

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Metody měření vnitřního pnutí v tlustých vrstvách

Autor práce: **Bc. Petr Kutěj**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Hlína, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr KUTĚJ**
Osobní číslo: **E20N0014P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Metody měření vnitřního pnutí v tlustých vrstvách**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s technologií tlustých vrstev.
2. Zpracujte rešerši týkající se metod pro měření vnitřního pnutí v tlustých vrstvách.
3. Navrhněte vhodný motiv pro měření vnitřního pnutí v tlustých vrstvách.
4. Pomocí navrženého motivu vybranou metodou ověřte vnitřní pnutí a vyhodnoťte získané výsledky.


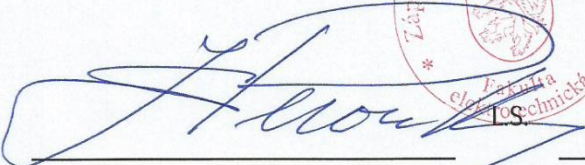
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

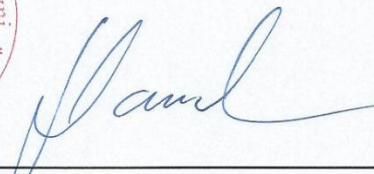
Seznam doporučené literatury:

1. HARPER, Charles A., ed. a SERGENT, Jerry E., ed. Hybrid microelectronics handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 1 sv. (v různém stránkování). ISBN 0-07-026691-3.
2. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Hlína, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem technologií tlustých vrstev, dále je zde uveden popis metod měření vnitřního pnutí v tlustých vrstvách. Je zde proveden návrh experimentálního přípravku pro měření vnitřního pnutí metodou nosníku a tato metoda byla otestována na 10 skupinách vzorků, které obsahovaly pasty stříbrné, dielektrické a jejich kombinaci. V hlavní části jsou interpretovány výsledky měření, které potvrzují proveditelnost a funkčnost vybrané metody.

Klíčová slova

Tlusté vrstvy, metody měření pnutí v tlustých vrstvách, měření pnutí ve vrstvách, pnutí, metoda nosníku.

Abstract

This thesis describes the technology of thick films, where are described methods for measurement of inner tension in thick films. In this thesis is made a proposal of experimental preparation for measuring inner tension according to Cantilever (Beam) method. This method was tested by 10 groups of specimens which contains silver paste, dielectric paste and their combination. In the main part, the results are discussed, and the results confirm the feasibility and functionality of this method.

Key Words

Thick films, methods for measurement inner tension of thick films, measure inner tension of films, inner tension, Cantilever (Beam) method.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Hlínovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Technologie tlustých vrstev	- 2 -
1.1 Pasty pro tlusté vrstvy	- 2 -
1.1.1 Vodivé pasty	- 2 -
1.1.2 Odporové pasty	- 3 -
1.1.3 Dielektrické pasty	- 4 -
1.2 Technologie nanášení tlustých vrstev	- 4 -
1.2.1 Sítotisk	- 4 -
1.2.2 Šablonový tisk.....	- 8 -
1.2.3 Dispensing	- 8 -
1.2.4 Jetting.....	- 9 -
2 Metody měření pnutí ve vrstvách	- 10 -
2.1 Rentgenová difrakce (X-Ray diffraction)	- 10 -
2.2 Laserová skenovací metoda	- 11 -
2.3 Více paprsková metoda optického snímače (Multi-Beam).....	- 11 -
2.4 Metoda koherentního gradientního senzoru (CGS)	- 12 -
2.5 Technika mřížkového odrazu (The Grid-Reflection technique)	- 13 -
2.6 Technika metody nosníku	- 13 -
3 Praktická část.....	- 15 -
3.1 Návrh měřící metody.....	- 15 -
3.2 Návrh přípravku, šablony a lůžka	- 16 -
3.3 Popis vybraných past.....	- 17 -
3.4 Popis jednotlivých skupin vzorků	- 18 -
3.5 Realizace vzorků	- 19 -
3.5.1 Postup a realizace vzorků	- 19 -
3.6 Měření prohnutí a výpočet pnutí	- 21 -
4 Výsledky měření.....	- 23 -
4.1 Stříbrné pasty – C 8717E a C1076SD.....	- 23 -
4.2 Dielektrické pasty – QQ550 a 5704	- 24 -

4.3	Stříbrné pasty C 8717E a C1076SD – dvě vrstvy	- 25 -
4.4	Stříbrné pasty s dielektrickou pastou QQ550 a 5704.....	- 26 -
4.4.1	Krycí pasta QQ550 a stříbrné pasty C 8717E a C1076SD	- 26 -
4.4.2	Pasta pro vícevrstvé obvody 5704 a stříbrné pasty C 8717E a C1076SD-	27
-		
4.5	Porovnání všech skupin vzorků po výpalu.....	- 28 -
4.6	Změna pnutí v čase.....	- 29 -
4.6.1	Skupina vzorků QQ550	- 30 -
4.6.2	Skupina vzorků 5704	- 31 -
4.6.3	Skupina vzorků – 2 vrstvy C 8717E	- 32 -
4.6.4	Skupina vzorků – 2 vrstvy C1076SD	- 34 -
4.6.5	Skupina vzorků – C 8717E a krycí pasta QQ550	- 35 -
4.6.6	Skupina vzorků – C1076SD a krycí pasta QQ550	- 36 -
4.6.7	Skupina vzorků – C 8717E a pasta pro vícevrstvé obvody 5704	- 37 -
4.6.8	Skupina vzorků – C1076SD a pasta pro vícevrstvé obvody 5704.....	- 38 -
4.7	Další analýza past.....	- 39 -
	Zhodnocení a závěr	- 45 -
	Literatura.....	- 46 -
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Popisek	Jednotka
c	Tloušťka povlaku	(mm)
d_{hkl}	Krystalografická rovina	(-)
$E_{b,sub}$	Yangův modul pružnosti substrátu	(Pa)
E_S	Modul pružnosti	(MPa)
h	Výchylka nosníku	(mm)
L	Délka substrátu mezi upnutím a bodem měření	(mm)
t	Tloušťka substrátu	(mm)
t_f	Tloušťka filmu	(m)
t_{sub}	Tloušťka substrátu	(m)
S	Vnitřní pnutí	(MPa)
ν_s	Poissonův poměr substrátu nosníku	(-)
κ	Zakřivení substrátu	(-)
λ	Vlnová délka	(nm)
σ_f	Pnutí dle Stoneyho rovnice	(Pa)
Θ	Úhel dopadu a odrazu	(°)
<i>PLA</i>	Polyaktid (kyselina polyléčná)	

Úvod

Tenké vrstvy, potažmo tlusté vrstvy jsou v dnešní době hojně používány v elektrotechnice, zejména na vícevrstvé obvody, ale také především pro realizaci termistorů, odporových teploměrů a termočlánků. Po nanesení tlustých vrstev a výpalu vzniká mezi substrátem a nanesenou pastou pnutí, většinou charakteru tahového. Toto pnutí, pokud bude nabývat větších hodnot, může způsobit, že se substrát ohne natolik, že jeho struktura nevydrží a rozlomí se. Z tohoto důvodu je potřeba toto pnutí měřit a docílit, aby bylo toto pnutí co nejmenší. Tento problém se vyskytuje často zejména u tenkých vrstev, ale mohl by se vyskytnout i u vrstev tlustých.

