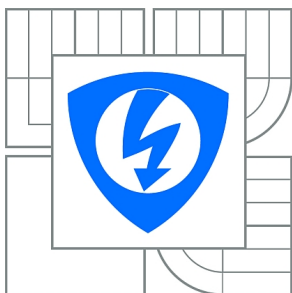


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

VLIV SMÁČECÍCH CHARAKTERISTIK NA SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER JOINT RELIABILITY AND WETTING CHARACTERISTICS INFLUENCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

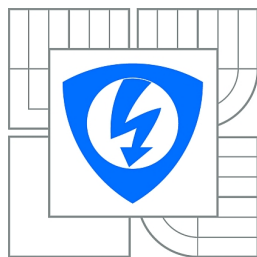
Bc. RADEK LABAJ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Radek Labaj

ID: 78590

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Z dostupné odborné literatury se seznámte s metodou smáčecích vah, problematikou pájecích slitin, tavidel i povrchových úprav.

Navrhněte metodiku testování smáčecích charakteristik pro rozdílné materiálové a procesní vlivy u oboustranně plátovaného základního materiálu.

Aplikujte DOE pro sledování interakcí u smáčecích charakteristik v různých materiálových kombinacích. Dosažené výsledky vyhodnoťte a sledujte korelace smáčecích charakteristik se změnami elektrických a mechanických vlastností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Radek Labaj

Bytem: Pasecká 282, Albrechtice 735 43

Narozen/a (datum a místo): 19.8.1986 v Bohumíně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- | | | |
|---|---|-------------------|
| ☐ tištěné formě | — | počet exemplářů 2 |
| ☐ elektronické formě | — | počet exemplářů 2 |

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá metodikou testování smáčecích charakteristik pro rozdílné materiálové a procesní vlivy u oboustranně plátovaného základního materiálu. Testování probíhá pomocí metody smáčecích vah. Je navržen postup pro výpočet úhlů na jednotlivých stranách nehomogenního materiálu. Pro vyhodnocování výsledků je použita metoda Design of Experiments, pomocí této metody jsou také vyhodnoceny elektrické a mechanické vlastnosti pájeného spoje. Je diskutována korelace se smáčecími charakteristikami.

KLÍČOVÁ SLOVA

smáčení, smáčecí charakteristiky, metoda smáčecích vah, smáčecí úhel, plánovaný experiment, spolehlivost pájeného spoje, pájka, tavidlo

ABSTRACT

This thesis deals with the methodology of testing the wetting characteristics for different material and process effects in the double-plated base material. Testing is performed by wetting balance method. There is designed procedure to calculate the angles on each side of the non-homogeneous material. The Design of Experiments method is used to interpret the results, by using this method are also interpreted electrical and mechanical properties of solder joints. The correlation with wetting characteristics is discussed.

KEYWORDS

wetting, wetting characteristics, wetting balance test, wetting angle, Design of Experiments, solder joint reliability, solder, flux

LABAJ R. *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce 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

.....
(podpis autora)

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat všem ostatním za pomoc a podporu při tvorbě této práce.

OBSAH

Úvod	13
1 Pájený spoj a smáčivost	14
1.1 Požadavky na pájený spoj	14
1.2 Spolehlivost pájeného spoje	15
1.2.1 Stárnutí materiálu	16
1.2.2 Mechanické namáhání	16
1.2.3 Tepelné namáhání	16
1.3 Pájitelnost a smáčení povrchu	17
1.4 Metoda smáčecích vah	21
2 Materiálové faktory	25
2.1 Pájecí slitiny	25
2.1.1 Pájka SnAgCu	25
2.1.2 Pájka SnAg	26
2.1.3 Pájka SnAgBi	26
2.1.4 Pájka SnZnBi	27
2.1.5 Pájka SN100C	27
2.2 Tavidla	28
2.2.1 Tavidlo 979T	30
2.2.2 Tavidlo ECOFREC 202	30
2.2.3 Tavidlo TSF 6592	30
2.3 Povrchové úpravy	30
2.3.1 Galvanické pokovení	31
2.3.2 Chemické pokovení	31
2.3.3 HAL - Hot Air Leveling	31
2.3.4 OSP - Organic Surface Protection	31
3 Design of Experiments	32
3.1 Experiment	33
3.2 Plánování experimentů	34
4 Měření smáčecích charakteristik	36
4.1 Zadání měření	36
4.2 Použité materiály	36
4.3 Postup měření	37
4.4 Grafy naměřených hodnot (Stárnuté v příloze)	38
4.5 Naměřené a vypočtené hodnoty	41

4.5.1	Výpočet úhlu smáčení	42
4.5.2	Průměrné výšky smočeného povrchu	46
5	Aplikace DOE	47
5.1	Testování smáčivosti	47
5.1.1	Faktorový plán pro test smáčivosti	47
5.1.2	Analýza dat	48
5.1.3	Model procesu	51
5.2	Testování vodivosti	52
5.2.1	Faktorový plán pro testování vodivosti po proudovém stárnutí	53
5.2.2	Analýza dat testované vodivosti po proudovém stárnutí	54
5.2.3	Faktorový plán pro testování vodivosti po termálním stárnutí	56
5.2.4	Analýza dat testované vodivosti po termálním stárnutí	56
5.3	Testování pevnosti pájených spojů	58
5.3.1	Faktorový plán pro testování pevnosti	59
5.3.2	Analýza dat testované mechanické pevnosti	59
5.4	Diskuze dosažených výsledků a korelace smáčecích charakteristik . . .	61
6	Závěr	63
	Literatura	65
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	66
	Seznam příloh	68
A	Smáčecí char. pro stárnuté vzorky	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Stykový úhel pro nesmáčivý (nahore) a smáčivý (dole) povrch	15
1.2	Smáčení povrchu roztavenou pájkou	18
1.3	Vzorek ponořený do roztavené pájky	21
1.4	Křivka rovnováhy smáčení	22
1.5	Příklady průběhů časové závislosti smáčecí síly	23
1.6	Síla F_2 a čas $t_{2/3}$	24
2.1	Ternární diagram pájky SnAgCu [8]	25
2.2	Ternární diagram pájky SnAgBi [8]	26
3.1	Obecné schéma procesu	33
4.1	Příklady použitých vzorků	36
4.2	Měřicí pracoviště s meniskografem	37
4.3	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovaná Cu s Ni/Au	38
4.4	Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu s Ni/Au	38
4.5	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu	39
4.6	Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu	39
4.7	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP	40
4.8	Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP	40
4.9	Jednotlivé smáčecí síly působící na různé povrchy	42
4.10	Jednotlivé vzorky	43
5.1	Graf hlavních efektů pro $F_2/t_{2/3}$	49
5.2	Graf hlavních efektů pro $F_2/t_{2/3}$ za použití pouze nestárnutých vzorků	49
5.3	Graf hlavních efektů pro výšku smočené plochy	50
5.4	Graf interakcí pro $F_2/t_{2/3}$	50
5.5	Graf interakcí pro výšku smočené plochy	51
5.6	Graf efektů pro vodivost po proudovém stárnutí	55
5.7	Graf interakcí pro vodivost po proudovém stárnutí	55
5.8	Graf efektů pro vodivost po termálním stárnutí	57
5.9	Graf interakcí pro vodivost po termálním stárnutí	57
5.10	Princip zkoušky stříhem	58
5.11	Graf efektů pro mechanickou pevnost pájených spojů	60
5.12	Místa odtržení součástky	61
A.1	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s Ni/Au	69
A.2	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu	69
A.3	Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP	70

SEZNAM TABULEK

2.1	Složení pájky SnAgCu a SN100C [11]	28
2.2	Fyzikální vlastnosti pájky SnAgCu a SN100C [11]	28
4.1	Naměřené a vypočtené hodnoty pro nestárnuté vzorky	41
4.2	Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky	41
4.3	Hodnoty výšky výšky smočeného povrchu u nestárnutých vzorků . . .	46
4.4	Hodnoty výšky smočeného povrchu u stárnutých vzorků	46
5.1	Úrovně faktorů pro testování smáčivosti	47
5.2	Faktorový plán pro testování smáčení	48
5.3	Úrovně faktorů pro testování vodivosti po proudovém stárnutí	53
5.4	Faktorový plán pro testování vodivosti po proudovém stárnutí	54
5.5	Faktorový plán pro testování vodivosti po termálním stárnutí	56
5.6	Úrovně faktorů pro trhací zkoušky	58
5.7	Faktorový plán pro testování mechanické pevnosti	59
5.8	Četnosti defektů	60
5.9	Hodnoty smáčivosti, vodivosti a mechanického zatížení	62
5.10	Poměr faktoru smáčivosti a příslušné vodivosti	62
5.11	Poměr faktoru smáčivosti a mechanického zatížení	62

ÚVOD

Tato práce se věnuje oblasti smáčení různých materiálů. Na základě smáčecích charakteristik jsou zjišťovány vlastnosti rozdílných materiálových a procesních vlivů. Popisuje problematiku pájecích slitin, tavidel a povrchových úprav, všechny tyto záležitosti ovlivňují výsledné smáčecí charakteristiky. Praktickým úkolem je návrh zkušebních vzorků a jejich metodiku testování smáčecích charakteristik. Jako testovací vzorky poslouží kupóny ze základního materiálu pokoveného mědi s různou povrchovou úpravou. Celé měření proběhne na meniskografu, pracujícím na principu smáčecích vah. Při měření na meniskografu bude použita bezolovnatá pájka SAC305. Jedním z bodů vypracování bude také výpočet smáčecích úhlů a to nejen celkového smáčecího úhlu, ale také jednotlivých úhlu působících na jednotlivé strany nehomogenního materiálu. Všechny naměřené hodnoty a charakteristiky budou analyzovány pomocí metody Design of Experiments. Bude sledován vliv zvolených faktorů na vybrané výstupní parametry. Pomocí přehledných grafů budou zobrazeny efekty faktorů na smáčivost, vodivost a mechanickou pevnost pájeného spoje. Také bude diskutována korelace smáčecích charakteristik s elektrickými a mechanickými vlastnostmi.

1 PÁJENÝ SPOJ A SMÁČIVOST

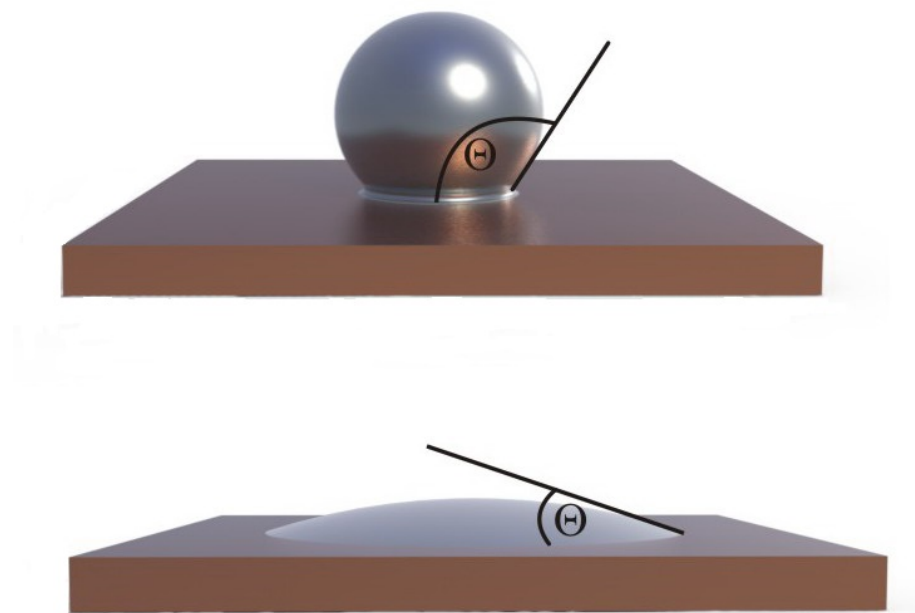
1.1 Požadavky na pájený spoj

- Mechanická integrita spoje
 - Správný konstrukční návrh spoje
 - Správná volba pájecí slitiny
 - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
 - Odpovídající pevnost a tažnost spoje
- Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
 - Odpovídající elektrický kontakt
 - Odpovídající tepelný kontakt
- Metalurgická stabilita
 - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
 - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozu
- Environmentální trvanlivost
 - Odolnost vůči korozi
 - Odolnost vůči oxidaci spoje
- Kompatibilita se statutárními požadavky
- Estetické požadavky [4]

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem – pájkou. Atomy základního materiálu, které jsou na povrchu, se dostanou do styku s atomy roztavené pájky do tak malé vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhézních a kohézních sil (adheze = přilnavost, koheze = soudržnost). Zároveň se vzájemně rozpouštějí a difundují některé prvky spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem. Ve většině případů vznikají přechodové oblasti určité tloušťky, které mají jiné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti.

Proces pájení patří mezi klíčové operace při montáži desek plošných spojů. Vlastní proces pájení není složitý, ale vzhledem k tomu, že k této operaci přistupují další činitelé, kteří podstatně ovlivňují tento proces, stává se nejnáročnějším.

Jednoznačně je možné stanovit dobrý spoj podle velikosti stykového úhlu. Na obr. (1.1) je případ pro nesmáčivý a pro smáčivý povrch.



Obr. 1.1: Stykový úhel pro nesmáčivý (nahore) a smáčivý (dole) povrch

Kritéria smáčení:

- $0^\circ - 20^\circ$ výborné až dokonalé
- $20^\circ - 40^\circ$ dobré až velmi dobré
- $40^\circ - 55^\circ$ postačující
- $55^\circ - 90^\circ$ špatné
- $> 90^\circ$ nesmáčivost

1.2 Spolehlivost pájeného spoje

Základním pilířem elektrotechnického průmyslu je spolehlivý pájený spoj. Z funkčního hlediska je hlavním parametrem doba života spoje, po který je zaručena správná funkce pájeného spoje. Vlastnosti pájeného spoje jsou samozřejmě také ovlivněny použitou pájkou, tavidlem a samotným procesem pájení. Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou. Takový spoj by měl mít i dostatečnou mechanickou pevnost. [4]

Pájený spoj si musí zachovávat dostatečnou hodnotu vodivosti v čase. Ta je ovlivněna několika faktory a mezi hlavní patří:

- stárnutí materiálu
- mechanické namáhání
- teplotní a proudové namáhání

1.2.1 Stárnutí materiálu

Stárnutí materiálu je ovlivněno zejména tvorbou difúzní vrstvy, která se tvoří na rozhraní mědi a cínu. Stárnutím také dochází k tvorbě oxidů a dalších adsorbčních vrstev na povrchu materiálu. Difúzní vrstva potvrzuje, že došlo k vytvoření pájeného spoje, ale zároveň zhoršuje jeho vlastnosti, a to hlavně zvyšováním odporu. Difúzní vrstva je tvořena intermetalickými sloučeninami, které s postupem času narůstají – zvyšuje se jejich tloušťka, což je výrazně urychleno při zvýšené teplotě. Běžně se tloušťky difúzních vrstev pohybují řádově v mikrometrech, ale mohou dosahovat i několik desítek mikrometrů. V takovém případě už může pájený spoj ztrácet své mechanické a elektrické vlastnosti.

1.2.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání může být děleno podle působení na pájený spoj:

- externí – působení zvenčí (vibrace, ohyb)
- interní – vnitřní působení (spoj je namáhán v důsledku změn vnitřních poměrů)

Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu, která se projeví snížením mechanických vlastností a případným mechanickým narušením. Rozdílné délkové roztažnosti mají za následek mechanické namáhání při změně teploty.

1.2.3 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je důsledkem tepla působícího na pájený spoj. Teplo může být dodáváno okolními vlivy, nebo může vznikat přímo v elektrickém obvodu, v důsledku vyzařovaného ztrátového výkonu. Působení tepla vyvolává buď nevratné děje (změna struktury, difúze), nebo vratné děje (změny rozměrů, ohyb). [5]

1.3 Pájitelnost a smáčení povrchu

Nestačí pouze pájené komponenty zahřát na požadovanou teplotu a dodat pájku, ale je třeba pájené komponenty připravit – musí mít vyhovující pájitelnost. Termín pájitelnost povrchu je použit jako popis schopnosti povrchu být smáčitelný pájkou během procesu pájení. Je to funkce přesného procesu a práce materiálu. Kontakt může vykazovat přijatelnou pájitelnost v některých procesech, ale v jiných ne. Stupně smáčení mohou být děleny následovně:

- Nesmáčení

V tomto případě se nevytvoří metalurgická vazba a rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelné. Tavidlo použité k podpoře pájení nemohlo adekvátně odstranit povrchové znečištění nebo je oxidační vrstva příliš silná nebo tavidlo není dostatečně aktivní.

- Smáčení

Povrchová energie čistého kovového povrchu je vyšší než povrchová energie roztavené pájky. Za této podmínky pájka smočí povrch a vytvoří tak na rozhraní metalurgickou vazbu. Jak smáčení postupuje, tak roste na rozhraní tenká mezikovová vrstva a vytváří základ pro spolehlivý spoj.

- Odsmačení

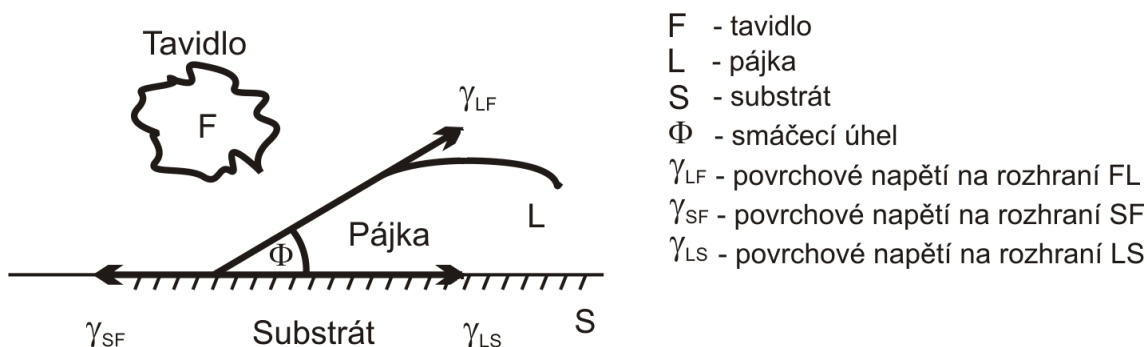
Stav vznikající v případě, že roztavená pájka pokryla povrch a poté ustoupila a zanechala tak kopečky pájky nepravidelného tvaru oddělené oblastmi pokrytými tenkou vrstvou pájky. Odsmačení se může také vyskytnout zespoda – od pájeného místa, v místě vystavenému nesmačenému povrchu, kdy je tenká pájená vrstva kovu úplně rozpuštěna do pájky. Toto může nastat, když se pájí kontakty z drahých kovů, které se rychle rozpustí v SnPb pájce. Slabá pájitelnost součástek se hlavně projevuje při špatném režimu pájení přetavením SMD. V procesu pájení vlnou je spoj omýván velkým množstvím pájky. Malá množství nečistot jsou rychle zředěna a odnesena pryč. Pájení přetavením neprovádí čisticí operaci. Nečistoty, které jsou přítomny na kontaktech součástky, zůstanou v zhotoveném spoji.

Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti - tzv. smáčecím úhlem Θ . Rovnováha procesu smáčení je na Obr. (1.2) Platí Youngova rovnice

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cdot \cos\Theta. \quad (1.1)$$

Smáčení se zlepšuje, tj. smáčecí úhel se zmenšuje, jestliže se

- snižuje γ_{LF} - povrchové napětí na rozhraní tavidlo/vzduch nebo dusík/pájka
- zvyšuje γ_{SF} - povrchové napětí na rozhraní pájený povrch/tavidlo/vzduch
- snižuje γ_{LS} - povrchové napětí na rozhraní pájený povrch/pájka



Obr. 1.2: Smáčení povrchu roztavenou pájkou

Čím menší je tedy povrchové napětí na rozhraní tavidlo/vzduch/pájka a čím větší je povrchové napětí pájeného povrchu/tavidlo, tím je vyšší smáčivost povrchu roztavenou pájkou a tedy snadnější pájení. Smáčení i roztékavost selepší i malou metalurgickou reakcí mezi pájkou a základním materiálem. Smáčení a oxidační rychlost se zvýší se zvýšením pájecí teploty. Naopak snížením pájecí teploty se sníží smáčivost povrchu roztavenou pájkou i pájitelnost. Navíc jsou potřebné delší pájecí doby a tím se zase zvyšuje náchylnost procesu k oxidaci. [4]

Základními problémy, které snižují pájitelnost povrchu, jsou oxidace a znečištění.

- Oxidace

Většina problémů pájitelnosti je zapříčiněna okysličováním povrchu pájeného materiálu. Obvykle tavidlo užívané během pájení rozbije a rozpptýlí tento oxid, ale pokud je vrstva neobvykle tlustá, tavidlo nemusí být dostatečně aktivní pro danou funkci. Konkrétně u materiálů s povrchovou úpravou pokovením je nezbytné pečlivě kontrolovat počáteční výrobní proces. Pokud základní kov např. kontaktu součástky není řádně připraven před pokovením, může na povrchu zůstat vrstva oxidů. Ačkoliv tento povrch není sám pájitelný, mohou být ještě pájitelné vrcholky dané vrstvy přes ni elektricky pokoveny. V tomto případě součástka tak jak je přijatá od výrobce bude vizuálně vyhovující, ale když bude

následně pájena, tak se úprava elektrickým pokovením rozpustí a výsledkem bude nesmáčený spoj.

- **Pórovitost**

Pórovitost kontaktů dovolí nárůst oxidů na spodní vrstvě povrchu, přičemž způsobí nesmáčení na rozhraní mezi vrstvami. Na tento jev jsou zvláště náchylné úpravy elektropokovením. Pokud není proces pečlivě kontrolován, může se pórovitost objevit na hranicích mezi jednotlivými zrny. Ačkoliv se počáteční pájitelnost jeví jako dostačující, může se rapidně snížit s výskytem narůstajících oxidů.

- **Znečištění**

Nechťené kovové nebo organické zbytky se někdy mohou usadit během elektrického pokovení. Rovněž z balicího materiálu mohou být zanechány částice nečistot vláknitého materiálu, silikonů nebo změkčovadel, případně lze nalézt otisky prstů vzniklé neopatrnou manipulací. Některá z těchto znečištění v dostatečně velkém množství snižují schopnost pájení. [10]

Odlišnosti u bezolovnatého pájení

Bezolovnaté pájení je obtížnější jednoduše z důvodu užšího výrobního procesu. Existuje mnoho problémů, se kterými je nutno se vypořádat. Například chemické složení pájky běžně používané pro pájení vlnou, nebo selektivní pájení. Dále také nastavení zařízení, které byly přesně seřízeny na pájení s olovem, tato zařízení jsou pro bezolovnaté pájení ve většině nevhodné. Důležitým rozdílem je používaná teplota jak pro pájení vlnou, tak pro pájení přetavením.

Musí se také změnit vizuální kontrola. Bezolovnatý spoj vypadá namrzle. Dokonce i nejmenší znečištění může způsobit zničení pájky, to pak vede k drahému čištění a novému plnění. Pájky znečištěné olovem jsou velice nespolehlivé, hlavně kvůli menší smáčivosti. Řízení procesu musí být velice přesné. S vyššími teplotami vznikají problémy s nekvalitním povlakem spoje, praskáním součástek atd. Proces pájení přetavením je riskantní, musí se dávat pozor na změny okolní teploty, chlazení produktu a proudění vypařovaných látek.

Jsou zde ovšem také faktory, které mohou být nápomocné. Za pomoci dusíku je možné zlepšit proces pájení a zvýšit smáčivost. Velmi vhodná jsou nová tavidla na bázi vody bez organických složek a také jsou nezávadná pro životní prostředí.

Součástky

Součástky jsou nejslabším článkem v celém procesu bezolovnatého pájení. Často jsou k dostání pouze s SnPb zakončeními. Je zapotřebí nového pokovování a tak mnoho výrobců přináší bezolovnatá zakončení na již existující používané součástky.

Někteří výrobci součástek nabízejí se zakončeními typu NiPd a samozřejmě také SnAgCu.

Jiné možnosti zakončení zahrnují prvky Sn, SnBi, SnAg a SnCu, ale nejvhodnější systém zatím nebyl standardizován. Dále musí být více prošetřena spolehlivost součástek za vysokých teplot (až 260 °C). Při vyšších teplotách, které jsou pro bezolovnaté pájení potřeba, se často stává, že některá součástka tuto teplotu nevydrží.

Nynější povrchová úprava součástek pro bezolovnaté pájení

Pro bezolovnaté součástky je hlavní povrchovou úpravou matné pokovování cínem pro diskrétní součástky i pro součástky SMT s krátkým životním cyklem (5 let a méně). Dále se používá matné pokovování cínem se spodní vrstvou niklu pro součástky s vysokou životností. Výrobci součástek mají velký zájem o bezolovnaté pájení a zvýšili své úsilí při výrobě takovýchto součástek. Výrobci různých elektronických zařízení si žádají součástky, které vydrží vyšší pájecí teploty a mají bezolovnatá zakončení. [8]

1.4 Metoda smáčecích vah

Jde o metodu, kdy se citlivými mikrováhami měří síla působící na vývod součástky ponořený do lázně roztavené pájky. Testovaná součástka je zavěšena na siloměru nad nádobou s roztavenou pájkou do které se při testu ponoří (Obr. 1.3). Zařízení je již běžně označováno jako meniskograf (označení je odvozeno od obchodního názvu jednoho z prvních typů těchto přístrojů). Tento přístroj se skládá z měřicí hlavy s pružinovými mikrováhami, držáku na uchycení měřeného předmětu, pájecí lázně a elektronické řídicí jednotky. [2]

Tato metoda zajišťuje kvantitativní výsledky, které jsou vhodné pro analýzu základních vlastností kontaktů součástek. Stejně jako v ponořovacím testu ji lze použít pro charakteristiku pájitelnosti substrátů. Smáčecí váhy jsou zařízení velmi drahé a pro většinu firem nedostupné. Tento test je příznačný pro specializované laboratoře nebo velké firmy. Test je definován v ČSN EN 60068-2-69 a ČSN 34 5791-2-54.



Obr. 1.3: Vzorek ponořený do roztavené pájky

Průběh měření

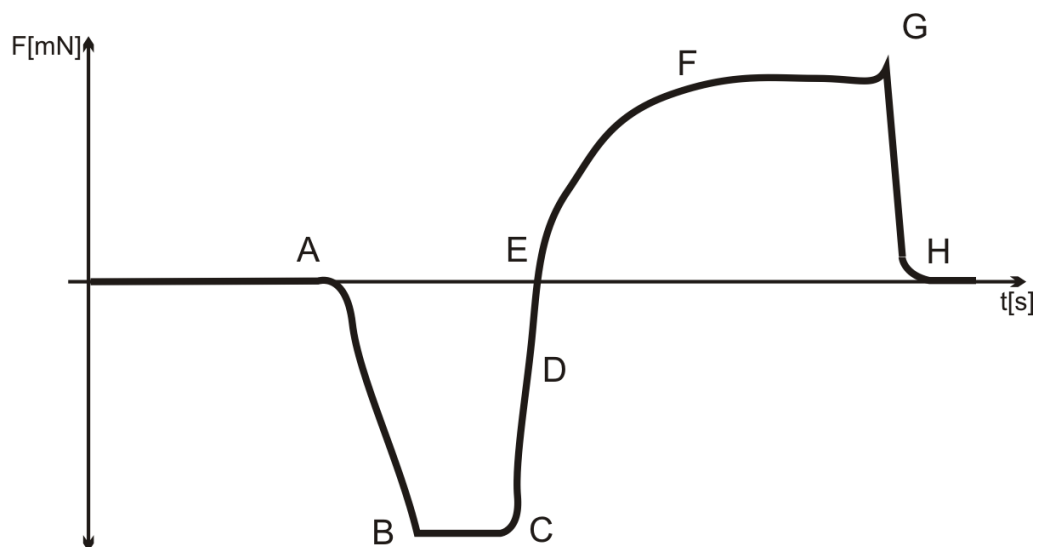
Testovaný vzorek s naneseným tavidlem je zavěšen na siloměru nad nádobu s roztavenou pájkou. Se stoupáním nádoby s pájkou se vzorek ponoří do pájky. Zařízení registruje síly působené na měřený prvek. Nádoba s roztavenou pájkou je na zdvihacím mechanismu ovládaném krokovým motorem. Elektronické řízení dovoluje měnit rychlost zdvihu a tím rychlost ponoru. Teplota v lázni je udržována s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$. Jelikož všechny pohyby, teploty a čas jsou přesně řízeny a sledovány, je možné všechna měření přesně reprodukovat.

Přístroj měří změnu vertikálních složek povrchového napětí během pájení. Rovnováha smáčení vyhodnocuje změnu kontaktního úhlu mezi pájkou a destičkou v čase. Vertikální síly jsou úměrné kosinu úhlu. Tyto síly vyjadřuje rovnice 1.2,

$$F = \gamma p \cos \Theta - g\rho V \quad (1.2)$$

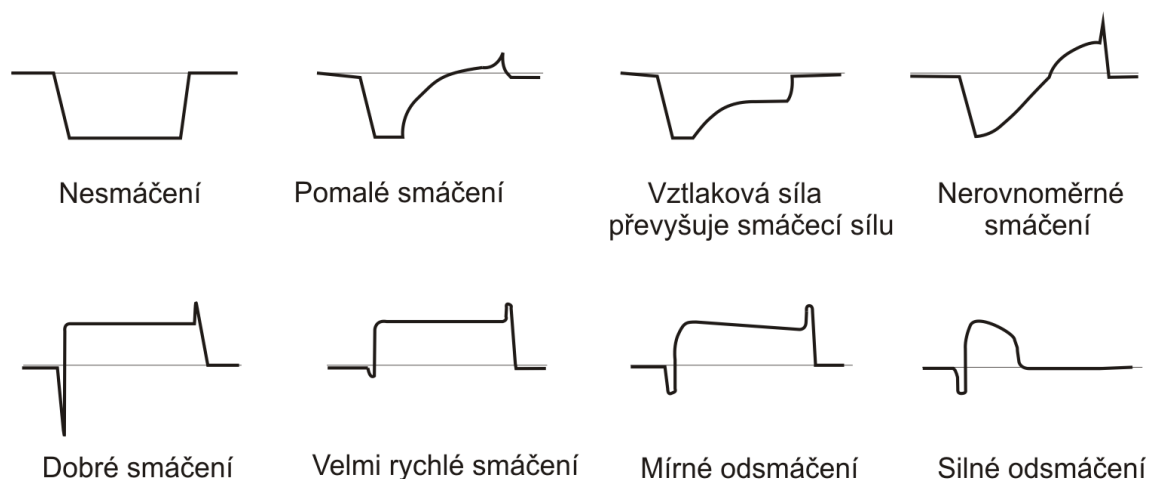
kde F je rovnovážná smáčecí síla, γ je povrchové napětí, p je obvod vzorku, Θ je smáčecí úhel, g je gravitační zrychlení, ρ je hustota pájky, V je objem ponořené části.

Vertikální síla měřená smáčecími vahami se skládá ze dvou sil – vztlakové síly a smáčecí síly. Hodnota $(g\rho V)$ vyjadřuje velikost vztlakové síly, je určena objemem vytlačené pájky a během testu zůstává konstantní. Smáčecí síla je daná hodnotami $(\gamma p \cos \Theta)$, obvod vzorku a povrchové napětí jsou během testu konstantní, mění se pouze kontaktní úhel.



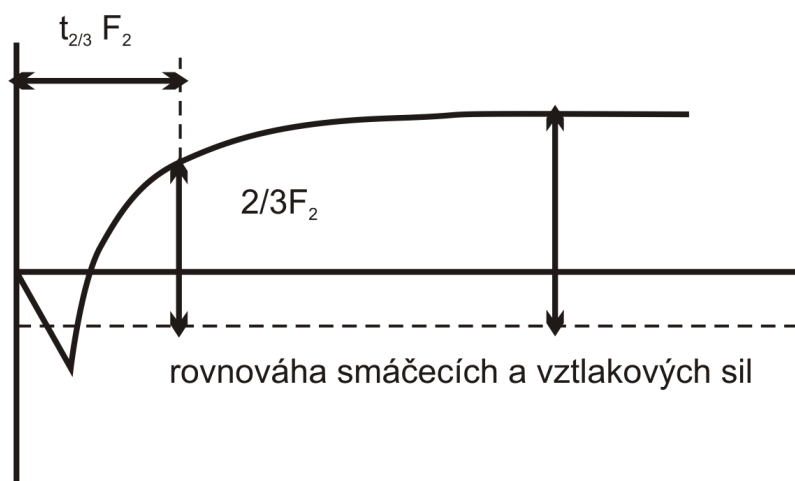
Obr. 1.4: Křivka rovnováhy smáčení

Na obr. (1.4) je zobrazena obecná křivka smáčení. Počátek styku vzorku s pájkou je označen bodem A. Teplota vzorku je příliš nízká k podpoře smáčení a musí být vtlačován velkou silou. Sklon křivky mezi A a B je dán rychlostí, jakou je vzorek ponořován. V bodě C pájka začíná smáčet vzorek. Nastává změna působící síly do bodu F. Pájka nejprve vytlačuje vzorek směrem vzhůru, s postupujícím smáčením ho však začne povrchové napětí táhnout dolů do nádoby a je nutné vyvinout určitou sílu na jeho vytažení – křivka D až F. Bod D je okamžik, kdy je povrch pájky kolmý k povrchu vzorku. Síla v bodě D je rovna vztlakové síle a je možné ji vypočítat z rozměrů vzorku, hloubky ponoru a měrné hmotnosti pájky. V bodě E jsou síly působící na vzorek v rovnováze a výsledná síla je nulová. Časový interval B až C je dán tepelnou kapacitou vzorku a rychlostí přestupu tepla mezi pájkou a vzorkem. Tvar křivky C a F je dán rychlostí smáčení a má rozhodující význam pro určení kvality smáčitelnosti. Bod G je vrchol křivky a určuje, kdy došlo k úplnému vytažení vzorku z lázně, H je konečný stav. Tímto měřením jsme schopni velmi přesně stanovit smáčitelnost a rovněž i vliv dalších činitelů.



Obr. 1.5: Příklady průběhů časové závislosti smáčecí síly

Pro porovnání výsledků měření na meniskografu se používá poměr parametrů F_2 a $t_{2/3}$ ze smáčecí křivky - Obr. (1.6). F_2 je maximální smáčecí síla a $t_{2/3}$ je čas, kdy smáčecí síla dosáhne $2/3$ maximální síly. Vzorky s nejlepší smáčivostí mají vysokou hodnotu tohoto poměru tzn. že hodnota síly F_2 by měla být vysoká a hodnota času $t_{2/3}$ malá. [4]



Obr. 1.6: Síla F_2 a čas $t_{2/3}$

2 MATERIÁLOVÉ FAKTORY

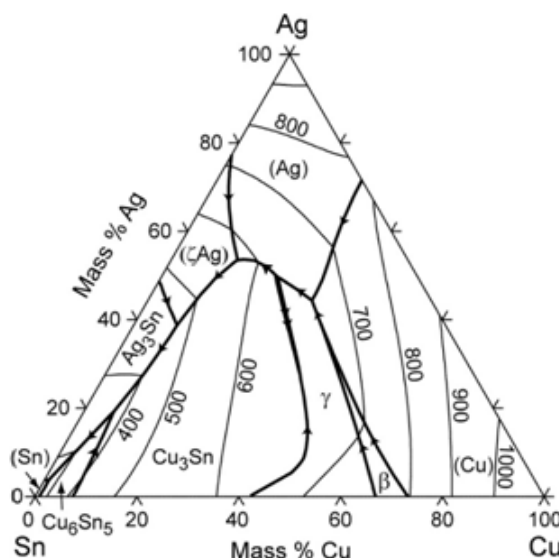
2.1 Pájecí slitiny

Od roku 2006 je až na výjimky zakázáno používat olovnaté pájky ve výrobním procesu z důvodu jejich vysoké toxicity. Proto je zde popsáno několik základních bezolovnatých slitin.

Základní bezolovnatou slitinou je SnAgCu. Přednost také dostávají slitiny s bismutem. Na základě testů je možno konstatovat, že slitina SnAgCu má ekvivalentní vlastnosti jako slitina SnPbAg. Rozdílem je teplota tání. SnAgCu se taví při teplotě okolo 217 °C, což je o 34 °C více, než u slitiny s olovem. Zvýšená teplota může mít nežádoucí vliv na vyráběnou spotřební elektroniku.

Cín zůstává i nadále klíčovou složkou, další složky jako bismut, stříbro nebo indium tvoří pouze malou část slitiny, poslední dva hlavně kvůli jejich vysoké ceně. Kadmium je vyloučeno z důvodu jeho toxicity. Antimon je také toxický, ale méně než olovo a kadmium. Používá se tedy pouze jako minimální součást slitiny.

