

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Testování kvality bondovaných spojů**

**vedoucí práce: Ing. Karel Hromadka**

**autor: Ladislav Hanuš**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ladislav HANUŠ**  
Osobní číslo: **E09B0127P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Testování kvality bondovaných spojů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principem mikrodrátkového bondování.
2. Zmapujte průmyslové standardy pro testování kvality bondovaných spojů.
3. Zjistěte, které parametry a jakým způsobem ovlivňují kvalitu výsledných bondů.
4. Navrhněte postupy pro měření mechanických a elektrických vlastností bondovaných spojů.
5. Proveďte porovnání jednotlivých metod testování.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Harman, G.: Wire Bonding in Microelectronics. McGraw-Hill, 2010.
2. Firemní literatura a katalogy nalezených výrobců
3. Elektronické informační zdroje


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Hromadka**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na testování kvality bondovaných spojů, seznámení s problematikou testování a zhodnocení jednotlivých testů.

První část se zabývá metodami bondování a základním rozdělením bondovacích nástrojů. Druhá část popisuje test tahem, stříhem a některé další průmyslové standarty pro hodnocení kvality bondu. Třetí kapitola navrhuje možné testovací zařízení a porovnává zařízení dostupná na trhu.

## **Klíčová slova**

Mikrodrátové bondování, drátek, testování kvality, test tahem, test stříhem, háček, klín, kapilára, kulička

## **Abstract**

Presented bachelor's thesis is focused on testing of wire bond, familiarization with problems of testing and evaluation of individual tests.

First part is aimed to explain methods of wire bonding and basic tools for bonding. Second part describes pull test, shear test and some other industrial standards for bond quality assessment. Third chapter designs possible test device and compares some devices available at market.

## **Key words**

Wirebonding, wire, quality testing, pull test, shear test, hook, wedge, capillary, ball

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hromadkovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 BONDVACÍ PROCESY .....</b>	<b>12</b>
1.1 TERMOKOMPRESSE.....	12
1.2 ULTRAZVUKOVÉ BONDVÁNÍ.....	13
1.3 TERMOSONICKÉ BONDVÁNÍ.....	13
1.4 TECHNIKY BONDVÁNÍ .....	15
1.4.1 Bondování kapilárou.....	15
1.4.2 Bondování klínem .....	19
1.5 MIKRODRÁTKY PRO BONDVÁNÍ.....	21
<b>2 TESTOVÁNÍ BONDU .....</b>	<b>22</b>
2.1 VIZUÁLNÍ METODA .....	22
2.2 DESTRUKTIVNÍ TEST TAHEM.....	23
2.2.1 Rozložení síly při testování tahem .....	24
2.3 TESTOVÁNÍ PEVNOSTI BONDU STŘIHEM .....	27
2.3.1 Rušivé vlivy .....	30
2.4 TEST KLÍNOVÉHO BONDU STŘIHEM.....	32
2.5 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKA TAHEM .....	34
2.6 SPECIÁLNÍ TESTY KVALITY BONDŮ .....	35
2.6.1 Leptání bondu .....	35
2.6.2 Test vibracemi.....	36
2.6.3 Test extrémní teplotou.....	36
2.6.4 Test tepelným cyklem .....	36
2.6.5 Elektrické testování.....	37
<b>3 ZAŘÍZENÍ VHODNÁ PRO TESTOVÁNÍ .....</b>	<b>37</b>
3.1 ZAŘÍZENÍ PRO TEST STŘIHEM .....	37
3.2 RUČNÍ STŘIHOVÁ SONDA .....	39
3.3 TESTOVACÍ HÁČEK .....	40
3.4 JEDNOÚČELOVÝ TAHOVÝ TESTER ROYCE 610 .....	40



3.5	MULTITESTER ROYCE 620 .....	41
3.6	UNIVERZÁLNÍ TESTER ROYCE 650 .....	42
3.7	MANUÁLNÍ TESTER PRO TEST TAHEM WEST BOND 70 PTC .....	42
3.8	UNIVERZÁLNÍ TESTER DAGE SERIES 4000 .....	43
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>46</b>
	<b>EVIDENČNÍ LIST .....</b>	<b>49</b>

## **Seznam symbolů**

T/K Termokomprese

T/S Termosonické bondování

U/S Ultrazvukové bondování

## **Úvod**

Tato bakalářská práce je zaměřena na testování kvality bondovaných spojů, popisuje testovací metody a zařízení využívaná pro testování.

Bondování je metoda pevného spojení součástek (čipů) s kontaktní ploškou pomocí jemných mikrodrátků. Realizuje se pomocí termokomprese, ultrazvukově nebo termosonicky.

Práce je rozdělena na 3 kapitoly. První kapitola se zabývá problematikou a základními metodami bondování.

Druhá kapitola popisuje základní testovací metody, jejich vývoj a zpracování. Mezi hlavní zkoušky řadíme nedestruktivní i destruktivní test tahem, vizuální metodu a testování stříhem. Dále jsou zde uvedené některé speciální testy.

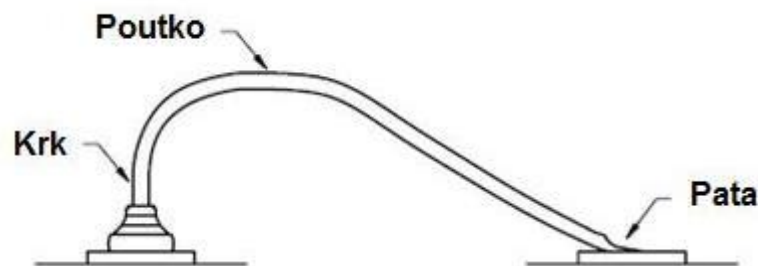
Třetí kapitola hodnotí jednotlivá zařízení pro testování a měření bondovaných spojů. Popisuje základní vlastnosti a parametry aktuálních i dříve používaných přístrojů pro testování.

# 1 Bondovací procesy

Mikrodrátkové bondování je metoda elektrického propojení kontaktů jednotlivých součástek s deskou plošného spoje, čipu nebo další součástkou. Je to metoda pevného spojení, pokud jsou dva kovové materiály (mikrodrátek a podložka) v těsném kontaktu, dojde ke svaření spoje jednou ze tří možných metod. [1]

Při spojení se využívá především Al, Au nebo Cu mikrodrátků o průměru přibližně 40  $\mu\text{m}$ . Připojení mikrodrátku může být provedeno třemi různými způsoby: termokompresí, ultrazvukovým nebo termosonickým bondováním, údaje o jednotlivých metodách jsou uvedeny v Tab. 1. Dále existují dvě základní techniky bondování: pomocí klínu nebo kapiláry. U termosonického a ultrazvukového bondování nemusí být použit mikrodrátek, ale může být nabondován přímo celý čip. [1]

Pro kvalitnější bondování je výhodnější lesklá úprava povrchu, jelikož vytvořený bond na lesklém povrchu je kvalitnější, oproti matné povrchové úpravě, kde bond již nedosahuje tak vysoké kvality. [1]



Obr 1.1 Popis bondu (převzato z [4])

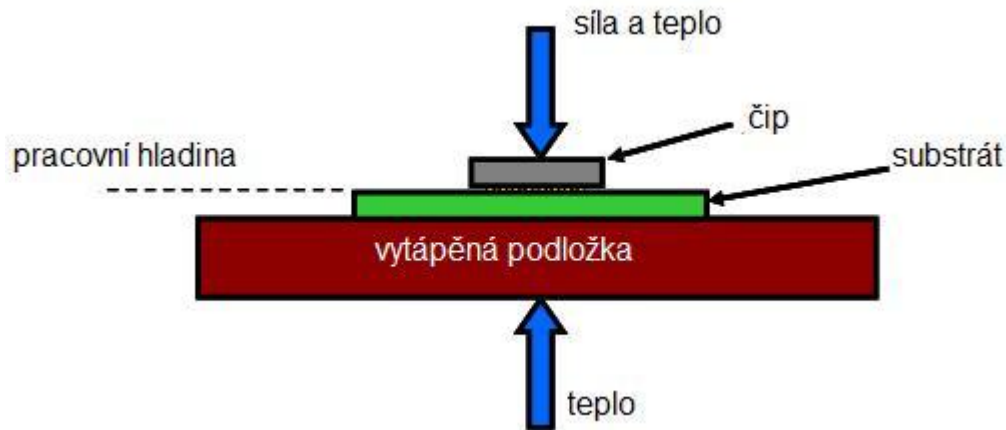
## 1.1 Termokompresse

Termokompresse byla vyvinuta odborníky z Bell Laboratories: O.L. Anderson, H. Christensen a P. Andreatchem roku 1957. [7]

U termokompresse se nejprve zahřejí komponenty a substrát na teplotu 200 – 300 °C. Poté musí být vytvořena přítlačná síla po dobu cca půl sekundy, která podpoří vzájemnou difuzi krystalových mřížek dvou materiálů: mikrodrátku a kontaktní plošky, tím dojde ke vzájemnému svaření. U termokompresse může být bondován pouze zlatý mikrodrátek, který neoxiduje vlivem vysoké teploty. Tato metoda je nejstarší a využívá se pouze při bondování kapilárou. [1]

Bondování mikrodrátku na povrch čipu polovodiče je velmi obtížný úkol. Bond musí mít výborné elektrické připojení, které nebude s přibývajícím časem degradovat. [1,7]

První bonder pro komerční účely využívající termokompresi vyrobila firma Kulicke & Soffa koncem roku 1959. [7]



Obr 1.2 Princip termokompresi (převzato z [8])

## 1.2 Ultrazvukové bondování

Ultrazvukové bondování je velmi atraktivní způsob kontaktování digitálních a analogových součástek, popřípadě výkonových polovodičů. Při této metodě nezahříváme kontakty čipů, pouze využíváme pokojové teploty 21 °C. [1]

Připojovaný mikrodrátek je přitlačován oproti termokompresi mnohem menší silou a je rozkmitán působením ultrazvuku (40 - 60 kHz). Třením vzniká teplo potřebné ke spojení kontaktu s mikrodrátkem a současně jsou díky tření oxidy vytlačovány mimo vlastní spoj. Oproti termosonickému bondování je však spolehlivost a pevnost bondu horší. [1]

Ultrazvukové bondování bylo objeveno roku 1950 jako obecná svářecí technika. [1]

## 1.3 Termosonické bondování

Levittown Coucolas je dodnes považován za „otce“ termosonického bondování. Roku 1970 kombinací ultrazvukové energie a tepelné energie vyvinul jako první termosonické bondování. Původně tuto metodu nazval „horká práce ultrazvukové energie.“ Doposud je většina propojení integrovaných obvodů vyráběna termosonickou metodou, pomocí Au mikrodrátku a bondovací kapiláry. [1]

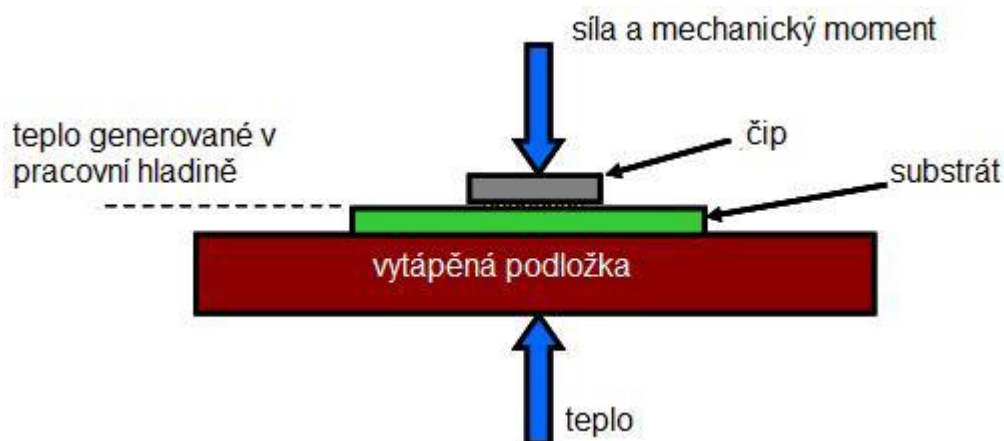
Termokompresi obvykle vyžaduje povrchové teploty kolem 300 °C. Tato teplota by mohla

způsobit poškození moderních plastových podložek, balících materiálů, laminátů a některých citlivých čipů. Při termosonickém bondování může být rozsah teplot mnohem nižší a pohybuje se mezi 125 °C a 220 °C. Také čas u této metody je mnohem kratší než u termokomprese, většinou 10 ms oproti stovkám ms. Ultrazvuková energie napomáhá k rozptýlení nečistot mezi mikrodrátkem a kontaktní ploškou již na počátku cyklu bondování, díky tomu vytvoří kvalitnější svár. [1]

Pro bondování kapilárou se drát nejprve provlékne skrz kapiláru, poté elektrický náboj roztaví konec drátu, který vytvoří v konci kapiláry kuličku. Bond (svár) vzniká, když kapilára tlačí na kuličku a zároveň ji deformuje proti vyhřívané podložce na cca 150 °C, ultrazvuková energie je použita pro dokončení procesu. Dnes je tato metoda bondování nejvyužívanější. [2, 8]

Tab. 1. Metody bondování

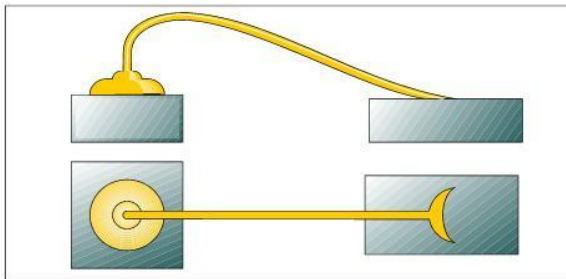
Metody bondování	Tlak	Teplota	Ultrazvuk	Drát	Podložka
Termokomprese T/K	vysoký	300-500 °C	ne	Au	Al, Au
Ultrazvukové U/S	nízký	25 °C	ano	Au, Al	Al, Au
Termosonické T/S	nízký	100-150 °C	ano	Au	Al, Au



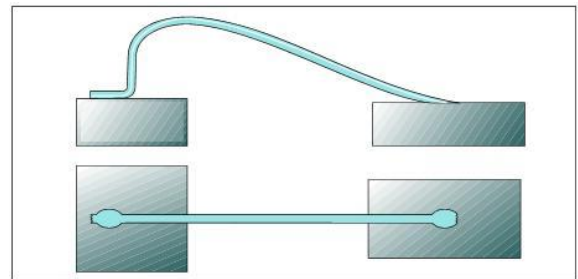
Obr 1.3 Proces termosonického bondování (převzato z [8])

## 1.4 Techniky bondování

Existují dvě techniky bondování: kapilárou nebo klínem. Bondování kapilárou je dnes nejpoužívanější technikou spojování, především proto, že je rychlejší než bondování klínem.



