvrdé hliníkové pájky je též používán plamen s mírným přebytkem acetylenu, vhodnější je pak ale pájení směsí propan-kyslík nebo propan-butan. Stejně směsi jsou pak vhodné i pro měkké pájení.

Proces pájení trubky plamenem

Největší pozornost musí dostat sama trubka před započítím celého pájení. Konec trubky uvnitř i vně se zbaví otřepu a u měkkých měděných trubek se provede kalibrace. Je to důležitý předpoklad pro správnou kapilární pájecí spáru. Jestliže se měkké trubky nekalibrují, trubka nemá správný tvar vůči tvarovce. Pokud dojde k pokusu trubku a tvarovku zasunout do sebe, nemá mezera mezi trubkou a tvarovkou správnou hodnotu kapilární mezery a nedojde ke správnému vyplnění pájeného spoje pájkou.

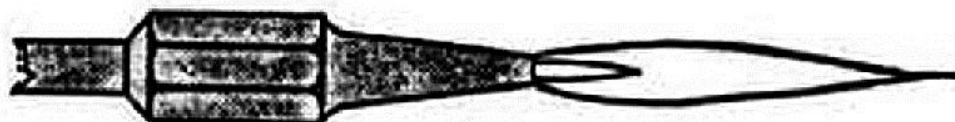
Konec trubky zvnějšku a tvarovka zevnitř se mechanicky očistí. K čištění jsou vhodná nekovová čistící rouna, jemná ocelová vata, smirkové plátno (zrnitost 240 nebo jemnější) anebo prstencové či kulaté kartáče s drátěnými štětinami. Jestliže se konec trubky a tvarovka mechanicky neočistí, spoj nelze úspěšně provést.[9]

Tavidlem se potře pouze konec trubky. Tak se tavidlo nedostane dovnitř trubky. Aby bylo pájené místo opticky čisté, doporučuje se odstranit po nasunutí trubky a tvarovky přebytečné tavidlo resp. pájecí pastu (které zůstane na trubce). Při tvrdém pájení spoje měď-měď pájkou obsahující fosfor (CP 203 nebo CP 105) není tavidlo nutné.

Nastavení správného plamene hořáku je taky velmi důležitý parametr. Druh hořáku volíme podle průměru trubky. Pro pájení natvrdo se nečastěji používají skupinové hořáky nebo víceotvorové (žádné svářecí trysky). Pájí se neutrálně nastaveným plamenem obr. 12.



obr. 12 Neutrální plamen [10]



obr. 13 Oxidační (ostrý) plamen – přebytek kyslíku [10]



obr. 14 Redukční (měkký) plamen – přebytek acetyleny [10]

Při samotném pájení dojde k nasunutí očištěného a tavidlem natřeného konce trubky až na doraz do tvarovky. Pak dojde k rovnoměrnému zahřívání rozptýleným plamenem. Při příliš velkém zahřátí tavící přísada shoří a pájka nemůže smáčet, ale ukapává. Při pájení natvrdo se správná pracovní teplota dosáhne při tmavočerveném žáru.

Pájka se přiloží na pájené místo do rozptýleného plamene a odtavuje se vlivem plamene, což způsobí přecházení pájky do kapilární spáry, až ji zcela vyplní. Při tvrdém pájení trubek velkých průměrů se postupuje po obvodu a pájka se roztavuje v zónách.

Na závěr se pájený spoj očistí vlhkým hadrem nebo drátěným kartáčkem, aby se odstranily zbytky tavidla. Pájený spoj nesmí být chlazen, ale musí vychladnout postupně. [9]

3.3.2 Pájení v peci

Pájecí pece nabízejí různé výhody oproti pájení plamenem jako například regulovatelnost, automatizaci, opakovatelnost a flexibilitu. Pájení v peci obvykle probíhá v ochranné plynné atmosféře, ve vakuové komoře (vakuové pece) nebo při podtlaku. Stejně jako u pájení plamenem i u pájení v peci se určitá oblast zahřívá na specifickou hodnotu, než dojde k roztavení výplňového materiálu. Následně je na řadě ochlazení nebo kalení, aby bylo docíleno požadovaných vlastností materiálu. Ochlazení se obvykle provádí v jiné zóně pece nebo v samostatné komoře.

Výhod pájení v peci je hned několik:

- Více spojů stejného typu se může pájet současně.
- Komplikované upínání je většinou zbytečné, obvykle dostačuje gravitace nebo minimální fixace.
- Nežádoucí atmosférické složky mohou být kontrolovány nebo odstraněny.
- Můžeme používat různé atmosféry v odlišných komorách pro různé typy operací.
- Proces je opakovatelný a ideální pro automatickou výrobu nebo sběr dat.
- Obvykle nevyžaduje chemická tavidla.
- Vyžaduje minimální nebo žádné po pájecí čištění.
- Poskytuje velmi přesné dodržení teploty pro optimální a rovnoměrné výsledky.

Musíme také zmínit nevýhody pájení v peci jako je např. vyšší cena na vybavení (oproti plamenu), vyšší spotřeba energie a požadavky na údržbu pece. Kromě toho musíme věnovat více pozornosti společnému návrhu, protože pájení probíhá v prostoru pece a není snadno pozorovatelné. Také požaduje určité dovednosti při řízení procesu. Musí se řídit proměnná atmosféra, průtok paliva, kontaminace, odplynování, vytápění a chlazení. Bezpečnostní aspekty jsou také velmi důležité, protože pájecí atmosféra a její produkty mohou být jedovaté nebo výbušné. Pájení v peci není optimální proces pro sériovou výrobu.[12]

Proces tvrdého pájení v peci

Proces tvrdého pájení v peci je velmi podobný procesu pájení plamenem s tím rozdílem, že všechny úkony jsou prováděny automaticky a příslušný software přesně stanovuje teplota a čas určitých kroků.

1. Termické zařízení pro odstranění odpařitelného oleje

Skládá se z pece pro odstranění mazacího oleje ze součástí a ze spalovací pece pro spalování olejových výparů, spalovna je vytápěna plynem, termická pec je částečně vytápěna plynem a částečně je využito teplo ze spalovny. Zařízení je mechanicky samostatné, je integrální jednotkou, s izolovanou ocelovou komorou a s recirkulačními větráky pro zvýšení účinnosti předávání tepla při ohřívání. Ovládání je zahrnuto v ovládacím panelu systému, výrobky jsou zahřívány na teplotu 150- 200°C. Při této teplotě dochází k odpaření oleje, tyto zplodiny jsou odsávány a spalovány ve spalovně při teplotě 800°C. Vytápění odmašťovací komory je zajištěno plynovými hořáky. Atmosféru uvnitř pece tvoří okolní vzduch a vzduch vypařující se z výrobku.[13]

2. Zařízení pro nanášení tavidla

Je to dopravníkový stroj, sloužící k aplikaci tavidla na součástky. Skládá se ze dvou PVC nádob, které jsou opatřeny systémem stálého míchání a komory pro nanášení tavidla. Tavidlo je dopravováno systémem pump a trysek do komory, kde je aplikováno. Součástky jsou dopraveny do komory z teplotní odmašťovny. Na součástky je aplikován roztok demineralizované vody a tavidla, přebytečný roztok je ofukován a vrácen zpět do nádoby na přípravu tavidla. Ovládání je v centrálním panelu systému.

3. Sušící pec

V sušící peci dochází při provozní teplotě 200°C – 300°C k odstranění vody použité při nanášení tavidla. Demineralizovaná voda se zde odpařuje a dochází k vysoušení součástky. Mechanicky je pec zcela samostatná a není součástí pájecí pece. Je vytápěna plynem a má recirkulační ventilátory pro posílení vytápění a sušení.

4. Předehřívací pec

Je součástí pece tvrdého pájení. V každé zóně jsou plynové hořáky, dále jsou zde recirkulační ventilátory k zajištění konvekčního přenosu tepla. Součástky jsou předehřívány na teplotu 400 - 500°C.

5. Pec tvrdého pájení

Je vytápěna elektrickými topnými články, přenos tepla je radiační na teplotu 570°C – 630°C. Pec je rozdělena do sedmi zón. K pájení natvrdo dochází při teplotě 600°.

6. Chladicí systém

Skládá se ze sekcí s vodním obalem a ventilátorem. Sekce chladicího systému s vodním obalem je součástí pece tvrdého pájení. Je to uzavřený okruh, chlazený přes výměník tepla, ventilátor je samostatná část, která slouží k dochlazení chladiče na pokojovou teplotu.

7. Odlučovač

Je určen pro snižování škodlivých emisí (fluoridů) do ovzduší z ochranné atmosféry předehřívací pece, pece tvrdého pájení a chladicího systému s vodním obalem. K čištění se používá náplň kryolitu (hexafluorohlinitan sodný, bílá krystalická látka, ve vodě téměř nerozpustná).

8. Kontrolní systém

Slouží k ovládání celé pájecí linky, nastavení, kontrole provozních parametrů, spuštění a zastavení, celá pájecí linka je řízena speciálním software.[13]

4 Praktická část

Realizace vývodů hybridních integrovaných obvodů je obvykle prováděna metodou měkkého pájení. Tahle práce zkoumá nekonvenční způsob připojení vývodu a to pomocí tvrdého pájení. Zejména se zaměříme na způsob propojení hřebíkových vývodů se substrátem.

Při mém experimentu byla použita stříbrná pájka bez kadmia s označením 1555P ve formě prášku. Tato pájka je složena ze stříbra a cínu a je velmi využívána při pájení nerezových ocelí, niklů a niklových slitin, mědi a měděných slitin a různých tvrdokových plátků. Její teplota tavení je 660°C , pevnosti v tahu dosahuje až $390\text{N}/\text{mm}^2$ a její elektrická vodivost je $11\text{ S.m}/\text{mm}$.

