

# Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah

P. Harant<sup>1</sup>, F. Steiner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : harantp@ket.zcu.cz, steiner@ket.zcu.cz

## Anotace:

Článek pojednává o pájitelnosti a o jejím testování. Pájitelnost je vysvětlena coby důležitá vlastnost povrchů, které mají být spojeny strojním pájením. Příspěvek je zaměřen na testování pájitelnosti měřením časového průběhu smáčecí síly, nebo-li test metodou smáčecích vah. Dále jsou popsány normalizované zkoušky pájitelnosti a některá standardizovaná kritéria posuzování pájitelnosti. V závěru práce je popsán tester pájitelnosti MUST SYSTEM II Plus a možnosti testování pájitelnosti pomocí tohoto přístroje.

## ÚVOD

V průběhu několika let došlo zcela ke změně výrobního postupu při tvorbě pájeného spoje. Klasické součástky byly pájeny ručně a každý pájený spoj byl tak ihned po vytvoření kontrolován. Bylo tedy velmi snadné vadný spoj odhalit a případně opravit. Tento proces byl však příliš výrobně i časově náročný.

Přešlo se ke strojnímu pájení. Omezila se pájecí teplota i doba na vytvoření pájeného spoje. Zvýšila se také hustota pájených spojů na desce. Nalezení vzniklé chyby a její následné opravení se stalo obtížnější.

Nyní se zavedením bezolovnatých pájek do výroby, kde povrchové napětí bezolovnaté pájky je vyšší než u pájky s olovem, dochází obecně k menšímu smáčení pájených povrchů. Smáčivost závisí také na vhodné povrchové úpravě vývodů součástek i pájecích plošek desek plošných spojů. Důležitost zavedení hodnocení pájitelnosti tak ještě vzrostla. [1]

## PÁJITELNOST

Pájitelnost je komplex vlastností udávajících vhodnost pro průmyslové pájení. Pájitelnost je v úzkém vztahu ke schopnosti materiálu být smáčen roztavenou pájkou a obsahuje 3 hlediska:

- **smáčivost:** povrch musí umožnit smáčení materiálu roztavenou pájkou během doby vhodné pro vytvoření pájeného spoje a to bez odsmáčení

- **teplotní požadavek:** pájené součástky musí umožnit ohřev plochy určené k pájení na požadovanou teplotu během požadované doby

- **odolnost vůči teple při pájení:** teplo a s tím související teplotní namáhání pájených dílů nesmí ovlivnit funkci součástek před definovaným limitem.

### Smáčivost povrchu roztavenou pájkou

Smáčivost je první fází vzájemného fyzikálně-chemického působení atomů roztavené pájky na povrch spojovaného materiálu. Při smáčení začínají působit meziatomární síly. Na místech mezi-fázového rozhraní tak postupně vznikají vazby, které se rozšiřují po celé ploše styku. Dochází přitom ke

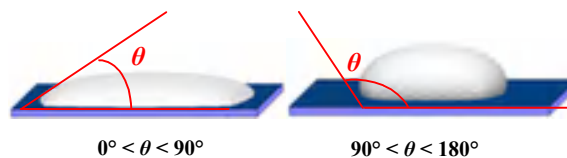
snížení volné povrchové energie systému. Během procesu smáčení se dva volné povrchy - roztavená pájka a tuhý kov - mění v jedno mezifázové rozhraní. Na tomto mezifázovém rozhraní přecházejí atomy roztaveného kovu do mřížky tuhého kovu. Dochází ke spojování valenčních elektronů jednotlivých kovů a k vytvoření kovové vazby.

Proces smáčení může probíhat bez nebo s chemickou reakcí na rozhraní. Jedná se potom o fyzikální nebo chemické smáčení.

- **fyzikální smáčení:** ve své podstatě je to adhezni spojení (např. u Pb-Cu). Při smáčení povrchu roztavenou pájkou neproběhne chemická reakce na rozhraní a nedojde ke změně chemického složení. Adhezni spoj má menší pevnost ve smyku a v ohybu, ale dobrou elektrickou vodivost.