Obr. 1.4 Bondování kapilárou (převzato z [11])



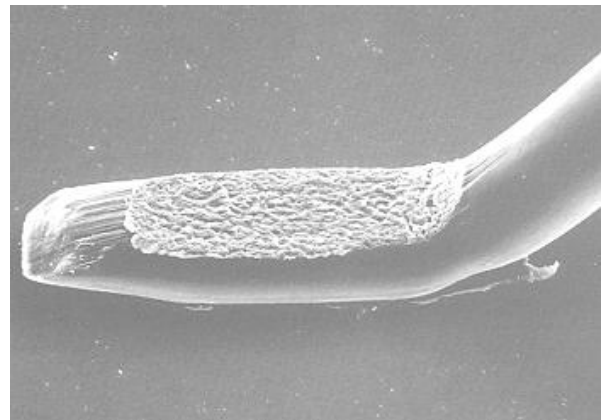
Obr. 1.5 Bondování klínem (převzato z [11])

Tab. 2. Techniky bondování

Bondovací proces	Bondovací nástroj	Drát	Podložka	Rychlost
T/K, T/S	Kapilára	Au	Al, Au	10 bondů/s (T/S)
T/S, U/S	Klín	Au, Al	Al, Au	4 bondy/s



Obr. 1.6 Bond vytvořený kapilárou (převzato z [3])



Obr. 1.7 Bond vytvořený klínem (převzato z [2])

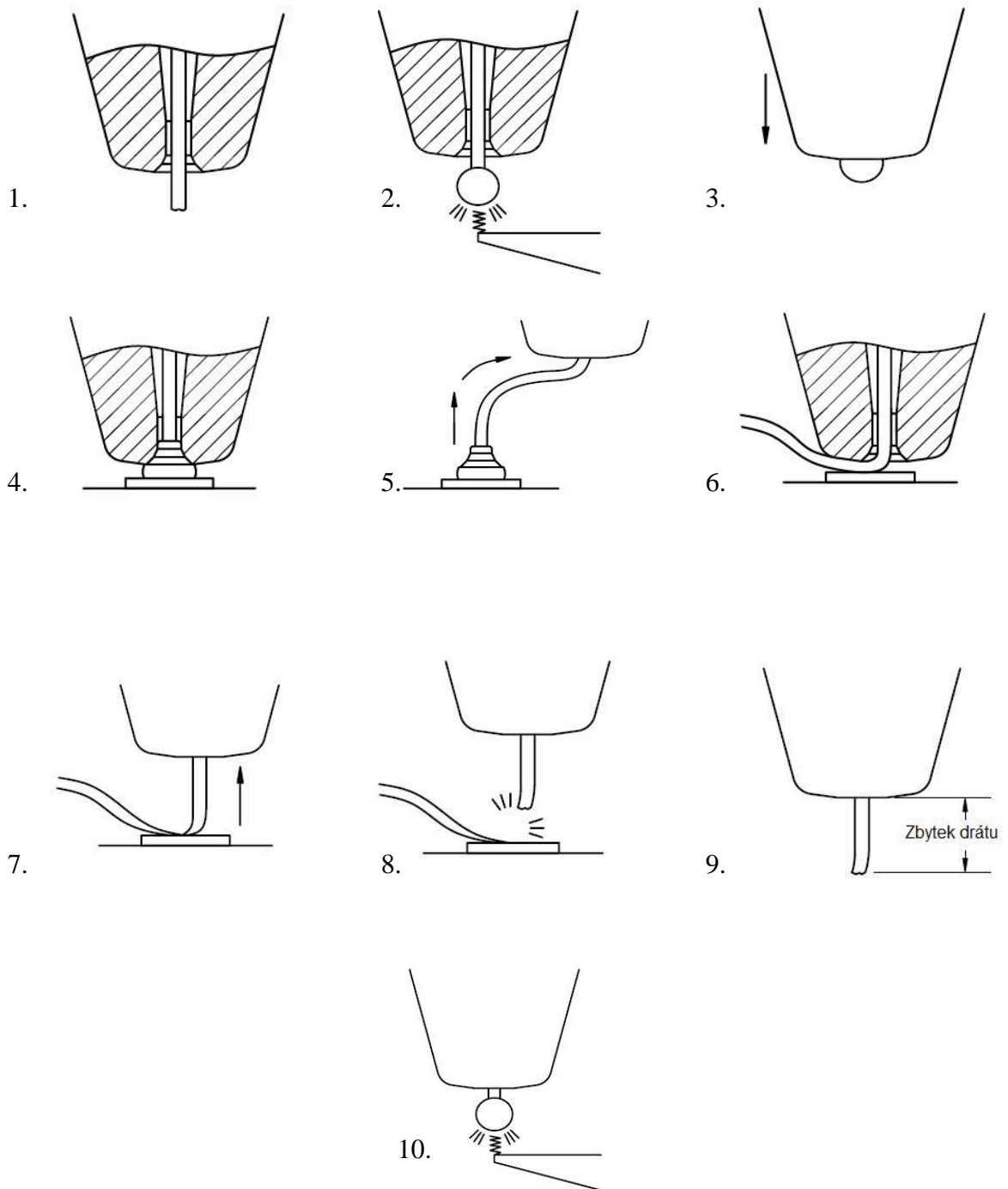
### 1.4.1 Bondování kapilárou

Základní požadavky na úspěšné bondování:

- Výběr vhodné kapiláry
- Udržování čistoty kapiláry a její funkčnosti
- Kvalita mikrodrátku, jeho skladování a správná manipulace
- Čistý povrch podložky [4]

Mimo výše uvedené záleží také na velikosti kontaktní plošky a bondovaného spoje, čistotě spojovaných kontaktů, průměru mikrodrátku, výšce poutka, délce poutka, rychlosti a přesnosti vytvoření bondovaného spoje. Dnes je na trhu mnoho druhů keramických kapilár, díky nimž může být zvolena vždy vhodná kapilára pro danou aplikaci. Postup je znázorněn na Obr. 1.8.

[3]



Obr. 1.8 Technika bondování kapilárou (převzato z [4])



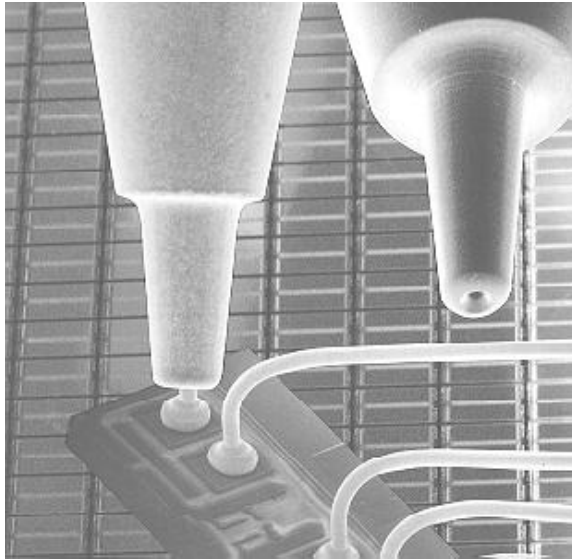
Postup bondování kapilárou:

1. Provláčení mikrodrátku do kapiláry.
2. Vytvoření kuličky na konci mikrodrátku pomocí elektrického náboje.
3. Cívka zatáhne kuličku zpět do kapiláry a přitlačí ji na povrch kontaktní plošky.
4. Pomocí přitlačné síly a ultrazvukové energie dojde za určitý čas ke spojení kuličky s kontaktní ploškou.
5. Přesun kapiláry ke druhému kontaktu a vytvoření poutka.
6. Přitlačná síla a ultrazvuková energie opět propojí mikrodrátek s kontaktní ploškou.
7. Kapilára se zvedne do určité vzdálenosti.
8. Poté se sevřou kleštiny kapiláry, která se dále zvedá a ustříhne mikrodrátek.
9. V kapiláře zůstává zbytek mikrodrátku.
10. Proces se opakuje. [3]

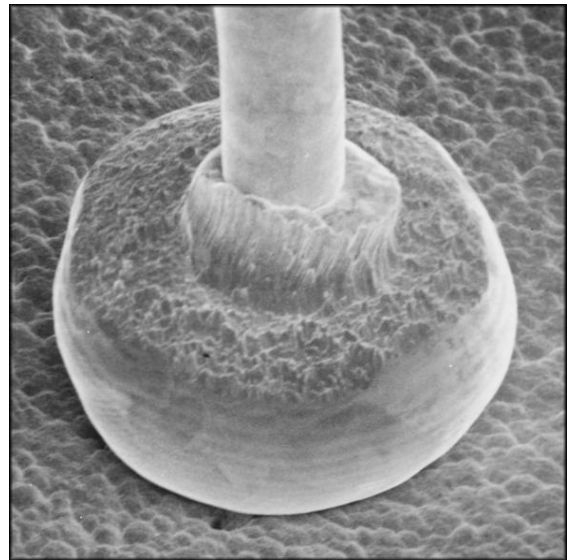
#### 1.4.1.1 Kapilára

První keramická kapilára byla vynalezena a vyrobena firmou Gaiser Tool Company v roce 1970. Nejvíce používaným materiálem je jemná keramika o vysoké hustotě, která je velmi odolná proti opotřebení, oxidaci a lze ji také snadno čistit po bondování. Dále se využívá wolfram, keramika nebo rubín. [3]

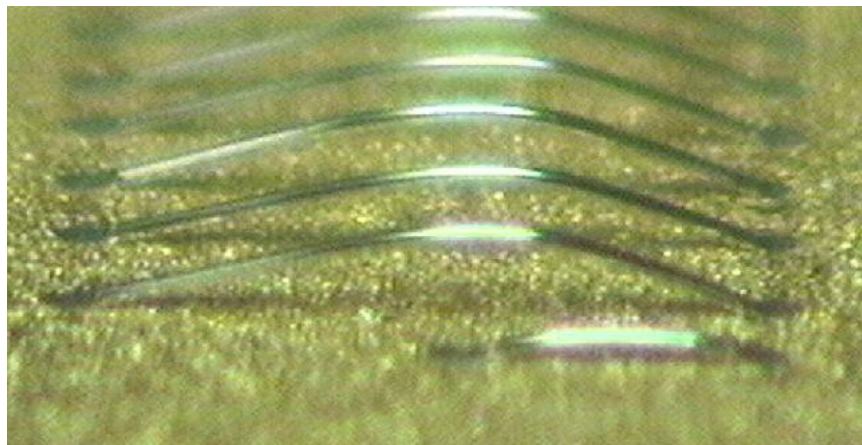
Kapiláry mají typické rozměry 1,585 mm v průměru a 11,1 mm na délku. Začátek kapiláry tvoří velký vstupní otvor pro mikrodrátek, který se zužuje až na malé průměry 38 - 50  $\mu\text{m}$  v závislosti na průměru mikrodrátku. Na konci kapiláry je na vnitřní hraně zkosení. To je navrženo tak, aby kulička v nástroji měla co nejvyšší přitlačnou sílu. Vnitřní 120° zkosení kapiláry je použito pro povrchy, který nelze snadno bondovat, jelikož kapilára dokáže vyvinout mnohem více přitlačné síly. Nevýhoda tohoto zkosení spočívá ve vytvoření většího silového namáhání v mikrodrátku provlečeného kapilárou. Pro kvalitnější povrchy je využíváno vnitřní zkosení 90°. V poslední době se využívá i zkosení 70°, které je vhodné pro speciální malé kuličky využívané při jemných roztečích kontaktů polovodičových pouzder. [4]



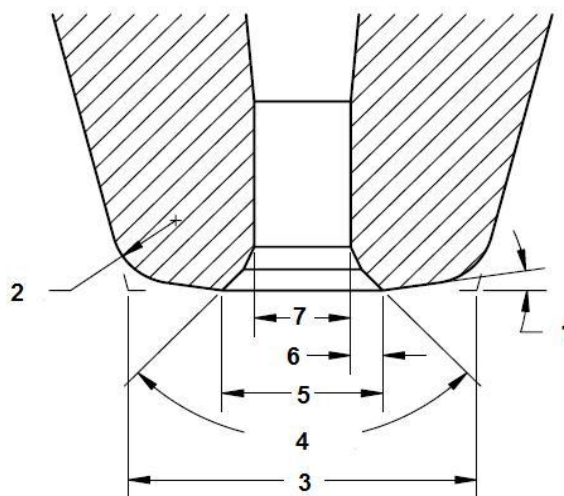
Obr. 1.9 Bondovací kapilára (převzato z [6])



Obr. 1.10 Ukázka bondu při použití špatné kapiláry (převzato z [4])



