

Anotace

Cílem této práce je seznámení se s metodou Wirebonding (svařování tenkým drátkem). Jsou zpracovány různé metody svařování. Dále jsou popsány různé způsoby testování pevnosti svarů, především destruktivní a nedestruktivní zkoušky pevnosti. Destruktivních zkoušek je použito v experimentální části a výsledky jsou uvedeny v tabulkách.

Abstrakt

The object of this work is the identification of Wirebonding (welding with a thin wire). This work elaborates various methods of welding. Various methods of testing are described, especially destructive and non-destructive testing. Destructive testing is used in experimental part and the results are placed in tables.

Klíčová slova

Wirebonding, ultrazvukové svarování, termosonické svarování, termokompresní svarování, kapilára, klín

Keywords

Wirebonding, Ultrasonic welding, Thermosonic welding, Thermocompression welding, Capillary, Wedge

Bibliografická citace mé práce:

Gregor, P. Kontaktování a klimatická odolnost kontaktů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 40stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Edita Hejátková

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Kontaktování a klimatická odolnost kontaktů 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 uvedeného semestrálního projektu 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 28. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Editě Hejátkové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 28. května 2008

.....
podpis autora

!!Popisný soubor závěrečné práce!!

OBSAH

1. ÚVOD	10
1.1 METODA WIREBONDING	10
2. METODY SVAŘOVÁNÍ.....	11
2.1 TERMOKOMPRESSE	11
2.2 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	11
2.2.2 Svařitelnost materiálů	11
2.2.3 Aplikace ultrazvukového svařování	12
2.3 TERMOSONICKÉ SVAŘOVÁNÍ.....	12
3. TYPY SPOJŮ	13
3.1 SPOJE VYTVOŘENÉ KAPILÁROU	13
3.2 SPOJE VYTVOŘENÉ POMOCÍ KLÍNU	15
4. POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	17
4.1 SVAŘOVÁNÍ ZLATEM	17
4.2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKEM.....	17
4.3 SVAŘOVÁNÍ MĚDÍ	17
5. METALURGICKÉ SYSTÉMY	18
5.1 AU-AU	18
5.2 AU-AL.....	18
5.3 AU-CU	18
5.4 AU-AG	18
5.5 AL-AL	19
5.6 AL-AG.....	19
5.7 AL-CU.....	19
6. TESTY PEVNOSTI KONTAKTOVÁNÍ	19
6.1 VNITŘNÍ VIZUÁLNÍ KONTROLA	19
6.2 ČASOVÁ MĚŘENÍ.....	20
6.3 DESTRUKTIVNÍ TAHOVÝ TEST	20
6.4 NEDESTRUKTIVNÍ TAHOVÝ	23
6.5 ROVNOMĚRNÉ ZRYCHLENÍ.....	23
6.6 NÁHODNÉ OTŘESY	23
6.7 MECHANICKÝ ŠOK.....	23
6.8 ODOLNOST PROTI VLHKU.....	23
7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
7.1 Úvod.....	24
7.2 POUŽITÉ MATERIÁLY A POSTUP PŘÍPRAVY VZORKŮ:	24
7.3 ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ:	27
7.4 REFERENČNÍ VZOREK	28
7.5 VLIV PŮSOBENÍ TEPLoty	29
7.6 VLIV PŮSOBENÍ VLHKOSTI.....	30
7.7 VLIV CYKLOVÁNÍ TEPLot	31
7.8 PROUDOVÉ ZKOUŠKY	32
8. ZÁVĚR	33
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35

Seznam obrázků

Obr. 1: Čip nakontaktovaný pomocí wirebondingu.....	10
Obr. 2: Spoj vytvořený klínem.....	13
Obr. 3: Spoj vytvořený kapilárou.....	13
Obr. 4: Postup vytvoření spoje pomocí kapiláry	14
Obr. 5: Kapilára.....	15
Obr. 6: Klín pro svařování Al.....	15
Obr. 7: Klín pro svařování Au	15
Obr. 8: Aplikace klínového svařování	16
Obr. 9: Schéma tahového testu	20
Obr. 10: 90° tahový test jediného svaru smyčky	21
Obr. 11: 30° tahový test jediného svaru smyčky.....	21
Obr. 12: 90° tahový test individuálního svaru	21
Obr. 13: 45° tahový test individuálního svaru	21
Obr. 14: Přetuhnutí drátku těsně u spoje.....	22
Obr. 15: Odrážení sváru z čipu.....	22
Obr. 16: Přetrhnutí drátku v místě testování	22
Obr. 17: Odrážení části čipu i se svárem	22
Obr. 18: Vodivý motiv pro přípravu vzorků	25
Obr. 19: Ultrazvukové svářecí zařízení ESEC 8-166-02	25
Obr. 20: Postup vytvoření svaru na ultrazvukovém svářecím zařízení	26
Obr. 21: Přetrhané spoje podrobené testu pevnosti.....	26
Obr. 22: Pevnost jednotlivých spojů referenčního vzorku	28
Obr. 23: Pevnost jednotlivých spojů, test 50 °C, 100hodin	29
Obr. 24: Pevnost jednotlivých spojů, test 80 °C, 100hodin	30
Obr. 25: Pevnost jednotlivých spojů - vliv působení vlhkosti.....	31
Obr. 26: Pevnost jednotlivých spojů - vliv cyklování teplot	32
Obr. 27: Přetavené spoje po proudových testech	33
Obr. 28: Graf naměřených hodnot	33

Seznam tabulek

Tab. 1: Druhy wirebondingu;.....	12
Tab. 2: Druhy spojů	16
Tab. 3: Výsledky testu pevnosti referenčního vzorku	28
Tab. 4: Výsledky testu pevnosti – vliv teploty 50 °C, 100hodin	29
Tab. 5: Výsledky testu pevnosti – vliv teploty 80 °C, 100hodin	30
Tab. 6: Výsledky testu pevnosti – vliv vlhkosti	31
Tab. 7: Výsledky testu pevnosti – vliv cyklování teplot	32

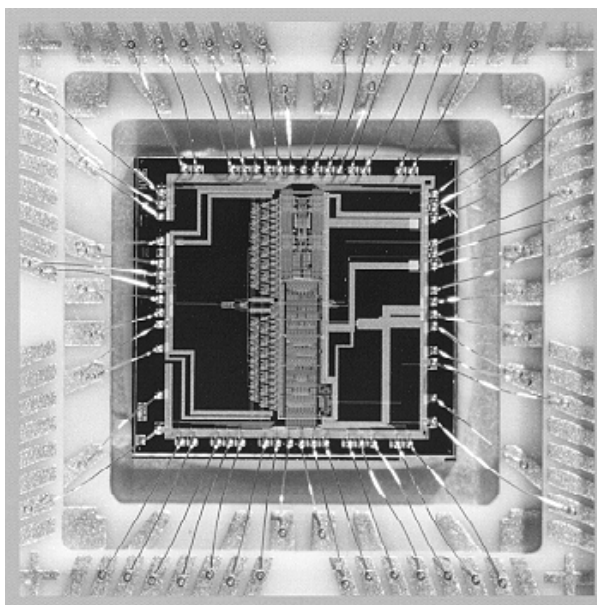
1. Úvod

1.1 Metoda Wirebonding

Wirebonding je metoda používající svaření tenkého drátu (obvykle 25 až 100 μm v průměru) od jednoho spoje k druhému. Jako první začaly tuto metodu využívat Bellovy laboratoře v roce 1957. První komerčně prodávané zařízení využívající metody wirebonding vyrobila společnost Soffa Industries v roce 1963. Všechna tato zařízení využívala pouze termokompresního svařování. V roce 1970 se začalo používat ultrazvukové a termosonické svařování. Výrazně se tak omezila teplota potřebná k utvoření svaru.

K vytvoření vodivého spoje se tedy využívá tlaku, teploty a ultrazvukové energie. K přivaření drátků slouží např. kapilára nebo klín. Nejvíce využívané metody wirebondingu jsou termokompresní, termosonické a ultrazvukové svařování. Každý rok se těmito metodami vytvoří přibližně 40 bilionů spojů a většina je použita asi ve 4-5 bilionech vytvořených integrovaných obvodech. Wirebonding je i nadále velice populární a nejvíce používaná metoda svařování, i když jsou používány i další (např. Flip Chip, Controlled Collapsed Chip Connection, Tape Automated Bonding a další). V minulosti způsobovaly velké rozměry všech polovodičových součástek velké problémy při wirebondingu, vyskytovalo se spoustu chyb, které však byly postupně eliminovány a tak se začala tato technologie využívat i v sériové výrobě.

Při použití wirebondingu musí být umístěny vývody čipů na jejich okraji, jinak může dojít ke zkratu. Proto je aplikace wirebondingu obtížná pro vysoký počet vzájemných spojů (>500).



Obr. 1: Čip nakontaktovaný pomocí wirebondingu

2. Metody svařování

2.1 Termokompresa

Termokompresní svařování je první metodou, která se začala ve wirebondingu používat. U této metody můžeme použít svařování pomocí klínu i kapiláry. V dnešní době se využívá pouze pro pár speciálních aplikací.

Při termokompresi dochází k vytvoření svaru mezi drátkem a ploškou kombinací teploty a tlaku. Svár je při kontaktování vytvořen vzájemnou difúzí krystalové mřížky mikrodrátku a kontaktovací plošky. Teplota ohřevu kontaktovací plošky i mikrodrátku, který se od ní při kontaktování ohřívá, je nižší než její teplota tavení. Používá se rozmezí teplot od 280 °C do 380 °C. Zbylá energie potřebná pro vytvoření svaru je dodána energií tlakovou.

Čas potřebný k vytvoření svaru je přibližně 1s. Je to poměrně dlouhá doba, která je důvodem ústupu této technologie.

Při termokompresním svařování se používá pouze zlatý drátek, hliníkový nelze použít z důvodu pokrytí oxidem hliníkem při vyšší teplotě.

2.2 Ultrazvukové svařování

Tuto metodu popsali v roce 1978 Winchell a Berg ve své knize, která je stále nejdůležitější publikací zabývající se ultrazvukovým svařováním [1].

Technologie nás neomezuje na použití pouze zlatého mikrodrátku. Můžeme použít i měď, stříbro, hliník a různé slitiny. Drátky je možno přivařit k ploškám na čipu, napařeným tenkým vrstvám zlata, stříbra, niklu nebo palladia.

Princip ultrazvukového kontaktování spočívá ve smykovém prolínání atomů. Není ani zapotřebí žádné zvýšené teploty, stačí pouze běžná teplota prostředí. Spoj se realizuje rozkmitáním kontaktovací hlavy (ve vodorovné rovině) a poté se přitiskne ke kontaktní plošce. Používáme frekvence od 60kHz do 120kHz. Doba potřebná k vytvoření spoje je přibližně 25ms. Spoj je tvořen pomocí klínu.

Díky ultrazvukové energii je podložka při utváření spoje očištěna od oxidů kovů vznikajících na povrchu. Spojované materiály se stanou plastickými a dojde k prolnutí krystalových mřížek a tudíž k vytvoření spoje.

2.2.2 Svařitelnost materiálů

Svařitelnost kovů ultrazvukem je podobná svařitelnosti tlakem za studena. Při volbě kombinací jsme však omezení velikostí průměrů atomů, které se mohou lišit do 18 %, což odpovídá možnosti vzniku substitučního tuhého roztoku. Při rozdílech průměrů atomů 19 až 44% se ultrazvukový spoj nevytvoří. Obecně jsou čisté kovy

lépe svařitelné než jejich slitiny. S růstem tloušťky materiálu vzrůstá útlum mechanického vlnění a maximální tloušťky materiálu jsou:

a) hliník 3,17 mm

b) měď 2 mm

c) ostatní materiály – Ni, Mo, Fe, Co, Ta atd. se svařují v rozsahu 0,5 – 0,7 mm.