- **chemické (reaktivní) smáčení:** procesy rozpouštění nebo difúze dojde k vytvoření společné fáze na rozhraní liquidu a solidu, tj. musí zde dojít k vytvoření tuhého roztoku nebo intermetalické fáze, přičemž vzájemná rozpustnost kovů může být jen nepatrná. Vzniká přechodová oblast určité tloušťky.

Pájka se roztéká po povrchu, dokud nedosáhne optimálního energetického stavu. Úroveň smáčení povrchu pájkou je podmíněna velikostí aktivních rozhraní i energetickými předpoklady. Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti - tzv. kontaktním (smáčecím) úhlem (obrázek 1). [2]



Obr. 1: Kontaktní smáčecí úhel  $\theta$

Podle velikosti stykového úhlu rozeznáváme různé stupně smáčení. Dokonalá nebo úplná smáčivost nastává při  $\theta = 0$ . Velmi dobrá smáčivost nastává při  $\theta < 20^\circ$ . Dobrá smáčivost nastává při  $20^\circ < \theta < 90^\circ$ . Je-li stykový úhel  $\theta > 90^\circ$ , jedná se o smáčivost špatnou.

Smáčivost (smáčecí doba, smáčecí síla, roztečení při smáčení) bývá ovlivněna viskozitou, hustotou, povrchovým napětím, typem povrchové úpravy, morfologií povrchu i okolní atmosférou. Dopad těchto vlivů je nutné testovat. Smáčecí charakteristiky lze hodnotit ve statickém režimu, tj. v ustáleném

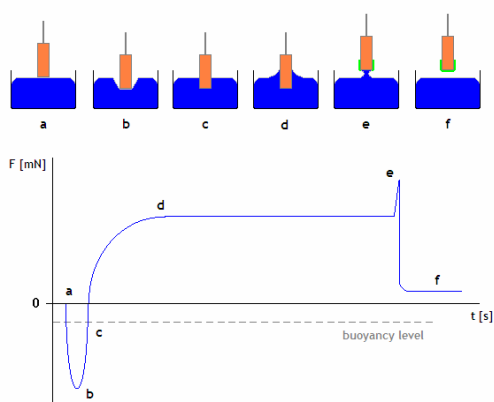
stavu a v režimu dynamickém, tj. za procesu smáčení. Smáčecí charakteristiky jsou výslednicí jednotlivých působících sil mezifázového povrchového napětí. Pro hodnocení dynamických vlastností se nejčastěji používá metoda smáčecích vah, která je popsána v následujícím textu.

## ZKOUŠKY SMÁČIVOSTI

Účelem zkoušek smáčivosti je za řízených podmínek přivést zkušební vzorek a pájku dohromady tak, aby bylo možné posoudit jakost smáčení vzorku v souladu s definovanými kritérii. Při kvalitativních zkouškách smáčivosti je pájitelnost posuzována pouze vizuální prohlídkou. Plně kvantitativní jsou zkoušky, při kterých se měří skutečné charakteristiky smáčení (tj. síla působící na vzorek vlivem povrchového napětí pájky v závislosti na čase). Některé ze zkušebních metod jsou také určeny ke stanovení míry odsmačeni. Odsmačení znamená, že při delším kontaktu zkušební vzorku s roztavenou pájkou se za jistých okolností kontaktní úhel zvětší a pájka se stáhne z povrchu vzorku. Existuje mnoho zkoušek pájitelnosti. Ve standardech jsou udány například zkouška pájecí lázně (ponořovací test), zkouška kuličkou, test roztékavosti a již uvedená zkouška metodou smáčecích vah.

### Teorie testování pájitelnosti metodou měření časového průběhu smáčecí síly

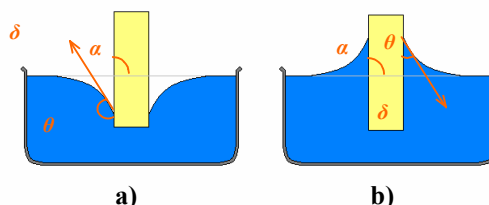
Účelem zkoušky metodou měření časové závislosti smáčecí síly, nebo-li metodou smáčecích vah, je určit smáčivost vývodů libovolného tvaru. Metoda zkoušky používající smáčecích vah měří svislé síly působící na vzorek při ponořování do lázně s roztavenou pájkou nebo do kuličky roztavené pájky v závislosti na čase. Umožňuje tak detailně sledovat průběh velikosti smáčecí síly po celou dobu smáčení. Je definována například v ČSN EN 60068-2-69, ČSN EN 60068-2-54, ČSN EN ISO 9455-16 a ČSN EN ISO 12224-3. Princip testu je znázorněn na obrázku 2.



