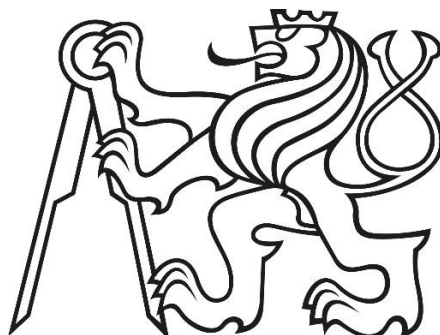


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



**Testování pájitelnosti bezolovnatých slitin
metodou smáčecích vah**

Solderability testing of lead-free alloys by wetting balance test

Diplomová práce

Master thesis

Bc. Iva Králová

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Králová** Jméno: **Iva** Osobní číslo: **474773**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Testování pájitelnosti bezolovnatých slitin metodou smáčecích vah

Název diplomové práce anglicky:

Testing of lead-free alloys solderability by the wetting balance method

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s chybami u technologie pájení a s možnými testovacími metodami
- 2) Analyzujte vybrané vzorky materiálů metodou smáčecích vah
- 3) Výsledky analýz vyhodnotte

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice, 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 20. května 2022

.....

Iva Králová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k realizaci této diplomové práce. Velké poděkování patří zejména doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho čas, odborné vedení, cenné rady a za podporu během celého magisterského studia. Děkuji také Ing. Petru Veselému, Ph.D. za jeho vstřícnost, nekonečnou trpělivost a přínosné konzultace. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Martinu Plačkovi, Ph.D., jehož odborná pomoc přispěla nemalým dílem k experimentální části této práce. Na závěr děkuji své rodině a přáteli, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší problematiku pájitelnosti bezolovnatých pájecích slitin. V první části byla provedena stručná rešerše bezolovnatého pájení se zaměřením na pájení vlnou, kterou následuje vysvětlení fyzikální podstaty smáčení a měření povrchového napětí. Dále se práce zabývá častými chybami v pájených spojích vytvořených pomocí pájení vlnou. Na závěr rešeršních kapitol jsou uvedeny testovací metody v technologii pájení. Cílem experimentální části práce byl návrh nové metodiky pro měření pájitelnosti pokovených otvorů DPS. K realizaci byla využita metoda smáčecích vah. Práce popisuje návrh experimentu i chyby, kterým je třeba se vyvarovat. Představenou metodiku je možné dále použít pro hodnocení pájitelnosti prokovů v technologii skrzděrové montáže. Navrženým postupem bylo následně provedeno měření, z něhož vyplývá vliv teploty pájecí lázně, průměru prokovu a použitých tavidel na hodnocené parametry pájitelnosti jako např. zero-cross time, čas nesmáčení, maximální smáčecí sílu, výšku vyvzlínání pájky a další.

Klíčová slova

Bezolovnaté pájení, meniskograf, metoda smáčecích vah, pájitelnost, smáčení.

Abstract

This master thesis deals with solderability issues of lead-free solder alloys. The first part contains a short literature review on lead-free soldering with a focus on wave soldering, followed by explanations of physical principles of wettability and surface tension measurement. In addition, this part summarizes frequent defects occurring in the solder joints created by wave soldering technology. The last part of the literature overview brings a summary of testing methods used for the soldering process quality evaluation. The goal of the experimental part of this work was to design a new methodology for solderability measurement of plated through holes (vias) connecting different layers of the printed circuit board and enabling mounting of through-hole devices. For the realization, the wetting balance test was used. The design of this experiment as well as mistakes to avoid are also described in this thesis. The introduced methodology can be further used for a solderability evaluation of vias in through-hole technology. Subsequently, the presented procedure was used for the measurement, which shows the effect of a solder bath temperature, a diameter of through-hole, and used flux on the evaluated parameters such as zero-cross time, non-wetting time, maximum wetting force, a height of capillary rise of the solder and others.

Keywords

Lead-free soldering, meniscograph, solderability, wettability, wetting balance test.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Úvod	10
1 Technologie pájení	11
1.1 <i>Pájení vlnou</i>	12
1.1.1 Charakteristika procesu.....	12
1.1.2 Typy vln.....	13
1.1.2.1 Jednoduchá vlna.....	13
1.1.2.2 Dvojitá vlna.....	14
1.1.2.3 Dutá vlna.....	15
1.1.3 Kvalita výsledného pájeného spoje.....	16
1.2 <i>Používané materiály při pájení vlnou</i>	17
1.2.1 Tavidlo.....	17
1.2.2 Slitiny.....	18
2 Smáčení	20
2.1 <i>Metody měření povrchového a mezifázového napětí</i>	22
2.1.1 Metoda kapilární elevace.....	23
2.1.2 Metoda vzestupu kapaliny na svislé desce.....	23
2.1.3 Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky.....	24
2.1.4 Metoda měření pomocí nesmáčivého vzorku.....	25
3 Chyby v pájeném spoji	26
3.1 <i>Můstky a krápníky</i>	26
3.2 <i>Studený spoj</i>	26
3.3 <i>Voidy</i>	27
3.4 <i>Vznik kuliček pájky</i>	28
3.5 <i>Nedostatečné vyplnění prostoru prokovu</i>	28
3.6 <i>Nesmáčení</i>	29
3.7 <i>Nadzvednutí součástky</i>	29
3.8 <i>Odlupování spoje</i>	30
3.9 <i>Whiskery</i>	30
4 Testovací metody v technologii pájení	31
4.1 <i>Nedestruktivní testovací metody</i>	31
4.1.1 Vizualní kontrola.....	31
4.1.2 Automatická optická kontrola.....	31
4.1.3 Rentgenové kontrolní metody.....	32
4.2 <i>Destruktivní testovací metody</i>	32
4.2.1 Metalografické výbrusy.....	32
4.2.2 Měření mechanických vlastností.....	33
4.2.2.1 Namáhání kuličky pájky stříhem.....	33
4.2.2.2 Namáhání kuličky tahem.....	34
4.3 <i>Testování pájitelnosti</i>	34
4.3.1 Ponořovací test.....	35

4.3.2	Kuličkový test	35
4.3.3	Test roztékavosti	36
4.3.4	Metoda smáčecích vah	37
4.3.4.1	Rozbor smáčecí křivky	38
4.3.4.2	Korekce vztlakové síly	39
5	Experimentální část	40
5.1	<i>Návrh experimentu</i>	40
5.1.1	Původní experiment	40
5.1.2	Nový experiment	41
5.2	<i>Použité materiály a metody</i>	41
5.2.1	Příprava experimentu	41
5.2.2	Další měření	43
5.2.3	Meniskograf	44
5.2.4	Metodika	45
5.3	<i>Výsledky experimentů</i>	46
5.3.1	Výsledky měření metodou smáčecích vah	46
5.3.2	Výsledky měření výšky menisku	51
5.3.3	Výsledky výpočtu objemu pájky v trubičce	52
5.4	<i>Vyhodnocení výsledků experimentů</i>	53
5.4.1	Vliv teploty pájecí lázně	53
5.4.2	Vliv průměru trubičky	54
5.4.3	Vliv tavidla	56
5.5	<i>Zhodnocení použité metodiky</i>	56
	Shrnutí a závěr	57
	Seznam použité literatury	59
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Přílohy	I
A.	<i>Odvození vztahu pro výpočet povrchového napětí pro nesmáčivý vzorek</i>	<i>I</i>
B.	<i>Smáčecí křivky pro různé kombinace průměru trubičky, teploty pájecí lázně a tavidla ..</i>	<i>II</i>

Seznam použitých symbolů a zkratek

- **AOI** – automatic optical inspection, automatická optická kontrola
- **BGA** – ball grid array, typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž
- **CT** – computer tomography, počítačová tomografie, radiologická vyšetřovací metoda
- **DPS** – deska plošného spoje
- **EDX** – energy dispersive X-ray analysis, energiově disperzní rentgenová analýza, metoda využívaná pro analýzu prvkového složení vzorků
- **IML** – intermetallic layer, intermetalická vrstva
- **HASL** – hot air solder leveling, druh povrchové úpravy, při které se DPS ponoří do lázně s roztavenou slitinou
- **HCl** – kyselina chlorovodíková
- **PIP** – pin-in-paste, technologie přetavení pájecí pasty v otvorech určených pro vývodové součástky skrzděrové montáže
- **RTG** – rentgenový, rentgenové záření
- **SAC** – slitina cínu, stříbra a mědi (Sn, Ag, Cu)
- **SEM** – scanning electron microscope, rastrovací elektronový mikroskop
- **SMD** – surface mount device, součástka pro povrchovou montáž
- **THD** – through-hole device, součástka s vývody pro skrzděrovou montáž
- **THT** – through-hole technology, skrzděrová technologie montáže THD součástek
- **VOC** – volatile organic compounds, těkavé organické látky
- α – kontaktní úhel na dokonale hladkém povrchu ($^{\circ}$)
- α_w – kontaktní úhel na drsném povrchu ($^{\circ}$)
- $\Delta\rho$ – rozdíl hustoty kapaliny a okolní atmosféry (kg/m^3)
- γ_{SG} – povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází (N/m)
- γ_{SL} – povrchové napětí mezi pevnou a kapalnou fází (N/m)
- γ_{LG} – povrchové napětí mezi kapalnou a plynnou fází (N/m)
- **D** – výška kuličky pájky po přetavení (mm)
- **F_{end}** – konečná smáčecí síla odpovídající množství slitiny, které zůstalo uvnitř trubičky (N)
- **F_{max}** – maximální smáčecí síla (N)
- **F_{vzt}** – vztlaková síla (N)
- **F_{wet}** – smáčecí síla (N)
- **g** – tíhové zrychlení (m/s^2)
- **h** – výška (m)
- **H** – průměr kuličky pájky před přetavením (mm)
- **p** – obvod měřeného vzorku (m)

- **r** – faktor drsnosti (-), příp. poloměr (mm)
- **R** – poloměr menisku v trubičce (mm)
- **SF** – spread factor, faktor roztékavosti (%)
- **t₀** – zero-cross time (s)
- **t_{2/3}** – čas dosažení 2/3 maximální smáčecí síly (s)
- **t_{non-wett}** – čas nesmáčení (s)
- **V** – objem (m³)
- **y** – hloubka ponoru (m)

Úvod

Ačkoli je pájení jednou z nejstarších metod metalurgického spojování, v současné době je stále aktuálním tématem a přináší mnoho prostoru pro vědecké zkoumání. Zejména v době transformace pájení z olovnatého na bezolovnaté bylo nutné začít řešit mnoho problémů z hlediska spolehlivosti pájených spojů, které ovlivňují životnost celého zařízení. V průběhu let proběhlo mnoho výzkumů vlastností bezolovnatých pájecích slitin v kombinaci s nejrůznějšími materiály, které poukazují na některé nedokonalosti těchto slitin oproti pájkám na bázi olova. Nicméně, i přesto jsou v současné době v praxi nejpoužívanější slitiny Sn-Ag-Cu, tzv. SAC, zejména potom slitina SAC305 (Sn96,5Ag3Cu0,5), kterou jsem využila i pro své experimenty. Všechny pájky v kombinaci s vybraným substrátem musí pro vytvoření kvalitního spoje splňovat určité spektrum požadavků, z nichž jedním z nejdůležitějších je pájitelnost, respektive smáčitelnost. Dobré smáčení je totiž předpokladem pro vznik kvalitního pájeného spoje s dobrými mechanickými vlastnostmi. Předtím, než je do procesu zavedena nová materiálová kombinace, je třeba pájitelnost řádně otestovat abychom předešli případným finančním ztrátám způsobených nevhodně zvolenými kombinacemi. V práci je popsána celá řada testovacích metod se zaměřením na metodu smáčecích vah, která přibližuje smáčení při pájení vlnou. Ačkoli je v současné době nejpoužívanější technologií pájení přetavením z důvodu miniaturizace součástek a využívání technologie povrchové montáže, pájení vlnou v kombinaci se skrzděrovou technologií má v elektrotechnice stále ještě své místo – a to zejména pro konektory s velkým počtem vývodů, velké elektrolytické kondenzátory a další.

V odborné literatuře je metoda smáčecích vah představována jako metoda, pomocí které je možné testovat pájitelnost vývodů zejména THD součástek. Pro kvalitně zapájený spoj pomocí pájecí linky s vlnou je však rozhodující nejen dobré smáčení vývodu součástky, ale také pokoveného otvoru. Přesto však neexistuje téměř žádná unifikovaná metodika, která by hodnocení měření smáčení prokovu umožňovala. Jedinou metodou popsanou v odborné literatuře byl modifikovaný kuličkový test (angl. *PTH globule test*), který však dává informaci pouze o času potřebném k vyvzlínání pájky skrz pokovený otvor. Nicméně, v žádné vědecké studii tato metoda nebyla reálně použita. Z tohoto důvodu se v práci zabývám návrhem experimentu, který by měření smáčení prokovu umožňoval a zároveň poskytoval více kvantitativních parametrů smáčení, než je pouze čas vzlínání slitiny skrz prokov. Navržená metodika vychází z nejpřesnější a nejvíce využívané metody smáčecích vah, kterou následně v experimentální části práce využívám pro charakterizaci smáčení prokovů o různých průměrech, s různou teplotou pájecí lázně a použitým tavidlem. Na závěr hodnotím využitelnost této metodiky v praxi.

1 Technologie pájení

Pájení patří společně se svařováním k technologiím metalurgického spojování kovových či pokovených částí přidáním roztaveného kovu, nebo slitiny. Pokud k tavení pájecí slitiny dochází pod teplotou 450 °C, hovoříme o měkkém pájení. V opačném případě se jedná o pájení tvrdé. Historicky je rozdíl mezi těmito procesy dán složením slitin. Pro měkké pájení se využívaly slitiny, které byly na bázi cínu, zatímco slitiny pro tvrdé pájení obsahovaly měď a zinek [1–3].

Dle základního dělení rozlišujeme technologie pájení ruční a strojové. Druhé jmenované se následně dále dělí podle techniky pájení. Ačkoli je ruční pájení nejstarší technologií a v současné době stále ještě velmi rozšířenou zejména v oblasti oprav, není příliš spolehlivou a reprodukovatelnou technikou. Žádný z dílčích kroků ručního pájení není ani vysoce kvalifikovaný člověk schopen s dostatečnou přesností opakovat. Do procesu totiž vstupuje mnoho proměnných, které výslednou kvalitu pájeného spoje ovlivňují. Může se jednat například o množství slitiny ve spoji, tepelné namáhání apod. [4,5].

Co se týče technik strojového pájení, není potřeba tak kvalifikované pracovní síly, oproti ručnímu pájení dochází i k časové úspoře a reprodukovatelnost procesu je bezesporu mnohonásobně vyšší. Existují zde dvě velké skupiny – pájení tekutou pájkou (angl. *flow soldering*) a pájení přetavením (angl. *reflow soldering*) [5].

Pájení přetavením se využívá zejména pro kontaktování součástek povrchové montáže (angl. *surface mount device, SMD*) ať už pro jednostrannou či oboustrannou montáž. Přetavením, tzv. *pin-in-paste (PIP)* technologií, lze však připájet i vývodové součástky (angl. *through-hole device, THD*) a tedy desky plošných spojů (DPS) smíšené montáže. Většinou se však při přetavení jedná pouze o SMD součástky. Prvním krokem je nanesení slitiny (nejčastěji pomocí šablonového tisku) ve formě pájecí pasty obsahující několik složek. Jednou z nich je také tavidlo. Následuje osazení součástek a přetavení v peci s nastaveným teplotním profilem. Pro přetavení pájecí pasty je možné využít různých zdrojů tepla jako např. infračervený zářič, horký vzduch (případně jiný plyn), laser nebo i skupenské kondenzační teplo páry. V závislosti na použitém zdroji tepla umožňuje pájení přetavením jak hromadnou výrobu, tak selektivní zapájení [1,6,7].

Pájení tekutou pájkou dále rozlišujeme na pájení vlnou, vlečením a ponorem. Pájení vlnou je nejpoužívanější metodou flow pájení, proto se budu dále více zabývat právě touto technologií. Tato technologie se využívá zejména pro konektory s velkým počtem vývodů, velké elektrolytické kondenzátory apod. [1,7]. Vývodové kondenzátory, na rozdíl od SMD, vydrží vyšší teploty a jsou odolnější proti mechanickému namáhání. THD součástky se tedy využívají zejména v aplikacích s vysokou spolehlivostí výrobků, které vyžadují silnější propojení mezi vrstvami – zatímco SMD jsou upevněny na povrch DPS pouze pájkou, vývody THD procházejí skrz DPS a tím zajišťují větší odolnost vůči okolnímu namáhání [8].

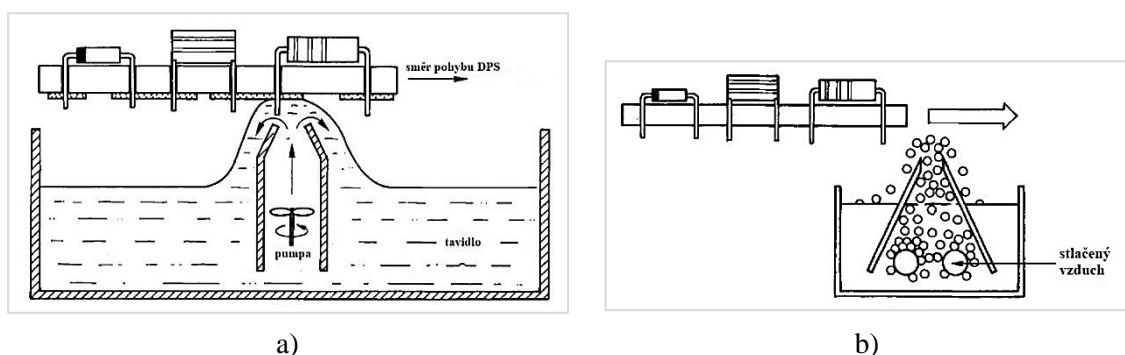
1.1 Pájení vlnou

V této kapitole se budu detailněji zabývat pájením vlnou (angl. *wave soldering*). Podívám se na charakteristiku procesu, pro jakou montáž je tato technika využitelná, druhy vln, nanášení tavidla a v neposlední řadě také na kvalitu výsledného spoje.

1.1.1 Charakteristika procesu

Pájení vlnou je technologický proces charakterizovaný zejména tím, že součástky osazené na desce plošného spoje (DPS) jsou nejčastěji vývodové, THD. Vlnou lze však pájet i SMD součástky, které je nutné před procesem na DPS přilepit pomocí nevodivého a netoxického lepidla. Na lepidlo jsou kladeny i další požadavky, jako například malá roztékavost nebo dobrá adheze k součástce i DPS. Dále je zapotřebí, aby s rostoucí teplotou lepidlo neměklo a chemicky neovlivňovalo výsledný pájený spoj. Před samotným zapájením se lepidlo vytvrdí, typicky při teplotě 150 °C. Je důležité si také uvědomit, že na rozdíl od vývodových součástek, kde se vlna nachází na druhé straně DPS než samotná součástka, při pájení SMD prochází součástka vlnou roztavené pájecí slitiny. Dochází tak k teplotnímu namáhání, které musí součástka vydržet [1,9]. Problém mohou způsobovat velmi malé součástky povrchové montáže, nebo naopak velké elektrolytické kondenzátory. Malé součástky způsobují problémy během přilepování. V některých případech je totiž „kulička“ lepidla větší než samotná součástka a následkem toho může lepidlo přetéct na pájecí plošku. Velké SMD součástky způsobují problém z důvodu tepelného namáhání, které může vést k prasknutí součástky [10].

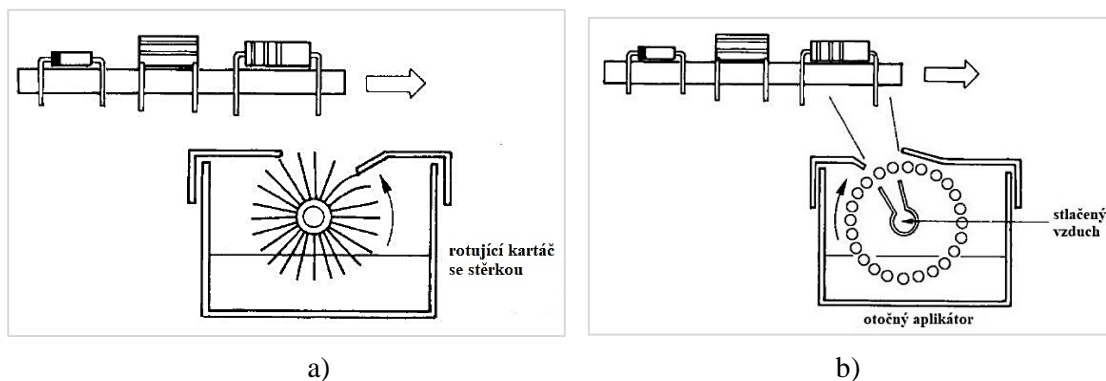
Celý pájecí proces se skládá z několika kroků. Za prvé je třeba aktivovat pájený povrch, tedy zbavit ho oxidové vrstvičky – nejčastěji prostřednictvím tavidla (angl. *flux*). Mezi další možnosti patří například ultrazvukové či plazmové čištění povrchu od oxidů. Tavidlo lze nanést několika způsoby: pěnovým, vlnovým, sprejovým dávkovačem nebo dávkovačem s rotujícím kartáčem. Všechny tyto metody znázorňují obrázky níže (Obrázek 1. a Obrázek 2.) [9,11].



Obrázek 1. Nanášení tavidla a) vlnovým dávkovačem, b) pěnovým dávkovačem. Upraveno podle [9].

Po aktivaci povrchu dochází k předehřevu DPS na teplotu mezi 80 °C a 130 °C, během kterého se odpařují z tavidla rozpouštědla či absorbovaná vlhkost. Pokud by se tyto látky neodpařily v dostatečném množství, mohly by způsobovat prskání slitiny nebo výpary ulpívající ve slitině

s následnou tvorbou dutinek a prasklinek v pájeném spoji. Správně zvoleným přehřevem se zároveň zamezí teplotním šokům DPS a následným defektům jako např. warpage efektu (prohnutí DPS vlivem odlišných teplot na horní s dolní straně DPS, známý je tento jev především u BGA pouzder). Přehřev je realizován pomocí sálavého tepla z výhřevných desek nebo častěji prouděním vzduchu [1,9,11].



Obrázek 2. Nanášení tavidla pomocí **a)** dávkovače s rotujícím kartáčem, **b)** sprejovým dávkovačem. Upraveno podle [9].

Následuje posun osazené DPS přes vlnu roztavené slitiny, která jednak dokončí aktivaci tavidla a dále v okamžiku, kdy materiál dosáhne teploty tání slitiny, dojde ke smáčení, roztékání, vzlínání a difúze slitiny do základního materiálu DPS. Vlna vzniká průchodem roztavené slitiny skrz čerpací komoru nahoru do trysky. Po dosažení vrcholu klesá zpět do nádoby s lázní jednou nebo oběma směry kolem komory [1,9]. Více o typu vln pojednává následující kapitola 1.1.2 Typy vln.

V případě použití agresivnějších tavidel je na závěr potřeba DPS důkladně omýt od tavidlových zbytků, aby nedocházelo ke korozním jevům a následné zrychlené degradaci pájeného spoje. Úplně posledním krokem, jak už tomu bývá ve všech výrobních procesech, je kontrola zapájené DPS pomocí jedné z kontrolních metod zmíněných ve 4. kapitole Testovací metody v technologii pájení.

1.1.2 Typy vln

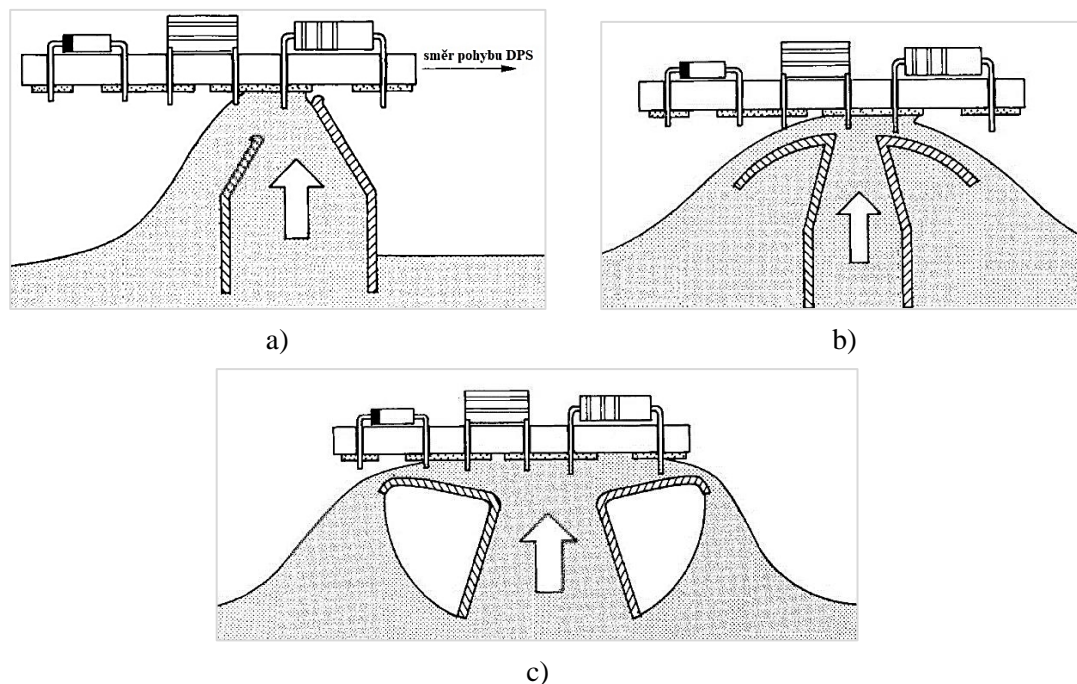
Volba správného typu vlny je jedním z důležitých parametrů podílejících se na výsledné kvalitě pájeného spoje. Existuje proto několik druhů a tvarů vln.

1.1.2.1 Jednoduchá vlna

Pod pojmem jednoduchá vlna si lze představit tři základní typy podle tvaru čerpací komory a trysky. První z nich je vlna jednostranná (Obrázek 3.a), dále potom oboustranná (Obrázek 3.b), či nejčastěji využívaná vlna rozšířená (Obrázek 3.c).

Pájení jednoduchou vlnou je nejméně náročné a lze ho použít také pro součástky povrchové montáže. Nicméně v případě vícevývodových SMD součástek a malých rozstupů mezi vodivými cestami se často objevují nedokonalosti pájeného spoje. Jedná se například o studené spoje

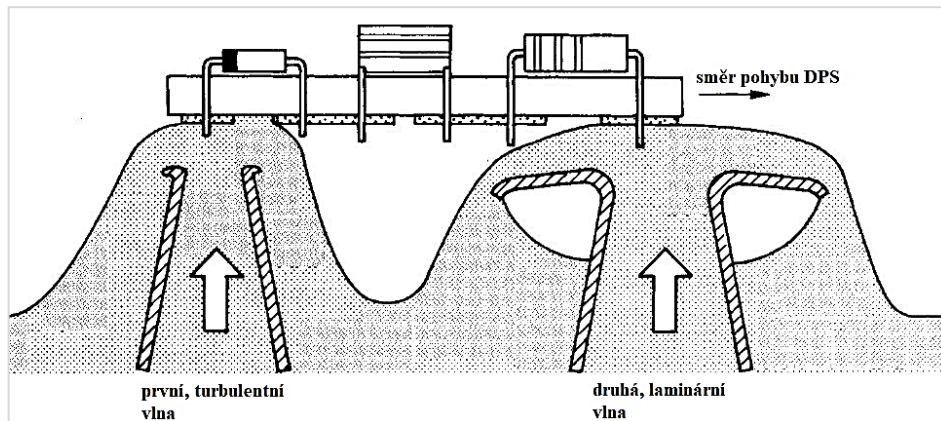
způsobené nedostatečným smočením kvůli tzv. stínům (angl. *shadow effect*), které vytvářejí součástky svým plastovým, a tedy nesmáčivým pouzdrům. Další chybou mohou být například můstky (angl. *bridging*), tedy vodivé propojení mezi vývody buď jedné, nebo dvou sousedních součástek (ať už SMD či THD). S vyšší hustotou vývodů roste četnost tohoto jevu. Aby k výše uvedenému nedocházelo, více se využívá vlny dvojité [1,5,9].