Svařitelnost materiálů je velmi široká a kromě stejných kovů, lze spojovat i celou řadu různorodých materiálů: hliník a jeho slitiny jsou svařitelné s téměř všemi kovy. Měď, molybden, železo a stříbro mají také velmi širokou svařitelnost.

2.2.3 Aplikace ultrazvukového svařování

Ultrazvukové svařování je s výhodou použitelné tam, kde jiné technologie jsou nevyhovující a ultrazvukové spojování je jedinou možnou metodou. Nejčastější použití je v oblasti elektrotechniky, elektroniky, letecké a kosmické techniky. Například lze spojovat hliníkové a stříbrné drátky s napařenou tenkou vrstvou kovu, torzní svařování ve tvaru prstence a švové svařování se používá pro hermetické uzavírání obalů chemikálií, léčiv, výbušnin a radioaktivních látek.

2.3 Termosonické svařování

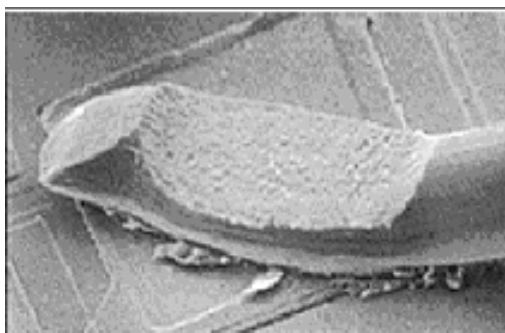
Využívá kombinace tepla a ultrazvukové energie. Nejčastěji svařované materiály jsou zlato a měď. Používá se stejné intenzity ultrazvukové energie jako u ultrazvukového svařování, tedy 60kHz až 120 kHz. Rozdílná je ale teplota při utváření spoje, nejčastěji bývá v rozmezí od 100 °C do 200 °C [2]. Doba pro vytvoření svaru bývá od 5ms do 20ms.

Tab. 1: Druhy wirebondingu

Metoda	Teplota	Ultrazvuková energie	Drát	Čas potřebný pro vytvoření spoje
Termokomprese	300-500 °C	NE	Au	1000ms
Ultrazvukové svařování	25 °C	ANO (60-120kHz)	Au, Al	25ms
Termosonické svařování	100-200 °C	ANO (60-120kHz)	Au, Cu	5-20ms

3. Typy spojů

Existují dva druhy spojů – vytvořené kapilárou nebo klínem. Studie ukazují, že asi 90% všech spojů a montáží je vyrobeno kapilárou a asi 10% pomocí klínu. [3] Zvýšené použití kapiláry je způsobeno zvýšením funkčnosti polovodičů a zmenšením jejich velikosti, díky malým a blízko u sebe umístěným spojům.



Obr. 2: Spoj vytvořený klínem



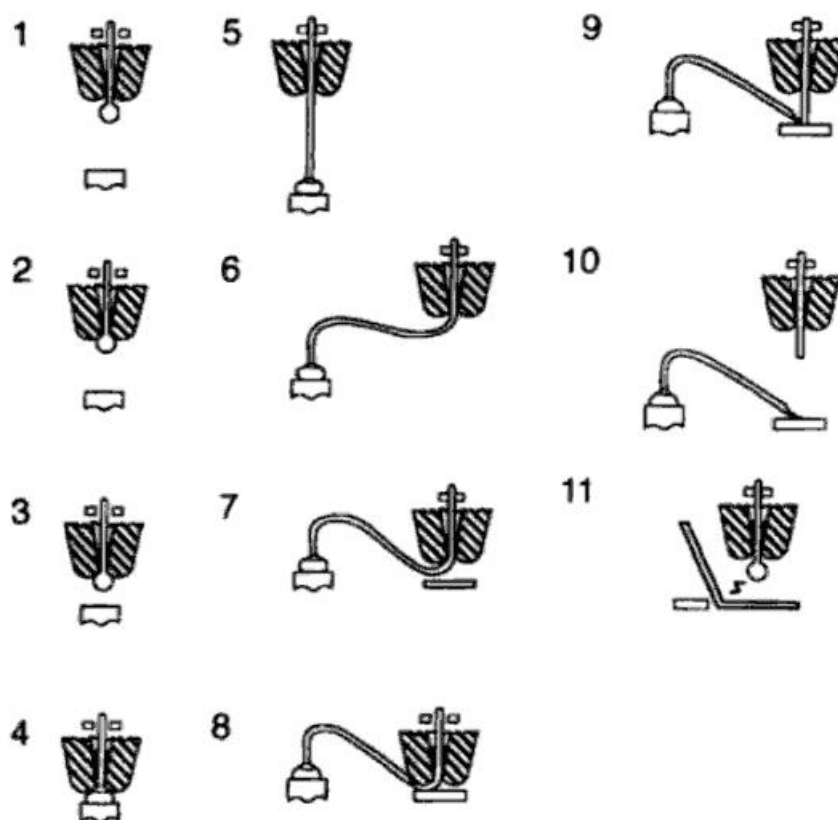
Obr. 3: Spoj vytvořený kapilárou

3.1 Spoje vytvořené kapilárou

Přibližně 90% veškerých spojů je utvořeno kapilárou. Kapiláry jsou vyrobeny z různých materiálů (např. hliník, wolfram, rubín, keramika). Jsou přibližně 11mm dlouhé a v průměru mají 1,58mm. Nasazovací otvor pro mikrodrátek se postupně zužuje na průměr asi 40-50 μm , záleží na síle mikrodrátku.

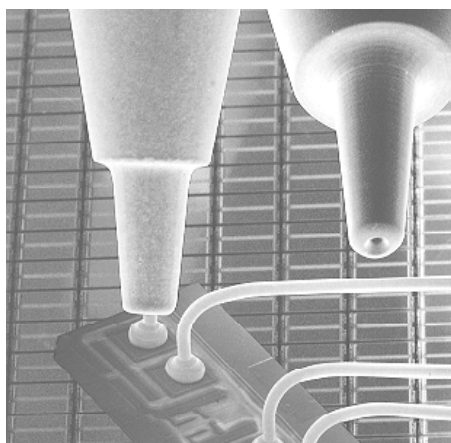
Tenký drátek prochází dutou kapilárou a elektrická jiskra (EFO) je použita pro roztavení malé části drátku přichyceného pod kapilárou.

Díky povrchovému napětí se vytvoří na kapiláře malá kulička. Ta je uchycena k přípojně plošce na podložce s dostatečnou silou, která způsobí plastickou deformaci a prolnutí atomů, které má zabezpečit pevné spojení mezi dvěma kovovými povrchy a tvořit první pouto (základní spoj). Kapilára je pak zvednuta a přemístěna na druhé spojované místo na podložce. Jakmile se připojí druhý konec drátku k podložce, je vytvořen vodivý spoj.



Obr. 4: Postup vytvoření spoje pomocí kapiláry

- 1) Kulička vytvořená pod kapilárou
- 2) Kapilára postupně sestupuje k podložce, kulička je postupně přibližována ke kapiláře a dotýka se skosených hran
- 3) Postupně se snižuje rychlost přibližování kapiláry k podložce – dochází k tomu v bodě TIP (tool inflection point)
- 4) Po aplikaci ultrazvukové energie a přitlačné síly je vytvořen první spoj
- 5) Kapilára je zvednuta směrem od podložky do dostatečné výšky pro vytvoření smyčky mezi spoji
- 6) Přesun kapiláry nad místo druhého spoje
- 7) Sestup kapiláry k podložce
- 8) Aplikace ultrazvukové energie a přitlačné síly – vytvoření druhého spoje
- 9) Kapilára je zvednuta do stanovené výšky. Ta je potřebná k utvoření další kuličky pod kapilárou
- 10) Odtržení kapiláry od druhého spoje
- 11) Z vyčnívajícího drátku pod kapilárou je pomocí elektrické jiskry (EFO) utvořena kulička. Kapilára je připravena k dalšímu svařování.

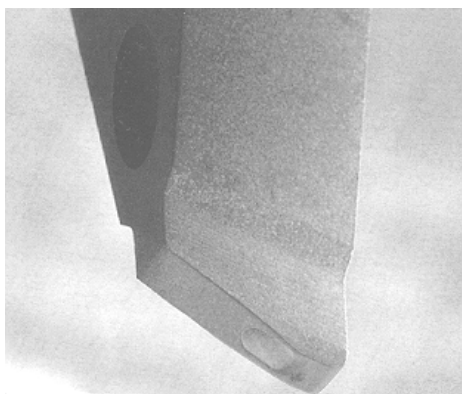


Obr. 5: Kapilára

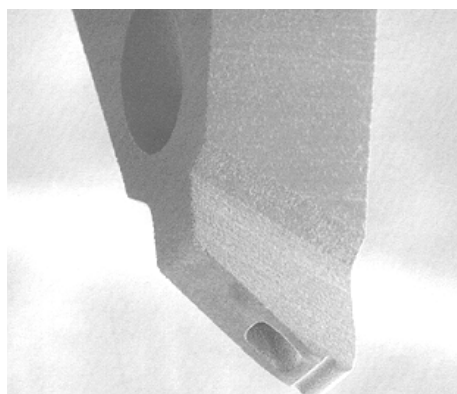
3.2 Spoje vytvořené pomocí klínu

Používá se zařízení s hrotem ve tvaru klínu. Klín je vyroben v závislosti na typu tažených mikrodrátků. Pro Al je to keramika nebo wolfram. Pro Au je to většinou titan. Drát je v klínu ohýbán pod malým úhlem – asi 30-60°. To umožňuje lepší kontrolu při umístění mikrodrátku. [4]