Obr. 2: Metoda měření časové závislosti smáčecí síly. Vzorky se upevní pomocí speciálních nástavců a zavěsí na citlivý měřicí mechanismus testeru. Poté je zkoumaná část povrchu ponořena ve směru své podélné osy do roztavené pájky o dané konstantní

teplotě. Počátek styku vzorku s pájkou je označen bodem *a*. Teplota vzorku je příliš nízká k podpoře smáčení, vzorek tudíž musí být vtlačován velkou silou. Sklon křivky mezi body *a* a *b* je dán rychlostí, jakou je vzorek ponořován. V bodě *b* pájka začíná smáčet vzorek. Nastává změna působící síly. Pájka nejprve vytlačuje vzorek směrem vzhůru, s postupujícím smáčením ho však začne povrchové napětí táhnout dolů do nádoby. Je nutné vyvinout určitou sílu na jeho vytlačení. Bod *c* je okamžik, kdy je povrch pájky kolmý k povrchu vzorku. Síla v bodě *c* je rovna vztlakové síle a je možné ji vypočítat z rozměrů vzorku, hloubky ponoru a měrné hmotnosti pájky (1). Tvar křivky *b* až *d* je dán rychlostí smáčení a má rozhodující význam pro určení kvality smáčitelnosti. Bod *e* je vrchol křivky a určuje, kdy došlo k úplnému vytažení vzorku z lázně, *f* je konečný stav.

Obrázek 3.a. ukazuje vzorek DPS ponořený do vaničky s roztavenou pájkou na začátku testu. Povrch pájky byl stlačen a síla vyvolaná povrchovým napětím pájky zkouší desku vytlačit ven z vaničky. Ponořený vzorek není dosud smáčen pájkou (kontaktní smáčecí úhel  $\theta > 90^\circ$ ). Síla  $\delta$  vyvolaná povrchovým napětím  $\gamma$  působí tangenciálně k povrchu pájky, pod úhlem  $\theta$  mezi pájkou a vzorkem. Kontaktní úhel  $\theta$  je vždy měřen uvnitř roztavené pájky.



Obr. 3: Smáčení vzorku ponořeného do roztavené pájky. Obrázek 3.b znázorňuje, jak vypadá vzorek na konci testu pomocí smáčecích vah. Síla vyvolaná povrchovým napětím nyní působí dolů a zkouší tak strhnout desku do vaničky s roztavenou pájkou. Kontaktní smáčecí úhel  $\theta$  je nyní menší než  $90^\circ$ . Deska je považována za smáčenou. Pokud má deska dobrou pájitelnost, bude se pájka zdvihát nad hladinu vaničky. Výška vzestupu, potažmo naměřená smáčecí síla, bude záviset na pájitelnosti desky. Výška vzestupu pájky ve skutečnosti reprezentuje měnící se kontaktní úhel mezi roztavenou pájkou a plochou vzorku během testu. Vertikální měřená síla, úměrná kosinu kontaktního úhlu, je dána rovnicí:

$$F = \gamma p \cos \theta - V \rho g \quad (1)$$

Kde:

- $\gamma$  = povrchové napětí roztavené pájky při použití daného tavidla
- $p$  = obvod ponořené části vzorku
- $\theta$  = kontaktní smáčecí úhel
- $V$  = objem ponořené části vzorku
- $\rho$  = hustota roztavené pájky
- $g$  = gravitační zrychlení