Obr. 1.11 Klínový bond 1mm dlouhý a 130  $\mu\text{m}$  vysoký (převzato z [11])



- 1) Úhel čela
- 2) Vnější radius
- 3) Šířka kapiláry
- 4) Vnitřní úhel zkosení
- 5) Průměr vnitřního zkosení
- 6) Délka vnitřního zkosení
- 7) Průměr vnitřní díry

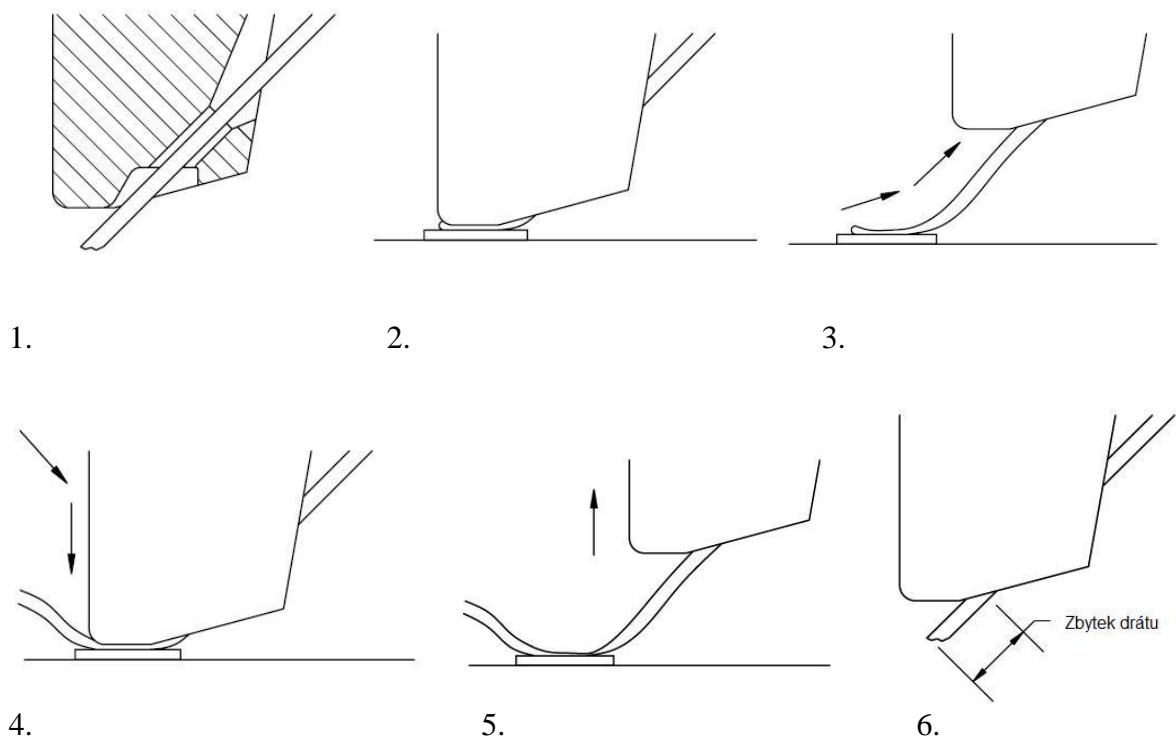
Obr. 1.12 Kapilára přiblížená (převzato z [4])

### 1.4.2 Bondování klínem

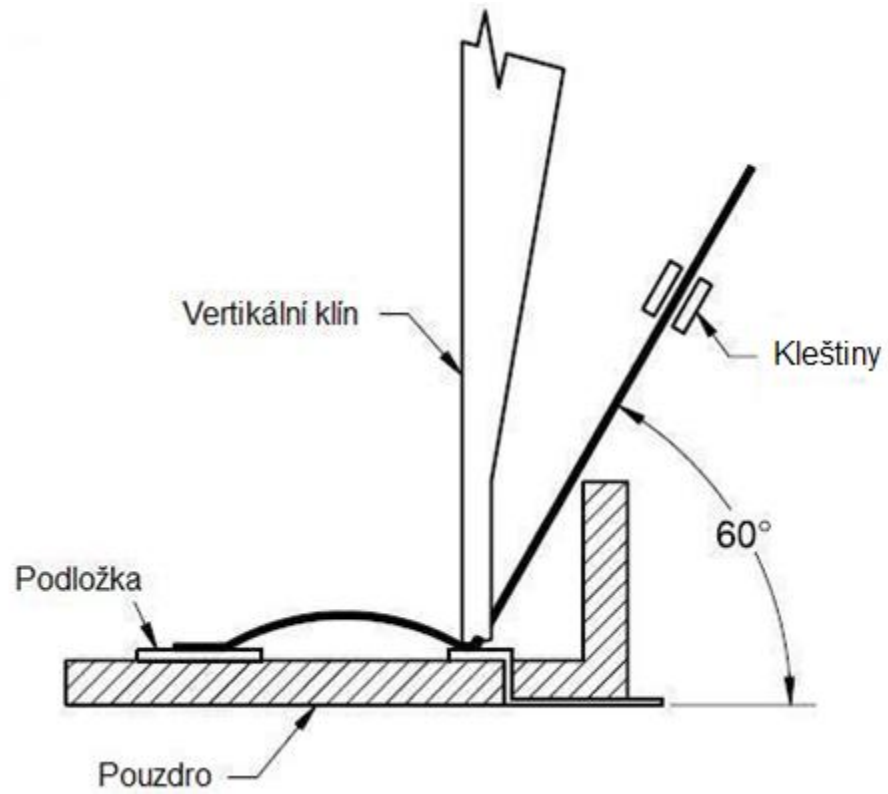
Bondování klínem je pojmenováno na základě tvaru bondovacího nástroje. Při bondování klínem využíváme pouze Au mikrodrátky, které neoxidují. Tato technika se dnes využívá minimálně. Nevýhoda této metody spočívá v nutnosti natočit bondovací klín ve směru bondování, což prodlužuje dobu bondování. Postup je znázorněn na Obr. 1.13. [5]

Postup bondování klínem:

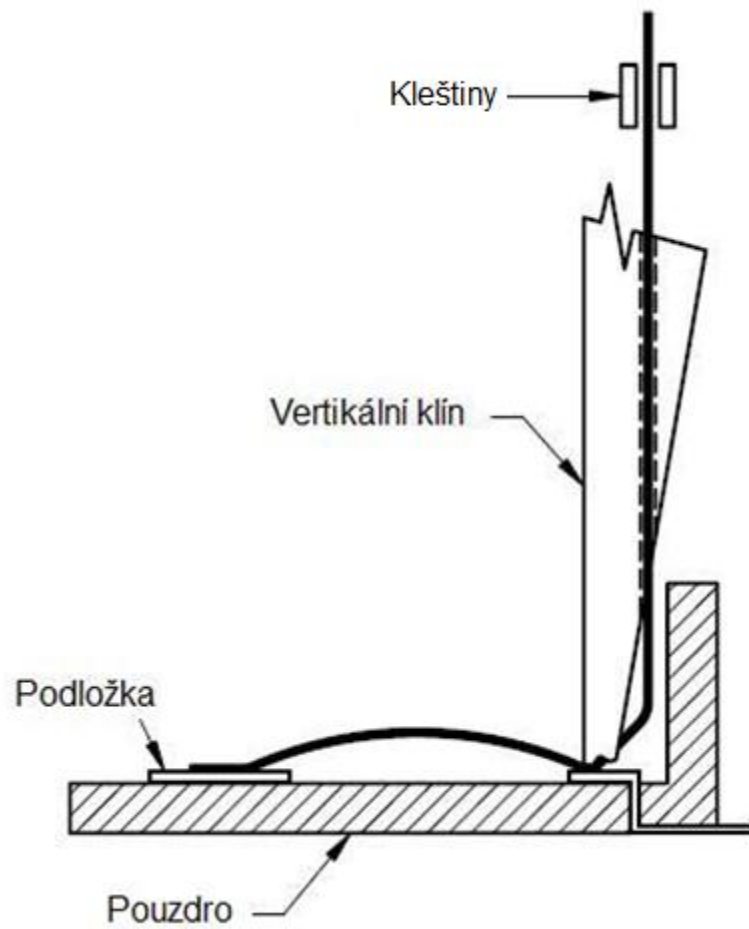
1. Provláčení mikrodrátku do nástroje.
2. Přítlačná síla a ultrazvuková energie spojí mikrodrátek s podložkou.
3. Klín se přesune ke druhému kontaktu a vytvoří se poutko.
4. Opět pomocí přítlačné síly a ultrazvukové energie dojde ke spojení mikrodrátku s kontaktní ploškou.
5. Zvednutí nástroje do určité vzdálenosti.
6. Sevření mikrodrátku v kleštinách a jeho utržení. [5]



Obr. 1.13 Technika bondování klínem (převzato z [5])



Obr. 1.14 Běžný klínový nástroj pro bondování (převzato z [5])

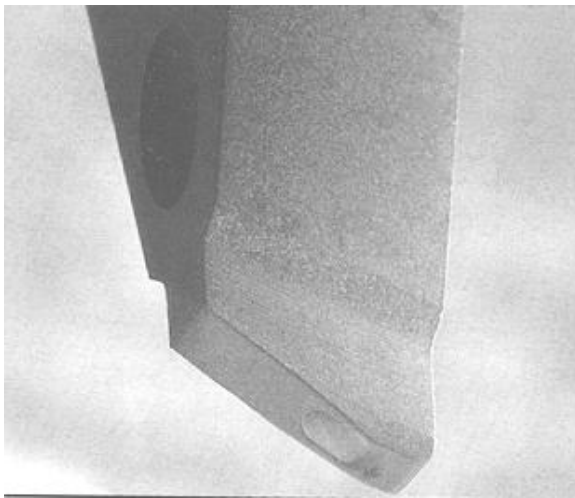


Obr. 1.15 Klínový nástroj pro špatně přístupná místa (převzato z [5])

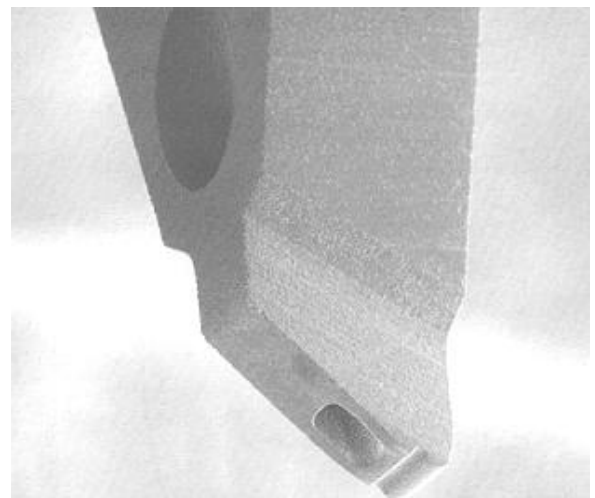
### 1.4.2.1 Klínový nástroj

Při bondování klínem je mikrodrátek přiváděn do nástroje pod úhlem 30° až 60° (v extrémních případech až 90°). Nízký úhel přivedení mikrodrátku zajišťuje výborné ovládní a vysokou kvalitu bondového spoje. Přivádění mikrodrátku pod vysokým úhlem se používá zřídka, pouze pokud je to nezbytně nutné vzhledem k vysokým stěnám v blízkosti bondování. [3]

Profil klínu může být buď rovinný, nebo konkávní. Většina automatických aplikací používá hliníkový mikrodrátek s konkávním klínem, který zvyšuje přesnost bondu. Ploché klín se používá se zlatým nebo hliníkovým mikrodrátkem pro dosažení extrémně krátkého bondu. U hliníkového mikrodrátku je klín obvykle vyroben z karbidu wolframu nebo keramiky. Keramické klínové nástroje poskytují lepší kvalitu a životnost nástroje. Pro zlatý mikrodrátek se využívá nejvíce karbid titanu, do kterého může být přidáno jako pojivo karbid wolframu. Mezi hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu bondového spoje je velikost, tvar a úhel. [3]



Obr. 1.16 Klín pro Al mikrodrátek (převzato z [3])



Obr. 1.17 Klín pro Au mikrodrátek (převzato z [3])

## 1.5 Mikrodrátky pro bondování

- Zlatý mikrodrátek

Je využíván nejčastěji pro termokompresi a termosonické bondování. Při výrobě zlatého mikrodrátku jsou nejdůležitější dva aspekty, povrchová úprava a čistota povrchu mikrodrátku. Čistota musí být udržována proto, aby se zamezilo zanesení bondovací kapiláry nebo klínu a vytvořil se kvalitní a silný spoj. Mikrodrátek z ultra-čistého zlata je velmi měkký, proto ho musíme dotovat 5 - 10 ppm nebo 30 - 50 ppm mědi. Berylliem dotovaný zlatý

mikrodrátek dosahuje lepší kvality než mikrodrátek dotovaný mědí cca o 10 - 20 %. [3]

- Hliníkový mikrodrátek

Čistý hliník je většinou příliš měkký a nelze z něj vytvořit jemný drátek. Proto je často legovaný s 1 % Si nebo 1 % Mg, což mu poskytuje větší pevnost. Hliník legovaný s 1 % Mg má vyšší odolnost vůči únavě. Degradace pevnosti po vystavení zvýšeným teplotám je téměř nulová. [3]

- Měděný mikrodrátek

V poslední době získal měděný mikrodrátek značnou pozornost především díky jeho nízké ceně. Hlavním problémem tohoto systému je však bondovatelnost. Díky oxidaci mědi je nutné bondování provádět v inertní ochranné atmosféře. Měď je tvrdší než zlato a hliník, což může vést k vytvoření kráterového poškození nebo vytlačení kontaktní plošky mimo spoj, proto je nutné zajistit tvrdší podložku. [3]