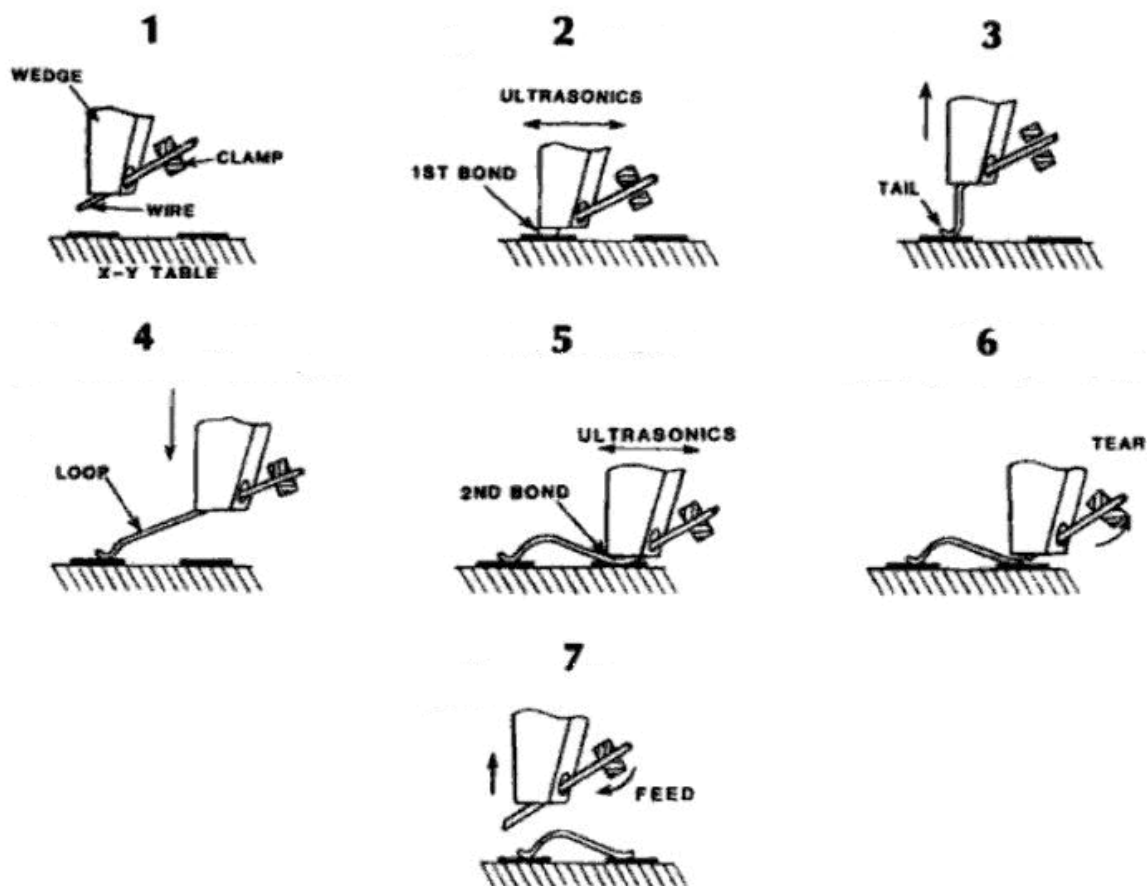
První spoj bývá utvořen na čipu a druhý na podložce z důvodu lepší spolehlivosti spoje. Po vytvoření prvního spoje se kapilára zvedne a přesune na místo spoje druhého a drát je tak ohýbán přes otvor v klínu. Poté se drát odstříhne nebo odtrhne pomocí klínu. Tada metoda může být použita i pro velice malé rozměry (cca 25μm).



Obr. 6: Klín pro svařování Al



Obr. 7: Klín pro svařování Au



Obr. 8: Aplikace klínového svařování

- 1) Klín je přesunut nad místo prvního spoje, drátek je uchycený v kleštičkách
- 2) Aplikace ultrazvukové energie, vytvoření prvního spoje, uvolnění kleštiček
- 3) Zvednutí klínu nad podložku do výšky potřebné k utvoření smyčky
- 4) Přesun nad místo druhého spoje
- 5) Aplikace ultrazvukové energie, vytvoření druhého spoje
- 6) Uzavření kleštiček
- 7) Zvednutí klínu, odtržení drátku od druhého spoje, klín je připraven k dalšímu svařování

Tab. 2: Druhy spojů

Typ spoje	Metoda kontaktování	Nástroj	Drát	Rychlost
Kapilární spoj	T/C, T/S	Kapilára	Au	10 spojů/sec (T/S)
Klínový svár	T/S, U/S	Klín	Au, Al	4 spoje/sec

4. Používané materiály

Nejpoužívanější svařovací materiály jsou dráty zlaté, hliníkové, ale také stříbrné a měděné. Svařování mědi pomocí kapiláry získalo náležitý ohlas díky svým nízkým ekonomickým nákladům a díky své velké odolnosti. Zlato bylo používáno v době, kdy byla technologie wirebonding vyvíjena. Hliník se stal populární kvůli jeho dobrým elektrickým a technickým parametrům a nižší ceně, používá se především ke svařování ultrazvukem pomocí klínu. [5]

4.1 Svařování zlatem

Nejběžnější spojování zlatých vodičů je pomocí termosonického svařování, které užívá optimální vyvážení teploty a ultrazvukové energie a tím se vytváří spolehlivé spoje. Nejprve musíme prostrčit tenký drátek skrze malou díрку ve speciální kapiláře. Ten je pak rozžhaven elektrickou jiskrou nebo v plamenu vodíku, aby se vytvořila kulička, která je větší než vnitřní průměr kapiláry. Kulička na špičce kapiláry, je pak posunuta k povrchu, který má být spojen a před tím byl přehřátý na požadovanou teplotu.

Typická teplota pro termosonické svařování je mezi 100 °C a 200 °C. Kapilára je navíc rozkmitaná pomocí ultrazvukové energie a tudíž nemusí být použito tak vysokých teplot jako při svařování pomocí termokomprese.

4.2 Svařování hliníkem

Čistý hliník je pro wirebonding příliš měkký, proto se využívá hliník s příměsí 1% křemíku nebo hořčíku. Slitina s hořčíkem má mnohem lepší vlastnosti, je pevnější i při nižších teplotách a odolnější proti stárnutí.

4.3 Svařování mědi

V současnosti velice oblíbený materiál – velmi příznivá cena. Měď je však tvrdší než hliník nebo zlato, proto může dojít k problémům při kontaktování. Měď na vzduchu také rychle oxiduje, je proto zapotřebí použít netečné atmosféry.

5. Metalurgické systémy

U metody wirebonding jsou používány různé kovové plošky, ke kterým přivařujeme mikrodrátky. Použití materiálů závisí na požadavcích výroby. Různé metalurgické systémy mohou mít rozdílnou spolehlivost utváření svaru. Typické metalurgické systémy jsou:

5.1 Au-Au

Velmi spolehlivé je spojení zlatého drátku ke zlaté vrstvě, protože na spoj nemá velký vliv povrchová koroze, intermetalické slitiny nebo jiné degradační vlivy. Dokonce u nespolehlivě vytvořených zlatých spojů se zvyšuje mez pevnosti s časem a teplotou. Zlatý drátek se sváří nejlépe za tepla, ačkoli tento spoj může být také proveden za studena a to pomocí ultrazvukového připojování. Velice spolehlivě a snadno jsou vytvořené buď termokompresní nebo termosonické spoje.

5.2 Au-Al

Au-Al systém je při připojování nejběžněji užívaný. Nicméně, tento systém může snadno vést ke tvoření Au-Al intermetalických slitin [6]. Mezi zlatou a hliníkovou vrstvou se může zpočátku během připojování tvořit AuAl_2 při pokojové teplotě. Proto tento systém často představuje problém ve spolehlivosti spojů.

5.3 Au-Cu

Spojování zlata k tenké vrstvičce mědi může způsobit tři různé typy sloučenin těchto kovů (Cu_3Au , AuCu , Au_3Cu) s celkovými aktivačními energiemi z 0.8 do 1 eV [7]. Formace těchto intermetalických sloučenin může mít na svědomí snížení pevnosti spojů při vyšších teplotách (200 °C–325 °C). Čistota povrchu je velmi důležitá vůči kvalitě spojení. Spoj se musí navíc vytvářet v netečném prostředí kvůli předejití oxidaci.

5.4 Au-Ag

Au-Ag systém je velmi spolehlivý systém při dlouhodobém působení vysokých teplot. Tento systém netvoří intermetalické slitiny a neprojevuje se u něj povrchová koroze. Problémy spolehlivosti připojování tohoto spojení mohou být způsobené znečišťujícími látkami např. síra.

5.5 Al-Al

Systém Al-Al je vysoce spolehlivý, protože tento systém není náchylný k tvorbě intermetalických slitin a korozi [8]. Hliníkový mikrodrátek na hliníkové metalizaci se nejlépe provede ultrazvukovým kontaktováním, ale i termokompresí může být spoj vytvořený při vysokém tlaku.

5.6 Al-Ag

Připojení hliníkového drátu k postříbřenému substrátu je často používané v tlusté vrstvě (obvykle ve slitině s Pt nebo Pd). Al-Ag systém je velmi složitý s mnoha intermetalickými slitinami. V praxi je systém Al-Ag užíván zřídka, protože interdifúze a oxidace ve vlhkém prostředí způsobuje jeho selhání. Chlor je zde hlavním důvodem korozního procesu.

5.7 Al-Cu

Měděný drát může být svařen jak se zlatým, tak i s hliníkovým podkladem. Nicméně dochází k podobným chybám jako u Au-Al systému.

6. Testy pevnosti kontaktování

Po vytvoření spoje může být proces vyhodnocen optickou kontrolou nebo mechanickou zkouškou - výběr závisí na požadavcích dané situace nebo na předchozích zkušenostech.

Vizuální kontrola využívá optický mikroskop, elektronový mikroskop a další vhodné analytické nástroje.

Mechanická zkouška spočívá na testu pevnosti spojů.

Metody testování spolehlivosti spojů jsou uvedeny ve vojenské normě USA - STD-833.

6.1 Vnitřní vizuální kontrola

Tato metoda je užívaná pro kontrolu vnitřních materiálů, provedení a konstrukce mikroobvodů v souladu s požadavky aplikací.

Test je optimalizovaný k vyhledání a odstranění součástí s vnitřním defektem, které mohou vést k selhání přístroje při běžném provozu.

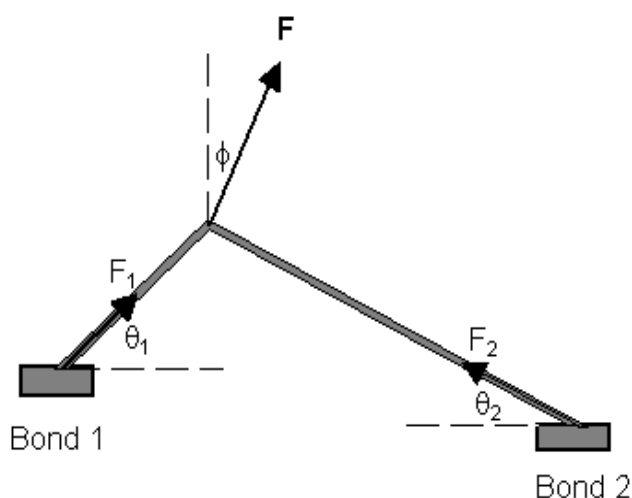
6.2 Časová měření

Tato metoda měří zpoždění šíření signálů v obvodu. Výsledkem chyb může být rušivý signál na výstupu, zkreslení signálu kvůli špatným spojům nebo přítomnosti nečistot jako např. Si (kvůli nevhodné teplotě svaření)

6.3 Destruktivní tahový test

Je to tahová zkouška pevnosti, která se provádí až do přetrhnutí drátku. Je to základní testovací metoda pevnosti spoje a slouží k potvrzení správného nastavení mikrosvářečky. Tahová mez pevnosti je silně závislá na geometrickém uspořádání testovací soustavy. Podle výsledků pak můžeme optimálním způsobem nastavit svářečku. Síla tahu v každém místě testovaného spoje je dána vztahem (1):

$$F_1 = \frac{F \cos(\theta_2 - \phi)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad F_2 = \frac{F \cos(\theta_1 + \phi)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