2.1.1 Pájka SnAgCu



Obr. 2.1: Ternární diagram pájky SnAgCu [8]

Několik těchto slitin dosahuje eutektického stavu, který vzniká díky přesnému poměru jednotlivých složek, díky tomu mají nižší eutektickou teplotu tání, u SnAgCu

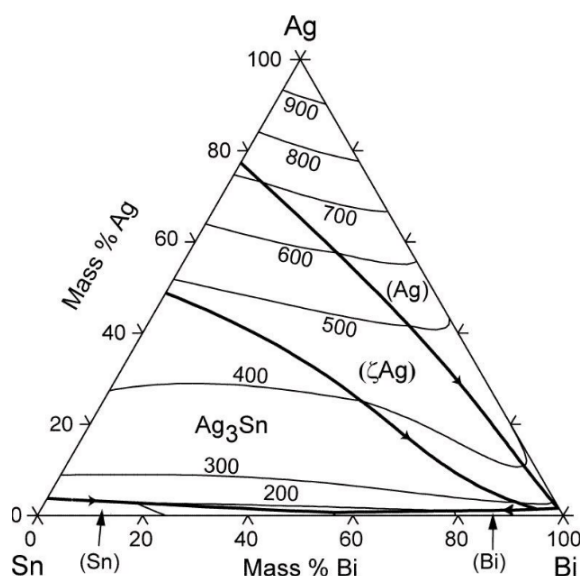
je to 217 °C. Tyto slitiny se v porovnání s olovnatou pájkou nabízí jako nejvhodnější do budoucna. Díky vyšším teplotám tání slitiny SnAgCu, je tato slitina vhodnější při vyšších provozních teplotách než SnPb. Při smáčení mědi SnAgCu pájkou se měď nesmáčí tak dobře, jak olovnaté pájky. Přidáním jiného prvku, například bismutu, se nijak výrazně nesníží teplota tání, ale ani se nezvýší náklady. Na trhu jsou k dispozici různé varianty slitin, například: SnAg4Cu0.5, SnAg3.8Cu0.7, SnAg3.7Cu1.3, SnAg4Cu1, SnAg3.2Cu0.5, SnAg4.7Cu1.7.

2.1.2 Pájka SnAg

Jedná se o binární slitinu, která obsahuje 3,5 % stříbra, teplota tavení je 221 °C. Vykazuje podobné smáčecí charakteristiky a pevnost spoje jako SnAgCu, s pájkami tohoto typu je kompatibilní. Používá se pro ruční pájení při opravách. Obsah stříbra snižuje rozpouštění stříbrných pokovení součástek. [8]

2.1.3 Pájka SnAgBi

Přidáním bismutu do pájky SnAg se sníží teplota tavení a zlepšuje se smáčivost. Další výhodou bismutu je zvýšená mechanická odolnost pájeného spoje. Pájka obsahuje 4,8 % bismutu a teplota tavení je v rozsahu 208 °C – 215 °C. Používá se hlavně pro pájení součástek povrchové montáže.



Obr. 2.2: Ternární diagram pájky SnAgBi [8]

2.1.4 Pájka SnZnBi

Tato slitina byla vytvořena již v roce 1920, kdy bylo potřeba vyřešit pájení hliníku. Je také náhradou za olovnaté pájky, jelikož její náhradzující prvky nejsou příliš drahé a má relativně nízkou teplotu tavení. Skupina slitin SnZnBi má teplotu tavení okolo 189 °C, čímž se dosti přibližuje dříve používané olovnaté pájce SnPb. Nevýhodou je zvýšená oxidace zinku, která komplikuje pájecí proces. Bismut má opět za úkol zvyšovat smáčivost, snižovat teplotu tavení a omezovat oxidaci. [8]

2.1.5 Pájka SN100C

Odklon od základní eutektické slitiny cín/měď byl způsoben nepříjemným množstvím můstků a zkratů při pájení za normálních podmínek. Zejména tvorbu můstků se nepodařilo odstranit přenastavením parametrů procesu, tj. použitím aktivnějších tavidel, nižší rychlostí procesu atd.

V zájmu zachování všech výhod výrobního procesu pro elektronický průmysl při současné eliminaci olova, spojily firmy Balver Zinn, DKL a FCT vývojové prostředky s firmou Nihon Superior a vyvinuly řadu bezolovnatých pájek SN100C. Inovativní stabilizovaná pájka cín/měď SN100C má přijatelnou teplotu zpracování (250 °C – 260 °C) při pájení vlnou, což eliminuje nebezpečí tepelného poškození desek plošných spojů a součástek. SN100C je pájka prvotřídních vlastností a přináší ekologické výhody spojené s bezolovnatou technologií.

SN100C je ideální pro sofistikované procesy včetně pájení vlnou, aplikace ponorem a galvanické aplikace. Unikátní stabilizace procesu použitím niklu má velmi pozitivní vliv na chování pájky při tuhnutí. Vytváření jehlových krystalů je zpomalené a vytváří se více sférické struktury. To výrazně zlepšuje tok pájky na přechodu pájecí plochy a vlny a působí proti vytváření můstků pájky. Výsledkem je jednolitá struktura s lesklým povrchem. Navíc SN100C poskytuje vynikající tepelnou a elektrickou vodivost doprovázenou sníženou mírou přechodu mědi do pájecí lázně ve srovnání se slitinami SAC. Pájka SN100C také nabízí výhody z hlediska ceny ve srovnání se slitinami obsahujícími stříbro.[8]

Jestliže je do pájky SN100C přidán fosfor, působí jako velice účinný antioxidant, fosfor ovšem může snižovat smáčivost pájky, což je vzhledem k jeho nízké koncentraci zanedbatelné.

Hlavní rozdíly mezi SAC305 a SN100C

Z hlediska složení a vlastností jsou tyto dvě pájky velice zajímavé, jelikož pájka SN100C neobsahuje stříbro a je stabilizovaná minimálním množstvím niklu. Přitom vykazuje lepší smáčecí charakteristiky, ovšem za cenu vyšší teploty tavení.

Tab. 2.1: Složení pájky SnAgCu a SN100C [11]

Pájka	Sn(%)	Ag(%)	Ni(%)	Ge(%)	Cu(%)
SAC305	96,5	3,0	0	0	0,5
SN100C	99,2	0,0045	0,05	$\leq 0,01$	0,6

Tab. 2.2: Fyzikální vlastnosti pájky SnAgCu a SN100C [11]

Pájka	Teplota tavení (°C)	Hustota (g/cm ³)	Pevnost v tahu (MPa)	rezistivita ($\mu\Omega\text{m}$)	Tažnost (%)
SAC305	217	7,37	52	0,15	27
SN100C	227	7,4	32	0,13	48

2.2 Tavidla

Tavidla pomáhají za působení tepla odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a chrání jej i proti oxidaci během procesu pájení. Reakce tavidla s oxidy zapříčiní zvýšení povrchového napětí pájeného povrchu a tím zlepšení smáčivosti. Přísady, pomocí kterých dosahujeme dobrých pájecích výsledků se nazývají aktivátory.

Funkce tavidla

- Tavidlo za spolupůsobení tepla napomáhá fyzikálně i chemicky k vytvoření spolehlivého pájeného spoje, reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaném povrchu i pájce a brání reoxidaci povrchů - tj. chemická funkce.
- Odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy - tj. fyzikální funkce.
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu, umožní tak pájce, aby se dobře roztekla.
- Zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu - tj. tepelná funkce
- V pájecí pastě suspenduje kuličky pájky, řídí tixotropní a reologické vlastnosti a "zapouzdřuje" pohyblivé ionizovatelné zbytky po procesu pájení.

Pro bezolovnaté pájení s vyššími pracovními teplotami dochází k zásahům do formulace zejména bezoplachových tavidel, která mají malé "technologické okno" - úpravy aktivačních teplot i časů. Všeobecně se používají stejné typy tavidel jako u olovnatých pájek. Preferují se bezoplachová tavidla (no clean - nc) na bázi pryskyřic - ekologické i ekonomické důvody.

Tavidla musí splňovat následující kritéria:

- musí vyhovovat zákonům a musí být neškodná pro životní prostředí
- musí být zajištěna kompatibilita se všemi používanými materiály
- musí být dostupná

Obecně se tedy doporučují tavidla bez organických látek tzv. VOC-free. VOC – Volatile Organic Compounds, neboli nestálé organické složky, které se vypařují při nízkých teplotách a mohou unikat do atmosféry. Tyto látky podporují tvorbu ozonové díry. Z hlediska čistoty životního prostředí proto není jejich použití příliš vhodné.

Další důvody proč používat VOC-free tavidla:

- nejsou hořlavá a jsou méně nebezpečná než alkohol
- menší vypařování
- vyšší požadavky na teplotní zpracování – vhodnější pro bezolovnaté pájení
- snížení znečištění prostředí

Nevýhody použití VOC-free tavidla:

- jelikož obsahuje vodu, může tavidlo zmrznout, také má větší povrchové napětí
- vyžaduje větší energii pro odpařování
- je zapotřebí složitějšího systému pro nanesení tavidla

Tavidla rozpustná ve vodě jsou velmi aktivní a vyžadují použití čistícího systému. Tyto tavidla se dělí na dvě kategorie, organické a anorganické. Organická tavidla jsou více aktivní než pryskyřice a anorganická tavidla jsou nejvíce aktivní ze všech.

Tavidla rozpustná ve vodě používají smáčecí činidlo namísto pryskyřice, aby snížila povrchové napětí a zajistila lepší pájení. Používají také stejné kyselinové aktivátory jako pryskyřicová tavidla, pouze ve větší koncentraci. Jsou více korozní než pryskyřice a veškeré zbytky musí být odstraněny za pomoci vody.

2.2.1 Tavidlo 979T

Jedná se o VOC-free tavidlo, které nevyžaduje čištění. Po pájení zanechává minimální množství zbytků, tyto zbytky jsou nevodivé, nekorozivní a ve většině aplikací nevyžaduje čištění. Vyznačuje se dobrým smáčením povrchu desky i vyplňováním otvorů a redukuje tvorbu mikrokuliček pájky. [12]

2.2.2 Tavidlo ECOFREC 202

Má velmi nízký obsah netěkavých složek. Po strojním pájení vlnou dojde zcela k eliminaci bezhalogenidového aktivačního systému tavidla. Tavidlo nezanechává žádné viditelné tavidlové zbytky, vzhledem k tomu nebrání použití elektrických sond. Může být použito pro bezolovnaté pájení. Je vhodné pro aplikaci pěnou i postřikem. Tavidlo má dobrou smáčivost na různých druzích povrchů desek s plošnými spoji používaných v bezolovnatém procesu. [13]

2.2.3 Tavidlo TSF 6592

TSF 6592 je bezoplachové pastovité tavidlo, které je navrženo pro bezolovnaté technologie pájení, hlavně se používá pro flip chip aplikace, ball attach, opravy CSP, BGA a SMD. Je ovšem vhodné pro jakékoli aplikace bezolovnatého pájení. Skládá se z kalafuny, terpineolu a malého množství kyseliny jantarové. [9]

2.3 Povrchové úpravy

Nejčastěji se používají metody pokovování, a to buď galvanické nebo chemické. Také se používá metoda OSP (Organic Surface Protection), což je pokrytí povrchu organickým povlakem. Jedná se o finální povrchovou úpravu, která se provádí z důvodu ochrany povrchu před oxidací a tím je zajištěna vyšší možná doba skladovatelnosti. Typ povrchové úpravy se vybírá podle požadavků na následnou povrchovou montáž. Povrchová úprava musí být materiálově kompatibilní s povrchem desky, musí zajišťovat dobrou smáčivost, možnost použití tavidel nebo nepájivé masky. Také musí být kompatibilní s následným procesem výroby např. musí být dodržena určitá rovinnost povrchu, celková tloušťka, možnost kontaktování, teplotní odolnost a jiné. Desky s povrchovou úpravou by také neměly být toxické a měly by být vhodné pro ekologickou likvidaci.

Pokovování probíhá na galvanické lince, která se skládá ze soustavy van, ve kterých probíhají chemické předúpravy, které zlepšují přilnavost povrchu a poté probíhá chemické nebo galvanické pokovení.

2.3.1 Galvanické pokovení

Při galvanickém pokovení se vylučuje vrstva vodivého materiálu (Cu, Sn, Ni, Au aj.) nejčastěji na kovových základních materiálech. Nanášení kovové vrstvy je založeno na elektrolytické reakci pokovovacího roztoku a elektrod za průchodu stejnosměrného proudu proudem. Katodu tvoří pokovovaný materiál, anoda se v průběhu reakce rozpouští a dodává tak potřebný kov do pokovovacího roztoku.

2.3.2 Chemické pokovení

Povrchová vrstva vodivého materiálu (Cu, Ni, Au aj.) je chemicky vylučována na povrch základního materiálu, jedná se o autokatalytickou reakci. K nanesení vrstvy není potřebný elektrický proud. Výhodou tohoto procesu je rovnoměrná tloušťka naneseného materiálu. Je vhodná i pro materiály složitějšího tvaru.

2.3.3 HAL - Hot Air Leveling

Žárově se nanáší vrstva PbSn, která slouží jako povrchová ochrana Cu proti oxidaci. Je stabilnější než povlak Sn nanesený galvanicky. Mezi nevýhody této metody patří deformace desky způsobená vysokou teplotou, špatná rovinnost pájecích ploch, nemožnost kontaktování vodičů a díky vysoké teplotě není vhodná pro tenké desky. V současné době se od této metody upouští jednak z ekologických důvodů, jelikož obsahuje olovo, a také z aplikačních důvodů.

2.3.4 OSP - Organic Surface Protection

Jedná se o metodu, kdy jsou chemicky nanášeny organické inhibitory mědi na povrch desky. Takto nanesená vrstva se drží na povrchu pomocí slabých Van der Waalsových sil. Oproti metodě HAL se vyznačuje téměř dokonalou rovinností povrchu a největší výhodou je mnohem nižší cena. Spolehlivost pájených spojů je srovnatelná s metodou HAL. Nevýhodou je kratší doba skladovatelnosti a různé vlastnosti OSP povrchů od různých výrobců. [4]

3 DESIGN OF EXPERIMENTS

Design of experiments je metoda plánovaných experimentů. Popisuje proces plánování, vytváření a analýzu experimentu tak, aby mohly být efektivně a účinně vyvozeny dostatečné a platné závěry. Abychom z experimentu byli schopni vyvodit spolehlivá rozhodnutí, je nezbytně nutné zapojit do metodologie experimentálního procesu jednoduché, ale významné statistické metody. Úspěch jakéhokoli zamýšleného experimentu závisí na důkladném plánování, vhodném výběru návrhu, statistické analýze a týmové spolupráci. K tomu, aby bylo možné chápat plánovaný experiment, je nutné důkladně znát celý jeho průběh. Průběhem je myšlená přeměna vstupů na výstupy. Z pohledu výroby patří mezi vstupy faktory nebo procesní proměnné jako jsou lidé, materiály, metody, prostředí, stroje, procedury a další. Mezi výstupy můžeme řadit naměřené výkonové nebo kvalitativní charakteristiky výsledného produktu. [1]

Technika DOE je velmi efektivním nástrojem pro zlepšování jakosti produktu a redukcí nákladů. Nejvhodnější oblast pro použití této metodiky představuje právě výzkum a vývoj, dále pak testování a validace.

DOE umožňuje řešení složitých a komplexních úloh, kdy je konečný výsledek ovlivňován velkým počtem faktorů. Proto je nutná rozsáhlá analýza pomocí nástroje, který je schopen ji celou pojmout. Cílem je nalézt kritické faktory a jejich optimalizaci, minimalizaci variability a v závěru vytvoření tzv. robustního modelu, kde jsou charakteristiky odolné vůči působení vnějších přirozených vlivů. Pochopení kritických faktorů, jejich interakcí a vlivu na způsobnost procesu umožňuje definovat požadavky a tolerance pro daný proces. U faktorů, které kritické nejsou, je možné stanovit tolerance volnější. Tím samozřejmě dochází ke snižování a optimalizaci nákladů spojených s daným procesem.

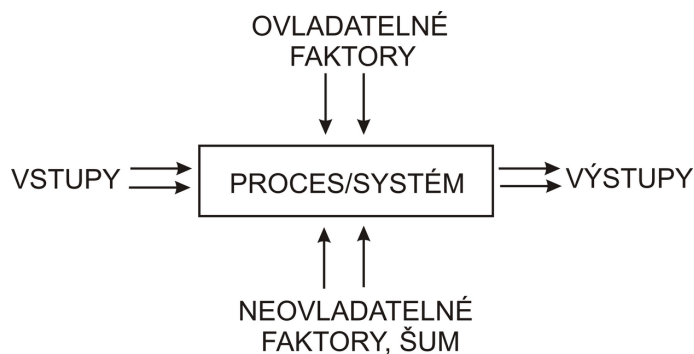
Z hlediska předsériových etap mohou být pomocí metodiky DOE zkoumány konstrukční a výrobní technické alternativy řešení s ohledem na jejich vzájemnou interakci a ovlivňování konečných veličin. Hlavním důvodem je predikce chování systému v budoucnosti a odhalení možností jeho zlepšení. Aplikací DOE v této fázi můžeme předcházet kvalitativním problémům při konečné výrobě a tak opět snižovat náklady. Metodika může být samozřejmě použita v každé fázi plánování a přípravy vývoje produktu, procesu a vlastní sériové produkce.

Metodika DOE patří k nástrojům, které vyžadují precizní přípravu před samotnou realizací experimentu. Čas vložený do přípravy je lehce získán zpět, protože se díky ní musí provádět jen skutečně nezbytné experimenty. Je nutné tedy nejprve pro-

blém analyzovat, stanovit si přesně zadání řešené úlohy a připravit základní vstupy pro samotné plánování experimentů. Z tohoto pohledu se tedy nejedná jen o čisté statistické metody, ale o provázání analytických technik se statistickými.

3.1 Experiment

Experimenty jsou v praxi prováděny za účelem poznání něčeho nového o určitém procesu či systému. U experimentů pracujeme s kombinací zařízení, procesů, metod a dalších prostředků a sledujeme transformaci vstupů na výstupy, které mají pozorovatelné, měřitelné parametry nebo charakteristiky. Experiment má tzv. ovladatelné faktory, což jsou faktory, které je možné nastavit. Každý proces má ale také tzv. neovladatelné faktory, které není možno vůbec řídit nebo je můžeme ovlivnit pouze částečně. Základní schéma procesu je zobrazeno na obr. (3.1) Pokud je to možné, snažíme se zaměřit pouze na faktory, jejichž testování není příliš náročné a nákladné.



Obr. 3.1: Obecné schéma procesu

Faktorem se tedy rozumí vstupní proměnná, která je zkoumána v rámci experimentu. Účelem DOE je zkoumat vliv faktorů na výstupní proměnnou. Pro každý faktor jsou stanoveny úrovně, dle kterých bude v experimentu zkoumán. Stanovení správných faktorů a jejich úrovní je důležité pro úspěšný průběh a výsledek experimentu. Faktory musí být stanoveny v rámci plánovací fáze experimentu a vycházejí ze současné znalosti systému. Při stanovování faktorů musíme rovněž brát v úvahu jejich charakteristiky, protože podle nich je návazně volen i typ experimentu. Musíme rovněž identifikovat faktory, které není možné kontrolovat a patří tudíž do kategorie tzv. noise factors, neboli šumové faktory, které přispívají k učinění nesprávných závěrů. Faktory můžeme dále dělit na kvantitativní (teplota, tlak, čas) a kvalitativní (linka, dodavatel, pracovník). Podle typu faktoru a očekávaného výsledku experimentu jsou voleny úrovně jednotlivých faktorů. Při predikci lineární závislosti jsou

dostačující dvě úrovně. Naopak při složitějším průběhu závislosti bude nutné zvolit tři a více úrovní. Flexibilita stanovení úrovní je omezena u kvalitativních faktorů. Při volbě faktorů a úrovní musí být rovněž brána v úvahu otázka nákladů a vhodnosti z praktického hlediska.