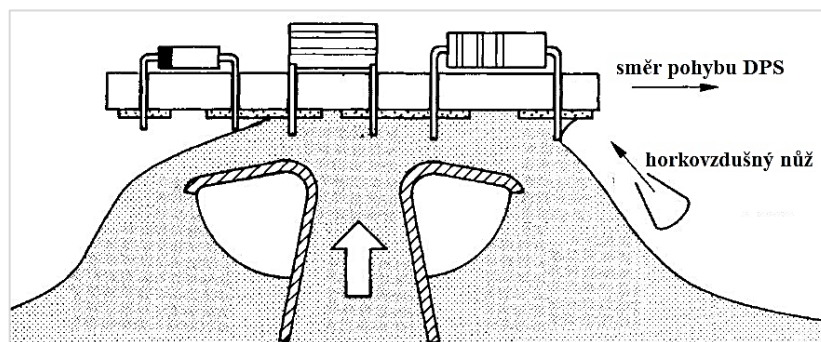
Obrázek 3. Typické tvary jednoduché vlny: a) jednostranná, b) oboustranná, c) rozšířená. Upraveno podle [9].

1.1.2.2 Dvojitá vlna

K odstranění můstků a chyb způsobených stíny je třeba zařadit za sebe dvě vlny (Obrázek 4). První vlna je jednostranná vysokotlaká turbulentní, která zajistí smočení i obtížně dostupných oblastí a vývodů. Tato vlna však zároveň snadno způsobuje vznik můstků u malých a blízkých vývodů, neboť neumožňuje odtok přebytečné pájky. Z tohoto důvodu musí být následována oboustrannou hladkou vlnou laminární, která má za cíl eliminovat vznik můstků. Výstup z laminární vlny je kritickým bodem z hlediska kvality výsledného pájeného spoje. Vlivem povrchového napětí je pájka udržována ve spoji. Proti síle povrchového napětí působí tíhová síla samotné slitiny, která se jí snaží od spoje oddělit. Kvalitu smáčení potom udává rovnováha těchto sil. Rovnovážný bod závisí na pájitelnosti materiálu DPS a lze ho docílit optimální rychlostí dopravníku právě skrz laminární vlnu a rychlostí proudění samotné vlny. Dále je možné za druhou vlnu umístit tzv. horkovzdušný nůž (angl. *hot-air knife*), proud vzduchu o teplotě 380 °C s nastavitelným úhlem, který zajistí odstranění přebytečné slitiny (eliminuje vznik můstků). Při použití horkovzdušného nože se také jakékoliv odsmačení ve spoji, které by mohlo později způsobit problémy, stává okamžitě viditelným [1,5,9,12]. Umístění horkovzdušného nože zobrazuje Obrázek 5.



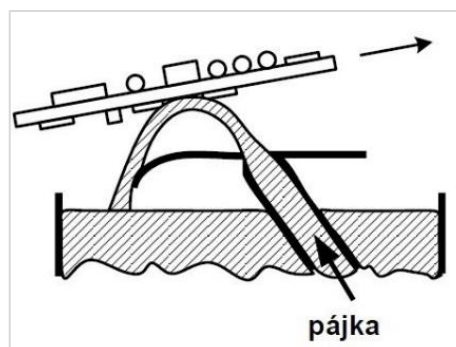
Obrázek 4. Princip pájení dvojitou vlnou. Upraveno podle [9].



Obrázek 5. Použití horkovzdušného nože v pájecím procesu za laminární vlnou. Upraveno podle [9].

1.1.2.3 Dutá vlna

Dalším typem vlny je vlna dutá, která je velmi rychlá a dynamická. Využívá se zde Bernoulliho zákona. Například společnost Kirsten Soldering AG využívá jednoduché, duté tryskové vlny, kde atmosférický tlak nad vlnou je vyšší než pod ní. Díky tomu jsou vývodové součástky během pájení do prokovu spíše vtahovány než vytlačovány nahoru. Aby se u duté vlny předešlo tvorbě můsteků, je nutné dodržet stejnou rychlost proudění vlny a rychlost posunu dopravníku s DPS [1,12,13].



Obrázek 6. Pájení dutou vlnou. Převzato z [5].

1.1.3 Kvalita výsledného pájeného spoje

Abychom mohli považovat spoj za kvalitní, musí splňovat určité požadavky, jako např. dobré mechanické vlastnosti, vysokou elektrickou vodivost, odolnost vůči klimatickým degradačním vlivům apod. K tomu je třeba správně nastavit parametry pájecího procesu. Výslednou kvalitu pájeného spoje ovlivňuje během procesu pájení vlnou např. teplota pájecí sliny ve vlně, doba styku vývodu s pájkou, rychlost pohybu dopravníku nebo také orientace součástek na vlnu. Pro skrzděrovou montáž vyžadujeme úplné vyplnění prostoru pokoveného otvoru (prokovu) ve vertikálním směru (angl. *through-hole fill*). Toho bude dosaženo tehdy, pokud teplota pájení bude dostatečně velká na to, aby slitina před opuštěním vlny neztuhla v otvoru. Pro THT (angl. *through-hole technology*) to konkrétně znamená, že teplota na horní straně DPS musí být vyšší než teplota tání použité slitiny ve vlně. U součástek s velkou tepelnou kapacitou nebo masivních DPS je tedy nutný přehřev i z její horní strany. To snižuje délku pobytu desky ve vlně a předchází její destrukci. Zároveň po celém obvodu vývodu požadujeme co nejlepší smožení pájkou, tj. konkávní meniskus a spoj bez voidů a prasklin [14].

Ve vědeckých publikacích zabývajících se pájenými spoji s vývodovými součástkami jsou popisovány různé vlivy a parametry ovlivňující jejich výslednou kvalitu. Jedná se například o spolehlivost měděných cest a pokovení otvorů [15,16] nebo již výše zmíněné vyplnění prostoru prokovu [17] i v závislosti na tvaru [18] a rozměrech pinu [19]. Matematickým modelováním v publikaci [18] bylo zjištěno, že kruhový průřez pinu zajistí vyšší úroveň, rychlejší a rovnoměrné vyplnění prokovu ve srovnání s ostatními tvary¹. Studie [19] uvádí, že pro bezolovnaté pájení tlustších DPS je nezbytné použít piny, které jsou delší než je výška DPS. Tyto spoje totiž vykazují lepší vlastnosti – lepší *through-hole fill* a menší voidovitost než spoje s kratšími piny. Na voidovitost má dle těchto autorů také vliv poměru průměru pinu a prokovu (angl. *P/H ratio*). Čím je tento poměr nižší, tím je i výskyt voidů menší. Podle studie [20] má ze zkoumaných parametrů² na *through-hole fill* největší vliv teplota vlny a čas kontaktu součástky se slitinou.

Dále se v publikacích objevuje vliv tvaru pájeného spoje (menisku) [21], výběru pájecí slitiny [22] a materiálu povrchové úpravy [23] na důležité parametry z hlediska výsledné kvality pájeného spoje. Lze najít i odborné studie zabývajících se vlivem průměru prokovu a velikosti „prstýnku“ (angl. *solder land*) kolem pokoveného otvoru [24], správným nastavením pájecího procesu [25], či změnami mikrostruktury spoje během stárnutí nebo teplotních šoků [26–28]. Všechny tyto aspekty (a mnohé další) více či méně ovlivňují celkovou kvalitu a spolehlivost spojů, proto je třeba se jimi zabývat.

¹ Ostatní zkoumané tvary průřezu pinu: trojúhelníkový, čtvercový, obdélníkový a hexagonální.

² Hodnocenými parametry byly: typ tavidlo (na bázi alkoholu/vody), množství tavidla, teplota slitiny ve vlně (250 °C, 260 °C, 275 °C), čas kontaktu součástky se slitinou (2 s, 4 s, 6 s), teplota přehřevu (100 °C, 110 °C, 125 °C) a atmosféra při pájení (dusík/vzduch).

1.2 Používané materiály při pájení vlnou

1.2.1 Tavidlo

Prvním krokem při procesu pájení vlnou, jak již bylo popsáno v kapitole 1.1.1 výše, je nanesení tavidla. Tavidlo je důležitým prvkem zejména z pohledu čistoty povrchu a z toho vyplývající kvality konečného pájeného spoje. K úspěšnému zapájení je potřeba, aby slitina pájený povrch dobře smáčela a roztékala se na něm. Hlavní bariéru pro smáčení představují nekovové vrstvičky a povlaky na povrchu, zejména potom oxidy a jiné nečistoty. Oxidy však netvoří pouze fyzickou bariéru, ale i tepelnou. Oproti kovům jsou totiž slabě tepelně vodivé a tím znesnadňují přechod tepla důležitý pro dobré smáčení pájeného povrchu. Z tohoto důvodu využíváme chemická činidla, tavidla, která tyto nechtěné vrstvy odstraňují a podporují smáčení. Tavidlo také snižuje povrchové napětí mezi slitinou a DPS a tím zlepšuje roztékavost pájky [1,2].

Obecně tavidlo obsahuje 4 složky, které se liší podle jeho konkrétního typu – tavidlový nosič, aktivátor, aditiva a rozpouštědla. Tavidlovým nosičem bývá buď přírodní (angl. *rosin*) nebo syntetická pryskyřice (angl. *resin*), případně organické či anorganické sloučeniny. Hlavním úkolem tavidlového nosiče je právě odstranění oxidů a nečistot z povrchu. S nástupem bezolovnatého pájení začal nabývat na významu aktivátor, který je chemicky agresivní a podporuje funkci tavidla. Aktivátory dělíme na bezhalogenové, nebo s obsahem halidů (zejména bromidů nebo chloridů). Tyto látky musí být plně rozpustné v pryskyřici i rozpouštědle, aby nezvyšovaly vodivost nebo nevytvářely lokální korozivní centra. Rozpouštědlem může být isopropyl-alkohol (jakožto zástupce těkavých organických látek známých pod angl. zkratkou VOC – *volatile organic compounds*), případně další alkoholy. U bezpryskyřicových tavidel je možným rozpouštědlem také voda [29,30].

Ideálně by tavidlo nemělo zanechávat žádné zbytky, případně zanechávat zbytky snadno odstranitelné – např. rozpustné ve vodě. Tavidlové zbytky na povrchu DPS mohou být totiž zdrojem koroze nebo podporovat iontovou migraci (růst dendritů) a tím urychlovat stárnutí zařízení a ohrožovat jeho spolehlivou funkci. Pro snížení nákladů na následné mycí a čistící procesy ve výrobních linkách byla představena vodou-rozpustná (angl. *water-soluble*) a bezoplachová (angl. *no-clean*) tavidla [2,29,30]. Právě nástřik bezoplachových VOC-free tavidel je typicky implementován do pájecích procesů, kde dochází k bezolovnatému pájení vlnou oboustranných DPS s THD komponenty. Zejména se potom jedná o procesy s Sn-Ag-Cu slitinami [31].

Pro mezinárodní značení tavidel a jejich kategorizaci se využívá několik norem, z nichž v praxi nejpoužívanějším patří např. IPC-J-STD-004B [32] (značení podle tavidlového nosiče RO/RE/OR/IN, aktivity tavidla L/M/H a zastoupení halidů 0/1) nebo EN ISO 9454-1 (Tabulka 1).

Tabulka 1. Rozdělení tavidel dle ISO 9454-1:2016 [33].

Základní typ tavidla	Tavidlový nosič	Aktivátor	Obsah halidů
1 – pryskyřicové	1 – přírodní pryskyřice	1 – bez aktivátoru	
	2 – syntetická pryskyřice	2 – halogenidy 3 – bez halogenů	
2 – organické	1 – rozpustný ve vodě	1 – bez aktivátoru	< 0,01 %
	2 – nerozpustný ve vodě	2 – halogenidy 3 – bez halogenů	< 0,15 %
3 – anorganické	1 – soli ve vodném roztoku	1 – NH ₄ Cl (chlorid amonný)	0,15 až 0,2 %
	2 – soli v organickém složení	2 – bez NH ₄ Cl	> 0,2 %
	3 – kyseliny	1 – kyselina fosforečná 2 – jiné kyseliny	
	4 – zásady	1 – aminy nebo amoniak	

1.2.2 Slitiny

Po mnoho dekád byly pro pájení využívány slitiny cínu a olova, neboť tyto pájky přinášely mnoho výhod: nízké teploty tání, dobrá tažnost, skvělé smáčení na mědi a měděných slitinách... Na přelomu století se však situace změnila. V úvahu se začaly brát toxické vlastnosti olova a z toho vyplývající nežádoucí vliv na životní prostředí a člověka. V roce 2003 byly proto v Evropě přijaty dvě legislativy: Direktiva Evropského parlamentu a Rady 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ, angl. *Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE*) a 2002/95/ES o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (angl. *Restriction of Hazardous Substances in electrical and electronic equipment – RoHS*). Druhá zmíněná směrnice byla v roce 2011 s platností od července 2019 nahrazena přísnější směrnici 2011/65/EU (tzv. RoHS 2). Od roku 2006 tedy není dovoleno využívat olovo a další v direktivě specifikované látky (např. rtuť nebo kadmium) v elektronických zařízeních. Výjimku mají zařízení, která se v současné době bez použití těchto látek nedají vyrobit, nebo kde vodivý spoj nedosahuje takových kvalit – zařízení v medicíně, letectví, armádě nebo zařízení určená do vesmíru [1,29,34,35].

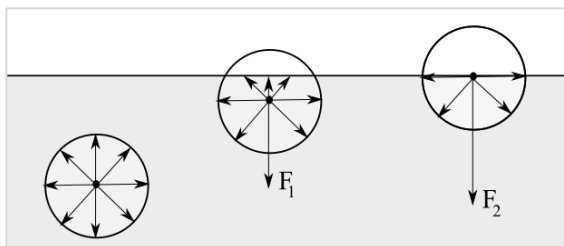
Od té doby je výzkumu bezolovnatých slitin věnováno mnoho úsilí. V současné době jsou nejpoužívanějšími pájkami slitiny cínu, stříbra a mědi, tzv. SAC. Ačkoli mají tyto slitiny dobré vlastnosti z pohledu spolehlivosti, teplotního stárnutí a odolnosti vůči tečení (angl. *creep resistance*), v některých ohledech jsou stále horší než Sn-Pb. Jedná se např. o vysokou teplotu tání, horší smáčení nebo hrubší mikrostrukturu [36]. Zatímco eutektická Sn-Pb slitina (Sn63Pb37) má teplotu tání 183 °C, bezolovnaté SAC o přibližně 35 °C více [34]. Vysoká teplota pájení je nežádoucí, protože může způsobit poškození součástí citlivých na tepelné přetížení

(např. polovodičových čipů). Z výše uvedených důvodů lze do SAC slitin přidávat další prvky pro zlepšení jejich vlastností. Konkrétním případem může být dopování galliem, které zlepšuje smáčení [36]. Přidáním india lze zase dosáhnout nižší teploty tání, lepšího smáčení (kratší zero-cross time, vyšší maximální smáčecí síla) a vyšší mikrotvrdosti a pevnosti [37]. Dále například malé množství vzácných zemin (Ce a La) v SAC slitinách snižuje smáčecí úhel, zvyšuje smáčecí sílu a pevnost v tahu [38]. V praxi se při pájení vlnou využívá také fosforu pro snížení oxidace pájecí lázně a následné redukce strusky [39].

Z pohledu pájení při nižších teplotách jsou vhodnou náhradou Sn-Pb pájek například i slitiny na bázi bizmutu a cínu, neboť bizmut snižuje teplotu tání. Eutektická slitina Bi58Sn42 má bod tání na 138 °C, vykazuje dobrou pevnost v tahu i odolnost proti tečení. Na druhou stranu, bizmut je velmi křehký a pájené spoje mohou potom při teplotním a mechanickém namáhání praskat. Z tohoto důvodu je snaha i do těchto slitin přidávat další prvky zlepšující jejich vlastnosti [34,40]. Podle provedené studie [41] dojde přidáním 2 hm.% stříbra k nárůstu tvrdosti a pevnosti v tahu pájeného spoje. Stejných výsledků bylo dosaženo i po přidání 2 hm.% india. Změnami vlastností Bi58Sn42 slitiny dopované indiem se zabývá i další studie [42], ze které vyplývá, že po přidání In lze pozorovat snížení roztékavosti, pevnosti v tahu, i teploty tání. U slitiny Bi55,5Sn42In2,5 byl pozorován značný nárůst tažnosti. Stejně jako v SAC slitinách, stopové množství vzácných zemin (konkrétně Ce a La) v eutektické Bi-Sn slitině zlepšuje smáčení a pevnost v tahu. Dále dochází ke ztenčení intermetalické vrstvy (angl. *intermetallic layer*, *IML*) na rozhraní s Cu substrátem [43]. V jiné studii bylo zjištěno, že 0,5 hm.% Ce zlepšuje mechanické vlastnosti, zejména zvětšuje tažnost [44].

2 Smáčení

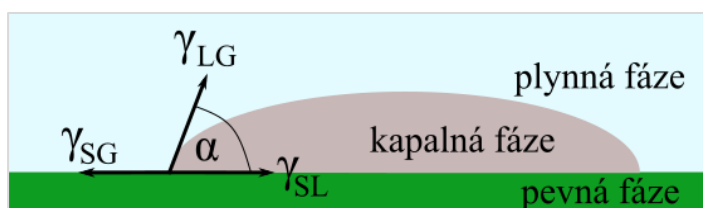
Smáčení povrchu je jednou z nejdůležitějších vlastností pájecí slitiny, která určuje výslednou kvalitu pájeného spoje. Pro dobře vytvořený spoj vyžadujeme co nejlepší smáčení povrchu, které nastává v případě, že smáčecí úhel α je menší než 40° . Při kontaktním úhlu větším než 90° hovoříme o nesmáčení. Výborné až dokonalé smáčení je popsáno kontaktním úhlem α menším než 20° [1].



Obrázek 7. Silové působení na povrchu tekutiny.

S problematikou smáčení souvisí velikost povrchového napětí (mezifázového napětí na rozhraní kapaliny a plynu). Na povrchu působí na molekuly slitiny síly, které je vtahují dovnitř. Molekuly na povrchu mají oproti molekulám uvnitř přebytek energie, kvůli kterému se tekutina snaží zaujmout při daném objemu co nejmenší povrch. Silové působení na molekuly v různých polohách jsou znázorněny na Obrázku 7. Při roztékání slitiny na povrchu nastává na rozhraní tři fáze rovnováha sil povrchových napětí (Obrázek 8.) [29]. Tj. vektorový součet všech tří mezifázových napětí je roven nule:

$$\vec{\gamma}_{SG} + \vec{\gamma}_{SL} + \vec{\gamma}_{LG} = 0 \quad (1)$$



Obrázek 8. Rovnovážný stav povrchových napětí.

Tuto rovnováhu lze při zanedbání gravitace na dokonale hladkém a chemicky homogenním pevném povrchu (pevné fázi) popsat Youngovou rovnicí:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \alpha \quad (2)$$

kde γ_{SG} je povrchové napětí (N/m) mezi pevnou a plynnou fází, γ_{SL} mezi kapalnou a pevnou fází, γ_{LG} mezi kapalnou a plynnou fází a $\cos \alpha$ součinitel smáčení (-) s kontaktním úhlem α ($^\circ$) [1,45]. Z výše uvedené rovnice je patrné, že v situaci, kdy je kontaktní úhel větší než 90° , povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází γ_{SG} je větší než mezi fází pevnou a kapalnou γ_{SL} . V případě $\alpha < 90^\circ$ vyplývá z rovnice opačná nerovnost, $\gamma_{SG} < \gamma_{SL}$.

Povrchové napětí γ_{SG} představuje „tažnou sílu“ kapaliny k roztečení po povrchu. Pro dosažení co nejlepšího smáčení usilujeme o co největší součinitel smáčení, tedy co nejmenší kontaktní úhel. Po úpravě Youngovy rovnice (2) do tvaru

$$\cos \alpha = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (3)$$

je zřejmé, že smáčení lze zlepšit třemi způsoby:

- a) zvětšením povrchového napětí mezi pevnou a plynnou fází γ_{SG} ,
- b) zmenšením povrchového napětí mezi pevnou a kapalnou fází γ_{SL} ,
- c) zmenšením povrchového napětí mezi kapalnou a plynnou fází γ_{LG} .

Povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází γ_{SG} je možné zvýšit čistotou povrchu pevné fáze, tedy v našem případě povrchu DPS. Nečistoty jako prachové částice, vodní pára apod. brání roztékání slitiny po povrchu, snižují hodnotu γ_{SG} a to má za následek zvětšení kontaktního úhlu α . Z tohoto důvodu je použití tavidel jedním z důležitých faktorů, které mají vliv na smáčení povrchu a kvalitu výsledného spoje [2,29].

Co se týče povrchového napětí mezi pevnou a kapalnou fází γ_{SL} , to je ovlivněno jednak použitými materiály (kombinace slitina-povrch) a dále také teplotou pájení. Změna kombinace materiálů slitiny a pájeného povrchu je v praxi velmi složitá. A to zejména z toho důvodu, že po zapájení musí výrobek splňovat další požadavky [29]. Teplotu pájení je však možné měnit s ohledem na tepelnou odolnost pájených součástek a teplotu tání použité slitiny. Různé vědecké studie [46–48] popisují vliv teploty na smáčení. Bylo zjištěno, že se zvyšující se teplotou klesá povrchové napětí mezi pevnou a kapalnou fází γ_{SL} , a tedy i kontaktní úhel.

Povrchové napětí mezi kapalnou a plynnou fází γ_{LG} závisí rovněž na teplotě a také na okolní atmosféře, která je mimo jiné charakterizována i tlakem. Lepšího smáčení, tj. menší hodnoty α lze dosáhnout za sníženého tlaku. Protože s tlakem klesá povrchové napětí γ_{LG} , v praxi se někdy využívá pájení ve vakuu, případně v jiné atmosféře např. dusíkové. Dusíková atmosféra funguje jako inhibitor oxidace na povrchu a tím zároveň dochází k nárůstu povrchového napětí mezi DPS a pájecí slitinou γ_{SG} [2,29,49].

Youngova rovnice (2) však platí jen pro případ dokonale hladkého a chemicky homogenního povrchu. Smáčivost povrchu je však závislá nejen na chemické struktuře povrchu, která ovlivňuje interakci mezi substrátem a slitinou, ale i na drsnosti povrchu pájeného substrátu – zdrsnění zvýrazní jeho hydrofobní/hydrofilní vlastnosti. Tzn. pokud máme slitinu, která dobře smáčí hladký povrch, zdrsněný povrch bude smáčet ještě lépe. Naopak špatně smáčející pájka smáčí drsný povrch hůře než hladký, neboť došlo ke zvětšení plochy DPS, kterou slitina nesmáčí [50,51]. Z tohoto důvodu byla zavedena korekce Youngovy rovnice (2) na tvar:

$$\cos \alpha_w = r \cos \alpha \quad (4)$$

kde α_w představuje kontaktní úhel ($^\circ$) na drsném povrchu a r je faktor drsnosti (-), který udává zvětšení povrchu vlivem zdrsnění, tj. poměr velikosti plochy reálného zdrsněného a dokonale hladkého povrchu. Faktor drsnosti nabývá hodnoty jedna pro perfektně hladký povrch a $r > 1$ pro povrch drsný [45].

Pro 2D analýzu profilů drsnosti je možné vypočítat faktor drsnosti pomocí hodnoty R_{Lo} (%) definované v normě ISO 4287 jako parametr drsnosti popisující délku profilu vyjádřenou procentuálním zvětšením oproti profilu dokonale hladkého povrchu [45].

$$r = 1 + \frac{R_{Lo}}{100} \quad (5)$$

2.1 Metody měření povrchového a mezifázového napětí

Aby bylo možné smáčení nějakým způsobem kvantifikovat, byla zavedena celá řada metod měření povrchového a mezifázového napětí. Metody je obecně možné rozdělit do tří skupin na metody statické, semistatické a dynamické [50].

Statické metody vychází z měření v ustálených rovnovážných stavech, kdy hodnoty povrchových napětí nezávisí na čase. Mezi tyto metody patří např. metoda kapilární elevace (angl. *capillary rise method*), metoda měření vzestupu kapaliny na svislé desce (angl. *capillary rise at vertical plate*), metoda vyvažování Wilhelmyho destičky (angl. *Wilhelmy plate method*), metoda rotující kapky (angl. *oscillating drop method*), analýza profilu kapek a bublin a další [50,52].

Semistatické metody jsou stejně jako metody statické založeny na dosažení rovnovážného stavu, ale rovnováha je zde nestabilní. Měření vyžaduje volbu optimální rychlosti přibližování se k rovnovážnému stavu, aby prováděná měření nebyla zdlouhavá, ale abychom zajistili výsledky blížící se skutečným rovnovážným hodnotám [50]. Do této skupiny řadíme např. metodu maximálního přetlaku v bublině (angl. *maximum bubble pressure method*), odtrhávací (angl. *detachment methods*) či stalagmometrické metody (angl. *stalagmometric methods*) [52–54].

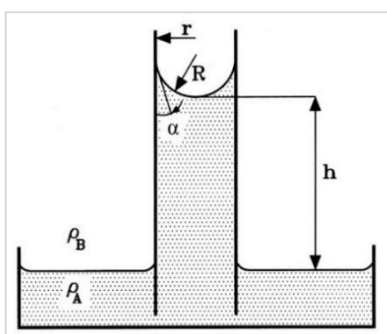
Dynamické metody se využívají pro měření výrazně nerovnovážných stavů povrchových vrstev kapalin a rychlosti ustálení rovnovážné struktury jejich povrchu [50]. Mezi tyto metody patří např. metoda oscilující kapky (angl. *oscillating drop method*) nebo proudu (angl. *oscillating jet method*) [55,56].

V následujících odstavcích se zaměřím pouze na nejdůležitější metody, ze kterých budu následně vycházet a případně se na ně odkazovat.