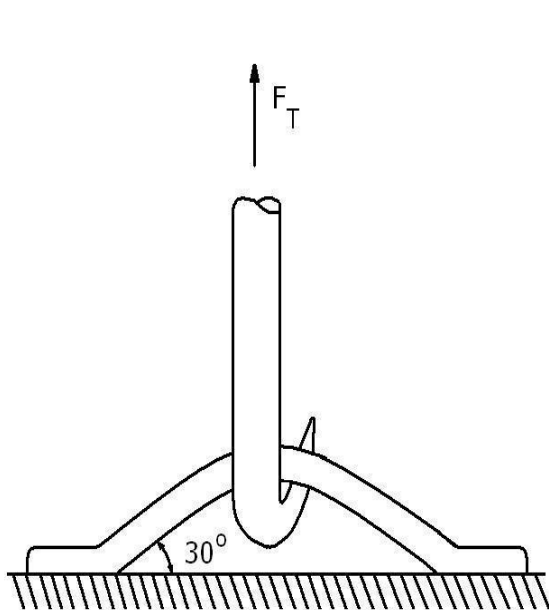


Obr. 9: Schéma tahového testu

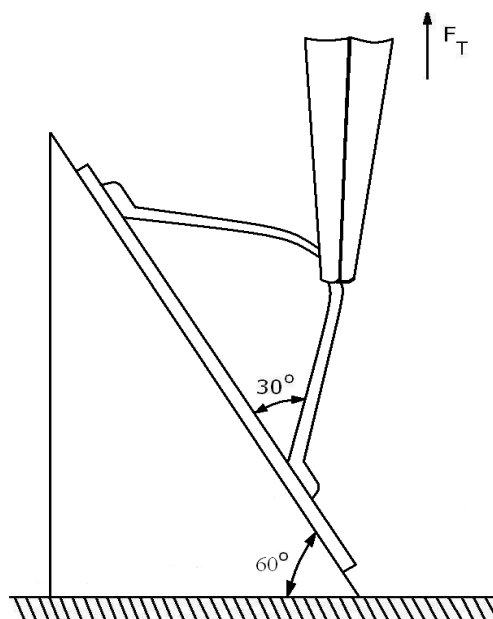
Pokud jsou obě podložky ve stejné výšce a síla tahu je soustředěna na střed drátku, platí vztah (2):

$$F_1 = F_2 = \frac{F}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

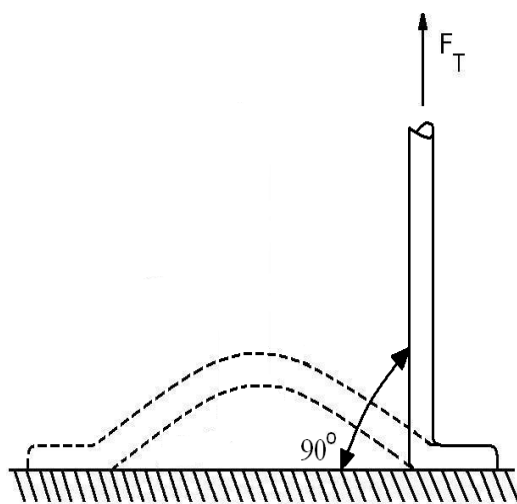
K testování pevnosti se dále používá těchto způsobů:



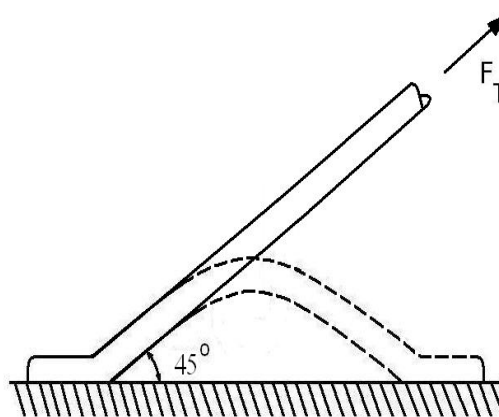
Obr. 10: 90° tahový test jediného svaru smyčky



Obr.11: 30° tahový test jediného svaru smyčky



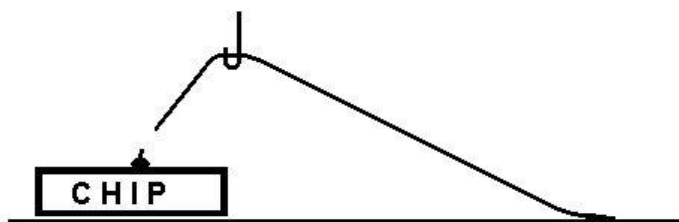
Obr.12: 90° tahový test individuálního svaru



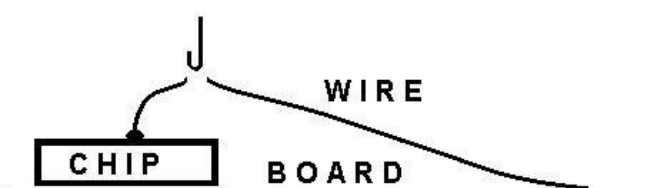
Obr.13: 45° tahový test individuálního svaru

Základní testovací uspořádání pro měření tahové pevnosti ultrazvukových svárů je patrné z obrázků **Obr. 10**, **Obr. 11**, **Obr. 12**, **Obr. 13**

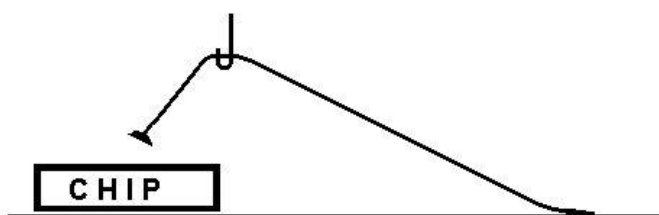
Možné typy výsledků destruktivní zkoušky jsou následující:



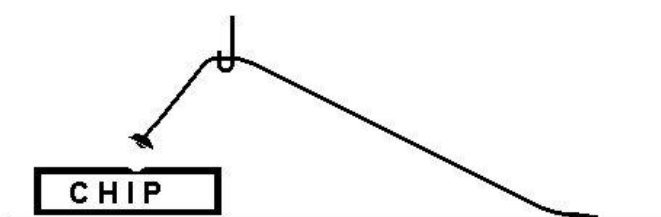
Obr. 14: Přetrhnutí drátku těsně u spoje



Obr. 15: Přetrhnutí drátku v místě testování



Obr. 16: Odrážení sváru z čipu



Obr. 17: Odrážení části čipu i se svárem

6.4 Nedestruktivní tahový

Tento test je velice podobný destruktivnímu testu s tím rozdílem, že se používá maximální tahová síla do předem určené meze. Velikost tahové síly je určena typem a průměrem materiálu. Tím většinou zjistíme vadné spoje, ale bezvadné spoje zůstanou nepoškozeny. V některých případech se však můžou testované spoje částečně narušit a poškodit a tím ztratí svou původní pevnost. Nedestruktivní zkoušky pevnosti proto také zanechávají nepříznivý vliv na testovaných spojích.

Pro výběr nedestruktivních zkoušek existuje řada kritérií, nejdůležitější z nich jsou například [9]:

- zkouška nesmí zhoršit pevnost svarů a vodiče
- mechanické síly mají přibližně stejně namáhat svary vodičů různých délek použitých v obvodu
- zkouška má vyřadit nejen spoje s pevností blížící se nule, ale též spoje s pevností pod určitou stanovenou hranicí
- zkouška má být definovaně aplikovatelná pro různé materiály vodičů a jejich rozměry i pro druhy vodivých vrstev
- zkoušku má být možno zařadit do výrobní linky
- zkouškou nesmí docházet k poškození nebo znečištění pasivní sítě hybridního integrovaného obvodu a vsazovacích součástek

6.5 Rovnoměrné zrychlení

Tento test má za úkol najít defekty špatně spojených materiálů při vystavení vysokému zrychlení v řádech 10000G. Někdy ale může být vhodnější použití testu pomocí otřesu, který je snadnější.

6.6 Náhodné otřesy

Testovaný díl je upevněn na vibračním válu a je vystavený náhodným frekvencím a hustotám vibrací. Tímto testem se zjišťuje možnost použití zařízení se spoji v běžné praxi.

6.7 Mechanický šok

Tento test má za úkol zjistit vady způsobené středně silnými otřesy - např. při transportu. Vady se projevují především při opakovaných otřesech.

6.8 Odolnost proti vlhku

Tímto testem se zjišťuje odolnost proti korozi ve velmi vlhkém prostředí.

7. Experimentální část

7.1 Úvod

Cílem této práce je osvojit si metodiku zjišťování vlivu okolního prostředí na pevnost spojů, vytvořených pomocí ultrazvukového svařování. Rozsah práce nám nedovoluje získat přesné výsledky. Aby byly výsledky statisticky ověřené, bylo by zapotřebí vytvořit a otestovat tisíce spojů. Samotná příprava vzorků je ale velmi časově náročná. Pro každý z testů se proto zjišťuje vliv prostředí pouze na sedmdesáti spojkách. Cílem práce tedy není přesnost naměřených hodnot, ale odzkoušení různých vlivů prostředí, do kterých jsme vzorky umístili. V praxi jsme si tedy odzkoušeli působení vlhka, tepla, cyklování teplot a proudovou nosnost spojů. Výsledky jsou porovnány se vzorkem, který byl čerstvě nakontaktován a nemohl se tak u něho projevit žádný vliv prostředí na pevnost spojů.

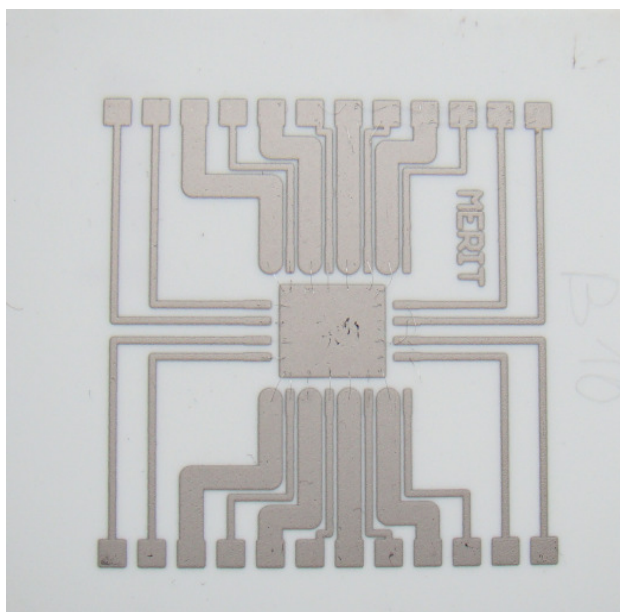
7.2 Použité materiály a postup přípravy vzorků:

Vzorky jsme připravili na keramickém substrátu – Al_2O_3 . Pro vytvoření vodivého motivu byla použita vodivá pasta Electro-Science Laboratories 9695.

Parametry pasty 9695 dle výrobce:

Složení	Ag-Pd
Teplota výpalu	625 °C-930 °C (optimální 850 °C)
Pevnost UZ sváru (25µm Al drát)	6-8g
Rozlišovací schopnost	250µm x 250µm
Ohřev/chlazení	60 °C-100 °C/min
Doba skladování	6 měsíců

Nanesení a výpal pasty bylo provedeno dle doporučených údajů výrobce. Po nanesení motivu jsme nechali pastu na substrátu 10min ustát při teplotě 25 °C. Po 15min vysoušení při 120 °C se pasta přetaví při 850 °C (10-12min) a nastává chlazení. Celý proces výpalu trvá necelých 60min.