Cílem této práce je seznámit se s technologií tlustých vrstev a provést literární rešerši jednotlivých metod měření vnitřního pnutí. Dalším cílem této práce je navrhnout motiv, respektive metodu pro měření vnitřního pnutí a ověřit její funkčnost a použitelnost. Jako posledním cílem této práce je interpretace a diskuze výsledků měření.

V první části této práce tedy popisují používané technologie tlustých vrstev, do kterých patří používané pasty a zejména samotná technologie nanášení tlustých vrstev. V druhé kapitole je již zpracována literární rešerše metod měření vnitřního pnutí, kde je popsáno šest metod, které byly vyvinuty. Ve třetí kapitole je popsán samotný návrh měřicí metody, potažmo přípravku, šablony a lůžka, kterými jsou dále připravovány vzorky pro ověření vybrané metody. V poslední kapitole jsou popsány výsledky měření vybraných past.

1 Technologie tlustých vrstev

S rostoucí integrací v elektrotechnice je potřeba nahrazovat klasické součástky jinými vhodnými prvky s menšími rozměry. S tím přichází i požadavek na jednoduchou a levnou technologii. Tyto skutečnosti byly jedním z podmětů ke vzniku tlustovrstvých technologií.

Tlusté vrstvy nazýváme vrstvami o tloušťce větší než 1 μm [1–3]. Tyto vrstvy jsou většinou připravovány tiskem (sítotisk a šablonový tisk [2]) pasty na vhodný substrát. V porovnání s tenkými vrstvami, které jsou vytvářeny vakuovými depozičními metodami (napařování, naprašování), je technologie tlustých vrstev levnější, protože není zapotřebí vakua [1, 2].

Tlustovrstvé pasty mohou být provedeny několika způsoby jako jsou například pasty vodivé, odporové nebo dielektrické [2, 3]. Tyto pasty se pak nanášejí na keramické substráty [4]. Po nanesení pasty je potřeba pastu zasušit a vypálit. Sušení nejčastěji probíhá v rozmezí teplot 150 °C až 200 °C, výpal pak dle druhu pasty, nejčastěji od 500 °C do 1100 °C [2]. Mezi nejčastější využití tlustých vrstev patří realizace výkonových či mikrovlnných obvodů, lze je využít v oblasti optických displejů, topných elementů, solárních článků, antén pro čipové karty, vysokonapěťové izolace, rychlé tlustovrstvé pojistky a hlavně senzory [2]. Neposlední, ale také důležitou oblastí využití tlustých vrstev, jsou též rezistory.

1.1 Pasty pro tlusté vrstvy

Pasty pro tlusté vrstvy se skládají ze tří složek [3, 4]. První je složka funkční, která udává, jestli pasta bude vodivá, odporová nebo dielektrická. Na fyzikální a elektrické vlastnosti výsledné vrstvy mají vliv velikost a tvar částic funkční složky. Tato složka je ve formě prášku [4].

Druhá složka je složka pojivová, které je také v práškové podobě. Tato složka vytváří základní matici vrstvy a vytváří vazbu mezi funkční složkou a substrátem. Může se skládat například z nízkotavného skla [2] nebo polymeru [1].

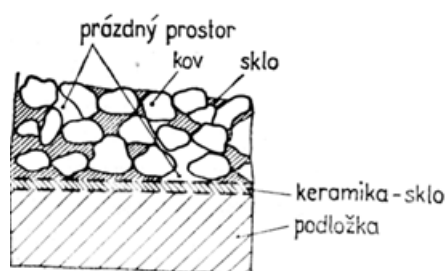
Poslední složka je technická. Tato složka umožňuje vytvořit pastu, zajišťuje potřebnou viskozitu pasty a celkové tiskové vlastnosti. Někdy se této složce říká také složka organická [4]. Při výpalu pasty se tato složka odpaří [2, 5].

1.1.1 Vodivé pasty

V tlustovrstvých obvodech se vodivé pasty používají k vytvoření obvodů, k propojení částí obvodu, na kontakty rezistorů a elektrody kondenzátorů. Dále se mohou využívat

k propojení vodivých ploch a vývodů elektrických součástek [6]. Vodivou vrstvou se stává pasta až po jejím výpalu. Vlastnosti, které jsou požadovány od vodivých vrstev, jsou například dobrá elektrická vodivost, chemická a mechanická stabilita, pájitelnost, dobrá adheze a nízká cena [6]. Pasty musí mít velký rozsah vypalovacích teplot, jelikož mohou být použity s ostatními druhy past, zároveň si ale musí udržet své dobré elektrické i mechanické vlastnosti [6].

Vodivé pasty jsou složeny z funkční složky ve formě částíček drahých kovů, jako je například zlato, platina a slitiny paladia se stříbrem a zlatem, slitiny platiny se zlatem a stříbrem, ale i mědí [1, 6]. Vodivé částice tvoří 50 % až 70 % hmotnosti pasty [4]. Během výpalu dochází, u vrstev na principu skelné vazby, k vyhoření organické složky a slinování kovových částic se sklem. Proud prochází přes kontaktní body vytvořené z miniaturních částí kovu (Obr. 1). Vodivost takovéto vrstvy je asi o třetinu menší než vodivost samotného kovu.



Obr. 1: Struktura vodivé vrstvy skelné vazby - převzato z [6]

1.1.2 Odporové pasty

Odporové pasty slouží k vytvoření tlustovrstvých odporů. Tato pasta obsahuje práškový vodivý pigment a skelnou fritu [5]. Změnou koncentrace vodivých částic v pastě lze snadno měnit vodivost odporové pasty a snadno nastavit požadovanou hodnotu odporu. Tlustovrstvé odpory by měly mít dobrou stabilitu, dobré elektrické vlastnosti a malé rozměry. Tyto pasty je možno vyrobit ve velkém rozpětí odporu, řádově mezi hodnotami 10^1 až $10^9 \Omega$ [3, 6]. Výsledné vlastnosti odporových vrstev závisí na dodržení technologického postupu, jako je dodržení teploty a doba výpalu. Teplota výpalu u těchto vrstev se pohybuje okolo 850°C , celková doba je nejčastěji mezi 30 a 60 minutami [2]. Mezi požadavky na odporové pasty patří široký rozsah odporu, stabilní vlastnosti při vysokých teplotách, nízké hodnoty teplotního součinitele odporu, nízká hodnota napěťového koeficientu odporu, nízký šum a kompatibilita s vodivými pastami. Dalším parametrem je plošný odpor, nebo někdy nazýván také jako odpor na čtverec. Ten vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru. Tato hodnota je stanovena pro danou tloušťku, kterou bude mít tlustá vrstva při dodržení

předepsaného technologického postupu [7]. Odporové pasty tvoří oxidy nebo oxidové slitiny na bázi india, thallia, ruthenia, paladia, wolframu, osmia, iridia a rhodia [8].