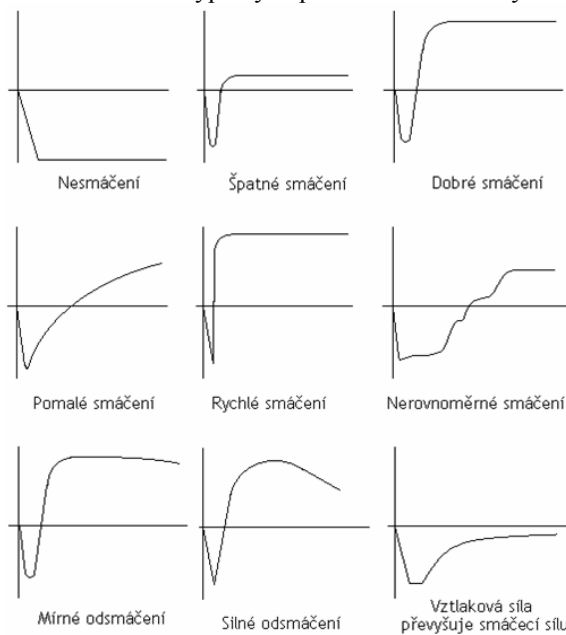
Uvažujeme-li ideální smáčení (tj. kontaktní smáčecí úhel  $\theta = 0^\circ$ ) pak je  $\cos \theta = 1$ . Toto nám umožní

srovnávat smáčivosti získané při měření na skutečných součástkách s teoreticky předpokládanou maximální hodnotou.

Výslednice vertikálních složek vztahové síly a smáčecí síly působící na ponořený vzorek je snímána a následně digitalizována. Takto získaná křivka může být porovnána s křivkou odpovídající ideálně smáčenému vzorku stejného typu a shodných rozměrů.

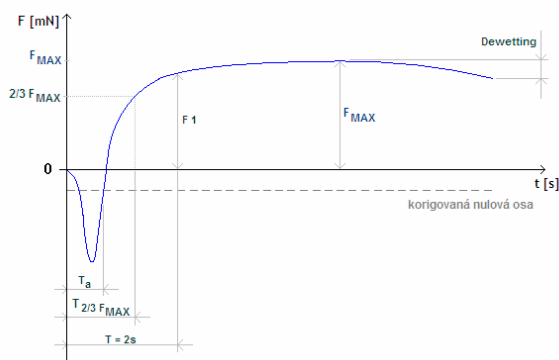
## KRITÉRIA POSUZOVÁNÍ PÁJITELNOSTI

Při posuzování pájitelnosti metodou smáčecích vah se, jak již bylo řečeno, vyhodnocuje časový průběh smáčecí síly. Na následujícím obrázku je pro ilustraci uvedeno několik typických průběhů smáčecí síly.



Obr. 4: Příklady průběhů smáčecích sil

Ve skutečnosti nemusí být posouzení pájitelnosti tak jednoduché nebo jednoznačné. Proto se při zkoušce pájitelnosti metodou smáčecích vah z grafických závislostí (obrázek 5) určuje několik specifických hodnot (podle aplikovaných technických standardů) a pomocí nich je dále možné pájitelnost posoudit.



Obr. 5: Časová závislost smáčecí síly

Pájitelnost lze posuzovat v souladu s mezinárodními normami. V následujícím textu jsou uvedeny

jednotlivé standardy a podmínky, při jejichž splnění je možné považovat pájitelnost za vyhovující. [6]

*MIL-STD-883 C, metoda 2022.1 z roku 1986*

- změna znaménka smáčecí síly v čase nejpozději 0,59 s od začátku měření
- dosažení 2/3 maximální smáčecí síly v čase nejpozději 1 s od začátku měření

*ANSI/J-STD-002 z roku 1992 (IPC-1-002149 z roku 1992)*

- průchod korigovanou nulovou osou (okamžik vyrovnání vztahové a smáčecí síly) v čase do 1 s od začátku měření
- dosažení hodnoty smáčecí síly F200 (síla mající hodnotu 200 mN na každý 1 mm obvodu vývodu) v čase do 2,5 s od začátku měření
- smáčecí síla zůstane nad hodnotou síly z předcházejícího ustanovení alespoň 4,5 s od začátku měření

*IPC-S-805*

- změna znaménka smáčecí síly v čase nejpozději 0,6 s od začátku měření
- dosažení 3/4 maximální smáčecí síly v čase nejpozději 2 s od začátku měření