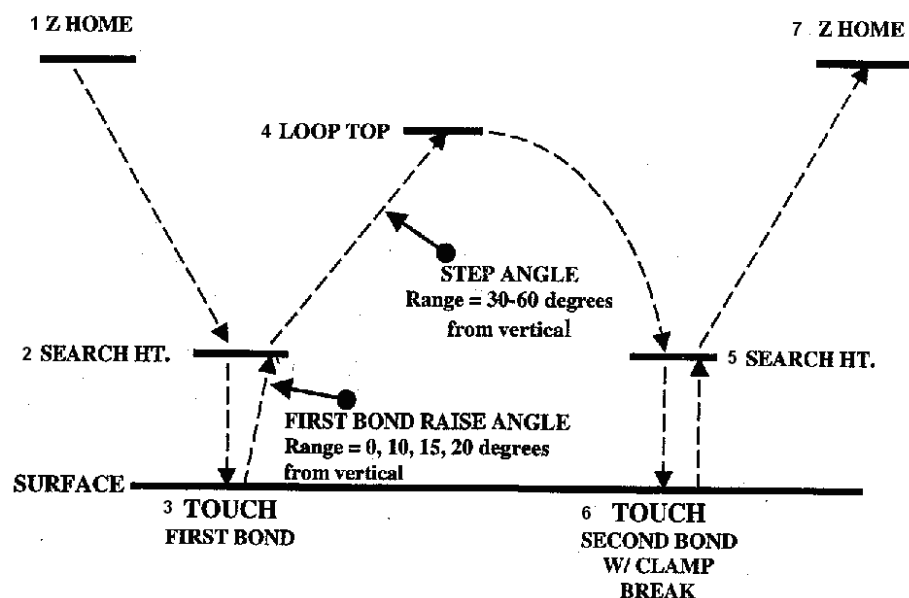
Obr. 18: Vodivý motiv pro přípravu vzorků



Obr. 19: Ultrazvukové svářecí zařízení ESEC 8-166-02

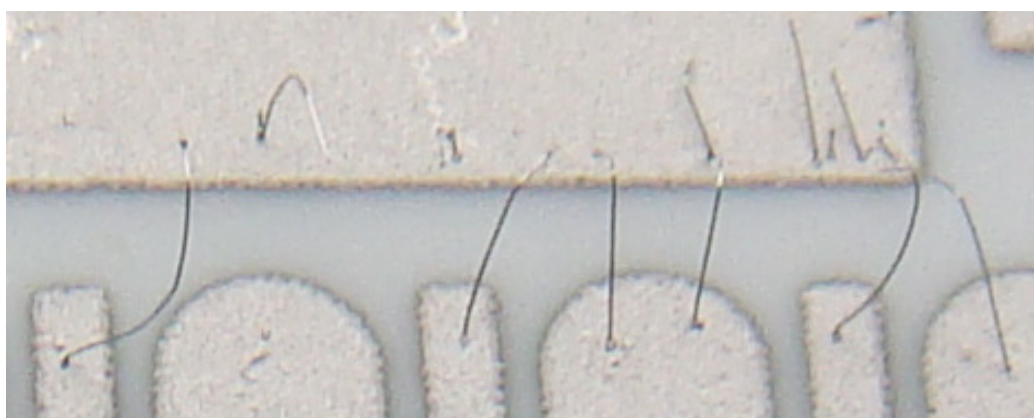
K naší práci používáme ultrazvukové svářecí zařízení ESEC 8-166-02 (**Obr. 19**). Na vodivém motivu (**Obr. 18**) každého vzorku je vytvořeno 70 spojů. Svářecí zařízení je ovládáno nožním spínačem a mechanickým posuvníkem, pomocí kterého posouváme svařovaný materiál v horizontální poloze. Postup vytvoření spoje je naznačen na obr 9. Pro veškeré testy použité v této práci bylo vytvořeno celkem šest vzorků, to znamená 360 spojů. Kontaktování svárů bylo provedeno ultrazvukovým svářecím zařízením. Byl použit hliníkový drátek o průměru 25 μ m s 1% příměsí křemíku. Ten je do drátku přidán z důvodu lepšího tažení a tím

můžeme vyrobit drátek s malým průměrem. Další výhoda je u použití při kontaktování křemíkových čipů – nedochází ke kontaminaci dalším prvkem.



Obr. 20: Postup vytvoření svaru na ultrazvukovém svářecím zařízení

V práci je použito destruktivních zkoušek pevnosti ve společnosti TYCO Electronics Kuřim. Testuje se až do přetržení spoje (**Obr. 21**), počítač následně zaznamená sílu, při které dojde k přetržení spoje. Pro zvýšení přesnosti naměřených výsledků vynecháváme v našich výpočtech hodnoty, které vykazují nižší pevnost než 3,5cN. Počet nevyhovujících spojů je u každé zkoušky zapsán v tabulce. Pro každý z testů je vyhodnocena průměrná pevnost spojů, směrodatná odchylka, rozptyl, minimální pevnost spoje, maximální pevnost spoje a každý z testů je zobrazen do grafu.



Obr. 21: Přetrhané spoje podrobené testu pevnosti

7.3 Způsob zpracování výsledků:

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Při vyhodnocení jsme použili tyto veličiny:

N, n	počet testovaných svarů
$\bar{X}$	aritmetický průměr = střední hodnota (3)
$X_{\min}$	nejnižší zjištěná pevnost svaru [cN]
$X_{\max}$	nejvyšší zjištěná pevnost svaru [cN]
δ	směrodatná odchylka (4)
δ^2	rozptyl (5)

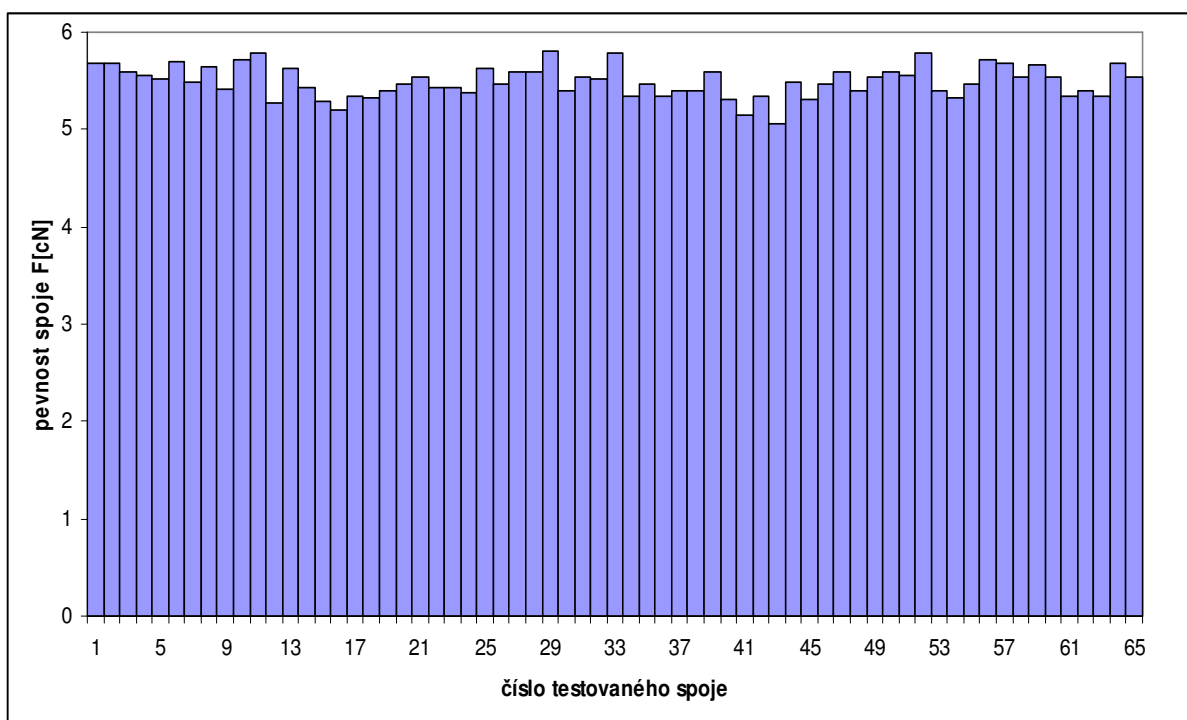
$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \bar{x}^2} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \bar{x}^2 \quad (5)$$

7.4 Referenční vzorek

Pro srovnání výsledků jsme zjištěné hodnoty porovnávali s hodnotami naměřenými na vzorku, který byl čerstvě nakontaktovaný a nemohl se u něj tedy projevit žádný z vlivů okolního prostředí. Tento vzorek by měl mít i podle teoretických poznatků nejvyšší pevnost, což se také potvrdilo. Pro zpřesnění výsledků jsme vyřadili z tohoto vzorku celkem pět nevyhovujících spojů, u kterých bylo evidentní jejich špatné nakontaktování a pouze by celkový výsledek zkreslily. Průměrná pevnost u referenčního vzorku je 5,49cN.



Obr. 22: Pevnost jednotlivých spojů referenčního vzorku

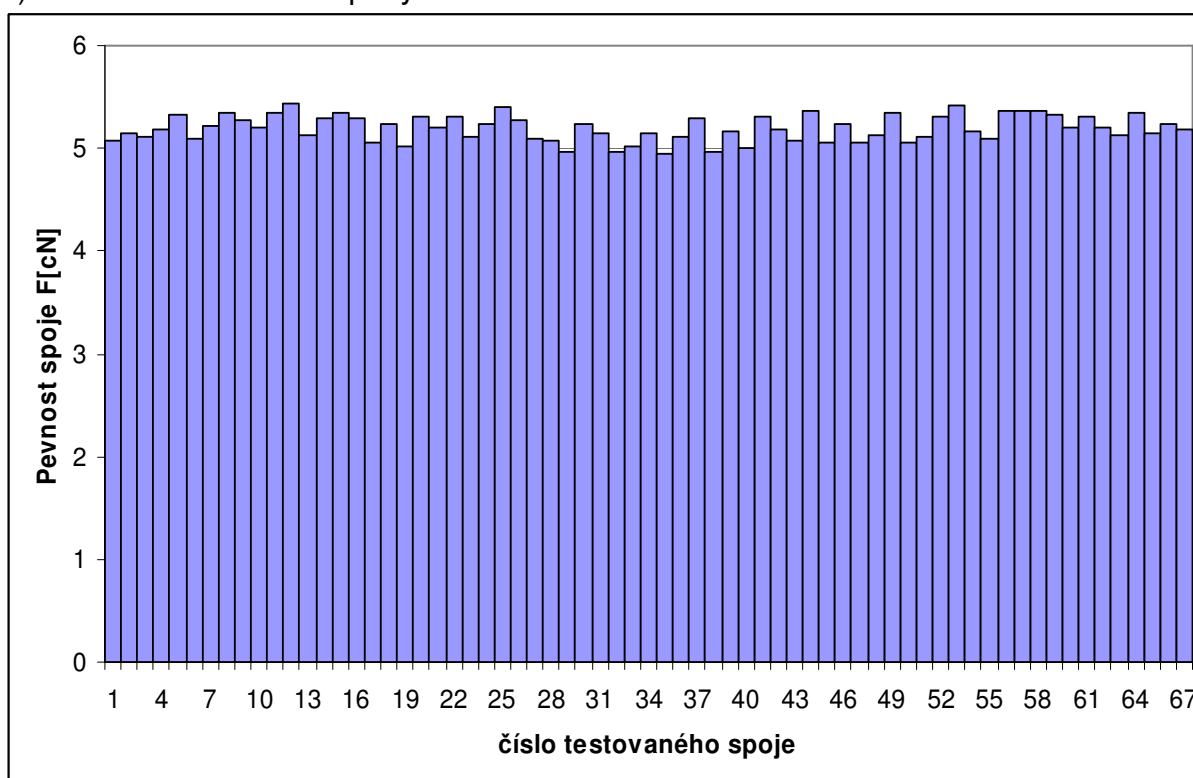
Tab. 3: Výsledky testu pevnosti referenčního vzorku

$X_{\min}[\text{cN}]$	$X_{\max}[\text{cN}]$	$\bar{X} [\text{cN}]$	δ	δ^2	Nevyhovující spoje
5,06	5,8	5,49	0,1594	0,0254	5

7.5 Vliv působení teploty

Pro odzkoušení vlivu teploty na pevnost spojů jsme použili dvě metody - vliv působení teploty 50 °C a vliv působení teploty 80 °C. Vzorky byly umístěny v peci se stabilní teplotou v laboratoři na U-15 po předem stanovenou dobu 100 hodin. Z výsledku je zřejmé, že zvýšení teploty na 50 °C nemá prakticky vliv na výslednou pevnost spojů. Rozdíl v průměrných hodnotách je minimální (0,29cN oproti výchozí pevnosti) a s přihlédnutím k možné chybě výsledků, způsobené malým počtem testovaných vzorků zanedbatelný. Teplota 80 °C již má na výslednou pevnost mnohem větší vliv. Pokles v pevnosti je 1,11cN oproti výchozí pevnosti, což je více než 20% .