Jako druhá pájecí slitina byla použita pájka s označením Ag15CuP ve formě drátu. Pájka je složena ze slitiny stříbra, mědi a fosforu a je hojně využívána při pájení mědi a měděných slitin, např. bronzů a mosazí. Doporučená teplota pájení je zde 700°C a její pevnost v tahu dosahuje až $54\text{kg}/\text{mm}^2$. Při pájení mědi a měděných slitin má fosfor funkci tavidla takže nemusí být použito přídavné tavidlo, ale pro kvalitnější spojení je doporučováno.

Třetí pájecí slitina byla opět ve formě drátu a byla označena Ag45CuZn. Slitina obsahuje stříbro, měď a zinek a je vhodná pro temperované litiny, mědi, slitin mědi, niklu, slitin niklu. Doporučená teplota tavení je u této slitiny 730°C a dosahuje pevnosti v tahu 220 MPa .

Jako tavidlo bylo použito u všech typů pájek univerzálního tavidla pro tvrdé pájení stříbrem s označením 1500FLX. Tavidlo má pracovní teplotu mezi $550 - 800^{\circ}\text{C}$. Tavidlo a pájecí pasta použitá při experimentu je zobrazena na obr. 15.



obr. 15 Tavidlo a pájecí pasta

Dalším použitým materiálem jsou samotné hřebíkové vývody. Výroba a výhody hřebíkových vývodů jsou uvedeny v teoretické části. Pro náš experiment jsme zvolili Ni-Cu vývody jenž mají bod tavení vyšší než je teplota, která vzniká při procesu tvrdého pájení. Použité hřebíkové vývody jsou zobrazeny na obr. 16.



obr. 16 Hřebínkové vývody

Dalším použitým materiálem na vývody byla slitina niklu, chromu a titanu a slitina železa, niklu a chromu. Obě slitiny byly ve formě plechu. Slitina železa, niklu a chromu byla následně nastříhána na tenké pásky, z kterých byly vytvarovány samotné vývody. Příklad vývodu je uveden na obr. 17.



obr. 17 Tvar vývodu ze slitiny železa, niklu a chromu

4.1 Použité přístrojové vybavení

Přístroje použité v práci lze rozdělit do třech skupin. V první skupině se nachází přístroje, které sloužily k vytvoření zkušebního motivu, na kterém byly realizovány všechny pokusy, a jsou to:

- síťotiskový poloautomat AUREL C 880 Screen Printer.
- sterilizátor CHIRANA HS 62 A.
- průběžná přetavovací pec BTU BUCR – 1.

Ve druhé skupině jsou přístroje sloužící k samotné realizaci spojení pomocí tvrdé pájky. Pro realizaci vývodů pomocí tvrdého pájení je zapotřebí určité technologické vybavení. Z důvodu nízkého počtu laboratorních přístrojů, které jsou vhodné pro vytvoření spoje tvrdým pájením, byly zvoleny tyto přístroje:

- Hot-plate,
- kyslíkovodíková svářečka,
- laboratorní pec LMH LAC.

Poslední skupina obsahuje zkoušecí přístroje, kterými byly výsledné vzorky testovány. Při testování výsledného spojení byly využity dva typy zařízení:

- proudový zdroj MANSON,
- měřič síly v tahu u SMD.

4.1.1 Síťotiskový poloautomat AUREL C 880 Screen Printer

Síťotiskový poloautomat je zařízení s velikou škálou použití. Lze s ním nanášet tlustovrstvé pasty na různé typy materiálů (např. korund, sklo, LTCC), slouží k výrobě senzorů a biosenzorů, umožňuje malosériovou výrobu elektronických obvodů. Jeho hlavní předností je možnost sesouhlasení pomocí optické kamery a velká plocha pro tisk, až 30x30cm.

V práci byl síťotiskový poloautomat využit pro tisk vodivé a odporové vrstvy na zkušební substráty. Použité zařízení je zobrazeno na obr. 18.



obr. 18 Síťotiskový poloautomat AUREL C 880 Screen Printer

4.1.2 Sterilizátor CHIRANA HS 62 A

Sterilizátor CHIRANA HS 62 A je pec sloužící k odstranění nežádoucích látek obsažené v pastě, které by mohly způsobit vady v natisknuté struktuře (zejména se jedná o těkavá organická rozpouštědla). Obvyklá teplota a čas pro zasušení vodivých past je 150°C po dobu 10 až 15 minut.

V tomto případě bylo zasušení prováděno 10 min při teplotě 150°C, jak je předepsáno výrobcem. Použité zařízení je zobrazeno na obr. 19.



obr. 19 Sterilizátor HS 62 A

4.1.3 Průběžná přetavovací pec BTU TFF51

Přetavovací pec je zařízení sloužící pro výpal tlustých vrstev. Obsahuje 4 zóny, její maximální teplota činí 1100°C a rychlost pásu 2,5 až 15 cm/min. Hlavní výhodou pece je možnost použití inertní atmosféry a nastavování teplotního profilu pomocí PC.

V tomto případě byl použit hodinový teplotní profil s vrcholovou teplotou 850°C. Použitá pec je zobrazena na obr. 20.



obr. 20 Přetavovací pec BTU TFF51

4.1.4 HOTPLATE

HOTPLATE neboli horká plotna obsahuje sklokeramickou plochu, které může být vytápěna až na 500°C a dosahuje výkonu až 1200W. Příklad je vyroben společností Schott a je určen pro široké spektrum aplikací. Příklad obsahuje sklokeramickou desku, která je vytápěna centrální oblastí $145\text{ mm } \varnothing$. Proměnný teplotní řídicí systém slouží k regulaci výkonu od 10 do 100%. Regulátor výkonu je uložený v separátní nádobě, která je odolná proti teple a zajišťuje neovlivnitelnost regulátoru při nepřetržité operaci. Příklad bývá využíván pro předehřev substrátu nebo pro samotné zapájení součástek u hybridních integrovaných obvodů a plošných spojů.

V tomto experimentu byl HOTPLATE použit pro předehřev keramické destičky z důvodu zmenšení teplotního šoku při tvrdém pájení. Kdyby nebyl substrát předehříván, mohlo by dojít při přiložení hořáku k velmi rychlému nárůstu teploty, při kterém by mohlo dojít ke zničení substrátu. Na obr. 21 je zobrazen přístrojek, který byl použit při experimentu.



obr. 21 GLASS CERAMIC HOTPLATE CT 10

4.1.5 Kyslíkovodíková svářečka

Svářečka má široké spektrum použití, lze ji použít pro sváření materiálů s nižší teplotou tavení, nebo pro realizaci tvrdého pájení. Přístroj je vybaven dvěma nezávislými hořáky a schopností regulovat vstupní proud. Svářečka, použita při experimentu, měla označení Luigi dal trozzo SC5003. Tento typ svářečky dokáže vyvinout výkon až 750 W a je napájena 220V.

Pro pokus byla svářečka nepostradatelnou záležitostí, protože dokáže vyvinout dostačující teplotu pro roztavení tvrdé pájky. Na obr. 22 je zobrazen přístroj použitý při experimentu.



obr. 22 Kyslíkovodíková svářečka

4.1.6 Laboratorní pec LMH LAC

Pec LMH LAC je zařízení sloužící k žhání a výpalu vzorků. Maximální teplota nastavení pece je 1200°C a nastavení profilu se provádí pomocí regulátoru HT INDUSTRY. Její výhodou je možnost nastavení vysoké teploty a možnost použití inertní atmosféry.

V experimentu byla pec použita pro vytvoření spoje pomocí tvrdého pájení. Použitá pec je zobrazena na obr. 23.



obr. 23 Pec LMH LAC

4.1.7 Laboratorní zdroj MANSION

Laboratorní zdroj MANSION je zařízení určené pro širokou škálu aplikací v telekomunikacích, laboratořích a průmyslu. Jedná se o vysoce kvalitní a výkonný zdroj, který je proveden v nejmenších možných rozměrech. Mezi jeho hlavní výhody patří odpojení výstupu při nastavování hodnoty a vysoký výstupní proud, který je až 60 A. [14]

V experimentu byl zdroj použit na výkonové zatížení testované struktury a tím její zahřátí na teplotu 500°C. Zařízení použité v experimentu je zobrazeno na obr. 24.



obr. 24 Laboratorní zdroj MANSION [14]

4.1.8 Zařízení pro měření síly v tahu u SMD

Zařízení bylo zhotoveno panem Ing. Janem Valíčkem pro test síly v tahu u SMD součástek a BGA pouzder. Pracovní zatížení je omezeno rozsahem měřidla TEST 321 na 450 N. Se zařízením se dá snadno manipulovat pro jeho nízkou hmotnost a další výhodou je možnost připojení zařízení s počítačem pro další zpracování naměřených dat. [15]

V experimentu bylo zařízení použito pro zjištění maximální síly, která je potřebná k odtržení vývodu. Přístroj použit v experimentu je zobrazen na obr. 25.



obr. 25 Měřič v tahu [15]

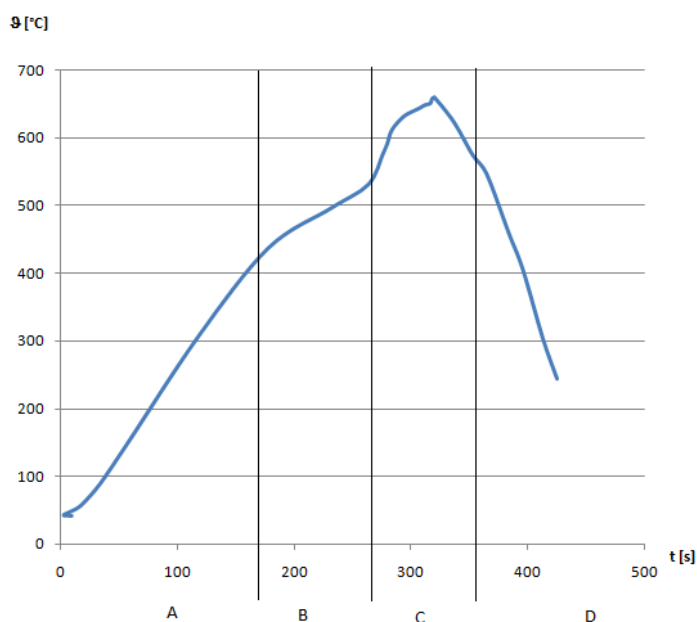
4.2 Technologický proces tvrdého pájení

Technologický proces nebyl v práci pro všechny druhy pájecích slitin totožný. Při práci s pájecí pastou byl technologický proces složitější z hlediska udržení přesné teploty a času pájení. Naopak při práci s drátovou pájkou bylo jednodušší udržení teploty ale složitější příprava pájecí slitiny o přesné hmotnosti.

