



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

**Analýza termomechanických vlastností desek plošných
spojů**

**Analysis of thermomechanical properties of printed
circuit boards**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Daniel Koc

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

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

Praha, 2021/2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Koc Jméno: Daniel Osobní číslo: 460528
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrotechnologie
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Specializace: Aplikovaná elektrotechnika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza termomechanických vlastností desek plošných spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of thermomechanical properties of printed circuit boards

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií výroby desek plošných spojů a s možnými chybami, ke kterým může u desek plošných spojů docházet.
- 2) Připravte si vzorky, které zhodnotíte z pohledu termo-mechanických vlastností
- 3) Výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov 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) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: 14.09.2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 04.01.2022

Platnost zadání bakalářské práce: 19.02.2023

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

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza termomechanických vlastností desek plošných spojů** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Daniel Koc

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je přiblížit čtenáři problematiku oblasti desek plošných spojů.

Teoretická část je zaměřena na výrobní proces, povrchové úpravy, možné chyby a možnosti testování desek plošných spojů.

Praktická část zkoumá teplotní roztažnost desek v ose Z. Obsahuje rovněž popis zařízení použitého při měření, naměřená data a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova:

Deska plošných spojů, koeficient teplotní roztažnosti v ose Z, teplota skelného přechodu.

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to introduce readers to the problematics of printed circuit boards.

The theoretical part is focused on the manufacturing process, surface finishings, defects and testing options for printed circuit boards.

The practical part investigates the thermal expansion in Z-axis. It also contains utilised equipment during the measurement, measured data and its evaluation.

Key words:

Printed circuit board, Coefficient of thermal expansion in Z-axis, Glass transition temperature.

Obsah

Úvod	8
1. Deska plošných spojů	9
1.1. Substrát	9
1.1.1. Teplota skelného přechodu	10
1.2. Vodivá vrstva	11
1.2.1. Rolované temperované měděné fólie	12
1.2.2. Elektrolytické měděné fólie	13
1.3. Nepájivá maska	13
1.4. Moderní substráty	13
1.4.1. Ohebné desky plošných spojů	13
1.4.2. Desky s hliníkovým jádrem	15
1.5. Klasifikace desek plošných spojů	16
1.5.1. Jednostranné desky plošných spojů	16
1.5.2. Oboustranné desky plošných spojů	17
1.5.3. Vícevrstvé desky plošných spojů	17
1.6. Výroba	18
2. Povrchové úpravy	20
2.1. OSP (Organic Solderability Preservative)	21
2.2. ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	21
2.3. ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)	22
2.4. ImAg (Immersion Silver)	23
2.5. ImSn (Immersion Tin)	23
2.6. HASL (Hot Air Solder Leveling)	23
3. Materiály používané při montáži součástek	25
3.1. Tavidla	25
3.2. Pájecí slitiny	25
3.2.1. SnPb	26
3.2.2. Bezolovnaté pájky	26
3.3. Pájecí pasty	26
3.4. Lepidla pro povrchovou montáž	27
4. Chyby desek plošných spojů	29
4.1. Problémy s povrchovými úpravami	29
4.2. Delaminace	30
4.3. Nedostatečné drážkování (Starved Thermals)	31

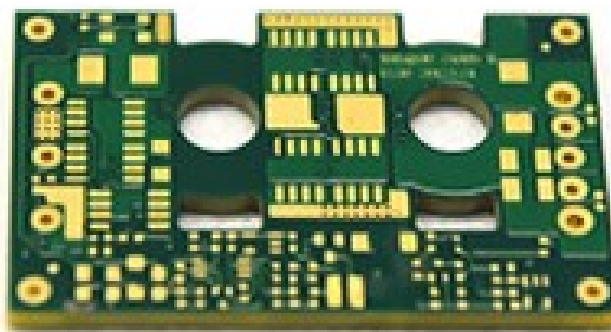
4.4.	Pad Cratering	31
4.5.	Barrel Cracking	32
4.6.	Tombstoning	33
4.7.	Warpage efekt	33
4.8.	Vlivy prostředí	34
5.	Testování desek.....	35
5.1.	Automatizovaná optická kontrola	35
5.2.	Vnitroobvodové testování (In-Circuit Testing – ‘Bed of Nails’)	35
5.3.	Flying Probe Test.....	36
5.4.	Automatizovaná rentgenová kontrola	37
5.5.	Funkčnostní test	37
5.6.	Klimatické testy	37
5.7.	Termomechanická analýza.....	38
5.8.	Dynamická mechanická analýza	39
5.9.	Ultrazvuková mikroskopie	39
6.	Praktická část	40
6.1.	Vzorky.....	41
6.2.	Popis měření.....	42
6.3.	Výsledky	45
6.4.	Vyhodnocení měření	62
7.	Závěr	67
	Použité zkratky	69
	Seznam grafů.....	70
	Obrázky	71
	Seznam vzorců.....	72
	Seznam tabulek.....	72
	Zdroje	73
	Přílohy	75

Úvod

Desky plošných spojů patří mezi nezbytnou součást dnešní elektroniky tím, že elektricky a mechanicky propojí její komponenty. Komplexní systém vodivých propojení determinuje unikátní užití každé desky a zodpovídá za funkčnost zařízení.

Z dnešního pohledu představuje deska plošných spojů tenkou desku vyrobenou zpravidla ze skleněné tkaniny, která se impregnuje mimo jiné například epoxidovou pryskyřicí a dále je potažena měděnou fólií. Používá se k mechanickému úchytu a elektrickému propojení elektronických součástek s využitím vodivých drah vyleptaných z měděných fólií laminovaných na nevodivý substrát. Na deskách plošných spojů se vyskytují rozmanité elektronické součástky jako například odpory, kondenzátory, relé, tranzistory, procesory či integrované obvody, čipy a další.

Jejich první komerční využití pochází z počátku padesátých let dvacátého století. Jejich myšlenka se však zrodila o dalších 50 let dříve. [1]



Obr. 1 – Vícevrstvá deska plošného spoje [2]

Teoretická část

1. Deska plošných spojů

Desky plošných spojů jsou zpravidla tvořeny několika vrstvami skleněné tkaniny s pryskyřicí reprezentující substrát, měděnou fólií, otvory pro osazení součástek a nepájjivou maskou.

Všechny montáže desek plošných spojů se skládají z desky a elektronických součástek na ní usazených. Desku lze rozdělit na tři základní části. Část nevodivou, tedy substrát či laminát, část vodivou sestávající z vodivých cest a část elektronických komponent připájených k desce, tedy různých čipů, konektorů, několikvrstevných keramických kondenzátorů, rezistorů a mnoha dalších.

1.1. Substrát

Základem desky plošného spoje je zpravidla neohebný arch dielektrického materiálu. Základním materiálem pro výrobu desek plošných spojů je například předimpregnovaná skleněná tkanina, ke které se přilísuje na jedné straně fólie mědi, která tvoří elektricky vodivou část plošného spoje. Můžeme se též setkat s oboustrannými variantami desek, kde se měděná vodivá vrstva nachází po obou jejích stranách.

V minulosti se využívala často papírová výplň díky své nízké ceně a jednoduchému strojnímu opracování. Nevýhodou bývala vysoká navlhavost materiálu. Skleněná vlákna oproti tomu nabyly na oblíbenosti především díky své vysoké tahové odolnosti a rozměrové stálosti. Mezi své přednosti mohou skleněná vlákna řadit vysokou odolnost vůči změnám teplot a nízkou navlhavost.

Substrát představuje kompozitní materiál, který poskytuje mechanickou oporu pro elektronické součástky. Výsledný tenký dielektrický materiál se zpravidla skládá ze zpevňovacího materiálu a pryskyřice, na který se přilísují měděné fólie, které po odleptání zajistí elektrické propojení elektronických součástek. Rozlišujeme ohebný a neohebný typ substrátu.

Pryskyřice se používají pro impregnaci zvolené dielektrické výplně. Mezi nejpoužívanější druhy patří například fenolformaldehydová nebo epoxidová pryskyřice. Obecně se jedná o syntetické materiály, a to buď reaktoplasty, či termoplasty vznikající polymerizačními procesy. Výběr pryskyřice ovlivňuje

elektrické, mechanické, chemické a teplotní charakteristiky vyrobené desky. Jednotlivé vlastnosti je tudíž nutné zvážit dle plánovaného využití dané desky.

Do epoxidových pryskyřic, které se dnes využívají nejčastěji, je možné pro některé aplikace přidávat přísady zlepšující chemickou odolnost a též umožňující vyšší teplotní namáhání substrátu. Při impregnování výplně je nutné se ujistit, že bylo dodáno dostatečné množství pryskyřice, aby došlo k úplnému vyplnění veškerých mezer v materiálu, neboť případné vnitřní prostory mohou způsobit předčasné mechanické selhání desky plošného spoje.

Nejpoužívanějším substrátem pro výrobu desek plošných spojů je v dnešní době kombinace skleněné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Tato kombinace se nazývá FR4. Teplota skelného přechodu T_g pro materiál FR4 se pohybuje typicky v rozmezí 130 až 150 °C. Desky FR4 se mohou teplotně stabilně používat přibližně v rozmezí teplot od -50 °C do 110 °C.

Pro extrémnější teplotní namáhání substrátu například v případě prodloužené doby pájení či užití při dlouhodobě působící vyšší či naopak nižší teplotě se může využít vlastností pryskyřice polyimidové. Teplota skelného přechodu přesahuje teploty potřebné pro bezolovnaté pájení. Oblast využití desek impregnovaných polyimidovými pryskyřicemi se pohybuje od -200 °C do 300 °C. [1] [3]

Předvytvrzené listy naimpregnované skleněné tkaniny se nazývají zkráceně prepregy. Prepregem se rozumí polotovar využívaný k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou jsou skleněná vlákna předimpregnovaná například epoxidovou pryskyřicí. Z prepregu se vysekávají listy požadovaných rozměrů a k jejich dotvarování a dotvrzení dochází lisováním zatepla. Pro výrobu desky se může využít i vrstva několika listů prepregu přilepených k sobě, aby se dosáhlo požadované tloušťky desky.

1.1.1. Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu označována běžně zkratkou T_g představuje teplotu, při které se deska plošného spoje přeměňuje z pevné formy do měkké, elastické. Jedná se o vlastnost zvoleného substrátu a o jednu z důležitých charakteristik desky, ke které je nutné přihlédnout dle zamýšlené aplikace a předpokládaného tepelného zatížení. Tato teplota by měla být nejméně o cca 20 °C větší nežli plánovaná teplota desky při jejím provozu.

Proces skelného přechodu patří mezi reversibilní děje. Elektrické i mechanické vlastnosti desky se po překročení teploty skelného přechodu mění.

Dochází například ke značnému navýšení koeficientu teplotní roztažnosti substrátu, což může při provozu způsobit selhání desky.

1.2. Vodivá vrstva

Nejčastěji se jedná o tenké archy mědi, které se umísťují buď mezi, nebo na listy prepregu, které zajistí spojení měděných archů se substrátem pomocí pojiv, která jsou obsažena v prepregu. Mezi jiné materiály využívané pro výrobu vodivé vrstvy patří například nikl nebo nerezová ocel. Tyto kovové fólie zodpovídají za elektrickou vodivost desky.

Vodivé cesty z těchto fólií vznikají odleptáním předem definovaného množství kovu z povrchu desky a jsou charakterizovány svou šířkou a výškou či tloušťkou. Tyto hodnoty určují množství proudu, pro který je daná cesta dimenzována.

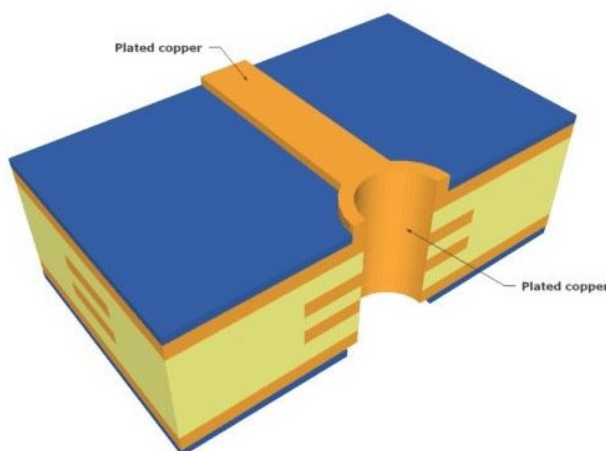
U hotových desek se můžeme setkat s přídavným plátováním. Toho je využíváno na vnějších vrstvách desek pro zvětšení tloušťky vodivé vrstvy či pro zajištění vodivého spojení mezi různými vodivými vrstvami, které se nacházejí v desce plošného spoje.

Pájecí plošky (pady) se nacházejí u desek určených pro povrchovou montáž, takzvanou SMT (*'Surface Mount Technology'*). Osazení součástky SMD (*'Surface Mount Device'*) vyžaduje plošku běžně čtvercového, nebo obdélníkového tvaru, na kterou se součástka připájí, či přilepí elektricky vodivým lepidlem. Velikost a tvar této plošky záleží na součástce, pro kterou je daná ploška určena. Většina výrobců součástek dodává informace o velikosti těchto pájecích plošek ke svým vyráběným součástkám.

Dalším možným typem montáže je takzvaná THT (*'Through-Hole Technology'*). THT montáží se osazují součástky s vývody. V minulosti se využívaly neprokožené díry, se kterými jsme se setkávali u jednostranných či u oboustranných desek plošných spojů. V dnešní době se setkáváme spíše s vícevrstevnými deskami, které využívají takzvaných prokovů. Pro spojování různých vrstev v rámci desky plošného spoje se používá výraz vias. Prokovy představují vyvrtané díry v desce, které před samotným dokončením výroby desky plošného spoje prošly depozicí mědi a jsou případně vybaveny i dalšími povrchovými úpravami.

Důvody pro prokovení otvorů jsou především podpora vnějších osazovacích míst umožňující zmenšení měděných plošek v okolí otvorů, lepší odvod tepla při pájení a elektrické propojení vnějších vodivých vrstev. V neposlední řadě se jedná o nezbytnou úpravu pro propojení vnitřních vodivých vrstev u vícevrstevných desek

plošných spojů. Prokovy se nenacházejí pouze u desek plošných spojů s THT montáží, ale i u těch s SMT montáží.



Obr. 2 – Prokov [4]

Kvalita desek plošných spojů do vysoké míry závisí na vlastnostech měděné vrstvy. I díky tomu se klade důraz na vysoký standard kvality používaných měděných fólií. Množství užité mědi se měří při výrobě v uncích na stopu čtvereční. Tloušťka mědi odpovídající jedné unci na stopu čtvereční je 35 μm . U hmotnosti mědi se pracuje s tolerančním rozmezím $\pm 10\%$. Měděné fólie se skladují ve velkých rolích vážících 136 až 181 kg. Tyto fólie by neměly obsahovat bublinky, štěrby, díry či škrábance. Fólie bývají dostupné ve dvou formách, a to buď jako rolované temperované měděné fólie, či elektrolytické měděné fólie. [1]

1.2.1. Rolované temperované měděné fólie

Tyto fólie se vyrábí tavením elektrolyticky tvářené měděné katody do tvaru velkých slitků. Tyto slitky se za tepla rolují ve speciálně navržených rolovacích mlýnech a žíhají se pro získání velkých rolí měděné fólie. Je možné získat role o šířce od 635 mm do 965 mm a čistota mědi dosahuje 99,9 %.

Takto vyhotovené měděné fólie se využívají u desek plošných spojů pro jejich pružnost při opracovávání. Mezi nevýhody těchto fólií řadíme například omezenou šířku, špatnou pájitelnost, adhezní a tažné vlastnosti způsobené deformacemi vzniklých struktur při přetavení. Pokud došlo k výrobě role mědi při vysoké teplotě, výsledný produkt též nazýváme *'High Temperature Elongator'* fólie. Tyto fólie se pak vyznačují vysokou tažností a tím umožňují své využití v některých mikrovlnných aplikacích. [1]

1.2.2. Elektrolytické měděné fólie

Elektrolytické měděné fólie se vyrábějí metodou elektrolytického pokovování. V nádrži modré skalice se nachází měděná anoda a rotující buben z nerezové oceli. Díky nízké přilnavosti mědi na buben se snadno odloupne vzniklá vrstva mědi. Čistota takto vyrobené mědi je přibližně 99,5 % a je možné dosáhnout šířky až 1970 mm. [1]

1.3. Nepájivá maska

Nepájivá maska představuje materiál, kterým se pokrývá deska, aby chránil desku před okolním prostředím, elektricky ji izoloval, bránil vzniku zkratů, chránil osazené součástky na desce a chránil desku před vznikajícím teplem na osazených součástkách. Dále také určuje barvu desky.



Obr. 3 – Různé barvy nepájivých masek [5]

1.4. Moderní substráty

Rychlý vývoj elektroniky vyžaduje hledání odpovědí a chytrých řešení problémů, které nejdou jednoduše vyřešit staršími modely desek plošných spojů. V této kapitole se proto zmíním o dvou novinkách posledních let, které nabízejí elegantní řešení pro některé speciální aplikace.

1.4.1. Ohebné desky plošných spojů

Mezi novinky ve světě desek plošných spojů patří ohebné desky. Jejich použití započalo na přelomu tisíciletí například v kosmickém či armádním průmyslu.

V dnešní době se s těmito deskami plošných spojů můžeme setkat mimo jiné u chytrých telefonů, LCD televizí, počítačů či chytrých hodinek.

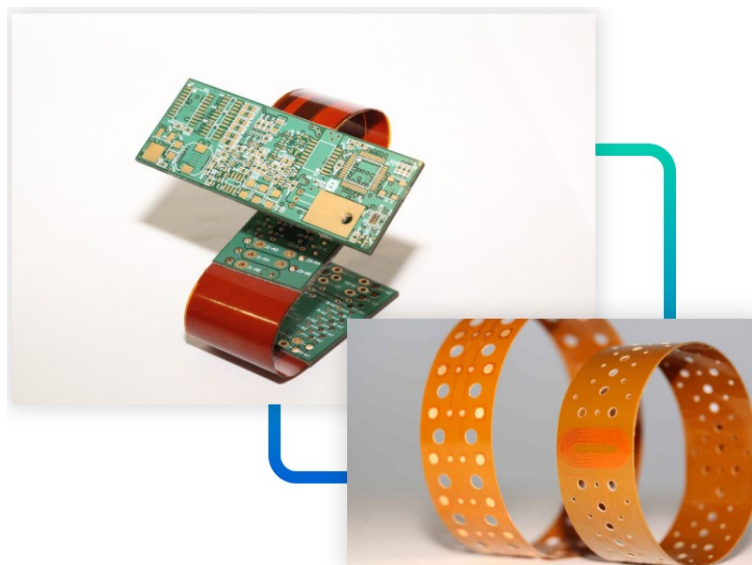
Výhodou používání ohebných desek je především zjednodušení instalace tím, že je možné desku plošných spojů natvarovat tak, aby co nejlépe vyhovovala svému umístění v elektronice. Jejich ohýbání či rotace nepoškodí obvod. Tuto ohebnost zaručuje speciální materiál použitý pro výrobu substrátu. Mezi materiály používané pro výrobu těchto substrátů patří polyimid či průhledný a vodivý polyester.

Další výhodou ohebných desek plošných spojů oproti pevným deskám je fakt, že jsou vyráběny z lehčích materiálů a nejsou tolik náchylné na vibrace při svém využívání. Nevýhodou představuje možnost méně hustého osazení oproti běžným pevným deskám plošných spojů.

Ohebné desky plošných spojů mohou mít navíc krycí vrstvu, která má za úkol ochránit vnější části obvodu před poškozením. Tato krycí vrstva je podobná nepájlivé masce u pevných desek plošných spojů. Krycí vrstva může být například polyimidová fólie, která se lepí k desce pomocí speciálního lepidla.

Výrobními náklady se od běžných desek plošných spojů příliš neliší, avšak díky svým vlastnostem a možnostem specifického užití se jejich cena může pohybovat trochu výše.

Mezi novinky posledních let patří kombinované desky plošných spojů, které se pyšní výhodami obou typů desek, a to jak ohebných, tak pevných. Ke spojení ohebných částí s pevnými částmi se mohou využívat například i prokovy, a to v případě nutnosti jak mechanického, tak elektrického propojení spojovaných pevných částí. Výhoda klasické desky plošného spoje spočívá ve skutečnosti, že ji lze hustěji osadit a zaručuje kvalitní mechanickou oporu součástek. Ohebné části slouží k propojení pevných částí. Tyto desky plošných spojů nalézají své uplatnění v aplikacích, kdy by se klasická deska plošného spoje potřebných rozměrů nevešla do určeného prostoru.