1.1.3 Dielektrické pasty

Dielektrické tlustovrstvé pasty jsou definovány jako vysoko viskózní pasty obsahující dielektrické nebo feroelektrické oxidy ve formě prášku a skelné frity. Mezi nejdůležitější vlastnosti těchto past patří relativní permitivita, ztrátový činitel, izolační odpor, teplotní a kmitočtová stabilita [6]. Pasta je tvořena například oxidem barnato-titaničitým (BaTiO_3) [1], ale v základě tyto pasty obsahují hliníkový nebo jiný keramický prášek a částičky skla [9]. Tyto pasty jsou určeny k vytváření tlustovrstvých kondenzátorů a používají se také jako ochranná vrstva či izolace vodivých vrstev. Složení past pro kondenzátory a pro izolační vrstvy je samozřejmě rozdílné. U kondenzátorů je například použita pasta $\text{PbO-CaO-TiO}_2\text{-Al}_2\text{-SiO}_2$ (neo-keramicko skleněná pasta) [10], u izolačních past je například použita pasta $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [11]. Ochranná dielektrická vrstva se vyznačuje vysokou hodnotou měrného odporu, nízkou hodnotou permitivity a malým ztrátovým činitelem [12]. Jelikož může dojít k ovlivnění kryté vrstvy, hodnota výpalu musí být malá, okolo $500\text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Tato vrstva je aplikována jako poslední.

1.2 Technologie nanášení tlustých vrstev

Tato kapitola se zabývá technologiemi nanášení tlustých vrstev. V této práci je popsán sítotisk, šablonový tisk a technologie dispensing a jetting. U sítotisku a šablonového tisku se využívá k protlačení pasty třerka, která protlačí pastu skrze síto nebo šablonu, zatímco u zbylých dvou technologií se využívá bezkontaktní nanášení past.

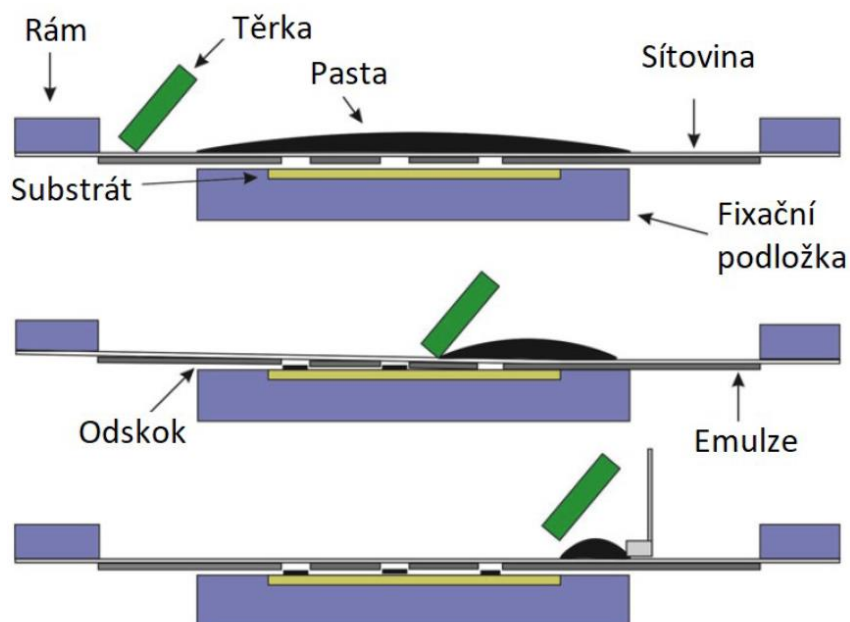
1.2.1 Sítotisk

Sítotisková technologie byla vyvinuta jako jedna z prvních technologií nanášení tlustých vrstev a je stále velmi rozšířená a vyhovující z hlediska výkonnosti a hospodárnosti. Je to technologie původně používaná k nanášení leptuvzdorných rezistů a dnes se používá pro mnohá další média (pájecí pasty, lepidla, fotorezistory, apod. [5]).

Princip sítotisku je protlačování pasty volnými otvory obrazce skrze vytvořené sítotiskové šablony (znázorněno na Obr. 2). Síto je umístěno s odskokem několika desetin milimetru od substrátu [5]. Pasta je protlačována sítem pomocí třerky. Po nanesení pasty na sítotiskovou šablonu dojde k zaplnění ok síťoviny pastou a tlakem třerky dojde k jejímu protlačení na substrát. Vlivem tlaku třerky se šablona k substrátu přibližuje, po protlačení pasty se opět šablona vrátí do původní polohy. Množství, které bude protlačeno skrze síto

na substrát, určuje viskozita pasty, povrchové napětí pasty, smáčivost substrátu a síta, tloušťka síta, tvar, sklon a poddajnost těrky [5].

Základní části systému pro sítotisk tvoří sítotisková šablona, těrka s pohyblivým mechanismem a vlastní potiskovací stroj s držákem substrátu [6]. Ten umožňuje vzájemné nastavení polohy podložky vzhledem k šabloně ve všech třech osách [6].

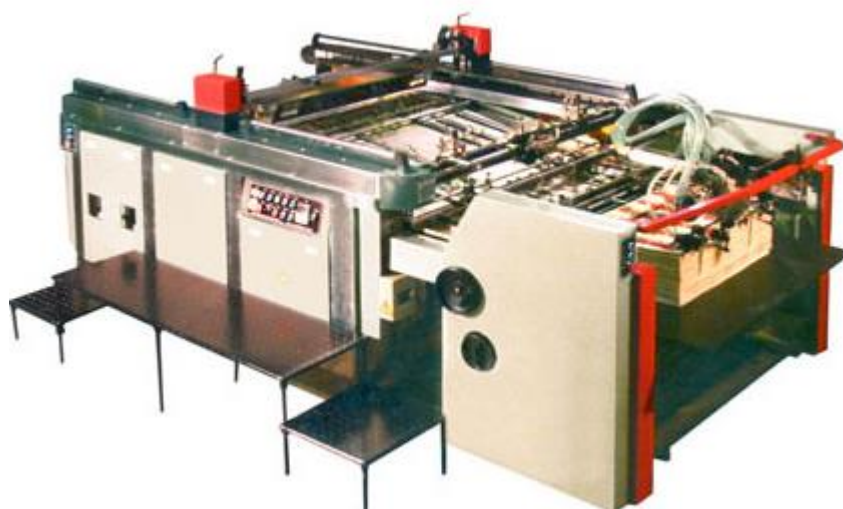


Obr. 2: Princip technologie sítotisku - převzato z [13]

1.2.1.1 Zařízení pro sítotisk

Zařízení pro sítotisk lze rozdělit na několik typů dle obsluhy systému. Zařízení pro ruční tisk, kdy obsluha pohybuje těrkou vlastní silou, je z principu zjednodušeno. Toto zařízení se skládá z konstrukce, která bude umožňovat uchycení podložky se substrátem a nastavení její polohy vodorovně či výškově od síta. Také musí zařízení obsahovat uchycení proti samovolnému pohybu, například tlakem těrky. Toho lze dosáhnout zarážkami podložky nebo podtlakem a přisátím podložky pomocí externího sacího zařízení. Poslední část tvoří systém posuvu těrky, která je většinou upevněna na ližinách nebo tyčích, a úchyt pro pohyb samotnou těrkou.