V dalších dvou částech jsou uvedeny pokyny pro vytvoření pájeného spoje pomocí pájecí pasty nebo drátové pájky.

4.2.1 Technologický proces tvrdého pájení pro pájecí pastu

Jako první je třeba navázat pastu o přesně definovaném poměru s tavidlem a to 1:1. Dále se provede nanesení malého množství pájecí pasty na kontaktní plošku kontaktu a kontakt se přiloží na vodivou plošku na substrátu. Kontakt se volí tak, aby měl co největší dotykovou plochu s vodivou ploškou. Substrát s kontaktem se opatrně umístí na HOTPLATE a kontakt se podloží do roviny se substrátem. Výkon HOTPLATE se volí takový, aby jeho maximální teplota byla nejméně 400°C jinak hrozí prasknutí substrátu při dalším tepelném namáhání. Dále následuje zapnutí HOTPLATE a nastavení vrcholové teploty nejméně 400°C. Po dosažení této teploty se provede zahřívání okolí kontaktu ze vzdálenosti přibližně 10 cm do aktivování tavidla. Začátek aktivace tavidla se pozná vznikem bublinek v pájce. Následuje samotné přetavení pájky ze vzdálenosti asi 5 cm po dobu neméně 100 s. Po úspěšném přetavení je substrát přesunut na kraj HOTPLATE, kde probíhá jeho postupné chladnutí. Po uplynutí přibližně 30 s může být substrát přesunut na stolní desku až do jeho úplného zchlazení. Po vychladnutí následuje očištění zbytku tavidla vhodným způsobem, který doporučuje výrobce tavidla. Orientační pájecí profil je zobrazen na obr. 26.



obr. 26 Pájecí profil pro pájku 1555p

- **A** – Proces **předehřevu** slouží pro minimalizování teplotního šoku substrátu.
- **B** – **Vyrovnávací část** slouží k aktivaci tavidla, které smáčí kontakt a vodivostní plošku, a pro rovnoměrné prohřátí substrátu.
- **C** – **Přetavení** by mělo trvat minimálně 100 s.
- **D** – Proces **chlazení** by neměl být příliš rychlý z důvodu možného prasknutí substrátu.

4.2.2 Technologický proces tvrdého pájení pro drátovou pájku Ag15CuP

Při práci s drátovou pájkou neaplikujeme pájku přímo na substrát, ale na kontakt vodiče. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby.

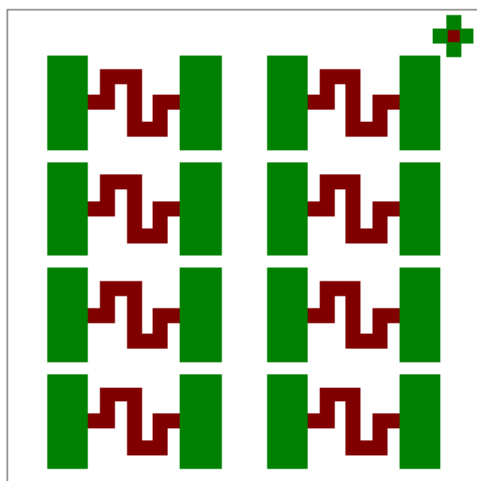
U prvního způsobu je jako první nanášeno tavidlo o hmotnosti 2 mg na kontakt vývodů. Dále je tavidlo aktivováno svářečkou přibližně z 10 cm, poté je přiložena drátová pájka a zahřívána přibližně z 5 cm do jejího rozpuštění na kontaktu.

U druhého způsobu je jako první odříznut kus pájky o hmotnosti přibližně 4 mg a umístěn na kontaktní plošku vývodu společně s tavidlem o hmotnosti 2 mg. Následně probíhá zahřívání pájky svářečkou z 10 cm do aktivace tavidla a následně z 5 cm do rozpuštění pájky na vývodu.

Další proces je totožný pro oba způsoby. Na HOTPLATE je umístěn substrát a vyhříván do jeho maxima. Na pájku na vývodu se umístí tavidlo, asi 2 mg, a vývod je přesunut na vodivou podložku substrátu. Druhý konec vývodu musí být podložen keramikou o stejné tloušťce jako substrát. Následně se okolí kontaktu zahřívá ze vzdálenosti nejdříve 10 cm, do aktivace tavidla a následně z 5 cm do roztečení pájky po vodivé podložce. Proces chlazení je prováděn stejným způsobem jako v předchozím případě.

4.3 Návrh testovací struktury a zjišťování zasychavosti tavidla

V prvotní fázi zkušebního osazení a testování vývodů byla použita testovací struktura z bakalářské práce Realizace vývodu hybridních integrovaných obvodu pro vysokoteplotní aplikace [16] pana inženýra Valíčka. Při pozdější realizaci došlo ke zjištění, že struktura nevyhovuje požadavkům procesu z důvodu praskání substrátu při teplotní zkoušce. Proto byla navržena nová struktura, která je zobrazena na obr. 27.



obr. 27 Výsledná struktura

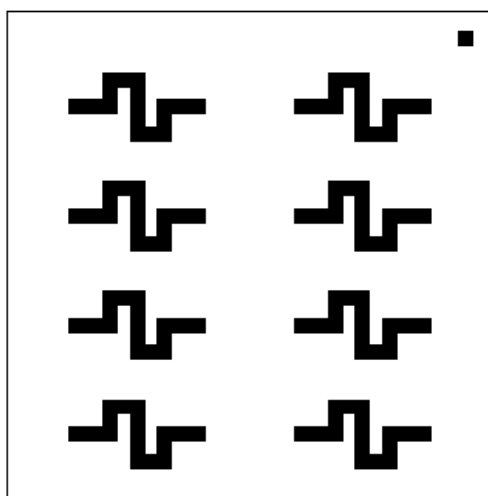
Kvůli nízkému odporu, který od výsledné struktury očekáváme, byla na meandr zvolena vodivá pasta s označením K650-99, která má uváděnou rezistivitu $79,2 \text{ m}\Omega / \square$. Pomocí výpočtu byl stanoven počet potřebných čtverců na odpor přibližně 1Ω . Výsledná odporová struktura je zobrazena na obr. 28.

Výsledný výpočet šířky odporu:

$$R = R_{\text{čtverec}} \cdot A \rightarrow A = \frac{R}{R_{\text{čtverec}}} = 13 \quad (1)$$

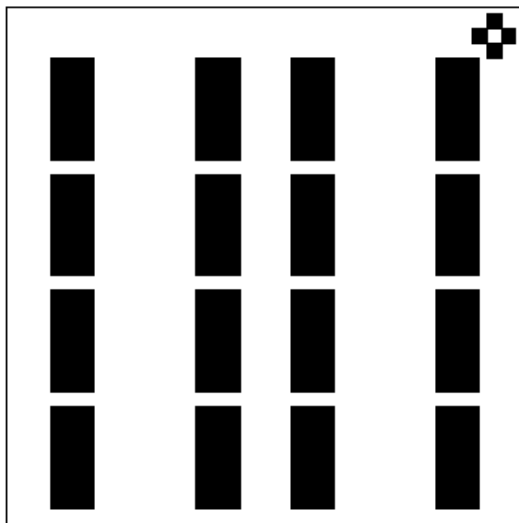
Vysvětlení vztahů:

- R – celkový odpor [Ω],
- $R_{\text{čtverec}}$ – odpor na čtverec [Ω],
- A-počet čtverců [-].



obr. 28 Odporový meandr

Pro pájecí plošky byla zvolena stříbrná pasta CSP-1381a stříbro-paládiová pasta 9635 HG. Obě pasty měly teplotu výpalu 800-850°C. Rozměry výsledné vodivé struktury jsou zobrazeny na obr. 29.



obr. 29 Vodivá struktura

Rezistorová struktura byla navržena kvůli zkoumání teplotního namáhání vytvořeného spoje. Tento aspekt je i pro tuto práci velmi důležitý. Motiv pro výkonový rezistor je zobrazen na obr. 28 a motiv pro pájecí podložku je zobrazen na obr. 29.

Jako další bylo zjišťováno, jak okolní prostředí působí na pájecí pastu z hlediska vypařování tavidla. Proto byla namíchána pasta obsahující 74 mg tavidla a 37 mg stříbrného prášku. Jak je patrné z Tab. 2 po dvaceti minutách se snížila hmotnost pájky o 9mg což má za následek ztvrdnutí pájky. Takto ztvrdlá pájka znemožňuje nanášení a další manipulace bez přidání tavidla.