Obr. 4 – Ohebná deska plošného spoje [6]

1.4.2. Desky s hliníkovým jádrem

Dalším typem desek plošných spojů jsou desky s kovovým jádrem. U těchto desek se jako substrát používá hliníkový list, který se pokrývá dielektrickým materiálem. Běžně se na těchto deskách využívají prokovy.

Hlavní výhodou desky s hliníkovým jádrem spočívá ve výborné teplotní vodivosti. Díky kvalitnímu odvodu tepla od součástek je možné tyto desky velmi hustě osazovat a využít je tak u výkonových obvodů. Teplo se přenáší dielektrickou vrstvou do vrstvy hliníku, která toto teplo efektivně rozptýlí. Hliník z již vyřazených desek je možné znovu použít, což znamená, že desky s hliníkovým jádrem jsou rovněž přátelské k životnímu prostředí. Jelikož jádrem je kov, tyto desky vyčnívají i svou životností a menší poruchovostí způsobenou mechanickými otřesy jak při používání, tak při výrobě. Tyto desky jsou dále lehčí ve srovnání s deskami plošných spojů s běžně používaným substrátem ze skelných vláken a pryskyřice.

Mezi nevýhody desek s hliníkovým jádrem patří jejich cena. Z důvodu vyšší ceny tyto desky nacházejí své užití výhradně u výkonových součástek a velice hustě osazených desek, kdy je zapotřebí zajistit lepší odvod tepla, než může zajistit běžná deska.

Desky lze mírně tvarovat, aby se vešly do menších prostorů. S funkcí tvarovatelnosti však přicházíme o jejich pevnost a deska hůře snáší mechanické otřesy způsobené používáním zařízení či jeho přesunem.

Jelikož LED (*Light-Emitting Diode*) generují velké množství tepla, desky plošných spojů s hliníkovým jádrem jsou ideálním kandidátem pro tento typ obvodů. Dále se s těmito deskami můžeme setkat u rozličných druhů zesilovačů jako například audio nebo vysokofrekvenčních zesilovačů. Další využití mohou najít u základních desek počítačů či různých vypínačů.

1.5. Klasifikace desek plošných spojů

Desky plošných spojů se rozdělují dle různých kritérií. V minulosti se desky rozdělovaly do tří skupin dle jejich použití a aplikací. Jednalo se o dělení na desky pro běžné užití, profesionální užití a na desky s vysokou spolehlivostí.

S běžnými deskami plošných spojů se dalo setkat například v rádiích, televizích či měřicích zařízeních. Tyto desky se vyráběly z levnějších materiálů a podléhaly vyšší toleranci pro výrobce umožňující levnější masovou výrobu.

Profesionální desky využívaly kvalitnějších materiálů a měly přísnější požadavky na elektrické a ekologické standardy oproti deskám pro běžné užití. Desky s vyšší spolehlivostí se používaly ve strategických aplikacích a měly poskytovat nejlepší elektrické vlastnosti. Proto se vyráběly z nejkvalitnějších materiálů a bylo zde nutné dodržet nejvyšší standardy na přesnosti měření.

V dnešní době se rozdělení na běžné a profesionální desky vytrácí. Elektronika denního užití totiž vyžaduje vyšší úroveň provedení kvůli své vzrůstající komplexnosti a vyšším požadavkům na spolehlivost, než tomu bylo v minulosti.

Nejpřirozenější dělení desek představuje tedy počet jejich vodivých vrstev.

1.5.1. Jednostranné desky plošných spojů

Na tomto typu desek se nalézají vodivé cesty pouze na jedné straně izolačního substrátu. Musíme rozlišit případ desek THT montáže, kde je jedna strana s vodivými propojeními určena k pájení a druhá strana k osazení součástek, a dále případ desek montáže SMT, kde se součástky nacházejí na stejné straně jako vodivá vrstva. Tyto desky se používají pro jednodušší obvody a vyznačují se především nižšími pořizovacími náklady. V dnešní době tyto desky již nemají valné komerční využití.

Při výrobě se využívá metod 'tisku a leptání' (*print and etch*) a 'ražení a vyříznutí' (*die cut*), kdy vodivá cesta je přímo na předpřipraveném lisu.

1.5.2. Oboustranné desky plošných spojů

Oboustranné desky se vyznačují vodivou cestou po obou stranách izolačního substrátu. Oboustranné desky dále rozdělujeme na desky s prokovy a desky bez prokovů. V dnešní době se již desky bez prokovů příliš nepoužívají a téměř výhradně se setkáváme v případě oboustranných desek s prokovy.

Použití prokovů na deskách plošných spojů se dnes rozmáhá především z důvodu umožnění realizace komplikovanějších návrhů obvodů s hustším osazením součástek, kde se tyto součástky používají po obou stranách desky. Desky bez prokovů pak oproti tomu představovaly pouze rozšíření desek jednostranných.

1.5.3. Vícevrstvé desky plošných spojů

Vývoj oboustranných desek s prokovy vedl k možnosti zhuštění vodivých cest a osazení součástek, a tím i zmenšení rozměrů desek plošných spojů. Další vývoj desek pak představují vícevrstvé desky, u kterých se vodivé vrstvy nacházejí uvnitř izolačního substrátu, což umožnilo další postup v miniaturizaci desek. Tyto desky se využívají především tehdy, kdy běžné jednostranné či oboustranné desky již neumožňují realizaci návrhu desky v daných rozměrech, neboť s narůstající hustotou vodivých cest dochází k šumu, přeslechům a nepřípustným napěťovým poklesům.

Pro výrobu vícevrstvých desek se používá více vrstev prepregu. Mezi listy prepregu se vkládají vodivé cesty z mědi tvořící následně vnitřní vodivou strukturu desky. Elektrický obvod je dokončen pomocí prokovů, které propojují různé vodivé vrstvy v desce. Zavedení vícevrstvé technologie nejen zmenšilo celkové rozměry desek, ale taktéž snížilo jejich hmotnost.

Díky hromadnému vývoji laminačních technologií je dnes složitost výroby čtyřvrstvých či šestivrstvých desek srovnatelná s výrobou desek dvouvrstvých. S ohledem na spolehlivost a klesající pořizovací náklady se navíc vícevrstvé desky začínají rozšiřovat i mimo technologické novinky a využívají se v běžných aplikacích například v rámci hračkářského průmyslu či zábavní elektroniky.

1.6. Výroba

Před samotným započítím výroby je nutné si připravit rozvržení a design desky, a to zpravidla ve virtuálním prostředí. Po zkontrolování návrhu a jeho případných úpravách přichází na řadu vytvoření negativů jednotlivých vrstev desky včetně nepájivých masek. Negativy v dnešní době vznikají mimo jiné na speciálních laserových tiskárnách, kterým se říká "plottery". Například oboustranná deska vyžaduje čtveřici negativů – dva pro měděné vrstvy, dva pro nepájivé masky. Aby bylo dosaženo perfektní shody překrytí všech archů, vytváření děr probíhá při překrytí na všech arších zároveň. Tyto archy tedy určují, kudy povedou vodivá spojení na desce.

Následujícím krokem začíná výroba samotné desky plošného spoje. Nejdříve je nutné vytvořit substrát, který sestává například z epoxidové pryskyřice a předimpregnované skleněné tkaniny. Tento substrát, nazývaný FR4, nadále slouží jako základ samotné desky a využívá se pro mechanické propojení součástek. Na očištěný substrát se přiliskují měděné fólie. V průběhu celého výrobního procesu je důležité udržovat desku v dekontaminovaném prostředí, neboť i prach zvyšuje pravděpodobnost neúspěšného zkompletování funkční desky.

Proces výroby desky pokračuje fotolitografií. Na přiliskované archy mědi se usadí fotorezist, který je osvětlen ultrafialovým světlem na místech, kde si přejeme dle návrhu ponechat vodivá propojení. Takto osvětlená část desky se stává nerozpustnou ve vývojce. Po ukončení procesu osvětlování se deska omyje ve vývojce, čímž je odstraněn neosvětlený fotorezist. Následuje proces sušení.

Dále je nutné odstranit nadbytečnou vrstvu mědi procesem leptání za pomoci speciálních leptadel určených pro měď. Po odstranění nadbytečné mědi a očištění desky od chemikálií následuje část stripování. Fotorezist lze odstranit například sprchováním horkou vodou, do které přidáme 1 % ethanolu. Po odstranění zbylého fotorezistu na substrátu zůstanou pouze požadovaná vodivá propojení. V tuto chvíli je nutné přesné usazení a spojení všech potřebných vrstev desky plošného spoje, neboť po jejich propojení již nebude možné případné nesrovnalosti opravit. Po usazení desek dojde k jejich slisování.

Následuje proces navrtávání desky. Po navrtání všech potřebných otvorů se odstraní přebytečná měď. Další krok při výrobě desek představuje plátování a depozice mědi. V průběhu plátování a depozice mědi, kdy se destička ponořuje do van s různými roztoky, dojde k pokrytí desky tenkou vrstvičkou mědi. Především však dojde k prokovení vyvrtaných děr v desce. V tuto chvíli jsou připravené prokovy, díky kterým se elektricky propojí vnitřní vrstvy, pokud jsou přítomny, a obě povrchové

vrstvy. Dále je nutné zopakovat dříve zmíněný proces fotolitografie, při kterém se vytvoří na vnějších vrstvách vodivé cesty. Po dokončení leptání a řádném očištění je deska připravena pro aplikaci nepájivé masky. Po aplikaci nepájivé masky je nutné desku zahřát v peci, aby se ošetřila nově nanesená vrstva.

Takto upravenou desku obvykle dokončíme aplikací některé z možných povrchových úprav, mezi něž patří například HASL, OSP či ENIG. Před expedicí takto zhotovené desky následují elektrické testy. Tyto testy se provádějí u každé desky, aby se výrobce ujistil, že daná deska vykazuje správné hodnoty a hlavně že vyhovuje zákazníkům zadaným parametrům.

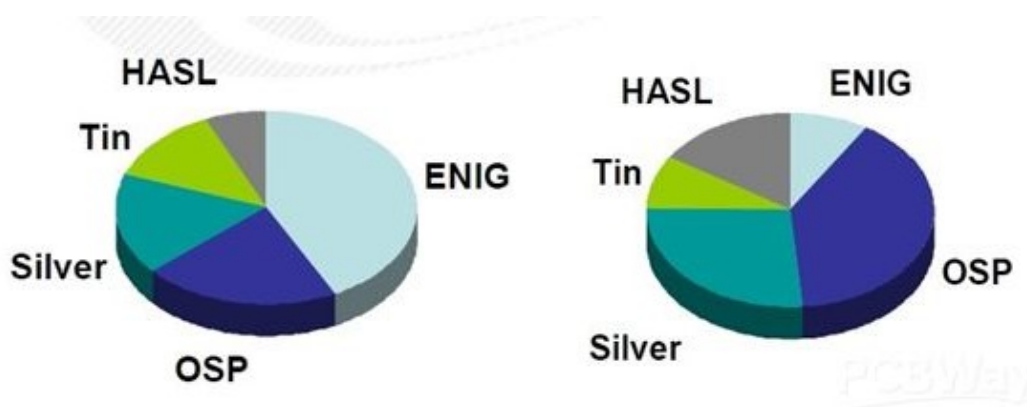
2. Povrchové úpravy

Správná volba povrchové úpravy desky plošného spoje je velmi důležitá. Povrchové úpravy ovlivňují vlastnosti desek jako jejich životnost, snižují zmetkovitost při kompletaci, zvyšují spolehlivost desek a možnost jejich využití pro různé úrovně jak teplotního, tak mechanického namáhání. Různé povrchové úpravy dále mají vliv na cenu výsledného produktu a také na možnou dobu skladování desek plošných spojů před osazením. Stejně jako u pájení se odvracíme od povrchových úprav, které při procesu výroby využívají olova. Špatnou volbou povrchové úpravy pro danou aplikaci může dojít ke zničení desky a nutnosti její výměny. Proto by neměla být volba povrchové úpravy brána na lehkou váhu a vyžaduje pečlivý výběr pro danou aplikaci.

Nové přístupy k pájení nastupující po éře cín-olovnaté pájky SnPb vyžadují vyšší teplotu při procesu pájení, což více zatěžuje desku zejména teplotně. To vytyčuje nové nutné vlastnosti, které musí povrchová úprava splňovat, aby nedošlo k narušení vodivých cest při pájecím procesu.

Povrchové úpravy prošly rychlým vývojem, aby vyhovely potřebám moderní techniky, která vyžaduje stále lehčí, rychlejší a menší výrobky.

Každá povrchová úprava má svá pro a proti, která ovlivňují smáčivost, spolehlivost, životnost či náročnost výroby. Mezi dnes nejpoužívanější úpravy patří OSP, ENIG, ENEPIG, ImAg, ImSn a HASL. V dnešní době se vyvíjejí moderní typy povrchových úprav založené například na nanočásticích.



**Obr. 5 – Vlevo: podíl použití materiálů
Vpravo: podíl oblasti použití daných úprav [7]**

2.1. OSP (Organic Solderability Preservative)

OSP vytváří velice tenkou vrstvičku organického povlaku na desce. Tento povlak se vstřebá a vytvoří ochrannou vrstvičku zabraňující oxidaci mědi. Některé typy OSP vyžadují dusíkovou atmosféru při montáži. Dnešní verze OSP již vydrží vyšší teploty při montáži, tedy umožňuje využití bezolovnatých pájek.

Mezi výhody OSP patří nízká cena, nenáročnost pro životní prostředí, v případě nutnosti možnost přepájení, použitelnost při povrchové montáži a absence olova při výrobě.

Mezi hlavní nevýhody lze řadit nedostatečnou kompatibilitu při použití THT metody osazování, především pak u prokovů, krátkou životnost vrstvy (ne více než 6 měsíců), nesnadnou kontrolu vrstvy pro svou průsvitnost a bezbarvost, či náchylnost na mechanické poškození.

Aplikace vrstev OSP se skládá ze tří kroků: důkladného vyčištění povrchu desky od všech nečistot, mezi něž mohou patřit například zbytky oleje, otisky prstů či zoxidovaný povrch desky, následného vylepšení povrchu pro zlepšení přilnavosti vrstvy OSP k odkrytým měděným cestám, a to mikroleptáním způsobujícím redukci oxidů vznikajících na povrchu mědi, a finálního deionizačního sprchování, kdy před nanesením OSP vrstvy vystavíme roztok OSP působení iontů tak, aby mohlo dojít k jeho snadnému odstranění při pájení.

2.2. ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

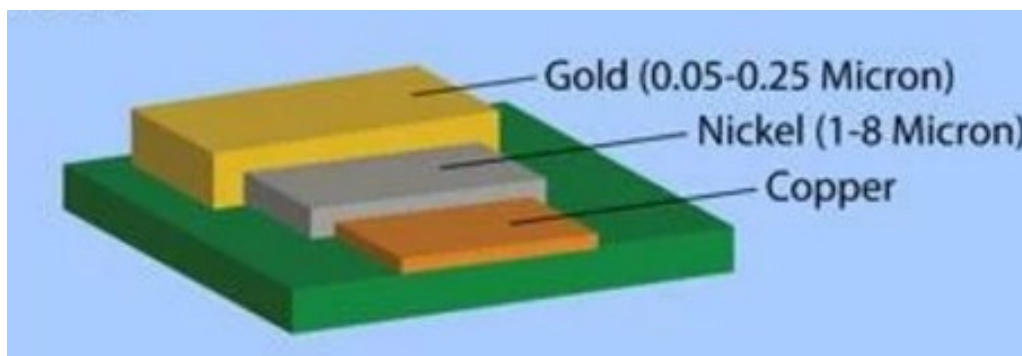
Jedná se o povrchovou úpravu zakrývající měděné pájecí plošky na desce pro ochranu před korozí a dalšími abnormalitami. Jak název napovídá, vrstva se skládá z niklu, který je přímo v kontaktu s mědí, a ten je dále pokryt tenkou vrstvičkou zlata. ENIG se vyznačuje dobrou ochranou před oxidací mědi a umožňuje snadný pájecí proces se skvělými vodivostními vlastnostmi.

Nikl představuje vrstvu, která chrání měděné plošky a propojuje se s pájkou při procesu pájení. Tenká vrstvička zlata pak především chrání nikl během skladování a propůjčuje mu nízkou kontaktní rezistivitu.

Mezi výhody úpravy ENIG lze řadit mimo jiné delší životnost vrstvy (12+ měsíců) díky nereakčnosti zlata na vzduchu, dále nikl zabraňuje vnitřnímu propojení mědi a zlata, neboť by se jinak měď prodívala na povrch skrze zlato a zoxidovala by, a nikl vytváří vnitřní kovovou sloučeninu Ni_3Sn_4 po reakci s cínovou pájkou zajišťující kvalitní pájený spoj. ENIG dále vyniká nízkou kontaktní rezistivitou a velmi kvalitním hladkým povrchem, což snižuje možnost oxidace a zabraňuje tření. Tato povrchová

úprava umožňuje použití i při THT montáži s kvalitními výsledky a též ji nepoškodí několikanásobný ohřev v peci.

Znatelné nevýhody této povrchové úpravy představují především její cena a nežádoucí magnetické vlastnosti.



Obr. 6 – ENIG a jeho složení [8]

2.3. ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)

Rozdílem od předchozí úpravy ENIG je přítomnost vrstvičky palladia. Tato vrstva zabraňuje vzniku syndromu “černé pájecí plošky” (*Black Pad*) jakožto důsledku koroze zapříčiněné zlatem ve vrstvě niklu.

Mezi výhody povrchové úpravy ENEPIG můžeme zahrnout možnost několikanásobného projití pájecí pecí či vysokou míru přizpůsobivosti k bezolovnatým přístupům v pájení. Použití palladia umožňuje ztenčit vrstvu zlata, dříve se proto jednalo o levnější úpravu v porovnání s ENIG. Kvůli nedávným pohybům na trzích s drahými kovy, kdy se spotové ceny palladia dostaly dokonce nad spotové ceny zlata, to už ale není pravda.

Hlavní nedostatek povrchové úpravy ENEPIG spočívá v křehkosti vrstvy cínu a palladia vznikající na niklu.

ENEPIG představuje ideální povrchovou úpravu pro desky plošných spojů kombinující více typů montáží jako například THT, SMT či wire bonding. Desky s touto úpravou se využívají například ve zbrojním průmyslu, lékařství, letectví či kosmonautice. Úprava umožňuje své aplikace v hustě osazených a *high performance* zařízeních.

2.4. ImAg (Immersion Silver)

Jedná se o pokovení 99% stříbrem obsahujícím stopy organickým materiálů, které chrání měděné vodivé cesty. Na povrchu ImAg se časem vytvářejí krystalky sulfidů způsobující zkratky. Tento nedostatek lze odstranit pokrytím stříbra tenkou vrstvičkou organického materiálu, který slouží jako bariéra před jejich vytvářením.

Tato povrchová úprava se vyznačuje střední životností vrstvy (6-12 měsíců), dobrou pájitelností či hladkým povrchem umožňujícím montáž *'fine-pitch'* či BGA součástek. Vydrží několikanásobný průchod tavící pecí a představuje vhodnou volbu pro vysokofrekvenční aplikace.

Nedostatkem ImAg jsou obtíže při elektrickém testování, citlivost na znečištění a zacházení či vznik whiskerů. Whisker patří mezi krystalografické metalurgické jevy. Jedná se vlastně o spontánní růst tenkých vousků z povrchu kovu.

2.5. ImSn (Immersion Tin)

Jedná se o vrstvu cínu nanášenou přímo na měď. Tato úprava se vyznačuje bílým vzhledem a může být nazývána "bílým cínem".

ImSn představuje levnější úpravu umožňující v případě nutnosti přepájení desky. Vrstva vydrží aktivní asi po dobu 6 měsíců a díky své hladkosti představuje vhodnou volbu pro BGA či malé součástky.

Mezi její nevýhody můžeme řadit malou trvanlivost a nerobustnost. Jako u úpravy ImAg zde dochází ke vzniku whiskerů. ImSn dále nevykazuje dobré vlastnosti pro použití u desek s prokovy a není ideální pro životní prostředí kvůli využívání karcinogenní thiomochoviny.