## 2 Testování bondu

Měřicí metody, techniky a rovnice použité pro bondování byly vyvinuty již před mnoha lety. Nejnovější kritéria pro hodnocení bondu jsou popsány v MIL-STD-833 G/H pro vojenskou techniku. [9]

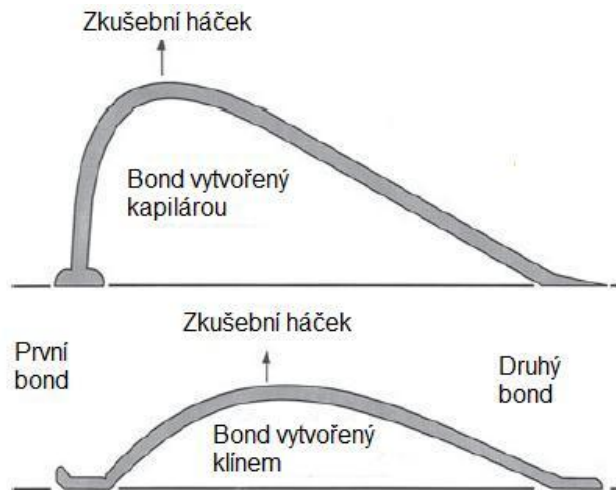
Po bondování může být bond hodnocen vizuálními metodami a mechanickým testováním. Vizuální metoda využívá optický mikroskop, elektronový mikroskop (SEM) a další analytické nástroje pro nalezení nežádoucí vazby. Mechanické zkoušky se provádějí pro zhodnocení pevnosti vazby. [9]

### 2.1 Vizuální metoda

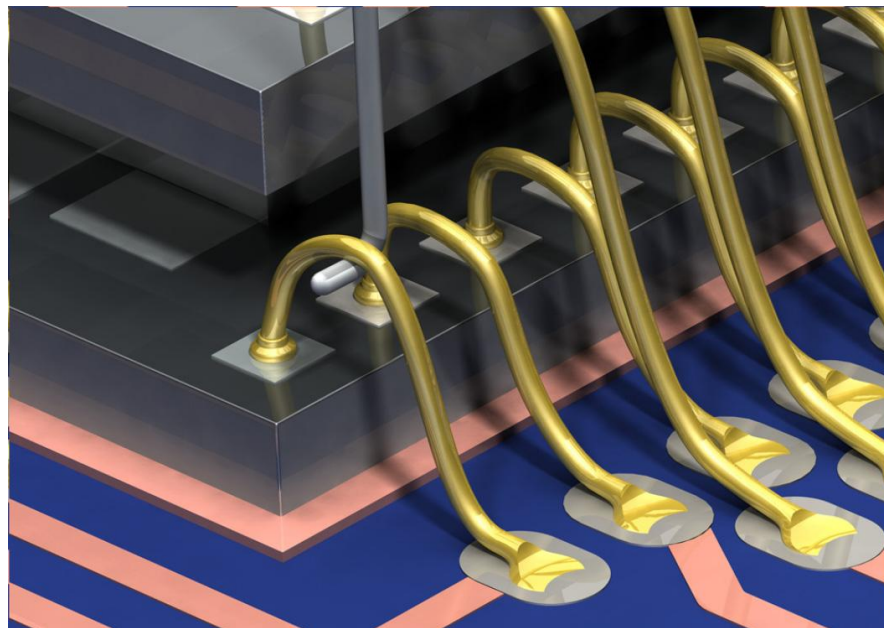
Vizuální metoda testování je využívána pro kontrolu nezapouzdřených čipů a mikroobvodů v souladu s požadavky aplikace. Pomocí této metody lze odhalit nevhodnou geometrii bondů, včetně deformace kapilárních bondů, porušení krku bondu, bond mimo kontaktní plošku a deformované klínové bondy s nadměrným poškozením paty. Zkouška se provádí před zapouzdřením. [3]

## 2.2 Destruktivní test tahem

Destruktivní test bondu tahem je nejvíce používaná metoda pro kontrolu kvality bondovacího procesu. Tato metoda testování byla vytvořena pro zhodnocení síly v mikrodrátku. Podobné testy mohou být použity pro svařované, pájené a další mikrodrátkové propojení. [9]



Obr. 2.1 Umístění zkušebního háčku (převzato z [9])

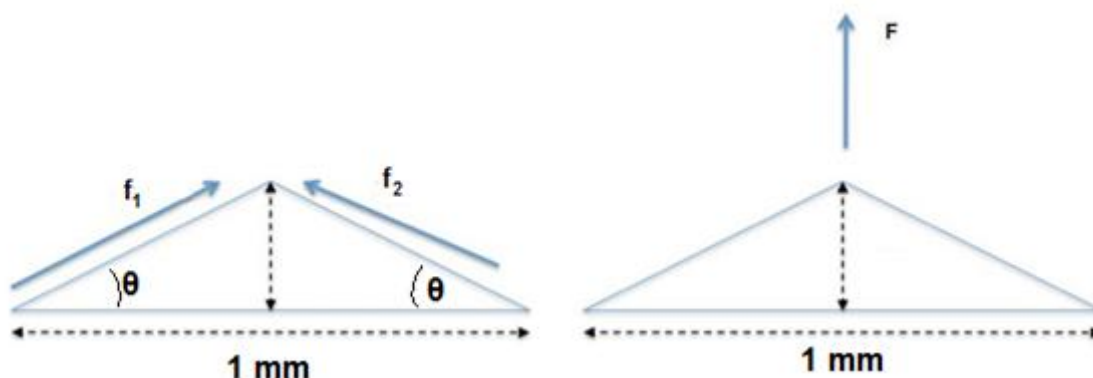


Obr. 2.2 Ukázka testování bondu tahem (převzato z [17])

### 2.2.1 Rozložení síly při testování tahem

Je-li háček zavěšen v polovině bondu (Obr. 2.3) a kontaktní plošky bondu jsou ve stejné rovině, vertikální tahovou sílu  $F$ , která se skládá z jednotlivých sil  $f_1$  a  $f_2$ , je možné vyjádřit ze vztahu (1-1).

$$f_1 = f_2 = \frac{F}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h}\right)^2} = \frac{F}{2 \sin \theta} \quad [N] \quad (1-1)$$



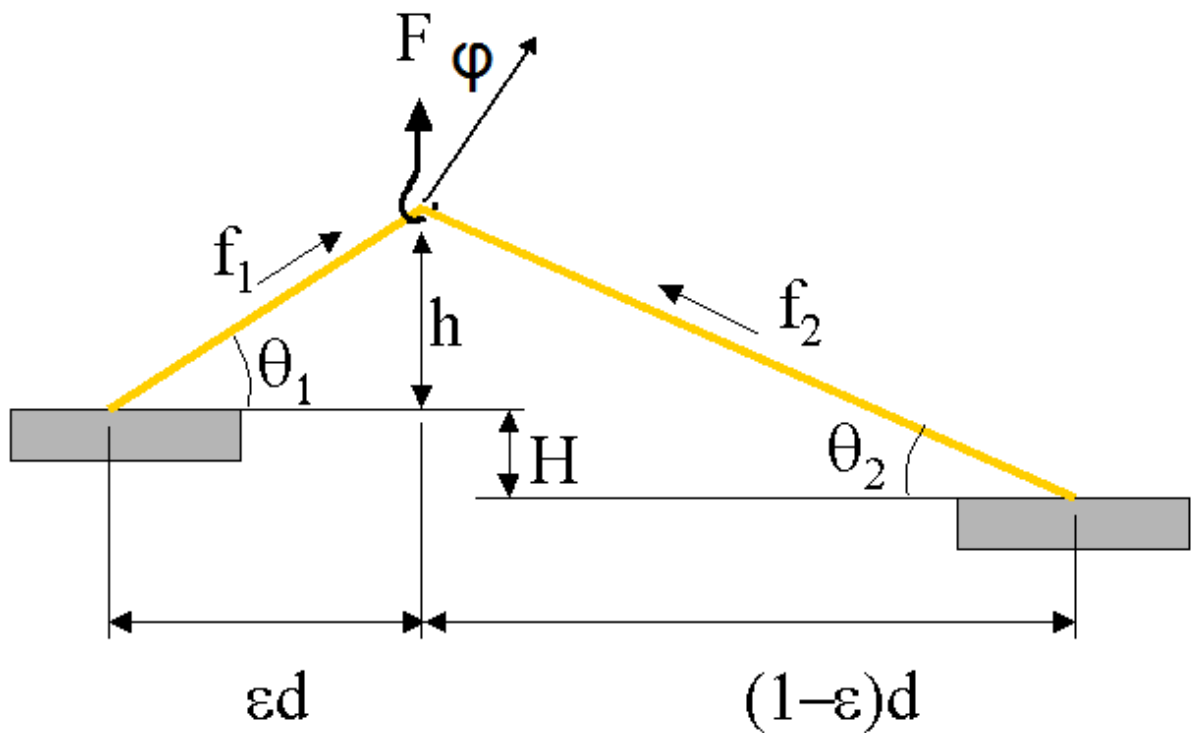
Obr 2.3 Rozložení sil v bondu při testování (převzato z [11])

Je-li do výpočtu zařazen úhel tažení háčku  $\varphi$ , odlišná výška kontaktních plošek bondu a pozice háčku, která již není ve středu jako na Obr. 2.4, pak pro výpočet jednotlivých sil  $f_1$  a  $f_2$  platí vztahy (1-2), (1-3).

$$f_1 = F \left[ \frac{(h^2 + \epsilon^2 d^2)^{1/2} \left( (1-\epsilon) \cos \varphi + \frac{(h+H)}{d} \sin \varphi \right)}{h + \epsilon H} \right] \quad [N] \quad (1-2)$$

$$f_2 = F \left[ \frac{\left( 1 + \frac{(1-\epsilon)^2 d^2}{(H+h)^2} \right)^{1/2} (h+H) \left( \epsilon \cos \varphi - \frac{h}{d} \sin \varphi \right)}{h + \epsilon H} \right] \quad [N] \quad (1-3)$$

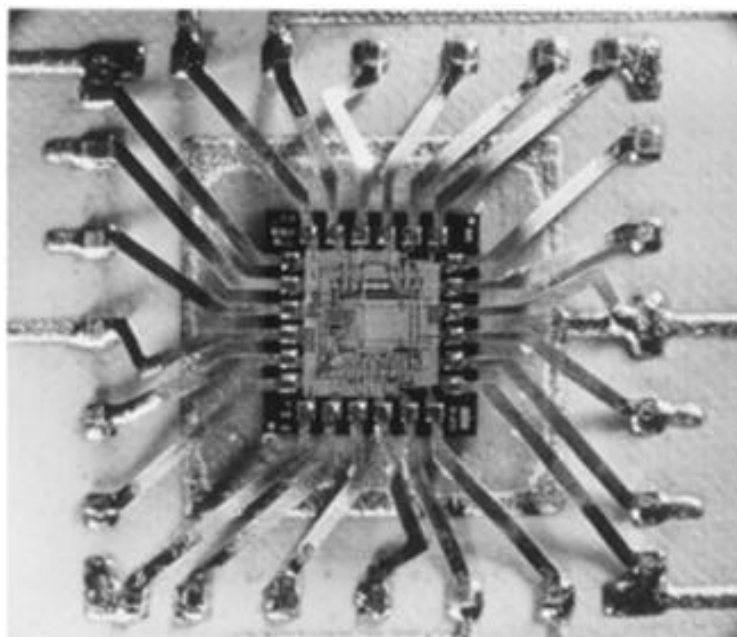




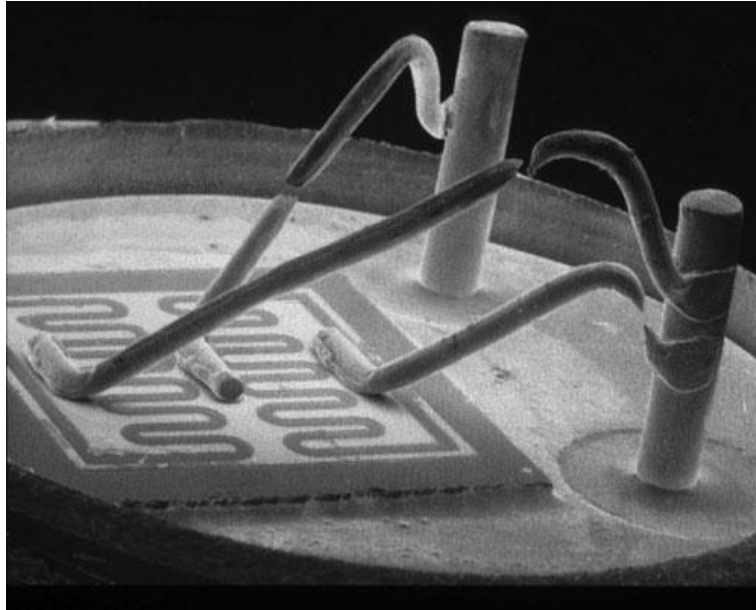
Obr. 2.4 Popis testu tahem (převzato z [15])

Pozice háčku blízko krku bondu je vhodná pro testování páskových bondů a jemných roztečí vazeb vytvořených kapilárou, aby nedocházelo k nadzvednutí podložky. [9]

Mikrodrátek se přetrhne v okamžiku, kdy jedna ze sil  $f_1$  nebo  $f_2$  dosáhne meze jeho pevnosti. Mikrodrátek se obvykle trhá těsně nad kuličkou v tepelně ovlivněné zóně. [9]