Tab. 2 Změna hmotnosti pájky s časem

t (min)	M (mg)
0	111
10	106
15	104
20	102
25	102
30	102
35	102
40	101

Při prvotním testování byly použity různé typy struktur. Nejčastěji šlo o předpřipravené struktury, u kterých vznikly při výrobním procesu chyby, a tak se staly nevhovujícím pro danou aplikaci.

4.4 Realizace pájení ve vypalovací peci pro tlusté vrstvy

Vzhledem k aspektu, že při výpalu tlusté vrstvy se pracuje s podobnou teplotou, jako při tvrdém pájení byl proveden pokus o zapájení vývodů v pájecí peci LMH LAC.

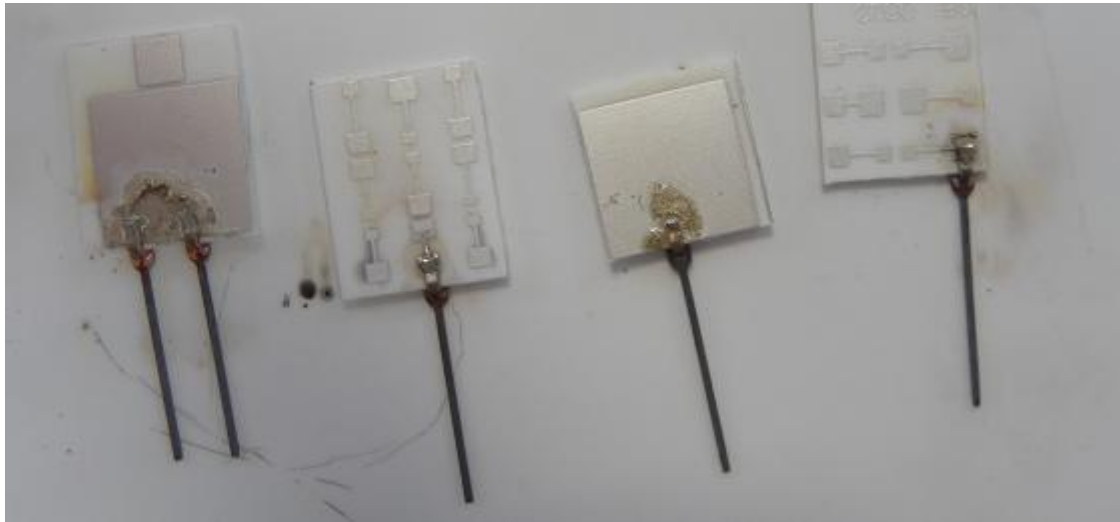
U prvního pokusu byl nastaven hodinový profil s vrcholovou teplotou 700 °C. Na testovací substráty byla nanášena stříbrná pájecí pasta, do které byly osazeny hřebíkové vývody. Testovací substráty byly umístěny do pece a po dosažení vrcholové teploty z pece vytaženy. Jak je patrné z obr. 30 došlo zcela ke spálení pájky a oxidaci hřebíkových kontaktů. Vzhledem k mechanickým vlastnostem došlo k pevnému spojení vývodů se substrátem a z elektrického hlediska byla výsledná struktura vodivá.



obr. 30 Substráty po vytažení z pece při hodinovém cyklu

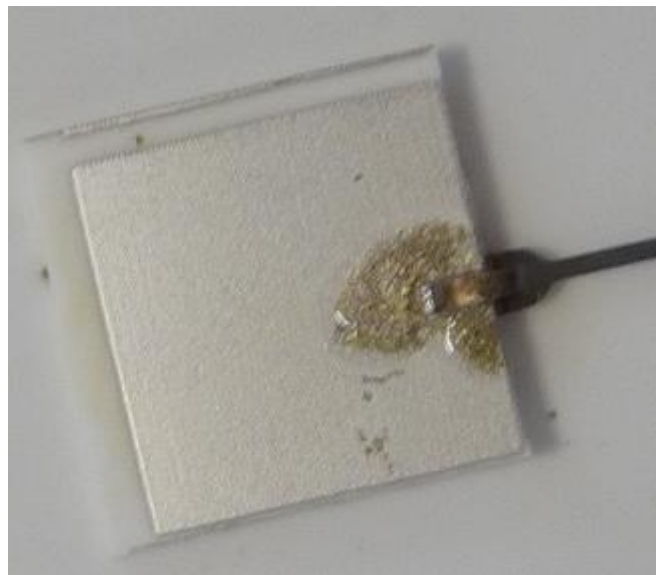
Při druhém experimentu bylo postupováno obdobně jako v předchozím s tím rozdílem, že testovací substráty byly do pece vloženy až při teplotě 660 °C, což je teplota tání stříbrné pájecí pasty. Substráty byly po 1 min a 50 s z pece vytaženy a zkoumány. Jak je patrné z obr. 31 došlo u většiny substrátů k jevu zvanému leaching vlivem vysoké teploty.

Leaching je jev při kterém tuhý materiál difunduje do kapalné látky vlivem vysoké teploty. Podrobně je leaching popsán v článku Extraction and leaching. [17]



obr. 31 Testovací substráty po vytažení z pece

Většina substrátů byla, jak po mechanické, tak i po elektrické stránce nepoužitelná z důvodu vzniklého odsmáčení. Substrát zobrazen na obr. 32 byl jediný mechanicky odolný a elektricky vodivý.



obr. 32 Pozitivní test z pece

Vzhledem k faktu, že vnitřní část pájecí pece tvoří materiál náchylný na změnu teplot, nebyly další experimenty s pecí prováděny z důvodů možného zničení pece při vkládání materiálů při vysoké teplotě.

4.5 Realizace pájení pomocí svářečky a HOTPLATE

Při této realizaci byl využíván sklokeramický HOTPLATE, který sloužil jako přehřev keramické destičky z důvodu snížení teplotního šoku, a kyslíkovodíková svářečka, která sloužila pro zahřátí spoje na teplotu tavení pájky. U všech testů byly substráty i kontakty očištěny izopropylalkoholem, aby došlo k odstranění mastnoty a případných nečistot.

4.5.1 Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty a hřebíkových vývodů

U tohoto pokusů bylo využíváno stříbrné pájecí pasty, která byla podle výrobce namíchána v poměru 1:1 a nanesena v množství přibližně 4mg na substrát, na kterém byly pájecí podložky vytvořeny stříbrnou vodivou pastou. Do pájecí pasty byly následně osazeny hřebíkové vývody. Substrát byl posléze umístěn na HOTPLATE a vyhřán na maximální hodnotu. Následně bylo okolí kontaktu zahříváno svářečkou ze vzdálenosti přibližně 10 cm do aktivace tavidla a následně ze vzdálenosti 5 cm do přetavení pájky. Po přetavení pájky byl substrát přesunut na kraj HOTPLATE a po uplynutí 30s na podložku, kde docházelo k jeho chladnutí. Po vychladnutí bylo místo spojení opláchnuto pod vodou, aby došlo k odstranění zbytkového tavidla. Jak je patrné z obr. 33 došlo k odsmáčení vývodu vlivem roztavené pájky.

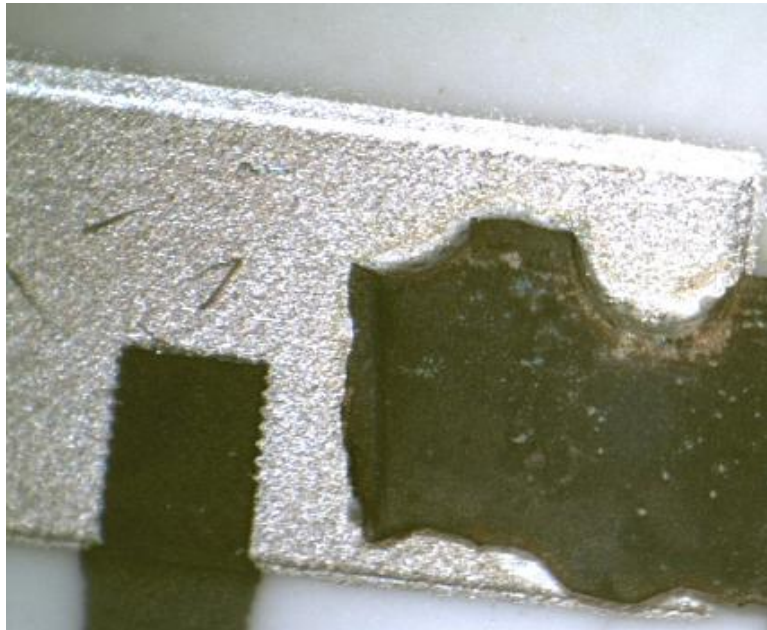


obr. 33 Leaching vývodu

U dalších pokusů prováděných se stejným materiálem a na podobném typu substrátu byl výsledek obdobný. Efekt byl způsoben příliš tenkou vrstvou plošky a malou plochou kontaktu.