2.6. HASL (Hot Air Solder Leveling)

Před započítím HASL se vyčistí a předeheje deska. Poté se ponoří do vany s roztavenou pájkou, kde tato pájka pokryje části desky, které nebyly předem ochráněné nepájkivou maskou. Deska se vyjme z vany s pájkou a podrobí se vlivu "vzdušných nožů", které za tlaku a tepla odstraní přebytečnou pájku a zajistí jednotlou vrstvu pájky zakrývající měděné cesty. Po tomto procesu se deska znovu očistí a je připravena pro další technologické procesy.

Tato povrchová úprava představuje ekonomickou variantu s dokonalými smáčecími a pájivými vlastnostmi pro následné dotváření funkční desky a dobrou ochranu měděné vrstvy před korozí. Pro tuto metodu může být využita bezolovnatá

pájka. Desky s touto úpravou mohou být uskladněny před svým osazením i déle než rok bez systematických pochybení při jejich pozdějším osazování.

Mezi hlavní nevýhody této úpravy patří teplotní namáhání desky, neboť ji musíme ponořit do roztavené pájky. Toto teplotní namáhání může způsobit vady desek. Dále nelze tuto metodu použít u desek s prokvy pro THT.

3. Materiály používané při montáži součástek

Vyrobenou desku, zpravidla ošetřenou nějakou ze zmíněných povrchových úprav, je nutné osadit součástkami. Mezi typy materiálů používané při montáži součástek na desky plošných spojů patří tavidla, pájky, pájecí pasty a lepidla pro povrchovou montáž.

3.1. Tavidla

Tavidla slouží k urychlení smáčecího procesu, čímž napomáhají vzniku spolehlivého pájeného spoje. Odstraňují nečistoty ze spojovaných povrchů a tím napomáhají dobrému roztečení a přilnutí pájky na povrch. Mimo nečistoty odstraňují oxidy a brání následné reoxidaci povrchu během pájení a zlepšují i přenos tepla. Jedná se o látky zlepšující smáčivost pájených materiálů. Toho je dosaženo reakcí tavidla s oxidy.

Typ tavidla můžeme volit dle rozličných kritérií. Nejdůležitějšími je zajištění spolehlivého, kvalitního a opakovatelného pájecího procesu s minimálním zbytkovým obsahem nečistot a oxidů po pájení, které by mohly zhoršit izolační vlastnosti a způsobit i korozi, či způsobit přerušení vodivých cest na desce plošného spoje.

Tavidla lze rozdělit na tři typy. Prvním typem jsou tavidla pryskyřicová, mezi které patří například přírodní pryskyřice nazývaná kalafuna. Jedná se o pevnou formu pryskyřice získávanou z borovic či jiných jehličnanů a patří mezi nejdéle používaná tavidla. Složením se jedná o směs organických kyselin. Kalafuna svými reakčními schopnostmi zcela neodpovídá dnešním požadavkům. Proto se při jejím používání přidávají aktivátory či další přísady zlepšující čisticí schopnosti, nebo zvyšující teplotní odolnost. Druhým typem tavidel jsou organická tavidla, která dále rozlišujeme na rozpustná či nerozpustná ve vodě. Posledním typem jsou anorganická tavidla, která lze rozlišit na soli, kyseliny či zásady.

3.2. Pájecí slitiny

Volba slitiny hraje důležitou roli při spolehlivosti spojů. V dnešní době se snažíme omezit používání olovnatých pájek, ale jejich využití stále přetrvává v odvětvích jako například lékařství či letectví pro jejich osvědčené chování a známé vlastnosti. Smyslem pájecích slitin jsou zajištění mechanické fixace a elektrického propojení

součástky s deskou plošného spoje, odvod zkratového tepla a ochrana povrchu před oxidací.

3.2.1. SnPb

Jedná se o nejčastěji používanou olovnatou pájku. Běžné složení je 63 % cínu a 37 % olova. Tavná teplota této pájky se pohybuje okolo 183 °C. Vyniká dobrými smáčecími vlastnostmi a nízkou cenou. V dnešní době se z ekologických důvodů od těchto pájek ustupuje a hledají se ekologicky nezávadné alternativy.

3.2.2. Bezolovnaté pájky

V dnešní době se klade důraz na ekologickou nezávadnost jak výrobku, tak samotného výrobního procesu i zpracování. Nalezení adekvátního substitutu olovnatých pájek není snadný úkol. Substitut hledáme především z důvodu toxicity olovnatých pájek. Vyžadujeme však, aby hledaný netoxický substitut disponoval obdobnou pevností a spolehlivostí pájeného spoje jako u olovnatých pájek.

Hlavní nevýhoda bezolovnatých pájek (až na výjimky jako SnBi) spočívá v nutnosti pájet při vyšších teplotách, mnohdy přesahujících 200 °C, což vystavuje jak substrát desky, tak pájené součástky vyššímu namáhání, a tím zvyšuje šanci jejich dřívějšího selhání, nebo úplného zničení již během procesu pájení. Chemické složení bezolovnatých pájecích slitin se liší. Nejčastěji používané slitiny se skládají z cínu a mědi či stříbra.

Nové bezolovnaté pájky se hodnotí například dle materiálových nebo technologických parametrů. Mezi materiálové parametry můžeme zařadit pevnost spojů, teplotu tavení, elektrickou vodivost, teplotní roztažnost nebo možnou dobu skladování. U technologických parametrů se klade důraz na možnost použití stávajících technologických postupů a zařízení používaných při pájení olovnatými pájkami.

3.3. Pájecí pasty

Výhodou nanášení pájecích past před technologií pájení vlnou je především nanášení definovaného množství pájecí pasty na pájený spoj a s tím spojená lepší opakovatelnost technologického procesu. Jedná se o homogenní směs pastovité

konzistence skládající se z práškovité pájky, gelového tavidla a reologických modifikátorů.

Přítomnost tavidla je z důvodu urychlení smáčecího procesu. Během samotného procesu pájení se vyžaduje, aby tavidlo vykazovalo konstantní smáčecí charakteristiky s minimální závislostí na teplotě a času před vlastním přetavením.

Reologické modifikátory ovlivňují chování pasty během tisku i po natisknutí, smáčecí charakteristiky a výslednou kvalitu pájeného spoje.

3.4. Lepidla pro povrchovou montáž

Rozlišujeme dva základní typy lepidel. Lepidla elektroizolační a lepidla elektricky vodivá. Směs musí být netoxická, nehořlavá a bez zápachu.

Elektricky vodivá lepidla operují na zcela odlišném principu elektricky vodivého spojování než pájení a vyžadují jiné technologické postupy. Nejčastěji u nich zkoumáme elektrickou vodivost spojů, pevnost v tahu či smyku a odolnost proti termodynamickému namáhání.

Elektrickou vodivost těchto lepidel zajišťují buď šupinky různých velikostí, nebo kuličky o průměrech asi 6-8 μm . Využívají se buď zcela stříbrné, nebo postříbřené měděné, či plastové kuličky.

Lepidla plněná šupinkami řadíme zpravidla mezi lepidla s izotropní elektrickou vodivostí. Objemová koncentrace vodivých částic by měla dosahovat 75-80 % pro spolehlivé elektrické propojení komponent. Vedle lepidel izotropních existují i lepidla anizotropní, která využívají postříbřených kuliček k zajištění elektrické vodivosti. Zde není nutné dosahovat tak vysokých objemových koncentrací vodivých částic a stačí přibližně 30 %. Tato lepidla jsou vodivá pouze ve směru osy Z a občas se nazývají také Z lepidly. Nejpoužívanější aplikací Z lepidel je instalace čipů, kdy se za tepla čip přitlačí na substrát s vrstvou anizotropního lepidla. Při tomto procesu dojde k propojení kontaktních plošek čipu a desky pomocí kuliček, které zajistí elektrické spojení.

Cena technologie vodivých lepidel se odvíjí od ceny stříbra. Využití lepidel je tedy dražší nežli použití bezolovnatých pájek. Dalšími nevýhodami lepidel v porovnání s pájkami jsou horší elektrické a mechanické vlastnosti, nižší odolnosti proti klimatickému či mechanickému namáhání nebo časově omezená skladovatelnost lepidel. Výhoda lepidel spočívá především v montáži součástek na desku, kdy není třeba desku zahřívat na teploty jako při použití pájek. Díky tomu nedochází při procesu

montáže součástek k tepelnému namáhání desky a tím se zmenšuje její opotřebenění před započítáním jejího používání v elektronice.

Lepidla nalézají svá využití například při výrobě LCD displejů, v moderních aplikacích jako 3D struktury a při montáži *'fine pitch'* pouzder.

4. Chyby desek plošných spojů

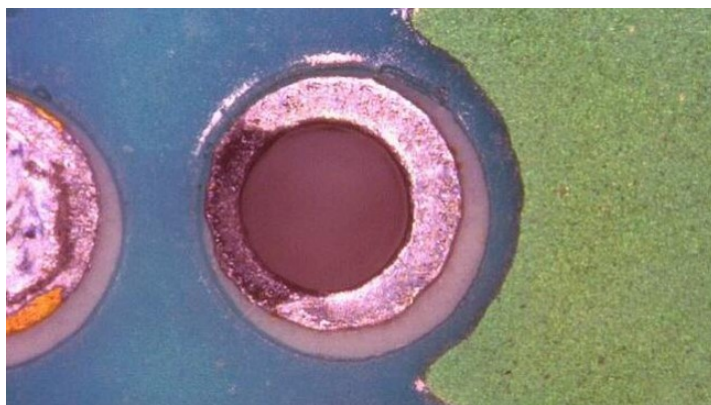
Desky plošných spojů tvoří základ dnešní elektroniky. Mnoho faktorů může způsobit selhání desky a tím i celého zařízení. Mezi časté příčiny selhání desek můžeme řadit mimo jiné vyhořelé součástky, vliv okolního prostředí či stárnutí součástek. Některým možným vadám lze zabránit řádným kontrolováním rozvržení a návrhů desek.

4.1. Problémy s povrchovými úpravami

Povrchové úpravy mimo svou hlavní roli ochrany vrstvy mědi se sebou nesou také jistá úskalí a vady.

U povrchové úpravy ENIG se můžeme setkat s nedostatečnou vrstvou zlata, kdy výrobce šetří na zlaté vrstvě, což způsobí nedostatečné pokrytí vrstvy niklu zlatem a tím nedostatečnou ochranu niklu před okolními vlivy, a to především oxidací.

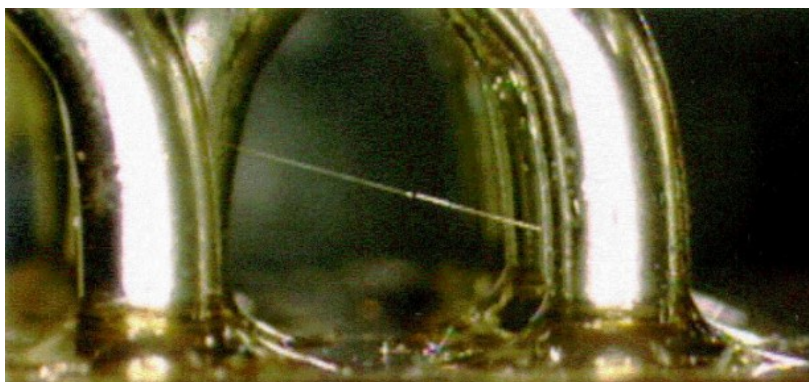
Dalším fenoménem povrchové úpravy ENIG je již dříve zmíněný *'Black Pad'* efekt. Zčernání pájecí plošky je způsobeno zkorodováním exponovaného niklu zapříčiněné agresivní reakcí vrstvičky zlata s niklem způsobené špatnou koncentrací zlata a kontaminací mědi ve zlaté lázni. Při této reakci dochází k uložení fosforu mezi vrstvu niklu a zlata. Fosfor způsobuje obtíže se smáčivostí a pájitelností plošky. Přítomnost fosforu na vrstvě niklu dále způsobí při procesu pájení typické zčernání pájecí plošky.



Obr. 7 – Black Pad u ENIG [9]

Další vadou desek způsobenou mimo jiné povrchovými úpravami mohou být "whiskery". Jedná se o vlásky kovu, které mohou způsobit bridging a tím narušení funkce celé desky. Whiskery vznikají zejména jako důsledek mechanického pnutí.

Fenomén whiskerů byl v minulosti řešen přidáním olova do pájky. Dnešní snaha hledání cest pájení bez používání olova však nebezpečí výskytu whiskerů navrácí.



Obr. 8 – Cíněný whisker [10]

4.2. Delaminace

Proces laminace představuje propojení vrstev do kompaktní desky pomocí zpravidla lisování za tepla. K dostatečné adhezi vrstvy mědi k substrátu je nutné spodní stranu mědi zdrsnit. V minulosti se využívalo zoxidování příkládané strany mědi, kdy vznikla černá vrstva oxidu měďnatého. Tomuto principu se říkalo *'black oxide'*. V dnešní době se častěji využívá *'brown oxide'*, kdy využíváme mikroreptání mědi do hloubky zhruba 1,5 μm . Takto upravený povrch mědi při lisování za tepla vykazuje vyhovující adhezi se substrátem.

Delaminace může být způsobena buď mechanicky, nebo chemicky. Materiál může například vykazovat vyšší míru vlhkosti, která je laminována ve vnitřních vrstvách desky. Tato vlhkost, která se nemá kam odpařit, pak při procesu pájení či při jiném zahřívání způsobuje bobtnání desky vedoucí k delaminaci. V krajním případě je možné i popraskání vnější vrstvy v těchto místech. K tomuto procesu dojde při náhlém přechodu z kapalné do plynné fáze, kdy expanze plynu způsobí zmíněné prasknutí povrchu desky.

Důsledkem delaminace pak může být vodivostní rozpojení spoje či zbarvení desky.

Můžeme rozlišit delaminaci v rovině XY, čili v rovině desky, či v ose Z. V rovině XY jsou koeficienty teplotní roztažnosti substrátu ve srovnání s osou Z menší díky skelným vláknům, které v této rovině do jisté míry omezují expanzi pryskyřice. V ose Z tento efekt skelná vlákna nemají, a proto je koeficient teplotní roztažnosti desky v ose Z násobně větší nežli v rovině XY.



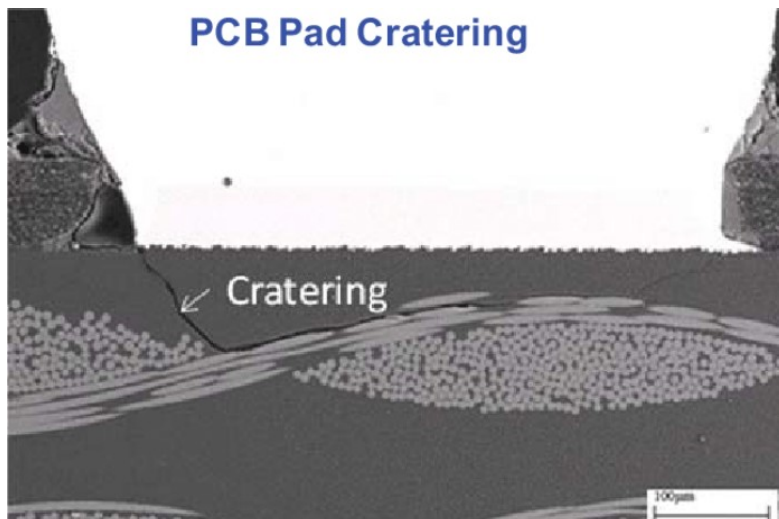
Obr. 9 – Zabarvení desky v místě delaminace [11]

4.3. Nedostatečné drážkování (Starved Thermals)

Pojmem *thermals* rozumíme malé drážky okolo pájecích plošek propojující tyto plošky s povrchem desky. Tyto drážky hrají klíčovou roli při odvodu tepla z pájecích plošek při procesu pájení. Při nedostatku thermálů či přítomnosti voidů v těchto drážkách se snižuje jejich účinnost při rozptylování tepla. Při nedostatečném odvodu tepla z pájecích plošek pak může docházet k přehřívání a k následnému poškození desky.

4.4. Pad Cratering

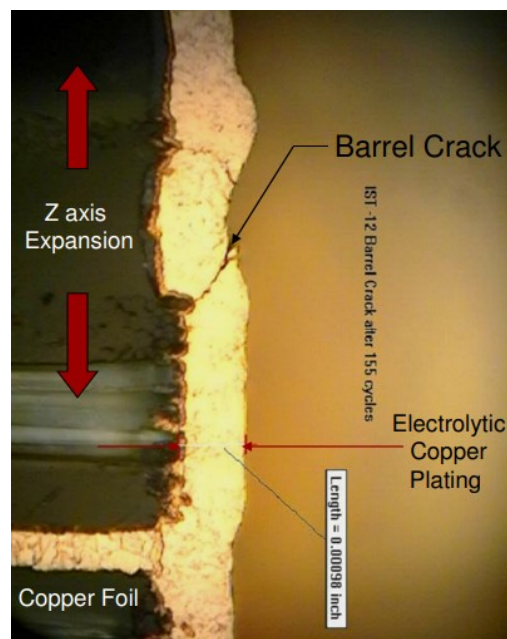
Pad Cratering představuje poškození způsobené zpravidla mechanickým šokem nebo vzniklé při tepelném, mechanickém či elektrickém testování správné funkčnosti desky výrobcem. Jedná se o frakturu na rozhraní padu a substrátu vedoucí nakonec až k úplné separaci pájecí plošky od samotné desky. S touto vadou se můžeme nejčastěji setkat u desek s BGA pouzdry. Samotný vznik Pad Crateringů nevede přímo k okamžitému selhání desky, avšak selhání již částečně poškozené desky je při dalším namáhání a používání nevyhnutelné.



Obr. 10 – Pad Cratering [12]

4.5. Barrel Cracking

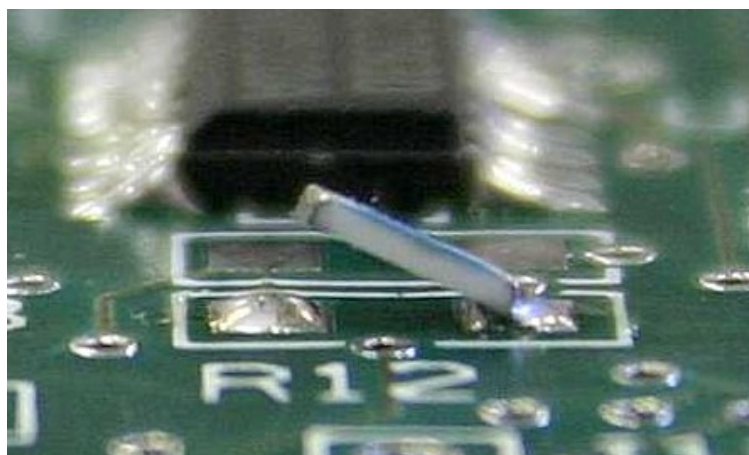
Barrel Cracking patří mezi vady desek s prokoveny. Jedná se o únavu měděné části prokovených otvorů, kdy dojde k prasknutí prokovení. Při Barrel Crackingu dochází k narušení měděné vrstvy, které je způsobeno zpravidla rozdílnou tepelnou roztažností mezi měděným prokovením a substrátem desky v ose Z. K Barrel Crackingu může dojít například opakovaným přehříváním a následným ochlazováním desky nebo nedostatečným prokovením prokovení.



Obr. 11 – Prasknutí prokovení [13]

4.6. Tombstoning

Mezi vady desek plošných spojů s SMD součástkami můžeme zařadit vadu nazývanou Tombstoning či efekt náhrobního kamene. Při této vadě desky plošného spoje dochází k otevření spoje na jedné straně součástky. Důvodem k nadzvednutí jedné strany součástky jsou rozdílné síly působící na součástku. Mezi hlavní příčiny Tombstoningu patří různé velikosti padů, nestálá distribuce tepla při pájecím procesu, či nerovnoměrná vrstva pájecí pasty.