1) Umístění vzorků do teploty 50 °C na 100hodin

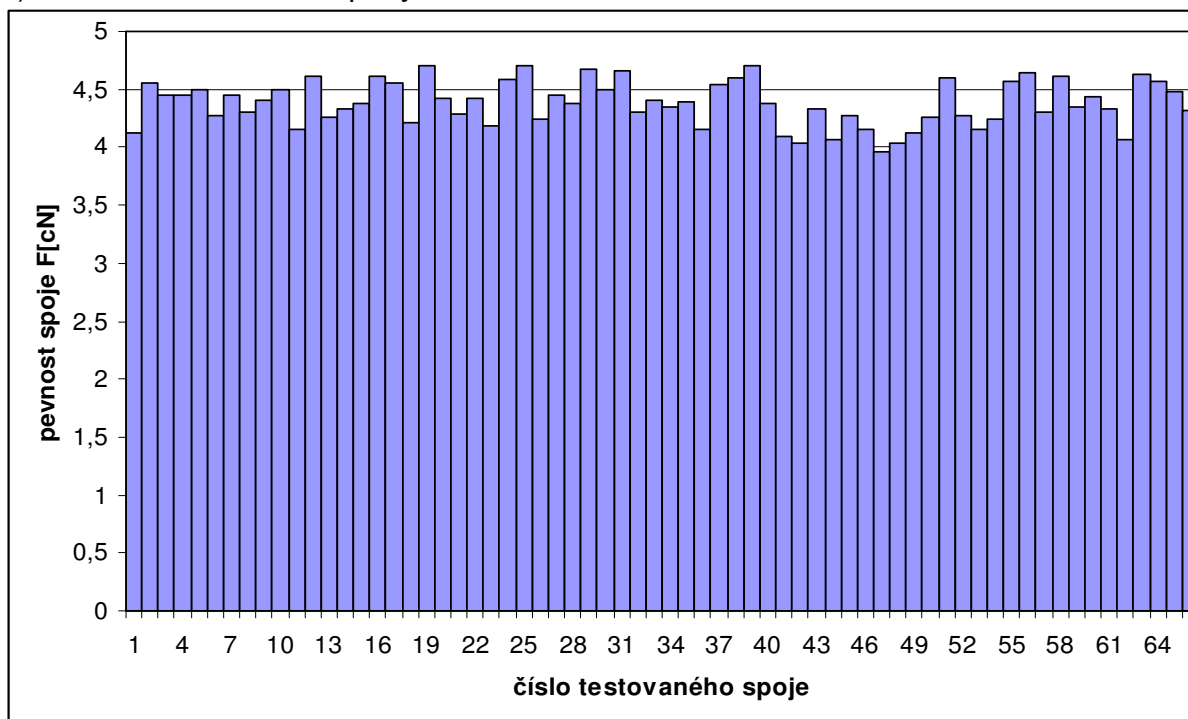


Obr. 23: Pevnost jednotlivých spojů, test 50 °C, 100hodin

Tab. 4: Výsledky testu pevnosti – vliv teploty 50 °C, 100hodin

$X_{\min}$ [cN]	$X_{\max}$ [cN]	$\bar{X}$ [cN]	δ	δ^2	Nevyhovující spoje
4,95	5,43	5,2	0,1241	0,0154	3

2) Umístění vzorků do teploty 80 °C na 100hodin



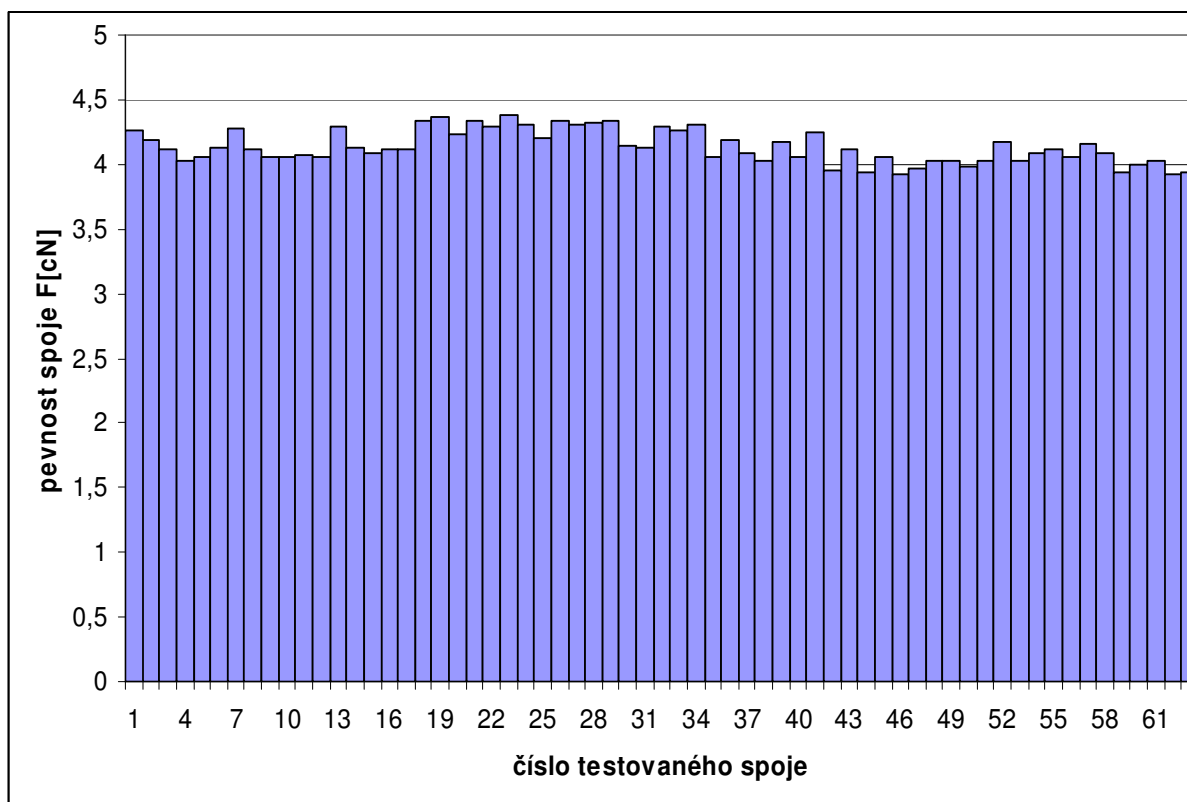
Obr. 24: Pevnost jednotlivých spojů, test 80 °C, 100hodin

Tab. 5: Výsledky testu pevnosti – vliv teploty 80 °C, 100hodin

$X_{\min}$ [cN]	$X_{\max}$ [cN]	$\bar{X}$ [cN]	δ	δ^2	Nevyhovující spoje
3,96	4,71	4,38	0,1907	0,0364	4

7.6 Vliv působení vlhkosti

Vzorek jsme umístili do uzavřené nádoby do 100% vlhkosti na dobu 500 hodin. Výsledná průměrná pevnost spojů po podrobení tohoto testu je ještě nižší než pevnost spojů, které byly umístěny do teploty 80 °C po dobu 100hodin. Průměrná pevnost je při působení vlhkosti také nejnižší ze všech vykonaných testů.



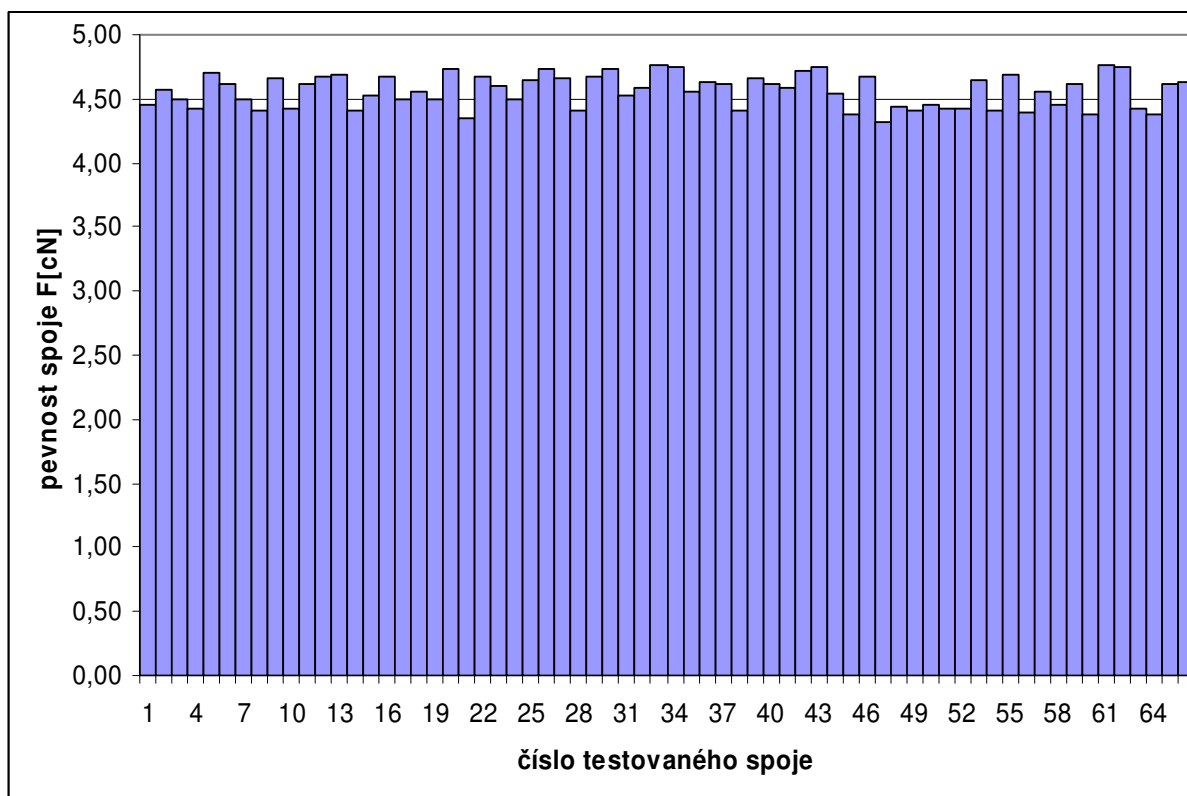
Obr. 25: Pevnost jednotlivých spojů - vliv působení vlhkosti

Tab. 6: Výsledky testu pevnosti – vliv vlhkosti

$X_{\min}$ [cN]	$X_{\max}$ [cN]	$\bar{X}$ [cN]	δ	δ^2	Nevyhovující spoje
3,92	4,38	4,13	0,1275	0,0163	7

7.7 Vliv cyklování teplot

Vzorek umístěný do cyklovací komory. Cyklováno od teploty 0 °C do teploty 100 °C. Prodleva jednoho cyklu byla 15 minut (dle normy IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments) . Celkový počet cyklů, kterým byl vzorek podroben je 1313 cyklů.