Ruční sítotisk se používá hlavně pro výrobu v menších sériích a tam, kde je hlavním kritériem pořizovací náklady na zařízení [5]. Další způsob, kterým je možné tisknout, je poloautomatický a automatický sítotisk (Obr. 3). Tyto zařízení jsou samozřejmě dražší a mnohem komplikovanější, protože je potřeba dodržet všechny parametry sítotisku dle požadavku. Tyto systémy mají poté ale mnohem větší kvalitu výsledného motivu. [5]



Obr. 3: Plně automatický sítotiskový stroj [14]

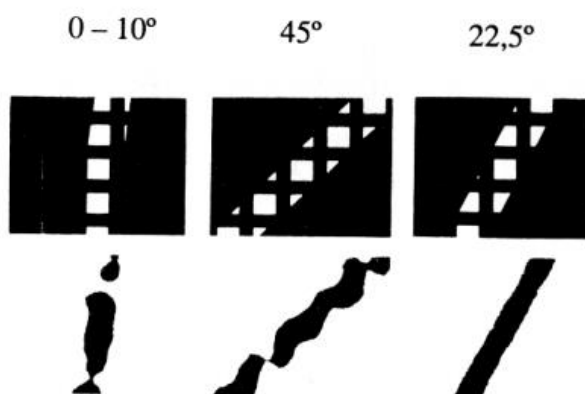
1.2.1.2 Síta

Kvalitu výsledné tlusté vrstvy ovlivňuje kvalita, stáří a provedení síta. Sítotiskové šablony jsou vytvořeny z rámu a na něm je napínáním uchycena síťovina z polyamidových vláken (silonové, nylonové) [15], polyesterových vláken [5], nerezové oceli či jejich kombinací [16]. Rámy byly dříve vyrobeny ze dřeva [15], napnula se na nich síťovina, která byla uchycena pomocí spon nebo lepidla. Dnes se rámy vyrábějí z hliníku [16] a také z oceli [16]. Tyto rámy lépe odolávají tahu síťoviny. Síťovina se na rám napne například pomocí pneumatického napínacího zařízení nebo jiným mechanickým systémem.

Dle požadavků na rozměr, přesnost požadovaného motivu a druhu pasty je zvolen správný materiál síťoviny. K zajištění dobrého průchodu pasty musí být velikost ok 2,5 až 3 krát větší než velikost částic použité pasty [5].

Síťovina tvořená ze zmiňovaných vláken, kromě ocelových, má dobré vlastnosti v tahu. Po protažení v mezních možnostech materiálu se vrátí bez problémů do původní polohy [5, 15]. Tkaniny z ocelových vláken mají téměř nulovou pružnost, ale jsou rozměrově velmi stabilní [5]. Tato vlastnost ztěžuje správnost přítlaku těrky, proto je nutné nastavit ideální podmínky, jinak může dojít k poškození těrky nebo síta. Proto se provádí kombinace kovového jádra s vrstvou polyesteru [5, 16]. Tyto vlastnosti jsou poté kompromisem mezi vlastnostmi jednotlivých řešení.

Jak již bylo zmíněno, přesnost tisku výsledného motivu mohou záviset nejen na správné volbě velikosti ok, vzdálenosti síta od podložky se substrátem, viskozitě pasty, ale i na šířce a délce dráhy těrky a samozřejmě i na úhlu natočení směru těrky (znázorněno na Obr. 4). Optimální úhel natočení těrky a směru jednotlivých vláken síťoviny je $22,5^\circ$ [5].



Obr. 4: Vliv úhlu natočení těrky a síta - převzato z [6]

1.2.1.3 Vytváření filmové matrice

Sítotisková šablona se vytváří vyplňováním sítotiskových ok pomocí fotocitlivé emulze. Zbylá oka zůstávají nevyplněná a průchozí. Využívají se 3 základní typy šablon, přímá šablona, nepřímá šablona a kombinovaná šablona. [5]

V případě přímé šablony se fotocitlivá emulze natře na tkaninová oka, provede se expozice a poté se nechá vyvolat. Nepřímá metoda využívá šablonového filmu ve formě listu. Exponování a vyvolání může být provedeno před aplikací na síto. U kombinované šablony je emulze ve formě listu. Tato emulze se na síto aplikuje před exponováním a po vyvolání. [2, 5]

1.2.1.4 Tvorba vrstvy

Celý proces sítotisku lze rozdělit do několika jednotlivých fází. Tyto fáze jsou tisk, uzavírání plochy a sušení.

V první fázi se protlačí sítotiskovou šablonou pasta. Na substrátu jsou tedy naneseny části pasty o velikosti jednotlivých ok sítotiskové šablony.

V druhé fázi dochází k uzavírání povrchu nanesené pasty sléváním do jednotlivého obrazce. Sníží se výška pasty a dojde k vyplnění otvorů způsobenými vlákny síta. Při správném nastavení parametrů zařízení, viskozitě pasty a správnému provedení tisku, dojde k vytvoření jednotné vrstvy bez mezer a bublin [5].

V poslední fázi se natištěná vrstva suší, kdy se vypaří těkavé složky z pasty. Doba sušení se odhadne ze známého podílu a druhu těkavých látek obsažených v pastě [5].

1.2.1.5 Tepelné zpracování

Pokud je pasta natištěna na substrátu a zasušena, je potřeba ji ještě vypálit. Teplota vypalování závisí na druhu pasty. Při výpalu dochází k chemické reakci jednotlivých komponent a dochází k pevnému spojení se substrátem. Velikost teploty u anorganických

past je okolo 500 °C až 1100 °C [1–3, 6] a u polymerových past se doporučená teplota pohybuje okolo 150 °C až 200 °C [3, 6]. Pro výpal se většinou používají pece tunelové. V ojedinělých případech je použita pec muflová, spíše tedy v laboratorních podmínkách.

1.2.2 Šablonový tisk

Jak již název napovídá, k vytvoření výsledného motivu se využívá šablona, ale na rozdíl od sítotisku je zde šablona vytvořena z fólie s otvory. Princip tisku je shodný se sítotiskem, jen výsledná vrstva bude mít jiné vlastnosti. Tloušťka vrstvy, při použití šablonového tisku, bude dána tloušťkou fólie, dá se tedy mnohem snadněji nastavit. Výsledný vzor bude jednodušší, přesnější než sítotisk a je vhodný pro tisk drobných motivů, jenž by šly sítotiskem obtížně vytvořit.

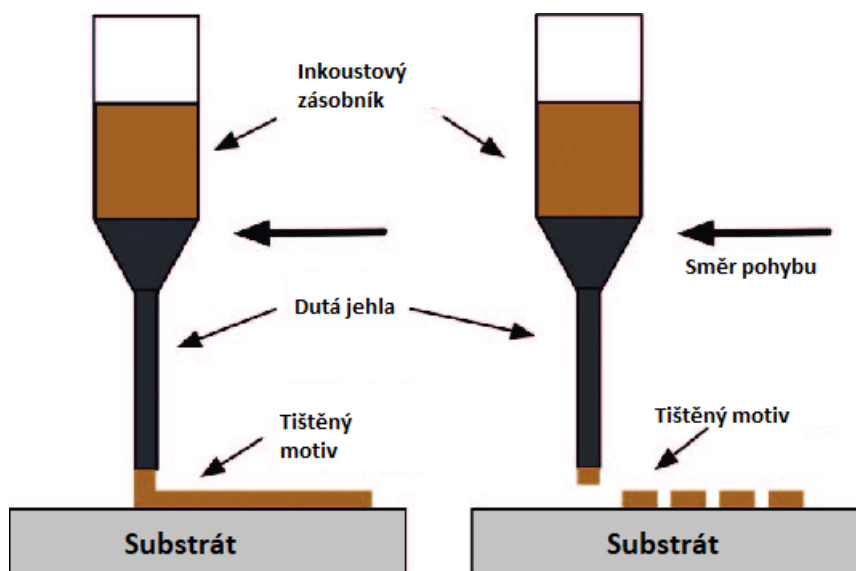
Materiál fólie je zvolen dle nároků na životnost, chemickou stálost vzhledem k typu pasty či motivu na fólii. Tato fólie může být vyrobena z oceli, mosazi, mědi, ale i z plastových materiálů [6]. Plastové fólie jsou samozřejmě cenově levnější než fólie z kovu.