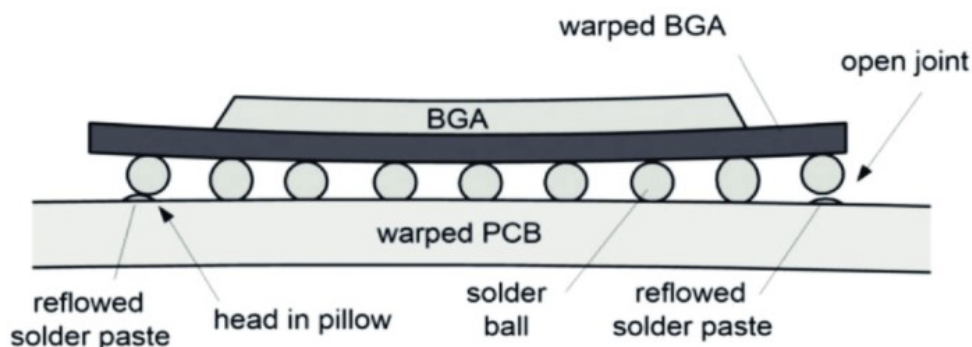
Obr. 12 – Tombstoning [14]

4.7. Warpage efekt

S pojmem Warpage se setkáváme především v rámci desek plošných spojů určených pro SMT montáž. U tohoto typu montáže představuje totiž tato vada závažnější problém nežli při montáži THT. Jedná se o prohnutí desky vlivem jejích zahřátí/ochlazení. Při montáži SMT je nutné, aby deska byla rovnoměrně zahřívána. Zprohýbání desky výrazně ztěžuje a mnohdy i znemožňuje ideální umístění součástek a dále zvyšuje šanci pohybu součástek při procesu pájení. Součástky se mnohdy mohou kvůli nerovnostem desky po desce posouvat či zcela odpadnout a vznikají tak na desce bridges či mezery v obvodu.

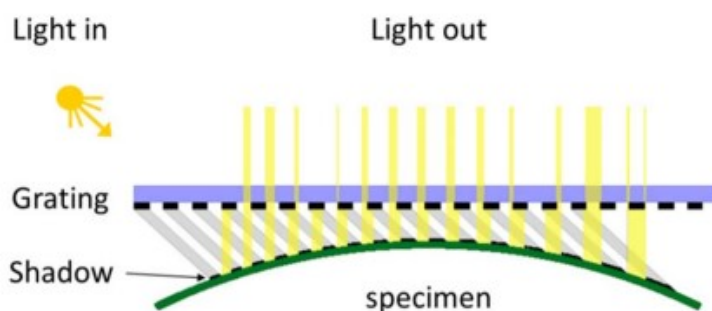
Warpage je způsoben tepelným působením na desku plošného spoje v průběhu pájecího procesu. Jednou z typických příčin je rozdílný teplotní koeficient roztažnosti mědi a substrátu. Při výrobě desky dochází k teplotnímu namáhání desky při lisování, kdy materiál projde expanzním procesem při zahřívání a následně kontrakčním procesem při dochlazování desky. Pokud se v materiálu uvolní vnitřní pnutí, vzniká právě jmenovaný Warpage, kdy se deska plošného spoje do jisté míry prohne.

Aby se projevům efektu Warpage zabránilo, je nutné, aby návrhář desky myslel na rovnoměrné rozložení měděné vrstvy ve všech vrstvách desky i její rovnoměrné osazení. K docílení prvního zmíněného může pomoci například vyplnění nevyužitých ploch měděnou mřížkou, která dopomůže vyrovnání pnutí na desce během jejího teplotního namáhání.



Obr. 13 – Warpage efekt [15]

Míra efektu Warpage se může měřit pomocí techniky 'Shadow Moiré Measurement Principle'. Jedná se o zcela bezkontaktní techniku, která funguje na principu geometrické interference mezi referenční mřížkou a jejím stínem na vzorku k měření relativního vertikálního posunutí jednotlivých pixelů ve výsledném obraze. [35]



Obr. 14 – Shadow Moiré Measurement Principle [16]

4.8. Vlivy prostředí

Změny okolní teploty mohou způsobit závadu na desce. Se změnami teploty dochází k rozdílnému materiálovému rozpínání způsobujícímu zakřivení desky. Tato zakřivení časem mohou způsobit narušení pájených spojů a znemožnění správné funkčnosti desky. Dalšími škodlivými vlivy mohou být prach či vlhkost. Vlhkost může způsobit oxidaci či korozi spojů. Nadměrné množství prachu může zanést destičku a v krajních případech způsobit i přehřátí součástek.

5. Testování desek

Pro ujištění o kvalitě výrobku výrobce provádí řadu testů zaměřených na funkčnost desky plošného spoje. Testování samotného návrhu a designu je nutné provést před započítím hromadné výroby. Další, více specifické testy, je nutné provádět u každé vyrobené desky, než se dostane do distribuce.

Mezi výhody testování patří odhalení chyb jako jsou zkratky obvodech, špatné připájení součástek či nesprávná funkčnost desky. Brzké testování v průběhu výrobního procesu umožňuje opravení problémů před dokončením desky, kdy by náprava zjištěných chyb byla zpravidla nákladnější a složitější.

Mezi testy patří například testy elektrické vodivosti, mechanické pevnosti, kvality pájených spojů osazených desek, čistoty, kvality prokovů a další.

Mezi testovací techniky patří mimo jiné optická kontrola, In-Circuit Testing, Flying Probe Testing či rentgenová kontrola.

5.1. Automatizovaná optická kontrola

Tato automatizovaná kontrolní souprava obsahuje buď jednu 2D, či dvojici 3D kamer snímajících povrch desek. Software dále sleduje, zda snímky odpovídají detailnímu schématu desky, či nikoli. Pokud se snímky liší nad určitou míru, deska je označena pro manuální posouzení technikem. Tato kontrolní metoda slouží k včasnému zastavení výroby při opakované nesrovnalosti se schématem. Dále metoda umožňuje zjistit škrábance či prostorové defekty desky.

Nejedná se o elektrický test, tedy je nutné tuto kontrolu zkombinovat například s elektrickými testy. Zároveň není možné touto metodou kontrolovat „neviditelné“ oblasti, jako je například kvalita pájených spojů u BGA pouzder.

5.2. Vnitroobvodové testování (*In-Circuit Testing* – ‘*Bed of Nails*’)

Jedná se o elektrický test pro nalezení případných zkratů na desce plošného spoje či špatného připájení součástek. V průběhu tohoto testu dojde ke kontaktu s deskou plošného spoje na více místech současně. Tester měří hodnoty jednotlivými cestami v rámci desky plošného spoje a v případě chyby je schopen tyto chyby lokalizovat a předat je zpět ve výstupní zprávě o chybě pro jejich snazší odstranění.

Jedná se o plně automatizovanou proceduru. Výhodou tohoto testování je konzistence ve výsledcích a její rychlost.

Nevýhodami In-Circuit Testingu jsou vyšší počáteční náklady a delší čas pro přípravu před samotným započítím testování. Souprava neumožňuje testovat neelektrické součástky.

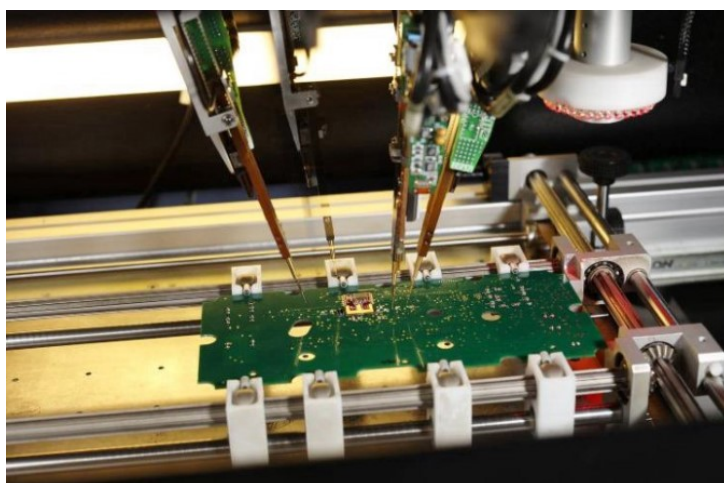


Obr. 15 – In-Circuit Testing souprava [17]

5.3. Flying Probe Test

Jedná se o testování zkratů, openů, pájecích plošek či prokovů. Testují se elektrické parametry jako polarita, rezistivita či kapacita. Na rozdíl od In-Circuit Testingu zde k testování slouží pouze dvojice či více párů pohyblivých sond, které automatizovaně "létají" nad deskou a testují její vodivé cesty a komponenty. Tento test je využíván pro prototypy či malé desky. Sondy je nutné naprogramovat pro jednotlivé desky pro jejich testování. Umožňuje testování LED.

Hlavním rozdílem od In-Circuit Testingu je možnost levnějšího kusového testování s menšími časovými náklady, avšak In-Circuit Testing vyniká rychlostí a cenou v sériovém testování stejného typu desek plošných spojů z dlouhodobého hlediska.



Obr. 16 – Flying Probe Test [18]

5.4. Automatizovaná rentgenová kontrola

Tento typ kontroly umožňuje nahlédnout do okem či kamerou nepřístupných míst desky plošného spoje, totiž vnitřních vrstev či pod připájený čip. Obtíží této kontroly je, že je jak časově, tak finančně náročná, a vyžaduje zkušeného technika. Tato metoda se používá například pro kontrolu pájených spojů u BGA pouzder, kontrolu dutin ve spojích apod.

5.5. Funkčnostní test

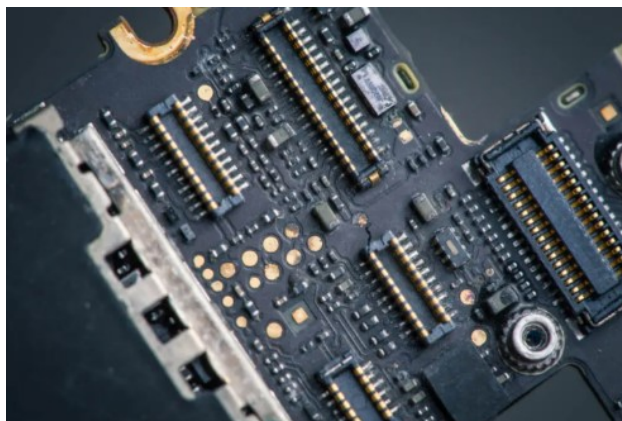
Jedná se o prostý test, že deska plošného spoje funguje. Parametry testování jsou obvykle poskytnuty zákazníkem. Tyto testy jsou časově náročné, ale umožňují opravdové otestování funkčnosti desky plošného spoje jako celku.

5.6. Klimatické testy

Mimo testy elektrické či testy elektromagnetické kompatibility je nutné, aby elektronika byla také bezpečná a spolehlivá. Mezi klimatické testy lze řadit kromě teplotního a vlhkostního testování též elektrické šoky, mechanické šoky a vibrace. Tyto testy slouží i k ověření, že desky plošných spojů vydrží uskladnění, transport za extrémních teplot či vlhkosti a montáž.

Pro klimatické testy slouží malé klimatické komory, do kterých se deska plošného spoje vloží a komora simuluje dané klimatické podmínky jako zvýšenou teplotu, zvýšenou vlhkost, či vibrace, které by mohly vést k selhání nové desky. Deska plošného spoje je v průběhu testu pozorována a odhalují se na ní slabiny.

Test vlhkosti a koroze sleduje míru absorpce vody do desky plošného spoje. Provádí se zvážení desky před vložením desky do klimatické komory a po jejím vyjmutí.



Obr. 17 – Změna zabarvení způsobená korozí během klimatického testování [19]

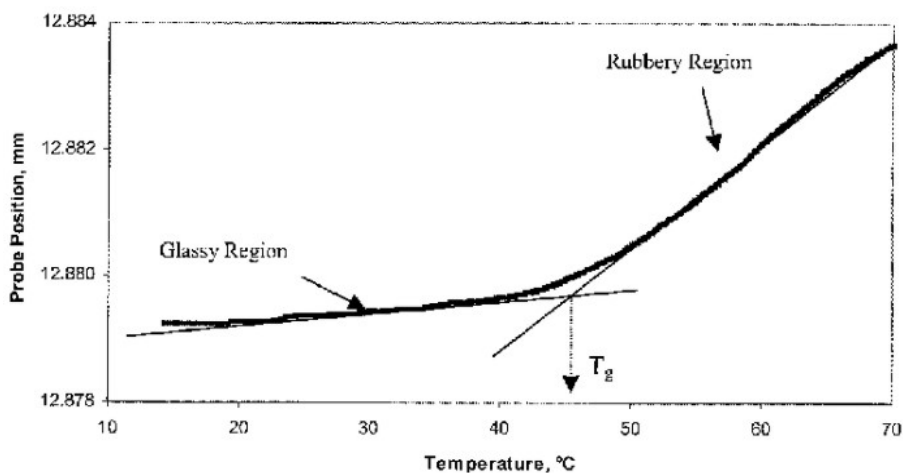
Teplotní šoky a jejich opakování jsou běžně prováděny odděleně od testů vlhkosti. Tyto testy zkouší, jak deska plošných spojů reaguje na teplotní roztažnost použitých materiálů. Tyto cykly proběhnou několikrát a jsou většinou nastavené od teplot mrazu až po teploty mírně překračující teplotu skelného přechodu substrátu se změnou přibližně 10 °C za minutu. Tento druh namáhání urychluje stárnutí desky a umožňuje tak identifikovat mechanické selhání desky plošných spojů.

Vibrační testy simulují výdrž desek plošných spojů v běžném prostředí a při přepravě k zákazníkovi. K poškození nejčastěji dochází při vibračních srovnatelných s rezonanční frekvencí. Rozlišují se tři druhy vibračních testů: pro přístroje umístěné na zdech domů, pro přístroje s elektronickými ovládacími boxy a pro instalace do pohyblivých nástrojů či vozidel. Rozlišují se vibrace dopravní, vibrace běžné při používání a vytrvalostní vibrace představující vibrace při rezonanční frekvenci.

5.7. Termomechanická analýza

Se zmenšujícími se elektrickými zařízeními jsou desky plošných spojů a komponenty na nich osazené vystavovány zvyšující se výkonové hustotě a složitosti těchto zařízení. Kvůli rozmanitostem ve velikosti elektronických zařízení vznikají vysoce komplexní modely na základě termomechanické analýzy. Termomechanická analýza se používá k měření míry deformace pevných látek, kapalin či gelů v závislosti na teple či mechanické síle za kontrolovaného teplotního profilu.

Termomechanickou analýzou se mohou měřit u desek plošných spojů především expanzní koeficienty a teplota skelného přechodu.



Obr. 18 – Způsob určení teploty skelného přechodu pomocí termogramu získaného termomechanickou analýzou [20]

5.8. Dynamická mechanická analýza

Dynamická mechanická analýza patří společně s termomechanickou analýzou mezi nejvýznamnější techniky termické analýzy. Oproti termomechanické analýze, která zkoumá mimo jiné například měnící se rozměry materiálu v závislosti na teplotě, dynamická mechanická analýza měří mechanické vlastnosti materiálu při deformaci materiálu vlivem periodických sil či posunů v závislosti na frekvenci či teplotě.

Výstupem dynamické mechanické analýzy mohou být například hodnoty pro Youngův modul pružnosti, tlumící charakteristiky či struktury polymerů.

5.9. Ultrazvuková mikroskopie

Ultrazvuková mikroskopie se používá pro analýzu osazení desky plošného spoje. Je zde využíváno vysokofrekvenčního odrazu na nespojitém rozhraní materiálů. Deska se skenuje z pohledu osy Z a získávají se informace o rozložení materiálu v rovině XY. Tím můžeme díky skenování desky touto metodou odhalit různé defekty součástek či substrátu od prasklin, delaminace až po dutiny v materiálu. Touto metodou se dají detekovat i vady pájených spojů.

S odvrácením se od pájek obsahujících olovo k pájkám bezolovnatým dochází častěji k poškození součástek či substrátu pod součástkami při SMT montáži, kde jsou součástky uloženy v plastových obalech a po jistou dobu ponořeny v roztavené pájce. Tyto vady ultrazvuková mikroskopie, jako nedestruktivní testovací metoda, rovněž spolehlivě odhaluje.

6. Praktická část

V praktické části jsem se zaměřil na zkoumání termomechanických vlastností substrátů pro výrobu desek plošných spojů v závislosti na jejich tloušťce, množství oddělovacích prepregů, zvoleném materiálu a dále na rozdíly mezi deskami, které byly ošetřeny povrchovou úpravou HASL, a deskami, které procesem HASL neprošly. Pro měření a sběr dat byl využit přístroj Q400 TMA.



Obr. 19 – Q400 TMA [21]

Pomocí přístroje Q400 TMA, který byl připojen k externímu počítači určenému ke sběru dat, jsem měřil změnu rozměru vložených vzorků v ose Z v závislosti na měnící se teplotě. Přístroj zaznamenával průběh změny rozměrů s velkou přesností při širokém rozsahu teplot. Na připojeném počítači jsem využíval aplikaci *TA Instrument Explorer*, která celý proces termomechanické analýzy zaznamenávala, a aplikaci *TA Universal Analysis*, díky níž jsem získaná data exportoval a umožnila mi tato data analyzovat.

6.1. Vzorky

Vzorky byly vyrobeny externí firmou. Pro mou práci jsem si vybral především desky z materiálu FR4 RD140. Celkem jsem analyzoval vzorky z deseti desek se substrátem FR4. Bylo nám dodáno 5 dvojic desek. Každá z těchto dvojic měla rozdílný počet jader FR4 či tato jádra byla oddělena různým počtem listů prepregu běžně používaného u desek z materiálu FR4 o síle 0,15 mm. Přesněji se jednalo o jednu dvojici z jednoho jádra FR4, dvě dvojice s dvěma jádry FR4 oddělenými jedním, či dvěma prepregy a dvě dvojice s třemi jádry FR4 rovněž s jádry oddělenými jedním, či dvěma prepregy. Jedna deska z každé dvojice vždy prošla procesem HASL, druhá nikoli. Síla základního jádra FR4 byla 1,5 mm.

Dále jsem analyzoval další dvě dvojice desek z jiných substrátů, a to G30 VT-901 a CEM1. Obdobně jako u destiček z FR4, jejich síla jádra byla 1,5 mm.

Materiál G30 VT-901 patří mezi zástupce polyamidových materiálů a představuje desku s vyšší teplotou skelného přechodu s typickou hodnotou 250 °C. Materiál CEM1 je pak tvořen papírovou výztuží, která je obalená skelnou tkaninou s epoxidovou pryskyřicí. Typická hodnota teploty skelného přechodu desek z CEM1 leží okolo 90 °C. [22] Pro materiál FR4 je dle katalogového listu výrobce typickou hodnotou teploty skelného přechodu 135 °C.

Materiál CEM1 představuje vhodnou levnější alternativu k jednostranným deskám z FR4, kde nejsou očekávány vyšší výkony a větší tepelné namáhání.

Materiál G30 VT-901 je využíván pro desky, kde jsou očekávány vyšší teploty a kde je nutná spolehlivost desky při extrémních podmínkách. Využití tento materiál nalézá například u desek v čipovém průmyslu či v armádních přístrojích.

Dle informací od dodavatele byly vzorky lisovány při teplotě 175 °C za tlaku 17 kg/cm² po dobu 65 minut. Po procesu lisování byly vzorky následujících 35 minut dochlazovány. Vzorky, které prošly procesem HASL, byly ponořeny na 8 sekund do roztavené pájky o teplotě 270 °C.

	Typ jádra	Počet jader	Počet prepregů oddělujících jádra	Tepelné zatížení procesem HASL
V1	FR4	1	-	ANO
V2	FR4	1	-	NE
V3	FR4	2	2	ANO
V4	FR4	2	2	NE
V5	FR4	3	2	ANO
V6	FR4	3	2	NE
V7	FR4	3	1	ANO
V8	FR4	3	1	NE
V9	FR4	2	1	ANO
V10	FR4	2	1	NE
V11	G30	1	-	ANO
V12	G30	1	-	NE
V13	CEM1	1	-	NE

Tabulka 1 – Seznam vzorků

6.2. Popis měření

Z externí firmy nám bylo dodáno celkem 14 desek plošných spojů z různých substrátů. Pro měření bylo nutné z těchto desek vyrobit čtverečky o rozměrech přibližně 0,8 cm x 0,8 cm. Vlastnosti vzorků ze 13 desek uvedených v Tabulce 1 jsem následně analyzoval pomocí termomechanického analyzátoru. Deska z materiálu CEM1 nepřežila průchod procesem HASL u výrobce a došlo k delaminaci desky. Dle katalogového listu by tento materiál měl přežít teplotní namáhání až 260 °C po dobu 10 sekund před jeho selháním. Bohužel pro nás bylo teplotní namáhání během procesu HASL pro desku terminační.