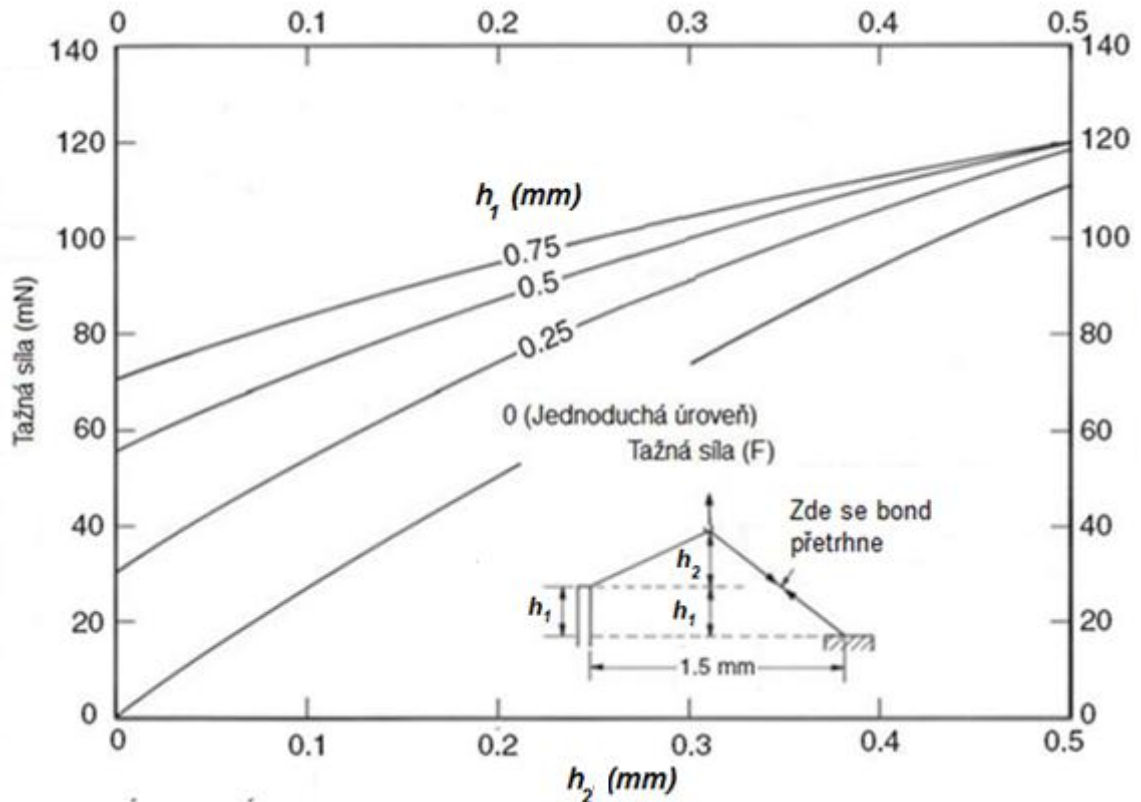


Obr. 2.5 Ukázka páskových bondů (převzato z [9])



Obr 2.6 Ukázka přetržených bondů po testování (převzato z [9])

Poloha háčku, která je znázorněna na Obr. 2.4 a tažný úhel, výrazně ovlivní rozložení sil na bondu. Jedna hodnota  $\varepsilon$  nebo  $\varphi$  může být zvolena, tak aby rozložení sil  $f_1$  a  $f_2$  bylo na každé straně stejné a bond mohl být otestován rovnoměrně. To je možné pouze u některých tažných testerů. Při manuálním tažném testu se tento postup velmi zpomalí. Kromě toho mnoho norem jako je ASTM F459-06, MIL-STD-883 G/H stanovuje, že umístění háčku musí být uprostřed bondu. Toto umístění je považováno za standardní umístění háčku pro testování klínových bondů. Avšak nelze takto testovat jemné kapilární bondy, které se většinou odtrhují od podložky v oblasti sváru. Proto musely být změněny dřívější specifikace, aby umožnily jiné umístění háčku pro nová testovací zařízení a ostatní testy tahem prováděné na jemných bondech. Nyní je již dovoleno uchytit háček mimo střed bondu. [9]

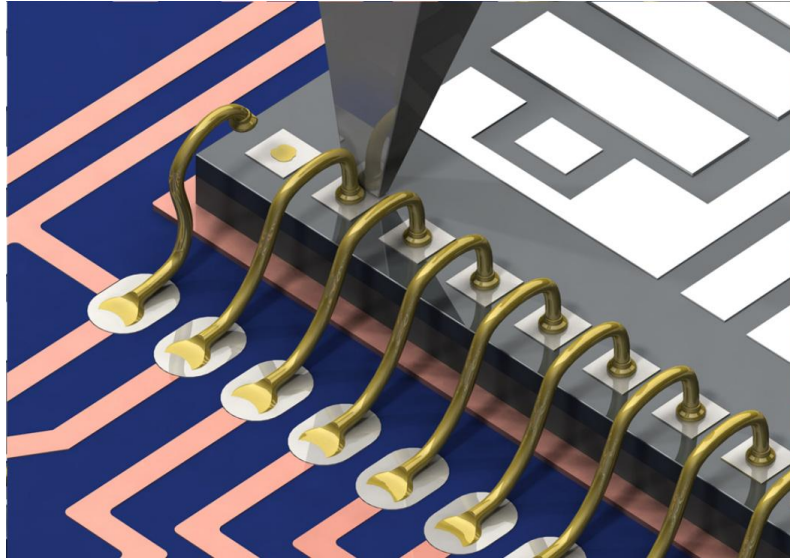


Obr. 2.7 Změna tažné síly pro odlišné výšky kontaktních podložek bondů (převzato z [9])

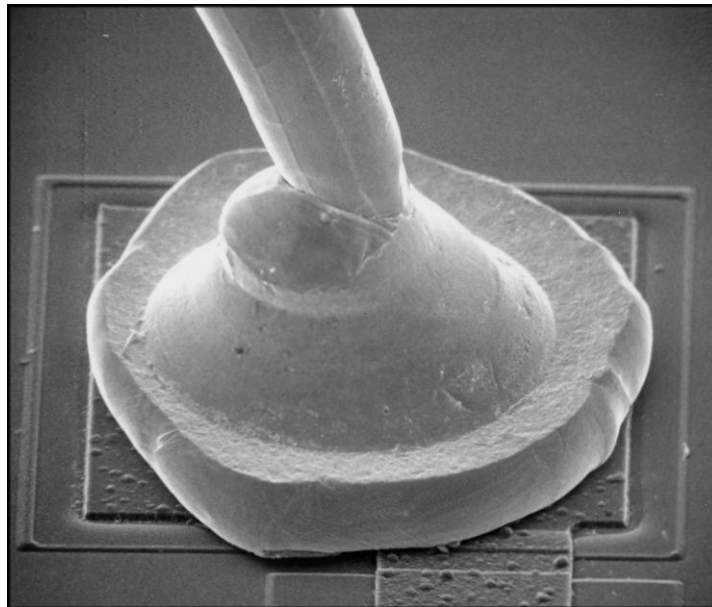
### 2.3 Testování pevnosti bondu stříhem

Testování bondu tahem je metoda používaná pro posouzení kvality bondu. Předpokládá se, že data z testu jsou dostatečné pro výhodnější nastavení bonderu. Avšak vzhledem k tomu, že většina bondů kapilárou může mít svařované plochy 3 až 6 krát větší než je průměr mikrodrátku, je zřejmé, že se dříve přetrhne mikrodrátek než špatně přivařený bond kapilárou. [9]

Vzhledem k výše uvedenému je zřejmé, že náhodné vibrace nebo zkouška stříhem nabízí nejlepší možnosti pro posouzení kvality rozhraní kapilárního bondu, a tedy správně a kvalitně nastavit bonder. [9]



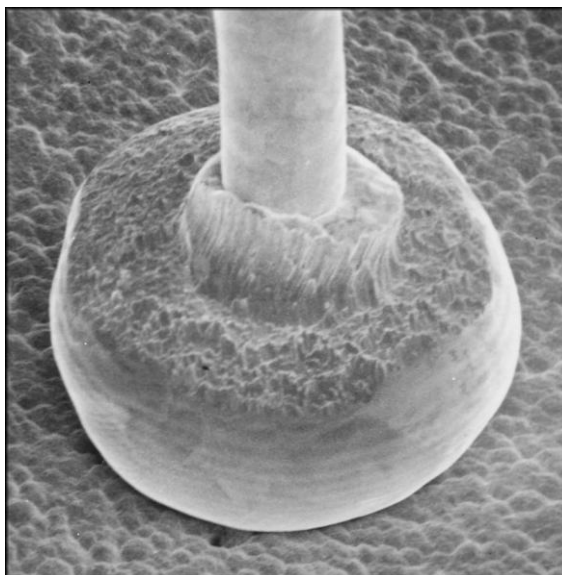
Obr. 2.8 Umístění testovací sondy (převzato z [17])



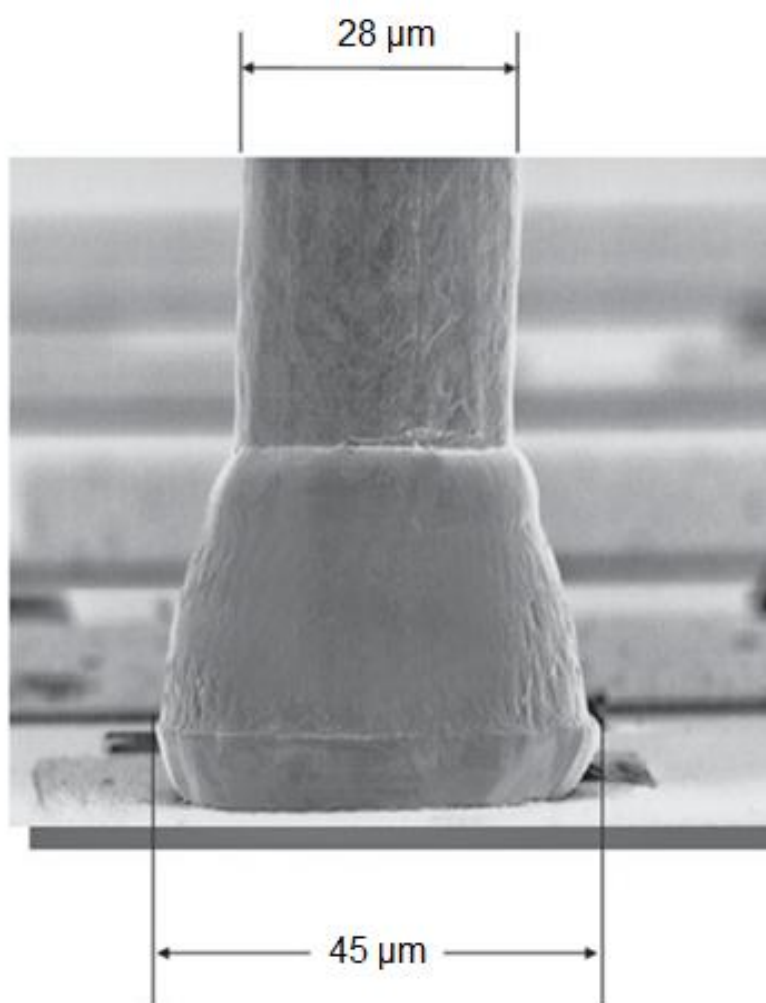
Obr. 2.9 Vadný krk bondu (převzato z [4])

Zkouška pevnosti bondu stříhem byla představena na veletrhu Průmyslová mikroelektronika v roce 1967. [9]

Od té doby, vzniklo mnoho dalších studií o zkoušce pevnosti bondu stříhem. Dnes je tato metoda téměř všeobecně přijata pro řízení výroby, stejně jako několik dalších standardů. [9]



Obr. 2.10 Ukázka špatného krku bondu (převzato z [4])



Obr. 2.11 Minimální povolený kuželový tvar pro jemné rozteče bondů (převzato z [9])