Obr. 26: Pevnost jednotlivých spojů - vliv cyklování teplot

Tab. 7: Výsledky testu pevnosti – vliv cyklování teplot

$X_{\min}$ [cN]	$X_{\max}$ [cN]	$\bar{X}$ [cN]	δ	δ^2	Nevyhovující spoje
4,32	4,77	4,56	0,1247	0,0156	4

7.8 Proudové zkoušky

Proudová zatížitelnost hliníkových drátů používaných ke svařování se nikde neudává, proto jsme podrobili spoje proudovým zkouškám. Testy jsme provedli na zdroji proudu v laboratoři U-15. Velikost proudu byla nastavována v rozmezí od 0,1A až do zničení spoje po kroku 50mA. Těmito zkouškami lze velice jednoduše vyřadit spoje, které byly špatně nakontaktované. Spoje s minimální pevností jsou zničeny již při protékání minimálního nastavovaného proudu 0,1A. Testům jsme podrobili dráty o průměru 25 μ m a 50 μ m. Zjistili jsme, že hliníkový drát o průměru 25 μ m vydrží proudové zatížení do 0,7A, drát o průměru 50 μ m pak vydrží přesně dvojnásobné proudové zatížení, tedy 1,4A.

Na **Obr. 27** je zobrazen přetavený 25 μ m hliníkový drátek. Jak je z obrázku patrné, přetavení nastane mezi jednotlivými spoji. Samotný svar se nezničí, je chlazen vodivým motivem, ke kterému je přivařen. Nejvyšší teplota je právě v prostřední části spoje, kde dochází k jeho přetavení.



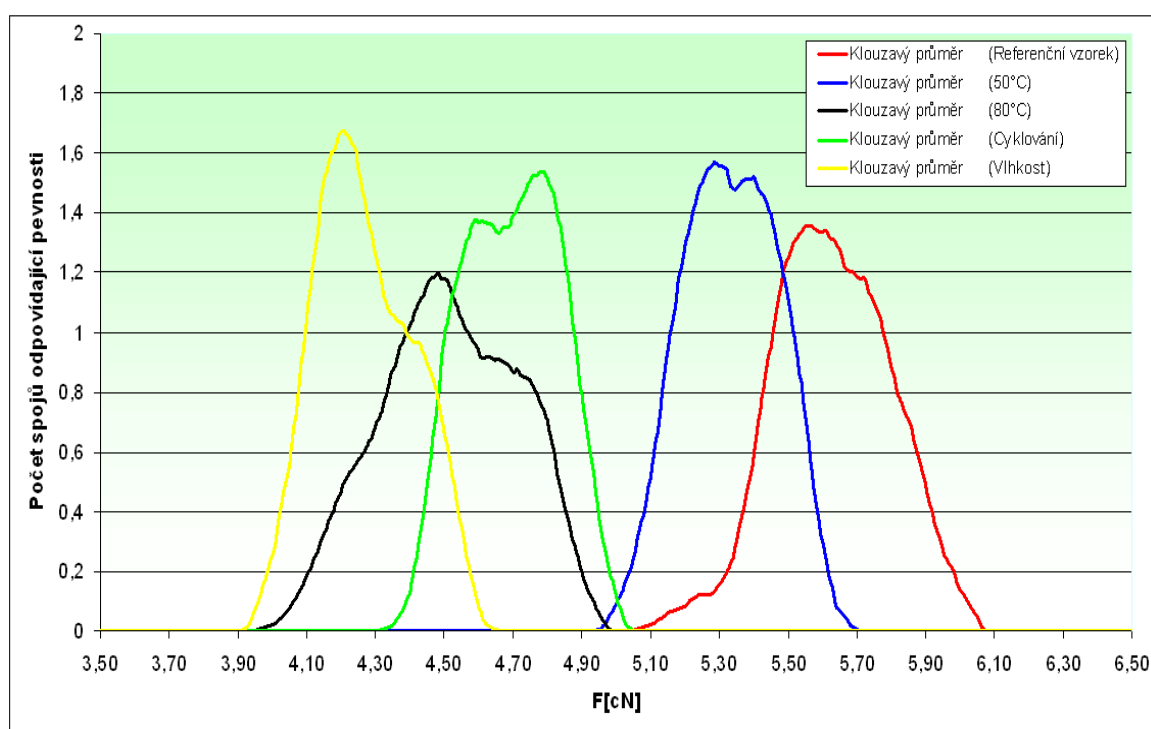
Obr. 27: Přetavené spoje po proudových testech

8. Závěr

V této práci jsme zjistili vliv různých prostředí na výslednou pevnost spojů vytvořených za pomoci ultrazvukového svářečního zařízení. Výsledky jsou vyhodnocovány z relativně malého počtu spojů, ale jejich maximální přesnost nebyla cílem této práce. Tím bylo osvojení si metody wirebonding, příprava vzorků pro testování a jejich následné umístění do různých prostředí. Nejtěžší částí bylo praktické zacházení se svářečním zařízením. Zvládnutí jeho ovládání a vytvoření prvního spoje trvalo několik týdnů. Tím ale naše snaha neskončila. Samotná příprava vzorků pro testování byla velice časově náročná. Příprava jednoho vzorku o sedmdesáti spoích zabrala z počátku přibližně pět hodin práce pod mikroskopem, postupně se ale časový interval zkracoval a nakonec jsme dokázali nakontaktovat jeden vzorek za necelé dvě hodiny. Jako poslední jsme nakontaktovali referenční vzorek. Tím bylo zabráněno ovlivnění výsledku různými vlivy prostředí. Ostatní vzorky byly podrobeny předem definovaným vlivům prostředí – teplotám 50 °C a 80 °C po dobu 100 hodin, vlhkosti a cyklování teplot. Dle zadání jsme měli zjistit vliv teplot v rozmezích 120 °C až 200 °C. Po konzultaci s vedoucí práce jsme tyto teploty snížili na 50 °C a 80 °C. Postupovali jsme podle normy IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments. Norma definuje průběh teplotního cyklování pro zkoušky spolehlivosti. Dále jsme také sledovali možné proudové zatížení vytvořených spojů. I když mohou být zjištěné výsledky nepřesné z důvodu vyhodnocování na relativně malém počtu vzorků, potvrzují teoretické předpoklady. Nejvyšší pevnost byla zjištěna u referenčního vzorku. Teplota 50 °C nemá téměř vliv na výslednou pevnost spojů, u 80 °C je rozdíl v pevnostech již znatelný. Největší vliv na pevnost spojů jsme zjistili u podrobení vzorků 100% vlhkosti. Na **Obr. 28** jsou vyobrazeny veškeré výsledky v grafu. Ten je vytvořený klouzavým průměrem z naměřených hodnot. Každý bod z grafu je počítán

jako průměr z 25 předchozích naměřených hodnot. Tohoto způsobu jsme využili z důvodu malého počtu testovaných spojů. Vrcholy křivek přibližně odpovídají průměrným hodnotám různých vlivu prostředí. Lze z nich také vyčíst rozptyl naměřených hodnot. Ten je největší u křivky reprezentující vliv 80 °C po dobu 100 hodin na výslednou pevnost spojů. U ostatních křivek není rozptyl naměřených hodnot tak patrný, ty se tedy většinou přibližují průměru.

Největší vliv na pevnost spojů má tedy vlhkost prostředí, teploty nad 50 °C a prudké změny teplot okolního prostředí. Vliv teplot lze eliminovat již při návrhu zařízení, kdy zajistíme dostatečné chlazení míst se spoji nebo jejich umístění do míst vzdálených od součástí vyzařujících teplo.



Obr. 28: Graf naměřených hodnot

9. Seznam použité literatury

- [1] Winchell V.H., Berg H.M., *Enhancing Ultrasonic Bond Development*, 1978
- [2] B. Lang, and S. Pinamaneni, *Thermosonic Gold Wire Bonding to Precious Metal-Free Copper Leadframe*, 1988
- [3] NASA Goddard Space Flight Center, Basic information about Wirebonding. Dostupné z WWW:
<http://nepp.nasa.gov/wirebond/Basic%20Info.htm#What%20is%20Wire%20Bonding?>
- [4] Rao R. Tummala, Eugene J. Rymaszewski, Alan G. Klopfenstein, *Microelectronics Packaging Handbook*, 1997
- [5] Zonghe Lai and Johan Liu, Wire Bonding. Dostupné z WWW:
<http://extra.ivf.se/ngl/A-WireBonding/ChapterA.htm>
- [6] E. Philosky, *Intermetallic Formation in Gold-Aluminum Systems*, Solid State Electronics, 13, 1970
- [7] V. A. Pitt, and C. R. S. Needes, *Thermosonic Gold Wire Bonding to Copper Conductors*, 1982
- [8] G.G. Harman, *Reliability and Yield Problems of Wire Bonding in Microelectronics*, 1991
- [9] S. M. Polcari, and J. J. Bowe, *Evaluation of Non-Destructive Tensile Testing*, 1971

Seznam příloh

NAMĚŘENÉ HODNOTY	37
<i>Referenční vzorek.....</i>	<i>37</i>
<i>Teplota 50°C, 100hodin.....</i>	<i>37</i>
<i>Teplota 80°C, 100hodin.....</i>	<i>38</i>
<i>Vliv cyklování teplot.....</i>	<i>39</i>
<i>Vliv vlhkosti.....</i>	<i>40</i>

Naměřené hodnoty

Referenční vzorek

Nr	Val [cN]	Resultcode
1	5,68	Heel break 1 bond
2	5,68	Heel break 1 bond
3	5,6	Heel break 1 bond
4	5,56	Heel break 1 bond
5	5,52	Heel break 1 bond
6	5,69	Heel break 1 bond
7	5,49	Heel break 1 bond
8	5,65	Heel break 1 bond
9	5,42	Heel break 1 bond
10	5,71	Heel break 1 bond
11	5,79	Heel break 1 bond
12	5,28	Heel break 1 bond
13	5,63	Heel break 1 bond
14	5,43	Heel break 1 bond
15	5,29	Heel break 1 bond
16	5,21	Heel break 1 bond
17	5,35	Heel break 1 bond
18	5,32	Heel break 1 bond
19	5,4	Heel break 1 bond
20	5,46	Heel break 1 bond
21	5,54	Heel break 1 bond
22	5,43	Heel break 1 bond
23	5,43	Heel break 2 bond
24	5,37	Heel break 1 bond
25	5,63	Heel break 2 bond
26	5,47	Heel break 1 bond
27	5,59	Heel break 1 bond
28	5,59	Heel break 1 bond
29	5,8	Heel break 1 bond
30	5,4	Heel break 1 bond
31	5,54	Heel break 1 bond
32	5,52	Heel break 1 bond
33	5,79	Heel break 1 bond
34	5,35	Heel break 1 bond
35	5,46	Heel break 1 bond
36	5,34	Heel break 1 bond
37	5,4	Heel break 1 bond
38	5,4	Heel break 1 bond
39	5,59	Heel break 1 bond
40	5,3	Heel break 1 bond
41	5,14	Heel break 2 bond
42	5,35	Heel break 2 bond
43	5,06	Heel break 1 bond