Obr. 20 – Delaminovaná deska z CEM1 po projití procesem HASL

Pro získání informace o změně chování substrátů procházely desky analyzátozem dvakrát. Na následujících fotkách je možné vidět, jak se změnila barva vzorků (ztmavly). Jedinou výjimkou byla deska ze substrátu G30. U té se změna zbarvení neprojevila, či pouze minimálně.



Obr. 21 – Desky z FR4

Vlevo = před použitím / Uprostřed = po prvním běhu / Vpravo = po dvou běžích



Obr. 22 – Desky z CEM1

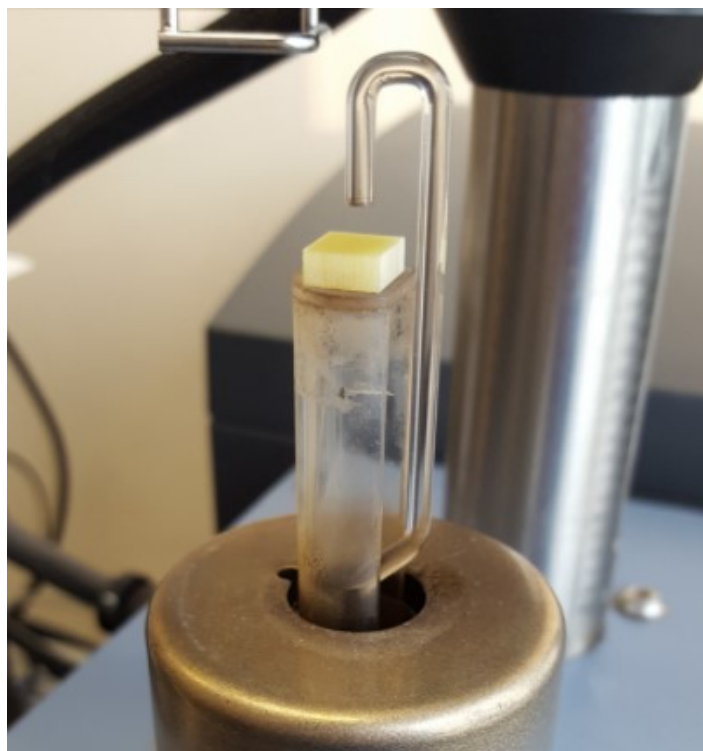
Vlevo = před použitím / Uprostřed = po prvním běhu / Vpravo = po dvou běžích



Obr. 23 – Desky z G30

Vlevo = před použitím / Vpravo = po dvou běžích

Před započítím analýzy na TMA bylo nutné vždy zkalibrovat měřící sondu, která posléze mohla přesně snímat měnící se rozměr vzorku v ose Z. Po dokončení kalibrace se vzorek umístil na podstavec pod sondu tak, aby nepřesahoval podstavec, a změnil se jeho výchozí rozměr v ose Z. Poté se na vzorek umístěný na podstavci nasunula pec a po započítím měření byl v její dutině vzorek zahříván.



Obr. 24 – Detail vloženého vzorku na podstavec s měřicí sondou

Nyní bylo nutné definovat parametry pro analýzu. Pro všechny desky byla zprvu užitá následující jednoduchá procedura:

Flow rate	100 ml/min
Force	0,01 N
Ramp	5 °C/min to 250 °C
Ramp	5 °C/min to 50 °C
Flow rate	0 ml/min

Během měření se následně ukázalo, že tato procedura byla vhodná pouze pro desky z FR4.

Pro desky z materiálu G30 se následně zvýšila maximální teplota a výsledná zatěžovací procedura vypadala následovně:

Flow rate	100 ml/min
Force	0,01 N
Ramp	5 °C/min to 300 °C
Ramp	5 °C/min to 50 °C
Flow rate	0 ml/min

Pro desky z materiálu CEM1 naopak bylo nutné maximální teplotu z původních 250 °C snížit a procedura se změnila následujícím způsobem:

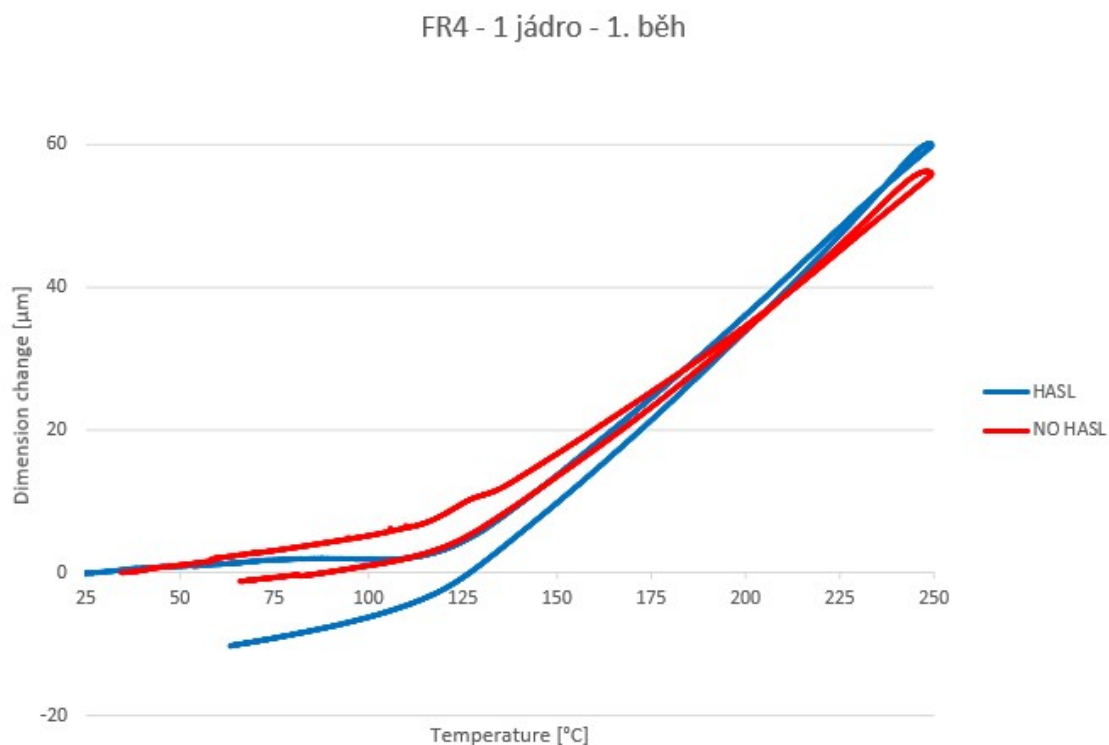
Flow rate	100 ml/min
Force	0,01 N
Ramp	5 °C/min to 200 °C
Ramp	5 °C/min to 50 °C
Flow rate	0 ml/min

Flow rate použitý v těchto procedurách udává množství dusíku, který je při měření do prostoru pece přiváděn, aby zajistil inertní atmosféru během analýzy, *Force* značí přítlačnou sílu, kterou má sonda působit na vzorek proti podstavci, a *Ramp* žádanou teplotní změnu za čas.

Po nastavení procedury mohla být započata vlastní analýza vloženého vzorku. Program po spuštění vyslal požadavek k přeměření vzorku pro přesný výchozí rozměr a od této chvíle již měření probíhalo samovolně. Po skončení procedury se pec sama otevřela a mohl jsem vzorek podrobit druhému běhu, nebo jej vyjmout a vložit po nové kalibraci další vzorek.

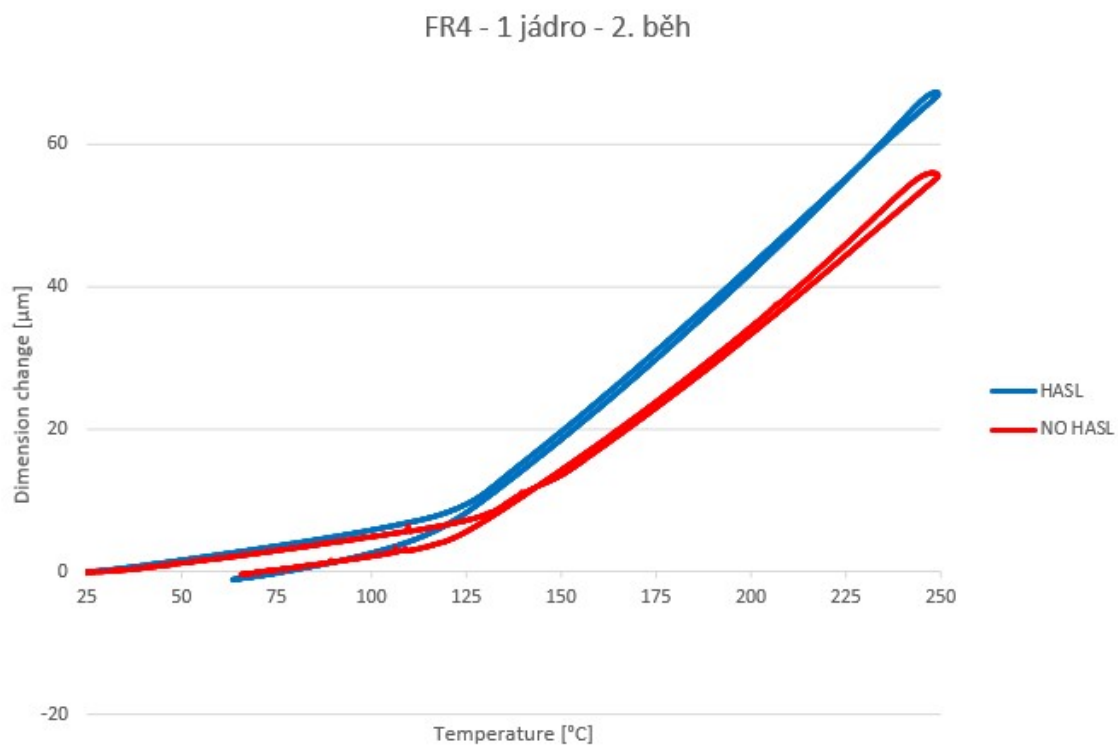
6.3. Výsledky

Data získaná během analýzy na termomechanickém analyzátoru byla vyexportována do textových souborů. Vyexportovaná data jsem vložil do Excelu a vytvořil průběhy změn rozměru v ose Z v závislosti na změně teploty. Do své práce jsem vybral některé z grafů pro znázornění chování vzorků v závislosti na počtu prepregů, změny chování mezi prvním a druhým během a vlivu procesu HASL na průběhy změn rozměru v ose Z v závislosti na změně teploty.



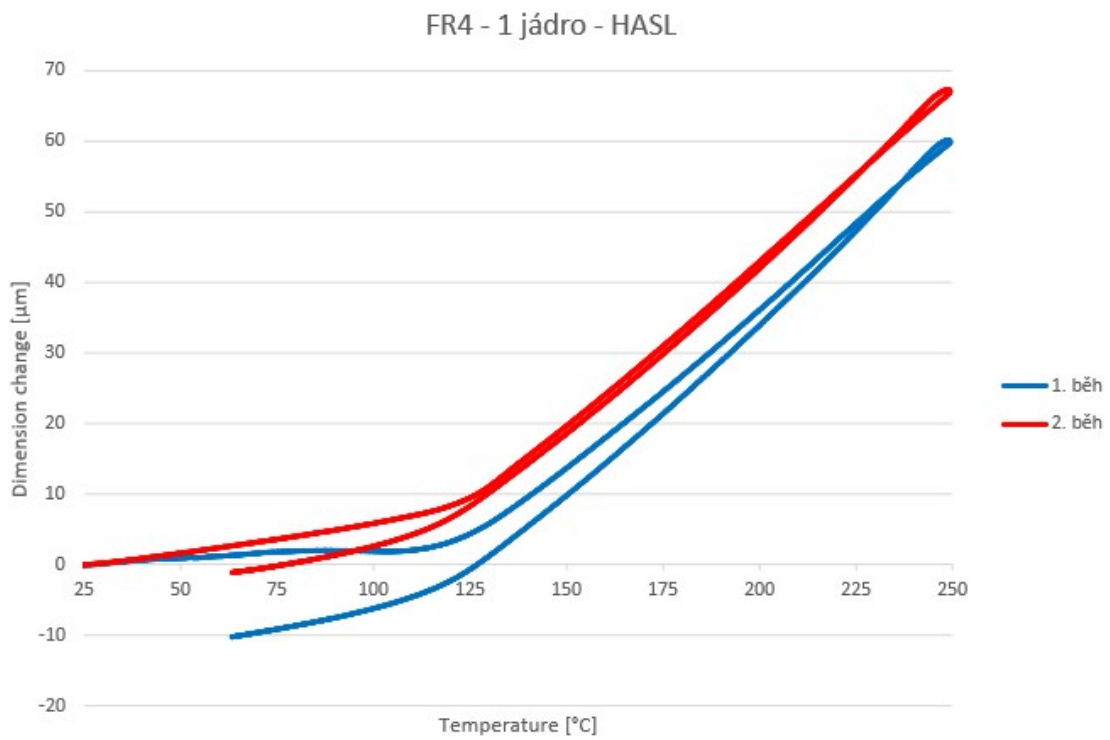
Graf 1 – Porovnání TMA HASL x NO HASL pro jedno jádro FR4 v 1. běhu

V grafu 1 můžeme pozorovat zavlnění červeného průběhu vzorku, který neprošel procesem HASL, okolo 125 °C. Při zpětném ochlazování k zavlnění nedochází. U vzorku reprezentovaného modrým průběhem docházelo k jeho rovnání při nižších teplotách, a proto do přibližně 125 °C nedošlo k téměř žádné změně rozměru v ose Z. Jak bylo zmíněno v teoretické části práce v sekci 5.7 o termomechanické analýze, pomocí této analýzy můžeme zjistit teplotu skelného přechodu. Tu nalezneme v grafu jako teplotu na ose X, kde deska přechází z pevného stavu do viskoelastického stavu, tedy teplotu, při které se mění směrnice křivky značící změnu rozměru vzorku. Z tohoto grafu můžeme usoudit, že vzorek, který prošel procesem HASL, se rozpínal po překročení teploty skelného přechodu rychleji nežli druhý vzorek.



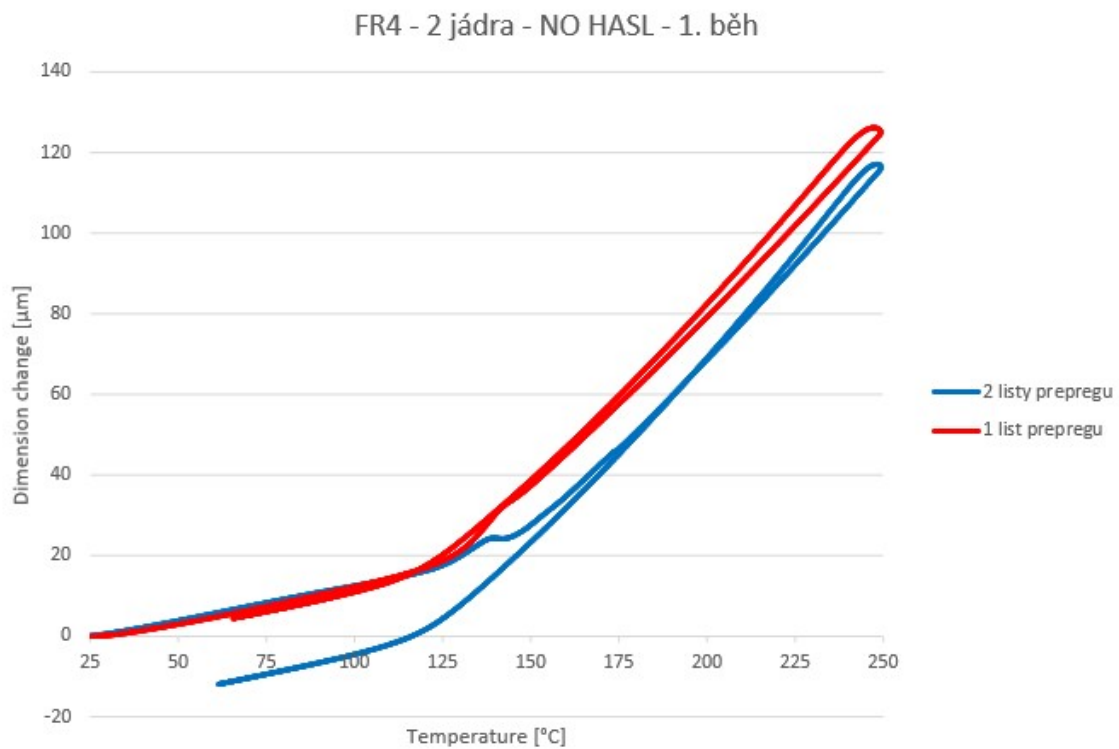
Graf 2 – Porovnání TMA HASL x NO HASL pro jedno jádro FR4 v 2. běhu

Pro srovnání v grafu 2 přikládám i druhý běh vzorků, jejichž první běh byl zobrazen v grafu 1. Zde již trend rovnání na modrém průběhu vzorku po ošetření procesem HASL nepozorujeme, modrá křivka vykazuje v celé analyzované teplotní škále rychlejší změnu rozměru v ose Z. Zavlnění na červeném průběhu se posunulo z přibližně 125 °C na 140 °C. Při ochlazení k zavlnění na červeném průběhu nedochází.



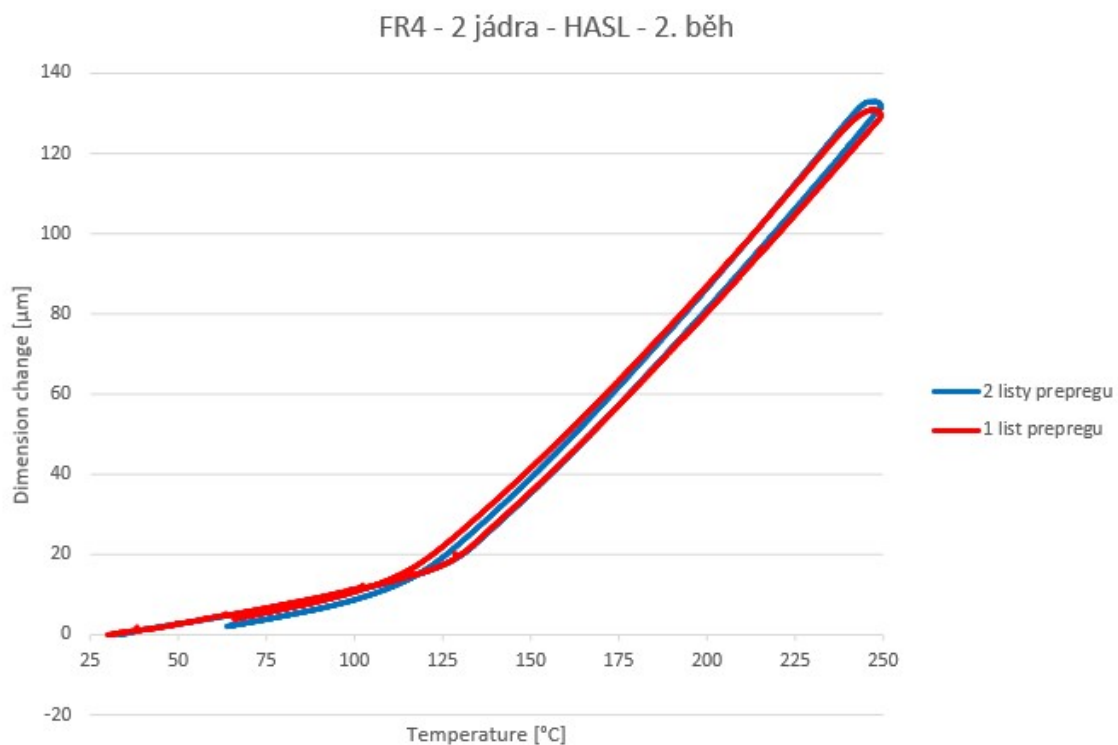
Graf 3 – Porovnání TMA pro jedno jádro FR4 ošetřené procesem HASL

Graf 3 ilustruje změnu chování desky mezi prvním a druhým během pro vzorek ošetřený procesem HASL.