Při provádění plánovaného experimentu měníme záměrně průběh nebo vstupní proměnné a na výstupu sledujeme odpovídající změny. Takto získaná data z dobře naplánovaného, vykonaného a analyzovaného experimentu mohou být poté použita ke zlepšení kvality výsledného produktu, snížení výrobního odpadu, výrobního času nebo ke snížení nadbytečnosti ve výrobním procesu atd. [3]

3.2 Plánování experimentů

Naplánování, určení cíle, účelu experimentu je počáteční a základní podmínkou úspěšné aplikace metody DOE. V této fázi je potřeba určit, které charakteristiky budou sledovány jako výstup experimentu a jejichž hodnotu chceme optimalizovat, nebo určit nejvhodnější vstupy. Může se jednat pouze o jednu charakteristiku nebo několik charakteristik. Výstupy lze dělit rovněž dle formátu výstupní proměnné – diskrétní nebo spojité, která je preferována. Charakteristika musí být zvolena rovněž tak, aby došlo k prohloubení znalosti procesu.

Plán experimentu je důležitou částí metody DOE. Špatná volba plánu experimentu přinese velmi málo požadovaných informací a následná analýza takto získaných dat nemůže výsledek zachránit. Plán experimentu stanovuje počet pokusů experimentu, podmínky a pořadí. Dle typu zkoumaného problému je možné volit mezi následujícími typy experimentů:

1. Experiment s jedním faktorem
2. Úplný faktorový experiment
3. Částečný faktorový experiment

Plán experimentu je před jeho samotnou realizací přenesen do přehledné matice, kde jsou zapsány stanovené faktory se svými úrovněmi a je dáno pořadí jednotlivých pokusů. Před provedením experimentu bychom měli udělat zkušební pokus abychom zjistili, zda bude vše probíhat bez problémů (zda je možné nastavit požadované úrovně faktorů, zda lze získat výsledky požadované výstupní proměnné atd.) Jakékoliv odchylky od plánu experimentu musí být zaznamenány.

Nashromážděná data musí být podrobena analýze. K dispozici je opět několik možných přístupů: regresní analýza, graf hlavních interakcí atd.

Posledním bodem metody DOE je prezentace závěrů a doporučení plynoucích z provedeného experimentu. Doporučení by se měla týkat optimálního nastavení parametrů procesu, systému pro dosažení požadovaného stavu, dále můžeme predikovat chování systému v budoucnosti na základě sledovaných parametrů a v neposlední řadě bychom měli navrhnout řešení, aby byl systém odolný vůči vnějším vlivům, tzn. zajistit robustnost systému. [3]

4 MĚŘENÍ SMÁČECÍCH CHARAKTERISTIK

4.1 Zadání měření

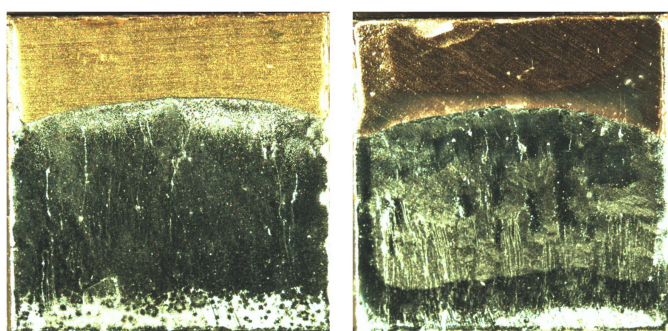
Navrhňte metodiku testování smáčecích charakteristik pro oboustranně plátované materiály a zkušební vzorky, které otestujete metodou smáčecích vah. Vyhodnoťte výsledné smáčecí charakteristiky.

4.2 Použité materiály

Bylo použito několik různých materiálů, které byly připravovány vždy stejným postupem, a to z důvodů zachování stejných podmínek výroby. U plátovaných materiálů se jedná o oboustranně plátovaný základní materiál FR4. Metodou smáčecích vah byly proměřeny následující materiály.

- FR4 plátovaná Cu s povrchovou úpravou Ni/Au
- FR4 plátovaná Cu bez povrchové úpravy
- FR4 plátovaná Cu s povrchovou úpravou OSP

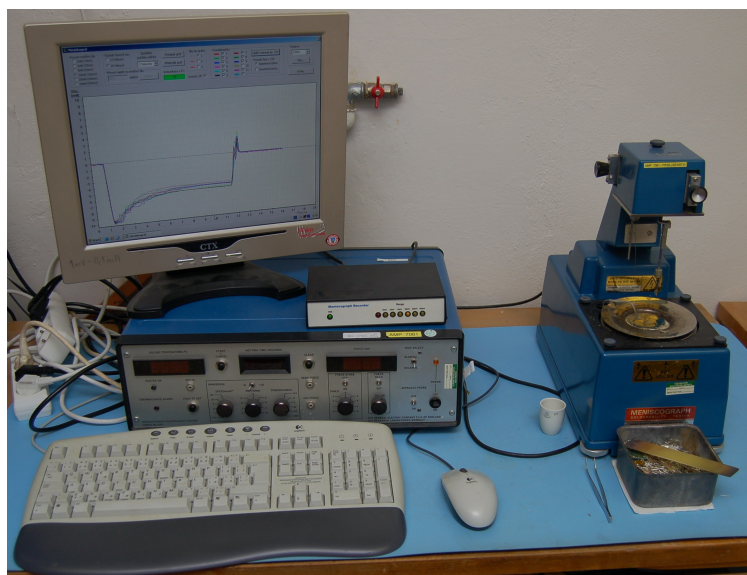
Dále byla použita stejná skupina vzorků, ale byla vystavena tepelnému stárnutí při teplotě 150 °C po dobu 1 hodiny. Všechny vzorky mají rozměry 8x8x1 mm, u každého měření bylo použito pastovité tavidlo TSF 6592 určené pro bezolovnaté pájení a pájka SAC305.



Obr. 4.1: Příklady použitých vzorků

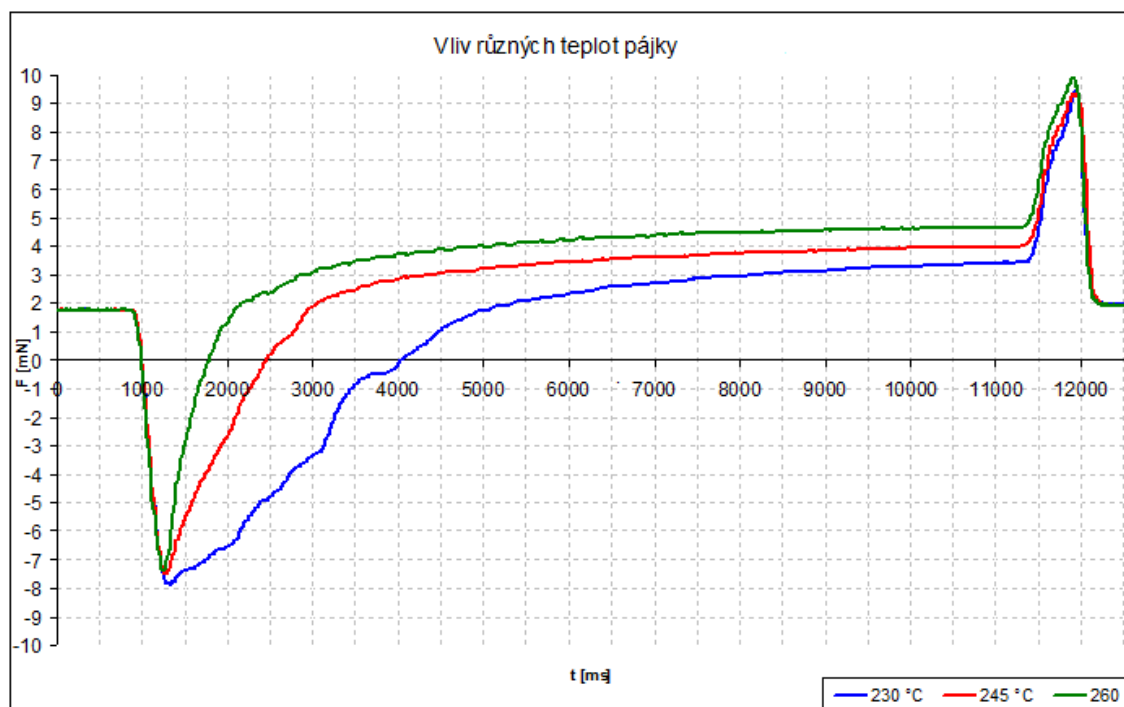
4.3 Postup měření

1. Příprava vzorků - vzorky na bázi FR4 nalámat na jednotlivé kupóny o rozměrech 8x8x1 mm. Je potřeba zachovat vysokou úroveň čistoty, je tedy nutné pracovat v čistých rukavicích.
2. Očištění a odmaštění vzorků umístěných v kádince s izopropylalkoholem.
3. Umístění odmaštěných vzorků na 1 minutu do kádinky s mikroleptem ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{IPA}$). Pokud se jedná o naprosto nové vzorky nejsou předchozí dva body nutné a můžou být vynechány.
4. Osušení vzorků na bezvlákné utěrce a s minimální prodlevou aplikování tavidlo a provedení testu smáčivosti.
5. Nastavení meniskografu:
Teplota: 230 °C, 245 °C , 260 °C
- Rychlost ponoru: 10 mm.s⁻¹
- Hloubka ponoru: 3 mm
- Prodleva ponoření: 10 s
- Approach probe: OFF
6. Nastavení programu na PC:
- Měřítka: 10 mN
- změřit 12 vzorků a uložit
- vymazat nejlepší a nejhorší křivku a uložit
7. Naměřené hodnoty zpracovat do grafů a vypočítat parametry pro porovnání výsledků.

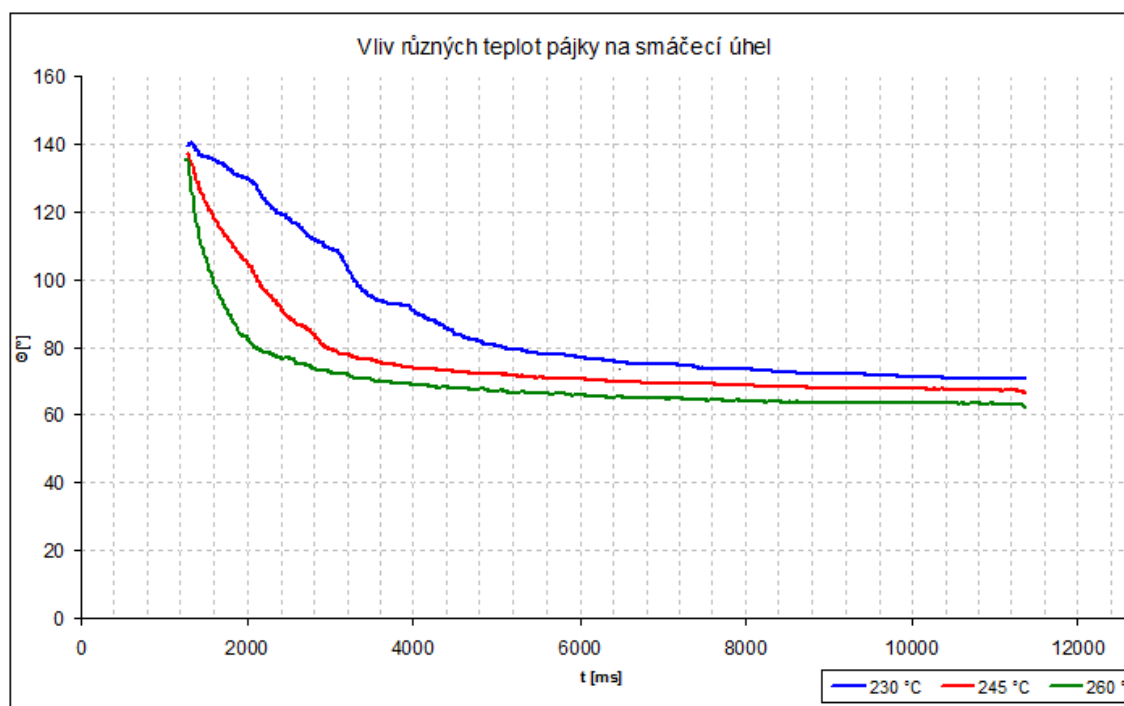


Obr. 4.2: Měřící pracoviště s meniskografem

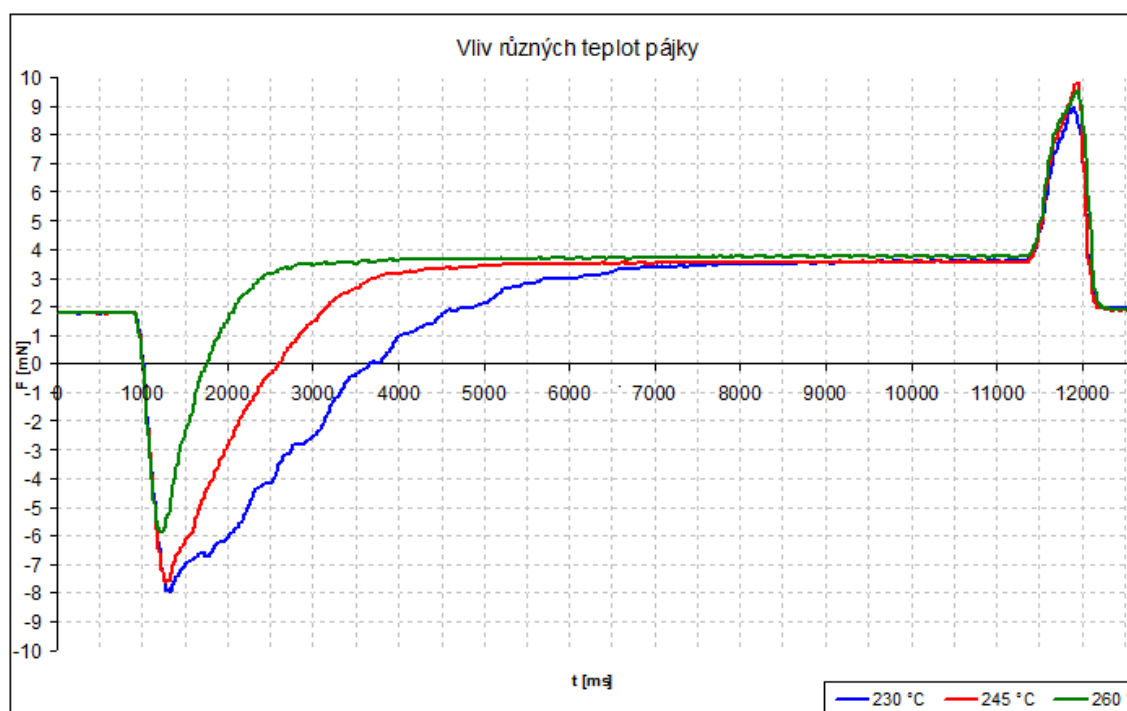
4.4 Grafy naměřených hodnot (Stárnuté v příloze)



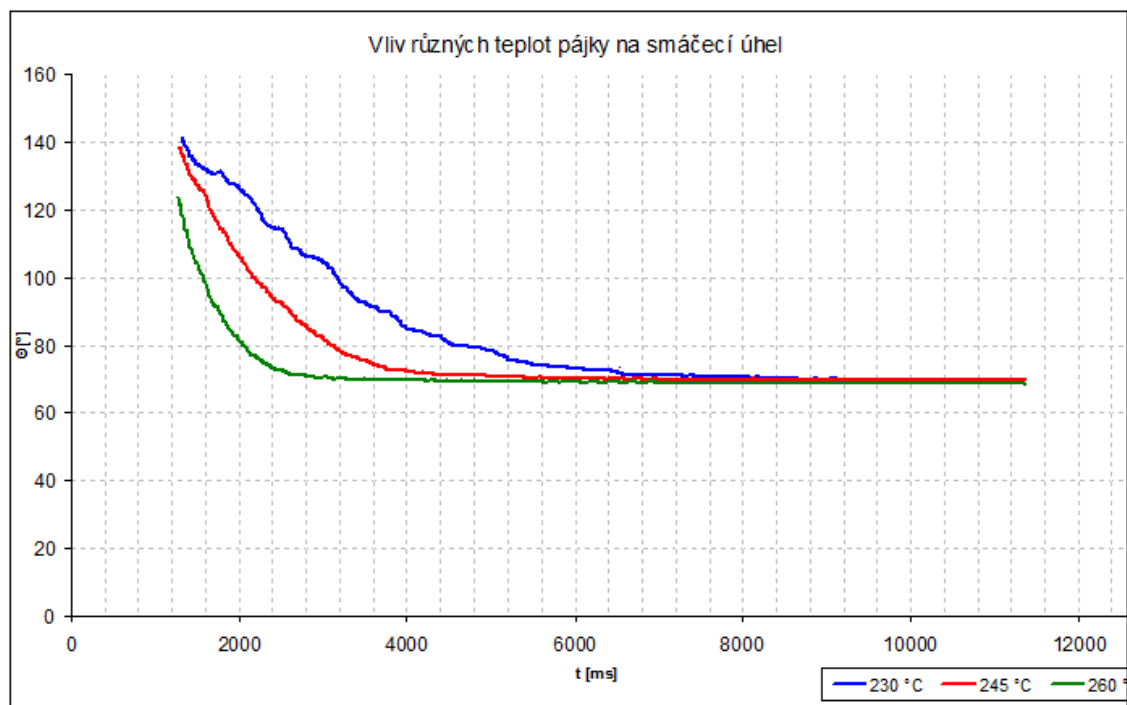
Obr. 4.3: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovaná Cu s Ni/Au



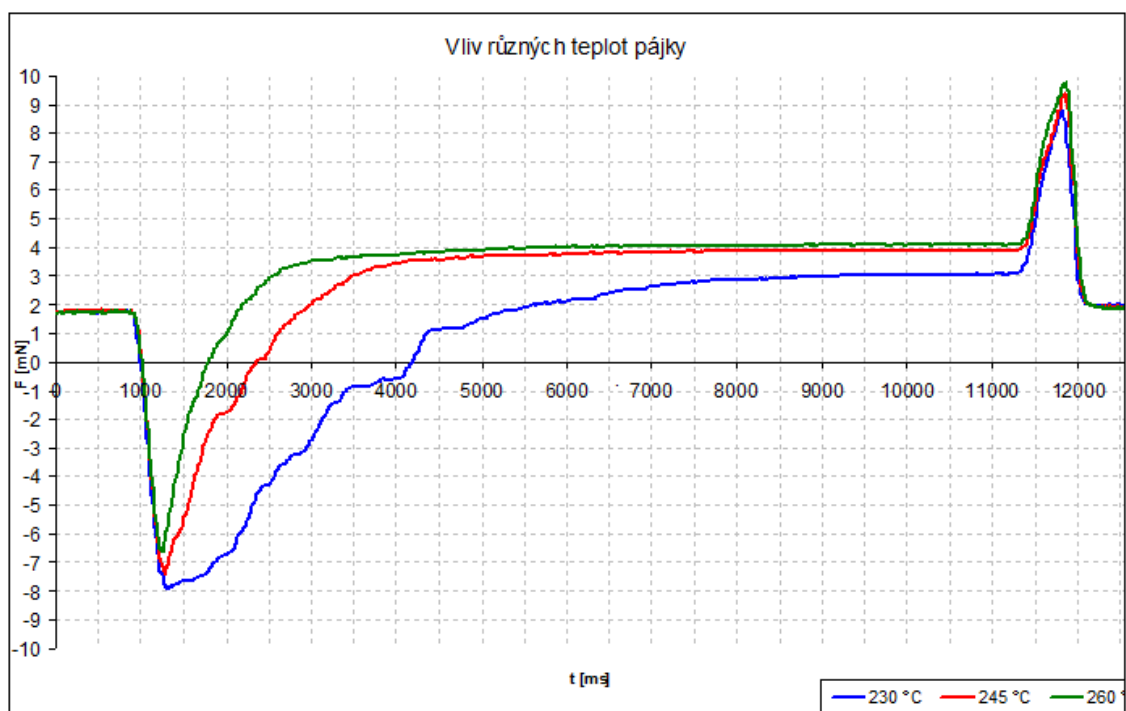
Obr. 4.4: Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu s Ni/Au