2.1.1 Metoda kapilární elevace

Metoda kapilární elevace spočívá v měření výšky vzestupu kapaliny h ve skleněné válcové trubičce (kapiláře) o daném poloměru r (Obrázek 9.). Pro malé průměry trubiček, kdy $r \ll h$ platí, že vytvořený meniskus má kulovitý tvar o poloměru R . Povrchové napětí (N/m) se následně vypočítá z rozdílu hustot kapaliny a okolní atmosféry $\Delta\rho$ (kg/m^3), tíhového zrychlení g (m/s^2), znalosti poloměru trubičky r (m), změřené výšky vzestupu h (m) a smáčecího úhlu α ($^\circ$) [52]:

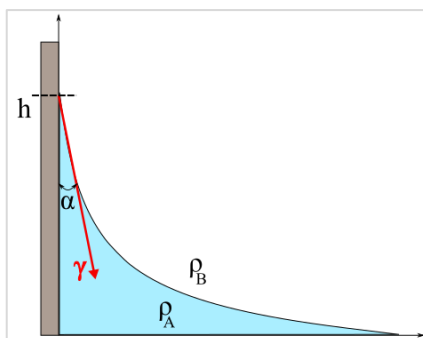
$$\gamma = \frac{\Delta\rho g h r}{2\cos\alpha} \quad (6)$$



Obrázek 9. Princip metody kapilární elevace. Upraveno podle [52].

2.1.2 Metoda vzestupu kapaliny na svislé desce

Tato metoda, obdobně jako metoda kapilární elevace, využívá měření výšky, do které vystoupá meniskus kapaliny. Rozdíl je zde však v tom, že zkoumáme stoupání na povrchu svisle ponořené destičky. Princip znázorňuje Obrázek 10. I tato metoda pro získání povrchového napětí však vyžaduje znalost kontaktního úhlu α , který je v praxi velmi těžko či ne zcela přesně měřitelný optickými metodami [50].



Obrázek 10. Vzestup kapaliny na svislé desce.

Pro výpočet platí vztah získaný integrací Laplaceovy-Youngovy rovnice [57]:

$$\sin\alpha = 1 - \frac{\Delta\rho g h^2}{2\gamma} \quad (7)$$

kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustot tekutin ρ_A a ρ_B (kg/m^3), α kontaktní úhel ($^\circ$), g tíhové zrychlení (m/s^2), h výška (m), do které vystoupá meniskus a γ povrchové napětí pájky (N/m).

2.1.3 Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky

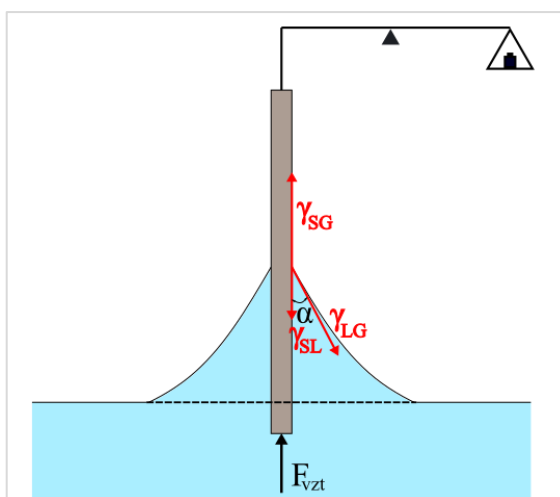
Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky je další ze statických metod, jejíž podstatou je měření vertikální síly působící na destičku definovaných rozměrů a hmotnosti ponořenou do kapaliny. Tato síla je měřena velmi citlivými vahami. Pokud destičku umístíme na hladinu, měřená smáčecí síla F_{wet} (N) je rovna síle povrchového napětí roztavené pájecí slitiny F_γ :

$$F_{wet} = p\gamma \cos \alpha = F_\gamma \quad (8)$$

kde p je obvod ponořené destičky (m), γ povrchové napětí (N/m) a α kontaktní úhel ($^\circ$) [58]. V případě, že destičku ponoříme, měřená síla F_{wet} se bude skládat ze síly povrchového napětí F_γ a vztlakové síly F_{vzt} působící na destičku. Vyjdeme z Youngovy rovnice (2) a silové působení znázorněné na Obrázku 11. popíšeme následující rovnicí:

$$0 = p\gamma_{LG} \cos \alpha + p\gamma_{SL} - p\gamma_{SG} - V\Delta\rho g \quad (9)$$

kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustoty kapaliny a okolní atmosféry (kg/m^3), V objem ponořené části destičky (m^3), g tíhové zrychlení (m/s^2) [50].



Obrázek 11. Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky.

Rovnici (9) dále upravíme do tvaru:

$$0 = p\gamma_{LG} \cos \alpha + p(\gamma_{SL} - \gamma_{SG}) - F_{vzt} \quad (10)$$

Rozdíl povrchových napětí γ_{SL} a γ_{SG} je označován za smáčecí sílu F_{wet} , která je zde měřena citlivými vahami. Po úpravě a provedení substituce

$$F_{wet} = p(\gamma_{SL} - \gamma_{SG}) \quad (11)$$

dostáváme často využívaný tvar rovnice pro zjištění povrchového napětí:

$$F_{wet} = F_\gamma - F_{vzt} = p\gamma_{LG} \cos \alpha - V\Delta\rho g \quad (12)$$

Obecně je možné tento výpočet použít jednak i pro vzorky jiného tvaru, např. drátek či válcové trubičky, nebo také pro výpočet povrchového napětí při měření časové závislosti smáčecí síly metodou smáčecích vah (více o metodě smáčecích vah v kapitole 4.3.4). Z rovnice (12) je zřejmé, že i v tomto případě je pro výpočet povrchového napětí nutná znalost kontaktního úhlu α .

2.1.4 Metoda měření pomocí nesmáčivého vzorku

Řešením problému měření kontaktního úhlu α je použití buď dokonale smáčivého, či nesmáčivého vzorku. V takovém případě bude $\cos \alpha$ roven 1, respektive -1. Nicméně, v praxi se s takovými materiály jen těžko setkáme, tomuto stavu se tedy můžeme jen blížit. Pro snadnější měření, resp. reprodukovatelnost měření je vhodnější využití nesmáčivého vzorku, který je možné opakovaně použít. Na rozdíl od dokonale smáčivého vzorku totiž během smáčení neztrácí své vlastnosti (povrch, obvod, objem apod.).

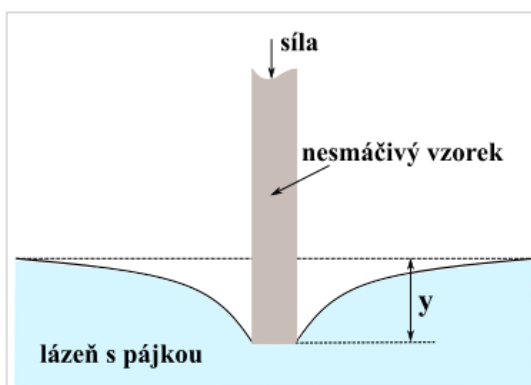
Tato metoda vychází z kombinace metody vzestupu kapaliny na svislé desce a metody vyvažování Wilhelmyho destičky, kdy se nesmáčivý vzorek dotýká roztavené pájce slitiny pouze svou podstavou, nikoli stěnami (Obrázek 12.). Kombinací rovnic (7), (12) a goniometrického vztahu mezi sinem a cosinem:

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1 \quad (13)$$

dostáváme výsledný vztah

$$\gamma_{LG} = \frac{1}{p^2 \Delta \rho g y^2} (F_{wet} + V \Delta \rho g)^2 + \frac{\Delta \rho g y^2}{4} \quad (14)$$

kde γ_{LG} je povrchové napětí pájky (N/m), p obvod vzorku (m), $\Delta \rho$ rozdíl hustoty kapaliny a okolní atmosféry (kg/m^3), g tíhové zrychlení (m/s^2), y hloubka ponoru (m), F_{wet} měřená smáčecí síla (N) a V objem ponořené části destičky (m^3) [59]. Detailní odvození tohoto výsledného vztahu se nachází v Příloze A.



Obrázek 12. Metoda měření pomocí nesmáčivého vzorku.

3 Chyby v pájeném spoji

Dosažení spolehlivého pájeného spoje se po přechodu na bezolovnaté pájení stalo velkou výzvou pro elektrotechnické společnosti. S touto změnou jsou spojeny nejen mechanické, elektrické a chemické vlastnosti slitiny jako takové, ale je potřeba brát v úvahu také vzájemnou vazbu mezi všemi využívanými materiály – pájky, součástky, tavidla a desky plošných spojů. Zatímco u povrchové montáže je proces podobnější bezolovnatému pájení, pro pájení vlnou je nutná i změna vybavení pájecí linky a nastavení pájecího procesu [60]. Nevhodně zvolená kombinace materiálů a nastavení parametrů pájecího procesu může vést k tvorbě defektů a snížené kvalitě výsledného spoje.

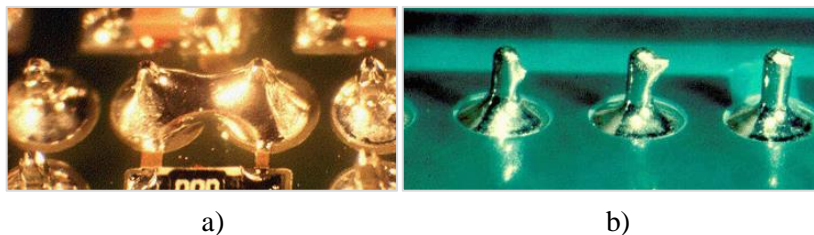
V následujících odstavcích se zaměřím zejména na chyby týkající se skrzděrové montáže a pájení vlnou.

3.1 Můstky a krápníky

Můstky (Obrázek 13.a) jsou chyby, kdy dojde k nechtěnému rozšíření pájecí slitiny a vytvoření vodivého propojení sousedních vývodů jedné, nebo více součástek. Toto propojení následně způsobí zkrat a ohrožuje pájené komponenty. Příčinou vzniku může být například ohnutý či příliš dlouhý vývod, malé rozestupy vývodů, znečištěná pájka, nízká teplota lázně, vysoká rychlost pohybu dopravníku nebo příliš hluboké ponoření DPS do slitiny [1,61].

Krápníkem (Obrázek 13.b) nazýváme přebytečné množství pájky ulpívající na konci pinu způsobené například špatným odtokem pájky z vlny nebo nevyhovující aplikací tavidla [62].

Zamezit vzniku můstků i krápníků můžeme také použitím druhé (turbulentní) vlny nebo vyšší teplotou pájecí lázně. Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 2, s vyšší teplotou totiž klesá povrchové napětí a zvyšuje se tekutost slitiny [5].



Obrázek 13. Ilustrace vzniklých a) můstků b) krápníků. Převzato z [63].

3.2 Studený spoj

Pokud při pájení vlnou nemá slitina dostatečnou teplotu na to, aby byla zcela tekutá, může vytvořit studený spoj, který je často charakterizován hrubým nebo hrudkovitým povrchem. Spoj je následkem toho špatně vodivý, či zcela nevodivý a vykazuje špatné mechanické vlastnosti. Studený spoj je však běžně možné opravit opětovným prohřátím spoje například pomocí ruční páječky. Předějit této chybě je možné správným nastavením teploty přehřevu [64].

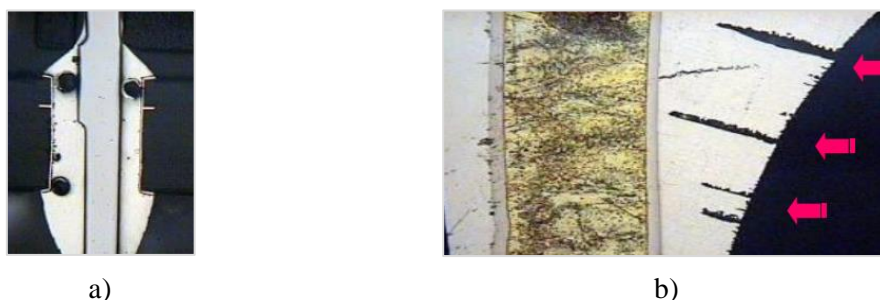
3.3 Voidy

Voidy jsou dutiny v pájeném spoji, které typicky obsahují vzduch, případně tavidlové zbytky. V praxi jsou často řešeným problémem, neboť některé typy voidů, zejména ty velmi malé na rozhraní DPS a slitiny, ovlivňují spolehlivost výsledného pájeného spoje. To, zda daný void ovlivní kvalitu záleží nejen na velikosti, ale hlavně na pozici, kde se vytvoří [65]. Obecně existuje mnoho druhů voidů – makro voidy, planární mikro voidy, Shrinkage voidy, Kirkendallové voidy, mikro-via či pinhole voidy.

Makro voidy, také nazývané procesní voidy, jsou dutiny o relativně velkém průměru. Tyto voidy vznikají během procesu pájení v případě nedostatečného času k úniku tavidlových VOC ze spoje. Mohou vznikat jak na rozhraní pájeného povrchu a pájky, tak i v objemu slitiny [65].

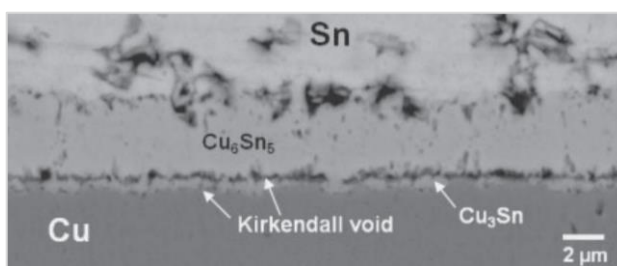
Planární mikro voidy jsou voidy o průměru menším než 25-50 μm vyskytující se v rovině nad intermetalickou vrstvou mezi pájeným povrchem a slitinou. Z hlediska spolehlivosti představují riziko zejména u BGA čipů [65].

Shrinkage voidy jsou voidy dendritických tvarů podobných trhlinám, které ale při následném termomechanickém namáhání nenarůstají a nepředstavují tak riziko z hlediska spolehlivosti. Tyto voidy se poměrně často vyskytují v bezolovnatých spojích se SAC slitinami. Vznikají během chladnutí pájky [29,65].



Obrázek 14. Ilustrace a) Makro b) Shrinkage voidů na zapájeném pinu. Převzato z [65].

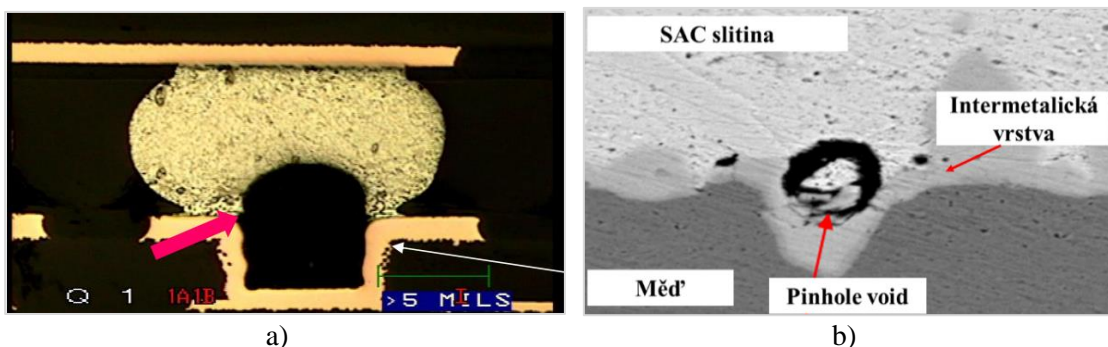
Kirkendallové voidy jsou dutinky objevující se na rozhraní intermetalické vrstvy a mědi jakožto pájeným povrchem. Tyto voidy jsou speciální svým vznikem. Nevznikají totiž během procesu pájení, ale až po určité době teplotního namáhání spoje – v okamžiku, kdy začne vznikat intermetalická sloučenina Cu_3Sn [66]. Vznik je vysvětlován rozdílným difúzním koeficientem (rozdílnou rychlostí difúze) mědi a cínu, kdy Cu difunduje do Sn rychleji než Sn do Cu [67].



Obrázek 15. Kirkendallové voidy. Převzato z [68].

Mikro-via voidy se netýkají THT montáže, ale vznikají u vývodů BGA pouzder připojených k plošce s prokoveným otvorem, tzv. micro-via, který slouží k propojení cest vícevrstvé DPS. V tomto případě při procesu pájení nedojde ke smočení vnitřní stěny otvoru, ze kterého se následně uvolňují plyny (tavidlové zbytky, vzduch, organické sloučeniny) [29].

Pinhole voidy jsou malé voidy v intermetalické vrstvě o průměru 1-3 μm . Mohou se nacházet také na rozhraní mezi IML a měděnou ploškou DPS. Tyto voidy vznikají při nesprávném pokovení (plátování) DPS mědí [65].



Obrázek 16. Ilustrace a) Mikro-via b) Pinhole voidů. Převzato z [65].

3.4 Vznik kuliček pájky

Při pájení vlnou může dojít také k tvorbě kuliček pájecí slitiny na nechtěných místech, mimo pájecí plošky/otvory. Příčinou může být například příliš vysoká, nebo naopak nízká teplota předehřevu, nadměrné množství tavidla, či příliš vysoká rychlost posunu DPS. To vše ovlivňuje vypařování rozpouštědel obsažených v tavidle a přispívá k prskání a následné tvorbě kuliček pájky. Další možnou příčinou může být nekvalitně provedená nepájivá maska, na které bude slitina nechtěně ulpívat [1,69].

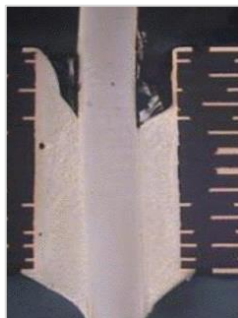


Obrázek 17. Výskyt kuliček pájky vlivem prskání slitiny z vlny. Převzato z [69].

3.5 Nedostatečné vyplnění prostoru prokovu

O vyplnění prostoru prokovu, tzv. through-hole fill byla řeč již v kapitole 1.1.3 o kvalitě výsledného pájeného spoje. Nedostatečný through-hole fill tedy znamená, že při pájení vlnou nevystoupá pájka skrz celý pokovený otvor a v důsledku toho dojde k zapájení pouze části pinu (Obrázek 18.). Tento defekt může následně snižovat mechanickou odolnost. Příčinou vzniku je obvykle teplota nebo tavidlo. Špatně nastavená teplota předehřevu či samotné pájecí slitiny ve vlně způsobí „zamrznutí“ slitiny před vystoupením skrz celý prokov. Nedokonalá aplikace tavidla

potom nepodpoří smáčení po celé délce prokovu a vlivem malého povrchového napětí se slitina nedostane na vrchol otvoru. Nedostatečné vyplnění může být způsobeno také vysokou rychlostí pohybu DPS vlnou, nebo špatnou pájitelností pinu či prokovu [1,70].



Obrázek 18. Ilustrace nedostatečného vyplnění prostoru prokovu. Převzato z [21].

3.6 Nesmáčení

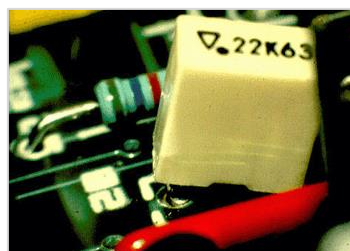
Fenomén nesmáčení, případně špatného smáčení souvisí s čistotou jednak pokoveného otvoru, pájeného vývodu, tak i pájecí plošky okolo prokovu tzv. solder land. Z toho vyplývá i vliv použitého tavidla a kvalitně nanesené nepájivé masky [61]. Jednou z možností, jak zlepšit smáčení je také použití dusíkové atmosféry, která zabraňuje oxidaci pájeného povrchu [31]. Nesmáčení se projevuje konkávním tvarem menisku pájeného spoje ať už na spodní straně DPS, nebo na horní straně u součástky (Obrázek 19.a). Jak již bylo zmíněno v kapitole 2 o smáčení, pokud po ukončení procesu pájení dostáváme spoj s kontaktním (smáčecím) úhlem větším než 90° , hovoříme o nesmáčení. Za špatné smáčení také považujeme pájené spoje, u kterých není po celém obvodu pinu/vývodu vytvořen rovnoměrný „kužel“ [71].

3.7 Nadzvednutí součástky

Dalším problémem při pájení vlnou může být nadzvednutí pájené součástky, kdy součástka na jedné straně ne zcela přiléhá k DPS a vizuálně je nakřivo (Obrázek 19.b). K pohybu součástky může dojít vlivem příliš dlouhého vývodu, který narazí na lázeň a nadzvedne se během kontaktu s vlnou. Dále například ohybem DPS, nebo pomalým smáčením vývodu vlivem velké tepelné kapacity součástky. Eliminovat tento jev je možné prodloužením času kontaktu s vlnou, případně ohybem vývodů či fixováním součástky z vrchní strany [72].



a)

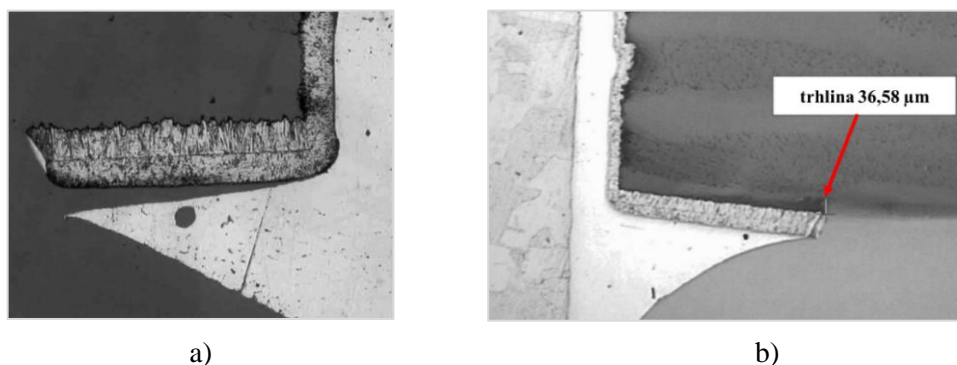


b)

Obrázek 19. Ilustrace a) Nedokonalé smáčení vývodu. Převzato z [71]. b) Nadzvednutí součástky. Převzato z [72].

3.8 Odlupování spoje

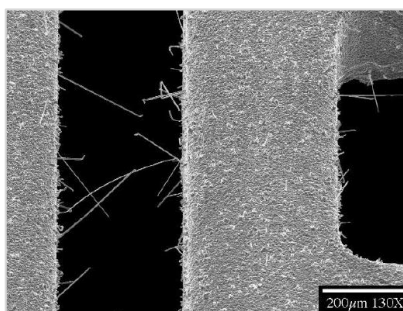
Problém odlupování spoje je typický pro pájení vlnou, kdy dojde k „odloupnutí“ pájeného spoje od DPS během chladnutí spoje vlivem rozdílné teplotní roztažnosti pájecí slitiny, měděné pájecí plošky a substrátu DPS. K tomuto defektu může dojít na třech místech: na rozhraní pájky a měděné plošky (pájka se odtrhne od plošky), mezi měděnou ploškou a substrátem DPS (ploška se „odloupne“ od substrátu), nebo se v pájeném spoji může vytvořit trhlina [1].



Obrázek 20. Odloupnutí **a)** slitiny od měděné pájecí plošky **b)** pájecí plošky od substrátu. Převzato z [31].

3.9 Whiskery

Whiskery jsou velmi tenké vodivé vlásky rostoucí do prostoru z povrchu kovu i za pokojové teploty. Zmíněným kovem jsou nízkotavitelné kovy jako např. cín, kadmium, zinek, hliník nebo také stříbro. Jedná se o poruchu dlouhodobého charakteru, nicméně přesná podstata růstu whiskerů není známa [73]. Obecně se však ukazuje, že při splnění třech následujících podmínek dochází k jejich růstu: pokrytí povrchu oxidovou vrstvičkou, vnitřní pnutí a možnost rychlé atomické difúze [74]. V praxi se vyskytují nejčastěji cínové whiskery, rostoucí z bezolovnatých slitin, které mají vysoký obsah cínu. Dále se s tímto fenoménem setkáváme u bezolovnaté povrchové úpravy HASL (Hot Air Solder Leveling), kdy se DPS ponoří do lázně s roztavenou bezolovnatou slitinou. Růst whiskerů také pozorujeme mezi chemicky pocínovanými pájecími ploškami nebo vývody součástek. Cínové whiskery mají průměr v řádu jednotek mikrometrů, jejich délky mohou ale dosahovat až několik milimetrů. Z hlediska dlouhodobé spolehlivosti představují riziko zkratů, proto se objevují snahy o potlačení vnitřního pnutí spoje, případně se rozmáhá také tendence přidávat do slitin další prvky (např. bismut) [29].



Obrázek 21. Růst cínových whiskerů. Převzato z [73].

4 Testovací metody v technologii pájení

Jak již bylo několikrát zmíněno, proces pájení je velmi komplexní a existuje mnoho faktorů, které mohou mít vliv na výslednou kvalitu pájeného spoje a následně celého výrobku. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby během celého procesu byly jednotlivé kroky správně navrženy a kontrolovány. Včasné podchycení vady nebo potenciální chyby může zamezit výrobě vadného produktu, snížit zmetkovitost, a tedy i dodatečné výrobní náklady. Obecně lze říci, že existují testovací metody elektrické a neelektrické. S elektrickými metodami (angl. *in-circuit testing*) je nutné počítat již při návrhu DPS (zahrnout kontrolní body) a řadíme mezi ně testování pomocí jehlových (elektrodových) polí (angl. *bed of nails*) nebo pomocí pohybujících se elektrod (angl. *flying probe testing*), někdy označované jako dynamické jehlové pole [29,75]. V této kapitole se dále zaměřím pouze na metody neelektrické, neboť z hlediska testování při procesu pájení vlnou jsou podstatnější než metody elektrické. Neelektrické testovací metody lze dále rozdělit na metody destruktivní a nedestruktivní.

4.1 Nedestruktivní testovací metody

Mezi nedestruktivní testovací metody řadíme takové metody, díky kterým jsou odhaleny skryté vady a defekty pájených spojů bez jakéhokoliv poškození testovaného objektu. Jedná se o vizuální a optické kontroly, diagnostiku pomocí rentgenového záření, kontrolu pomocí laserového či ultrazvukového odrazu, Moaré efektu a další [76].

4.1.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je nejjednodušší, nejlevnější a často využívanou metodou. Výsledky jsou však velmi závislé na lidském faktoru. Člověk, který kontrolu provádí, ji zatěžuje subjektivní chybou způsobenou vlastní interpretací, nebo například i únavou. Pro lepší pozorovací schopnost se při kontrole využívají binokulární lupy a mikroskopy. Vizuální kontrolou se hodnotí jednak obrysy a hrany, které musí být znatelné pouhým okem. Dále povlak pájky, který by měl být se stejnosměrně lesklým povrchem, povrch pájky potom pravidelný, hladký a bez defektů jako jsou trhliny a krátery. Nakonec je sledována konvexnost/konkávnost kužele spoje, tedy ostrost kontaktního úhlu [75,76]. Vizuální inspekce může probíhat při klasickém osvětlení, případně pro částečně transparentní vzorky je možné využít podsvícení pro detekci vnitřního poškození. Kontaminaci či degradaci povrchu odhalí kontrola za osvětlení ultrafialovým zářením [75].

4.1.2 Automatická optická kontrola

Automatická optická kontrola (AOI, angl. *automatic optical inspection*) spočívá, jak již název napovídá, v automatickém hodnocení kvality jednotlivých kroků procesu pomocí CCD videokamery s vysokým rozlišením a různých zdrojů osvětlení. Může se jednat o tzv. in-line nebo off-line systémy. In-line systémy představují kontrolu zabudovanou v určitých krocích pájecího

procesu, jsou tedy součástí pájecí linky – nejčastěji po nanesení pájecí pasty za osazovacími automaty a po procesu přetavení. Detekce vad je prováděna analýzou obrazu pomocí matematických algoritmů, kdy je možné rozpoznat správnou orientaci součástky, množství pájky ve spoji, nadzvednuté vývody, zkratky a mnohé další. AOI je rychlejší než klasická vizuální kontrola, velmi flexibilní, umožňuje bezkontaktní měření a použití v různých fázích výrobního procesu. Nevýhodou je však omezenost kontroly na viditelné části pájených míst [75,77].