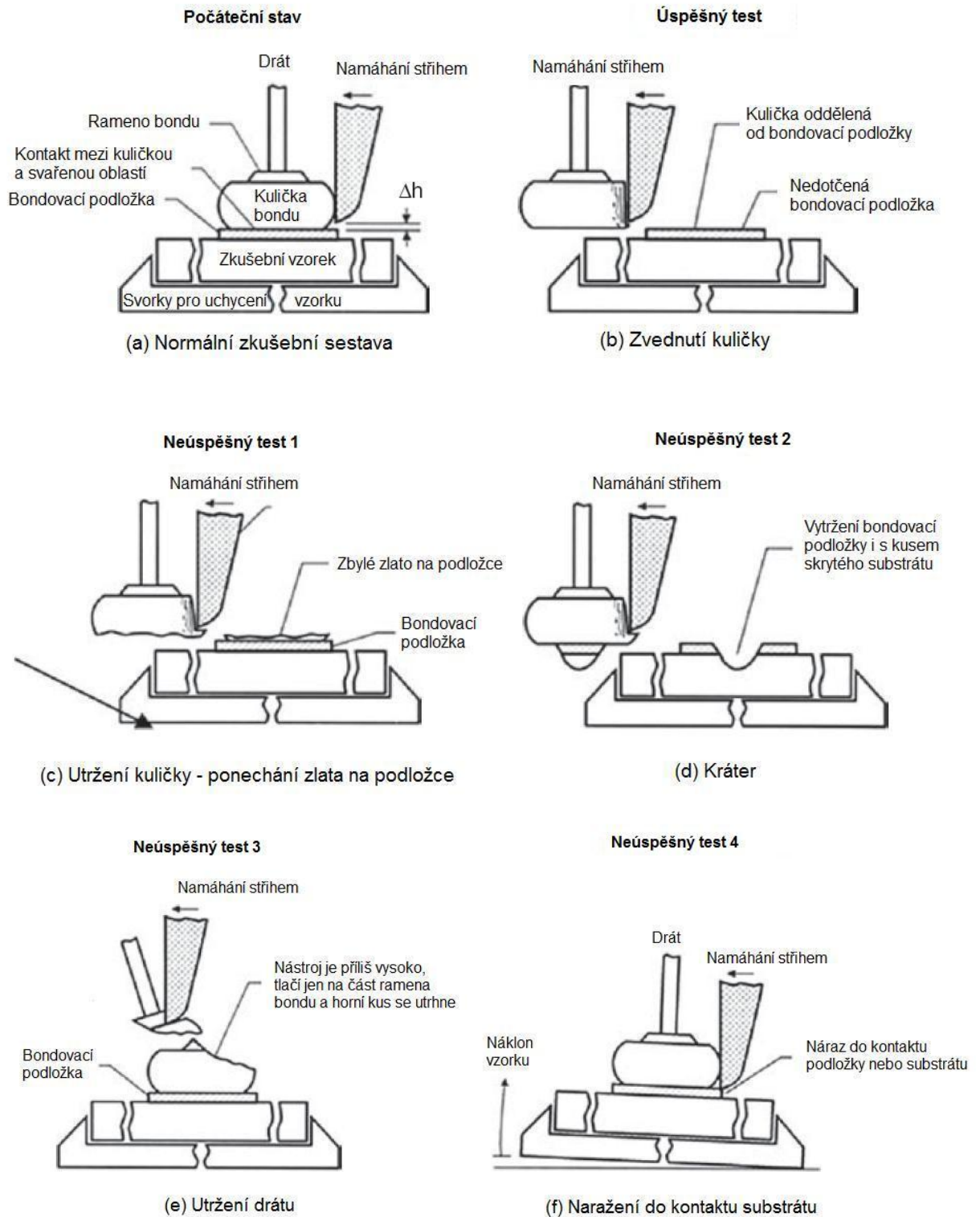
### 2.3.1 Rušivé vlivy

Jako u každé zkušební metody, nastávají problémy, které mohou ovlivnit měření špatnými údaji. Nejčastější selhání zkušebních testů pevnosti bondů jsou uvedeny na Obr. 2.12. Další jsou shrnuty níže:

- Táhnutí smykovým nástrojem v nesprávné výšce
- Zapuštěná podložka
- Problémy s přilnavostí
- Špinavý smykový nástroj (akumulace po mnoha testech)
- Substrát není upevněn ve vodorovné poloze [9]

Jeden z nejčastějších problémů je nesprávné vertikální umístění nástroje. Nástroj se nikdy nesmí dotýkat podkladu. Za normálních okolností by mělo být deformování kuličky cca 2 až 5  $\mu\text{m}$  nad podkladem a pro velké kuličkové bondy by nemělo být vyšší než 13  $\mu\text{m}$ . Dolní část nástroje musí být vždy udržována v čistotě. Pokud je nástroj umístěn moc vysoko nebo je špinavá spodní část, může zajet až na rameno bondu, v závislosti na výšce kuličky bondu. Je-li substrát potažen tenkou vrstvou nebo speciálním filmem, pak se indikovaná stříhová síla může zvýšit o 98,1 mN až 200 mN. Některé čipy nemusí být připojeny vodorovně, a proto je třeba dbát na to, aby se nástroj nikdy nedostal do kontaktu s podložkou bondu během testování. (viz Obr. 2.12, Neúspěšný test 4) [9]

Největší problém nastává při provádění testu na jemných bondech. Například jemný bond má kuličky pouze 6  $\mu\text{m}$  vysoké, které můžou být díky pasivaci zapuštěny až 1  $\mu\text{m}$  do podložky. [9]



Obr. 2.12 Počáteční stav, úspěšný test a neúspěšné testy (převzato z [9])

## 2.4 Test klínového bondu stříhem

Zkouška stříhem je užitečná pro hodnocení kvality kapilárních bondů. Společný experiment od NIST a Sandia National Laboratories byl navržen tak, aby mohla být stanovena kvalita klínového bondu. V testu byly použity 3 skupiny Al drátů o průměru 25 μm s obsahem 1 % Si, které byly vyrobeny za pomoci ultrazvukové energie na jednotlivé destičky. Polovina bondů na destičkách (náhodně vybraných) byla zničena tahem. Poté všechny destičky s bondy (i zničené) byly odeslány do Sandie, kde byly provedeny testy poničených i zdravých bondů. Údaje z testů jsou uvedeny na Obr. 2.13. [9]

Je-li je bond oslabený u své paty, tažná síla  $F$  klesá se zvyšující se deformací bondu. Test stříhem je nezávislý na stavu paty bondu, ale je závislý na skutečné velikosti svařené plochy. Vysoké hodnoty stříhové síly mohou být získány i z klínových bondů s prasklým nebo úplně přetrženým krkem. Stříhová zkouška není vhodná pro hodnocení Al klínových bondů malých průměrů. Stříhové zkoušky se nejčastěji používají pro klínové bondy s velkým průměrem mikrodrátku. [9]

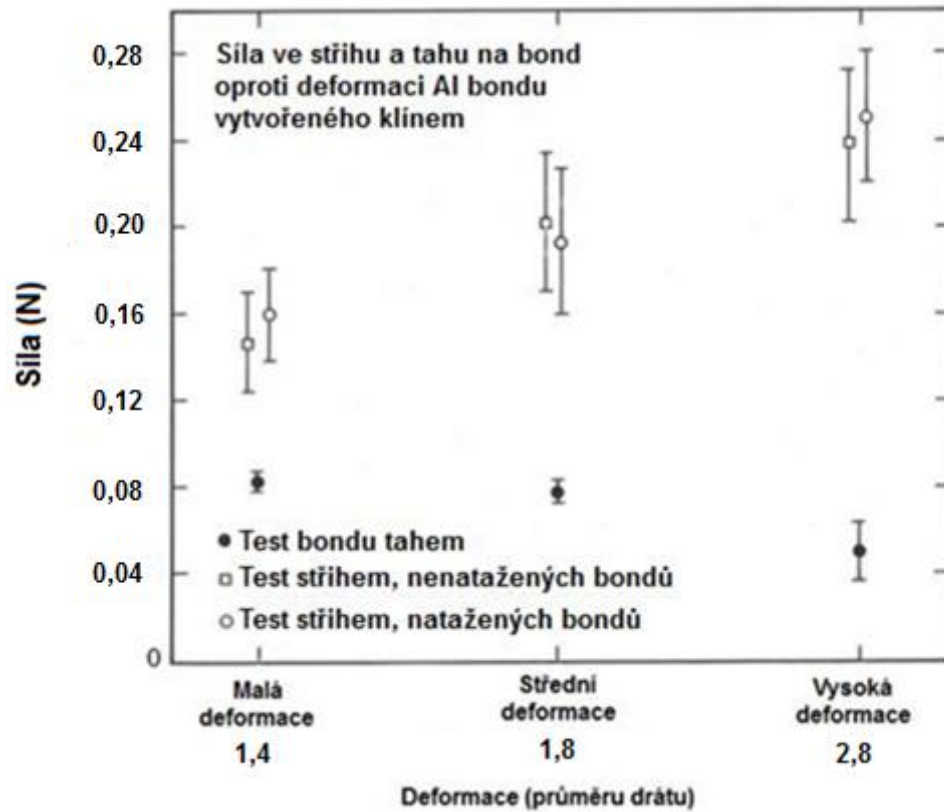
Pokud je testován Al drátek o průměru 250 μm s délkou paty 750 μm, pak stříhová síla bude přibližně 10 – 20 N, za předpokladu, že rozhraní je plně svařené. Hodnota pevnosti bondu ve stříhu lze definovat pro velké klínové bondy pomocí vztahu (1-4). Tento vztah může být využit pro porovnání kvality bondů, které mají různé velikosti mikrodrátku a odlišnou délku paty, kde  $SS$  je síla vztažená na plochu. [9]

$$SS_{klínový\ bond} = \left( \frac{SF}{L \times W} \right) [N/m^2] \quad (1-4)$$

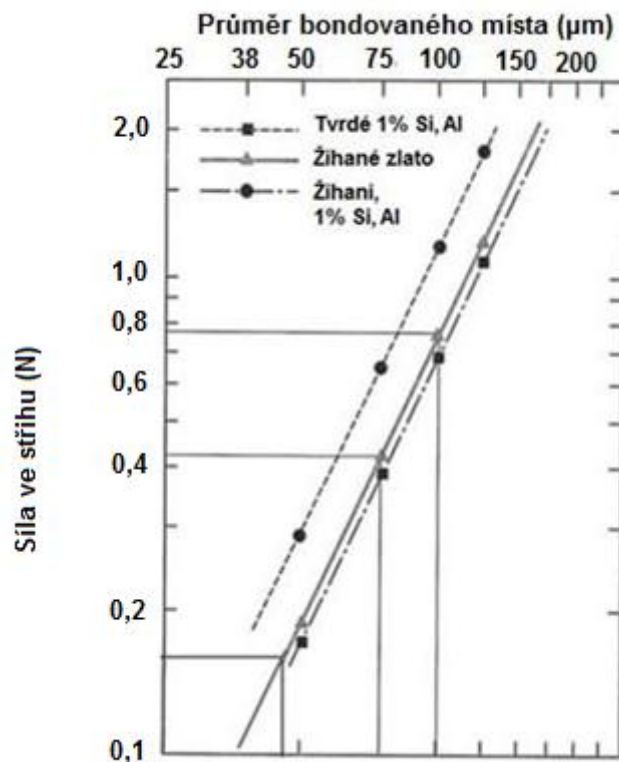
Kde  $SF$  je velikost stříhové síly v N,  $W$  je šířka rozhraní a  $L$  délka bondu. Zkoušku stříhem, při snižující se rozteči bondů, je obtížné provést, pokud rozteč jednotlivých kapilárních bondů klesne pod 50 μm. Pokud se navíc zmenší i bondovaná plocha, test stříhem již není možné provést. Test tahem se poté stává jediným způsobem pro zhodnocení kvality a síly kapilárního bondu. Tento test je založen na předpokladu, že alespoň 75 % svařované plochy je svařeno správně. Pokud se velikost svařované plochy přibližuje průměru mikrodrátku, pak je test tahem nejlepším způsobem zhodnocení kapilárního bondu a může být použit místo testu stříhem. [9]

Páskové bondy s minimální výškou poutka 12 μm nebo vyšší lze také testovat se stříhovým testerem. Optimální hodnoty stříhové zkoušky pro páskové bondy a velké průměry mikrodrátku lze získat z křivky na Obr 2.14. [9]





Obr. 2.13 Graf hodnot z testu tahem a stříhem na Al klínových bondech o násobcích 1,4; 1,8 a 2,8 deformace paty klínu a průměru 25  $\mu\text{m}$  (převzato z [9])

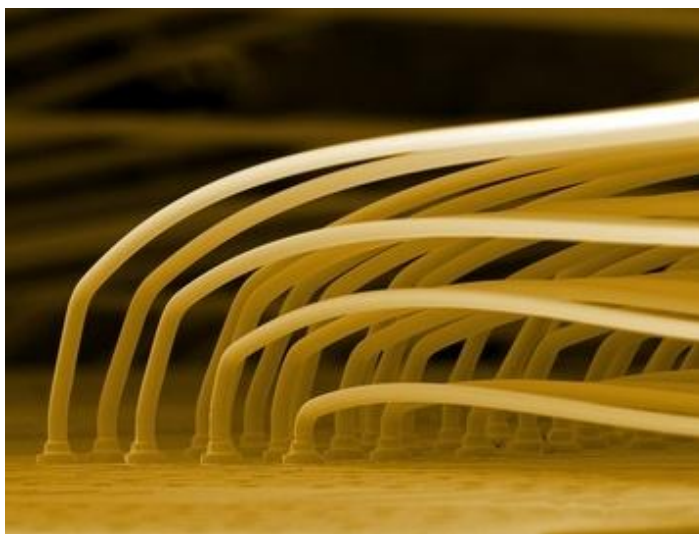


Obr. 2.14 Síla ve stříhu vs. průměr bondovaného místa (převzato z [9])

## 2.5 Nedestruktivní zkouška tahem

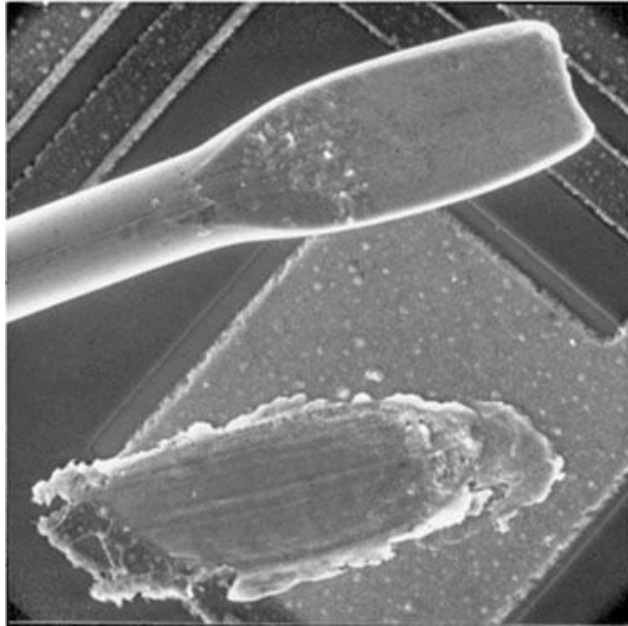
V roce 2008 byl nedestruktivní test tahem používán pouze v několika specializovaných oblastech. Nedestruktivní testování je příliš drahé a nelze použít pro bondy jemných roztečí. Zkouška se provádí podobně jako destruktivní test tahem s jediným rozdílem, že je předem stanovená hodnota síly působící na poutko. Test je určen pro odhalení slabých bondů a je obvykle aplikován na 100 % základních mikrodrátků u multičipového modulu. [9]