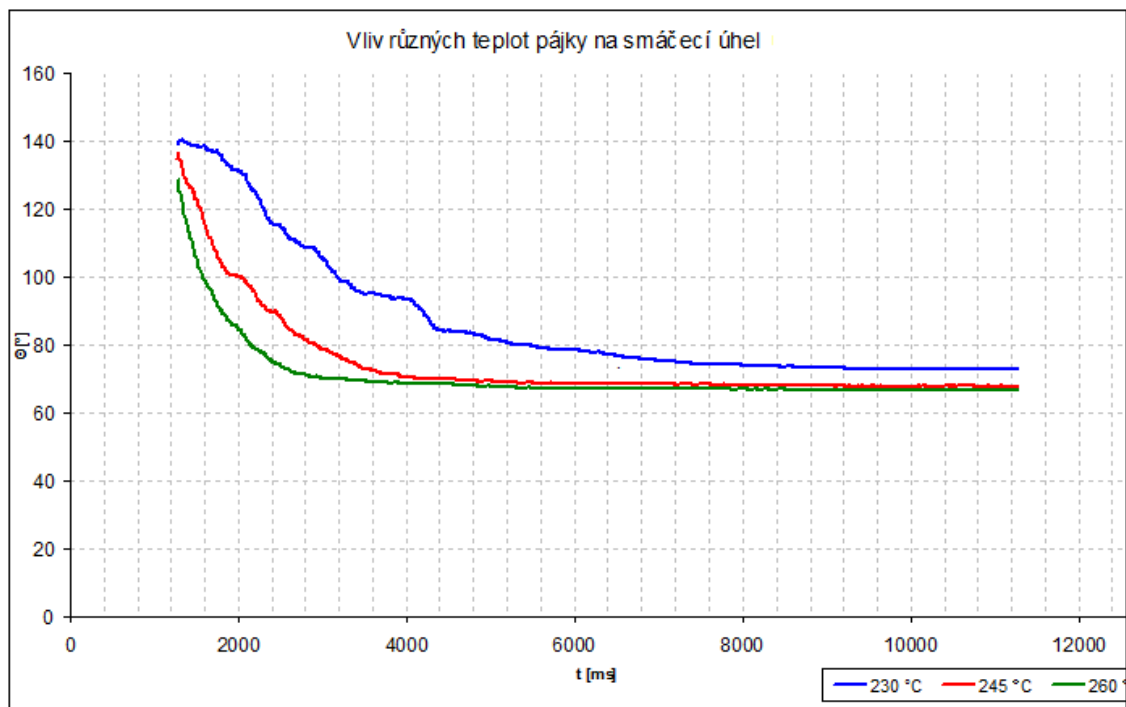
Obr. 4.5: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu



Obr. 4.6: Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu



Obr. 4.7: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP



Obr. 4.8: Závislost smáčecího úhlu na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP

4.5 Naměřené a vypočtené hodnoty

Tab. 4.1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro nestárnuté vzorky

Teplota pájky	230 °C			245 °C			260 °C		
Materiál	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP
F_{vz} [mN]	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
F_{max} [mN]	1,63	1,80	1,33	2,22	1,77	2,14	2,88	1,96	2,33
F_2 [mN]	3,40	3,57	3,10	3,99	3,54	3,91	4,65	3,73	4,10
$F_{2/3}$ [mN]	2,27	2,38	2,07	2,66	2,36	2,61	3,10	2,49	2,73
$t_{2/3}$ [ms]	4550	3800	4490	2410	2030	1990	1170	1010	1180
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,75	0,94	0,69	1,65	1,75	1,97	2,63	3,69	3,47

Tab. 4.2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky

Teplota pájky	230 °C			245 °C			260 °C		
Materiál	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP
F_{vz} [mN]	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
F_{max} [mN]	-0,88	-5,10	-7,04	0,44	-6,96	-7,12	2,03	-7,91	-5,63
F_2 [mN]	0,88	-3,33	-5,28	2,21	-5,19	-5,35	3,80	-6,14	-3,87
$F_{2/3}$ [mN]	0,59	-4,44	-7,03	1,47	-6,92	-7,13	2,53	-8,18	-5,15
$t_{2/3}$ [ms]	9190	7680	5090	7480	2550	2340	4930	1000	5390
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,10	-0,43	-1,04	0,30	-2,03	-2,29	0,77	-6,14	-0,72

Příklad výpočtu pro první sloupec tabulky (4.1)

$$F_{vz} = g\rho V = 9,81 \cdot 7020 \cdot 8 \cdot 1,07 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 0,001768 \text{ N} = 1,77 \text{ mN}$$

$$F_{max} = 1,63 \text{ mN (Odečteno z grafu)}$$

$$F_2 = F_{max} + F_{vz} = 1,63 + 1,77 = 3,40 \text{ mN}$$

$$F_{2/3} = \frac{2}{3} \cdot F_2 = \frac{2}{3} \cdot 3,401 = 2,27 \text{ mN}$$

$$t_{2/3} = t_2 - t_1 = 5900 - 1350 = 4550 \text{ ms}$$

$$F_2/t_{2/3} = \frac{3,40 \cdot 10^{-3}}{4550 \cdot 10^{-3}} = 0,00075 \text{ N/s} = 0,75 \text{ mN/s}$$

F_{vz} je vztlačková síla působící na vzorek.

F_{max} je maximální výsledná síla.

F_2 je maximální smáčecí síla.

$F_{2/3}$ je síla 2/3 maximální smáčecí síly.

$t_{2/3}$ je čas, kdy smáčecí síla dosáhne 2/3 maximální smáčecí síly.

t_1 je čas úplného ponoření vzorku.

t_2 je čas, kdy je síla rovna $F_{2/3}$.

$F_2/t_{2/3}$ je poměr příslušných parametrů, slouží k porovnání výsledků.

4.5.1 Výpočet úhlu smáčení

V grafu závislosti úhlu na čase je úhel spočítán pomocí rovnice smáčení (1.2), ze které se vyjádří $\cos \Theta$ (4.1). Tento úhel je počítán od okamžiku úplného ponoření do požadované hloubky a tedy zastavení ponořování, až do doby než se vzorek začal vynořovat.

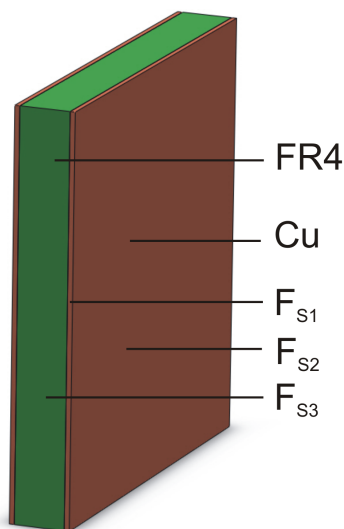
$$\cos \Theta = \frac{F + g\rho V}{\gamma p} \quad (4.1)$$

Jelikož se plátované vzorky skládají z více materiálů, výsledná působící síla na vzorek se skládá z více jednotlivých smáčecích sil. Na obr. (4.9) je zobrazen náčrt mědi pokoveného vzorku a na něm jsou vyznačeny jednotlivé plochy, na které působí smáčecí síly. Výsledná smáčecí síla se vypočítá jako součet jednotlivých smáčecích sil působících na plochy vzorku a to podle následující rovnice 4.2

$$F_S = 4F_{S1} + 2F_{S2} + 2F_{S3} \quad (4.2)$$

Při využití rovnice 1.2 můžeme zapsat rovnici pro výslednou sílu takto

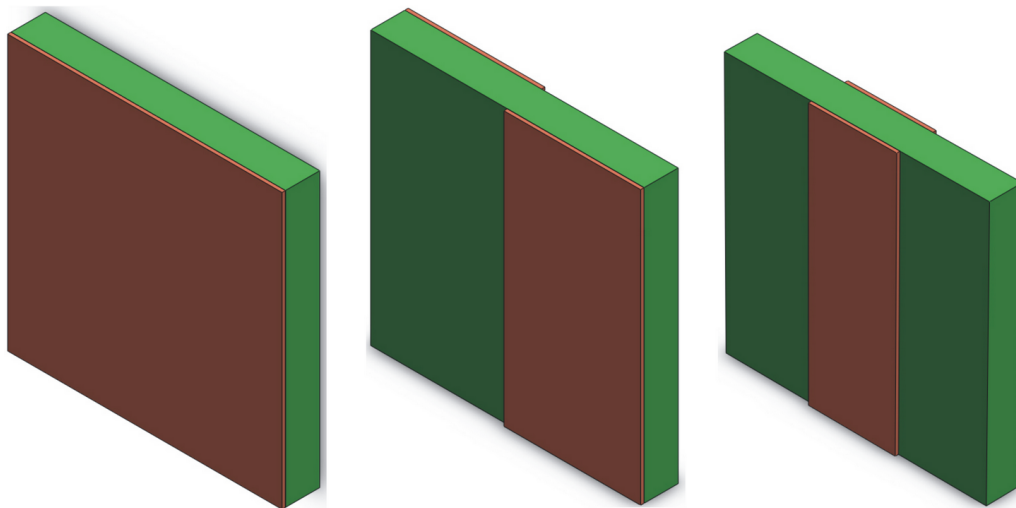
$$F = \gamma \cdot (p_{FR4} \cdot \cos \Theta_{FR4} + p_{Cu} \cdot \cos \Theta_{Cu}) - g\rho V \quad (4.3)$$



Obr. 4.9: Jednotlivé smáčecí síly působící na různé povrchy

K vytvoření matematického modelu pro výpočet úhlů smáčení na jednotlivých stranách vzorku poslouží trojice upravených plátovaných vzorků, které mají rozdílné

plochy mědi a FR4. První vzorek má celou jednu stranu odleptánu, měď se nachází pouze na jedné straně. Druhý vzorek má odleptánu polovinu z každé své strany. A třetí vzorek má odleptány 2/3 mědi, měď tedy zůstala pouze jako pruh uprostřed plochy vzorku. Jednotlivé vzorky jsou znázorněny na obr. (4.10).



Obr. 4.10: Jednotlivé vzorky

Tyto vzorky byly proměřeny metodou smáčecích vah a z naměřených hodnot smáčecí síly byla vytvořena soustava tří rovnic o třech neznámých (4.4). Neznámé představují hodnoty kosinu smáčecího úhlu. Obecně zapsaná soustava vypadá takto:

$$\begin{aligned} F_1 &= \gamma p_1 \cos \Theta_1 + \gamma p_2 \cos \Theta_2 + \gamma p_3 \cos \Theta_3 \\ F_{1/2} &= \gamma p_4 \cos \Theta_1 + \gamma p_5 \cos \Theta_2 + \gamma p_6 \cos \Theta_3 \\ F_{1/3} &= \gamma p_7 \cos \Theta_1 + \gamma p_8 \cos \Theta_2 + \gamma p_9 \cos \Theta_3 \end{aligned} \quad (4.4)$$

F_1 je smáčecí síla u vzorku s jednou odleptanou stranou mědi.

$F_{1/2}$ je smáčecí síla u vzorku, kde je odleptána polovina plochy mědi z každé strany.

$F_{1/3}$ je smáčecí síla u vzorku, kde jsou odleptány 2/3 plochy mědi.

$p_1 \dots p_9$ jsou odpovídající části obvodu vzorku.

Θ_1 je smáčecí úhel na mědi.

Θ_2 je smáčecí úhel na FR4 ze přední a zadní strany vzorku.

Θ_3 je smáčecí úhel na FR4 z boku vzorku.

V rovnicích figurují naměřené hodnoty síly z meniskografu. Jelikož se ovšem jedná o měřené hodnoty a tedy matematicky přibližné, nedá se soustavu rovnic počítat jako obecnou lineární soustavu, protože by výsledek neodpovídal požadovaným podmínkám. Protože je počítán kosinus úhlu, musí řešení padnout do intervalu $(-1,1)$. Z rovnic se snažíme najít takové řešení, aby rozdíl od naměřených hodnot

byl minimální. Hledání takového řešení je optimalizační proces. Jedním z možných řešení takového procesu je lineární programování. Lineární programování je matematická metoda pro určování způsobu, kterým lze dosáhnout nejlepšího požadovaného výsledku. Ze soustavy rovnic je vytvořen matematický model, který za pomoci minimalizace umožní získat správného výsledku. K výpočtu optimalizačního procesu je využit program LP Solve. Jedná se o jednoduchý program umožňující výpočet lineárního programování. Tento program je zdarma dostupný na internetu a může jej používat každý s minimální znalostí programování.

Konkrétní dosazované hodnoty:

$$\begin{array}{ll}
 F_1 = -0,002114 \text{ N} & p_1 = 0,00807 \text{ m} \\
 F_{1/2} = -0,002262 \text{ N} & p_2 = p_5 = 0,008 \text{ m} \\
 F_{1/3} = -0,003950 \text{ N} & p_3 = p_6 = p_9 = 0,002 \text{ m} \\
 \gamma = 0,57 \text{ N/m} & p_4 = 0,00814 \text{ m} \\
 \cos \Theta_1 = x1 & p_7 = 0,005473 \text{ m} \\
 \cos \Theta_2 = x2 & p_8 = 0,010666 \text{ m} \\
 \cos \Theta_3 = x3 &
 \end{array}$$

Po dosazení známých a naměřených hodnot do soustavy rovnic (4.4) je získána matice.

$$\begin{pmatrix} 0,0045999 & 0,00456 & 0,00114 \\ 0,0046398 & 0,00456 & 0,00114 \\ 0,00311961 & 0,00608 & 0,00114 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,002114 \\ -0,002262 \\ -0,003950 \end{pmatrix}$$

Matice je zapsána do programu LP Solve s potřebnými podmínkami následujícím způsobem.

```
/* Účelová funkce */
min: d1 + d2 + d3 + d4;

/* Lineární ohraničení hledaných proměnných */
x1 >= 0;
x1 <= 1;
x2 >= -1;
x2 <= 0;
x3 >= -1;
x3 <= 0;

x2 - x3 + d4 >= 0;
x2 - x3 - d4 <= 0;
x3 - x2 >= 0;

0.0045999 x1 + 0.00456 x2 + 0.00114 x3 + d1 >= -0.002114;
0.0045999 x1 + 0.00456 x2 + 0.00114 x3 - d1 <= -0.002114;

0.0046398 x1 + 0.00456 x2 + 0.00114 x3 + d2 >= -0.002262;
0.0046398 x1 + 0.00456 x2 + 0.00114 x3 - d2 <= -0.002262;

0.00311961 x1 + 0.00608 x2 + 0.00114 x3 + d3 >= -0.003950;
0.00311961 x1 + 0.00608 x2 + 0.00114 x3 - d3 <= -0.003950;
```

d_1 , d_2 , d_3 představují odchylku od původních naměřených hodnot, kterou se snažíme minimalizovat.

Vypočítané hodnoty

$$\begin{array}{ll} x_1 = 0,39 & \Theta_1 = 67^\circ \\ x_2 = -0,72 & \Theta_2 = 136^\circ \\ x_3 = -0,72 & \Theta_3 = 136^\circ \end{array}$$

Hodnoty x_1 , x_2 , x_3 odpovídají příslušnému kosinu úhlu na dané straně vzorku. Podle očekávání vyšlo, že strana pokrytá mědí je mnohem více smáčivá, než strana s materiálem FR4. Tímto způsobem je možné vypočítat jednotlivé smáčecí úhly na příslušných stranách nehomogenního materiálu, je ovšem nutné brát v úvahu případnou chybu měření, a proto je potřeba brát vypočtený úhel s tolerancí přibližně 5° .

4.5.2 Průměrné výšky smočeného povrchu

Všechny vzorky, které byly otestovány metodou smáčecích vah, byly poté vyfoceny kamerou na mikroskopu Olympus SZ61 a s využitím dostupného softwaru byla u jednotlivých vzorků změřena výška smočeného povrchu pájky. V tabulkách (4.3) a (4.4) jsou zaznamenány průměrné výšky smočeného povrchu pájkou pro stárnuté a nestárnuté vzorky při různých teplotách. Při testování byl zvolen ponor 3 mm, v důsledku kapilárních sil poté došlo k navzlínání pájky na plochu vzorku.

Tab. 4.3: Hodnoty výšky smočeného povrchu u nestárnutých vzorků

Teplota pájky	230 °C			245 °C			260 °C		
Materiál	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP
Výška sm. plochy [mm]	5,63	5,47	4,92	5,85	5,52	5,02	6,23	5,65	5,15

Tab. 4.4: Hodnoty výšky smočeného povrchu u stárnutých vzorků

Teplota pájky	230 °C			245 °C			260 °C		
Materiál	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP	Au	Cu	OSP
Výška sm. plochy [mm]	4,06	2,43	2,21	4,80	2,33	2,87	5,79	1,47	2,40

5 APLIKACE DOE

V této kapitole je demonstrováno použití metody Design of Experiments. V první části jsou sledovány vlivy faktorů na smáčecí charakteristiky v různých materiálových kombinacích. V druhé části je vyhodnoceno několik faktorů a jejich vliv na výslednou změnu vodivosti. Dále je zjištěna souvislost získaných dat s mechanickou odolností spoje. Hlavním úkolem je zvýšení spolehlivosti pájeného spoje a to hlavně z hlediska vodivosti.

5.1 Testování smáčivosti

5.1.1 Faktorový plán pro test smáčivosti

Prováděný experiment má 3 vstupní faktory a každý faktor má 3 úrovně, kromě faktoru tepelného stárnutí, který má pouze 2 úrovně. Bude proveden faktorový plán, u kterého bude použito tříúrovňové kódování. Potřebný počet pokusů je 18.

Následující tabulka (5.1) zobrazuje úrovně všech faktorů, které byly nastaveny u jednotlivých zkoušek. Pro jednoduchost je FR4 plátovaná Cu s Ni/Au značena pouze Au, FR4 plátovaná mědí bez povrchové úpravy je značena Cu a FR4 plátovaná mědí s organickým ochranným povrchem je značena OSP. V tomto plánu jsou tři faktory, faktor A – materiál, faktor B – teplota pájky a faktor C – tepelné stárnutí.