4.1.3 Rentgenové kontrolní metody

Rentgenová (RTG) kontrola byla dříve využívána pouze ve formě off-line systému, nicméně s rostoucími nároky na kvalitu a spolehlivost se začal rentgen implementovat i do pájecích linek, tzv. in-line. RTG slouží k inspekcii částí, které jsou optickou kontrolou nezachytitelné. Jedná se zejména o DPS se součástkami pro povrchovou montáž, kdy rentgen poskytuje kontrolu pájených spojů pod pouzdry součástek ať už z pohledu množství slitiny (zapájeno/nezapájeno), zkratů, nebo zejména u BGA (z angl. *ball grid array*) pouzder z pohledu tvaru kuliček pájeného spoje. Rentgenové kontrolní metody je dále možné využít například pro kontrolu wirebondingu čipů – konkrétně zda nedošlo k poškození či utržení mikrodrátků. Pro vývodové součástky má rentgen využití zejména pro kontrolu voidů a mechanických trhlin. Rentgenového záření se využívá i v RTG defektoskopii, kde jsou rentgeny oproti inspekčním začleněným ve výrobních linkách sofistikovanější, většinou vybavené počítačovou tomografií (CT, angl. *computer tomography*) [75,76,78].

4.2 Destruktivní testovací metody

Zatímco nedestruktivní kontroly je možné začleňovat do výrobních procesů, destruktivní metody spočívají v analýze vybraného vzorku takovou formou, že jej dále není možné použít. Destruktivních testovacích metod je celá řada, zde uvedu pouze dvě nejvýznamnější z hlediska diagnostiky a kontroly pájených spojů.

4.2.1 Metalografické výbrusy

Diagnostika metalografických výbrusů je jednou z velmi používaných metod při zjišťování příčin vyskytujících se poruch. Metalografický výbrus (Obrázek 22.) vzniká následujícím způsobem. Nejprve se DPS vertikálně seřízne a zalije fixační hmotou (nejčastěji epoxidovou pryskyřicí). Následuje broušení vzorku na oblast, kterou chceme pozorovat a na závěr se výbrus leští a případně leptá [78]. Takto vzniklý metalografický výbrus je analyzován pomocí optického (např. metalografického), konfokálního nebo elektronového mikroskopu (nejčastěji rastrovacího elektronového mikroskopu SEM, angl. *scanning electron microscope*). Výbrusy mohou být zkoumány z hlediska pozorování trhlin a dutin, případně také při měření kontaktního úhlu α atd. [29]. Elektronovým mikroskopem můžeme s výhodou měřit nejen tloušťku IML, ale v případě, že je vybaven tzv. EDX spektroskopií (angl. *energy dispersive X-ray spectroscopy*), je možné také provádět prvkovou analýzu IML na rozhraní [76].



Obrázek 22. Metalografický výbrus zalitý vodivou epoxidovou pryskyřicí a připravený na analýzu na elektronovém mikroskopu (SEM). Převzato z [79].

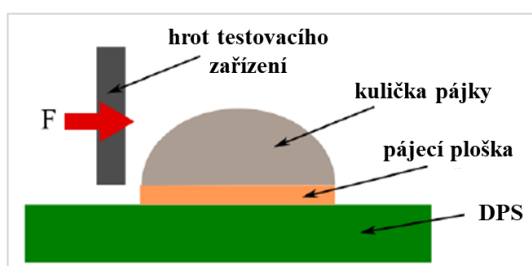
4.2.2 Měření mechanických vlastností

Výrobky zejména spotřební elektroniky jsou vystaveny každodennímu mechanickému namáhání a vibracím, proto je žádoucí pájené spoje testovat nejen z hlediska mikrostruktury, ale i z hlediska jejich mechanických vlastností. Ačkoli spotřební elektronika obsahuje zejména součástky povrchové montáže, které jsou na mechanické poškození náchylnější, pro vývodové součástky jsou důležité mechanické vlastnosti slitiny jako takové. Mechanické vlastnosti se v principu zkoumají buď na kuličce pájecí slitiny, nebo přímo na zapájené součástce. V praxi se setkáváme nejčastěji s těmito zkouškami [1]:

- a) namáhání kuličky pájky stříhem,
- b) namáhání kuličky pájky studeným/teplým tahem,
- c) namáhání pájených spojů tahem pomocí připájené součástky,
- d) namáhání pájených spojů smykem pomocí připájené SMD součástky,
- e) namáhání pájených spojů cyklickým ohybem DPS.

4.2.2.1 Namáhání kuličky pájky stříhem

Zkouška stříhem (angl. *shear strength test*) spočívá v namáhání připájené kuličky slitiny. Hrot testovacího zařízení se pohybuje po celou dobu konstantní rychlostí v rovnoběžném směru s DPS. Principiální schéma zkoušky znázorňuje Obrázek 23. Během měření je zaznamenávána závislost síly stříhu F (N) na posunu hrotu ΔL (mm). K porušení pájeného spoje může docházet na různých místech. Jednou z možností je porušení v objemu kuličky, kdy DPS i pájecí ploška zůstávají na svém místě. Dále může spoj prasknout na rozhraní IML/pájka nebo IML/pájecí plošky. Poslední možností je odtržení celé pájecí plošky od substrátu DPS, případně se pájecí ploška může utrhnout i s částí substrátu [1].

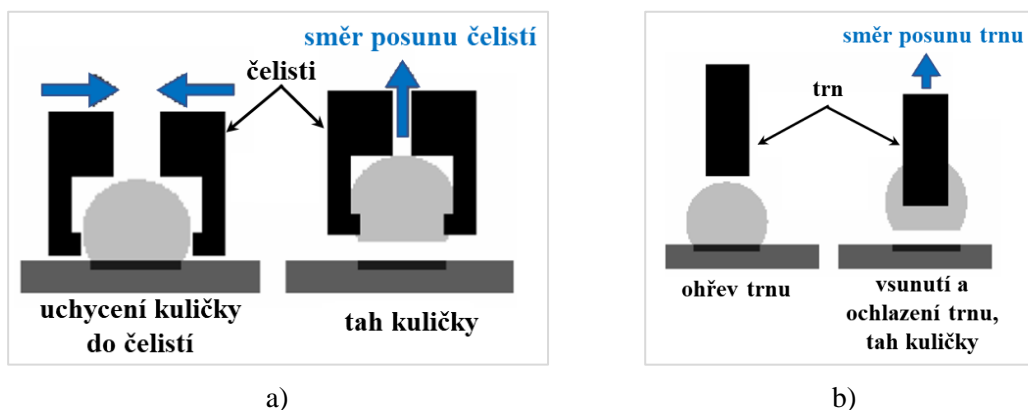


Obrázek 23. Schéma měření namáhání kuličky pájky stříhem.

4.2.2.2 Namáhání kuličky tahem

Zkoušku tahem (angl. *pull test*) rozdělujeme na tzv. studeným a horkým tahem. Na rozdíl od zkoušky stříhem je kulička při tahové zkoušce namáhána ve směru kolmém k rovině DPS a většinou se zjišťuje pouze maximální síla tahu, nikoli celý průběh. Zkouška studeným tahem spočívá v namáhání kuličky pomocí konstantně se pohybujících čelistí, do kterých je kulička chycena (Obrázek 24.a). Princip metody horkého tahu je opět v namáhání kuličky, ale v tomto případě trnem připájeným dovnitř kuličky (Obrázek 24.b). Trn se nejprve ohřeje nad teplotu tavení slitiny a následně se zasune do kuličky. Tyto zkoušky mají však své nevýhody. Při namáhání studeným tahem dochází k počáteční deformaci kuličky sevřením čelistí, u horkého tahu potom zase ke změně mikrostruktury pájeného spoje vnořením tělesa. Oba tyto zásahy mohou mít vliv na výsledek zkoušky [1,80].

Podobnou zkoušku je možné realizovat i u vývodových součástek a pinů, kde se pin uchytí do čelistí a měří se síla, při které dojde k vytržení pinu [66].



Obrázek 24. Principiální schéma namáhání kuličky a) studeným, b) horkým tahem. Upraveno podle [1].

4.3 Testování pájitelnosti

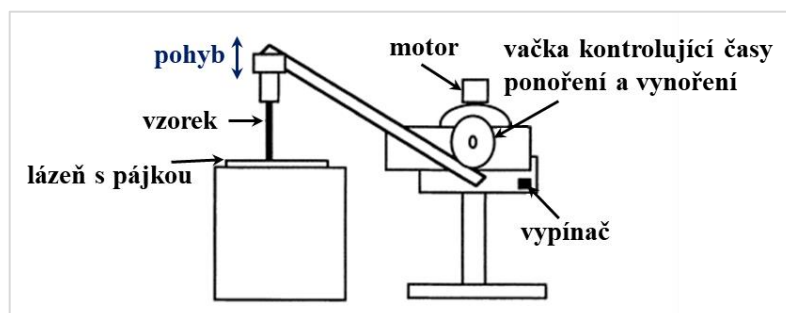
Proces pájení je velmi komplexní, a proto je důležité vyladit podmínky tak, aby byl výsledný spoj co nejkvalitnější a nejspolehlivější. Testování pájitelnosti je důležitou součástí pájení, neboť jím lze predikovat úspěch či neúspěch pájecího procesu předtím, než bude udělána velká investice do nové materiálové kombinace. Pokud daná slitina nebude pájené komponenty (zejména součástky a DPS) dostatečně smáčet, komponenty nebudou dostatečně pájitelné, spoj nedosáhne dobrých mechanických ani elektrických vlastností, které jsou nezbytné pro kvalitně provedený spoj.

Testovací metody lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní, kdy kvalitativní metody jsou založeny zejména na optických kontrolách (např. ponořovací test) a do vyhodnocení je vnesena chyba subjektivního posouzení kvality. V takovém případě se většinou jedná o metody, které vyhodnocují konečný výsledek smáčecího procesu. Naproti tomu kvantitativní metody využívají měření skutečných fyzikálních vlastností během smáčení (např. metoda smáčecích vah) a

vyhodnocují míru smáčení pomocí daných parametrů [81]. Metod testování pájitelnosti je celá řada: ponořovací test, ponoření hrany, kuličkový test, otočně-ponořovací metoda, metoda stoupání menisku, test roztékavosti nebo jedna z nejpoužívanějších testovacích zkoušek, metoda smáčecích vah [81,82]. Na dalších řádcích stručně představím vybrané testy pájitelnosti se zaměřením na metodu smáčecích vah.

4.3.1 Ponořovací test

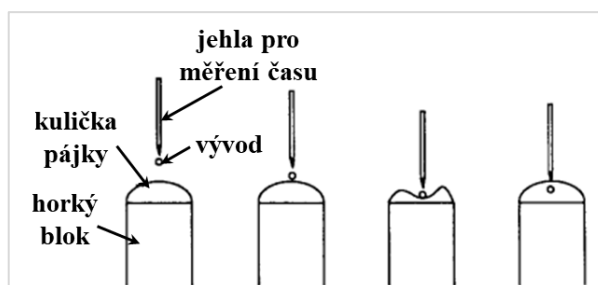
Ponořovací test (angl. *dip and look test*) patří mezi nejrychlejší a nejlevnější metody měření pájitelnosti, ačkoliv není příliš přesný a spolehlivý. Metoda spočívá v ponoření testovacího vzorku po definovaný čas do lázně s roztavenou pájecí slitinou. Ponor může být realizovaný ručně, nicméně využití ponořovacího zařízení přináší výhodu konstantní rychlosti ponoru (Obrázek 25.). Ponor je tedy ovládaný vačkou, která do procesu vnáší jistou reprodukovatelnost měření. Posledním krokem je vizuální hodnocení výsledku smáčení. Právě v subjektivním optickém hodnocení pověřeného pracovníka tkví nevýhoda tohoto testu [81,82].



Obrázek 25. Schéma zařízení pro automatické řízení ponoru ponořovacího testu. Upraveno podle [82].

4.3.2 Kuličkový test

Kuličkový test (angl. *globule test*) byl první z velmi rozšířených kvantitativních metod testování pájitelnosti. Tato metoda testování je použitelná primárně pro THD součástky s vývody kruhového průřezu. Prvním krokem je roztavení dané pájky na horkém nesmáčivém bloku, čímž je vytvořena kulička. Následně je horizontálně orientovaný vývod očištěn tavidlem ponořován do kuličky. V prvním okamžiku dojde k rozdělení kuličky na dvě části, postupně však slitina začne vývod smáčet až ho úplně obklopí (Obrázek 26.).



Obrázek 26. Náčrt sekvence kroků při kuličkovém testu. Upraveno podle [81].

Kuličkový test je založen na měření času od prvního kontaktu pájky do okamžiku, než začne slitina ponořenou část vývodu smáčet. Tento test nám tedy nedává žádnou informaci o kvalitě smáčení ani tendenci odsmačeni. Dalším úskalím jsou velmi tenké vývody, při jejichž ponoru nedojde k rozdělení pájky na dvě části. Také hranaté vývody mohou představovat problém s řádným smočením horní hrany vývodu [81,82]. Variací klasického kuličkového testu je kuličkový test s pokoveným otvorem, tzv. *PTH (plated through hole) globule test*, kde na vrchol kuličky umístíme pokovený otvor a měříme čas potřebný k vystoupení pájky skrz tento prokov [82]. V současné době se kuličkový test z důvodu nedostačujících výsledků získaných při tomto testu používá jen omezeně. Čas smáčení lze totiž mimo další fyzikální vlastnosti získat také měřením metodou smáčecích vah (o této metodě více dále v kapitole 4.3.4).

4.3.3 Test roztékavosti

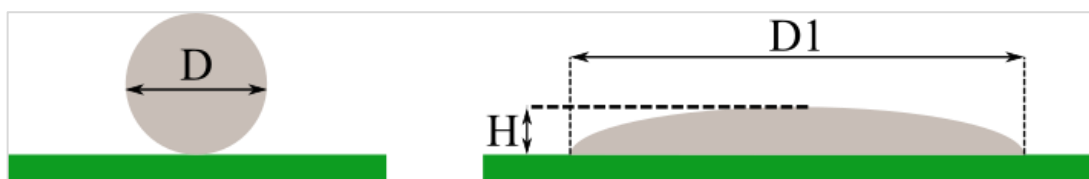
Jedna z nejstarších metod testování pájitelnosti je test roztékavosti (angl. *spreading test*). Prvním krokem tohoto testu je nanesení daného množství pájky na tavidlem očištěný povrch testovacího kupónku. Pájka může být nanášena buď šablonovým tiskem ve formě pasty, nebo je možné připravit kuličky předem definovaného průměru [82–84]. Následně je povrch zahřát a pájka přetavena (Obrázek 27.). K přetavení je možné použít libovolnou metodu – např. přetavení v parách, horkovzdušnou pecí, infračerveným ohřevem a další [85]. Takto provedený test je následně vyhodnocován pomocí tzv. faktoru roztékavosti (angl. *spread factor*) definovaného v normě IPC-SP-819 [86]. Faktor roztékavosti SF (%) je dán následujícím vztahem:

$$SF = \frac{D - H}{D} 100 \quad (15)$$

kde D (mm) je průměr kuličky před přetavením a H (mm) výška kuličky po procesu přetavení.

Rozměry kuličky je možné měřit pomocí některého z mikroskopů (např. konfokálního nebo SEM). V některých studiích [83,87,88] se kromě faktoru roztékavosti objevuje také měření kontaktního úhlu α jakožto dalšího parametru pro vyhodnocení testu roztékavosti. Úhel byl ve většině případů zjišťován z metalografického výbrusu pod elektronovým mikroskopem.

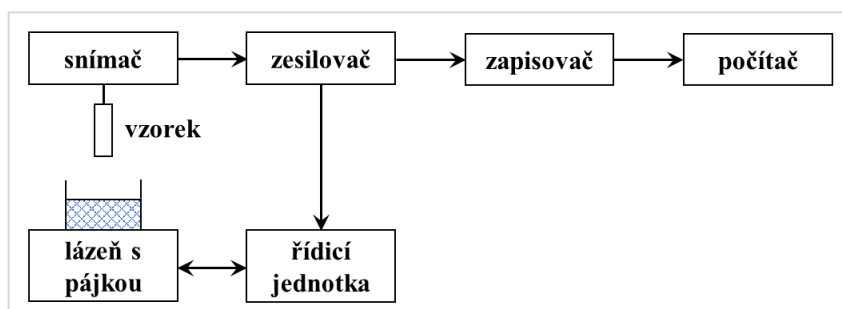
Pomocí této testovací metody je možné zjišťovat účinky různých složení tavidel, drsnosti povrchu, složení pájecích slitin, povrchových úprav, odlišných metod přetavení a atmosfér atd. na roztékavost [83–85,87,89].



Obrázek 27. Princip testu roztékavosti.

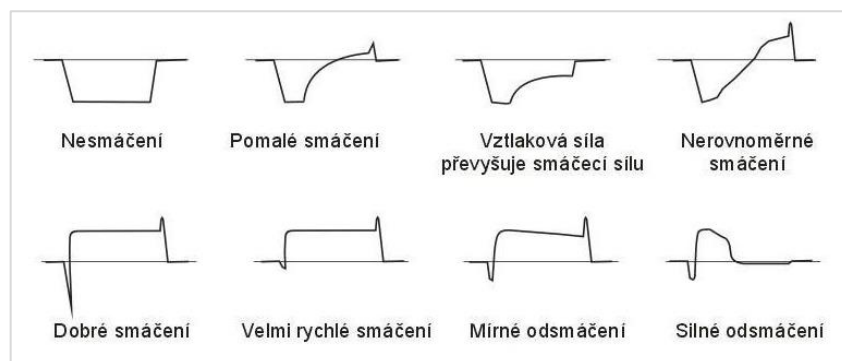
4.3.4 Metoda smáčecích vah

Metoda smáčecích vah (angl. *wetting balance test*) je jednou z velmi přesných kvantitativních testovacích metod pájitelnosti. Vychází z metody vyvažování Wilhelmyho destičky (kapitola 2.1.3), kde je měřena síla povrchového napětí po ponoru testovací destičky do pájecí slitiny. Tato metoda byla s rozvojem elektroniky vylepšena na dnes hojně využívanou metodu smáčecích vah, kde je měřena vertikální síla působící na testovaný vzorek v závislosti na čase. Digitální přístroj využívaný k měření se nazývá meniskograf [90].



Obrázek 28. Principiální schéma testování pájitelnosti metodou smáčecích vah.

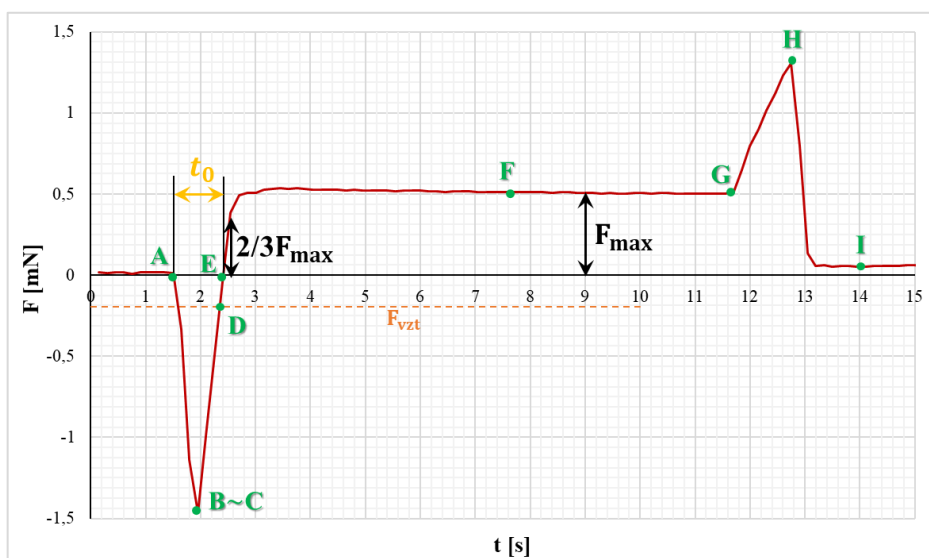
Proces testování začíná zahřátím pájecí slitiny na požadovanou teplotu, která je po dobu měření udržována topným tělesem na konstantní hodnotě. Následuje příprava testovaného vzorku, který se volně zavěsí na siloměr nad pájecí lázeň. Po spuštění měření se pájecí lázeň pohybuje pomocí krokových motorů nastavenou konstantní rychlostí směrem vzhůru. V okamžiku styku vzorku se slitinou je detekován ponor – v závislosti na typu meniskografu buď elektricky nebo opticky. V nastavené hloubce zůstane vzorek ponořen po stanovenou dobu, během které by mělo dojít ke smočení vzorku. Po uplynutí nastaveného času se pájecí lázeň začne pohybovat zpět směrem dolů. Po celou dobu testování je převodníkem zaznamenávána síla působící ve vertikálním směru, která je konvertována na nepřetržitě zaznamenávaný elektrický signál posílaný do počítače. Zde je pomocí programu vykreslována smáčecí síla v závislosti na čase, tzv. smáčecí křivka [59,91]. Z tvaru smáčecí křivky je možné určit, o jaký typ smáčení se jedná, případně jaký negativní vliv se během testování projevil. Různé tvary smáčecích křivek jsou znázorněny na Obrázku 29.



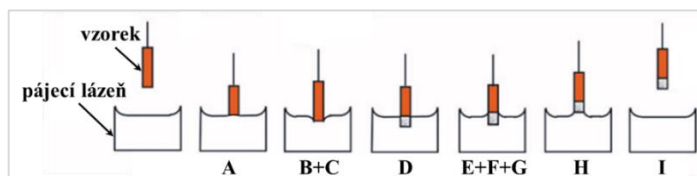
Obrázek 29. Příklady různých tvarů smáčecích křivek. Převzato z [75].

4.3.4.1 Rozbor smáčecí křivky

Obrázek 30. představuje změřenou smáčecí křivku eutektické Bi-Sn slitiny na měděném drátku o průměru 1,5 mm očištěném neutrální pájecí kapalinou s následujícími nastavenými parametry měření: teplota pájecí lázně: 200 °C, hloubka ponoru: 5 mm, rychlost ponoru: 5 mm/s. Obrázek 31. potom zobrazuje jednotlivé pozice testovaného vzorku v souvislosti s vyznačenými body na křivce.



Obrázek 30. Smáčecí křivka měděného drátku změřená meniskografem se slitinou Bi58Sn42.



Obrázek 31. Znárodnění jednotlivých bodů na smáčecí křivce. Upraveno podle [90].

V bodě A došlo k prvnímu kontaktu drátku s pájecí slitinou. V tomto okamžiku je však teplota vzorku ještě velmi nízká, a proto ke smáčení ještě nedochází a kontaktní úhel je větší než 90°. Na vzorek působí velká vztlačová síla, zatímco je vzorek dále ponořován do definované hloubky. Sklon křivky mezi body A a B je dán rychlostí ponoru. Pokud by v okamžiku B nebyl vzorek dostatečně prohřátý, v bodě B by se vytvořila „pata“ a bod B bychom rozdělili na B a C (jako je tomu na Obrázku 29. – pomalé smáčení). Čas mezi body B a C potom nazýváme časem nesmáčení (angl. *non-wetting time*). Od okamžiku bodu C začíná pájka testovaný vzorek smáčet, pomalu vtahovat do lázně, a kontaktní úhel klesá. V bodě D je kontaktní úhel α roven 90° a smáčecí síla odpovídá vztlačové síle F_{vzt} působící na ponořenou část drátku, která je rovna součinu tíhového zrychlení g (m/s^2), hustoty pájecí slitiny ρ_s (kg/m^3) a objemu ponořené části vzorku V (m^3). Bod E je významným bodem z hlediska měření času t_0 mezi body A a E, který nazýváme zero-cross time. Je to je čas, za který dojde k přechodu od nesmáčení ke smáčení testovaného vzorku. Smáčecí síla dále stále narůstá, vzorek je čím dál tím více vtahován do pájecí lázně, poté

se síla ustálí a v bodě G nastává vynořování vzorku z pájecí slitiny. V okamžiku bodu H došlo k „odtržení“ vzorku od slitiny a prudkému poklesu snímané vertikální síly. Sílu v bodě I nazýváme konečnou smáčecí silou F_{end} (angl. *final wetting force*), která představuje sílu danou množstvím slitiny, jež ulpěla na testovaném vzorku [90].

4.3.4.2 Korekce vztlakové síly

Aby bylo měření opakovatelné a porovnatelné, provádí se korekce vztlakové síly, která je odlišná pro různé vzorky a slitiny. Pro výpočet se využívá již zmíněného vztahu:

$$F_{vzt} = V\Delta\rho g \quad (16)$$

kde $\Delta\rho$ je rozdíl hustoty slitiny a okolní atmosféry (kg/m^3), V objem ponořené části destičky (m^3), g tíhové zrychlení (m/s^2). Hustota okolní atmosféry (nejčastěji vzduchu) je však oproti hustotě pájecí slitiny zanedbatelná, proto se často počítá pouze s hustotou pájky a vztah (16) přechází do tvaru:

$$F_{vzt} = V\rho_s g \quad (17)$$

5 Experimentální část

Experimentální část této práce vychází z provedené rešerše a myšlenky měření smáčení pokoveného otvoru metodou smáčecích vah. Jak již bylo zmíněno v teorii v kapitole 4.3.2, pomocí modifikovaného kuličkového testu (PTH globule test), kdy se na vrchol kuličky roztavené pájky umístí prokov, je možné měřit čas vyvzlínání pájky pokoveným otvorem. Čas je však jen jedním z parametrů, které nás při hodnocení pájitelnosti zajímají. Z tohoto důvodu vznikla myšlenka měřit i jiné parametry při smáčení prokovu DPS, a to nejpoužívanější a nejspolehlivější metodou smáčecích vah. Po provedení rozsáhlé rešerše ohledně výzkumů měření na meniskografu nebyla nalezena žádná zmínka o pokusech toto měření realizovat. Metoda smáčecích vah je totiž v publikacích prezentována jako metoda pro testování pájitelnosti vývodů součástek pro skrzděrovou technologii, případně pro testování samotných substrátů. Z tohoto důvodu byla metoda smáčecích vah nejčastěji realizována na měděných drátkách o různých průměrech – např. v těchto studiích byly použity Cu drátky o průměru 0,44 mm [39], 1 mm [87], 0,3 mm, 0,4 mm a 0,7 mm [92]. Další vědecké publikace (např. [46,93,94]) využívají pro měření na meniskografu testovacích kupónků/destiček. Tímto způsobem je možné posuzovat pájitelnost různých povrchových úprav DPS [94], případně stejně jako při použití testovacího drátku lze zkoumat vliv teploty pájecí lázně [46,93], použitého tavidla [87,92], použité slitiny [92] včetně vlivů přidaných prvků [39] a dalších parametrů na pájitelnost.

V následujících kapitolách představím navrženou metodiku simulující měření smáčení pokoveného otvoru metodou smáčecích vah. Zaměřím se také na problémy, se kterými jsem se během ladění této metodiky potýkala a kterým je potřeba se vyhnout. Dále zhodnotím naměřené výsledky získané touto metodou a nastíním další možné kroky, které by byly pro praxi rovněž přínosné.