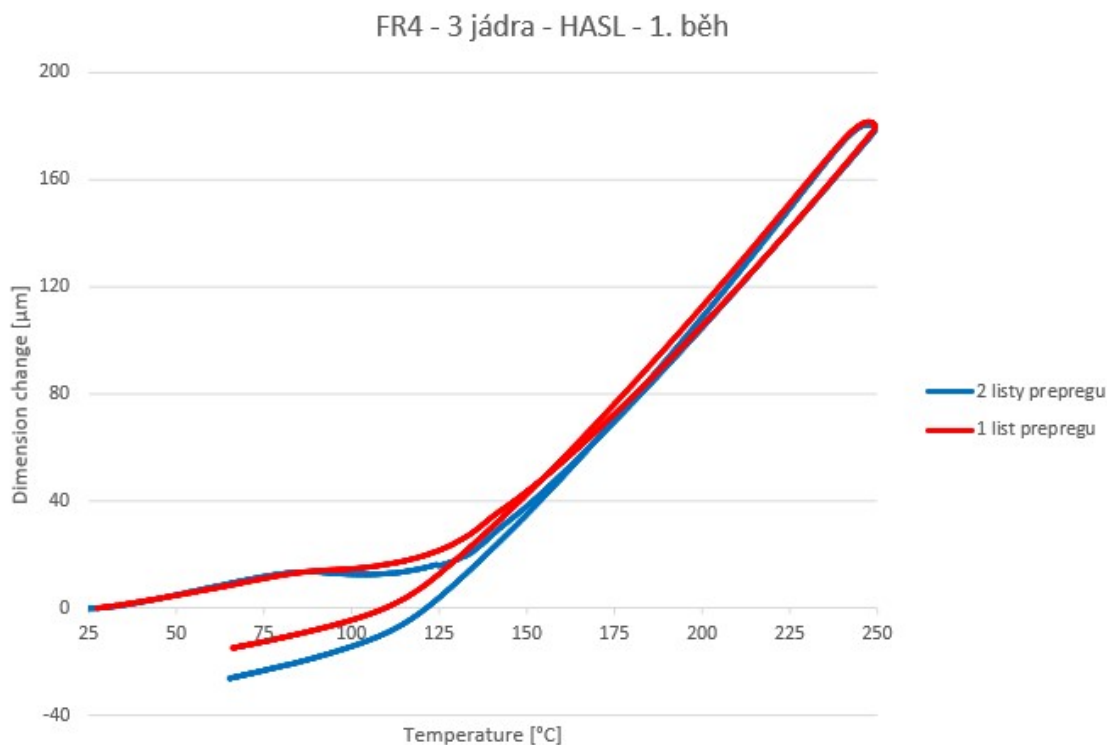
Graf 4 – Porovnání TMA pro dvě jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu

Na obou průbězích v grafu 4 můžeme pozorovat zavlňení vzorků mezi teplotami 130 °C a 150 °C. Pro modrý průběh je toto zavlňení lépe pozorovatelné.



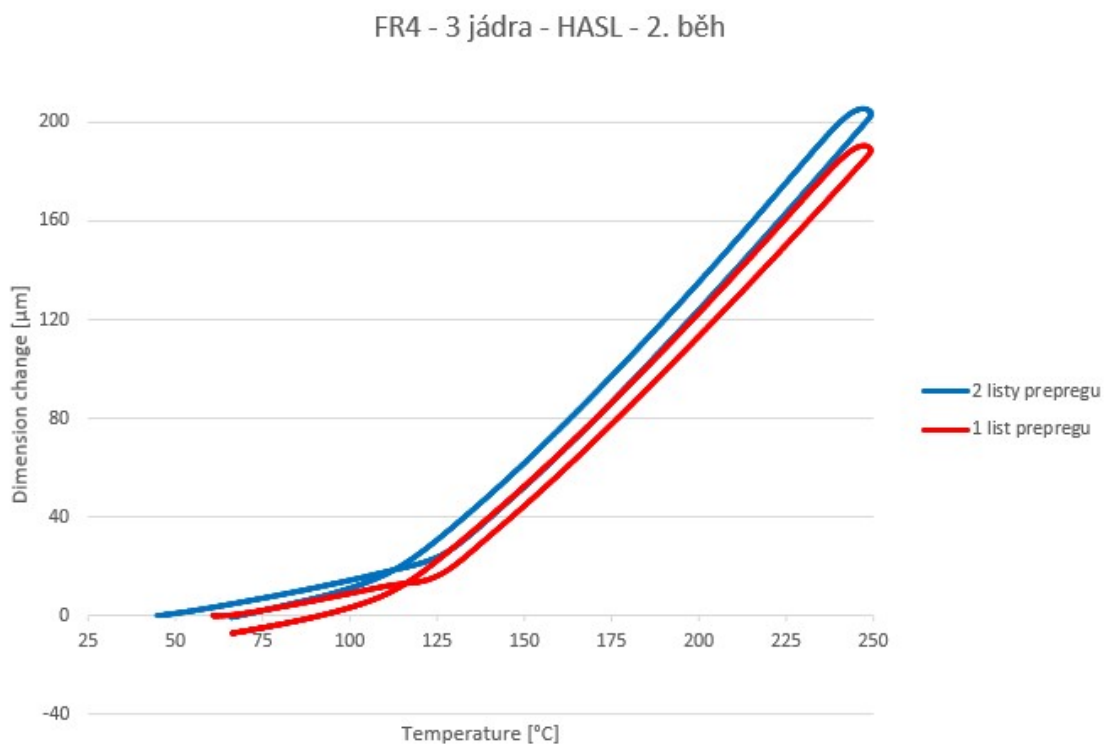
Graf 5 – Porovnání TMA pro dvě jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu

Pro kontrast s předchozím grafem 4 se na průbězích v grafu 5 nenacházejí zvlnění okolo teploty skelného přechodu. Průběhy se zde téměř překrývají po dosažení teploty skelného přechodu. Po překonání této teploty dochází k mírně rychlejší expanzi na modrém průběhu, tedy u vzorku, ve kterém byla jádra oddělena dvěma prepregy. Při zpětném zmenšování rozměru vzorků rovněž dochází k rychlejší kontrakci vzorku s dvěma prepregy.



Graf 6 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu

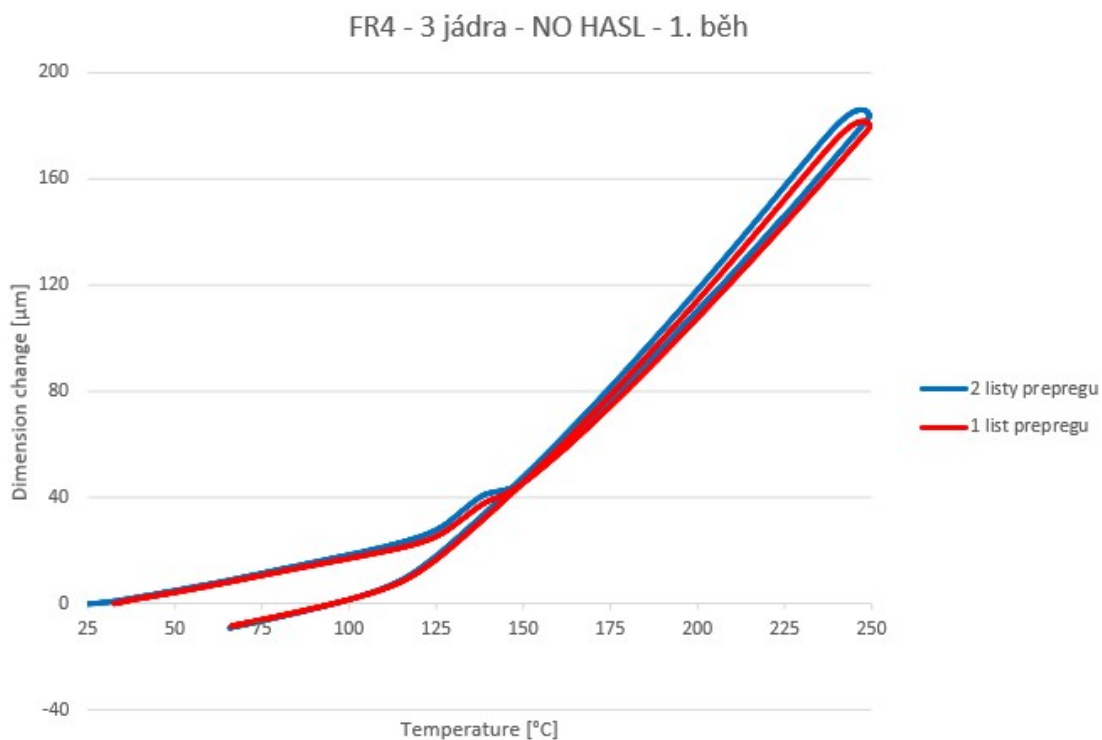
Vzorky, jejichž průběhy jsou zobrazeny v grafu 6, byly ošetřeny procesem HASL. I u nich při prvním běhu můžeme pozorovat zavlňení způsobené nerovnostmi vzorku v místě kontaktu se sondou. U modrého průběhu došlo k výraznější anomálii průběhu. Můžeme však pozorovat, že rychlost změny rozměru v ose Z pro teploty pod teplotou skelného přechodu je pro oba vzorky téměř totožná a pro teploty nad teplotou skelného přechodu se rychleji rozpíná respektive smršťuje vzorek s dvěma prepregy.



Graf 7 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu

V grafu 7 se nacházejí průběhy stejných vzorků jako v grafu 6, tentokrát při jejich druhém běhu. U modrého průběhu zde není pozorovatelné rovnání desky, ke kterému došlo při prvním běhu. Můžeme tedy konstatovat, že se vzorek při tepelném namáhání při prvním běhu alespoň dočasně vyrovnal.

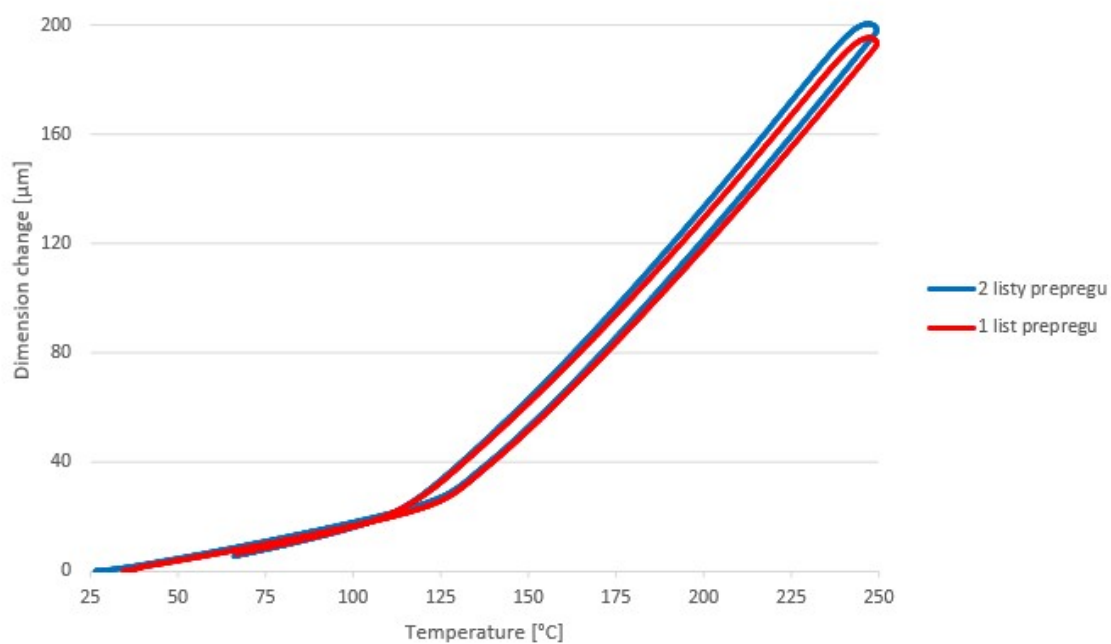
I v tomto případě se vzorek s dvěma prepregy rozpínal rychleji při teplotách převyšujících teplotu skelného přechodu, avšak na tomto grafu to není zřejmé kvůli rozdílným počátečním teplotám.



Graf 8 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu

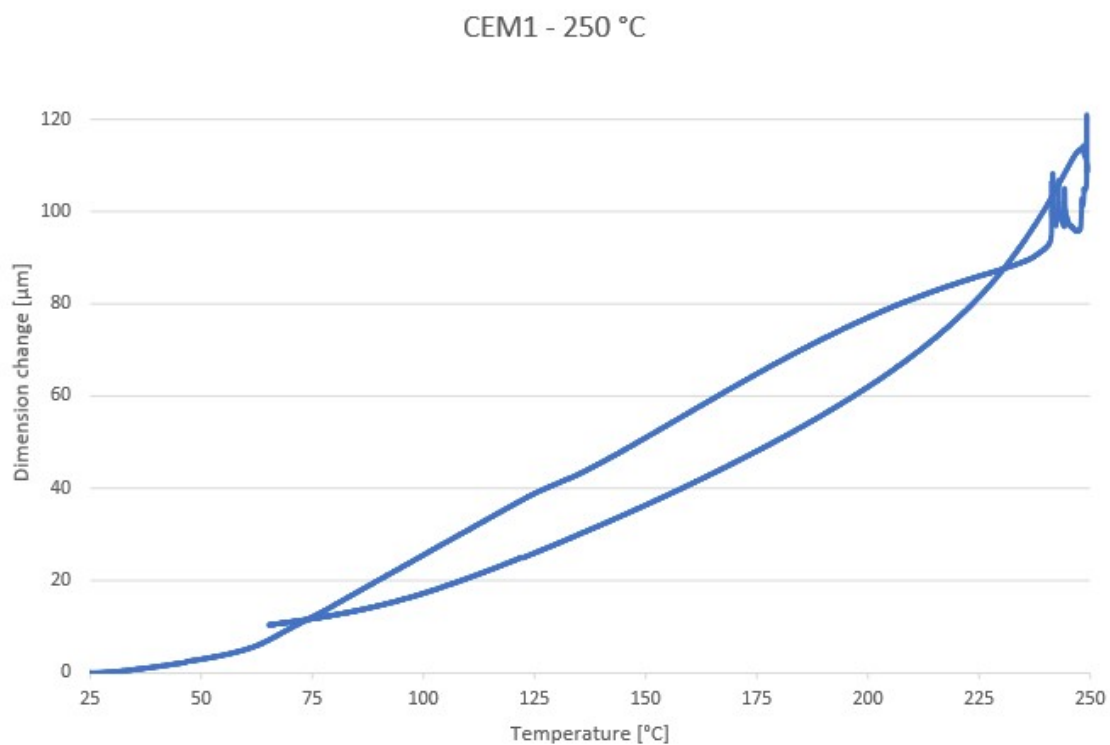
Obdobně jako u vzorků, které prošly procesem HASL, můžeme i v grafu 8 vidět rychlejší expanzi vzorku s dvěma prepregy. V rámci prvního běhu znovu dochází k zavlňení průběhu, a to mezi teplotami 125 °C a 145 °C.

FR4 - 3 jádra - NO HASL - 2. běh



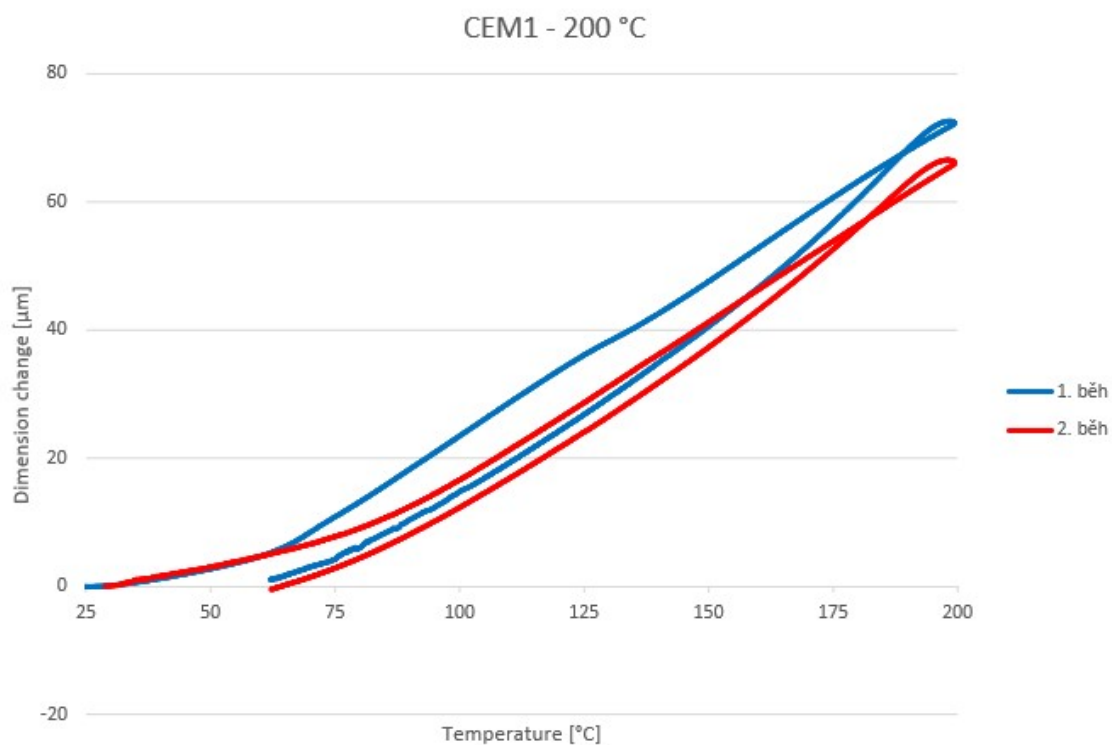
Graf 9 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu

Při druhém běhu týchž vzorků vymizí v grafu 9 zavlňení a můžeme rovněž pozorovat rychlejší expanzi vzorku s dvěma prepregy.



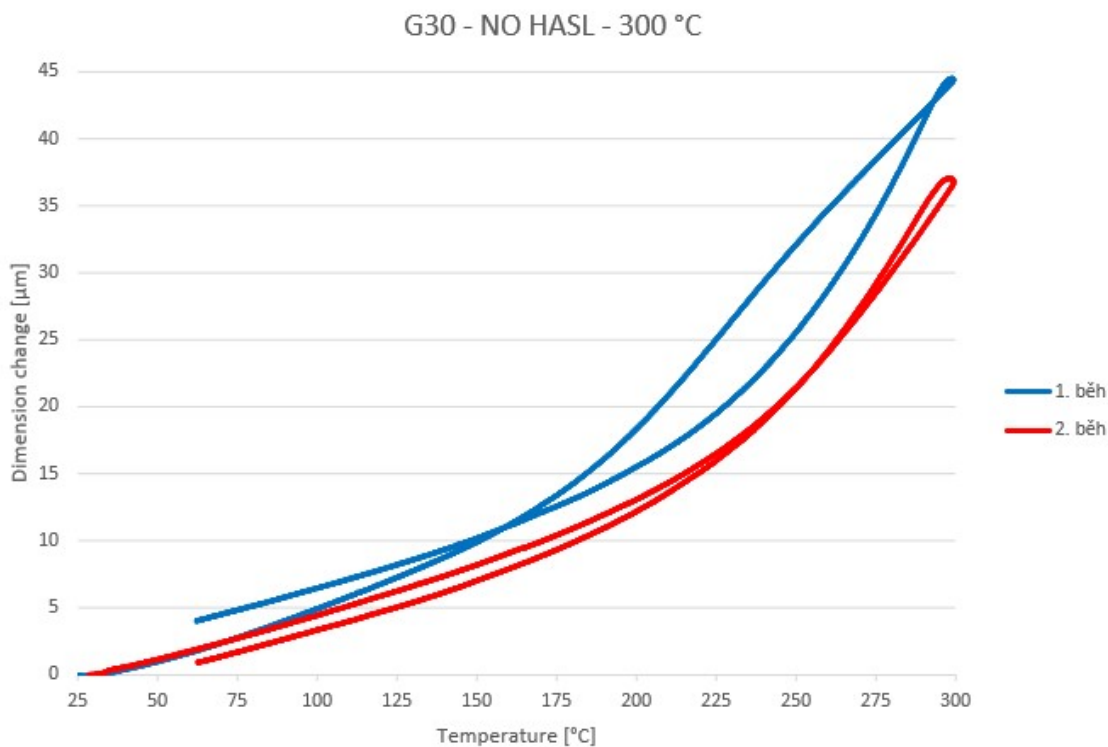
Graf 10 – Ukázka průběhu změny rozměru v závislosti na teplotě pro substrát CEM1 při běhu do 250 °C

Jak bylo v popisu měření předestřeno, deska z materiálu CEM1 nepřežila úpravu procesem HASL. V grafu 10 můžeme vidět průběh termomechanické analýzy, kdy byl vzorek z tohoto substrátu testován do teploty 250 °C. Při opakovaném měření vzorků tohoto substrátu docházelo k obdobným anomáliím, které byly i doprovázeny zvukovým efektem. V tomto případě k této anomálii došlo přibližně při teplotě 240 °C. Ukázalo se, že při této teplotě dochází k delaminaci vzorku v ose Z.