4.5.2 Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty a vývodů s větší kontaktní plochou

Při další fázi realizace byly hřebíkové vývody nahrazeny kouskem kovu stejného materiálu o stejné tloušťce ale s větší dotykovou plochou asi 16 mm². Realizace byla provedena obdobným způsobem jako při předchozí realizaci s tím rozdílem, že se volný konec kontaktu musel podložit, aby byl v rovině s pájecí podložkou. Jak je patrné z obr. 34, došlo k zapájení vývodu. Při dalším testování bylo zjištěno, že je kontakt mechanicky odolný a elektricky vodivý.



obr. 34 Realizace spojení s větší plochou kontaktu

4.5.3 Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty, hřebíkových vývodů a stojanu na mikroplamene

Proces probíhal stejným způsobem jako v předchozím případě s tím rozdílem, že hořák byl umístěn ve stojanu, kterým se dala regulovat jeho vzdálenost od substrátu. Na obr. 35 je zobrazeno uspořádání pracoviště.



obr. 35 Upevnění mikroplamene

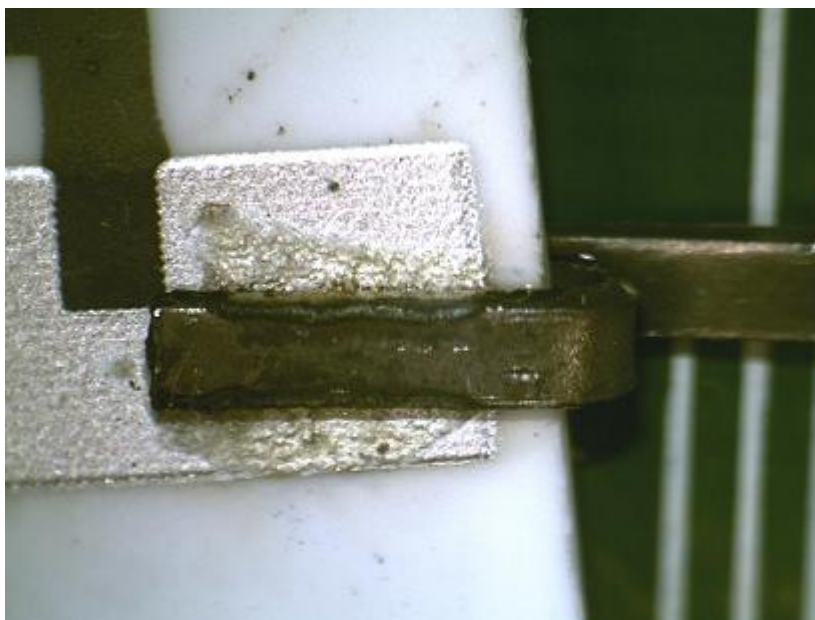
Při tomto typu realizace docházelo velmi často k praskání substrátů, nebo k difundování stříbrné podložky do pájky. Tyto efekty byly způsobeny přílišným lokálním ohřevem a neschopností rychle reagovat na změny pájeného spoje.

Z těchto důvodů, nebyl stojan dále používán a nastavování výšky plamene se provádělo ručně.

4.5.3.1 Realizace spoje pomocí stříbrné pájecí pasty a vývodů ze slitiny železa, chromu a niklu

Realizace tohoto typu spojení byla prováděna na různých typech substrátů. Na prvním typu substrátu byla vodivá podložka vytvořena vodivou pastou AgPd. Na druhém substrátu byla vodivá ploška vytvořena vodivou pastou Ag o dvou vrstvách. Na třetím substrátu byla vodivá ploška vytvořena vodivou pastou Ag o třech vrstvách.

Samotný proces zapájení probíhal stejným způsobem jako v předchozích případech. Na obr. 36 je zobrazen kontakt vytvořený na substrátu s Ag trojitou vodivou vrstvou.



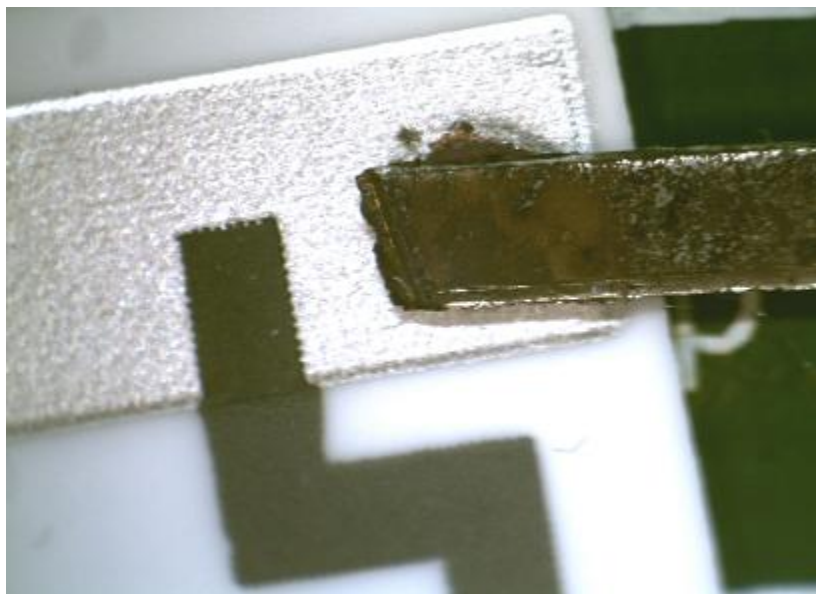
obr. 36 Stříbrná troj vrstva s kontaktem ze slitiny železa, niklu a chromu

Od každého typu substrátu byly vyrobeny dva kusy, na kterých byly prováděny zkoušky, které jsou popsány v závěrečné části. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v části Zkoušky pájených spojů.

4.5.4 Realizace spoje pomocí Ag15CuP pájky a vývodů ze slitiny železa, chromu a niklu

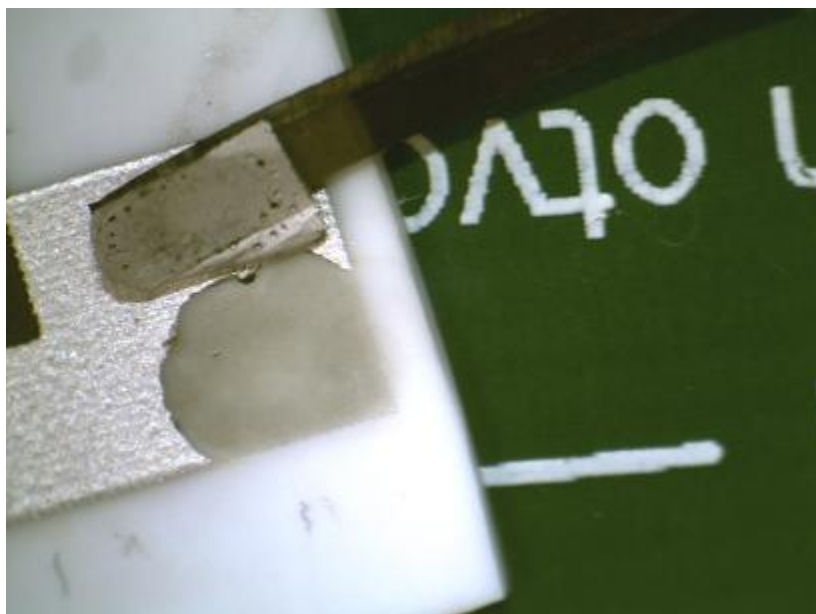
Vzhledem k faktu, že typ pájky byl ve formě drátu, nemohl být použit totožný způsob pájení jako v předešlých případech. Nejvíce se osvědčila metoda, kdy byl ustřížený kus pájky, přibližně 4 mg, nanesen na nenatvarovaný vývod z železa, chromu a niklu společně s tavidlem o hmotnosti asi 2mg. Následně byl vývod z 10 cm zahříván do aktivace tavidla, a dále zahříván ze vzdálenosti 5 cm do přetavení pájky. Dále byl na HOTPLATE umístěn substrát a vyhříván do jeho maxima. Na vývod s pájkou bylo umístěno tavidlo, asi 2 mg, a vývod byl umístěn na podložku. Druhý konec vývodu byl podložen keramikou o stejné tloušťce jako substrát. Následně byl kontakt zahříván ze vzdálenosti nejdříve 10 cm, do aktivování tavidla a následně z 5 cm do roztečení pájky po vodivé podložce. Proces chladnutí probíhal stejným způsobem jako v předchozím případě.

Na obr. 37 je zobrazen výsledný spoj tvořený pájkou Ag15CuP na substrátu s vodivou stříbrnou podložkou tvořenou třemi vrstvami.



obr. 37 Spoj vytvořený pájkou Ag15CuP

Při práci s několikavrstvou vodivou ploškou nemusela být pečlivě hlídána doba přetavení pájky při pájení vývodu na podložku. U vodivé plošky vytvořené pastou AgPd docházelo vlivem nehlídané doby přetavení k odsmáčení podložky a znehodnocení vzorku, jak je ukázáno na obr. 38. Z tohoto důvodu muselo být ihned po začátku roztékání pájky na podložce ukončeno zahřívání a substrát odebrán z HOTPLATE, aby se minimalizovala doba tepelného působení.

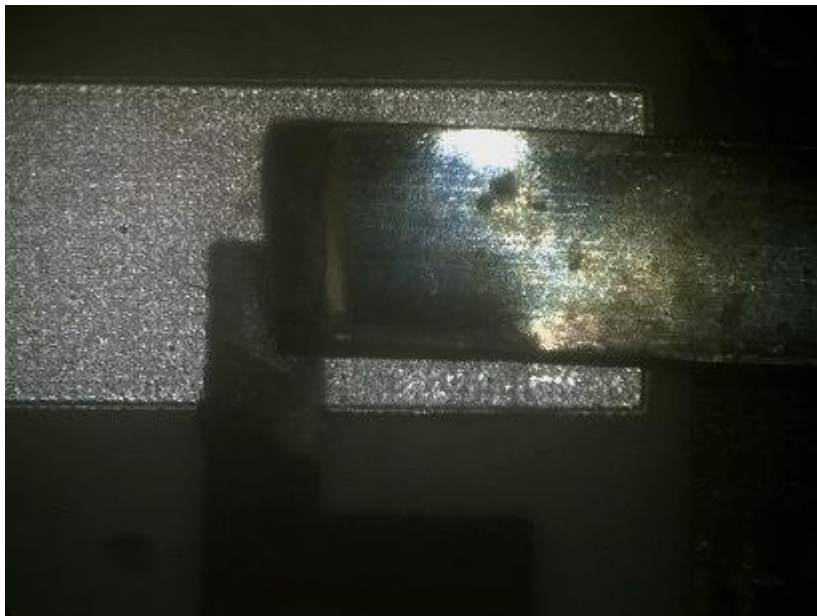


obr. 38 Odsmačená podložka

Jako v předchozím případě byly vytvořeny dva kusy od všech druhů substrátů, které se budou posléze podrobovat zkouškám.