Vytvořit motiv na fólii lze několika způsoby. Nejméně náročná metoda je leptání. Tato metoda má ovšem značná omezení a to především v minimálním průměru vytvořených otvorů, které by neměly být menší než je 150 % šířky fólie [6]. Další způsob vytvoření motivu je řezání laserem, kde lze dosáhnout větší přesnosti a menších průměrů motivu [6]. Pokud není hlavním kritériem cena, bude laserové řezání upřednostněno před leptáním.

1.2.3 Dispensing

Dispensing je založený na principu nanášení pasty na substrát jejím vytlačěním ze zásobníku. Je to tedy aditivní proces, který využívá k nanášení plné nebo duté jehly. Dispensing s plnými jehlami je pomalejší, protože proces nanášení pasty spočívá v namočení jehly v pastě a poté se přesune na místo, kam má být pasta nanášena. Dutá jehla se přesune přímo na místo, kam chceme pastu nanést a vytlačíme přesné množství pasty. Proto je dutá jehla přesnější a rychlejší. [5]

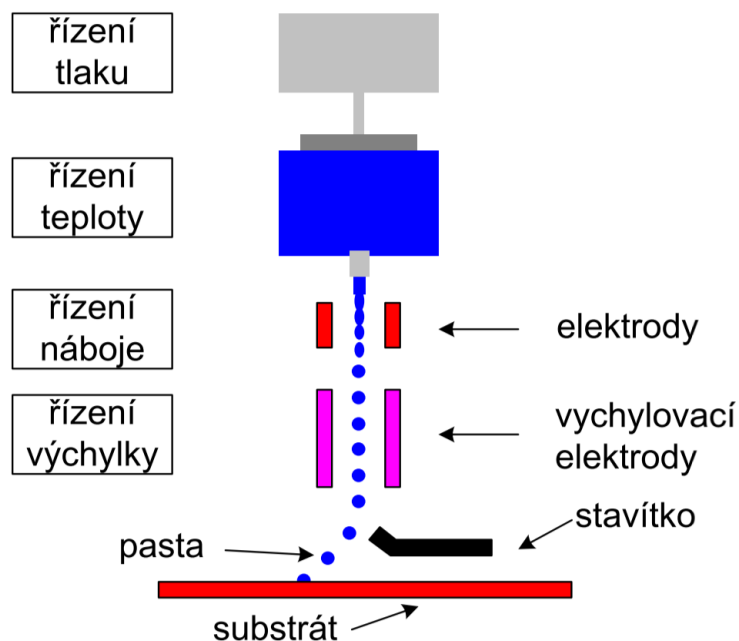
Rychlost nanášení u této technologie není závratně velká, a proto se vyvinuly jiné a lepší technologie, které mají základ právě v této technologii. Mluvíme zde o bezkontaktním dispensingu a jettingu. [5]



Obr. 5: Dispensing technologie - převzato z [17]

1.2.4 Jetting

Jetting je složitější technologie bezkontaktního dispensingu, která vypouští kapičky pasty a pomocí vychylovacích elektrod řídí jejich směr. Předností této metody je rychlejší a přesnější nanášení pasty na substrát. Příklad jetting systému je vidět na Obr. 6. [5]



Obr. 6: Princip jetting technologie - převzato z [18]

2 Metody měření pnutí ve vrstvách

Při procesu jako je sušení nebo vypalování pasty, může docházet k formování přechodných napětí, která mohou způsobit popraskání [19]. Ta dále mohou vést k přítomnosti zbytkového pnutí ve vypálené pastě. V disertační práci [20] je uvedeno, že pro detekci pnutí se využívá stanovení středních hodnot zbytkových napětí. Metody pro měření jsou založeny na měření zakřivení potištěného substrátu [21], nebo na detekci mřížkové deformace pomocí rentgenového paprsku. Bylo vyvinuto několik metod k určení průměrného pnutí ze zakřivení substrátu, které se dá určit pomocí Stoneyho rovnice (2.2) [19, 20, 22].

Techniky pro měření pnutí v tlustých vrstvách nejsou zdaleka rozšířené, proto je v této práci vycházeno z technik pro měření pnutí v tenkých vrstvách. Techniky pro měření pnutí v tenkých vrstvách můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupina je založena na přímém měření elastického napětí využívající rentgenový paprsek [20, 23] a dá se využít pouze u materiálů s krystalickou mřížkou. Druhá skupina je založena na zakřivení plochy substrátu nebo jeho průhybu [23].

Technika přímého rentgenového paprsku poskytuje více informací, protože obsahují měření všech komponent pnutí. V podstatě mohou být rentgenové paprsky použity k detekci prostorových změn napětí ve filmu. Jak již bylo řečeno, rentgenové paprsky lze využít jen na materiál s krystalickou strukturou. Pro nekrytalické materiály lze využít metodou druhou, která měří zakřivení či průhyb substrátu. Často se tato metoda využívá i pro materiály krystalické, neboť je jednodušší ji použít.

2.1 Rentgenová difrakce (X-Ray diffraction)

Tuto nedestruktivní metodu lze využít k měření zakřivení povrchu tenké vrstvy u krystalického substrátu. V principu je rentgenová difrakce založena na Braggově zákonu, který se týká normálního rozestupu mezi krystalografickými rovinami (d_{hkl}), úhlu dopadu a odrazu (θ) pro určitý řád n a vlnové délky λ [20, 24, 25].

$$2d_{hkl}\theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

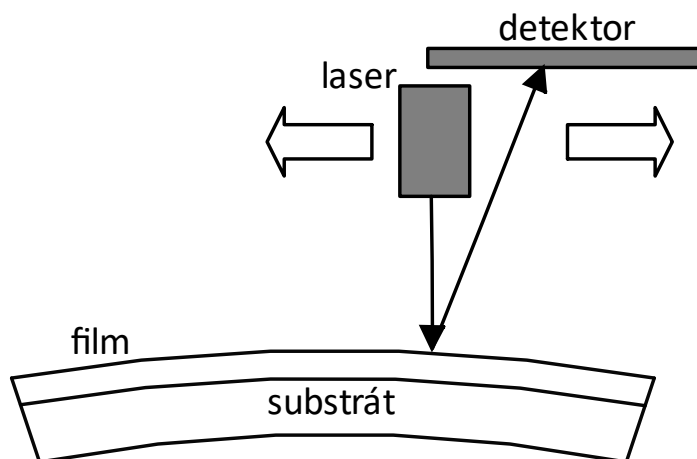
Technika rentgenové difrakce funguje podobně jako konvenční metoda laserového skenování, která je popsána níže. Rentgenový paprsek prochází přes vzorek a je difraktován mřížkovými rovinami substrátu. Zde je zvolen vrchol, jehož pozice je brána jako funkce při detekci, přičemž je zároveň korelována s vrstvou substrátu. Poté je pnutí (σ_f) spočteno podle Stoneyho rovnice [20, 26–28]:

$$\sigma_f = \frac{\kappa E_{b,sub} t_{sub}^2}{6t_f}, \quad (2.2)$$

kde κ je zakřivení substrátu, $E_{b,sub}$ je Youngův modul pružnosti substrátu (Pa), t_f je tloušťka filmu a t_{sub} je tloušťka substrátu (m).