Tab. 5.1: Úrovně faktorů pro testování smáčivosti

Faktor	úroveň -1	úroveň 0	úroveň 1
Materiál A	Au	Cu	OSP
Teplota pájky B	230 °C	245 °C	260 °C
Tepelné stárnutí C	0 h	-	1 h

Z tabulky faktorů je sestaven faktorový plán, ve kterém jsou otestovány všechny kombinace faktorů. Často se při tvorbě faktorového plánu používá kódování. Faktory jsou označeny písmeny a úrovním je přidělena číselná hodnota např. -1,0,1. Pro přehlednost bude raději zachován stávající popis faktorů i jejich úrovní. Při následném vyhodnocování a tvorbě grafů je poté přímo vidět, o který faktor se jedná.

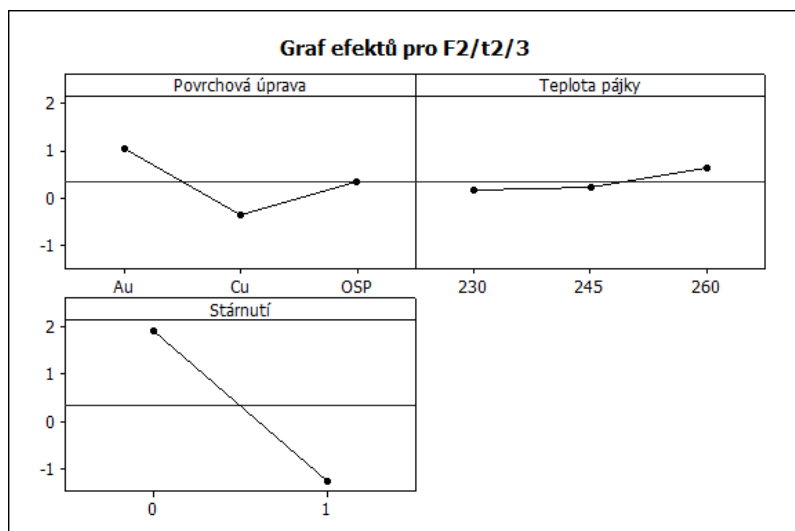
Tab. 5.2: Faktorový plán pro testování smáčení

Pořadí	Materiál A	Teplota B [° C]	Stárnutí C [h]	$F_2/t_{2/3}Y_1$ [mN/s]	Výška smáčení Y_2 [mm]
1	Au	230	0	0,75	5,63
2	Au	245	0	1,65	5,85
3	Au	260	0	2,63	6,23
4	Cu	230	0	0,94	5,47
5	Cu	245	0	1,75	5,52
6	Cu	260	0	3,69	5,65
7	OSP	230	0	0,69	4,92
8	OSP	245	0	1,97	5,02
9	OSP	260	0	3,47	5,15
10	Au	230	1	0,10	4,06
11	Au	245	1	0,30	4,80
12	Au	260	1	0,77	5,79
13	Cu	230	1	-0,43	2,43
14	Cu	245	1	-2,03	2,33
15	Cu	260	1	-6,14	1,47
16	OSP	230	1	-1,04	2,21
17	OSP	245	1	-2,29	2,87
18	OSP	260	1	-0,72	2,40

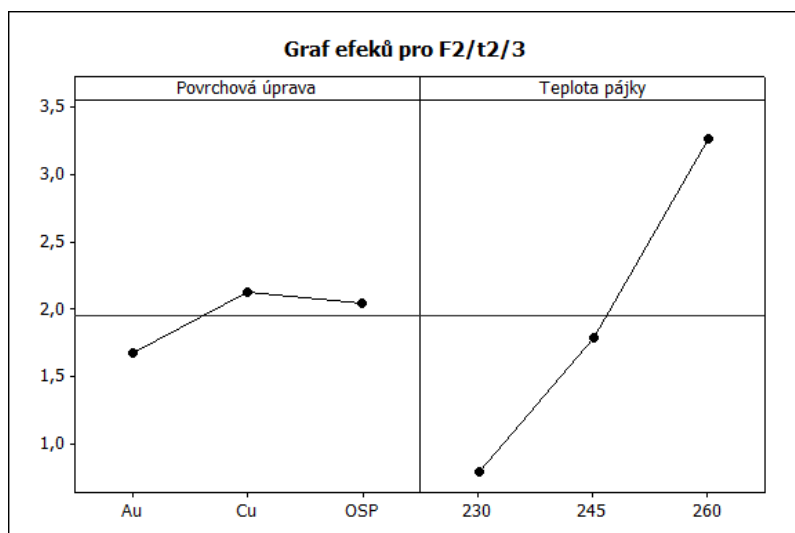
5.1.2 Analýza dat

Z tabulky (5.2) jsou vypočteny hodnoty efektů pro všechny tři faktory a vyneseny do grafů. Významnost jednotlivých faktorů je dána sklonem křivky. Na svislé ose jsou znázorněny průměry hodnot efektů faktorů a na vodorovné ose jsou znázorněny úrovně faktorů.

Graf (5.1) udává, že nejvýznamnějším faktorem je podle očekávání teplotní stárnutí. Efekt tohoto faktoru je mnohem vyšší než efekty zbývajících dvou faktorů a velmi výrazně snižuje smáčecí vlastnosti materiálu. Po teplotním stárnutí jsou vzorky značně zoxidovány, v praxi by jistě takový materiál nebyl pro pájení použit, proto je vyhodnocen stejný graf, ale bez vlivu faktoru tepelného stárnutí. Z tohoto grafu (5.2) vyplývá, že pokud jsou použity pouze nestárnuté vzorky, tak poměr $F_2/t_{2/3}$ je mnohem výrazněji ovlivněn teplotou pájecí lázně a použitý materiál má na velikost tohoto parametru minimální vliv (úsečka se pohybuje v blízkosti střední hodnoty). V tomto případě je proto nejvýznamnějším faktorem teplota pájky.

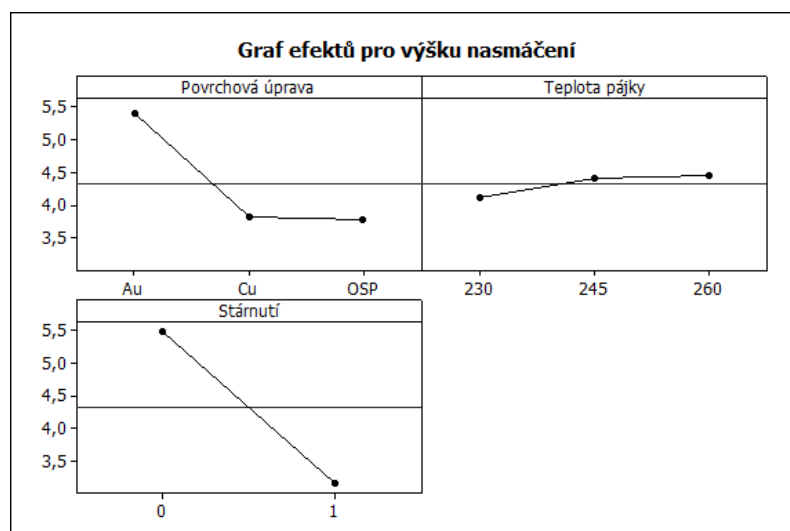


Obr. 5.1: Graf hlavních efektů pro $F_2/t_{2/3}$



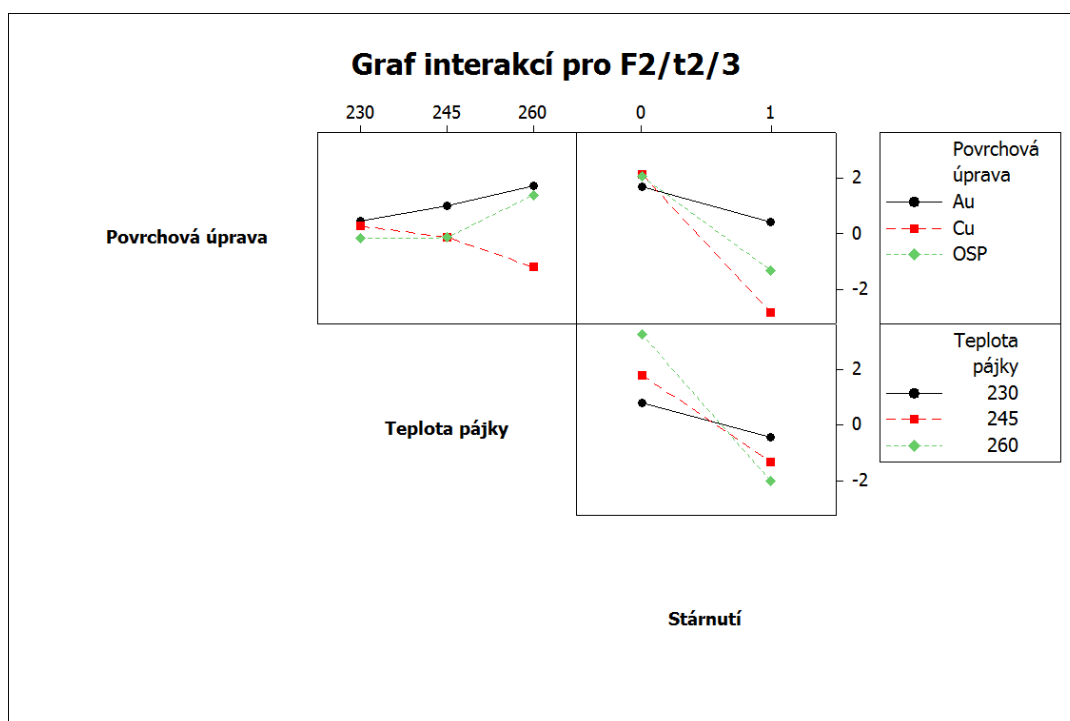
Obr. 5.2: Graf hlavních efektů pro $F_2/t_{2/3}$ za použití pouze nestárnutých vzorků

Z dalšího grafu (5.3) popisujícího vliv faktorů na odezvu – výšku smočené plochy vzorků lze vyčíst, že vzorky plátované Cu s Ni/Au dosahují nejlepších výsledků. Vzorky plátované mědí bez povrchové úpravy i s OSP dosahují menších hodnot. V praxi představuje průměrný rozdíl výšky navzlínání pájky až 1,5 milimetru. Se zvyšující se teplotou pájky se mírně zvyšuje výstupní odezva, tento jev souvisí s teplotní změnou povrchového napětí. Opět je zde nejvýznamnějším faktorem tepelné stárnutí.

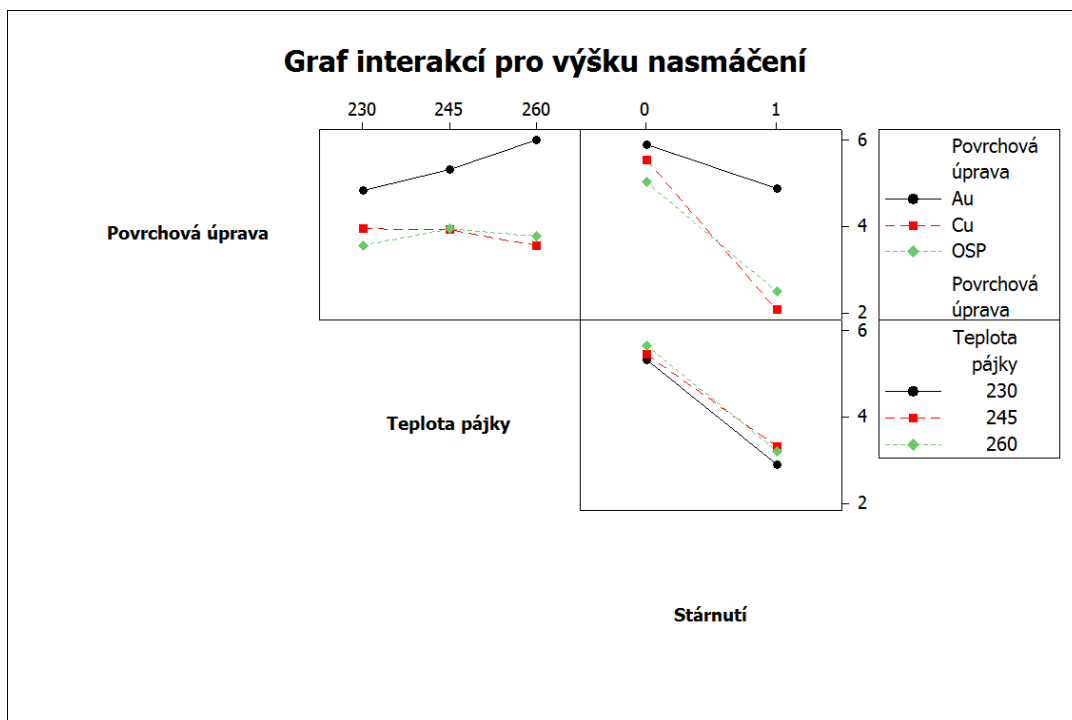


Obr. 5.3: Graf hlavních efektů pro výšku smočené plochy

Další graf, který můžeme získat analýzou dat, je normálně pravděpodobnostní graf, který představuje distribuční funkci normálního rozdělení. Je vhodný pro větší počet faktorů a tak raději použijeme graf interakcí. Ten může pomoci odhalit důležité interakce mezi faktory podobně jako normálně pravděpodobnostní graf a je možné z něj získat i další informace.



Obr. 5.4: Graf interakcí pro $F_2/t_{2/3}$



Obr. 5.5: Graf interakcí pro výšku smočené plochy

Jsou-li úsečky rovnoběžné, interakce neexistuje nebo je nevýznamná. Čím větší úhel úsečky svírají, tím větší interakce existuje. Jinými slovy, interakce existuje, pokud změna jednoho faktoru vyvolá výraznou změnu efektu jiného faktoru. Z grafů interakcí (5.4) a (5.5) je vidět, jak se chová příslušná odezva pro různý materiál, při různé teplotě a po tepelném stárnutí.

5.1.3 Model procesu

Jelikož je u vzorků vystavených tepelnému stárnutí větší rozptyl hodnot při měření, který by způsoboval nepřesnosti výpočtu, bude faktor tepelného stárnutí vypuštěn. Pomocí regresní funkce lze stanovit koeficienty modelu experimentu. Ten má obecný tvar

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \dots, \quad (5.1)$$

kde koeficienty A, B označují faktory a koeficient β_0 je střední hodnota odezvy, koeficienty β_1, β_2 se určí jako polovina efektů u jednotlivých faktorů. Jelikož je jeden z faktorů nespojitý, jedná se o faktor vyjadřující materiál, musí být rovnice modelu procesu vypsána pro každý materiál zvlášť:

- Rovnice modelu pro FR4 plátovanou Cu s Ni/Au

$$F_2/t_{2/3} = -18,5 + 0,0824 B \quad (5.2)$$

- Rovnice modelu pro FR4 plátovanou Cu bez povrchové úpravy

$$F_2/t_{2/3} = -18,5 + 0,450 + 0,0824 B \quad (5.3)$$

- Rovnice modelu pro FR4 plátovanou Cu s OSP

$$F_2/t_{2/3} = -18,5 + 0,366 + 0,0824 B \quad (5.4)$$

Tyto rovnice slouží jako prediktivní model procesu a je možno díky nim nastavit faktory pro požadovanou hodnotu výstupu. Model procesu má tedy několik využití:

- zjištění lokálně optimálních nastavení
- stanovení směru dynamického plánování experimentu
- odhad odezvy Y [7]

5.2 Testování vodivosti

V této části jsou vyhodnocena data naměřená na testovacích deskách s naprosto stejnou povrchovou úpravou, jako měly vzorky testované metodou smáčecích vah. Na deskách byla měřena vodivost simulovaných součástek typu Flip Chip 2x2 vývody. Při experimentu bylo měněno několik faktorů a sledována změna vodivosti u simulovaných součástek, které byly zapájeny stejnou pájkou se stejným tavidlem použitým při testu smáčivosti. Stejně podmínky byly zvoleny z důvodu možnosti sledování korelace smáčecích charakteristik s elektrickými vlastnostmi. Při testování byly desky podrobeny proudovému namáhání, tepelnému namáhání, desky byly zapájeny při jiném teplotním profilu pomocí reflow pájení a simulované součástky byly zapájeny ve dvou výškách. Tyto podmínky tvoří vstupní faktory, na výstupu procesu je vždy sledována změna vodivosti pájených spojů a to po zapájení, po 24 h a po 72 h.

Jelikož je testovaná skupina desek pro termální stárnutí a skupina testovaných desek pro proudové stárnutí jiná, nejedná se o stejné desky, musíme provést analýzu pro desky s proudovým a termálním namáháním zvlášť. Variabilita desek je brána z hlediska různé výchozí vodivosti bez jakéhokoli stárnutí. Ve faktorovém plánu proto jsou 4 faktory, faktor A – materiál, faktor B – teplotní profil pájení (vyjádřen pomocí PWI – Process Window Index), faktor C – výška pájeného spoje a faktor D – doba proudového nebo termálního stárnutí.

5.2.1 Faktorový plán pro testování vodivosti po proudovém stárnutí

Tento experiment má 4 vstupních faktory. Výška součástky, pájecí profil a použitý materiál má 2 úrovně, dalšími faktorem je proudové namáhání, které má úroveň 3. Hodnoty úrovní proudového namáhání jsou zapsány časem, po který bylo namáhání prováděno. K experimentu bylo provedeno 12 pokusů. V následující tabulce (5.3) jsou zobrazeny úrovně všech faktorů, které byly použity u experimentu. Pro jednoduchost je opět FR4 plátovaná Cu s povrchovou úpravou Ni/Au značena jen Au a FR4 plátovaná Cu s OSP je značena pouze OSP.

Tab. 5.3: Úrovně faktorů pro testování vodivosti po proudovém stárnutí

Faktor	úroveň -1	úroveň 0	úroveň 1
Materiál A	Au	-	OSP
PWI [%] B	94	-	450
Výška spoje [mm] C	0,225	-	0,3
Čas [h] D	0	24	72

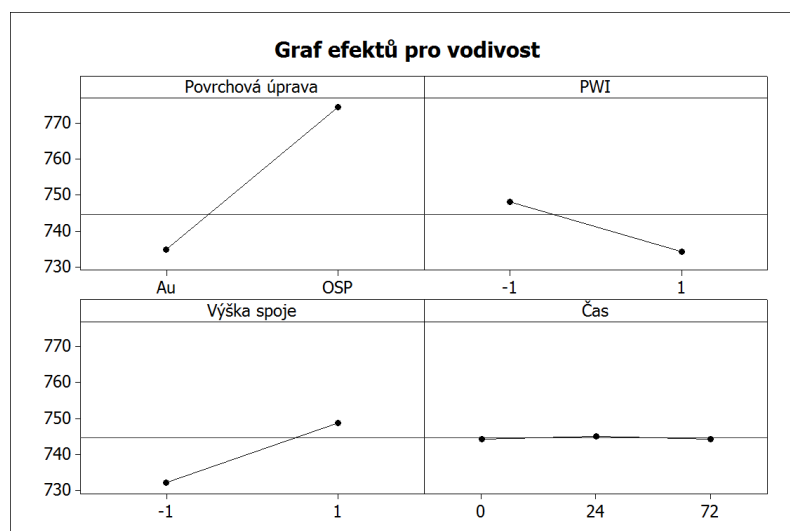
Z tabulky faktorů je sestaven faktorový plán, ve kterém jsou zahrnuty všechny použité kombinace faktorů. Více naměřených kombinací bohužel nebylo k dispozici a tak bude provedena analýza pouze z těchto možností. V posledním sloupci jsou uvedeny výstupní hodnoty představující naměřenou vodivost. Faktor A a D není překódován, umožní to lepší přehled v následujících grafech.