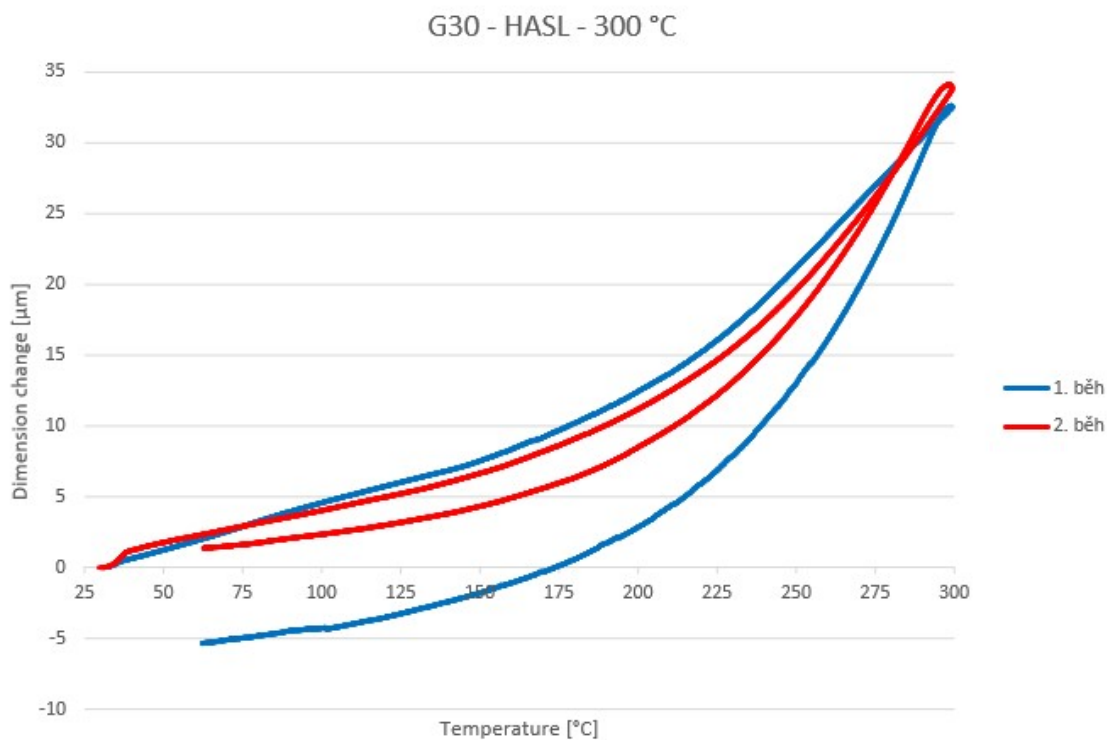
Graf 11 – Porovnání TMA pro substrát CEM1 do 200 °C

Jak bylo demonstrováno v grafu 10, sledovaný vzorek na rozdíl od vzorků z FR4 nepřežil celý běh až do 250 °C. Tento substrát byl proto nadále analyzován pouze do 200 °C. V grafu 11 můžeme pozorovat změnu teploty jeho skelného přechodu, která se při druhém běhu zvýšila v porovnání s prvním během. Tepelným namáháním během prvního běhu došlo k vytvrzení desky a trvale se změnila její vlastnosti.



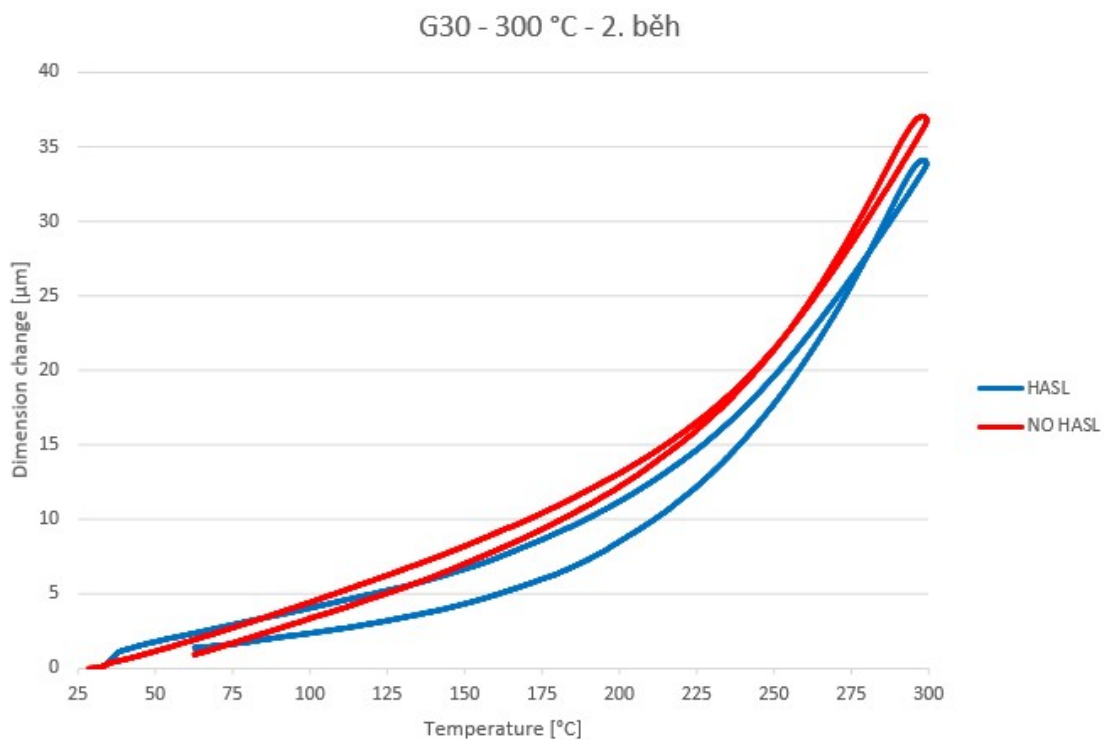
Graf 12 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C NO HASL

Vzorek ze substrátu G30 sledovaný v grafu 12 neprošel tepelným namáháním při procesu HASL u výrobce desky. U prvního běhu můžeme pozorovat rychlejší rozpínání v ose Z než při druhém běhu. Kvůli neobvyklému konkávnímu prohnutí u modrého průběhu se hodnota teploty skelného přechodu při prvním běhu výrazně odlišila od typické hodnoty pro materiál G30. Při druhém běhu se vzorek vytvrzený prvním během choval již standardně.



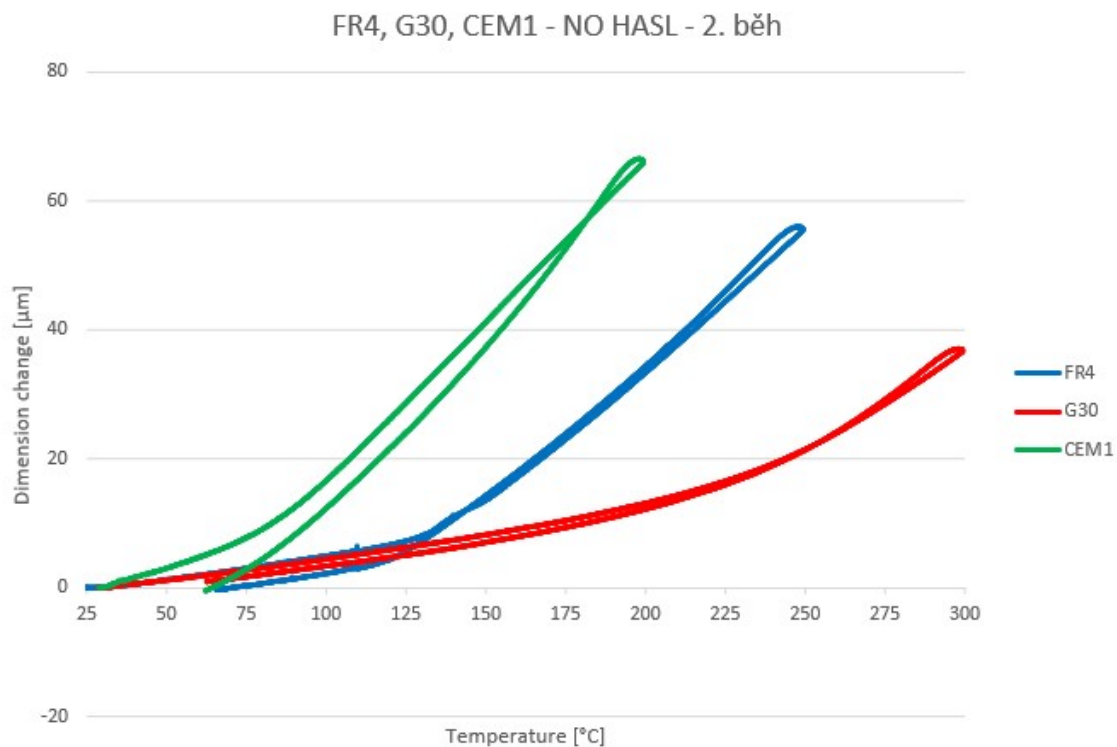
Graf 13 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C po projití procesem HASL

Kvůli vyšší typické hodnotě skelného přechodu pro materiál G30 byla zvolena vyšší maximální teplota, po kterou bude vzorek z tohoto substrátu analyzován. Při vytvrzování desky v prvním běhu došlo k jejímu zmenšení o přibližně 5 µm. Po druhém běhu se finální rozměr vzorku téměř nemění od jeho počátečního rozměru před druhým během, jak je patrné z grafu 13.



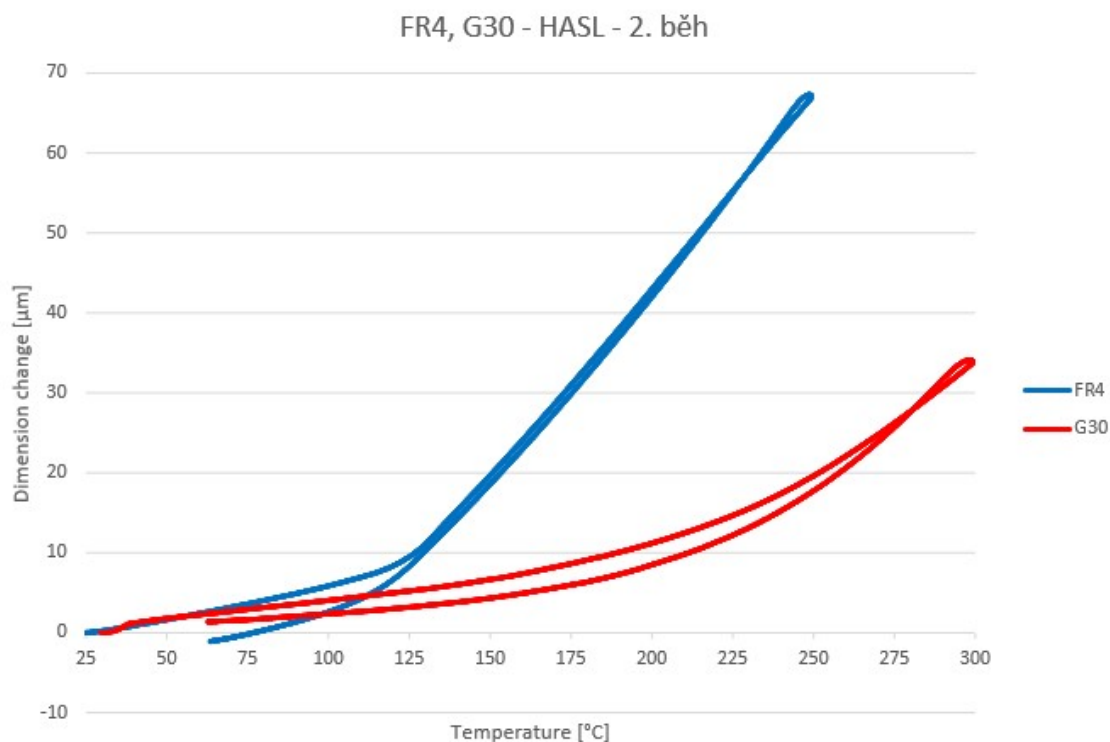
Graf 14 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C HASL x NO HASL při druhých bězích

I přes mírnou chybu měření u modrého průběhu na počátku analýzy můžeme v grafu 14 pozorovat, že se rozměr v ose Z měnil rychleji u vzorku, který nebyl ošetřen procesem HASL.



Graf 15 – Porovnání TMA pro všechny tři substráty NO HASL s jedním jádrem při druhých bězích

V grafu 15 se nachází grafické porovnání rozměrové změny v ose Z pro všechny tři substráty neošetřené procesem HASL. Teplotní roztažnost v ose Z vyšla viditelně největší u materiálu CEM1. Pro vzorky vyrobené z FR4 a G30 můžeme vidět, že rychlost expanze vzorků před dosažením teploty skelného přechodu byla srovnatelná. Pro lepší porovnání směrnic pro teploty přesahující teploty skelných přechodů materiálů FR4 a G30 by bylo nutné vzorek z materiálu G30 proměřit do vyšších teplot.



Graf 16 – Porovnání TMA pro substráty FR4 a G30 s jedním jádrem ošetřené procesem HASL při druhých bězích

Vzorek CEM1 nebylo možné analyzovat z důvodu delaminace, ke které došlo při procesu HASL. V grafu 16 tak porovnám alespoň chování substrátů FR4 a G30 po tepelném namáhání při ošetření procesem HASL v druhých bězích. Rozdíl změny rozměru v ose Z u vzorku ze substrátu FR4 před i po teplotách skelných přechodů je výrazný ve srovnání se vzorkem ze substrátu G30. U vzorků, které neprošly procesem HASL, se toto chování neukázalo (viz graf 15).

6.4. Vyhodnocení měření

U vybraných vzorků od každého materiálu v následujících tabulkách uvedu výsledky analýzy. Nalezneme v nich následující veličiny:

- T_{\max} [°C] - teplota, do které byl daný vzorek zatěžován
- $l_{\text{poč}}$ [μm] - počáteční rozměr vzorku
- Δl_{\max} [μm] - maximální výchylka velikosti od počáteční hodnoty $l_{\text{poč}}$
- T_{g1} [°C] - empirická hodnota teploty skelného přechodu při oteplování vzorku
- T_{g2} [°C] - empirická hodnota teploty skelného přechodu při ochlazování vzorku
- α_1 [K⁻¹] - koeficient teplotní roztažnosti před dosažením T_{g1}
- α_2 [K⁻¹] - koeficient teplotní roztažnosti mezi T_{g1} a T_{\max}
- α_3 [K⁻¹] - koeficient teplotní roztažnosti mezi T_{\max} a T_{g2}
- α_4 [K⁻¹] - koeficient teplotní roztažnosti po poklesnutí pod T_{g2}

Pro výpočet koeficientu teplotní roztažnosti používám vzorec

$$\alpha_i = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \quad (1)$$

Hodnoty jsem bral z lineárních oblastí získaných grafů, l_0 je menší z krajních rozměrů vzorku v daném teplotním úseku, dl je změna velikosti desky v ose Z a dt je změna teploty.

Každý vzorek vykazuje lineární charakteristiku ve čtyřech úsecích. Mezi prvním a druhým úsekem nalezneme T_{g1} a mezi třetím a čtvrtým úsekem T_{g2} . Výjimkou je vzorek V13, tedy materiál CEM1, kde je teplota skelného přechodu příliš nízká a čtvrtý lineární úsek zde proto nenalezneme. U tohoto vzorku tedy neuvádím koeficient α_4 a teplotu T_{g2} .

Dle dodaných katalogových listů od výrobce by měly být typické hodnoty teplot skelných přechodů a koeficientů teplotní roztažnosti v ose Z následující:

- pro FR4 teplota skelného přechodu T_g 135 °C.
- pro CEM1 koeficienty teplotní roztažnosti před T_g 100 a po T_g 320 ppm/K⁻¹.
- pro G30 T_g typicky 250 °C a koeficienty teplotní roztažnosti 50 a 250 ppm/K⁻¹.

Jelikož dodané katalogové listy neobsahovaly vždy údaj o teplotě skelného přechodu i teplotních roztažnostech materiálu v ose Z, dohledal jsem referenční hodnoty z jiných zdrojů dostupných na internetu. V nich jsem našel, že FR4 mívá běžně koeficienty

teplotní roztažnosti v ose Z cca 50 ppm/K⁻¹ před teplotou skelného přechodu a cca 250 ppm/K⁻¹ po překročení teploty skelného přechodu. Teplota skelného přechodu pro materiál CEM1 se pohybuje okolo 90 °C. [22] [23]

Vzorek		T _{max} [°C]	l _{poč} [μm]	Δl _{max} [μm]	T _{g1} [°C]	T _{g2} [°C]
FR4_1 jádro_0 prepreg_HASL	1. běh	250	1537,2	60,2	124,9	122,4
	2. běh	250	1524,7	67,3	124,8	120,9
FR4_1 jádro_0 prepreg_NO HASL	1. běh	250	1523,7	56,3	125,0	124,9
	2. běh	250	1520,9	56,0	137,8	128,5
FR4_2 jádra_2 prepregy_HASL	1. běh	250	3314,8	120,6	136,0	124,3
	2. běh	250	3299,1	132,9	133,5	123,0
FR4_2 jádra_2 prepregy_NO HASL	1. běh	250	3305,3	117,1	145,9	128,3
	2. běh	250	3296,2	126,8	138,9	126,1
FR4_3 jádra_2 prepregy_HASL	1. běh	250	5205,4	180,6	139,0	123,8
	2. běh	250	5172,8	205,6	137,3	116,8
FR4_3 jádra_2 prepregy_NO HASL	1. běh	250	5080,5	186,0	139,8	124,9
	2. běh	250	5061,4	200,4	134,9	123,3
FR4_3 jádra_1 prepreg_HASL	1. běh	250	4795,3	181,6	138,9	122,7
	2. běh	250	4783,5	190,5	134,2	113,8
FR4_3 jádra_1 prepreg_NO HASL	1. běh	250	4791,8	181,7	141,0	123,4
	2. běh	250	4773,6	195,3	134,6	121,1
FR4_2 jádra_1 prepreg_HASL	1. běh	250	3167,7	126,4	129,6	120,5
	2. běh	250	3159,1	130,9	131,6	121,2
FR4_2 jádra_1 prepreg_NO HASL	1. běh	250	3128,5	126,2	127,5	126,1
	2. běh	250	3126,8	123,5	134,4	123,4
G30_HASL	1. běh	300	1559,2	32,6	207,5	227,0
	2. běh	300	1548,7	34,1	212,2	223,2
G30_NO HASL	1. běh	300	1554,9	44,5	174,1	232,5
	2. běh	300	1545,8	37,1	219,6	229,6
CEM1_NO HASL	1. běh	200	1576,9	72,6	61,1	-
	2. běh	200	1570,8	66,5	84,4	-

Tabulka 2 – Data odečtená a vypočtená z naměřených hodnot I

Vzorek		α_1 [ppm/K ⁻¹]	α_2 [ppm/K ⁻¹]	α_3 [ppm/K ⁻¹]	α_4 [ppm/K ⁻¹]
FR4_1 jádro_0 prepreg_HASL	1. běh	12,9	289,3	312,1	75,8
	2. běh	55,3	301,6	303,4	73,2
FR4_1 jádro_0 prepreg_NO HASL	1. běh	50,2	240,8	273,9	44,8
	2. běh	48,1	270,2	277,6	50,2
FR4_2 jádra_2 prepregy_HASL	1. běh	34,2	270,3	289,1	55,1
	2. běh	51,2	290,7	290,2	52,6
FR4_2 jádra_2 prepregy_NO HASL	1. běh	52,6	266,1	286,2	58,7
	2. běh	54,2	281,4	282,9	58,4
FR4_3 jádra_2 prepregy_HASL	1. běh	30,1	269,7	288,5	65,8
	2. běh	56,2	297,5	271,9	61,3
FR4_3 jádra_2 prepregy_NO HASL	1. běh	52,4	264,0	283,4	61,3
	2. běh	51,4	283,9	281,1	60,4
FR4_3 jádra_1 prepreg_HASL	1. běh	42,4	280,8	295,9	62,8
	2. běh	52,2	301,1	265,2	68,0
FR4_3 jádra_1 prepreg_NO HASL	1. běh	53,9	280,9	285,9	60,0
	2. běh	54,8	294,1	280,9	58,9
FR4_2 jádra_1 prepreg_HASL	1. běh	33,9	290,1	289,8	53,5
	2. běh	51,1	293,0	287,7	60,1
FR4_2 jádra_1 prepreg_NO HASL	1. běh	53,7	272,9	284,5	61,4
	2. běh	50,4	284,4	275,2	58,2
G30_HASL	1. běh	40,9	147,3	265,5	35,6
	2. běh	31,8	168,2	234,0	24,1
G30_NO HASL	1. běh	57,0	167,2	264,5	51,2
	2. běh	46,2	177,2	228,7	50,0
CEM1_NO HASL	1. běh	87,9	306,8	320,2	-
	2. běh	97,4	315,2	319,1	-

Tabulka 3 – Data odečtená a vypočtená z naměřených hodnot II

Z naměřených dat získaných při termomechanické analýze jsem vytvořil tabulky 2 a 3.