2.2 Laserová skenovací metoda

Metoda laserového skenování se běžně používá pro rychlé stanovení průměrných napětí vrstvy, protože princip této techniky, jak již bylo řečeno výše, je velmi jednoduchý (stručně naznačen na Obr. 7). Laserový paprsek skenuje povrch potištěného substrátu. Paprsek se odráží od povrchu substrátu pod úhlem θ , který závisí na orientaci povrchu. Při skenování nové polohy se paprsek odráží pod jiným úhlem, pokud je substrát zakřiven. K detekci změny úhlu lze použít fotodetektor odraženého laserového paprsku [20, 23]. Nevýhodou této metody jsou ovšem vibrace. Zařízení je velmi citlivé na mechanické vibrace [20], což vedlo k vytvoření tzv. více paprskové metodě optického snímače.



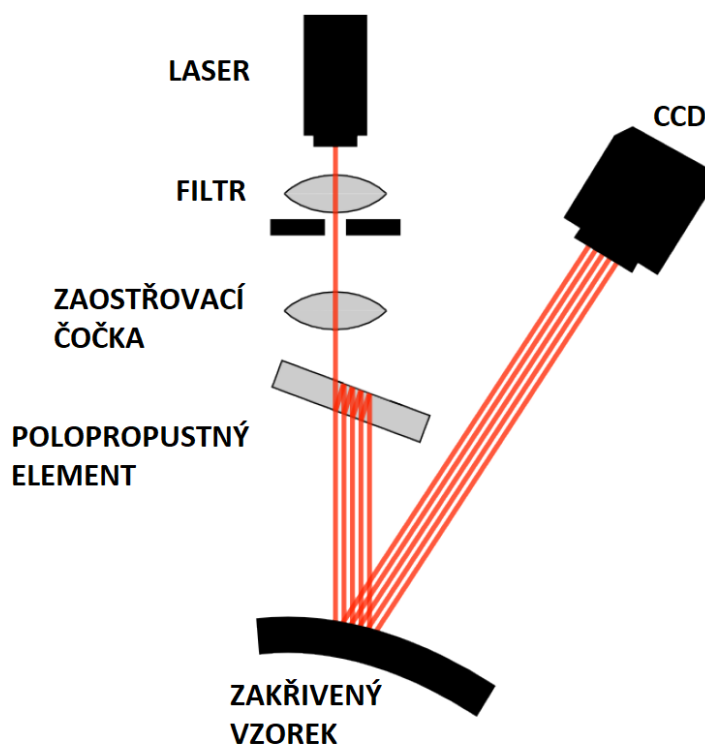
Obr. 7: Laserová skenovací metoda - převzato z [20]

2.3 Více paprsková metoda optického snímače (Multi-Beam)

Princip této metody je obdobný jako v předchozí kapitole (naznačen na Obr. 8) a je podrobně popsána v literatuře [20, 29]. Laserový paprsek prochází skrze optický element, který část paprsku odráží a část propouští skrz. Tento optický element má na jedné straně polopropustnou část, takže část paprsku je odrazena a část propuštěna. Na druhé straně tohoto optického elementu se paprsek pouze odráží zpět do polopropustné části. Optický element většinou vytvoří od tří do pěti paprsků. Tyto paprsky poté dopadají na povrch potaženého substrátu a tím ho skenují. Odražené paprsky od substrátu snímá CCD kamera.

Může být použit i druhý element orientovaný ortogonálně k prvnímu [29], který vytvoří dvoudimenzionální pole paralelních paprsků, a tím může být vytvořena plná mapa zakřivení povrchu potaženého substrátu.

Díky více paprskovému osvětlení dochází k výraznému snížení citlivosti na vibrace nebo pohybu vzorku. Jelikož se ale vzorek musí samovolně ohýbat, není možné jej na pevno uchytit, aby se pohyb vzorku omezil. Jelikož je více paprskové měření závislé pouze na vzdálenosti mezi paprsky a není závislá na absolutní poloze paprsku, je citlivost pohybu paprsku značně redukována. Pokud dojde k vibracím na vzorku, všechny odražené paprsky se pohybují společně, takže vibracemi vyvolané změny ve vzdálenosti paprsků jsou obvykle mnohem menší než změny v poloze jednotlivých paprsků.



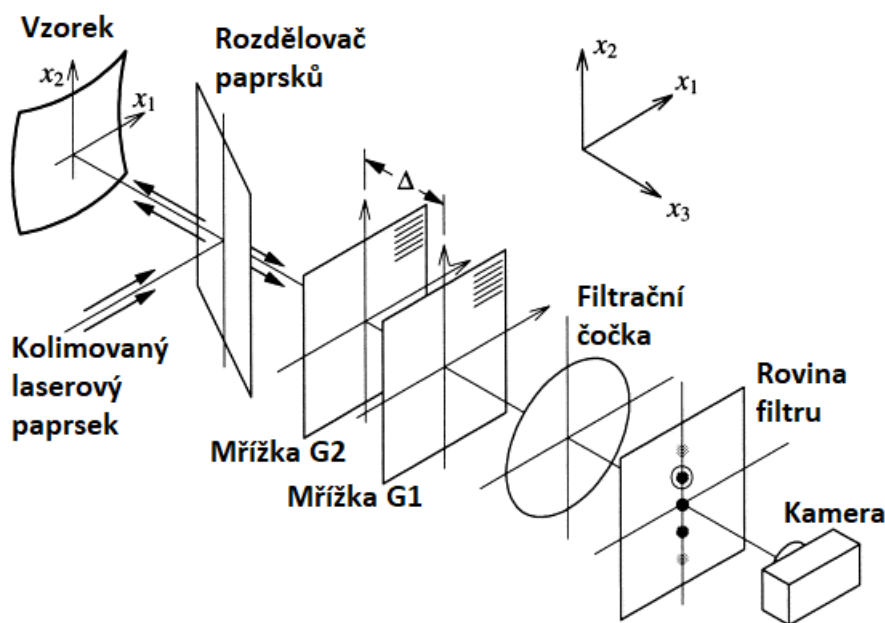
Obr. 8: Více paprskový laserový systém - převzato z [20]

2.4 Metoda koherentního gradientního senzoru (CGS)

Koherentní kolimovaný¹ laserový paprsek je směřován na povrch zakřiveného substrátu přes zrcadlo a skrze rozdělovač paprsků. Odražený paprsek z povrchu substrátu prochází skrze rozdělovač paprsků a dopadá na dvojici stejných mřížek s vysokou hustotou. Difrakční

¹ Kolimace je soustředování světelných paprsků do určitého směru.