*IEC 68-2-54 z roku 1985*

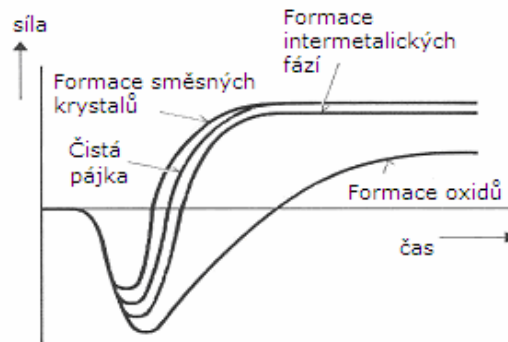
- Tento standard nepředepisuje konkrétní údaje o časech a silách ve fázi počátečního smáčení vzorku. Pájitelnost se hodnotí poměrem síly těsně před vytažením k maximální dosažené smáčecí síle v průběhu jednoho měření. Tento poměr nesmí klesnout pod 0,8.

*Empirický vztah respektující možné odsmáčení při pájení*

$$S = \frac{\text{smáčecí síla po 2s}}{(\text{max. vztahovací síla}) \times (\text{doba smáčení})} \quad (2)$$

Laboratorní zkoušky ukázaly, že u dobře pájitelných vývodů (bez odsmáčení) je hodnota S větší než 5. Nižší hodnoty znamenají nevyhovující pájitelnost, protože při nich již dochází k odsmáčení. [4]

Průběh smáčecí síly je u smáčivých povrchů modifikován i reakčními mechanismy na rozhraní povrchová úprava, tavidlo a pájka.



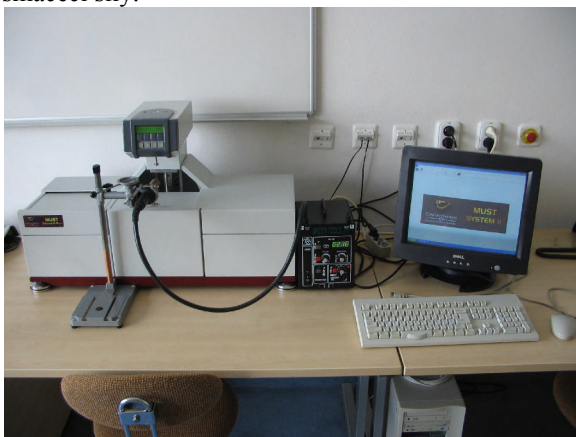
Obr. 6: Příklady ovlivnění smáčecí síly i časového průběhu způsobené změnami na mezifázovém rozhraní

Tím se také potvrzuje tvrzení o nejednoznačnosti a složitosti testování. Tyto reakční mechanismy totiž

vedou k ovlivnění jak velikosti smáčecí síly, tak i časového průběhu smáčení (viz obrázek 6).

## TESTER PÁJITELNOSTI MUST SYSTÉM II

K testování pájitelnosti vývodů součástek a plošek desek plošných spojů lze využít tester pájitelnosti Multicore MUST II (obrázek 7), který umožňuje vyhodnocovat pájitelnost právě pomocí průběhu smáčecí síly.



Obr. 7: Tester pájitelnosti MUST System II Plus [1]

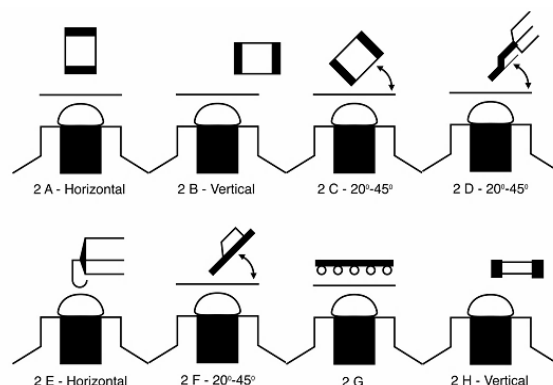
Smáčivost můžeme měřit jak ve vaničce s roztavenou pájkou, tak i pomocí kuličky roztavené pájky (viz obrázek 8). Ve vaničce se testují drátové vývody součástek nebo zkušební kupóny desek plošných spojů.