5.1 Návrh experimentu

Před začátkem experimentu jsem navrhla řešení (popsané v následující kapitole 5.1.1 Původní experiment), které se později bohužel ukázalo jako nevhodné, protože jsem se při následném měření potýkala s velkými problémy s opakovatelností měření. Z tohoto důvodu je tato kapitola rozdělena na dvě podkapitoly představující původní a současné, nové, řešení.

5.1.1 Původní experiment

Původní návrh experimentu spočíval v analogickém řešení jako je možné nalézt u modifikovaného kuličkového testu s pokoveným otvorem. Měření mělo spočívat ve dvou krocích. Prvním plánovaným experimentem bylo změření pouze prokovu, následně potom i prokovu s vloženým pinem. Pro tyto účely jsem navrhla dvouvrstvé DPS o rozměrech 10x10 mm a třech

různých tloušťkách (1,5 mm, 2,4 mm a 3,2 mm) se čtyřmi průměry prokovu (1 mm, 1,3 mm, 1,6 mm a 1,9 mm). Vybraná napanelovaná destička je zobrazena na Obrázku 32.a.



Obrázek 32. a) Navržená DPS pro původní experiment. b) Ukázka DPS s přilepeným pinem.

Pin do destičky jsem následně lepila tepelně odolným silikonem (Pattex, Special Materials) tak, aby okolo pinu vždy zůstal dostatečný prostor pro únik výparů z tavidla a během měření nedocházelo ke kolísání síly vlivem úniků tavidlových výparů (Obrázek 32.b). Nicméně, samotná proveditelnost experimentu byla náročná z mnoha dalších důvodů. Meniskograf používaný k tomuto měření totiž využívá detekci ponoru pomocí elektrického signálu. Jako možnou variantou uchycení jsem zvolila uchycení hliníkovým držákem za pin. Problém však spočíval v uchycení destičky za přilepený pin tak, aby byla destička vždy stoprocentně vodorovně s hladinou pájky v lázni. Při ponoření, byť jen velmi malé části DPS, dojde k rapidnímu nárůstu vztlakové síly a měření nic nevypovídá o smáčení prokovu s pinem. Často se také stávalo, že na spodní části destičky ulpěl tavidlový zbytek, který byl následně smočen a v jeho místě se vytvořil krápník pájky. Z těchto důvodů jsem od tohoto návrhu experimentu upustila.

5.1.2 Nový experiment

Nové řešení experimentu vycházelo z pokusu oříznuté původně navržené DPS, u které k výše popsaným negativním jevům nedocházelo. Ořezávání každé DPS by však bylo velmi časově náročné, proto jsem se rozhodla simulovat prokov měděnými trubičkami z vnější strany ošetřenými nepájivou maskou. Detailní popis tohoto experimentu bude představen v následujících kapitolách.

5.2 Použité materiály a metody

V této kapitole se zaměřím na navrženou metodiku nového experimentu. Představím konkrétní použité materiály, postup přípravy vzorků pro realizaci experimentu a detailněji rozeberu jednotlivé kroky metody.

5.2.1 Příprava experimentu

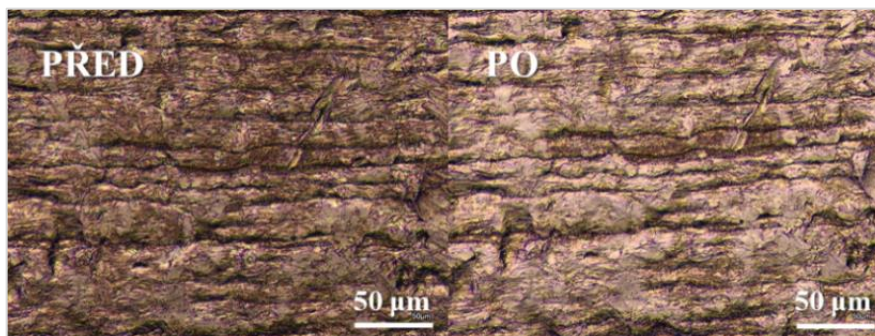
Pro experiment jsem využila měděné trubičky (Obrázek 33.) o šesti různých průměrech – vnější průměry: 2,2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 4,5 mm a 5 mm, resp. vnitřní: 1,5 mm, 1,8 mm, 2,3 mm, 3,2 mm, 3,8 mm a 4,2 mm. Bohužel nebylo možné sehnat takovou škálu průměrů

trubiček potřebné velikosti, které by svým průměrem odpovídaly velikosti prokůvů využívaných v praxi. Nicméně, tři nejmenší (1,5 mm, 1,8 mm a 2,3 mm) průměry lze považovat za velmi blízké těm používaným. Dále budu průměry trubiček označovat jejich vnějšími průměry.



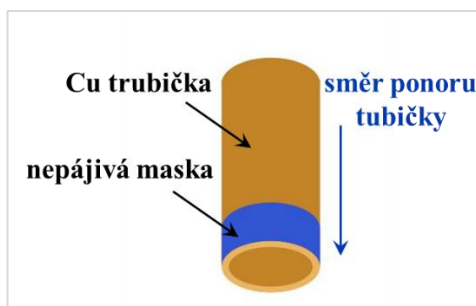
Obrázek 33. Trubičky použité v experimentu. Zleva průměr 2,2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 4,5 mm a 5 mm.

Z důvodu vysoké oxidace mědi byly trubičky nejprve očištěny v 21% roztoku kyseliny chlorovodíkové (HCl) s deionizovanou vodou. Ponor trubičky do roztoku jsem realizovala vždy ve vertikálním směru po dobu 1 minuty, aby byl proces co nejreprodukovatelnější. Z Obrázku 34. zobrazujícího povrch měděné trubičky před a po očištění je zřejmé, že v roztoku HCl byla odstraněna oxidová vrstva na povrchu mědi.



Obrázek 34. Povrch trubičky před a po očištění v HCl.

Po řádném očištění trubiček následovalo nanesení tenké vrstvy modré nepájjivé masky (označení BY-UVH900) pomocí štětečku. Vrstvu masky jsem nanasla vždy na jednu stranu trubičky tak, aby se maska nedostala ani na spodní stranu, ani dovnitř trubičky (Obrázek 35.). Poté byla maska vytvrzena UV lampou.



Obrázek 35. Ilustrační obrázek trubičky s nanesenou nepájjivou maskou.

Před samotným měřením jsem ještě použila dvě různá tavidla, která se lišila obsahem kalafuny. Informace o těchto tavidlech jsou uvedeny v Tabulce 2. Tavidlo jsem nanášela pomocí štětečku dovnitř trubičky tak, aby byla ošetřena celá vnitřní část. Přebytečné tavidlo jsem nechala

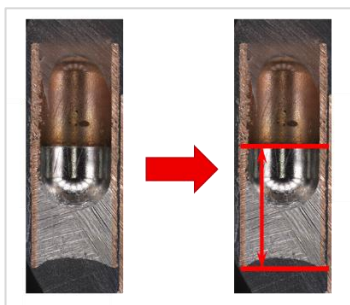
okapat nad filtračním papírem mimo pájecí lázeň. Takto připravené vzorky byly použity na měření pájitelnosti slitinou SAC305 (Sn96,5Ag3Cu0,5) pomocí meniskografu.

Tabulka 2. Specifikace použitých tavidel pro měření pájitelnosti.

tavidlo	označení dle ISO 9454-1	další informace
Topnik TE-410	2.2.3	kapalina, no-clean
Topnik TK83	1.1.2/3	kapalina, no-clean

5.2.2 Další měření

Po provedeném měření na meniskografu jsem ještě změřené trubičky kontrolovala opticky pomocí laserového skenovacího konfokálního mikroskopu Keyence VK-X1000. Pro všechny vzorky jsem provedla měření z horní strany trubičky a nasnímala meniskus. Dále z důvodu časové a materiálové náročnosti přípravy metalografických výbrusů jsem pro každou kombinaci průměru a teploty s tavidlem TE-410 zalila pouze tři trubičky do epoxidové pryskyřice, zbrousila a lehce vyleštila tak, aby bylo možné měřit výšku vystoupení pájecí slitiny v trubičce (Obrázek 36.).

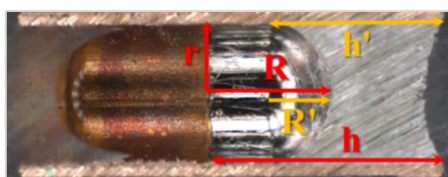


Obrázek 36. Ukázka měření výšky vystoupení pájecí slitiny v trubičce.

Z těchto výsledků jsem dále vypočítala objem pájecí slitiny, která ulpěla v trubičce po jejím vymoření z lázně. Nicméně, je potřeba si uvědomit, že v trubičce se vytváří konkávní meniskus, a proto není možné použít klasického výpočtu pro objem válce. Výpočet je potřeba upravit o objem kulového vrchlíku vytvořeného meniskem:

$$V = \pi r^2 h - \frac{1}{6} \pi R(3r^2 + R^2) \quad (18)$$

kde r je poloměr trubičky (mm), R poloměr menisku (mm) a h výška vyvzlínání pájky (mm). Tento vztah však platí pouze pro $R \leq r$, tedy pro malé průměry trubiček. V opačném případě je nutné výpočet ještě dále upravit, případně počítat výškou h' a poloměrem R' (Obrázek 37.). V případě znatelného menisku i na spodní straně trubičky je nutné odečíst i objem tohoto spodního menisku.

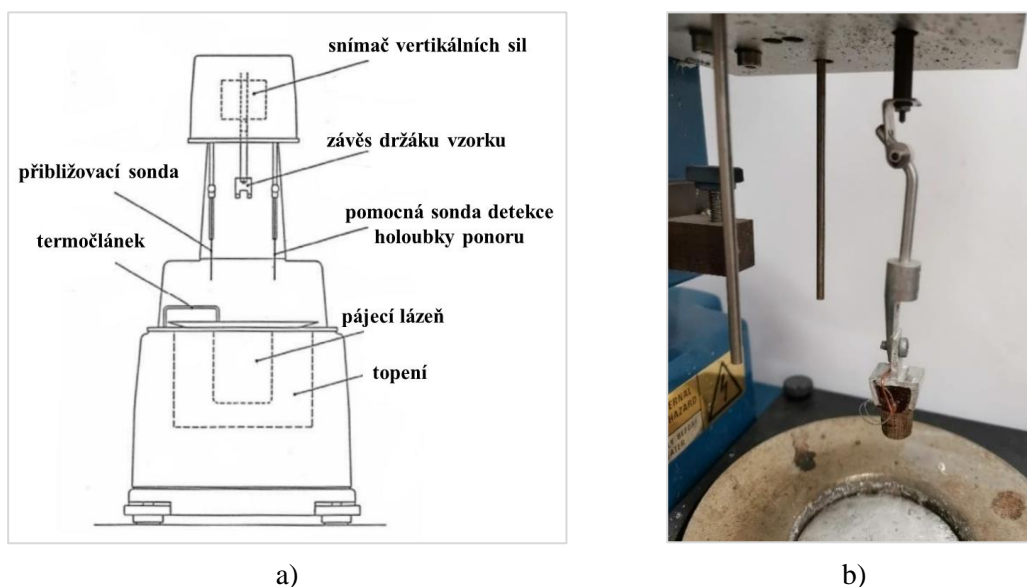


Obrázek 37. Znárodnění symbolů použitých ve výpočtu v rovnici (18).

5.2.3 Meniskograf

Pro tento experiment byl využit Meniskograf MK-6 (Obrázek 38.a), který k detekci ponoru vzorku využívá principu elektrického signálu. Je tedy třeba zajistit, aby byl vzorek přes držák, do kterého je upevněn, vodivě spojen se závěsem držáku. V případě nevodivých vzorků se používá pomocné sondy, která zajistí detekci ponoru a nastavenou maximální hloubku ponoru. Princip fungování meniskografu je popsán v kapitole 4.3.4. Metoda smáčecích vah.

K meniskografu byl dodán klasický hliníkový držák, který je vyhovující pouze pro měření smáčení na drátku, případně na destičce. Po upevnění trubičky do tohoto držáku nastává problém s velkou stykovou plochou a tepelnou vodivostí hliníku. Následkem toho je velká část tepla odvedena z trubičky pryč a měřená trubička se během ponoru v pájecí lázni nestačí prohřát. Při nedostatečném prohřátí vzorku potom nedochází ke smáčení. Z tohoto důvodu bylo potřeba vyrobit držák z materiálu o malé tepelné vodivosti (Obrázek 38.b). Pro tyto účely jsem modifikovala hliníkový držák, na jehož konec jsem připevnila část z pertinaxu (kompozitní materiál tvořený bavlnou a formaldehydem). Tento nástavec zároveň umožňuje fixaci trubičky ve vertikálním směru, čímž je zajištěna vodorovná poloha trubičky s hladinou pájecí lázně. V horní části pertinaxového nástavce je vytvořen otvor, který umožňuje únik výparů tavidla během procesu měření. Součástí držáku je ještě měděný drátek s ocelovou pružinkou. Tyto dva komponenty slouží pro uzavření elektrického obvodu a umožní detekci ponoru testovaného vzorku. Ocelová pružinka zároveň nedovolí trubičce z nástavce vypadnout.



Obrázek 38. a) Nákres meniskografu MK-6. b) Modifikovaný držák na uchycení testovaných trubiček.

Meniskograf MK-6 umožňuje nastavit několik parametrů: teplotu pájecí lázně, hloubku ponoru, rychlost ponoru a délku ponoru. Hloubku ponoru je možné nastavit od 0 mm po 9 mm s krokem jednoho milimetru. Rychlost ponoru 0,5 mm/s až 20 mm/s (0,5, 1, 2, 5, 10 a 20 mm/s) a čas ponoru od 0,5 s do 100 s (0,5, 2, 5, 10, 20 a 100 s). Nastavené parametry při mnou provedeném měření jsou uvedené v následující Tabulce 3.

Tabulka 3. Nastavení parametrů meniskografu.

parametr	hodnota
teplota lázně	255 °C, 270 °C, 285 °C
rychlost ponoru	5 mm/s
hloubka ponoru	1 mm
délka ponoru	20 s

Hloubku ponoru jsem měla v úmyslu nastavit na 0 mm. Meniskograf ale většinou nedokázal zajistit zastavení vzorku přímo na hladině, proto jsem se rozhodla trubičky ponořovat do hloubky 1 mm. Jak později ukázal výpočet, vztlaková síla způsobená ponorem vzorků na 1 mm je vzhledem k naměřeným hodnotám smáčecí síly tak malá, že není třeba provádět korekci na vztlakovou sílu. Malá vztlaková síla je dána také úzkou stěnou měřených trubiček.

Z toho důvodu, že jedním z cílů měření bylo zjištění vlivu teploty pájecí lázně na pájitelnost, experiment jsem prováděla při třech různých teplotách. Teploty byly voleny s ohledem na teplotu tání použité slitiny SAC305 a v praxi často využívané teploty při pájení vlnou. Slitina SAC305 má teplotu tání okolo 217 °C [31], nicméně při pájení vlnou se běžně nastavuje teplota o minimálně 30 °C vyšší. Při bezolovnatém pájení vlnou, zejména potom se slitinou SAC305 se nejčastěji používá teplota lázně 265±5 °C [20,31,66]. V praxi se výjimečně můžeme setkat i s bezolovnatou vlnou o teplotě 290 °C. Z těchto důvodů jsem za nejnižší teplotu zvolila 255 °C, pod kterou již slitina není dostatečně tekutá a na vzorcích vytváří krápníky. Dále jsem teplotu zvyšovala po 15 °C.

5.2.4 Metodika

Experiment vycházel z postupu měření na meniskografu popsaného výše v kapitole 4.3.4 Metoda smáčecích vah. V této kapitole stručně shrnu jednotlivé kroky navržené metodiky a popíšu následné vyhodnocení naměřených dat. Všechny tyto kroky musí být pro každý vzorek prováděny vždy za stejných podmínek, aby bylo možné výsledky porovnávat a abychom nezanášeli do měření proměnné faktory.

- 1) Příprava vzorků – očištění trubiček v HCl, nanesení a vytvrzení nepájivé masky.
- 2) Nanesení tavidla dovnitř trubičky. Odstranění přebytečného množství dotykem vzorku o filtrační papír.
- 3) Nastavení požadovaných parametrů meniskografu.
- 4) Upevnění trubičky do držáku a zavěšení nad pájecí lázeň.
- 5) Spuštění měření a zaznamenávání vertikální síly působící na vzorek.
- 6) Uložení csv souboru a následné vyhodnocení dat.

Každou kombinaci teplota-tavidlo-průměr trubičky jsem změřila 10krát a následně naměřená data vyhodnotila. Vyhodnocení naměřených průběhů smáčecí síly jsem provedla

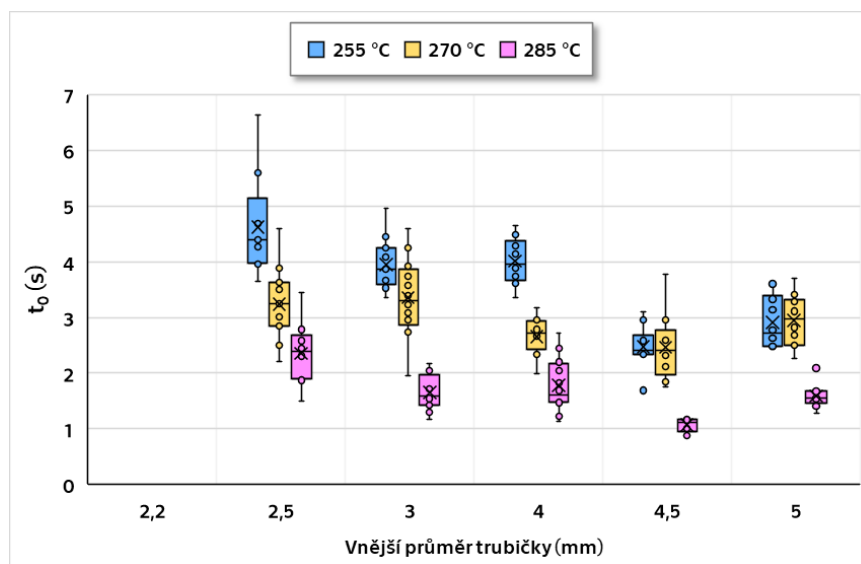
z hlediska dvou sil a dvou časů. Zajímala mě maximální smáčecí síla F_{\max} , konečná smáčecí síla F_{end} , která udává, kolik pájecí slitiny zůstalo v trubičce, dále zero-cross time t_0 a čas nesmáčení $t_{\text{non-wett}}$. Dodatečným parametrem, který mě zajímal byla výška vystoupení slitiny v trubičce h , respektive objem pájky V , který ulpěl v trubičce, a rychlost smáčení, respektive rychlost dosažení $2/3F_{\max}$, který jsem spočítala z podílu $2/3F_{\max}$ a času dosažení této síly $t_{2/3}$. Čím je tento podíl větší, tím je smáčení rychlejší. Požadujeme tedy v co možná nejkratším čase dosáhnout co nejvyšší síly $2/3F_{\max}$. Z vyhodnocených dat jsem poté pro každé tavidlo vykreslila box-plotový graf závislost sil, časů a rychlosti smáčení na teplotě a průměru trubičky. Trendy byly zároveň testovány pomocí Studentova T-testu s 5% hladinou významnosti.

5.3 Výsledky experimentů

V následujících podkapitolách představím výsledky získané navrženou metodikou. Nejprve krátce popíšu výsledky získané z měření na meniskografu a poté budou následovat výsledky z měření výšky vystoupení pájecí slitiny pomocí konfokálního mikroskopu. Detailnější rozbor a diskuze výsledků bude popsána v další kapitole 5.4. Vyhodnocení výsledků experimentů. U dat z experimentů s kalafunovým tavidlem TK83 chybí průměr trubičky 4,5 mm z důvodu chybného průměru dodaných trubiček ve druhé objednávce.

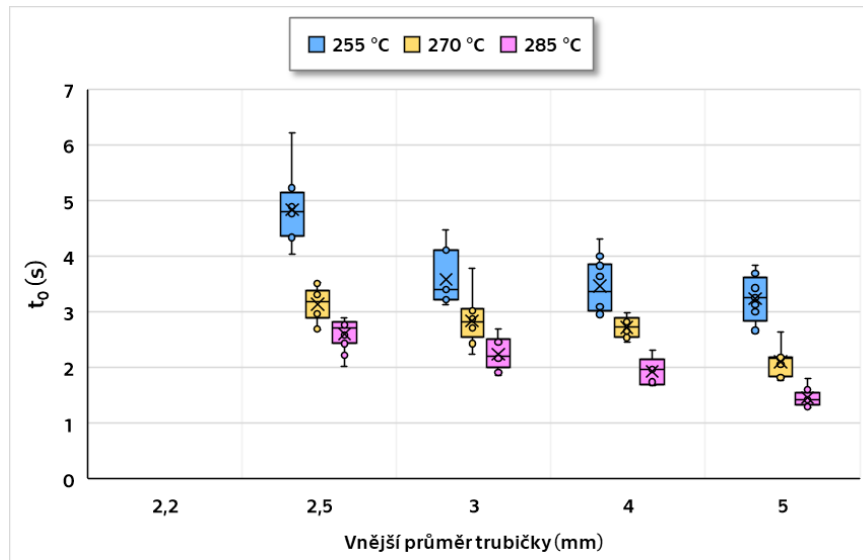
5.3.1 Výsledky měření metodou smáčecích vah

Obrázek 39. a Obrázek 40. zobrazují naměřené hodnoty zero-cross time pro jednotlivé kombinace teplot lázně, průměrů trubiček a tavidla. Na grafech je patrný vliv jak nastavené teploty pájecí lázně, tak průměru trubičky.

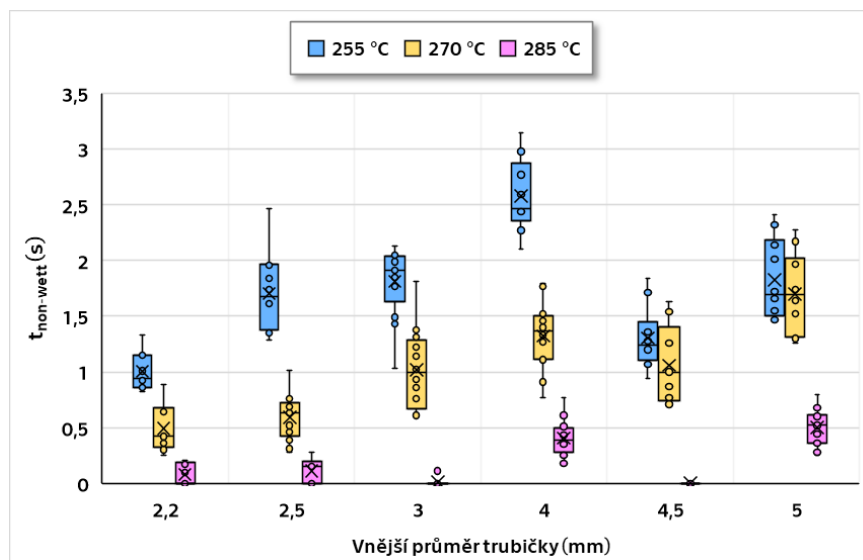


Obrázek 39. Naměřené hodnoty zero-cross time t_0 v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.

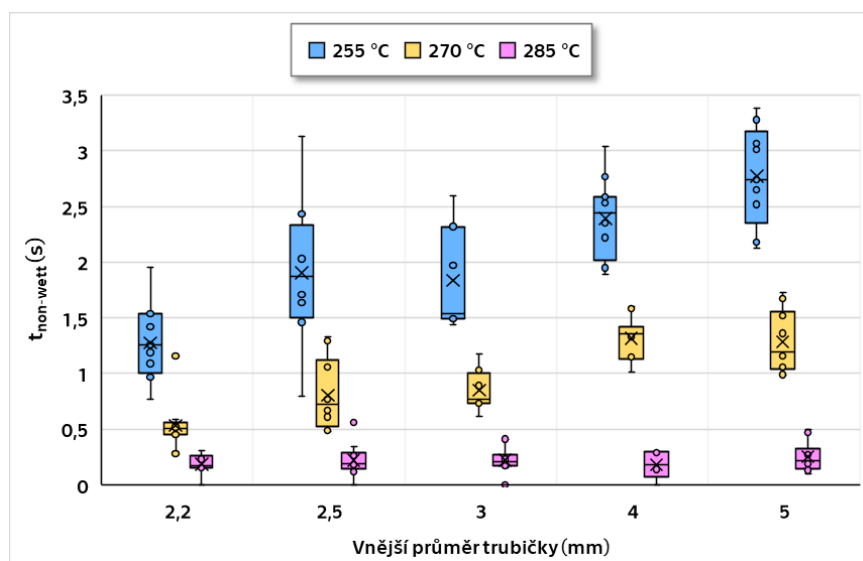
Box-plotové grafy na Obrázku 41. a Obrázku 42. představují naměřené hodnoty časů nesmáčení, tedy doby, než došlo k prvnímu smočení testované trubičky po dosažení požadované hloubky ponoru. Vliv teploty lázně a průměru trubičky na tento čas je zjevný.



Obrázek 40. Naměřené hodnoty zero-cross time t_0 v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.



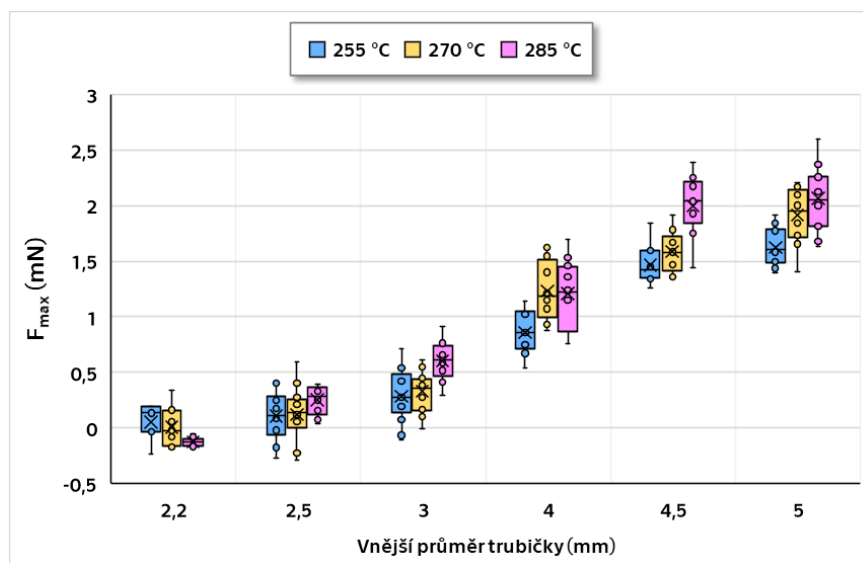
Obrázek 41. Naměřené hodnoty času nesmáčení $t_{non-wett}$ v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.