Tab. 5.4: Faktorový plán pro testování vodivosti po proudovém stárnutí

Pořadí	Materiál A	PWI B	Výška spoje C	Čas [h] D	G [S]
1	Au	-1	-1	0	732,4
2	Au	-1	-1	24	732,5
3	Au	-1	-1	72	732,1
4	Au	-1	1	0	737,9
5	Au	-1	1	24	738,5
6	Au	-1	1	72	737,1
7	Au	1	1	0	734,2
8	Au	1	1	24	734,4
9	Au	1	1	72	733,9
10	OSP	-1	1	0	773,3
11	OSP	-1	1	24	775,2
12	OSP	-1	1	72	774,7

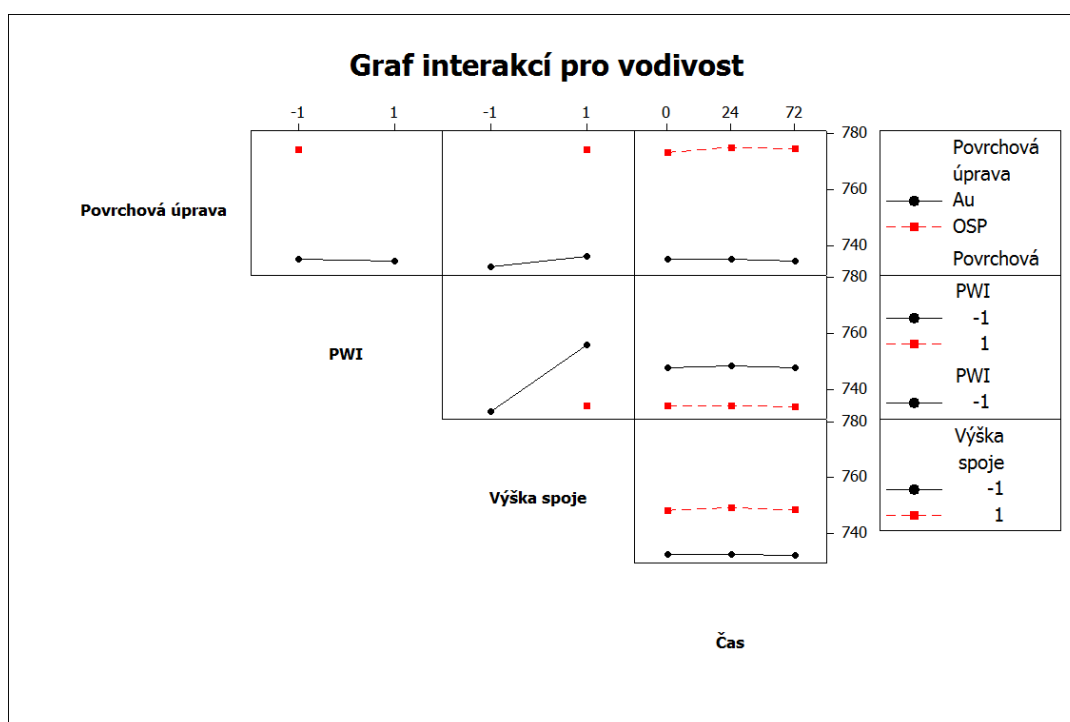
5.2.2 Analýza dat testované vodivosti po proudovém stárnutí

Graf (5.6) udává, že na vodivost má zásadní vliv typ použitého materiálu. U FR4 plátované Cu s OSP je znatelně vyšší hodnota vodivosti než u FR4 plátované Cu s povrchovou úpravou Ni/Au. Tento rozdíl je ovšem zřejmě způsoben nepřesnou výrobou zkušebních desek, výsledkem čehož je rozdílná velikost jejich pájecí ploch. Faktor teplotního profilu a výšky spoje ovlivňuje vodivost jen velmi málo. Při vyšším pájecím profilu hodnota vodivosti klesla, to je způsobeno degradací pájky a rychlejší tvorbou krystalů a intermetalických vrstev v důsledku vyššího integrálu dodané energie. Zajímavým zjištěním je, že při větší výšce spoje se hodnota vodivosti zvýšila. Faktor doby, po kterou působí elektrické namáhání, nevykazuje téměř žádný vliv na výslednou vodivost. Vhodnější by bylo měřit vodivost po mnohem delších intervalech proudové zátěže.



Obr. 5.6: Graf efektů pro vodivost po proudovém stárnutí

Graf (5.7) zobrazuje interakce mezi jednotlivými faktory a jejich vliv na vodivost. Úsečky jsou téměř rovnoběžné, k interakci mezi faktory tedy nedochází. FR4 plátovaná Cu s OSP byla proměřena pouze s jedním teplotním profilem a jednou výškou pájeného spoje, proto jsou výsledky nekompletní.



Obr. 5.7: Graf interakcí pro vodivost po proudovém stárnutí

5.2.3 Faktorový plán pro testování vodivosti po termálním stárnutí

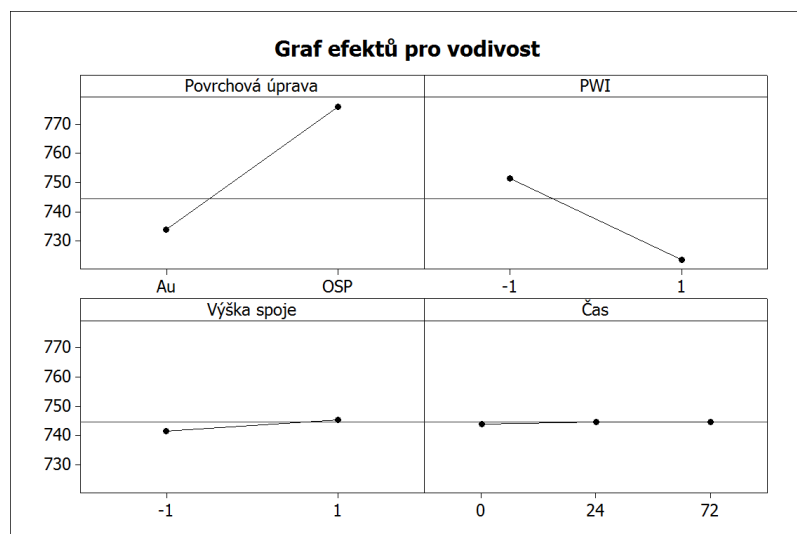
Plán obsahuje stejné faktory jako při proudové zátěži, místo které je ovšem použita tepelná zátěž. Úrovně faktorů jsou stejné jako v předchozí kapitole. Opět je sestaven faktorový plán pro všechny použité kombinace. Časový faktor v tomto případě případně vyjadřuje dobu, po kterou byly desky vystaveny termálnímu stárnutí.

Tab. 5.5: Faktorový plán pro testování vodivosti po termálním stárnutí

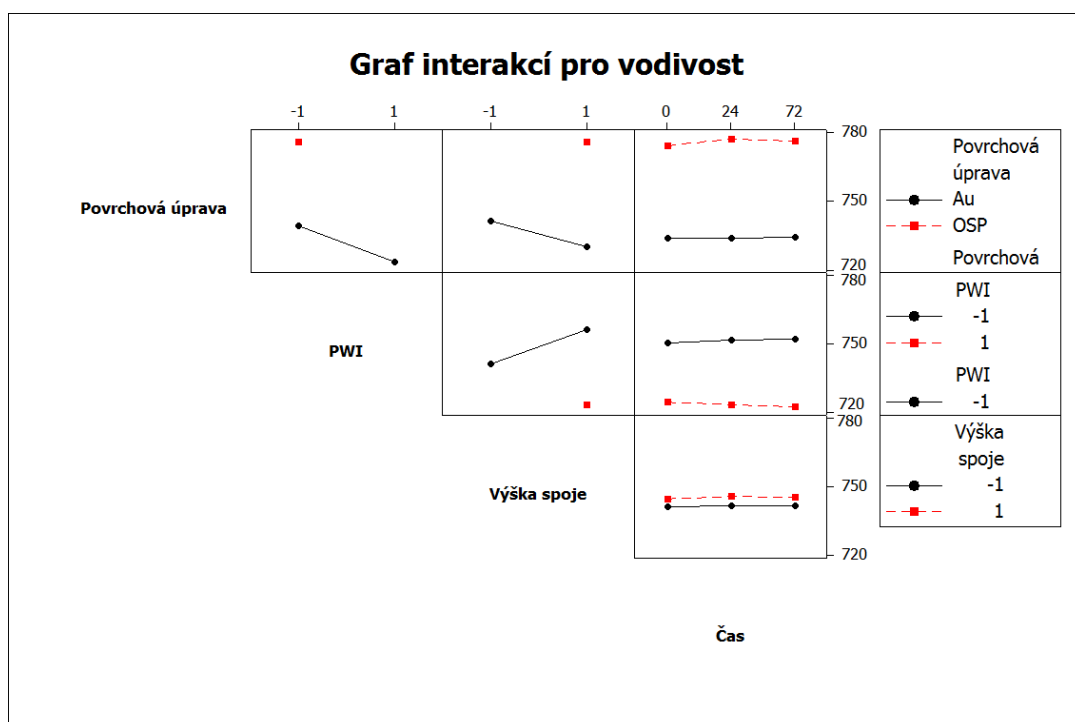
Pořadí	Materiál A	PWI B	Výška spoje C	Čas [h] D	G [S]
1	Au	-1	-1	0	741,4
2	Au	-1	-1	24	741,7
3	Au	-1	-1	72	735,7
4	Au	-1	1	0	735,6
5	Au	-1	1	24	736,5
6	Au	-1	1	72	738,3
7	Au	1	1	0	724,7
8	Au	1	1	24	723,6
9	Au	1	1	72	722,6
10	OSP	-1	1	0	774,4
11	OSP	-1	1	24	777,5
12	OSP	-1	1	72	776,4

5.2.4 Analýza dat testované vodivosti po termálním stárnutí

Pro faktory materiálu, teplotního profilu a výšky spoje vycházejí z grafu efektů (5.8) podobné výsledky jako při proudovém stárnutí. Největší roli opět hraje výběr použitého materiálu. Rozdílná výška spoje má na výslednou vodivost minimální vliv. Doba tepelného namáhání má na výslednou vodivost zanedbatelný vliv, zřejmě z důvodu krátké doby, po kterou byla deska vystavena termálnímu stárnutí.



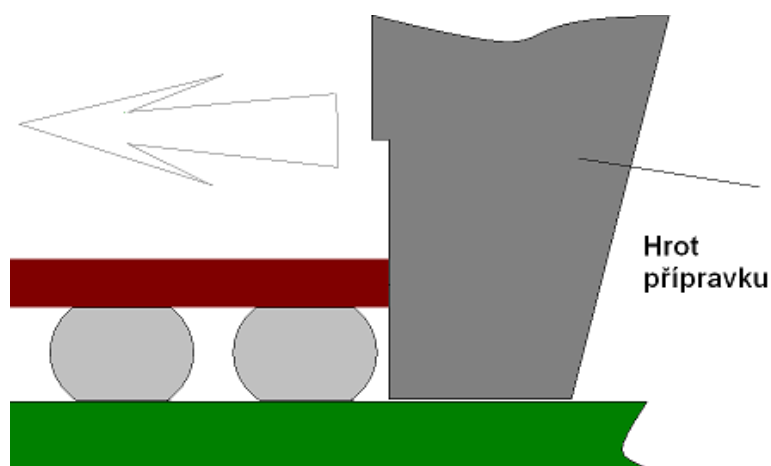
Obr. 5.8: Graf efektů pro vodivost po termálním stárnutí



Obr. 5.9: Graf interakcí pro vodivost po termálním stárnutí

5.3 Testování pevnosti pájených spojů

Zkouška mechanické pevnosti se provádí na přístroji DAGE 2400, který působí definovanou zaznamenávanou silou na vzorek. Zařízení je propojeno s počítačem, který vyhodnotí velikost mechanické zátěže nutné k oddělení simulované součástky. Rychlost posuvu hrotu byla $500 \mu\text{m/s}$. K testování byly použity desky nestárnuté, po proudové zátěži a po termálním stárnutí. Také je sledován vliv dalších faktorů – teplotního profilu, výšky zapájené součástky a použitého materiálu. Sledovanou veličinou je hmotnost měřená v kilogramech, při které je simulovaná součástka odtržena z desky. Z každé desky bylo odtrženo 10 simulovaných součástek. Každý faktor má pouze dvě úrovně, ve faktorovém plánu budou hodnoty faktorů zakódovány podle následující tabulky (5.6).



Obr. 5.10: Princip zkoušky stříhem

Tab. 5.6: Úrovně faktorů pro trhací zkoušky

Faktor	úroveň -1	úroveň 1
Materiál A	Au	OSP
PWI [%] B	94	450
Výška spoje [mm] C	0,225	0,3
Doba proudového stárnutí [h] D	0	72
Doba termálního stárnutí [h] E	0	72

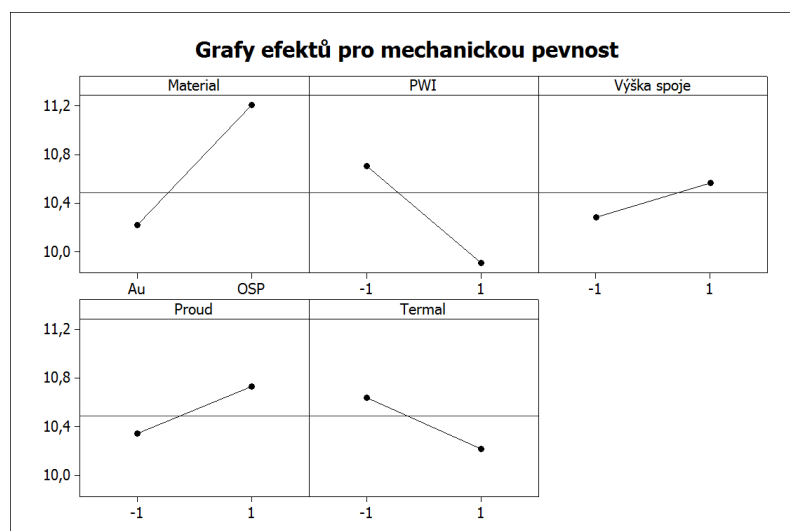
5.3.1 Faktorový plán pro testování pevnosti

Tab. 5.7: Faktorový plán pro testování mechanické pevnosti

Pořadí	A	B	C	D	E	m [kg]	sm.odchylka [kg]
1	Au	-1	1	-1	1	10,4	0,9
2	Au	-1	1	1	-1	10,8	0,3
3	Au	1	1	-1	1	9,5	0,8
4	Au	1	1	1	-1	10,3	0,3
5	Au	1	1	-1	-1	9,9	0,8
6	Au	-1	-1	-1	-1	10,2	0,7
7	Au	-1	-1	-1	1	9,8	1,0
8	Au	-1	-1	1	-1	10,7	0,4
9	OSP	-1	1	-1	-1	11,4	0,4
10	OSP	-1	1	-1	1	11,2	0,9
11	OSP	-1	1	1	-1	11,1	0,6

5.3.2 Analýza dat testované mechanické pevnosti

Z faktorového plánu jsou sestaven graf efektů, ze kterého jsou jasně vidět jednotlivé vlivy na mechanickou pevnost pájeného spoje. FR4 plátovaná Cu s povrchovou úpravou Ni/Au dosahuje menších hodnot mechanické pevnosti. Mechanickou pevnost také snižuje vyšší teplotní profil pájení a termální stárnutí. Nejdůležitějším faktorem je tedy dodané množství tepla. Součástky po proudovém namáhání vykazují lepší mechanickou pevnost než součástky po termálním namáhání. Výška pájeného spoje má na výslednou pevnost téměř zanedbatelný vliv, který se pohybuje v hodnotách střední odchylky při měření.



Obr. 5.11: Graf efektů pro mechanickou pevnost pájených spojů

Tab. 5.8: Četnosti defektů

Materiál	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	OSP	OSP	OSP
Stárnutí	T	P	T	P	N	N	T	P	N	T	P
Výška poje [mm]	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
PWI [%]	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Defekt 1	3	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Defekt 2	18	26	24	21	26	24	36	15	38	20	20
Defekt 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	18
Defekt 4	19	14	16	19	14	16	3	25	2	6	2
Defekt 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Na obr. (5.12) jsou zobrazena možná místa odtržení simulované součástky.

Defekt 1 - odtržení od FR4

Defekt 2 – odtržení od plátovaného materiálu u FR4

Defekt 3 – odtržení v pájce

Defekt 4 – odtržení od plátovaného materiálu u součástky

Defekt 5 – odtržení od základního materiálu součástky

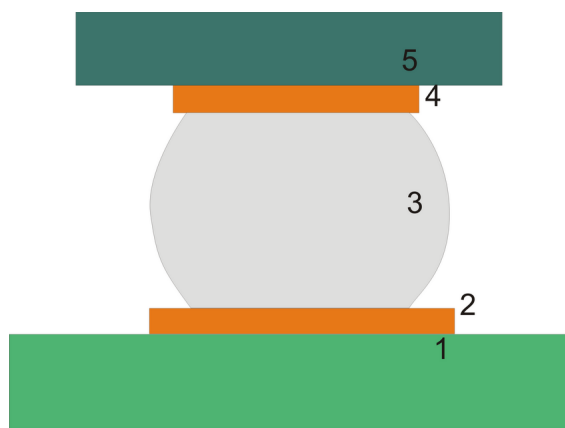
Materiál – Au značí FR4 plátovanou zlatem, OSP značí FR4 plátovanou Cu s organickou ochrannou vrstvou

Stárnutí – T – termální, P – proudové, N – nestárnuté

PWI – Process Window Index, -1 – 94%, 1 – 450%

Výška spoje, -1 – 0,225 mm, 1 – 0,3 mm

Po provedení trhacích zkoušek byly vyhodnoceny jednotlivé typy defektů u každého pájeného spoje. Defekty jsou rozděleny do 5 kategorií podle místa, kde došlo k odtržení součástky. Schématicky znázorněno na obr. (5.12). Z tabulky (5.8) pro četnosti jednotlivých defektů vychází, že u nestárnutého materiálu došlo mnohem častěji k defektu typu 2, tedy odtržení od plátovaného materiálu u FR4. U FR4 plátované Cu s OSP po termálním i proudovém stárnutí se často vyskytuje defekt 3, druhy stárnutí tedy ovlivňují mechanickou pevnost pájky. Pájka u simulované součástky byla během procesu výroby desky dvakrát přetavena, dosahuje vyšší mechanické pevnosti, to je dokázáno častějším výskytem defektu typu 2 v celém souboru defektů.