4.5.5 Realizace spoje pomocí pájky Ag45CuZn a vývodů ze slitiny niklu, chromu a titanu

Jako v předešlém případě je pájka ve formě drátu, takže proces vytváření spoje probíhal stejným způsobem. Vyrobené spojení je zobrazeno na obr. 39.

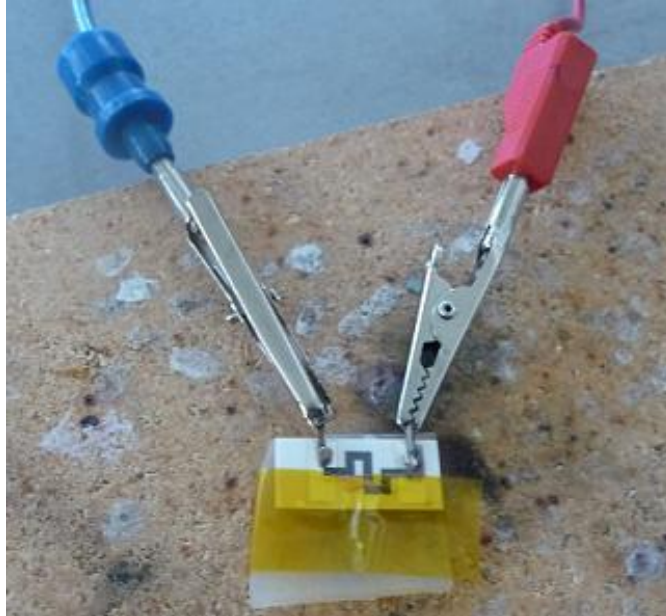


obr. 39 Spoj vytvořený pájkou Ag45CuZn

I zde bylo vytvořeno šest vzorků pro další testování.

4.6 Zkoušky tepelné

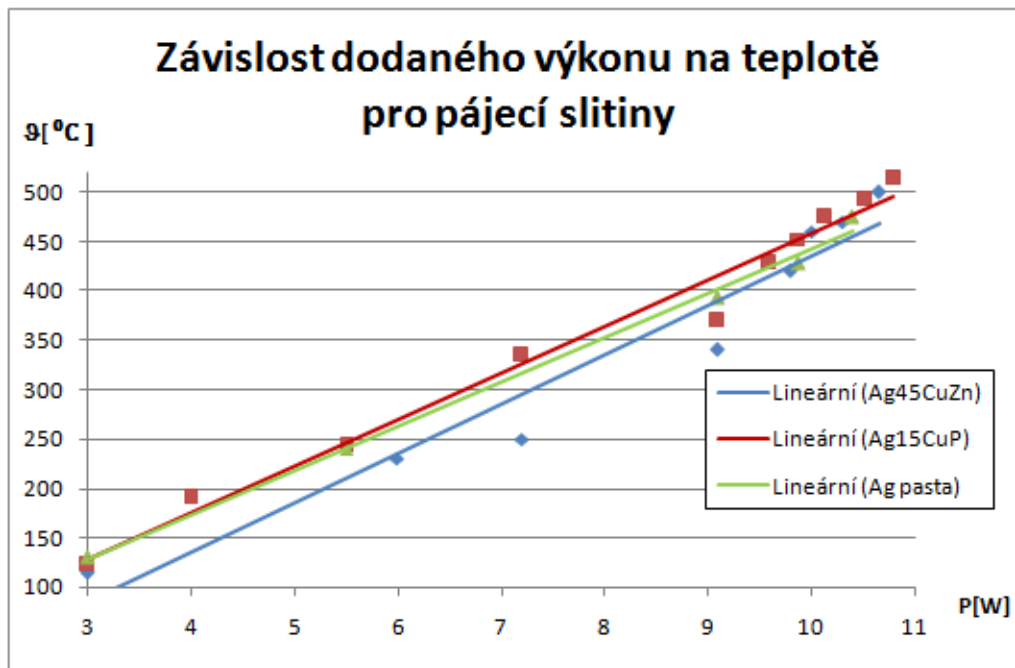
Od spoje pro výkonové aplikace se očekává, že zvládne teplotu aspoň 500°C. Z tohoto hlediska, byly testovací substráty postupně připojeny k proudovému zdroji, jak je zobrazeno na obr. 40, a probíhalo jejich vyhřívání proudem až na tuto teplotu. Teplota byla snímána pomocí termočlánu připojeného k počítači.



obr. 40 Připojení substrátu k proudovému zdroji

Vzhledem k tomu, že v průběhu vyhřívání docházelo k praskání substrátů, byly obvody umístěny na tepelně izolační podložku pro zamezení tohoto jevu.

Jak je patrné z obr. 41 není závislost dodaného výkonu na teplotě u všech pájecích slitin stejná. Důvodem rozdílu může být různá výška nenesené pájky, odlišné složení pájecích slitin a rozdílná plocha vývodů.



obr. 41 Graf závislosti dodaného výkonu na teplotě

Zkouška měla dokázat použitelnost pájecích slitin do 500⁰C. Všechny pájecí slitiny ve zkoušce obstály.

4.7 Mechanické zkoušky tahem

Kvůli zjištění mechanické pevnosti pájeného spoje byly prováděny zkoušky tahem. Přístroj na zkoušku tahem byl vytvořen panem ing. Janem Valíčkem a sloužil pro testování SMD součástek a BGA pouzder. V tomto testu byl vývod uchycen do měřiče síly TEST 321 a substrát do zařízení, které substrát oddalovalo od vývodu. Působící síla byla zaznamenána na TEST 321. Zjišťovalo se, jaká síla je potřebná k odtržení vývodu. Uchycení substrátu v zařízení je zobrazeno na obr. 42.



obr. 42 Upevnění substrátu v zařízení

4.7.1 Test pájky Ag45CuZn a vývodů ze slitiny niklu, chromu a titanu

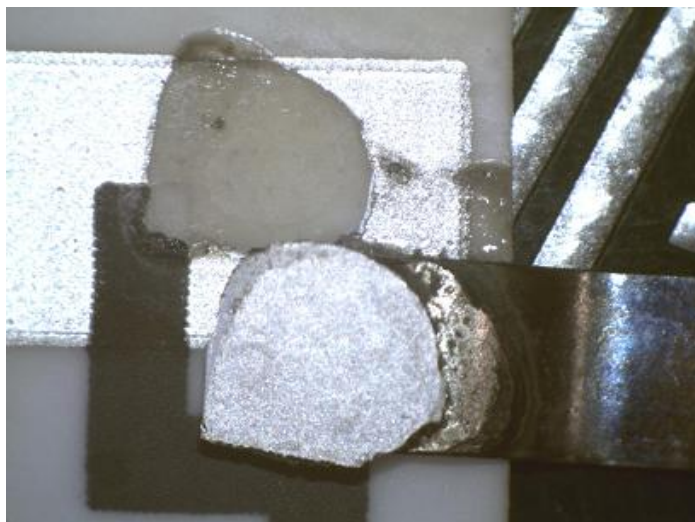
Pro tento test byly vytvořeny dva testovací substráty (čtyři spoje) od všech typů struktury (dohromady 6 substrátů) a byla zjišťována síla potřebná k utržení vývodu. V Tab. 3 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 3 Naměřené hodnoty pro pájku Ag45CuZn

Substrát	Maximální tahová síla [N]				Průměrná síla [N]
Ag tři vrstvy	182	179	170	168	174,75
Ag dvě vrstvy	22,6	19	16,5	15	18,28
AgPd	102	99	80	79,2	90,05

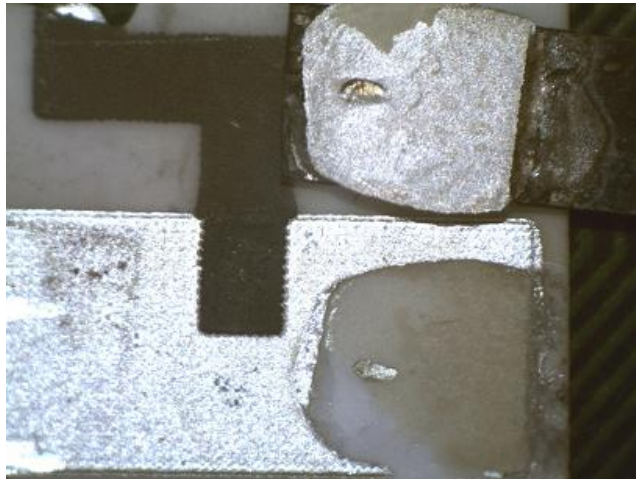
U vzorků tvořených stříbrnou pastou o třech vrstvách se nepovedlo odtržení kontaktu ani v jednom případě. Dřív než byl kontakt odtrhnut, došlo k prasknutí keramického substrátu, což znemožnilo další měření.