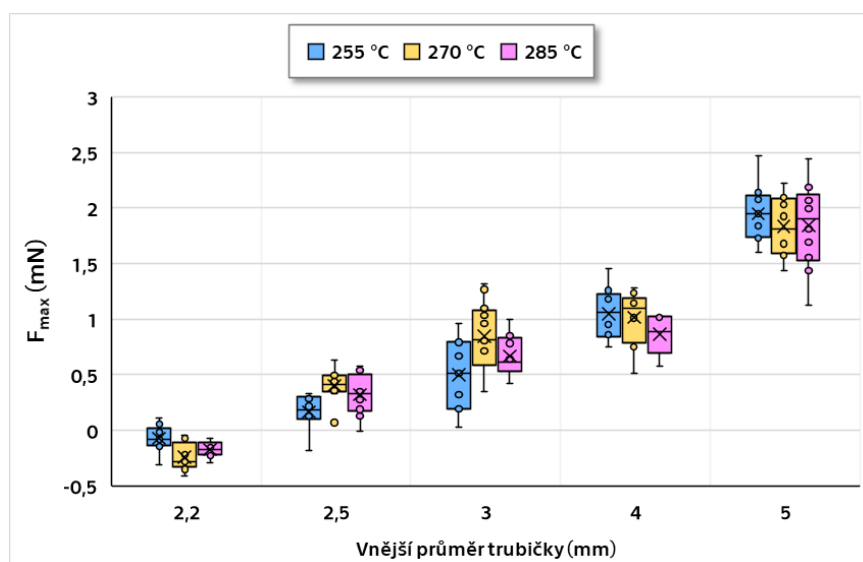
Obrázek 42. Naměřené hodnoty času nesmáčení $t_{non-wett}$ v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.

Změřené hodnoty maximální smáčecí síly je možné vidět na Obrázku 43. a Obrázku 44. Grafy na Obrázku 45. a Obrázku 46. znázorňují potom konečnou smáčecí sílu odpovídající množství slitiny, která zůstala v trubičce po vynoření. V obou případech pozorujeme znatelný vliv průměru testované trubičky, zatímco vliv nastavené teploty pájecí lázně na tyto síly (F_{\max} i F_{end}) je minimální.

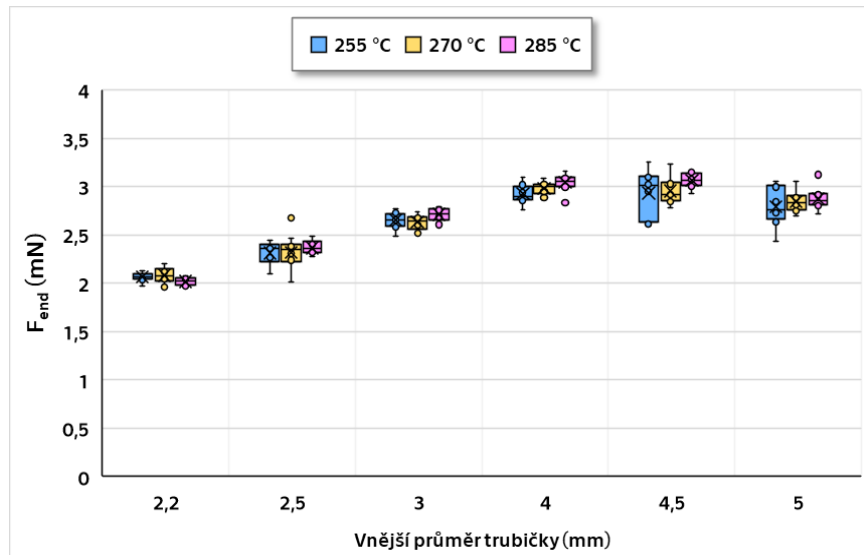
Box-plotové grafy na Obrázku 47. a Obrázku 48. dávají do souvislosti 2/3 maximální smáčecí síly a čas dosažení této síly. Takto vypočítaná rychlost smáčení je také jedním z parametrů, které se často hodnotí. I zde je patrnější vliv průměru trubičky oproti vlivu teploty pájecí lázně. Čím je tato rychlost vyšší, tím je dosaženo lepšího smáčení.



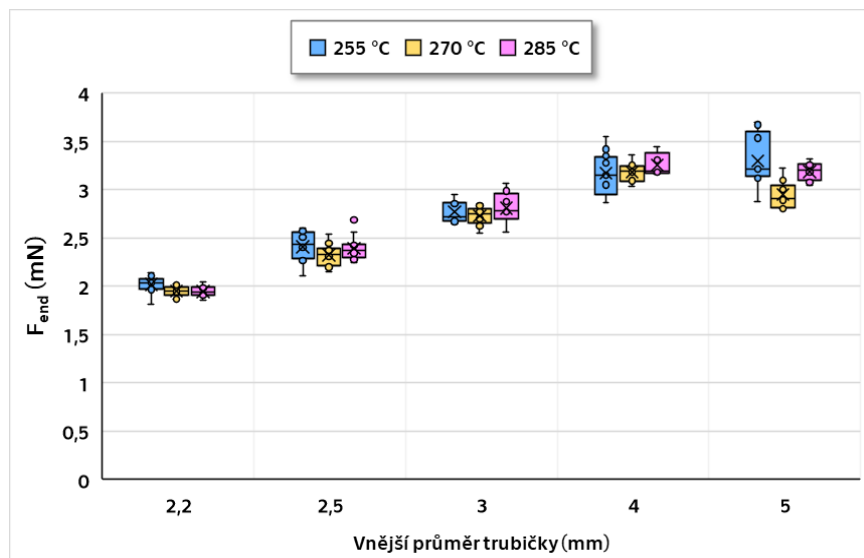
Obrázek 43. Naměřené hodnoty maximální smáčecí síly F_{\max} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.



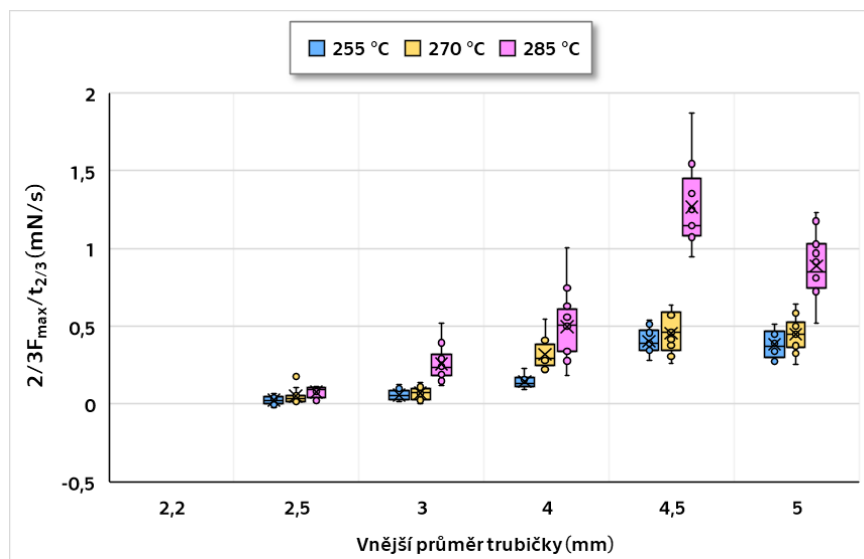
Obrázek 44. Naměřené hodnoty maximální smáčecí síly F_{\max} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.



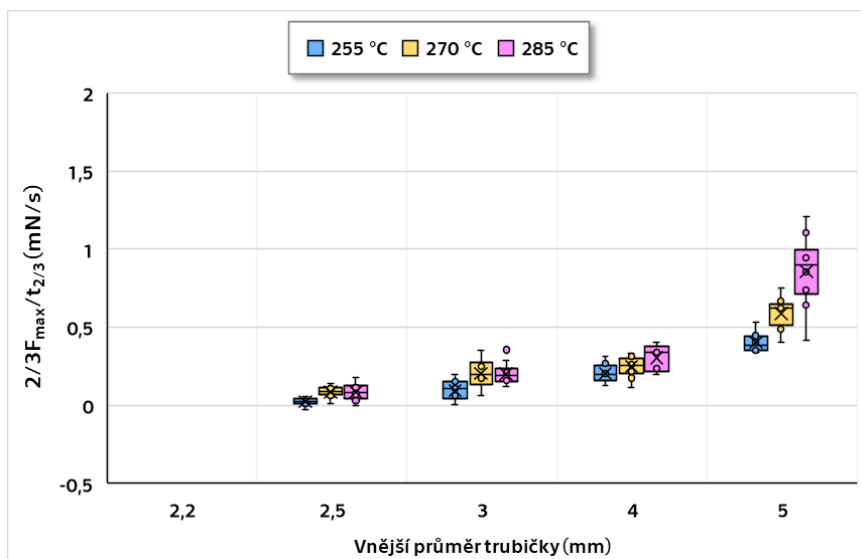
Obrázek 45. Naměřené hodnoty konečné smáčecí síly F_{end} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.



Obrázek 46. Naměřené hodnoty konečné smáčecí síly F_{end} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.

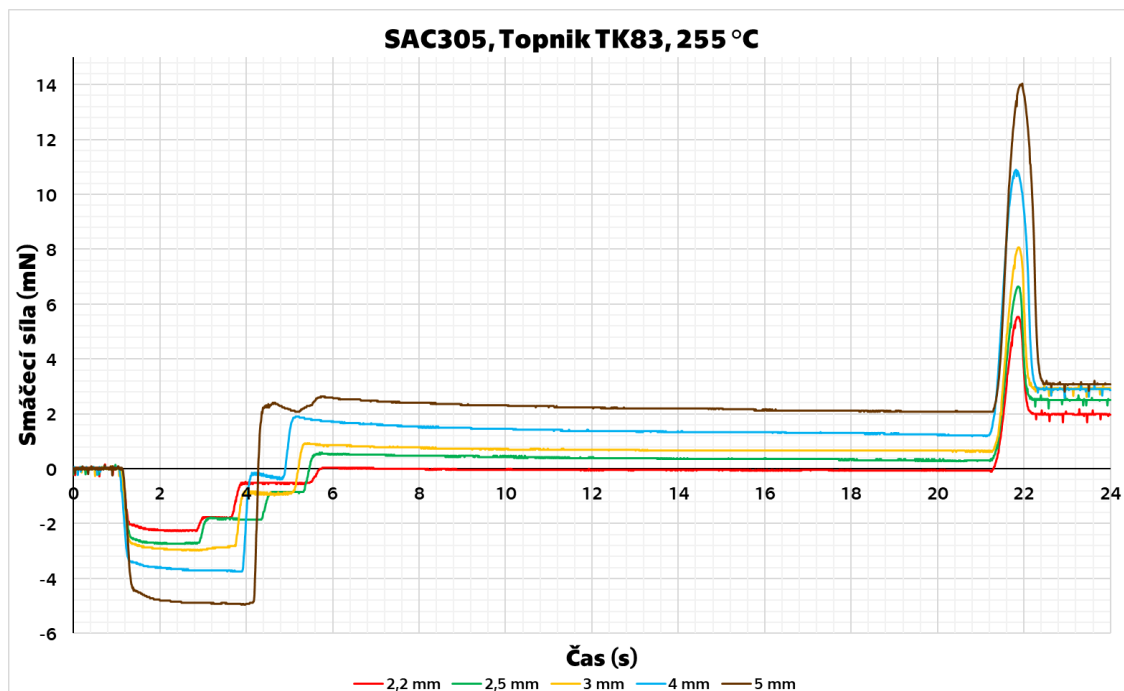


Obrázek 47. Vypočítané hodnoty rychlosti smáčení v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.

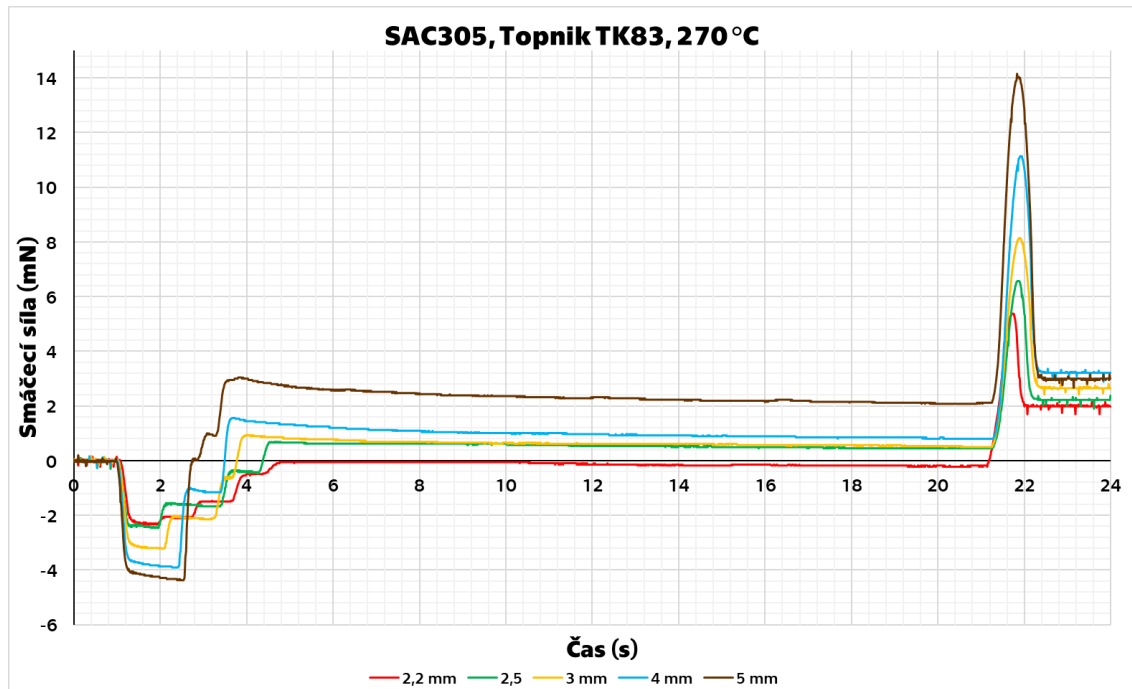


Obrázek 48. Vypočítané hodnoty rychlosti smáčení v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.

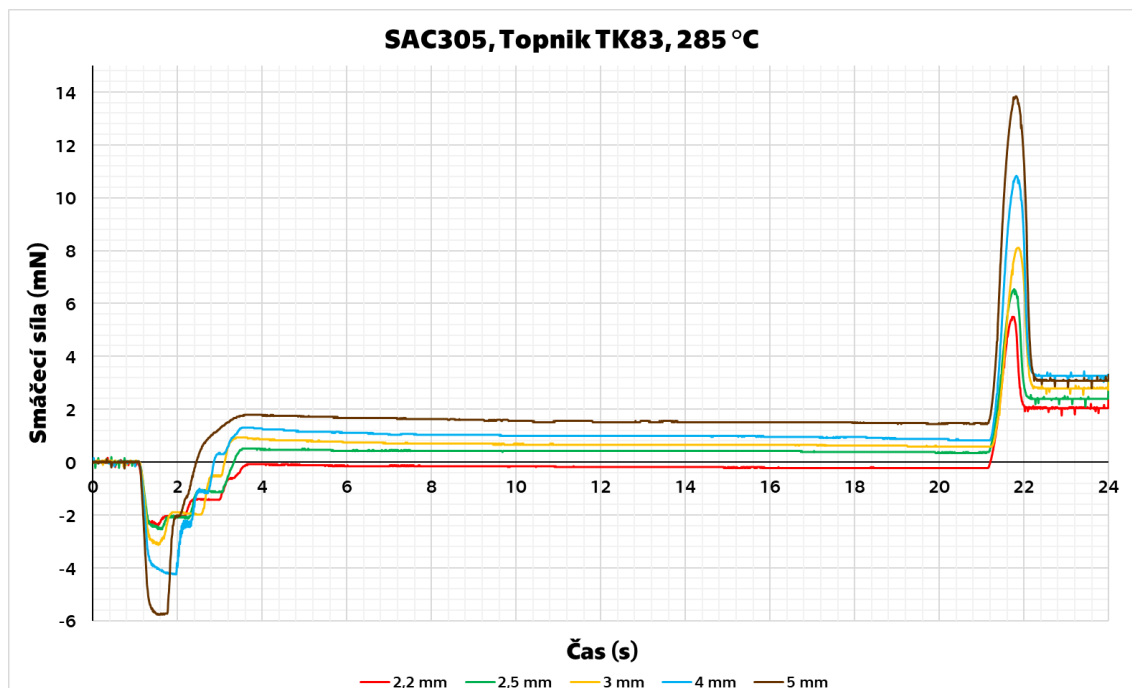
Následující Obrázky 49.–51. zobrazují charakteristické smáčecí křivky naměřené meniskografem pro jednotlivé kombinace průměrů trubiček a teplot pájecí lázně s kalafunovým tavidlem TK83. Z důvodu, že vliv tavidla není nijak velký, typické smáčecí křivky pro tavidlo TE-410 se nachází v Příloze B. na Grafech A.–C. Při pohledu na níže uvedené grafy je na první pohled zřejmý vliv průměru trubičky a při vzájemném porovnání jednotlivých obrázků je patrný vliv teploty pájecí lázně.



Obrázek 49. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 255 °C s tavidlem TK83.



Obrázek 50. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 270 °C s tavidlem TK83.

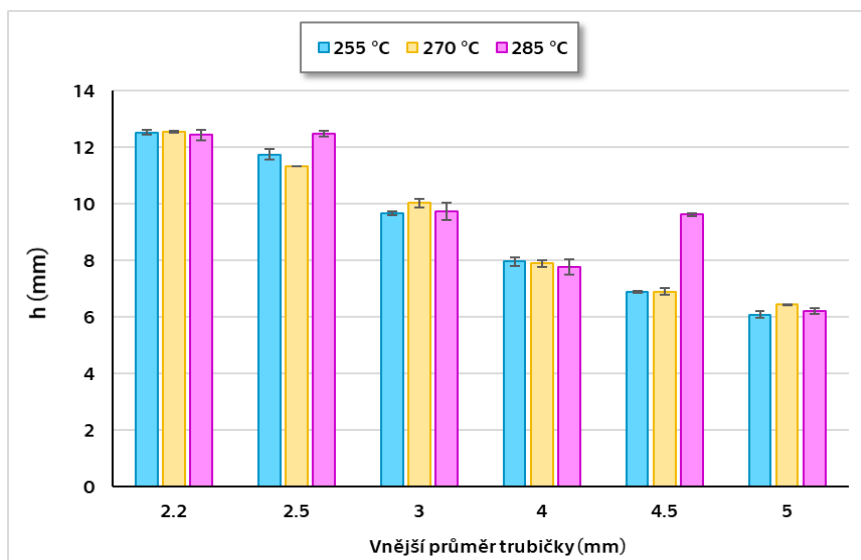


Obrázek 51. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 285 °C s tavidlem TK83.

5.3.2 Výsledky měření výšky menisku

Z časových důvodů jsem pro metalografické výbrusy a následné měření výšky vystoupaní pájky použila pouze tři trubičky od každého průměru měřené s tavidlem TE-410. Graf na Obrázku 52. znázorňuje závislost naměřené výšky h na průměru trubičky v závislosti na nastavené teplotě pájecí lázně. Na první pohled je zřejmé, že průměr trubičky hraje významnou roli, kdežto vliv teploty je zanedbatelný. Výkyvy u 2,5 mm a 4,5 mm při nastavené teplotě pájecí

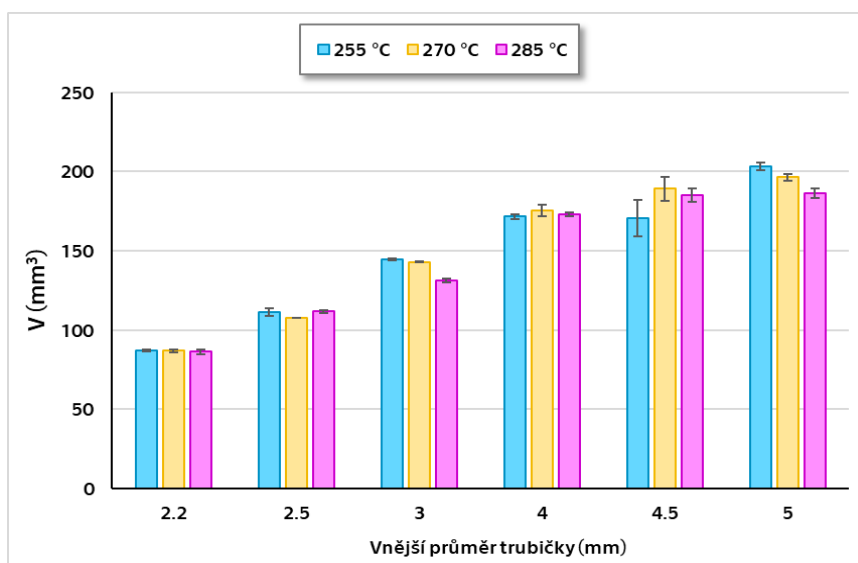
lázně 285 °C mohou být způsobeny chybou v měření na meniskografu, případně i malou odchylkou okolních podmínek během provádění experimentu.



Obrázek 52. Naměřené hodnoty výšky vystoupení pájky v trubičce v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.

5.3.3 Výsledky výpočtu objemu pájky v trubičce

Pro výpočet vyvzlínaného objemu pájky v úzkých trubičkách jsem využila rovnici (18). Pro trubičky větších průměrů, bylo nutné výpočet modifikovat o odečet objemu pájky vlivem nezanedbatelného menisku na spodní straně trubičky. Dále už neplatila podmínka $R \leq r$, bylo tedy potřeba počítat s h' a R' , nikoli již se změřenou výškou h , do které pájka během ponoru vystoupala. Sloupcový graf na Obrázku 53. zobrazuje vypočítané objemy vyvzlínané pájky v trubičkách o různých průměrech za třech teplot pájecí lázně. Při srovnání tohoto grafu s Obrázkem 45. vidíme stejné trendy, které potvrzují tvrzení, že konečná síla F_{end} je úměrná objemu pájky, který ulpěl v trubičce po jejím vynoření z lázně.



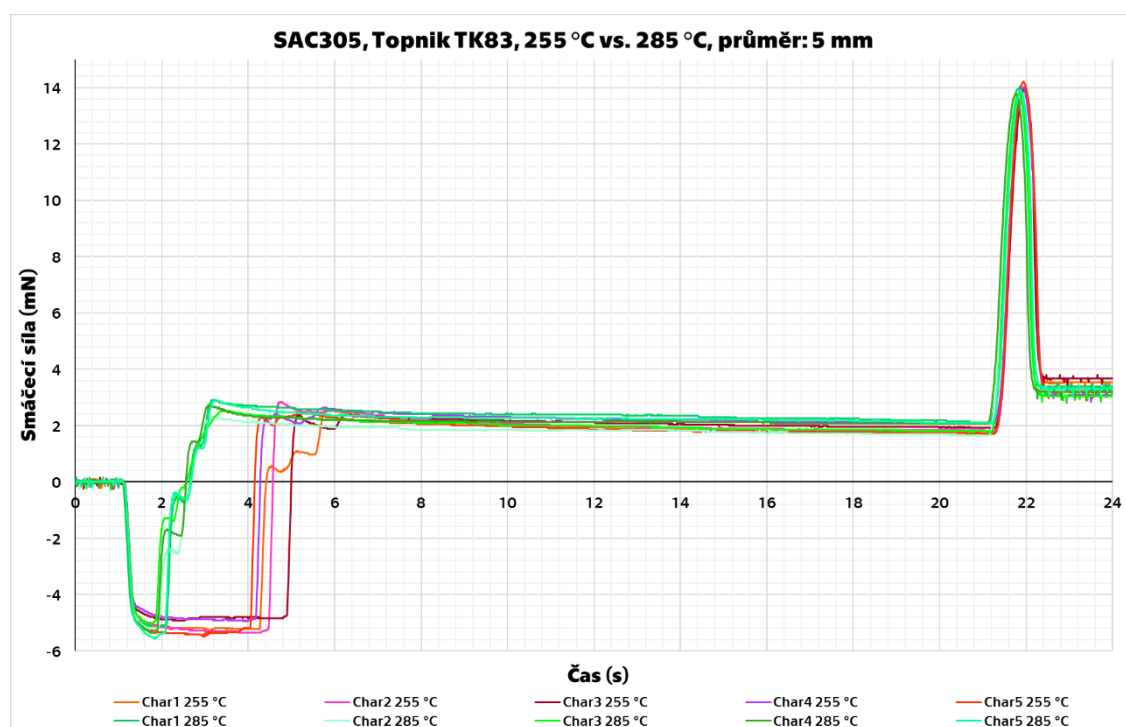
Obrázek 53. Výsledky vypočítaných objemů pájky, která ulpěla uvnitř trubičky v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.

5.4 Vyhodnocení výsledků experimentů

V následujících podkapitolách se zaměřím na detailnější popis výsledků představených v předchozí kapitole. Budu diskutovat vliv teploty pájecí lázně, průměru trubičky a tavidla na zkoumané parametry pájitelnosti slitinou SAC305.

5.4.1 Vliv teploty pájecí lázně

Z vyhodnocených průběhů je jasně patrný vliv teploty na zero-cross time t_0 (Obrázek 39. a Obrázek 40., případně z průběhů na Obrázku 49. a Obrázku 51.) a čas nesmáčení $t_{\text{non-wett}}$ (Obrázek 41. a Obrázek 42., respektive porovnáním Obrázku 49. a Obrázku 51.). Zero-cross time s vyšší teplotou lázně klesá, což je způsobeno rychlejším prohřátím pájené trubičky. Tento trend lze pozorovat u obou použitých tavidel s tím rozdílem, že pro bezkalafunové tavidlo TE-410 je pokles pro menší průměry znatelnější než pro průměry větší. Z měření trubiček o průměru 2,2 mm nejsou zaznamenána data o t_0 z toho důvodu, že smáčecí síla byla tak malá, že k protnutí časové osy ve většině případů vůbec nedošlo. Příklad takového průběhu je pro názornost uveden také v Příloze B. na Grafu D. Rychlost prohřátí, tedy teplota pájecí lázně má dominantní vliv i na čas nesmáčení. Příklad srovnání smáčecích křivek pro teploty 255 °C (zelené průběhy) a 285 °C (červené průběhy) se nachází na Obrázku 54. Ze stejného důvodu, jako klesá zero-cross time, klesá s teplotou také čas nesmáčení.



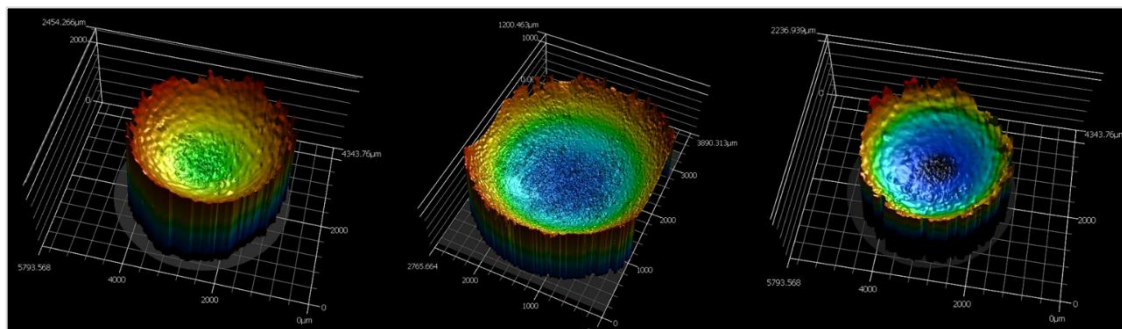
Obrázek 54. Porovnání smáčecích křivek pro trubičky o průměru 5 mm při teplotě pájecí lázně 255 °C (červené průběhy) a 285 °C (zelené průběhy) s tavidlem TK83.