Obr. 5.12: Místa odtržení součástky

5.4 Diskuze dosažených výsledků a korelace smáčecích charakteristik

Dílčí výsledky analýzy Design of Experiments jsou uvedeny vždy v příslušných kapitolách. K interpretaci výsledků posloužily grafy, které jsou velmi dobrou názornou pomůckou k prozkoumání dat a také sledování vlivu faktorů.

V tabulce jsou pro porovnání uvedeny faktory smáčivosti ($F_2/t_{2/3}$) pro příslušné materiály a naměřené hodnoty vodivosti a mechanického zatížení simulovaných součástek. V dalších tabulkách jsou vypočteny poměry faktoru smáčivosti a vodivosti a poměr faktoru smáčivosti a mechanického zatížení.

Tab. 5.9: Hodnoty smáčivosti, vodivosti a mechanického zatížení

Materiál	$F_2/t_{2/3}$	G_N [S]	G_T [S]	G_P [S]	m_N [kg]	m_T [kg]	m_P [kg]
Au	1,65	736,3	738,3	737,05	11,5	10,4	10,9
OSP	1,97	774,6	776,4	774,7	11,4	11,2	11,1

Tab. 5.10: Poměr faktoru smáčivosti a příslušné vodivosti

Materiál	$\frac{F_2/t_{2/3}}{G_N}$	$\frac{F_2/t_{2/3}}{G_T}$	$\frac{F_2/t_{2/3}}{G_P}$
Au	445,2	446,4	445,6
OSP	394,2	395,1	394,3
Δ [%]	11,5	11,5	11,5

Tab. 5.11: Poměr faktoru smáčivosti a mechanického zatížení

Materiál	$\frac{F_2/t_{2/3}}{m_N}$	$\frac{F_2/t_{2/3}}{m_T}$	$\frac{F_2/t_{2/3}}{m_P}$
Au	7,0	6,3	6,6
OSP	5,8	5,7	5,6
Δ [%]	17,1	9,5	15,2

G_N – vodivost nestárnutých vzorků

G_T – vodivost termálně stárnutých vzorků

G_P – vodivost proudově stárnutých vzorků

m_N – zatížení potřebné k odtržení součástky u nestárnutých vzorků

m_T – zatížení potřebné k odtržení součástky u termálně stárnutých vzorků

m_P – zatížení potřebné k odtržení součástky u proudově stárnutých vzorků

Jelikož je zlato ušlechtilý kov, je brána povrchová úprava Ni/Au jako referenční. Smáčecí charakteristika u povrchové úpravy OSP je o 19 % příznivější. Při srovnání s procentuálním rozdílem hodnot v tabulce (5.10) je vidět, že se rozdíl snížil pouze na necelých 12 %. Vzhledem k tomu, že byly testovací desky vyrobeny ve dvou firmách – Gatema Boskovice a Printed Mělník, a nemají stejné vzhledové charakteristiky, nemusí být zjištěné hodnoty zcela přesné. Je ale zřejmé, že korelace smáčecích charakteristik s elektrickými a mechanickými vlastnostmi existují, ale k provedení objektivních závěrů je potřeba provést rozsáhlejší měření vzorků v delším časovém horizontu u proudového a termálního zatížení. Z hlediska zátěží se korelace příliš neprojevila. Je však vysoce pravděpodobné, že bude docházet ke změnám jak materiálního složení difúzí v pevné fázi, tak krystalické struktury. Pro pokračování ve zjišťování korelací by bylo vhodné měřit větší soubor testovacích desek a například provádět mikrovýbrusy.

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá metodou smáčecích vah, metodikou testování smáčecích charakteristik oboustranně plátovaného základního materiálu. Metodou Design of Experiments jsou analyzovány změny elektrických a mechanických vlastností. Je diskutována korelace se smáčecími charakteristikami.

Pro měření smáčecích charakteristik byly použity tři typy zkušebních vzorků. Byl použit základní materiál FR4 plátovaný mědí s chemicky nanesenou úpravou Ni/Au, FR4 plátovaná mědí bez povrchové úpravy a FR4 plátovaná mědí s organickým ochranným povlakem. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin, první skupina byly nové nestárnuté vzorky a druhá skupina byla podrobena izotermálnímu stárnutí po dobu 1 h při teplotě 150 °C. Testované vzorky byly vždy připraveny stejným postupem a byl dodržen stejný technologický postup měření pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků. U měření smáčecích charakteristik byla použita teplota pájky 230 °C, 245 °C a 260 °C. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a smáčecí charakteristiky vyneseny do grafů pro srovnání výsledků. Pro všechny typy materiálů jsou vypočítány také jejich smáčecí úhly v průběhu smáčecího procesu. Jelikož byl použit nehomogenní materiál, byl také spočítán smáčecí úhel na jednotlivých stranách testovacího vzorku. Toho bylo dosaženo na základě měření smáčecích charakteristik tří speciálně upravených vzorků, u kterých byla odleptána různá část pokovení. Z naměřených hodnot a soustavy rovnic byly pomocí metody lineárního programování vypočteny smáčecí úhly na jednotlivých stranách materiálu.

Metoda Design of Experiments posloužila k vyhodnocení vlivu jednotlivých faktorů na výslednou smáčecí charakteristiku a výšku smočené plochy testovaných kupónů. Ze sestaveného faktorového plánu byly vytvořeny grafy, ze kterých je náznorně vidět vliv použitých vstupních podmínek na měřenou odezvu. Stejným postupem byla vyhodnocena měření vodivosti a mechanické pevnosti u simulovaných součástek na deskách se stejnými povrchovými úpravami jako měly testovací kupóny pro měření smáčecích charakteristik. Desky pro měření elektrických vlastností byly testovány za různých podmínek ovlivňujících výslednou vodivost – jiné materiály, teplotní profil, výška součástky a doba, po kterou byly desky vystaveny termálnímu stárnutí nebo proudové zátěži. Také byla použita stejná pájka a tavidlo, aby bylo možné sledovat korelace smáčení s elektrickými a následně mechanickými vlastnostmi.

Po analýze hodnot vychází z naměřených smáčecích charakteristik, že faktorem, který nejvíce ovlivňuje smáčení je termální stárnutí, po kterém jsou vzorky značně zoxidovány a velmi výrazně ztrácejí své smáčecí vlastnosti. Termálnímu stárnutí nejvíce odolává FR4 plátovaná mědí s povrchovou úpravou Ni/Au. U nestárnutých

vzorků se výsledná charakteristika zlepšuje při zvyšování teploty pájky a nejvhodnějším materiálem je měď. Při sledování výšky smočené plochy pájky na vzorcích dopadla nejlépe FR4 plátovaná mědí s povrchovou úpravou Ni/Au.

U sledování vodivosti simulovaných součástek byla provedena analýza hodnot u desek po proudovém namáhání a termálním stárnutí. U obou skupin vychází z hlediska vodivosti vhodnějším materiálem měď s organickým ochranným povrchem. U součástek s vyšší výškou pájeného spoje byla zjištěna mírně vyšší hodnota vodivosti. Vyšší hodnota pájecího profilu naopak výslednou vodivost snižuje, což souvisí s rychlejší tvorbou intermetalických vrstev v důsledku většího integrálu dodané energie. Proudové i termální zatěžování má na vodivost velmi malý vliv. Po třech dnech zatěžování je rozdíl pouze několik desetin procenta od výchozí hodnoty.

Trhací zkouškou byly zjištěny vztahy působících faktorů na mechanickou pevnost u simulovaných součástek na deskách, které byly použity pro testování vodivosti. Největší pevnost vykazuje materiál měď s organickým ochranným povrchem. Vyšší teplotní profil pájení pevnost snižuje. Zajímavým zjištěním je vliv proudové zátěže, který pevnost spoje zvýšil a termální zátěž naopak pevnost snížila.

LITERATURA

- [1] ANTONY, J. *Design of Experiment for Engineers and Scientists*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN: 0 7506 4709 4.
- [2] DUŠEK, K; URBÁNEK, J; DRÁPALA, J. *Měření pájitelnosti mědi, niklu a mosazi pro různé druhy pájek a tavidel*. [online]. FEL ČVUT Praha, VSB Ostrava [cit. 2010-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/50.pdf>>
- [3] DREISEITLOVÁ, D. *Plánování experimentů*. [online]. [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.dtocz.cz/casopis.php?id_article=179>.
- [4] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*. pracovní verze 90503, 2009.
- [5] SZENDIUCH I. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [cit. 2010-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>
- [6] ŠPETÍK, Z. *Návrh a analýza plánovaných experimentů*. Skriptum, 2001.
- [7] TOŠENOVSKÝ J.; NOSKIEVIČOVÁ D. *Statistické metody pro řízení jakosti*. Ostrava, 2000. 362 stran. ISBN 80-7225-040-X.
- [8] *Vitronics Soltec* [online]. 2006 [cit. 2010-03-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.vitronics-soltec.com>>
- [9] *Lead free soldering flux*. [online]. 2007, [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.wsbenelux.nl/producten/kester/pdf/tsf-6592%20global%20%2805jun07%29.pdf>>
- [10] *Problémy pájitelnosti*. [online]. [cit. 2010-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.smtcentrum.cz/pruvodce-technologie/smt/pajeny-spoj-pajitelnost/nektre-problemy-pajitelnosti.html>>
- [11] *Solder Datasheets*. [online]. [cit. 2010-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.metallicresources.com/>>
- [12] *979T VOC-free flux*. [online]. 2008, [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <[http://www.peromatic.ch/d/produktelinien/Kester/979T%20\(30Apr08\).pdf](http://www.peromatic.ch/d/produktelinien/Kester/979T%20(30Apr08).pdf)>
- [13] *Ecofrec 202*. [online]. 2008, [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.jamiel.cz/files/products/avantec/Ecofrec_202%20.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A,B,C faktory

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ koeficienty regresní funkce

BGA Ball Grid Array

CSP Chip Size package

d_1, d_2, d_3 odchylky

DOE Design of Experiments

F výsledná síla působící na vzorek

F_1 smáčecí síla u vzorku s jednou odleptanou stranou mědi

$F_{1/2}$ smáčecí síla u vzorku, kde je odleptána polovina plochy mědi z každé strany

$F_{1/3}$ smáčecí síla u vzorku, u kterého tvoří měď 1/3 plochy

F_{max} je maximální výsledná síla.

FR4 základní materiál (Flame Retardant)

F_s smáčecí síla

F_{vz} vztlačková síla působící na vzorek

g gravitační zrychlení

γ povrchové napětí

HAL Hot Air Leveling

OSP Organic Surface Protection

p obvod vzorku

PWI Process Window Index

ρ hustota

SMD Surface Mount Device

SMT Surface Mount Technology

$t_{2/3}$ čas, kdy smáčecí síla dosáhne 2/3 maximální smáčecí síly

Θ smáčecí úhel

V objem vzorku

VOC Volatile Organic Compound

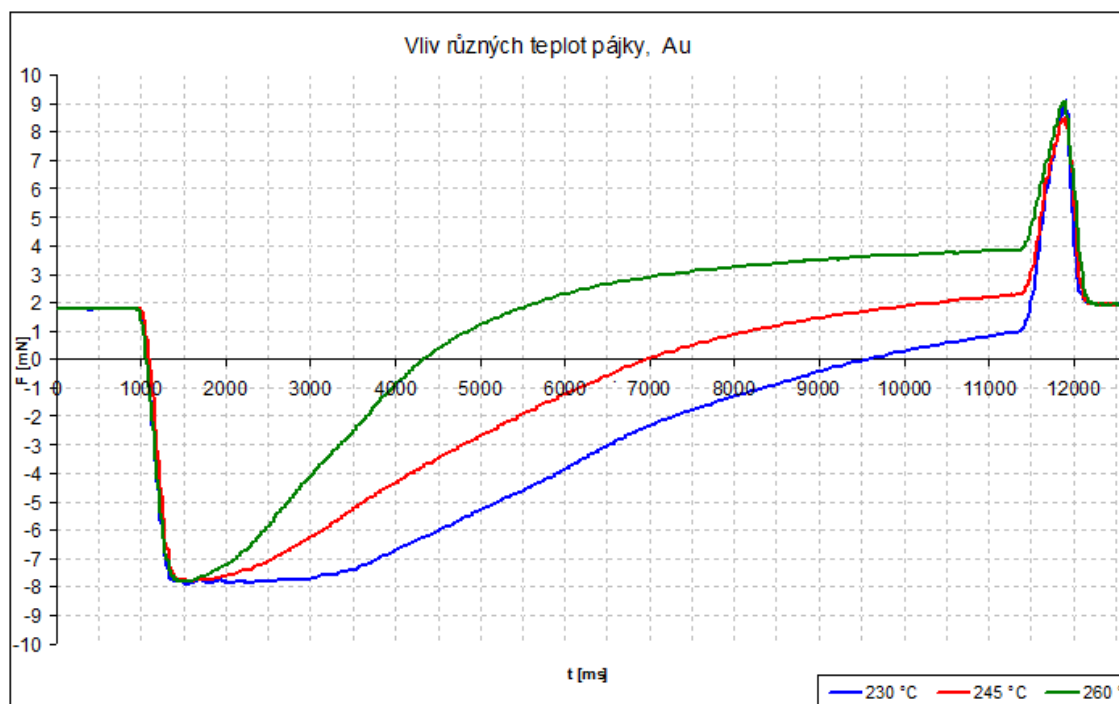
Y výstupní proměnná

SEZNAM PŘÍLOH

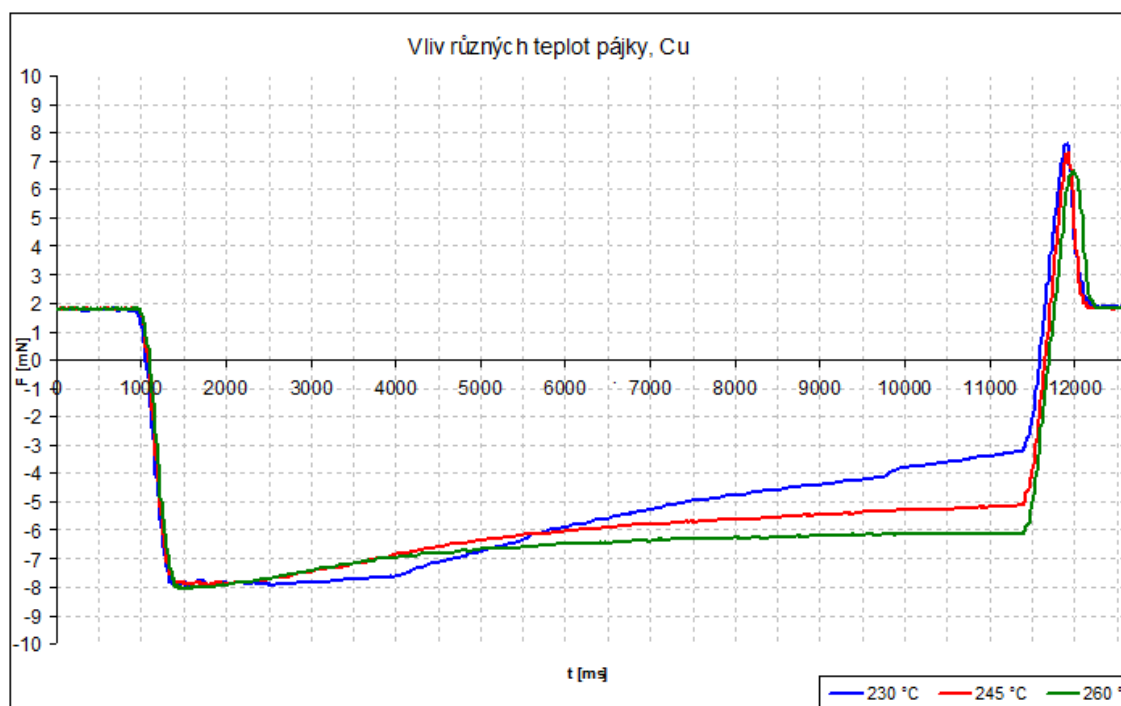
A Smáčecí char. pro stárnuté vzorky

69

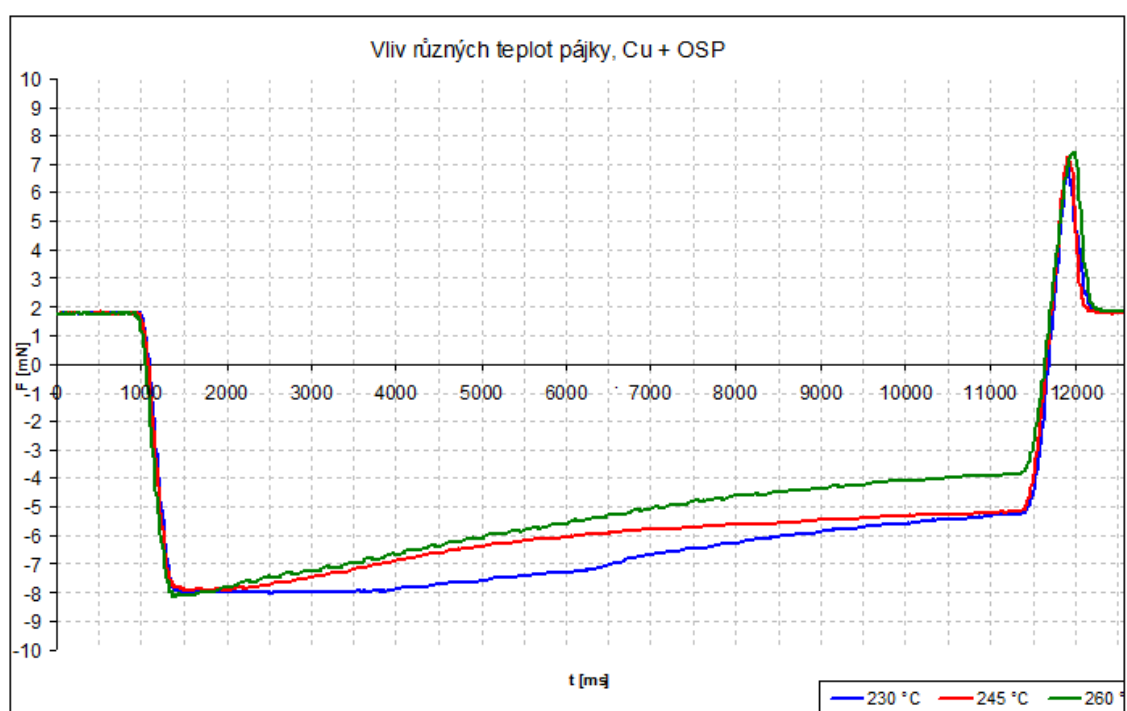
A SMÁČECÍ CHAR. PRO STÁRNUTÉ VZORKY



Obr. A.1: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s Ni/Au



Obr. A.2: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu



Obr. A.3: Závislost smáčecí síly na čase pro FR4 plátovanou Cu s OSP