Pro vzorky z materiálu FR4 můžeme z tabulek vidět, že až na několik výjimek (při prvních bězích) se koeficient α_1 pohybuje okolo hodnoty 50 ppm/K⁻¹. Při zpětném ochlazování se hodnota α_4 pohybuje spíše okolo 60 ppm/K⁻¹. Hodnoty koeficientů α_2 a α_3 oproti tomu příliš neodpovídaly očekávaným 250 ppm/K⁻¹ jakožto typické hodnotě pro substrát FR4, ale pohybovaly se okolo 270-290 ppm/K⁻¹. Teplota skelného přechodu Tg_1 se pohybovala do 10 % od uvedené hodnoty 135 °C v katalogovém listu. Lze si povšimnout, že při druhých bězích se získaná hodnota měla tendenci k této typické hodnotě oproti prvním běhu většinou přiblížit. Výjimky představoval vzorek V1 (FR4 s jedním jádrem ošetřený procesem HASL) a vzorek V3 (FR4 s dvěma jádry a dvěma prepregy ošetřený procesem HASL). V druhém případě však šlo jen o menší korekci, která se mírně vzdálila od již v prvním běhu velmi blízké hodnoty. Hodnoty teplot skelného přechodu při ochlazování vzorku Tg_2 se příliš k očekávané hodnotě 135 °C nepřibližovaly a spíše se pohybovaly v rozmezí 120-125 °C.

Nelze tvrdit, že by na hodnoty teplot skelných přechodů či koeficientů teplotní roztažnosti v ose Z vzorků ze substrátu FR4 měly zásadní vliv počty prepregů použitých ke spojování jader při výrobě.

Až na dva vzorky z materiálu FR4, V2 a V10 (oba NO HASL), vždy došlo při zahřívání vzorku k větší expanzi v ose Z při druhém běhu. Při porovnání desek se stejným počtem jader i prepregů docházelo častěji k větší expanzi u vzorků, které byly ošetřeny procesem HASL. Ze získaných dat vzorků se stejným počtem jader a obdobným ošetřením (HASL/NO HASL) se jasný závěr o změně rozměru v ose Z v závislosti na počtu použitých prepregů vyvodit nedá.

Při porovnání průběhů prvních běhů u vzorků FR4 si můžeme povšimnout, že zvlnění okolo teploty skelného přechodu se více projevovalo u vzorků, které neprošly u výrobce procesem HASL, tedy nebyly dodatečně tepelně namáhány a vytvrzeny, než u vzorků, které procesem HASL prošly. Pokud bychom porovnali první běhy vzorků NO HASL s rozdílnými počty prepregů, zvlnění bylo výraznější u vzorků s více prepregy.

U materiálu G30, tedy vzorků V11 a V12, můžeme vidět, že teplota skelného přechodu nedosahovala očekávaných cca 250 °C, které uvádí výrobce v katalogovém listu. Hodnota teploty skelného přechodu Tg_1 vzorku V12 (NO HASL) při prvním běhu byla výrazně nižší díky nestandardnímu průběhu rozpínání desky v ose Z při zahřívání. Mimo tuto anomálii se hodnoty Tg_1 pohybovaly spíše okolo 210 °C. Při druhém běhu se hodnoty Tg_1 přiblížily očekávané hodnotě, podobně jako u vzorků z FR4. Hodnoty Tg_2 se pohybovaly v rozmezí 225-230 °C. Z naměřených dat bych tedy usoudil, že je hodnota skelného přechodu dodaných vzorků zhruba 225 °C. Je však možné, že pokud by se měřilo do vyšších teplot nežli 300 °C, přesněji by se odečetla hodnota skelného přechodu z grafického výstupu termomechanické analýzy a mohla by se přiblížit uváděným 250 °C.

Vypočtené koeficienty teplotní roztažnosti α_1 a α_4 pro vzorek V12 (NO HASL) se blížily očekávaným 50 ppm/K⁻¹ uváděným v katalogovém listu. Nebylo tomu tak ale u vzorku V11 (ošetřený procesem HASL). Vypočtený koeficient α_2 se nepřiblížoval očekávané hodnotě ani u jednoho z měřených vzorků, vypočtený koeficient α_3 se naopak v obou případech pohyboval v rámci 10% odchylky od 250 ppm/K⁻¹.

Oproti vzorkům z materiálu FR4 se u vzorků G30 změny rozměru v ose Z po projití procesem HASL liší. Zde vzorky po projití procesem HASL vykazují menší změny nežli vzorky, které procesem HASL neprošly. Vzorek V12 (neošetřený procesem HASL) navíc při druhém běhu vykazoval výrazně menší rozměrovou změnu než při prvním

běhu (o 16,6 %). K takto výrazné změně u žádného vzorku z materiálu FR4 mezi jednotlivými běhy nedošlo.

Pro vzorek z materiálu CEM1 teplota skelného přechodu nevyšla dle hodnot získaných v externího zdroje. Experimentální hodnota se pohybuje okolo 90 °C, ale při prvním běhu na měřeném vzorku vyšla pouze 61,1 °C. Při druhém běhu se již teplota té experimentální přiblížila a vyšla 84,4 °C. [22]

Koeficienty teplotní roztažnosti vyšly při druhém běhu srovnatelně s jejich hodnotami v příloženém katalogovém listu od výrobce, v prvním běhu ale byly nižší než uváděné. Při prvním běhu tedy došlo k vytvrzení materiálu a při druhém běhu se již vzorek choval dle očekávání.

Jako u vzorku V12 z materiálu G30 (neošetřený procesem HASL) i zde došlo k větší změně rozměru v ose Z při prvním běhu.

Z naměřených dat lze vidět, že největšího namáhání materiálu je dosaženo při zahřívání vzorku z materiálu CEM1 již od nízkých teplot. Naopak u vzorků z materiálu G30 je do vyšších teplot toto teplotní namáhání malé ve srovnání s ostatními sledovanými vzorky.

U všech uvedených vzorků si můžeme dále všimnout, že počáteční rozměr vzorku při druhém běhu byl menší nežli při prvním běhu. Každý vzorek se tedy po prvním průchodu tepelným cyklem zmenšil.

7. Závěr

V bakalářské práci byla řešena problematika desek plošných spojů od obecného popisu, co to deska plošných spojů je, jak se vyrábí a ošetřuje, přes možné defekty desek plošných spojů až po způsoby, jak desky plošných spojů testovat.

Teoretická část se zabývá popisem jednotlivých částí desky plošného spoje jako jsou substrát, vodivá vrstva a nepájivá maska. Popsán je zde i výrobní proces desky plošných spojů na příkladu běžně užívaných desek plošných spojů ze substrátu FR4. Dále zde nalezneme používané povrchové úpravy jako ENIG, OSP či HASL a kapitolu o pájecích slitinách či tavidlech používaných při montáži součástek na vyrobenou desku. V rámci teoretické části se dále lze seznámit s několika příklady defektů desek plošných spojů a také s metodami, jakými se desky plošných spojů testují.

Praktická část práce byla zaměřena na sběr dat při termomechanické analýze různých substrátů a jejich vyhodnocení. Nalezneme zde popis použité měřící aparatury, použité vzorky s několika snímky regrese vzorků po průchodu tepelným namáháním při analyzování a popis samotného procesu analyzování. V rámci vyhodnocování byl kladen důraz na koeficienty teplotní roztažnosti v ose Z a teploty skelného přechodu sledovaných vzorků. Tyto hodnoty jsem odečítal z naměřených průběhů. V praktické části je vloženo několik grafů se stručným popisem chování sledovaných průběhů.

Cílem bylo porovnat změny chování substrátu v závislosti na tloušťce vyrobených desek, kde tato tloušťka byla ovlivněna počtem jader a počtem prepregů, které jednotlivá jádra propojovala. Dalším objektem pozorování byl vliv průchodu vzorků roztavenou pájkou na jejich vlastnosti, tedy projití procesem HASL.

Z naměřených dat lze vyvodit, že k nejmenšímu namáhání vzorku docházelo při teplotách před dosažením teploty skelného přechodu T_{g1} . Naopak největšího namáhání bylo dosaženo při chladnutí vzorků z maximální teploty při termomechanické analýze až po dosažení T_{g2} .

Na tuto práci by se dalo navázat například analýzou tepelného namáhání použitých vzorků v peci a sledováním změn jejich chování při následné termomechanické analýze v porovnání s naměřenými daty či podrobení vzorků dynamické mechanické analýze.

V rámci vypracovávání praktické části této bakalářské práce jsem se mohl přesvědčit, že dodaný materiál ne vždy odpovídá specifikaci, která je uvedena v příložených katalogových listech, a že některé důležité údaje v těchto katalogových

listech zcela chybí. Ke zjištění reálných hodnot teplot skelných přechodů a koeficientů teplotní roztažnosti v ose Z jsem použil termomechanický analyzátor.

Použité zkratky

OSP	.....	Organic Solderability Preservative – povrchová úprava
ENIG	.....	Electroless Nickel Immersion Gold – povrchová úprava
ENEPIG	...	Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold – povrchová úprava
ImAg	.....	Immersion Silver – povrchová úprava
ImSn	.....	Immersion Tin – povrchová úprava
HASL	.....	Hot Air Solder Leveling – povrchová úprava
FR4	.....	substrát – tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí
CEM1	.....	substrát – papírová výztuž obalená skelnou tkaninou s epoxidovou pryskyřicí
G30	.....	substrát – polyimidový laminát
Tg	.....	teplota skelného přechodu
α_i	.....	koeficient teplotní roztažnosti v ose Z
SMT	.....	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
SMD	.....	Surface Mount Device – součástka pro povrchovou montáž
THT	.....	Through-Hole Technology – technologie montáže součástek s vývody
LED	.....	Light-Emitting Diode
BGA	.....	Ball grid array – typ pouzdra integrovaného obvodu pro SMD
TMA	.....	termomechanická analýza/analyzátor

Seznam grafů

Graf 1 – Porovnání TMA HASL x NO HASL pro jedno jádro FR4 v 1. běhu	46
Graf 2 – Porovnání TMA HASL x NO HASL pro jedno jádro FR4 v 2. běhu	47
Graf 3 – Porovnání TMA pro jedno jádro FR4 ošetřené procesem HASL	48
Graf 4 – Porovnání TMA pro dvě jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu	49
Graf 5 – Porovnání TMA pro dvě jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu	50
Graf 6 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu	51
Graf 7 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu	52
Graf 8 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při prvním běhu	53
Graf 9 – Porovnání TMA pro tři jádra FR4 NO HASL v závislosti na počtu prepregů mezi jádry při druhém běhu	54
Graf 10 – Ukázka průběhu změny rozměru v závislosti na teplotě pro substrát CEM1 při běhu do 250 °C	55
Graf 11 – Porovnání TMA pro substrát CEM1 do 200 °C	56
Graf 12 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C NO HASL	57
Graf 13 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C po projití procesem HASL	58
Graf 14 – Porovnání TMA pro substrát G30 do 300 °C HASL x NO HASL při druhých běžích	59
Graf 15 – Porovnání TMA pro všechny tři substráty NO HASL s jedním jádrym při druhých běžích	60
Graf 16 – Porovnání TMA pro substráty FR4 a G30 s jedním jádrym ošetřené procesem HASL při druhých běžích	61

Obrázky

Obr. 1 – Vícevrstvá deska plošného spoje [2]	8
Obr. 2 – Prokov [4]	12
Obr. 3 – Různé barvy nepájivých masek [5]	13
Obr. 4 – Ohebná deska plošného spoje [6]	15
Obr. 5 – Vlevo: podíl použití materiálů Vpravo: podíl oblasti použití daných úprav [7]	20
Obr. 6 – ENIG a jeho složení [8]	22
Obr. 7 – Black Pad u ENIG [9]	29
Obr. 8 – Cíněný whisker [10]	30
Obr. 9 – Zabarvení desky v místě delaminace [11]	31
Obr. 10 – Pad Cratering [12]	32
Obr. 11 – Prasknutí prokovu [13]	32
Obr. 12 – Tombstoning [14]	33
Obr. 13 – Warpage efekt [15]	34
Obr. 14 – Shadow Moiré Measurement Principle [16]	34
Obr. 15 – In-Circuit Testing souprava [17]	36
Obr. 16 – Flying Probe Test [18]	36
Obr. 17 – Změna zbarvení způsobená korozí během klimatického testování [19]	37
Obr. 18 – Způsob určení teploty skelného přechodu pomocí termogramu získaného termomechanickou analýzou [20]	38
Obr. 19 – Q400 TMA [21]	40
Obr. 20 – Delaminovaná deska z CEM1 po projití procesem HASL	42
Obr. 21 – Desky z FR4 Vlevo = před použitím / Uprostřed = po prvním běhu / Vpravo = po dvou běžích ..	43
Obr. 22 – Desky z CEM1 Vlevo = před použitím / Uprostřed = po prvním běhu / Vpravo = po dvou běžích ..	43

Obr. 23 – Desky z G30 – Vlevo = před použitím / Vpravo = po dvou bězích	43
Obr. 24 – Detail vloženého vzorku na podstavec s měřící sondou	44

Seznam vzorců

(1) Vztah pro výpočet teplotní roztažnosti v ose Z	62
--	----

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Seznam vzorků	42
Tabulka 2 – Data odečtená a vypočtená z naměřených hodnot I.....	63
Tabulka 3 – Data odečtená a vypočtená z naměřených hodnot II.....	64

Zdroje

- [1] KHANDPUR, R. S. *Printed circuit boards: design, fabrication, and assembly*. New York: McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-146420-4.
- [2] <https://www.pcbway.com/> [cit. 2021-12-5].
- [3] *Polyimide vs FR4: Which is best for Aerospace PCBs?* [online] [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.tempoautomation.com/blog/polyimide-vs-fr4-which-is-best-for-aerospace-pcbs/>
- [4] *Detailed Procedures of Plating Copper for PCB Processing* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: https://www.pcbway.com/blog/PCB_Manufacturing_Information/Detailed_Procedures_of_Plating_Copper_for_PCB_Processing.html
- [5] *PCB Solder Mask Colors* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.pcbdirectory.com/community/pcb-solder-mask-colors>
- [6] *Flexible and Rigid/Flex Printed Circuit Boards* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.candorind.com/pcb-products/flexible-and-rigid-flex-printed-circuit-boards/>
- [7] *Organic Solderability Preservative (OSP)* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: https://www.pcbway.com/blog/PCB_Manufacturing_Information/Organic_Solderability_Preservative__OSP_.html
- [8] *ENIG* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <http://www.sharedpcb.com/new/ENIG.html>
- [9] *URBAN LEGENDS OF PCB PROCESSES: ENIG BLACK PAD* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://blog.epectec.com/urban-legends-of-pcb-processes-enig-black-pad>
- [10] *Tin Whiskers: PCB Soldering Issue* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/tin-whiskers-pcb-soldering-issue/>
- [11] *Delaminace – co to vlastně je?* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:51900/delaminace-co-to-vlastne-je->
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Typical-pad-cratering-failure-mode_fig2_260583435 [cit. 2021-12-5].

- [13] *Common Printed Circuit Failure Modes* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <http://nebula.wsimg.com/3154a1468161c2f8d6213be0e081cb6c?AccessKeyId=E5D6D3DDDDDBA073A2F5&disposition=0&alloworigin=1>
- [14] *What Is PCB Tombstoning?* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/what-is-pcb-tombstoning/>
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-warpage-effect_fig5_339373838 [cit. 2021-12-5].
- [16] Oliver Albrecht, Heinz Wohlrabe and Karsten Meier, "Impact of Warpage Effects on Quality and Reliability of Solder Joints" [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://sci-hub.se/10.1109/isse.2019.8810270>
- [17] *Circuit Board Design for In-Circuit Testing* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/circuit-board-design-circuit-testability>
- [18] *PCB Inspection and Testing Techniques* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://medium.com/supplyframe-hardware/pcb-inspection-and-testing-techniques-30631a885109>
- [19] *The Basics of Environmental Testing of Electronics* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.vse.com/blog/2020/05/14/the-basics-of-environmental-testing-of-electronics/>
- [20] https://www.researchgate.net/figure/Typical-thermomechanical-analysis-TMA-thermogram-indicating-assignment-of-glass_fig1_242137909 [cit. 2021-12-5].
- [21] <https://www.tainstruments.com/q400/> [cit. 2021-12-5].
- [22] *CHARACTERIZATION OF CEM-1 BOARDS* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.dfrsolutions.com/characterization-of-cem-1-boards>
- [23] <https://www.isola-group.com/wp-content/uploads/data-sheets/is400.pdf> [cit. 2021-12-5].
- [24] KAYA, M. *Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies*. The Minerals, Metals & Materials Society, 2019. ISBN 978-3-030-26593-9.
- [25] VARTERESIAN, J. *Fabricating Printed Circuit Boards*. Elsevier Science (USA), 2002. ISBN 1-878707-96-5.
- [26] WEI, XING-CHANG *Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging*. Taylor & Francis Group, LLC, 2017. ISBN 978-1-1380-3356-6

- [27] ROBERTSON, Christopher T. *Printed circuit boards designer's reference: basics*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-067481-8.
- [28] *Výroba plošných spojů* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205775/mod_resource/content/1/Vyroba_plosnych_spoju.pdf
- [29] *PCB Manufacturing Process* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://www.candorind.com/pcb-manufacturing-process/>
- [30] *Considerations for Selecting a PCB Surface Finish* [online]. [cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://www.dfrsolutions.com/hubfs/Resources/services/Selecting-a-PCB-Surface-Finish.pdf?t=1509023781105>
- [31] *Guide to Troubleshooting PCBs* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://gesrepair.com/guide-to-troubleshooting-pcbs/>
- [32] *What is Aluminum PCB?* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: https://www.allpcb.com/pcb/aluminum_substrate.html
- [33] *7 PCB TESTING METHODS YOU NEED TO KNOW* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://blog.matric.com/pcb-testing-methods>
- [34] *PCB Failure Analysis: Pad Cratering* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://wpo-altertechnology.com/pcb-failure-analysis-pad-cratering/>
- [35] *VISION MEASUREMENT TECHNOLOGIES* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://akrometrix.com/measurement-vision-technologies/>
- [36] *CAUSES OF WARPAGE IN PCBS* [online]. [cit. 2021-12-5] Dostupné z: <https://rushpcb.com/causes-of-warpage-in-pcbs/>

Přílohy

Příloha 1 – Katalogový list CEM1

Příloha 2 – Katalogový list G30 VT-901

Příloha 3 – Datasheet FR4