Provedeným T-testem bylo zjištěno, že teplota pájecí lázně nemá žádný významný vliv na maximální ani konečnou smáčecí sílu ($p < 0,05$). To je ostatně vidět také na box-plotových grafech na Obrázku 43.–46, případně na Obrázku 54. Z důvodu, že konečná smáčecí síla

(Obrázek 45. a Obrázek 46.) koresponduje s množstvím slitiny, které v trubičce zůstalo po jejím vynoření z pájecí lázně (Obrázek 53.). Lze usuzovat, že teplota nemá vliv ani na výšku, do které slitina vystoupala. Měřením výšky vyvzlínání pájky v trubičce na metalografických výbrusech byl tento úsudek následně potvrzen (Obrázek 52.).

Co se týče vlivu teploty na rychlost smáčení, zde je ve většině případů možné pozorovat mírný nárůst s teplotou (Obrázek 47. a Obrázek 48.). Tento nárůst je dán zejména poklesem zero-cross time, který velmi koresponduje s časem dosažení $2/3F_{\max}$. Nicméně, jak ukázal T-test, pouze 50 % těchto rozdílů je statisticky významných. Pro tavidlo TE-410 je více statisticky nevýznamných změn mezi teplotami 255 °C a 270 °C než mezi 270 °C a 285 °C. Přesně naopak je tomu u tavidla TK83.

Obrázek 55. zobrazuje příklad menisků nasnímaných na konfokálním mikroskopu pro trubičky o vnějším průměru 4 mm při různých teplotách pájecí lázně. Rozdíly ve tvaru menisku se s teplotou příliš nemění. S vyšší teplotou je meniskus mírně konkávnější, tj. kontaktní úhel je pravděpodobně o něco menší. Nicméně, rozdíly nejsou tak markantní, aby se vliv teploty jakkoli projevil ve výšce vyvzlínání či objemu vyvzlínané pájecí slitiny.



Obrázek 55. Obrázky menisků 4mm trubiček nasnímaných konfokálním mikroskopem pro různé teploty lázně s tavidlem TE-410. Zleva: 255 °C, 270 °C, 285 °C.

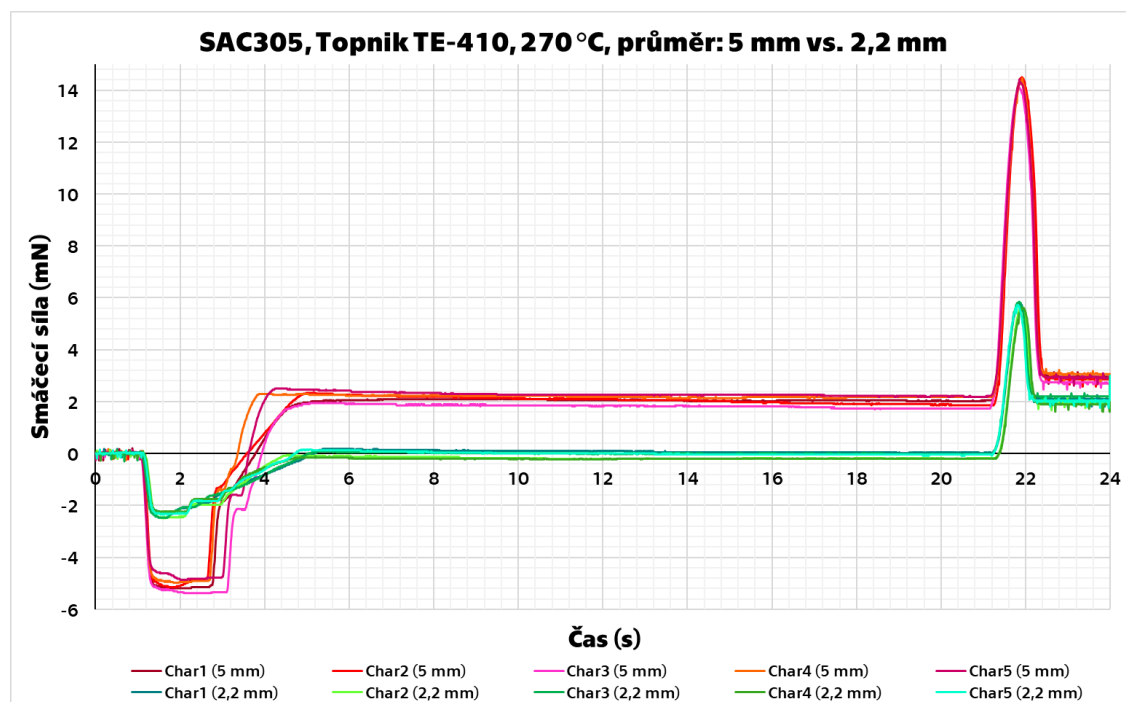
5.4.2 Vliv průměru trubičky

Průměr trubičky má zásadní vliv na všechny zkoumané parametry (Obrázky 49. –51.). Se zvětšujícím se průměrem roste maximální smáčecí síla (Obrázek 43. a Obrázek 44.). To je dáno tím, že u větších průměrů je pájkou smočena větší plocha. Zároveň v trubičce s větším průměrem vzlíná větší objem pájecí slitiny, což odpovídá i trendům konečné smáčecí síly (Obrázek 45. a Obrázek 46.). Tíhová síla této slitiny uvnitř působí v kladném směru smáčecí síly, čímž ji zvyšuje. Od 4mm průměru trubičky výše jsou však rozdíly v F_{end} již statisticky nevýznamné. Tento jev lze vysvětlit tím, že pro velké průměry je tíhová síla pájecí slitiny tak velká, že ji kapilární síly již nedokážou více vytlačit nahoru.

Vliv průměru trubičky na čas nesmáčení (Obrázek 41. a Obrázek 42.) úzce souvisí s teplotou pájecí lázně. Úzká trubička se totiž rychleji prohřeje a smáčení více pomáhají kapilární síly. Tím tedy dojde k rychlejšímu smočení. Při teplotách 255 °C a 270 °C pozorujeme tedy

s rostoucím průměrem nárůst času nesmáčení $t_{\text{non-wett}}$. 285 °C představuje již tak vysokou teplotu, že trubičky o jakémkoli průměru jsou smočeny velmi rychle, téměř okamžitě (Obrázek 51.). U tavidla TE-410 (Obrázek 41.) nastává pro 4,5mm trubičky náhlý pokles času nesmáčení v do té doby rostoucím trendu. Tento pokles však nejsem schopna fyzikálně vysvětlit. Je možné, že při přípravě trubiček nebyly dodrženy stejné podmínky, proto by pro ověření bylo dobré toto měření opakovat.

Jiná situace nastává, pokud se podíváme na trendy na Obrázku 39. a Obrázku 40. S rostoucím průměrem totiž klesá zero-cross time. Mohlo by se zdát, že to jde proti trendu popsanému v odstavci výše, kdy s rostoucím průměrem $t_{\text{non-wett}}$ roste. Vysvětlení však vyžaduje pohled na průběhy smáčecích křivek (Obrázky 49.–51., respektive Obrázek 56.). U užší trubičky (zelené průběhy) pozorujeme rychlé prvotní smočení, ale rychlost smáčení je velmi malá. Oproti tomu trubičkám s větším průměrem (červené průběhy) nějakou dobu trvá, než se prohřejí a dojde k jejich smočení. Následný nárůst smáčecí síly je ale naopak prudký, což může být dáno tím, že slitina nevyvzlíná do tak velké výšky jako v případě úzké trubičky (Obrázek 52.). Rozdíl ve výšce vyvzlínání pájky u 2,2mm a 5mm trubiček je přibližně dvojnásobný.



Obrázek 56. Porovnání smáčecích křivek pro trubičky o průměrech 2,2 mm (zelené průběhy) a 5 mm (červené průběhy) při teplotě pájecí lázně 270 °C s tavidlem TE-410.

Trendy nárůstu rychlosti smáčení s rostoucím průměrem (Obrázek 47. a Obrázek 48.) odpovídají nárůstu maximální smáčecí síly, a tedy i $2/3F_{\text{max}}$, a poklesu t_0 , respektive $t_{2/3}$. S rostoucím průměrem tedy dosahujeme $2/3F_{\text{max}}$ v kratším čase.

5.4.3 Vliv tavidla

Vliv tavidla na zkoumané parametry není z vykreslených grafů na první pohled znatelný. Nicméně, při bližším srovnání jednotlivých dvojic grafů zjistíme, že většina rozdílů zkoumaných parametrů je velmi malá. Provedený T-test následně také ukázal, že v našem měření má tavidlo statisticky nevýznamný vliv. To může být dáno výběrem tavidel, která se ve složení lišila pouze obsahem kalafuny. Obecně totiž míra aktivace tavidla má na měření vliv.

5.5 Zhodnocení použité metodiky

Provedený experiment navrženou metodikou, která simuluje měření smáčení prokovu pomocí trubiček, lze považovat za úspěšný. Experiment přinesl několik výsledků a zároveň z něj vyplývají další možná zlepšení této metodiky. Z provedeného měření lze stanovit vliv nastavené teploty pájecí lázně. Nejprve byla experimentálně testována nejnižší možná teplota pájecí lázně. Bylo zjištěno, že teplota nižší než 255 °C způsobí, že pájka je již tak málo tekutá, že vytváří krápníky a je tedy zcela nevhodná. Za optimální teplotu pájecí lázně z hlediska smáčecích vlastností a zároveň s ohledem na tepelné přetížené součástek může být považována teplota 270 °C. Tato hodnota souhlasí s teplotami využívanými v praxi pro slitinu SAC305. Experiment dále ukázal, že průměr prokovu má zásadní vliv na výsledné smáčení. Pro budoucí další měření a porovnání vlivu tavidla na smáčecí křivky bych volila jinak aktivovaná tavidla.

Všechny kroky této metodiky byly vyladěny tak, aby bylo dosaženo maximální reprodukovatelnosti celého měření. Klíčovým krokem byla výroba vhodného držáku o nízké tepelné kapacitě, který bude trubičku správně fixovat ve vodorovné poloze vůči hladině pájecí lázně a zároveň umožní unikat tavidlovým výparům během měření. Také čištění vzorků v roztoku HCl a prodlevy mezi očištěním a samotným měřením musely být unifikovány.

Ačkoli byl experiment úspěšný a podařilo se mi metodiku odladit tak, že výsledky jsou porovnatelné a opakovatelnost měření velká, metodika má jistá úskalí. Největší slabinou je vysoké množství faktorů ovlivňující celý proces – od přípravy vzorků až po samotné měření na meniskografu. Nicméně, tento fenomén je v praxi velmi častý, a proto je v procesech zavedena vysoká míra automatizace. V laboratorních podmínkách je však automatizace minimální. Z tohoto důvodu je třeba, aby sám člověk dodržoval stále stejný postup a měření pokaždé probíhalo za stejných podmínek. Další nevýhodou této metodiky je časová náročnost přípravy vzorků a vhodného držáku. Zde však vidím možnost, jak experiment zjednodušit. Katedra má v plánu pořídit nový meniskograf s laserovou detekcí ponoru. Pro tento meniskograf bude výroba držáku snazší, neboť nebude třeba zajišťovat elektricky vodivé spojení se vzorkem. Nový meniskograf zároveň umožňuje přesnější nastavení ponoru a je tedy možné, že po vyrobení patřičného držáku bude možné realizovat experiment v jeho původním návrhu s malými DPS.

Shrnutí a závěr

Motivace a cíl této práce byly rozebrány v úvodní kapitole. Stanoveným cílem byl návrh nové metodiky pro měření pájitelnosti pokovených otvorů (prokovů) DPS pomocí metody smáčecích vah. Tento cíl vychází z praktického požadavku, kdy se v současné době hodnotí pájitelnost slitiny pouze na drátku nebo kupónku daných materiálů, ačkoli pro pájení vlnou součástek skrzděrové montáže je důležitá pájitelnost nejen vývodu součástky (simulované drátkem), ale právě ona kombinace vývodu a daného prokovu.

První čtyři kapitoly přináší vhled do současné problematiky bezolovnatého pájení, často se vyskytujících chyb v pájených spojích, jakožto i přehled problematiky testovacích metod. V rešeršní části byly dále také shrnuty dosavadní poznatky z testování pájitelnosti a měření povrchového napětí.

Na rešeršní část práce navazuje část experimentální, která představuje rozsáhlou kapitolu rozdělenou na dvě oblasti. První z nich byla věnována návrhu metodiky a přípravě experimentu. Ve druhé části bylo popsáno konkrétní měření využívající navržené metodiky, ve kterém byla použita slitina SAC305 o třech různých teplotách, dvě tavidla – kalafunové a organické, a různé průměry měděných trubiček. Toto měření bylo dále vyhodnoceno z hlediska vlivu použitého tavidla, teploty pájecí lázně a průměru trubičky simulující prokov.

Provedený experiment ukázal dominantní vliv průměru prokovu na všechny zkoumané parametry pájitelnosti, kdy maximální i konečná smáčecí síla s průměrem rostou. S konečnou smáčecí silou koresponduje objem pájky, který vyvzlínal v trubičce – s průměrem tedy taktéž roste. Výška, do které slitina vyvzlínala naopak s větším průměrem klesá. Pokles s rostoucím průměrem byl také pozorován u zero-cross time, který představuje čas přechodu ze stavu nesmáčení testovaného vzorku po jeho smáčení. Posledním hodnoceným parametrem byl čas nesmáčení, který s průměrem roste. Z experimentu dále vyplynulo, že teplota pájecí lázně ovlivňuje zejména hodnocené časy, zatímco na ostatní parametry má převážně statisticky nevýznamný vliv. S rostoucí teplotou bylo možné pozorovat podobné klesající trendy u obou časů – času nesmáčení i zero-cross time. S ohledem na fakt, že zvolená tavidla byla stejně aktivovaná, lišila se pouze obsahem kalafuny, vliv tavidla v tomto experimentu nebyl prokázán.

Hlavní cíl práce, kterým bylo vytvoření unikátní a opakovatelné, do té doby neexistující metodiky měření pájitelnosti prokovů, byl splněn. Tato metodika je zajímavá zejména pro praxi a přináší nové výzvy do oblasti výzkumu pájitelnosti bezolovnatých pájecích slitin. Do budoucna bych ráda touto metodikou ověřila výkyvy v trendech s tavidlem TE-410, neboť s ohledem na trendy u měření za použití tavidla TK83 připouštím možné odchylky testovacích podmínek. Z experimentu však vyvstala další měření, která již přesahují rámec této práce. Jedná se například o experiment s trubičkou s vloženým pinem a následným porovnáním s výsledky dosaženými

v této diplomové práci. Dále také porovnání smáčecích křivek trubičky z vnější a vnitřní strany, kdy uvnitř musíme počítat s tíhou slitiny, která má bezesporu nezanedbatelný vliv. Všechna provedená i plánovaná měření jsou však časově náročná a nebylo možné je všechny do této práce zahrnout. Nicméně, touto problematikou se budu i nadále zabývat během doktorského studia na katedře elektrotechnologie, kdy se budu snažit metodiku dále vylepšit.

Seznam použité literatury

- [1] A. Pietriková, J. Ďurišin, a P. Mach, *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektrotechnike*, 1. vydání. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [2] G. Humpston a D. M. Jacobson, *Principles of Soldering*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004.
- [3] M. M. Schwartz, *Brazing*, 2. vydání. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003.
- [4] A. Sharma, „Taking a peek into the world of hand soldering“, *ElectronicsB2B*, 15. červenec 2015. <https://www.electronicb2b.com/headlines/taking-peek-world-hand-soldering/>
- [5] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*, 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [6] N.-C. Lee, *Reflow soldering processes: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [7] B. Illés, O. Krammer, a A. Geczy, *Reflow Soldering: Apparatus and Heat Transfer Processes*, 1. vydání. Elsevier, 2020.
- [8] M. Leupold, „Through-Hole Versus SMD Components“. VISHAY BCCOMPONENTS, 22. srpen 2017. [Online]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/45242/throughholevssmdcomponents.pdf>
- [9] K. Brindley, *Newnes Electronics Assembly Handbook*. Great Britain: Heinemann Newnes, 1990.
- [10] K. Mitzner, *Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor*, 1. vydání. Newnes, 2009.
- [11] S. Ganesan a M. G. Pecht, *Lead-free Electronics*. New Jersey: Wiley-Interscience publication, 2006.
- [12] F. Riley, Ed., *The Electronics Assembly Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. doi: 10.1007/978-3-662-13161-9.
- [13] „Jet wave“, *Kirsten Soldering AG*. <https://www.kirsten-soldering.ch/de/loetsystem/jet-wave/>
- [14] J. Smith, „Making Sense of Wave Soldering“, *Sierra Circuits*, 16. srpen 2021. <https://www.protoexpress.com/blog/making-sense-wave-soldering/>
- [15] D. Goval, H. Azimi, K. P. Chong, a M.-J. Lii, „Reliability of high aspect ratio plated through holes (PTH) for advanced printed circuit board (PCB) packages“, in *1997 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 35th Annual*, Denver, CO, USA, dub. 1997, s. 129–135. doi: 10.1109/RELPHY.1997.584249.
- [16] F. Su *et al.*, „On thermo-mechanical reliability of plated-through-hole (PTH)“, *Microelectronics Reliability*, roč. 52, č. 6, s. 1189–1196, čer. 2012, doi: 10.1016/j.microrel.2011.11.021.
- [17] S. Chang, R. Wang, Y. Xiang, P. Wang, a W. Shi, „Design for manufacturability of PTH solder fill in thick board with OSP finish“, in *2011 12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, Shanghai, China, srp. 2011, s. 1–8. doi: 10.1109/ICEPT.2011.6066932.
- [18] M. S. Abdul Aziz, M. Z. Abdullah, C. Y. Khor, A. Jalar, a F. Che Ani, „CFD modeling of pin shape effects on capillary flow during wave soldering“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, roč. 72, s. 400–410, kvě. 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.037.
- [19] J. Nguyen, D. Geiger, D. Rooney, a D. Shangguan, „A study of thermo-mechanical reliability of lead-free PTH solder joints“, *Soldering & Surface Mount Technology*, roč. 21, č. 2, s. 39–47, led. 2009, doi: 10.1108/09540910910947462.

- [20] E. Havia, E. Bernhardt, T. Mikkonen, H. Montonen, a M. Alatalo, „Implementation of lead-free wave soldering process“, led. 2005.
- [21] M.-C. Liao, A. Chen, T.-C. Huang, a T.-C. Luo, „The reliability evaluation of (PTH hole) negative wetting phenomena in lead free process used OSP coated PCB by using thermal cycle testing“, in *2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, Taipei, Taiwan, říj. 2010, s. 1–3. doi: 10.1109/IMPACT.2010.5699541.
- [22] M. Amagai, M. Watanabe, M. Omiya, K. Kishimoto, a T. Shibuya, „Mechanical characterization of Sn–Ag-based lead-free solders“, *Microelectronics Reliability*, roč. 42, č. 6, s. 951–966, čer. 2002, doi: 10.1016/S0026-2714(02)00017-3.
- [23] C.-H. Chen, B.-H. Lee, H.-C. Chen, C.-M. Wang, a A. T. Wu, „Interfacial Reactions of Low-Melting Sn-Bi-Ga Solder Alloy on Cu Substrate“, *Journal of Elec Materi*, roč. 45, č. 1, s. 197–202, led. 2016, doi: 10.1007/s11664-015-4142-5.
- [24] M. Sobolewski, J. Wojewoda-Budka, Z. Huber, P. Zieba, a A. Wierzbicka-Miernik, „Solder joints reliability of through hole assemblies with various land and hole design“, *Microelectronics Reliability*, roč. 125, s. 114368, říj. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114368.
- [25] M. S. Abdul Aziz *et al.*, „Implications of Adjustable Fountain Wave in Pin Through Hole Soldering Process“, *Arabian Journal for Science and Engineering*, roč. 39, č. 12, s. 9101–9111, pro. 2014, doi: 10.1007/s13369-014-1457-0.
- [26] X. Hu, Y. Li, Y. Liu, Y. Liu, a Z. Min, „Microstructure and shear strength of Sn37Pb/Cu solder joints subjected to isothermal aging“, *Microelectronics Reliability*, roč. 54, č. 8, s. 1575–1582, srp. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.04.003.
- [27] H. Xiao, X. Li, N. Liu, a Y. Yan, „Failure behavior and life prediction of through-hole solder joints under thermal cycling“, in *2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging*, srp. 2010, s. 1007–1012. doi: 10.1109/ICEPT.2010.5582627.
- [28] D. F. Susan, A. C. Kilgo, M. K. Neilsen, a P. T. Vianco, „Accelerated aging and thermal-mechanical fatigue modelling of Cu-plated through holes with partial solder filling“, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, roč. 2, č. 1/2, s. 138, 2008, doi: 10.1504/IJMSI.2008.018904.
- [29] P. Veselý, „Vliv tavidla na kvalitu povrchové montáže“, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2021.
- [30] R. Strauss, Dr.Ing, a FIM (Auth.), *SMT Soldering Handbook*, 2. vydání. Newnes, 1998.
- [31] C. Faure a J. Bath, „Lead-Free Wave Soldering“, in *Lead-Free Soldering*, J. Bath, Ed. Boston, MA: Springer US, 2007, s. 91–116. doi: 10.1007/978-0-387-68422-2_4.
- [32] „IPC J-STD-004B with Amendment 1 – Requirements for Soldering Fluxes“, IPC, USA, 2011.
- [33] „ISO 9454-1:2016 – Soft soldering fluxes — Classification and requirements — Part 1: Classification, labelling and packaging“, International Organization for Standardization, Ženeva, Švýcarsko, 2016.
- [34] E. Efsan a A. Marini, „A Review of Solder Evolution in Electronic Application“, *International Journal of Engineering*, lis. 2012.
- [35] K. Sukanuma, „Advances in lead-free electronics soldering“, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, roč. 5, č. 1, s. 55–64, led. 2001, doi: 10.1016/S1359-0286(00)00036-X.
- [36] L. Sun a L. Zhang, „Properties and Microstructures of Sn-Ag-Cu-X Lead-Free Solder Joints in Electronic Packaging“, *Advances in Materials Science and Engineering*, roč. 2015, úno. 2015, doi: 10.1155/2015/639028.

- [37] K. Kanlayasiri, M. Mongkolwongrojn, a T. Ariga, „Influence of indium addition on characteristics of Sn–0.3Ag–0.7Cu solder alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, roč. 485, č. 1, s. 225–230, říj. 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2009.06.020.
- [38] D. Q. Yu, J. Zhao, a L. Wang, „Improvement on the microstructure stability, mechanical and wetting properties of Sn–Ag–Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements", *Journal of Alloys and Compounds*, roč. 376, č. 1–2, s. 170–175, srp. 2004, doi: 10.1016/j.jallcom.2004.01.012.
- [39] K. Sweatman, T. Nishimura, a T. Fukami, „The Effects of Phosphorus in Lead-free Solders", Rosemont, zář. 2015, s. 7.
- [40] T.-K. Lee, T. R. Bieler, C.-U. Kim, a H. Ma, „Interconnection: The Joint", in *Fundamentals of Lead-Free Solder Interconnect Technology*, Boston, MA: Springer US, 2015, s. 21–50. doi: 10.1007/978-1-4614-9266-5_2.
- [41] R. M. Shalaby, „Effect of silver and indium addition on mechanical properties and indentation creep behavior of rapidly solidified Bi–Sn based lead-free solder alloys", *Materials Science and Engineering: A*, roč. 560, s. 86–95, led. 2013, doi: 10.1016/j.msea.2012.09.038.
- [42] X. Chen, F. Xue, J. Zhou, a Y. Yao, „Effect of In on microstructure, thermodynamic characteristic and mechanical properties of Sn–Bi based lead-free solder", *Journal of Alloys and Compounds*, roč. 633, s. 377–383, čer. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.01.219.
- [43] W. Dong, Y. Shi, Z. Xia, Y. Lei, a F. Guo, „Effects of Trace Amounts of Rare Earth Additions on Microstructure and Properties of Sn-Bi-Based Solder Alloy", *Journal of Electronic Materials*, roč. 37, č. 7, s. 982–991, čvc. 2008, doi: 10.1007/s11664-008-0458-8.
- [44] T.-H. Chuang a H.-F. Wu, „Effects of Ce Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Sn-58Bi Solder Joints", *Journal of Electronic Materials*, roč. 40, č. 1, s. 71–77, led. 2011, doi: 10.1007/s11664-010-1385-z.
- [45] K. J. Kubiak, M. C. T. Wilson, T. G. Mathia, a Ph. Carval, „Wettability versus roughness of engineering surfaces", *Wear*, roč. 271, č. 3, s. 523–528, čer. 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.03.029.
- [46] J. H. Lee, Y. M. Kim, J. H. Hwang, a Y.-H. Kim, „Wetting characteristics of Cu–xZn layers for Sn–3.0Ag–0.5Cu solders", *Journal of Alloys and Compounds*, roč. 567, s. 10–14, srp. 2013, doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.083.
- [47] A. M. Erer, S. Oguz, a Y. Türen, „Influence of bismuth (Bi) addition on wetting characteristics of Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy on Cu substrate", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, roč. 21, č. 6, s. 1159–1163, pro. 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.10.002.
- [48] J. Urbanek a K. Dusek, „Measurements of the solders surface tension values", in *EuroSime 2006 - 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*, Como, Italy, dub. 2006, s. 1–4. doi: 10.1109/ESIME.2006.1643983.
- [49] C. Gonçalves *et al.*, „Wetting behaviour of SAC305 solder on different substrates in high vacuum and inert atmosphere", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, roč. 26, č. 7, s. 5106–5112, čvc. 2015, doi: 10.1007/s10854-015-3037-9.
- [50] K. Dušek, „Smáčivost, povrchové napětí a jeho měření", prezentováno v kurzu B1M13MAD Kontrolní metody a testování v elektrotechnologii, Praha, 2021.
- [51] R. N. Wenzel, „Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry*, roč. 28, č. 8, s. 988–994, srp. 1936, doi: 10.1021/ie50320a024.