Při testech vzorků tvořených stříbrnou pastou o dvou vrstvách došlo k odtržení kontaktu i s vodivou ploškou. Na obr. 43 je zobrazen spoj, který byl zničen silou 182 N.



obr. 43 Stříbrná dvojevrstvá podložka

Jako poslední byly testu podrobeny vzorky tvořené AgPd vodivou pastou. Jak je patrné z obr. 44, pro sílu 22,6 N, došlo ke stejnému efektu jako v předchozím případě a to k odtržení kontaktu i s vodivou ploškou. Tento efekt byl totožný pro všechny testovací vzorky.



obr. 44 AgPd podložka

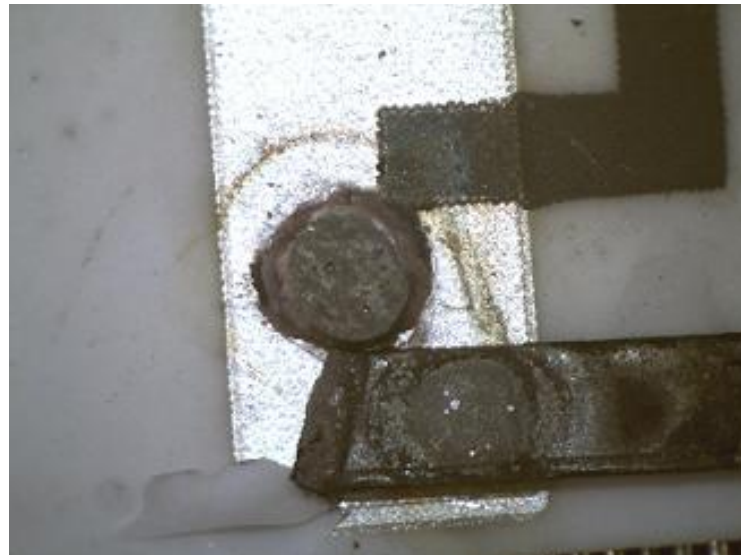
4.7.2 Test pájky Ag15CuP a vývodů ze slitiny železa, niklu a chromu

Jako v předešlém případě bylo testu podrobena celkem 12 spojů. Naměřené hodnoty pro všechny typy struktury jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Naměřené hodnoty pro pájku Ag15CuP

Substrát	Maximální tahová síla [N]				Průměrná síla [N]
Ag tři vrstvy	92,8	82	70	45,3	72,53
Ag dvě vrstvy	220	150	100	82	138
AgPd	22	20	15	12	17,25

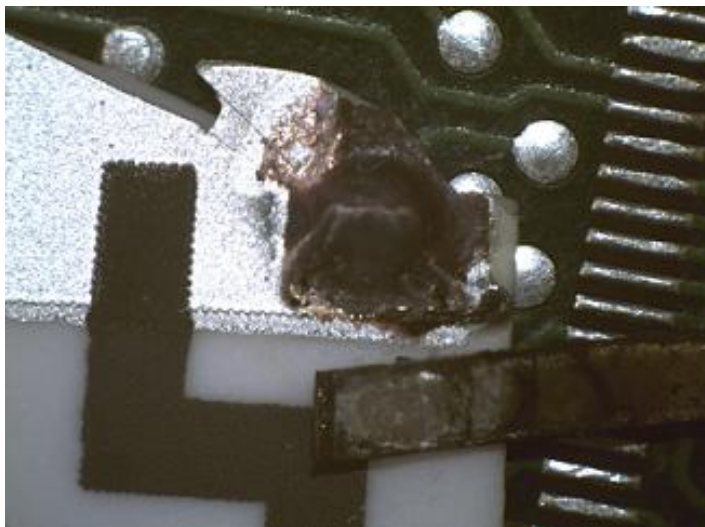
U testování vzorků tvořených stříbrnou pastou o třech vrstvách došlo vždy k utržení spoje v místech styku pájky s kontaktem. Příklad vzorku pro sílu 92,8 N je na obr. 45.



obr. 45 Stříbrná třívrstvá podložka

Při testech vzorků o dvou vrstvách byly patrné dva efekty. Buď došlo k odtržení pájeného spoje v místech styku pájky a kontaktu, jako v předchozím případě, nebo došlo vlivem mechanického namáhání k prasknutí keramického substrátu a tím k odtržení vývodu. Vysoký vliv, na zmenšení síly měl tvar vývodu. Pokud vývod nebyl dostatečně

rovný, docházelo při testu nejen k namáhání kontaktu v tahu, ale také k namáhání ve zkrutu, což mělo vliv na snížení síly. Testovací vzorek, který byl zničen silou 220 N, je zobrazen na obr. 46.



obr. 46 Stříbrná dvojrstvá podložka

U vzorků tvořených AgPd vodivou vrstvou došlo ve všech případech k odtržení vývodů i s vodivou ploškou. Na obr. 47 je zobrazen vzorek, u kterého došlo k odstranění vodivé plošky i s kusem keramického substrátu. Tento efekt mohl být způsoben naprasklým substrátem a vznikl při působící síle 22N.



obr. 47 AgPd podložka

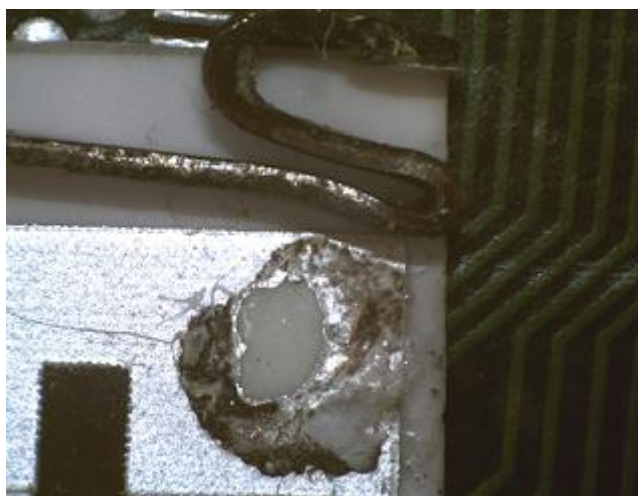
4.7.3 Test stříbrné pájecí pasty a vývodů ze slitiny železa, niklu a chromu

Jako u předchozí dvou testu, bylo i zde měřeno 12 spojů, které byly zapsány do Tab. 5.

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro stříbrnou pájecí pastu

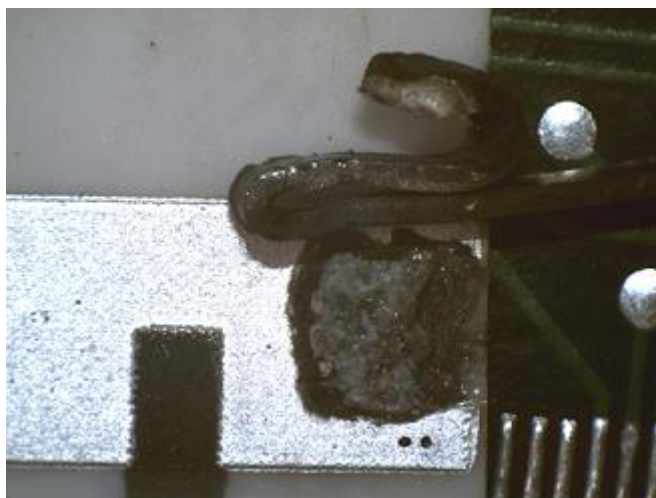
Substrát	Maximální tahová síla [N]				Průměrná síla [N]
Ag tři vrstvy	49,8	47,5	45,6	42	46,23
Ag dvě vrstvy	14,2	12,1	11,8	10,6	12,18
AgPd	12	10	8,9	7,5	9,6

Při testech vzorků se stříbrnou pastou o třech vrstvách, došlo vždy při přibližně stejné síle k odtržení kontaktu i s vodivou ploškou. Kontakt, který byl odtrhnut silou 49,8 N, je zobrazen obr. 48.



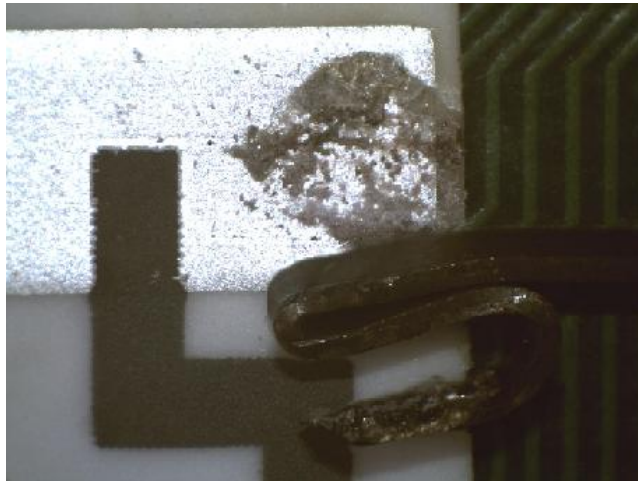
obr. 48 Stříbrná třívrstvá podložka

Dvojvrstvá stříbrná pasta obstála v testech podobně jako předchozí, s tím rozdílem, že u žádného s testovacích substrátů nedošlo k odtržení podložky s kontaktem, ale spoj byl přerušen v místech styku pájky a kontaktu. Odtržení spoje silou 14,2 N je na obr. 49.



obr. 49 Stříbrná dvojvrstvá podložka

U pasty Agpd dopadly všechny testy totožně jako předchozí. Síla potřebná k odtržení vývodu zde byla o něco menší. Ukázka spoje, který byl zničen silou 12 N, je na obr. 50.



obr. 50 AgPd podložka

Odolnost spoje je výrazně ovlivněna technologickým procesem jeho výroby, stykovou plochou kontaktu s podložkou a materiálem pájky. Při přehřátí spoje během technologického procesu sice mohlo dojít k připájení kontaktu, ale při následném mechanickém namáhání je zapotřebí menší síly k narušení spoje. Rozdílné hodnoty v měření jedné slitiny byly taky výrazně ovlivněny samotnou mechanickou zkouškou, která při nepřesně vodorovném uchycení kontaktu v zařízení nepůsobila pouze tahovou silou ve vodorovném směru ale také namáháním ve zkrutu, což zmenšilo sílu potřebnou k narušení spoje.