Od konce roku 1960 do devadesátých let 20. století, se nedestruktivní test tahem používal pouze pro zařízení vojenského a kosmického výzkumu, kde byla potřeba vysoká spolehlivost. Přibližně na konci tohoto období se začaly využívat vícevrstvé bondy. Bylo velmi obtížné, nedestruktivně tahat překrývající se mikrodrátky, tak aby háček nepoškodil ostatní mikrodrátky nebo nezpůsobil přiblížení jednotlivých vrstev mikrodrátků. NASA a armáda U.S.A. provedla alternativní statistické řízení procesů pro způsob bondování, které nahradilo nedestruktivní test tahem. Statistické řízení procesů bylo prováděno pro pouzdra s 84 nebo více externími piny. [9]



Obr. 2.15 Ukázka zlatých vícevrstvých bondů (převzato z [9])

Krátce poté provedlo několik společností hodnotící studie z nedestruktivních testů tahem, informace z nich sloužily pro interní účely a zůstaly nepublikované. Z nich pouze vědec Polcari uznával význam geometrie bondů. Polcari dále opakovaně zatěžoval mnoho bondů zvolenou silou nedestruktivním testováním v tahu a zjistil, že některé bondy vydrží tuto zkoušku 100x a jiné selhaly již po pátém pokusu. Průměrný bond vydržel zhruba 50 po sobě jdoucích testů, než selhal. Nicméně, standardní odchylky destruktivního testu tahem byly poměrně velké. Mnoho z těchto bondů bylo namáháno za hranici jejich pružnosti. [9]



Obr. 2.16 Odhalení špatného bondu po nedestruktivním testu tahem (převzato z [9])

Nedestruktivní tažná síla je specifická pro každý průměr mikrodrátku (ASTM F 458-06, MIL-STD-883 G/H, Method 2023.5 a MIL-PRF-38535). Typické hodnoty tažné síly pro Al mikrodrátek o průměru 25  $\mu\text{m}$  jsou 19,6 mN a 23,5 mN pro Au drát. Test většinou přetrhne velmi silně svařené bondy, které mají kvůli obalu nebo z jiných důvodů velmi nízká poutka. Při testu nesmí být překonána mez pružnosti mikrodrátku. [9]

## 2.6 Speciální testy kvality bondů

Průmysl používá různé techniky pro měření kvality bondů. Nejčastěji používané techniky jsou: vizuální kontrola, test tahem, stříhové zkoušky, leptání bondu, elektrické zkoušky, test extrémní teplotou, test tepelným cyklem / teplotním šokem, elektromagnetickou rezonancí, metodou povrchové analýzy. [10]

### 2.6.1 Leptání bondu

Leptání bondu testuje stav vrstev podložky pod bondem po bondování. Pomocí této techniky je kulička bondu a metalizovaná podložka odstraněna. Metodou mokrého leptání můžeme zjistit podpovrchové škody způsobené bondovacím zařízením. Tato metoda může také sloužit jako nástroj pro optimalizaci parametrů bondování. Typicky se používají chemické roztoky NaOH a KOH k odstranění propojovacího materiálu a odhalení základní struktury. Tato metoda umožňuje zjistit, zda ke kráterovému poškození došlo i pod padem bondu. [10]

### 2.6.2 Test vibracemi

Při testu vibracemi se zařízení s bondy pevně připevní k vibrační desce, a podrobí se náhodným frekvencím a síly vibrací. Náhodné vibrace mají za úkol napodobit vibrace při provozu zařízení a zjistit jestli bondy v zařízení jsou kvalitní. Většina bondů s velkou intermetalickou vrstvou ve sváru se odhalí náhodnými vibracemi nebo tepelným testem. [16]

### 2.6.3 Test extrémní teplotou

Tento test se zaměřuje na mikroelektronické zařízení skladované při vysokých teplotách a bez elektrického napětí. Vady způsobené tímto testem se projevují ve formě zvýšeného odporu bondu, elektrickým šumem a nadměrným množstvím intermetalické sloučeniny vytvořené na přechodu Al padu a Au mikrodrátku. Substrát s vytvořenými bondy je vystavován extrémní teplotě 300 °C po dobu 1 hodiny ve vzduchu nebo v ochranné atmosféře. Pevnost spoje se poté zkouší v souladu s MIL-STD-883, metoda 2011. [3]

### 2.6.4 Test tepelným cyklem

Největší namáhní v bondu je při testování tepelným cyklem. Používá se pro zhodnocení spolehlivosti elektronických systémů. Tepelný cyklus stanovuje různé rozsahy teplot pro různé produkty a závisí na úrovni požadavků spolehlivosti. [15]

Pro definování tepelného cyklu jsou důležité dva klíčové parametry: rozsah provozní teploty a teplotní rychlost změny. Při rychlých teplotních změnách nastává problém s kondenzací vody, proto je nutné sledovat při testu i hodnoty rosného bodu. [15]

Tab. 3. Některé standardní zkušební podmínky pro tepelný cyklus [15]

min. teplota / čas	max. teplota / čas	Standard
-25 °C / 10 min	125 °C / 10 min	EIAJ ED-4701-3
-40 °C / 10 min	85 °C / 10 min	IEC60749
-55 °C / 10 min	100 °C / 10 min	IPC9701A
-65 °C / 30 min	125 °C / 30 min	MIL-STD-202 DM 107C
-65 °C / 30 min	150 °C / 30 min	MIL-STD-202 DM 107C

Mezi teplotní test patří i zkouška teplotně – vlhkostním cyklem. Tento test se většinou provádí pro křemíkové zařízení, která se vystavují vysoké relativní vlhkosti při konstantní teplotě. [15]

Tab. 4. Hodnoty pro testování teplotně – vlhkostním cyklem [15]

Čas	Teplota	Relativní vlhkost vzduchu
1 hod	85 °C	85 %

### 2.6.5 Elektrické testování

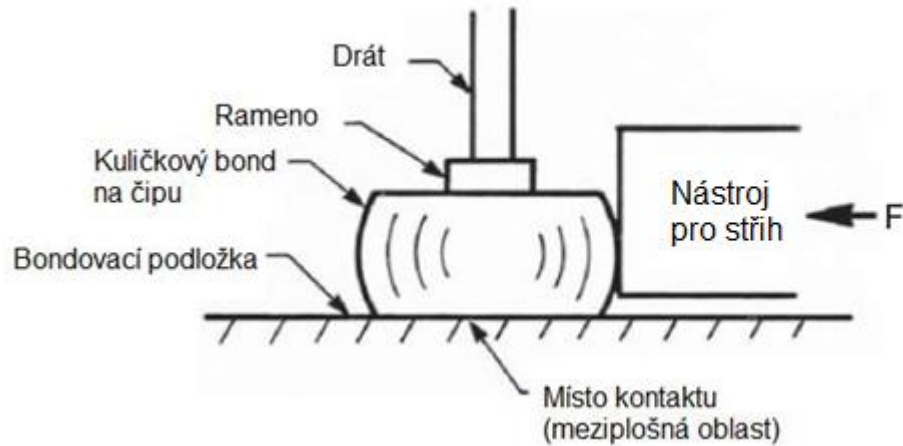
Elektrické testování ověřuje kvalitu bondovaného spoje. Nepřiléhající bond se projeví v přerušeném elektrickém obvodu, zatímco správně svařený bond způsobí zkrat. Existují dvě speciální techniky jako je testování „čtyřbodovou sondou,“ které slouží pro měření elektrického odporu na rozhraní svařované oblasti. Spolu se zvyšováním intermetalické vrstvy se zvedá elektrický odpor propojení. [10]

## 3 Zařízení vhodná pro testování

### 3.1 Zařízení pro test stříhem

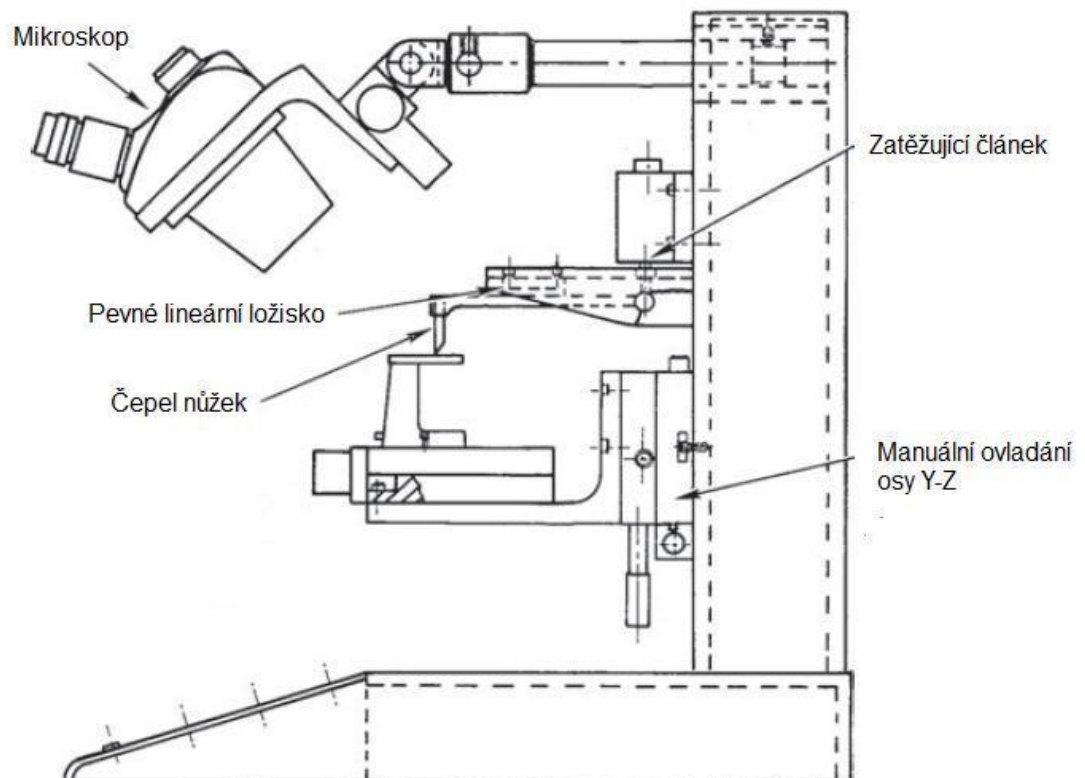
Zařízení pro testování pevnosti bondu stříhem vytvořeného kapilárou, se postupně vyvíjela od pinzety a jiných ručních sond až na jednoúčelový přístroj pro testování stříhem s tenzometrickými snímači síly, automatickým výškovým polohováním a elektronickým záznamem dat. V zásadě platí, že test pevnosti bondu stříhem je jednoduchý a skládá se z nástroje, který tlačí z boku na kuličku bondu a vytváří v něm stříhové napětí, které zaznamenává. Test je znázorněn na Obr. 3.1. [9]

Jellison navrhl přesný mechanický systém s tenzometrickým odečítáním sil. Návrh tohoto zařízení je zobrazen na Obr. 3.2. Tento tester musí být připevněn na lineárních ložiskách, které přenášejí zatížení z nástroje (nůžek) na tenzometr. Vzorek je pevně upevněn ve vodorovné poloze pro možnost pozorování mikroskopem. Stříhový nástroj je rozšířen z držáku směrem dolů tak, aby bylo možné testovat i v hlubokém obalu. Motor pohybuje vzorkem pro provedení testu pevně danou rychlostí 0,2 mm/s. [9]



Obr. 3.1 Princip testu stříhem kuličkového bondu [9]

V současné době existuje mnoho komerčních přístrojů pro testování stříhem. Nejlepší z nich mají automatické nalezení vertikální polohy a záznam dat z průběhu testu. Dále mohou být propojeny s počítačem a tiskárnou pro konečnou analýzu dat. Mezi hlavní rozdíly mezi moderními testery stříhu a testerem z Obr. 3.2 je, že Jellison pohyboval podložkou přístroje, zatímco dnešní testery pohybují pouze čepelí nůžek, mají samozřejmě větší přesnost měření a mohou být poloautomatické. [9]



Obr 3.2 První přesný stříhový tester pevnosti bondů vytvořených kapilárou (převzato z [9])

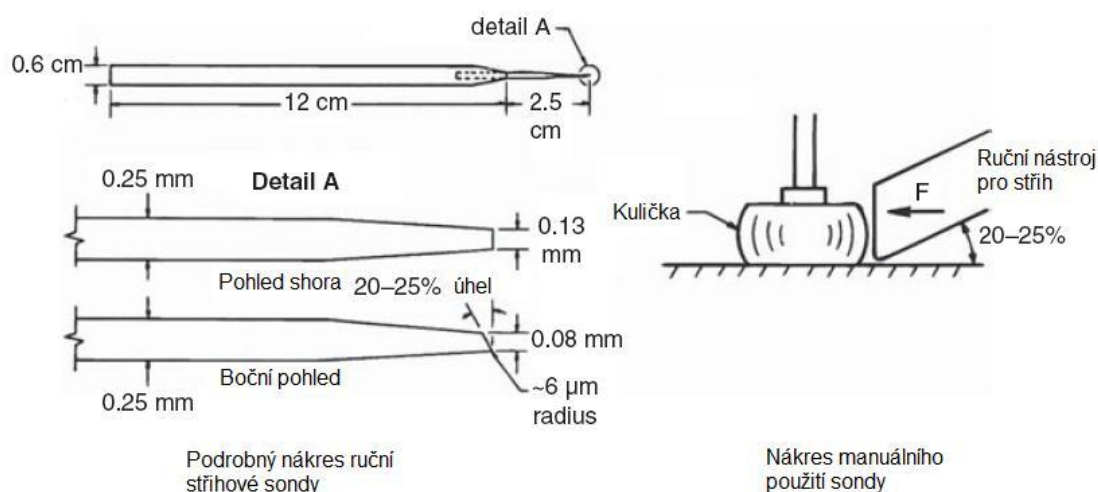
### 3.2 Ruční stříhová sonda

Vždy je žádoucí, aby přesnost testu stříhem byla kvantitativní. Pokud však takový tester není k dispozici, lze jej jednoduše nahradit. [9]

Nejjednodušší a nejdostupnější nástroj pro ruční testování bondů je pinzeta, která je na jednom konci zúžena. Po několik let se pinzety využívaly pro ruční testování. Avšak pinzeta pro testování bondů vytvořených kapilárou většinou nestačila, zejména pokud byla kulička bondu silně svařena s podložkou a proto byla navržena jednoduchá ruční sonda na Obr. 3.3, je kresba sondy, která je vhodná pro testování kapilárních bondů z mikrodrátku o průměru 33  $\mu\text{m}$ . Nástroj je však možné vyrobit během několika minut, pomocí menšího brusného kotouče a šroubováku ze standardního klenotnického setu. Vybraný šroubovák může být ručně zúžen nebo obroušen smirkovým papírem, aby měl přibližné rozměry jako na Obr. 3.3, detail A. [9]

Při testování je vzorek umístěn na pevném držáku ve stejné výšce, jako je sonda. Drží-li se sonda jako tužka a přibližujeme se k povrchu pod úhlem asi 20° až 25°, který odpovídá úhlu na špičce nástroje, bond je poté vytlačován z padu přibližně kolmo k jeho poloměru. Dále se při testu používá mikroskop s více než 30x násobným zvětšením.