- [52] J. Drelich, C. Fang, a C. L. White, „Measurement of Interfacial Tension in Fluid-fluid Systems", *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, s. 15, 2002.
- [53] G. Kuznetsov, E. Borisenko, a N. Kolesnikov, „Surface tension of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te melt", *Materials Letters*, roč. 317, s. 132093, čer. 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.132093.
- [54] K. J. Mysels, „The maximum bubble pressure method of measuring surface tension, revisited", *Colloids and Surfaces*, roč. 43, č. 2, s. 241–262, led. 1990, doi: 10.1016/0166-6622(90)80291-B.
- [55] L. Bartovská a M. Šišková, „metoda oscilující kapky". https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/metody.oscilujici_kapka.html
- [56] E. I. Franses, O. A. Basaran, a C.-H. Chang, „Techniques to measure dynamic surface tension", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, roč. 1, č. 2, s. 296–303, dub. 1996, doi: 10.1016/S1359-0294(96)80018-5.
- [57] L. Bartovská a M. Šišková, „vzestup kapaliny na svislé destičce". https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/metody.elevace_na_desce.html
- [58] J. Park, U. Pasaogullari, a L. Bonville, „Wettability measurements of irregular shapes with Wilhelmy plate method", *Applied Surface Science*, roč. 427, s. 273–280, led. 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.08.186.
- [59] K. Dusek a J. Urbanek, „Surface tension measurement of the solders by non-wetting specimen", in *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2008, s. 354–357. doi: 10.1109/ISSE.2008.5276667.
- [60] P. Biocca, „Lead-free Wave Soldering: Some Insight on How to Develop a Process that Works", s. 8, bře. 2005.
- [61] AIM Global Solder Solutions, „Wave Soldering Troubleshooting Guide". 30. listopad 2020. [Online]. Dostupné z: <https://aimsolder.com/services/troubleshooting>
- [62] Epec Engineered Technologies, „Solder Flags on a Printed Circuit Board", *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/solder-flags.html>
- [63] Epec Engineered Technologies, „Wave Soldering Defects - Through-Hole and Surface Mount PCB Assembly", *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/>
- [64] B. Earl, „Common Soldering Problems", *Adafruit Learning System*, 6. září 2012. <https://learn.adafruit.com/adafruit-guide-excellent-soldering/common-problems>
- [65] R. Aspandiar, „Voids in Solder Joints", *Surface Mount Technology Association Journal*, roč. 19, č. 4, s. 55, 2018.
- [66] C.-H. Kuo, H.-H. Hua, H.-Y. Chan, T.-H. Yang, K.-S. Lin, a C.-E. Ho, „Interfacial reaction and mechanical reliability of PTH solder joints with different solder/surface finish combinations", *Microelectronics Reliability*, roč. 53, č. 12, s. 2012–2017, pro. 2013, doi: 10.1016/j.microrel.2013.03.002.
- [67] K. Zeng, R. Stierman, T.-C. Chiu, D. Edwards, K. Ano, a K. N. Tu, „Kirkendall void formation in eutectic SnPb solder joints on bare Cu and its effect on joint reliability", *Journal of Applied Physics*, roč. 97, č. 2, s. 024508, led. 2005, doi: 10.1063/1.1839637.
- [68] J.-M. Park, S.-H. Kim, M.-H. Jeong, a Y.-B. Park, „Effect of Cu–Sn intermetallic compound reactions on the Kirkendall void growth characteristics in Cu/Sn/Cu microbumps", *Japanese Journal of Applied Physics*, roč. 53, č. 5S3, s. 05HA06, kvě. 2014, doi: 10.7567/JJAP.53.05HA06.

- [69] Epec Engineered Technologies, „Solder Balls or Solder Balling on a PCB”, *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/solder-balls.html>
- [70] Epec Engineered Technologies, „Inconsistent or Poor Hole Fill on a PCB”, *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/inconsistent-or-poor-hole-fill.html>
- [71] Epec Engineered Technologies, „Poor Lead Solderability and Wetting on a PCB”, *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/poor-lead-solderability-and-wetting.html>
- [72] Epec Engineered Technologies, „Lifted Component on a Printed Circuit Board”, *Wave Soldering Defects*. <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/lifted-component.html>
- [73] P. Zhang, Y. Zhang, a Z. Sun, „Spontaneous Growth of Metal Whiskers on Surfaces of Solids: A Review”, *Journal of Materials Science & Technology*, roč. 31, č. 7, s. 675–698, čvc. 2015, doi: 10.1016/j.jmst.2015.04.001.
- [74] P. Jagtap a P. Kumar, „Whisker Growth in Sn Coatings: A Review of Current Status and Future Prospects”, *Journal of Electronic Materials*, roč. 50, č. 3, s. 735–766, bře. 2021, doi: 10.1007/s11664-020-08440-z.
- [75] K. Dušek, „Chyby v pájení”, prezentováno v kurzu B1B13PTE Perspektivní technologie v elektrotechnice, únor 2020.
- [76] J. H. Lau a N.-C. Lee, *Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints*, 1st ed. Springer Singapore; Springer, 2020.
- [77] N. Cai, J. Lin, Q. Ye, H. Wang, S. Weng, a B. W.-K. Ling, „A New IC Solder Joint Inspection Method for an Automatic Optical Inspection System Based on an Improved Visual Background Extraction Algorithm”, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, roč. 6, č. 1, s. 161–172, led. 2016, doi: 10.1109/TCPMT.2015.2501284.
- [78] K. Dušek, „Diagnostika poruch pájených spojů, kontrolní a testovací metody”, s. 41, dub. 2017.
- [79] I. Králová, A. Kadlecová, P. Veselý, a K. Dušek, „Influence of Added Phosphorus and Gallium in Lead-free Bismuth-Tin Alloys on Wetting and Intermetallic Compounds”, in *2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2021, s. 1–6. doi: 10.1109/ISSE51996.2021.9467660.
- [80] F. Song, S. W. R. Lee, K. Newman, B. Sykes, a S. Clark, „Brittle Failure Mechanism of SnAgCu and SnPb Solder Balls during High Speed Ball Shear and Cold Ball Pull Tests”, in *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference*, kvě. 2007, s. 364–372. doi: 10.1109/ECTC.2007.373824.
- [81] J. A. DeVore, „Practical quantitative solderability testing”, in *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, kvě. 1989, s. 2027–2034 roč.4. doi: 10.1109/NAECON.1989.40499.
- [82] B. Hampshire a M. Wolverton, „Solderability Testing”, in *The Mechanics of Solder Alloy Wetting and Spreading*, F. G. Yost, F. M. Hosking, a D. R. Frear, Ed. Boston, MA: Springer US, 1993, s. 9–33. doi: 10.1007/978-1-4684-1440-0_2.
- [83] S. Chellvarajoo a M. Z. Abdullah, „Investigation on nano-reinforced solder paste after reflow soldering part 1: Effects of nano-reinforced solder paste on melting, hardness, spreading rate, and wetting quality”, *Microelectronics Reliability*, roč. 84, s. 230–237, kvě. 2018, doi: 10.1016/j.microrel.2018.03.027.
- [84] K. Dusek a J. Martinek, „Image analysis of solder spread factor on different material types”, in *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2009, s. 1–4. doi: 10.1109/ISSE.2009.5207059.

- [85] K. Dušek, J. Vávra, a A. Rudajevová, „Effect of reflow technology and surface finishes of PCB on solder spreading”, in *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2013, s. 136–139. doi: 10.1109/ISSE.2013.6648230.
- [86] „IPC J-STD-005A with Amendment 1 – Requirements for Soldering Pastes”, IPC, USA, 1996.
- [87] Z. Mei, F. Hua, J. Glazer, a C. C. Key, „Low temperature soldering”, in *Twenty First IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium Proceedings 1997 IEMT Symposium*, 1997, s. 463–476. doi: 10.1109/IEMT.1997.626966.
- [88] R. A. Islam, Y. C. Chan, W. Jillek, a S. Islam, „Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders”, *Microelectronics Journal*, roč. 37, č. 8, s. 705–713, srp. 2006, doi: 10.1016/j.mejo.2005.12.010.
- [89] T. Novák a F. Steiner, „The area of spread solderability test use for roughness influence assessment”, in *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, kvě. 2010, s. 160–165. doi: 10.1109/ISSE.2010.5547277.
- [90] D.-H. Jung a J.-P. Jung, „Review of the wettability of solder with a wetting balance test for recent advanced microelectronic packaging”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, roč. 44, č. 4, s. 324–343, čvc. 2019, doi: 10.1080/10408436.2018.1490249.
- [91] K. Dušek, „Technologické vlastnosti bezolovnatých pájek”, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2008.
- [92] D. Bušek, M. Plaček, a D. Růžička, „Wetting balance test — Comparison of solder alloys wetting”, in *2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2017, s. 1–5. doi: 10.1109/ISSE.2017.8000923.
- [93] M. Miyazaki, S. Nomura, T. Takei, N. Katayama, H. Tanaka, a M. Akanuma, „Upgrading Pb-free soldering technology (2) -flow soldering”, in *Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pro. 2001, s. 1076–1078. doi: 10.1109/ECODIM.2001.992525.
- [94] S. V. Sattiraju, B. Dang, R. W. Johnson, Y. Li, J. S. Smith, a M. J. Bozack, „Wetting characteristics of Pb-free solder alloys and PWB finishes”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, roč. 25, č. 3, s. 168–184, čvc. 2002, doi: 10.1109/TEPM.2002.801651.

Seznam obrázků

Obrázek 1. Nanášení tavidla a) vlnovým dávkovačem, b) pěnovým dávkovačem. Upraveno podle [9]...	12
Obrázek 2. Nanášení tavidla pomocí a) dávkovače s rotujícím kartáčem, b) sprejovým dávkovačem. Upraveno podle [9].....	13
Obrázek 3. Typické tvary jednoduché vlny: a) jednostranná, b) oboustranná, c) rozšířená. Upraveno podle [9].....	14
Obrázek 4. Princip pájení dvojitou vlnou. Upraveno podle [9].	15
Obrázek 5. Použití horkovzdušného nože v pájecím procesu za laminární vlnou. Upraveno podle [9]. ...	15
Obrázek 6. Pájení dutou vlnou. Převzato z [5].....	15
Obrázek 7. Silové působení na povrchu tekutiny.....	20
Obrázek 8. Rovnovážný stav povrchových napětí.....	20
Obrázek 9. Princip metody kapilární elevace. Upraveno podle [52].	23
Obrázek 10. Vzestup kapaliny na svislé desce.....	23
Obrázek 11. Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky.	24
Obrázek 12. Metoda měření pomocí nesmáčivého vzorku.	25
Obrázek 13. Ilustrace vzniklých a) můstků b) krápníků. Převzato z [63].	26
Obrázek 14. Ilustrace a) Makro b) Shrinkage voidů na zapájeném pinu. Převzato z [65].	27
Obrázek 15. Kirkendallovovy voidy. Převzato z [68].....	27
Obrázek 16. Ilustrace a) Mikro-via b) Pinhole voidů. Převzato z [65].	28
Obrázek 17. Výskyt kuliček pájky vlivem prskání slitiny z vlny. Převzato z [69].	28
Obrázek 18. Ilustrace nedostatečného vyplnění prostoru prokovu. Převzato z [21].	29
Obrázek 19. Ilustrace a) Nedokonale smočeného vývodu. Převzato z [71]. b) Nadzvednutí součástky. Převzato z [72].	29
Obrázek 20. Odloupení a) slitiny od měděné pájecí plošky b) pájecí plošky od substrátu. Převzato z [31].	30
Obrázek 21. Růst cínových whiskerů. Převzato z [73].	30
Obrázek 22. Metalografický výbrus zalitý vodivou epoxidovou pryskyřicí a připravený na analýzu na elektronovém mikroskopu (SEM). Převzato z [79].	33
Obrázek 23. Schéma měření namáhání kuličky pájky stříhem.	33
Obrázek 24. Principiální schéma namáhání kuličky a) studeným, b) horkým tahem. Upraveno podle [1].	34
Obrázek 25. Schéma zařízení pro automatické řízení ponoru ponořovacího testu. Upraveno podle [82].	35
Obrázek 26. Náčrt sekvence kroků při kuličkovém testu. Upraveno podle [81].....	35
Obrázek 27. Princip testu roztékavosti.	36
Obrázek 28. Principiální schéma testování pájitelnosti metodou smáčecích vah.	37
Obrázek 29. Příklady různých tvarů smáčecích křivek. Převzato z [75].....	37
Obrázek 30. Smáčecí křivka měděného drátku změřená meniskografem se slitinou Bi58Sn42.....	38
Obrázek 31. Znázornění jednotlivých bodů na smáčecí křivce. Upraveno podle [90].	38
Obrázek 32. a) Navržená DPS pro původní experiment. b) Ukázka DPS s přilepeným pinem.	41
Obrázek 33. Trubičky použité v experimentu. Zleva průměr 2,2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 4,5 mm a 5 mm.	42
Obrázek 34. Povrch trubičky před a po očištění v HCl.....	42
Obrázek 35. Ilustrační obrázek trubičky s nanesenou nepáživou maskou.....	42
Obrázek 36. Ukázka měření výšky vystoupení pájecí slitiny v trubičce.....	43
Obrázek 37. Znázornění symbolů použitých ve výpočtu v rovnici (18).	43
Obrázek 38. a) Nákres meniskografu MK-6. b) Modifikovaný držák na uchycení testovaných trubiček.	44
Obrázek 39. Naměřené hodnoty zero-cross time t_0 v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	46
Obrázek 40. Naměřené hodnoty zero-cross time t_0 v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.....	47
Obrázek 41. Naměřené hodnoty času nesmáčení $t_{\text{non-wett}}$ v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	47
Obrázek 42. Naměřené hodnoty času nesmáčení $t_{\text{non-wett}}$ v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.	47

Obrázek 43. Naměřené hodnoty maximální smáčecí síly F_{\max} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	48
Obrázek 44. Naměřené hodnoty maximální smáčecí síly F_{\max} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.	48
Obrázek 45. Naměřené hodnoty konečné smáčecí síly F_{end} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	49
Obrázek 46. Naměřené hodnoty konečné smáčecí síly F_{end} v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.	49
Obrázek 47. Vypočítané hodnoty rychlosti smáčení v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	49
Obrázek 48. Vypočítané hodnoty rychlosti smáčení v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TK83.	50
Obrázek 49. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 255 °C s tavidlem TK83.	50
Obrázek 50. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 270 °C s tavidlem TK83.	51
Obrázek 51. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 285 °C s tavidlem TK83.	51
Obrázek 52. Naměřené hodnoty výšky vystoupení pájky v trubičce v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	52
Obrázek 53. Výsledky vypočítaných objemů pájky, která ulpěla uvnitř trubičky v závislosti na teplotě a průměru trubičky s tavidlem TE-410.	52
Obrázek 54. Porovnání smáčecích křivek pro trubičky o průměru 5 mm při teplotě pájecí lázně 255 °C (červené průběhy) a 285 °C (zelené průběhy) s tavidlem TK83.	53
Obrázek 55. Obrázky menisků 4mm trubiček nasnímaných konfokálním mikroskopem pro různé teploty lázně s tavidlem TE-410. Zleva: 255 °C, 270 °C, 285 °C.	54
Obrázek 56. Porovnání smáčecích křivek pro trubičky o průměrech 2,2 mm (zelené průběhy) a 5 mm (červené průběhy) při teplotě pájecí lázně 270 °C s tavidlem TE-410.	55

Seznam tabulek

Tabulka 1. Rozdělení tavidel dle ISO 9454-1:2016 [33].	18
Tabulka 2. Specifikace použitých tavidel pro měření pájitelnosti.	43
Tabulka 3. Nastavení parametrů meniskografu.	45

Přílohy

A. Odvození vztahu pro výpočet povrchového napětí pro nesmáčivý vzorek

Vyjdeme z rovnice (i) pro vzestup kapaliny na svislé desce, rovnice (ii) pro metodu vyvažování Wilhelmyho destičky a rovnice (iii) jakožto známého vztahu pro goniometrické funkce sinus a cosinus.

$$\sin \alpha = 1 - \frac{\Delta \rho g y^2}{2\gamma_{LG}} \quad (i)$$

$$F_{wet} = F_y - F_{vzt} = p\gamma_{LG} \cos \alpha - V\Delta \rho g \quad (ii)$$

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1 \quad (iii)$$

Z rovnice (ii) vyjádříme $\cos \alpha$ a následně umocníme. Rovněž umocníme rovnici (i) a obojí dosadíme do vztahu pro goniometrické funkce (iii).

$$1 - \frac{\Delta \rho g y^2}{\gamma_{LG}} + \frac{\Delta \rho^2 g^2 y^4}{4\gamma_{LG}^2} + \frac{(F_{wet} + V\Delta \rho g)^2}{p^2 \gamma_{LG}^2} = 1 \quad (iv)$$

Obě strany rovnice vynásobíme členem $p^2 \gamma_{LG}^2$ a vyjádříme velikost povrchového napětí slitiny.

$$\gamma_{LG} = \frac{(F_{wet} + V\Delta \rho g)^2}{\Delta \rho g y^2 p^2} + \frac{\Delta \rho^2 g^2 y^4 p^2}{4\Delta \rho g y^2 p^2} \quad (v)$$

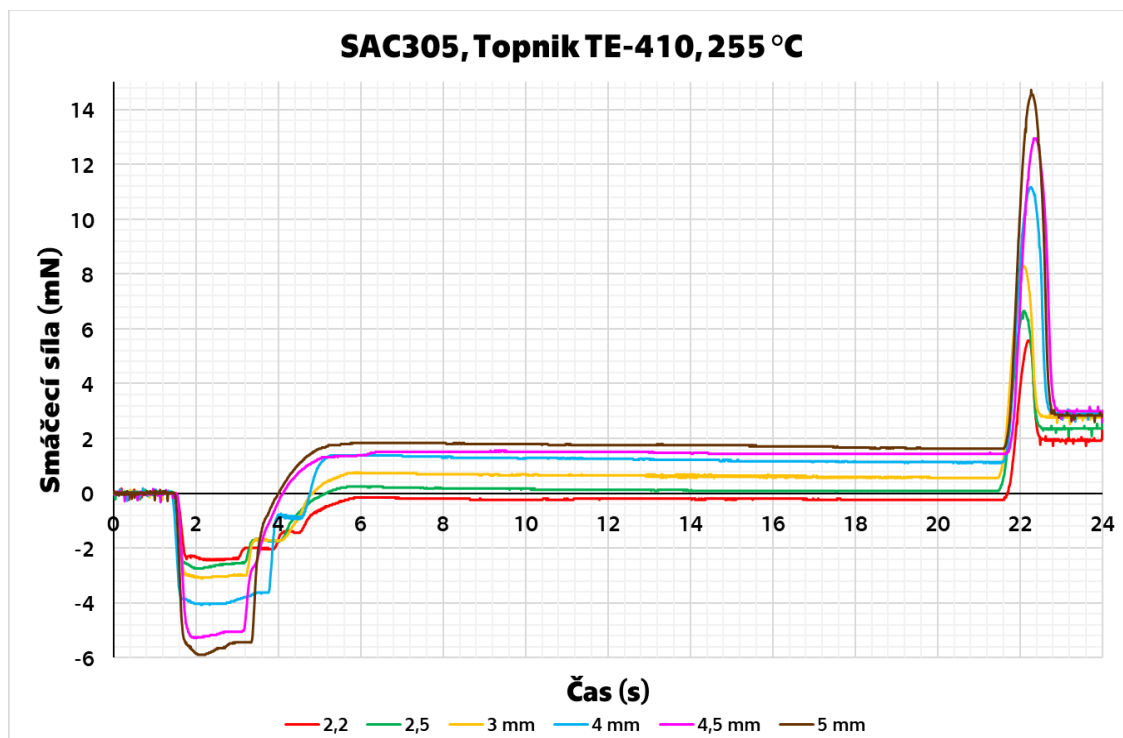
Po zkrácení dostaneme výsledný vztah (vi) pro povrchové napětí

$$\gamma_{LG} = \frac{1}{\Delta \rho g y^2 p^2} (F_{wet} + V\Delta \rho g)^2 + \frac{\Delta \rho g y^2}{4} \quad (vi)$$

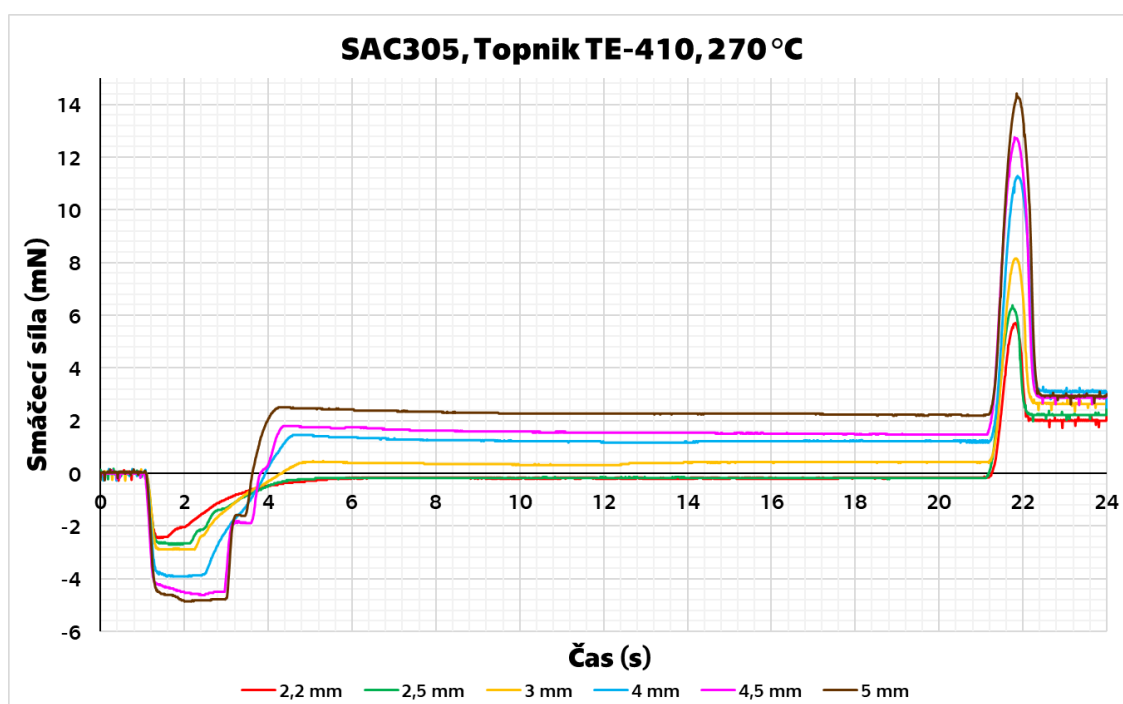
kde γ_{LG} je povrchové napětí pájky (N/m), p obvod vzorku (m), $\Delta \rho$ rozdíl hustoty kapaliny a okolní atmosféry (kg/m^3), g tíhové zrychlení (m/s^2), y hloubka ponoření (m), F_{wet} měřená smáčecí síla (N) a V objem ponořené části destičky (m^3).

B. Smáčecí křivky pro různé kombinace průměru trubičky, teploty pájecí lázně a tavidla

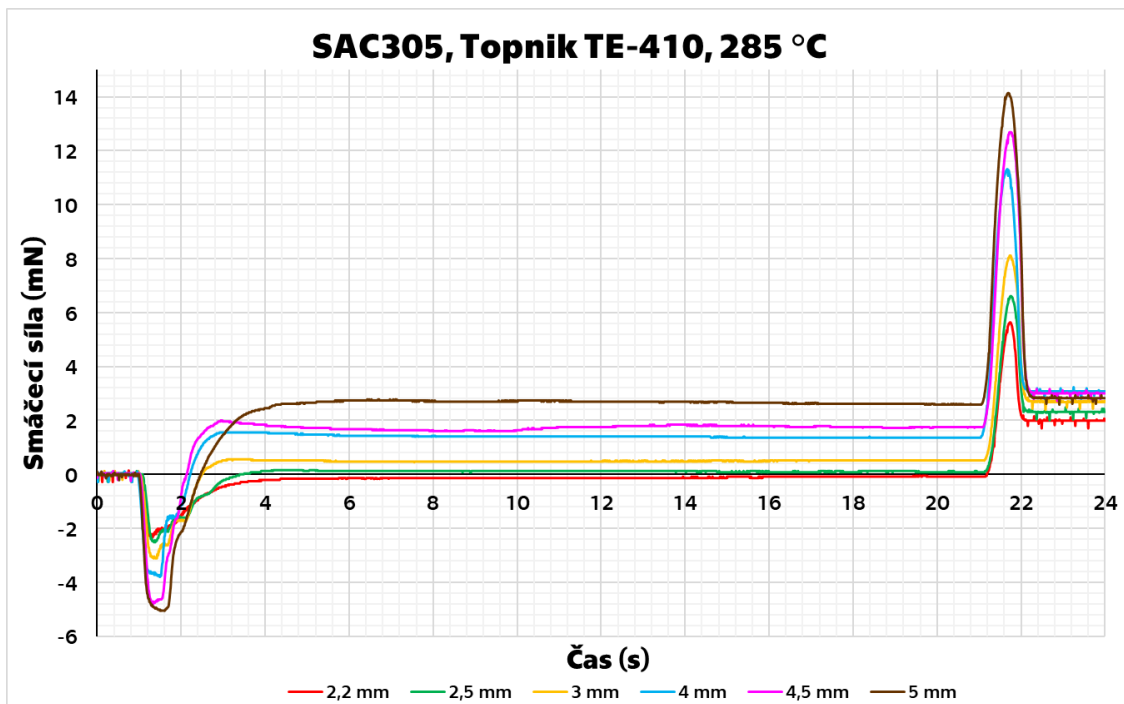
Následující grafy zobrazují smáčecí křivky naměřené na meniskografu pro různé kombinace průměru trubičky, nastavené teploty pájecí lázně a použitého tavidla. Na tyto křivky se odkazují v textu experimentální části této práce.



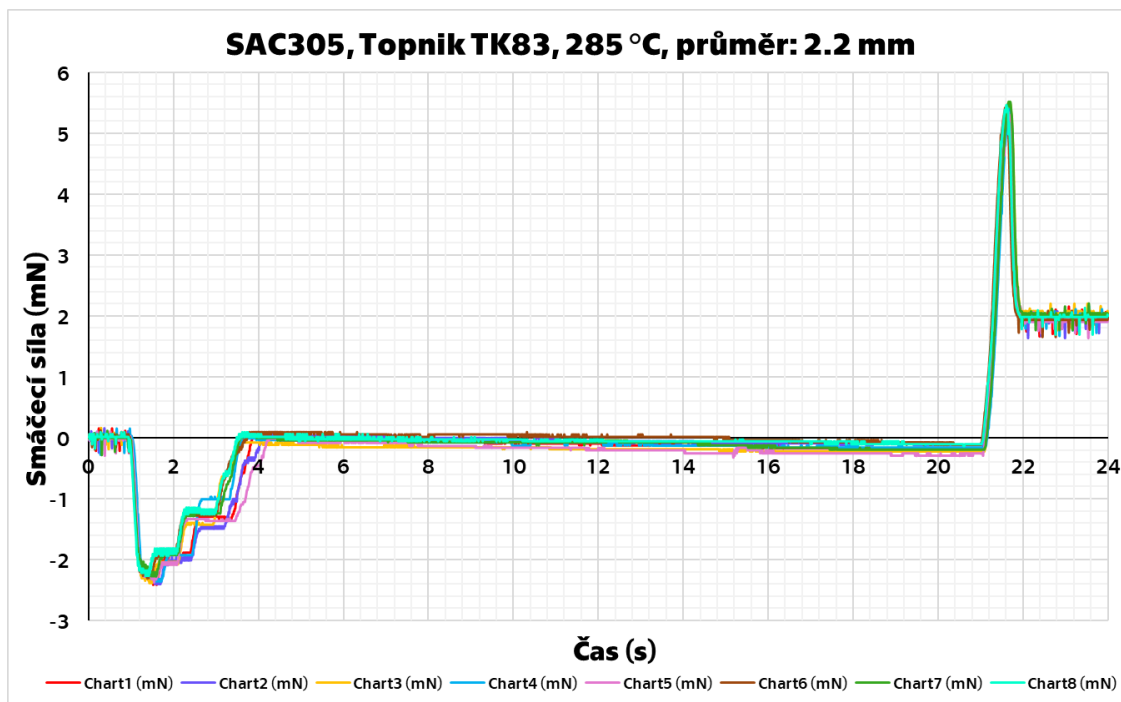
Graf A. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 255 °C s tavidlem TE-410.



Graf B. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 270 °C s tavidlem TE-410.



Graf C. Charakteristické smáčecí křivky trubiček jednotlivých průměrů při teplotě pájecí lázně 285 °C s tavidlem TE-410.



Graf D. Smáčecí křivka pro trubičku o průměru 2,2 mm při teplotě pájecí lázně 285 °C s tavidlem TK83.