44	5,48	Heel break 1 bond
45	5,3	Heel break 1 bond
46	5,46	Heel break 1 bond
47	5,6	Heel break 1 bond
48	5,4	Heel break 1 bond
49	5,54	Heel break 1 bond
50	5,59	Heel break 1 bond
51	5,55	Heel break 1 bond
52	5,79	Heel break 1 bond
53	5,39	Heel break 1 bond
54	5,32	Heel break 1 bond
55	5,46	Heel break 1 bond
56	5,72	Heel break 1 bond
57	5,68	Heel break 1 bond
58	5,54	Heel break 1 bond
59	5,66	Heel break 2 bond
60	5,53	Heel break 1 bond
61	5,34	Heel break 1 bond
62	5,39	Heel break 1 bond
63	5,35	Heel break 1 bond
64	5,68	Heel break 1 bond
65	5,49	Heel break 1 bond

Teplota 50 °C, 100hodin

Nr	Val [cN]	Resultcode
1	5,08	Heel break 2 bond
2	5,14	Heel break 1 bond
3	5,11	Heel break 2 bond
4	5,19	Heel break 2 bond
5	5,33	Heel break 1 bond
6	5,09	Heel break 2 bond
7	5,22	Heel break 2 bond
8	5,35	Heel break 2 bond
9	5,28	Heel break 2 bond
10	5,2	Heel break 2 bond
11	5,35	Heel break 2 bond
12	5,43	Heel break 2 bond
13	5,13	Heel break 2 bond
14	5,29	Heel break 2 bond
15	5,35	Heel break 2 bond
16	5,29	Heel break 2 bond
17	5,06	Heel break 2 bond
18	5,23	Heel break 1 bond

19	5,03	Heel break 1 bond
20	5,31	Heel break 1 bond
21	5,21	Heel break 1 bond
22	5,31	Heel break 2 bond
23	5,11	Heel break 1 bond
24	5,23	Heel break 1 bond
25	5,4	Heel break 2 bond
26	5,27	Heel break 2 bond
27	5,1	Heel break 2 bond
28	5,07	Heel break 2 bond
29	4,97	Heel break 1 bond
30	5,23	Heel break 2 bond
31	5,14	Heel break 2 bond
32	4,97	Heel break 2 bond
33	5,03	Heel break 2 bond
34	5,14	Heel break 1 bond
35	4,95	Heel break 2 bond
36	5,11	Heel break 1 bond
37	5,3	Heel break 1 bond
38	4,97	Heel break 1 bond
39	5,17	Heel break 1 bond
40	5,01	Heel break 1 bond
41	5,31	Heel break 2 bond
42	5,19	Heel break 2 bond
43	5,07	Heel break 1 bond
44	5,36	Heel break 1 bond
45	5,05	Heel break 1 bond
46	5,24	Heel break 1 bond
47	5,06	Heel break 1 bond
48	5,13	Heel break 1 bond
49	5,34	Heel break 2 bond
50	5,06	Heel break 1 bond
51	5,11	Heel break 1 bond
52	5,31	Heel break 1 bond
53	5,42	Heel break 1 bond
54	5,17	Heel break 1 bond
55	5,1	Heel break 1 bond
56	5,37	Heel break 1 bond
57	5,36	Heel break 2 bond
58	5,36	Heel break 1 bond
59	5,33	Heel break 1 bond
60	5,21	Heel break 1 bond
61	5,31	Heel break 1 bond
62	5,21	Heel break 1 bond
63	5,13	Heel break 1 bond
64	5,34	Heel break 1 bond
65	5,14	Heel break 1 bond
66	5,23	Heel break 2 bond

67	5,18	Heel break 1 bond
----	------	-------------------

Teplota 80°C, 100hodin

Nr	Val [cN]	Resultcode
1	4,13	Heel break 1 bond
2	4,56	Heel break 1 bond
3	4,45	Heel break 2 bond
4	4,45	Heel break 1 bond
5	4,5	Heel break 1 bond
6	4,27	Heel break 1 bond
7	4,45	Heel break 1 bond
8	4,3	Heel break 1 bond
9	4,4	Heel break 1 bond
10	4,5	Heel break 1 bond
11	4,16	Heel break 1 bond
12	4,62	Heel break 1 bond
13	4,26	Heel break 1 bond
14	4,33	Heel break 1 bond
15	4,37	Heel break 2 bond
16	4,62	Heel break 1 bond
17	4,55	Heel break 1 bond
18	4,22	Heel break 1 bond
19	4,71	Heel break 1 bond
20	4,42	Heel break 1 bond
21	4,29	Heel break 1 bond
22	4,42	Heel break 1 bond
23	4,19	Heel break 1 bond
24	4,58	Heel break 2 bond
25	4,71	Heel break 1 bond
26	4,25	Heel break 1 bond
27	4,45	Lift off 2 bond
28	4,37	Heel break 1 bond
29	4,68	Heel break 1 bond
30	4,5	Heel break 2 bond
31	4,66	Heel break 2 bond
32	4,3	Heel break 2 bond
33	4,4	Heel break 2 bond
34	4,35	Heel break 2 bond
35	4,39	Heel break 2 bond
36	4,16	Heel break 2 bond
37	4,54	Heel break 2 bond
38	4,6	Heel break 2 bond
39	4,7	Heel break 1 bond
40	4,37	Heel break 1 bond
41	4,09	Heel break 2 bond
42	4,03	Heel break 1 bond
43	4,33	Heel break 1 bond

44	4,06	Heel break 1 bond
45	4,27	Heel break 1 bond
46	4,15	Heel break 1 bond
47	3,96	Heel break 2 bond
48	4,04	Heel break 2 bond
49	4,12	Heel break 2 bond
50	4,26	Heel break 2 bond
51	4,6	Heel break 2 bond
52	4,27	Heel break 1 bond
53	4,16	Heel break 2 bond
54	4,25	Heel break 1 bond
55	4,57	Heel break 1 bond
56	4,64	Heel break 1 bond
57	4,3	Heel break 2 bond
58	4,62	Heel break 1 bond
59	4,35	Heel break 1 bond
60	4,43	Heel break 1 bond
61	4,33	Heel break 1 bond
62	4,06	Heel break 1 bond
63	4,63	Heel break 1 bond
64	4,57	Heel break 1 bond
65	4,48	Heel break 1 bond
66	4,32	Heel break 1 bond

Vliv cyklování teplot

Nr	Val [cN]	Resultcode
1	4,46	Heel break 2 bond
2	4,57	Heel break 1 bond
3	4,49	Heel break 1 bond
4	4,43	Heel break 1 bond
5	4,7	Heel break 1 bond
6	4,61	Heel break 1 bond
7	4,49	Heel break 1 bond
8	4,41	Heel break 1 bond
9	4,66	Heel break 1 bond
10	4,43	Heel break 1 bond
11	4,61	Lift off 2 bond
12	4,67	Heel break 1 bond
13	4,69	Heel break 1 bond
14	4,41	Heel break 2 bond
15	4,53	Heel break 2 bond
16	4,68	Heel break 2 bond
17	4,49	Heel break 2 bond
18	4,55	Heel break 2 bond
19	4,5	Heel break 2 bond
20	4,74	Heel break 2 bond

21	4,35	Heel break 2 bond
22	4,67	Heel break 1 bond
23	4,6	Heel break 1 bond
24	4,49	Heel break 2 bond
25	4,65	Heel break 1 bond
26	4,73	Heel break 1 bond
27	4,66	Lift off 2 bond
28	4,41	Heel break 1 bond
29	4,67	Heel break 1 bond
30	4,74	Heel break 2 bond
31	4,52	Heel break 2 bond
32	4,58	Heel break 1 bond
33	4,77	Heel break 1 bond
34	4,75	Heel break 1 bond
35	4,56	Heel break 1 bond
36	4,63	Heel break 1 bond
37	4,61	Heel break 2 bond
38	4,41	Heel break 2 bond
39	4,66	Heel break 2 bond
40	4,62	Heel break 1 bond
41	4,59	Heel break 1 bond
42	4,72	Heel break 1 bond
43	4,75	Heel break 1 bond
44	4,54	Heel break 1 bond
45	4,38	Heel break 2 bond
46	4,67	Heel break 1 bond
47	4,32	Heel break 1 bond
48	4,44	Heel break 1 bond
49	4,41	Heel break 1 bond
50	4,46	Heel break 1 bond
51	4,43	Heel break 1 bond
52	4,42	Heel break 1 bond
53	4,64	Heel break 2 bond
54	4,41	Heel break 2 bond
55	4,69	Heel break 1 bond
56	4,4	Heel break 1 bond
57	4,55	Heel break 1 bond
58	4,45	Heel break 2 bond
59	4,62	Heel break 1 bond
60	4,38	Heel break 1 bond
61	4,77	Heel break 1 bond
62	4,75	Heel break 1 bond
63	4,43	Heel break 1 bond
64	4,38	Heel break 1 bond
65	4,62	Heel break 1 bond
66	4,63	Heel break 1 bond

Vliv vlhkosti

Nr	Val [cN]	Resultcode
1	4,26	Heel break 1 bond
2	4,19	Heel break 2 bond
3	4,11	Heel break 1 bond
4	4,02	Heel break 1 bond
5	4,05	Heel break 1 bond
6	4,13	Heel break 1 bond
7	4,28	Heel break 2 bond
8	4,12	Heel break 2 bond
9	4,06	Heel break 2 bond
10	4,06	Heel break 1 bond
11	4,07	Heel break 2 bond
12	4,05	Heel break 2 bond
13	4,29	Heel break 1 bond
14	4,13	Heel break 1 bond
15	4,08	Heel break 1 bond
16	4,11	Heel break 2 bond
17	4,12	Heel break 1 bond
18	4,34	Heel break 1 bond
19	4,36	Heel break 2 bond
20	4,24	Heel break 1 bond
21	4,34	Heel break 1 bond
22	4,29	Heel break 1 bond
23	4,38	Heel break 1 bond
24	4,31	Heel break 1 bond
25	4,21	Heel break 2 bond
26	4,34	Heel break 2 bond
27	4,3	Heel break 2 bond
28	4,32	Heel break 2 bond
29	4,34	Heel break 1 bond
30	4,14	Heel break 2 bond
31	4,13	Heel break 1 bond
32	4,29	Heel break 1 bond
33	4,26	Heel break 1 bond
34	4,31	Heel break 1 bond
35	4,06	Heel break 1 bond
36	4,19	Heel break 1 bond
37	4,08	Heel break 1 bond
38	4,03	Heel break 1 bond
39	4,17	Heel break 1 bond
40	4,06	Heel break 1 bond
41	4,25	Heel break 1 bond
42	3,95	Heel break 1 bond
43	4,11	Heel break 1 bond
44	3,94	Heel break 1 bond
45	4,06	Heel break 1 bond
46	3,93	Heel break 1 bond

47	3,97	Heel break 1 bond
48	4,02	Heel break 1 bond
49	4,02	Heel break 1 bond
50	3,98	Heel break 1 bond
51	4,03	Heel break 2 bond
52	4,17	Heel break 1 bond
53	4,03	Heel break 1 bond
54	4,08	Heel break 1 bond
55	4,12	Heel break 1 bond
56	4,06	Heel break 1 bond
57	4,16	Heel break 1 bond
58	4,08	Heel break 1 bond
59	3,94	Heel break 1 bond
60	4	Heel break 1 bond
61	4,02	Heel break 1 bond
62	3,92	Heel break 1 bond
63	3,94	Heel break 1 bond