Silné kapilární bondy mají obvykle sílu ve stříhu  $\geq 0,48$  N. Údaj o pevnosti vazby lze často získat tím, že sledujeme deformaci kapilárního bondu. Tyto techniky jsou vhodné pro různé experimenty bondování. [9]



Obr. 3.3 Vlevo je podrobný nákres ruční stříhové sondy a vpravo je skica sondy v provozu (převzato z [9])

Ruční sonda by neměla být používána k získávání kvantitativních údajů. Především se používá k rychlému nastavení ručního bonderu a pro bondování s experimentálními

systemy a čipy. Často se používá v oblasti výzkumu a vývoje v laboratořích, ale nikdy ne v produkčních oblastech. Manuální sonda nelze použít pro hodnocení velmi jemných kapilárních bondů. [9]

### 3.3 Testovací háček

Velikost testovacího háčku se vždy odvíjí od průměru mikrodrátku, ze kterého je bond vytvořen.

Tab. 5. Průměr háčku dle průměru mikrodrátku [20]

Průměr mikrodrátku [mm]	Průměr háčku
0,051	min 2 x Ø drátku
0,051 - 0,127	min 1,5 x Ø drátku
0,127	min 1 x Ø drátku

Tab. 6. Hodnoty používané při nedestruktivním testu tahem [20]

Průměr Al a Au drátku [mm]	Tažná síla pro Al drátek [mN]	Tažná síla pro Au drátek [mN]
0,018	12	16
0,025	20	24
0,032	25	32
0,033	25	32
0,038	30	40
0,076	95	120

### 3.4 Jednoučelový tahový tester Royce 610

Ukázka přístroje na Obr. 3.4

Parametry:

- Výstup dat do PC využívající port RS232
- Jednoduchá kalibrace rozhraní umožňující uživateli rychle a snadno kontrolovat a kalibrovat přístroj dle pokynů na obrazovce
- Možnost tisku naměřených dat přímo z přístroje





Obr. 3.4 Tester Royce 610 (převzato z [18])

### 3.5 Multitester Royce 620

Tester Royce 620 umožňuje oproti předchozímu typu testovat tahem i stříhem. Ukázka testeru je na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Tester Royce 620 (převzato z [18])

### 3.6 Univerzální tester Royce 650

Tento tester umožňuje provádět většinu zkoušek potřebných pro zhodnocení kvality bondu.



Obr. 3.6 Univerzální tester Royce 650 (převzato z [18])

Tab. 7. Porovnání jednotlivých testerů Royce [18]

Série	650	620	610
Maximální síla pro test tahem	100 N	100 N	1 N
Maximální síla pro test stříhem	2000 N	50 N	-
Celková přesnost systému	± 0.1 %	± 0.1 %	± 0.25 %
Rozlišení osy Z	± 0.1 μm	± 0.1 μm	± 2,5 μm
Manipulace	pomocí joysticku	manuální	manuální

### 3.7 Manuální tester pro test tahem West Bond 70 PTC

West Bond 70 PTC umožňuje pohodlný způsob umístění háčku pod poutkem a testuje pevnost bondu v tahu, v destruktivním nebo nedestruktivním režimu. Je to velmi vhodný nástroj pro testování pevnosti mikrodrátku v tahu, má otočné rameno s háčkem, což velmi usnadňuje provádění testu. Testovací zařízení zpracovává data s rozlišením 0,1 g s přesností +/- 0,2 g. Testovaná data je možné přenést pro vyhodnocení do PC pomocí portu RS232. [19]



Obr. 3.7 Testovací zařízení West Bond 70PTC (převzato z [19])



Obr. 3.8 Ovládací panel zařízení West Bond 70PTC (převzato z [19])

### 3.8 Univerzální tester Dage Series 4000

Tento tester je schopen provádět test stříhem i test tahem, data zaznamenává do PC a okamžitě je vyhodnocuje. Cena tohoto testeru se pohybuje v řádech desetitisíců dolarů. Výhodou tohoto testeru je automatická kalibrace. [17]



*Obr. 3.9 Testovací zařízení Dage Series 4000 (převzato z [17])*

## Závěr

Bondování se za posledních pár let stalo velmi atraktivní metodou spojování. S touto technikou se objevila i řada nových metod pro testování. Dnes se nejvíce využívá bondování pomocí kapiláry.

Pro kvalitní posouzení kvality bondu je třeba zvolit vhodnou metodu testování. Nejčastěji se bond testuje ve stříhu a v tahu. Každý z těchto testů umožňuje zhodnotit kvalitu bondu a sváru. Má-li být bond otestován opravdu důkladně je potřeba provést tři základní testy. Nejprve se zpravidla provádí vizuální metoda, u které postačí ke kontrole geometrie bondu mikroskop. Následuje nedestruktivní testování bondu tahem, při kterém se projeví většina vad. V poslední fázi jsou bondy testovány stříhem. Dříve byla prováděna vizuální kontrola s mechanickým testováním jen pro zařízení, u kterých je vyžadována vysoká spolehlivost.

Důležitá změna v testování stříhem nastala, když rozteč kapilárních bondů klesla pod 50  $\mu\text{m}$  a zkouška se stala již nepraktická. Poté nezbývá jiná možnost než testovat nedestruktivně tahem za předpokladu, že svár tvoří alespoň 75 % z celkové svařované oblasti.

Je-li velikost této oblasti ekvivalentní k průměru mikrodrátku, test tahem není postačující a musí být provedena také zkouška stříhem. Dnes již toto hodnocení kvality vyhodnotí některý z univerzálních testerů automaticky.

Testování bondů v následujících letech bude ovlivněno stále jemnějšími roztečemi bondovacích podložek a snížením velikosti samotných bondů. Například při testu tahem je stále obtížnější se snižováním velikostí dostat háček pod mikrodrátku. Ve vícevrstvých bondech se snižuje náklon a výška poutka bondu. To bohužel komplikuje použití destruktivního testu tahem. Běžný postup pro vícevrstvé bondy je otestovat každou úroveň od shora dolů. Některá poutka jsou příliš malá, že pod ně nelze vložit háček, proto u nich není možné použít nedestruktivní ani destruktivní test tahem.

Pro test stříhem u kapilárních bondů se toho moc nezmění, se snižováním velikosti kuličky u bondu bude potřeba více přesný nástroj pro stříh, lepší nastavení výšky a užší stříhové nože, které se ale rychleji opotřebovávají.

V bakalářské práci jsou shrnuty veškeré poznatky o mikrodrátkovém bondování, především pak o testování bondovaných spojů. Tyto poznatky budou následně použity při výuce.

## Použitá literatura

- [1] Kontaktování čipu: Připojování čipů na kontakty základny [online]. web ČVUT [cit. 2012-04-16].  
Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Kontaktovani%20cipu.pdf>
- [2] KIM, Eli. Wire bonding techniques [online]. [2004] [cit. 2012-04-16].  
Dostupné z: <http://www.empf.org/empfasis/july04/wire.htm>
- [3] LAI, Zonghe. EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE OF Ni/Au METALLIZATION ON BONDABILITY OF FR-4 SUBSTRATE: The Swedish Institute of Production Engineering Research [online]. Sweden, 9.7.2000 [cit. 2012-04-16].  
Dostupné z: <http://extra.ivf.se/ngl/A-WireBonding/ChapterA.htm>
- [4] Capillary wire bonding: The ball bonding. *Gaiser Tool company* [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.gaisertool.com/products/cap/1.pdf>
- [5] Wedge bonding: The bond foot. *Gaiser Tool company* [online]. [cit. 2012-04-17].  
Dostupné z: <http://www.gaisertool.com/products/wedge/1.pdf>
- [6] University of Essex Nanofab: Wire bonding. *University of Essex Nanofab* [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://privatewww.essex.ac.uk/~bolat/wirebonder/Image20.gif>
- [7] Wire Bonding. *NASA* [online]. [cit. 2012-05-04].  
Dostupné z: [https://nepp.nasa.gov/wirebond/wirebonder\\_history.pdf](https://nepp.nasa.gov/wirebond/wirebonder_history.pdf)
- [8] Wire bonding: For Microwave and Millimeter-Wave, on a low budget. *QSL* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: [http://www.qsl.net/ct1dmk/wire\\_bonding.pdf](http://www.qsl.net/ct1dmk/wire_bonding.pdf)
- [9] HARMAN, George. *Wire Bonding in Microelectronics*. London: McGraw-Hill Prof Med/Tech, 2010. ISBN 0071476237.
- [10] The Quality Test of Wire Bonding. WANG, Caiyuan. *Modern Applied Science* [online]. December 2009 [cit. 2012-05-16].

Dostupné z: <http://ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/download/4589/3928>

[11] Wire Bond Strength Tests. *Wire Bond Strength Tests* [online]. May 2010 [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://home.fnal.gov/~kubik/WirebondStrengthTesting05Feb2010.doc>.

[12] CHARLES, H.K. *Ball Bond Shear Testing: An Interlaboratory Comparison*. Atlanta, Georgia: Comparison, Proc. 1986 Intl Symp. for Microelectronics (ISHM), Oct. 6–8, 1986.

[13] Bc. LIBICH, Termomechanické namáhání bezolovnatého pájeného spoje. Brno, 2011. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

[14] POLCARI, S. M. and BOWE, J. J., *Evaluation of Non-Destructive Tensile Testing, Report No. DOT-TSC-NASA-71-10*, June 1971

[15] Testing of Wire Bonds. *BONDING Laboratory* [online]. 2010 [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: [http://bondlab-ga.web.cern.ch/bondlab-ga/Pull\\_test.html](http://bondlab-ga.web.cern.ch/bondlab-ga/Pull_test.html)

[16] *Advanced Wirebond Interconnection Technology* [online]. 2005 [cit. 2012-06-03]. ISBN 1402077629.

Dostupné z:

[http://books.google.cz/books?id=uZqKr5jw0O4C&pg=PA555&lpg=PA555&dq=bake+test+bond&source=bl&ots=lg3qJVq61k&sig=AF06BIpTwdbyIkPszv1UJ7gbx1g&hl=cs&sa=X&ei=jI\\_LT9jDIeOuSW3OgP&ved=0CGMQ6AEwBA#v=onepage&q=bake%20test%20bond&f=true](http://books.google.cz/books?id=uZqKr5jw0O4C&pg=PA555&lpg=PA555&dq=bake+test+bond&source=bl&ots=lg3qJVq61k&sig=AF06BIpTwdbyIkPszv1UJ7gbx1g&hl=cs&sa=X&ei=jI_LT9jDIeOuSW3OgP&ved=0CGMQ6AEwBA#v=onepage&q=bake%20test%20bond&f=true)

[17] CASE STUDY. *Nordson Company* [online]. 2004 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: [http://www.nordson.com/en\\_us/divisions/dage/support/Literature/Documents/Dage\\_Kulicke%20and%20Soffa\\_Case\\_Study230209.pdf](http://www.nordson.com/en_us/divisions/dage/support/Literature/Documents/Dage_Kulicke%20and%20Soffa_Case_Study230209.pdf)

[18] Dedicated Wire Pull Bond Tester. *Royce Instruments* [online]. © 2012 [cit. 2012-06-05]. Dostupné z: <http://www.royceinstruments.com/bond-testers/royce610.html>

[19] Pull test machines. *WEST BOND* [online]. © 2010 [cit. 2012-06-06].

Dostupné z: <http://www.westbond.com/70ptc.htm>

[20] NONDESTRUCTIVE BOND PULL. *Q-TECH* [online]. 1994 [cit. 2012-06-06].

Dostupné z: [http://www.q-tech.com/assets/tests/std883\\_2023.pdf](http://www.q-tech.com/assets/tests/std883_2023.pdf)



## Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje bakalářská práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

<i>Jméno</i>	<i>Fakulta / katedra</i>	<i>Datum</i>	<i>Podpis</i>