Jak je patrné z průměrných naměřených hodnot různých slitin, nejodolnější spoj byl vytvořen pájkou Ag45CuZn a vývodem ze slitiny niklu, chromu a titanu. Tento aspekt byl způsoben velkou stykovou plochou kontaktu s pájecí podložkou, nízkou vzdáleností mezi kontaktem a podložkou a krátkým působením tavidla na kontaktní podložku. Naopak nejhorší vlastnosti vykazovala stříbrná pájecí pasta i navzdory tomu že má podobné složení jako pájka Ag45CuZn. Tento rozdíl byl způsoben rozdílným technologickým procesem obou pájecích slitin.

Závěr

Cílem této práce bylo proniknout do problematiky připojení hybridních integrovaných obvodů. V první řadě byla zpracována teorie pro různé způsoby připojení vývodů. Při výběru způsobu připojení hybridních integrovaných obvodů musíme brát v potaz vlastnosti, které od výsledného obvodu očekáváme. V automatické výrobě hybridních integrovaných obvodů převládá připojení vývodů pomocí tzv. TAB. Naopak v sériové výrobě převládá připojení pomocí hřebíkových vývodů. Hřebíkové vývody se nejčastěji připojují k HIO pomocí měkkého pájení. Tato práce, se ale zabývá nekonvenčním způsobem připojení těchto vývodů a to pomocí tvrdého pájení. Tato metoda byla zvolená kvůli možnosti použití HIO pro výkonové aplikace.

Praktická část popisuje možné způsoby realizace spoje pomocí tvrdé pájky na keramický substrát, res. vodivou tlustou vrstvou. První pokusy byly prováděny s hřebíkovými vývody, ale ty se později ukázaly jako nepoužitelné z důvodu malé kontaktní plochy s podložkou. Proto byly v další fázi nahrazeny kontakty s větší stykovou plochou s podložkou. Dále bylo zkoumáno použití laboratorního držáku na uchycení mikroplamene. Tento postup byl nevyhovující z důvodu přílišného lokálního ohřevu a snížené rychlosti reakce na změnu spoje, a proto bylo dále užíváno ručního pájení. V následujících pokusech, byly použity dvě formy pájky a to pájka ve formě pasty a drátu. Pájka ve formě pasty měla výhodu ve snadnějším nanášení oproti drátové, ale vlivem delšího působení tavidla mělo výsledné spojení menší mechanickou odolnost, z důvodů difundování vodivé podložky do pájky. Jako nejvhodnější materiál se v testech jevila pájka ve formě drátu Ag45CuZn z hlediska dobré smáčivosti a vynikající mechanické odolnosti, při spojení s vývodem ze slitiny niklu, chromu a titanu s širokou kontaktní plochou.

Z hlediska použitelnosti procesu pro výkonové aplikace by bylo vhodnější použití pájecí pece s přesně nastaveným teplotním profilem než kyslíkovodíkové svářečky. Při pájení kyslíkovodíkovou svářečkou dochází k nerovnoměrnému tepelnému namáhání substrátu, což může způsobit jeho prasknutí nebo zničení vytvořených motivů.

Použitá literatura

- [1] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [2] Harper, Charles A. Handbook of thick film hybrid microelectronics: a practical sourcebook for designers, fabricators, and users. New York,: McGraw-Hill,, 1974, ISBN 00-702-6680-8.
- [3] GUPTA, Tapan K. Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2003, 406 p. ISBN 04-712-7229-9.
- [4] LIYE MACHINERY. [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://www.liye-presses.com/english/english.htm>.
- [5] TE CONECTIVITY. [online]. [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://www.te.com/catalog/pn/en/1544143-1?RQPN=1544143-1>.
- [6] FARNELL. [online]. [cit. 2013-5-12]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/te-connectivity-amp/1544425-1/frame-lead-sil-2-54mm/dp/1863361>.
- [7] GLOBAL SOURCES. [online]. [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://www.globalsources.com/gsol/I/Lead-frame/p/sm/1000506255.htm#1000506255>.
- [8] An Introduction to Brazing článek společnosti Sulzer Metco. 2011. Dostupné z: http://www.sulzer.com/cs/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Materials/Braze/Brochures/Introduction_to_Brazing_V3.pdf.
- [9] Odborná instalace měděných trubek časopis Německého institutu mědi. 2006. Dostupné z: http://www.copperschool.com/cz/letoltes/odborna_instalace_medenych_trubek_ucebnice.pdf.
- [10] KUBÁLEK, Jaroslav. Pájení kovů. 2012. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pajeni-kovu>.
- [11] DRIEL, W.D. van, R.B.R. van SILFHOUT a G.Q. ZHANG. Reliability of wirebonds in micro-electronic packages. Microelectronics International. 2008, vol. 25, issue 2, s. 15-22. DOI: 10.1108/13565360810875967. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13565360810875967>.
- [12] APELIAN, Diran. Introduction to Furnace Brazing. 2001, s. 40. Dostupné z: <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/industries/metals-introduction-furnace-brazing.pdf>.
- [13] MACH, M. Pájení v ochranné atmosféře. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2011. 71 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jan Knedlová.
- [14] AKUMULÁTORŮ. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://akubat.cz/g2808.Laboratorn%C3%AD+zdroj+MANSON+1+60+VDC+++0+2,5+A,+150+W,+HCS+3104+USB.html>.
- [15] VALÍČEK, J. Návrh a realizace zařízení pro měření síly v tahu u SMD. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2013. 65 s., 11 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal.
- [16] VALÍČEK, J. Realizace vývodů hybridních integrovaných obvodů pro vysokoteplotní aplikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 54s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Řezníček.
- [17] PAControl.[online].[cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://www.paccontrol.com/process-information-book/Extraction%20and%20Leaching%2093851_14a.pdf.

Seznam obrázků

obr. 1 Technologický proces výroby kulového spoje [3].....	10
obr. 2 Technologický proces výroby wedge bonding [3]	10
obr. 3 Vytváření spoje pomocí ultrazvuku[3]	12
obr. 4 Druhy pinů pro TAB [3]	13
obr. 5 Vysokorychlostní automat LIYE MT-60 [4].....	14
obr. 6 Hřebínkové vývody SIL [6].....	14
obr. 7 Hřebínkové vývody DIL [5]	15
obr. 8 Mosazné hřebínkové vývody [7]	15
obr. 9 Pinové hřebínkové vývody[7].....	15
obr. 10 Hřebínkové vývody se zlatými kontakty [7].....	16
obr. 11 Dva základní druhy spojů [8].....	21
obr. 12 Neutrální plamen [10].....	22
obr. 13 Oxidační (ostrý) plamen – přebytek kyslíku [10].....	22
obr. 14 Redukční (měkký) plamen – přebytek acetylenu [10].....	22
obr. 15 Tavidlo a pájecí pasta	25
obr. 16 Hřebínkové vývody.....	26
obr. 17 Tvar vývodu ze slitiny železa, niklu a chromu	26
obr. 18 Sítotiskový poloautomat AUREL C 880 Screen Printer	27
obr. 19 Sterilizátor HS 62 A.....	28
obr. 20 Přetavovací pec BTU TFF51	29
obr. 21 GLASS CERAMIC HOTPLATE CT 10.....	29
obr. 22 Kyslíkovodíková svářečka.....	30
obr. 23 Pec LMH LAC.....	30
obr. 24 Laboratorní zdroj MANSION [14]	31
obr. 25 Měřič v tahu [15]	31
obr. 26 Pájecí profil pro pájku 1555p.....	32
obr. 27 Výsledná struktura	34
obr. 28 Odporový meandr	34
obr. 29 Vodivá struktura	35
obr. 30 Substráty po vytažení z pece při hodinovém cyklu	36
obr. 31 Testovací substráty po vytažení z pece.....	37
obr. 32 Pozitivní test z pece	37
obr. 33 Leaching vývodu.....	38

obr. 34 Realizace spojení s větší plochou kontaktu	39
obr. 35 Upevnění mikroplamene.....	39
obr. 36 Stříbrná troj vrstva s kontaktem ze slitiny železa, niklu a chromu	40
obr. 37 Spoj vytvořený pájkou Ag15CuP	41
obr. 38 Odsmaččená podložka	41
obr. 39 Spoj vytvořený pájkou Ag45CuZn	42
obr. 40 Připojení substrátu k proudovému zdroji.....	43
obr. 41 Graf závislosti dodaného výkonu na teplotě.....	44
obr. 42 Upevnění substrátu v zařízení.....	44
obr. 43 Stříbrná dvojrstvá podložka	45
obr. 44 AgPd podložka.....	46
obr. 45 Stříbrná třívrstvá podložka	46
obr. 46 Stříbrná dvojrstvá podložka	47
obr. 47 AgPd podložka.....	47
obr. 48 Stříbrná třívrstvá podložka	48
obr. 49 Stříbrná dvojrstvá podložka	48
obr. 50 AgPd podložka.....	49

Seznam tabulek

Tab. 1 Skupiny pájek a jejich vlastnosti [12].....	19
Tab. 2 Změna hmotnosti pájky s časem	35
Tab. 3 Naměřené hodnoty pro pájku Ag45CuZn.....	45
Tab. 4 Naměřené hodnoty pro pájku Ag15CuP	46
Tab. 5 Naměřené hodnoty pro stříbrnou pájecí pastu	48

Seznam zkratk

HIO - Hybridní integrovaný obvod

SMD-komponenta pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)

BGA- typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž (Ball grid array)

TAB- Páskové automatizované spojování (Tape Automated Bonding)

SIL- V jedné řadě (single in line)

DIL- Dvojitě v řadě (dual in line)

Seznam rovnic

Rovnice 1 Výpočet šířky odporu.....	34
-------------------------------------	----