řády ze dvou mřížek jsou prostorově filtrovány pomocí filtrační čočky za vzniku odlišných difrakčních míst na rovině filtru. Clona umístěná v této rovině odfiltruje sledované difrakční pořadí, které se poté zobrazí na rovinu filmu. Pohybem vzorku v rovině se změní interferenční obrazec. Spolu s optickými a geometrickými parametry experimentálního uspořádání se tato informace používá k výpočtu zakřivení potíštěného vzorku. [20, 30]



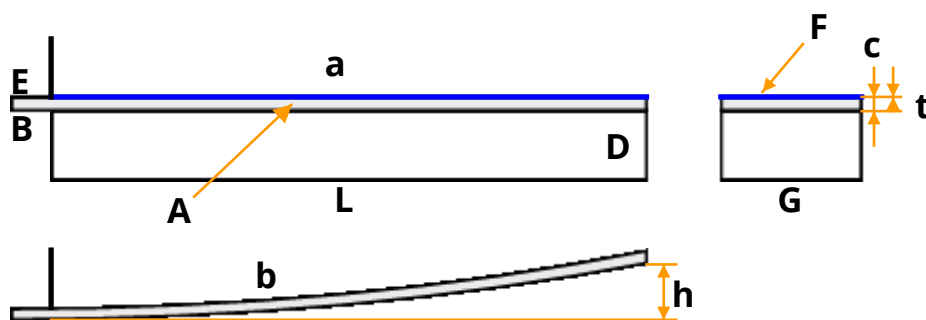
Obr. 9: Schéma metody CGS - převzato z [30]

2.5 Technika mřížkového odrazu (The Grid-Reflection technique)

Metoda odrazu mřížky detekuje odraz periodické mřížky promítnuté na vzorek. Tvar odrazu mřížky detekované CCD kamerou je díky zakřivenému vzorku zkreslený a umožňuje přesné určení zakřivení vzorku. Tato metoda je zvláště užitečná pro měření plného pole, nerovnoměrného zakřivení na velkých destičkách a plochých panelech, kde je vychýlení mimo rovinu větší než tloušťka substrátu. [20, 31]

2.6 Technika metody nosníku

Metoda nosníku je nejjednodušší metoda, kterou lze měřit vnitřní pnutí. Pro tuto metodu je zapotřebí speciální přípravek. Princip této metody je popsán na Obr. 10.



Obr. 10: Metoda nosníku - převzato z [32]

Substrát (A), ve tvaru pravoúhlého nosníku je upnut svým koncem (B) do speciálního přípravku (E). Vrstva (F) je nanášena na vnější stranu nosníku. Vnitřní pnutí nastává po tepelném zpracování, jako je sušení a výpal. Pokud nastane dostatečná adheze mezi povlakem a substrátem, vnitřní pnutí ohne substrát (A). Volný konec (D) se vychýlí z původní polohy o vzdálenost (h). Tato výchylka se měří optickým mikroskopem, který je schopen měřit s rozlišením 0,0254 mm ve vzdálenosti (L). [32]

Pro zmenšení efektu ukotvení nosníku musí být délka nosníku mezi bodem hrany a uchopení alespoň 80 mm. Měření se provádí, jakmile je vrstva dostatečně suchá. Ovrstvený nosník se uchytil do přípravku s potaženou stranou směrem vzhůru. První měření mikroskopem se provede v době, kdy má nosník minimální měřitelnou výchylku, tedy před nanášením vrstvy povlaku. Tomuto bodu se říká referenční „nulový“ bod. Poté se měří v určitých časových intervalech a z měření se vypočte průběh pnutí. Měření lze provádět jako funkci času, nebo podle proměnných jako je teplota, vlhkost, tloušťka povlaku atd.

Vnitřní pnutí se vypočte podle rovnice odvozené Corcoranem [32]:

$$S = \frac{hE_s t^3}{3L^2 c(t+c)(1-\gamma_s)} \quad (2.3)$$

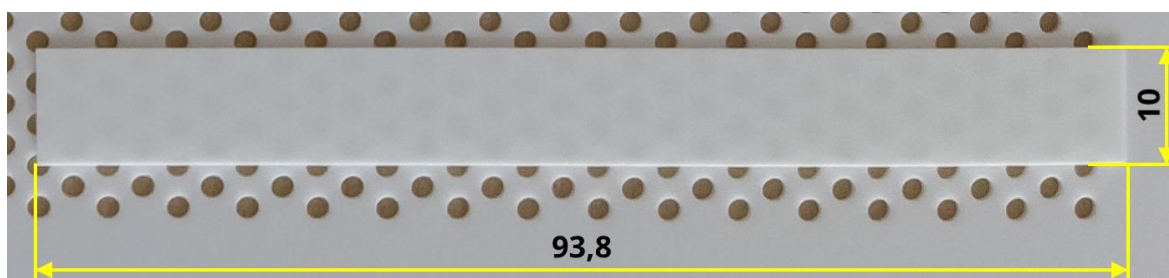
kde S je vnitřní pnutí (MPa), h je výchylka nosníku (mm), E_s je modul pružnosti substrátu (MPa), γ_s je Poissonův poměr substrátu nosníku, L je délka substrátu mezi bodem upnutí a bodem, kde se měří výchylka (mm), t je tloušťka substrátu (mm), c je tloušťka povlaku (mm).

3 Praktická část

V této kapitole je popsáno, jak bylo postupováno s návrhem měřící metody, jak probíhalo natištění vzorků a jak probíhal výpal a následné měření prohnutí a výpočet pnutí. Dále jsou zde stručně popsány vybrané pasty.

3.1 Návrh měřící metody

V teoretické části byly popsány jednotlivé metody, které se dají použít k měření pnutí vrstev. Pro praktickou část byla vybrána poslední popisovaná metoda, technika metody nosníku, která je podrobně popsána v kapitole 2.6, jelikož je z výše popsaných metod snadno realizovatelná a není potřeba žádné speciální zařízení. Abych mohl začít s návrhem přípravku pro měření, bylo potřeba si nejprve ujasnit rozměry substrátu a tištěného motivu. Použitý substrát k měření pnutí byl 96% Al_2O_3 . K dispozici bylo 40 vzorků o rozměrech $10 \times 93,8 \times 0,318 \text{ mm}$ (Obr. 11). Pro zmenšení efektu uchopení nosníku měla natištěná vrstva délku $83,5 \text{ mm}$ a tloušťka tištěné pasty byla $80 \mu\text{m}$.