Obr. 8: Měření smáčivosti pomocí testeru MUST II  
a) ve vaničce s roztavenou pájkou  
b) na kuličce roztavené pájky [1]

Pro měření na kuličce jsou k dispozici čtyři výměnné hlavice pro různé velikosti kuliček. K dispozici jsou kuličky o hmotnosti 5mg, 25mg, 100mg a 200mg. Měření na kuličce se provádí na vývodech SMD součástek (rezistory, kondenzátory atd.), dále pak na vývodech součástek typu SOT, QFP, PLCC a jiných. Možné způsoby umístění součástek při testu je na obrázku 9.

Výběr velikosti kuličky pájky a způsobu uchycení testovaného vzorku je dán normou IEC 60068-2-69. Zde je pro různé typy součástek specifikován úhel ponoru, hloubka ponoru, druh výměnné hlavice a velikost kuličky pájky.



Obr. 9: Způsob uchycení testované součástky při měření na kuličce pájky [1]

Aby při testování pájitelnosti byly určeny hodnoty reprezentující skutečnost, snažíme se nasimulovat takové podmínky, které jsou srovnatelné s podmínkami během procesu strojního pájení. Proto jsou zkušební vzorky při testování vystaveny horkovzdušnému předehřevu (obrázek 10).



Obr. 10: Doplnění testeru MUST II horkovzdušným předehřevem

Při předehřevu dochází k aktivaci tavidla a následnému odstranění nečistot z pájeného povrchu, což vede ke zlepšení jeho smáčivosti.

## SHRNUTÍ

Neboť do procesu pájení vstupuje mnoho faktorů, které negativně ovlivňují výrobu, je potřeba zajistit používání součástek i desek plošných spojů s dobrou a především stálou kvalitou. Kontroly pájitelnosti jednotlivých komponent je nutné provádět před začátkem výroby, nebo se jen spoléhat na osvědčené dodavatele jednotlivých komponentů. Jestliže byly komponenty uskladněny déle než rok, je dobré provést opakovanou zkoušku pájitelnosti před vydáním do výrobní linky. Je snadnější vyměnit součástky se špatnou pájitelností před zapájením, než lokalizovat vadný spoj a napravit chybu na již zapájené desce.

Použití zkušebních metod pro stanovení pájitelnosti je užitečné nejen ve výrobě, ale i v laboratořích. Mnohé metody užívané pro hodnocení pájitelnosti komponent mohou být aplikovány na hodnocení smáčivosti při použití různých tavidel, různých pájek nebo různých materiálů na pokovených vývodech součástí.

Metoda smáčecích vah udává přesně opakovatelné výsledky, které jsou vhodné jednak pro analýzu základních vlastností vývodů součástek, tak i pro charakteristiku pájitelnosti substrátů. Následné komplexní posouzení například pomocí metamorfologie pak umožní stanovit příčinu problému. Zařízení tohoto typu není standardním vybavením menších firem, neboť je testování touto metodou pomalé a finančně náročné.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

## LITERATURA

- [1] Solderability Test System for Surface Mount and Conventional Components MUST II - USER MANUAL, CONCOAT SYSTEMS 2004.
- [2] Steiner, F., Starý, J., Skočil, V. Diagnostika pájitelnosti spojovaných částí v podmínkách bezolovnatých technologií. Plzeň : 9.2.2007. 55 s.
- [3] ČSN EN 60068-2-54 Zkoušení vlivů prostředí – Část 2: Zkoušky – Návod ke zkoušce T: Pájení, Únor 1997.
- [4] IPC/EIA J-STD-003A Joint industry standard – Solderability Tests for Printed Boards, February 2003.
- [5] L. Zou, D Lea, Ch. Hunt, “Solderability Testing of Surface Mount Components and PCB Pads” – Measurement Good Practice Guide No. 66, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom 2004.
- [6] Urbánek, J., *Posouzení pájitelnosti jen podle kritérií norem může být někdy zavádějící.* – SMT Info, Bulletin seminářů, 25.číslo, Pájení a opravy DPS, tredny v mikroelektronice. Brno, 3.-4.11.1998. Dostupné z WWW: <<http://www.smtinfo.cz/bulletiny/urbanek/3-11-1998.htm>>.