Obr. 11: Vzorek substrátu - rozměry

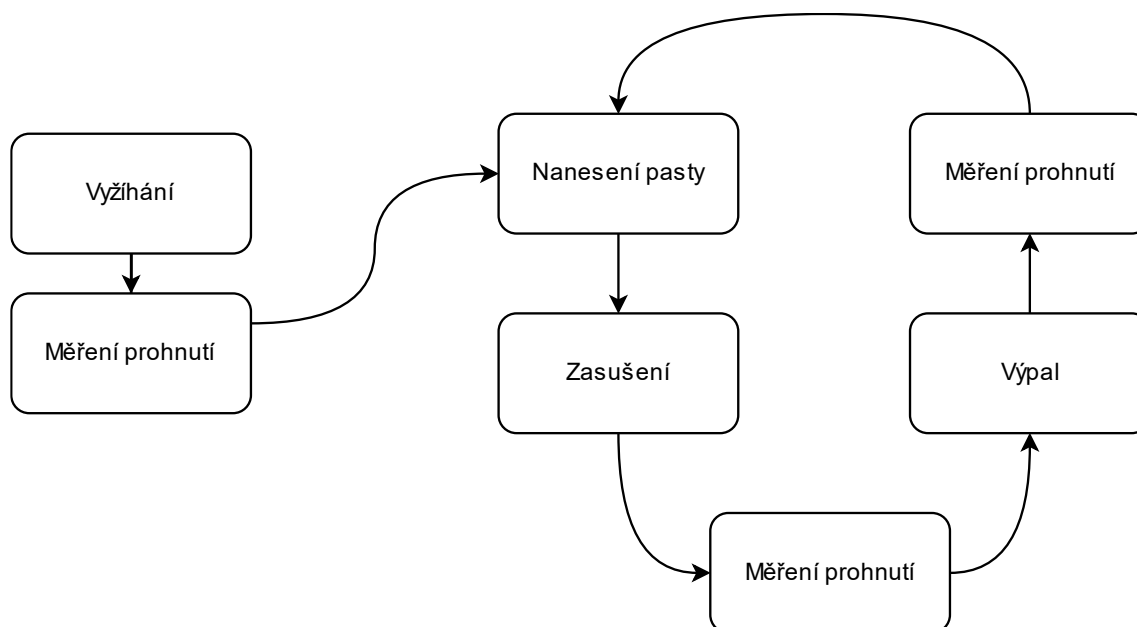
Dále bylo potřeba vytyčit jednotlivé body měření. Jelikož byla k měření použita metoda nosníku (2.6 Technika metody nosníku), měřilo se pnutí v 80 mm od uchopení nosníku kvůli zmenšení efektu uchopení. Pnutí bylo měřeno po zasušení pasty, poté po výpalu pasty. Pro měření byly zvoleny 2 pasty vodivé a 2 dielektrické. Tyto pasty jsou dále popsány v kapitole 3.3 Popis vybraných past.

Postup v bodech:

- 1) Vyžihání vzorků,
- 2) měření prohnutí na mikroskopu,
- 3) natištění pasty,
- 4) měření prohnutí na mikroskopu,

- 5) výpal vzorků,
- 6) měření prohnutí na mikroskopu.
- 7) Body 3-6 byly opakovány pro ostatní pasty.

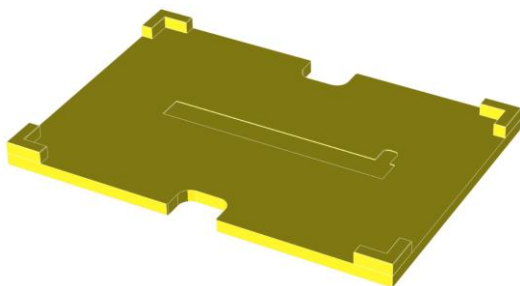
Pro lepší znázornění je tento postup doplněn grafickým znázorněním (Obr. 12).



Obr. 12: Graficky znázorněný postup

3.2 Návrh přípravku, šablony a lůžka

Dle rozměrů substrátu, uvedených v předchozí kapitole, bylo potřeba navrhnout šablonu a lůžko pro šablonový tisk. Do lůžka se musel vejít 1 vzorek substrátu a uchycení šablony. Muselo být navrženo tak, aby vzorek šel vyjmout z lůžka bez poškození samotného substrátu a rozmazání pasty. Samotný návrh lůžka s příslušnými rozměry je uveden v příloze (Příloha 1). Lůžko je vyrobeno z materiálu PLA a jeho digitální podoba je zobrazena na (Obr. 13) a reálná podoba na (Obr. 14). Lůžko bylo vytištěno na tiskárně Prusa MK3S.



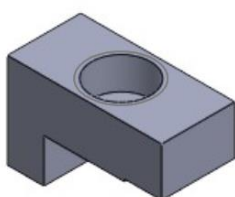
Obr. 13: Model lůžka pro síťotisk



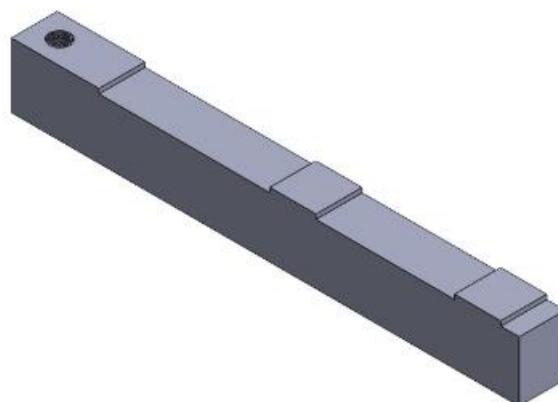
Obr. 14: Realizované lůžko

Po navržení lůžka bylo potřeba navrhnout šablonu pro šablonový tisk. Její tloušťka je $80\ \mu\text{m}$. Rozměry šablony tedy jsou $150 \times 100\ \text{mm}$ s vnitřním výřezem $8,5 \times 83,5\ \text{mm}$. Všechny potřebné rozměry jsou dále uvedeny v příloze (Příloha 3).

V neposlední řadě bylo potřeba navrhnout nejdůležitější část, samotný přípravek pro měření pnutí. Ten se skládá ze dvou částí, těla a částí k uchycení vzorku. Přípravek byl vyroben z nerezové oceli a všechny potřebné rozměry jsou dále uvedeny v příloze (Příloha 4).



Obr. 15: Přípravek – část k uchycení vzorku



Obr. 16: Přípravek – tělo přípravku



Obr. 17: Přípravek - reálné vyhotovení

3.3 Popis vybraných past

Pro zkoumání vnitřního pnutí byly zvoleny čtyři pasty, z toho jsou dvě vodivé a dvě dielektrické. V této kapitole shrnu vlastnosti a použití jednotlivých past. Teploty sušení a výpalu pro jednotlivé pasty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).

První vodivá pasta C 8717E, od firmy Heraeus Electronics, je stříbrná vodivá pasta pro tlustovrstvé materiály. Tato pasta je bezolovnatá z čistého stříbra a její aplikace je zejména pro výkonové hybridní systémy s tloušťkou vodivé vrstvy až $200\ \mu\text{m}$. [33]

Druhá vodivá pasta C1076SD od stejnojmenné firmy, je stříbro-platinová pasta. Tuto pastu lze použít k tisku jemných čar nebo velkoplošných motivů. [34]

Další pasta je dielektrická pasta QQ550 od firmy DuPont. Tato nízkoteplotní pasta je složena z bezkadmiové směsi se skleněnými zapouzdřovacími složkami a je určena pro izolaci a zároveň jako ochranná vrstva pro tlustovrstvé obvody. [35]

Poslední pasta 5704 je taktéž od firmy DuPont. Tato dielektrická pasta se využívá ve vícevrstvých obvodech jako izolace mezi jednotlivými vodivými vrstvami. Výrobce uvádí izolační odpor $> 10^{12} \Omega$ při 100 VDC. [36]

Tab. 1: Teploty a časy sušení a výpalu pro jednotlivé pasty [33–36]

Pasta	Teplota sušení (°C)	Doba sušení (min)	Teplota výpalu (°C)	Doba výpalu (min)
C 8717E	150	10-20	850	10-12
C1076SD	150	10-20	850	10
QQ550	150	10	510-525	1-2
5704	150	10-15	850	10

3.4 Popis jednotlivých skupin vzorků

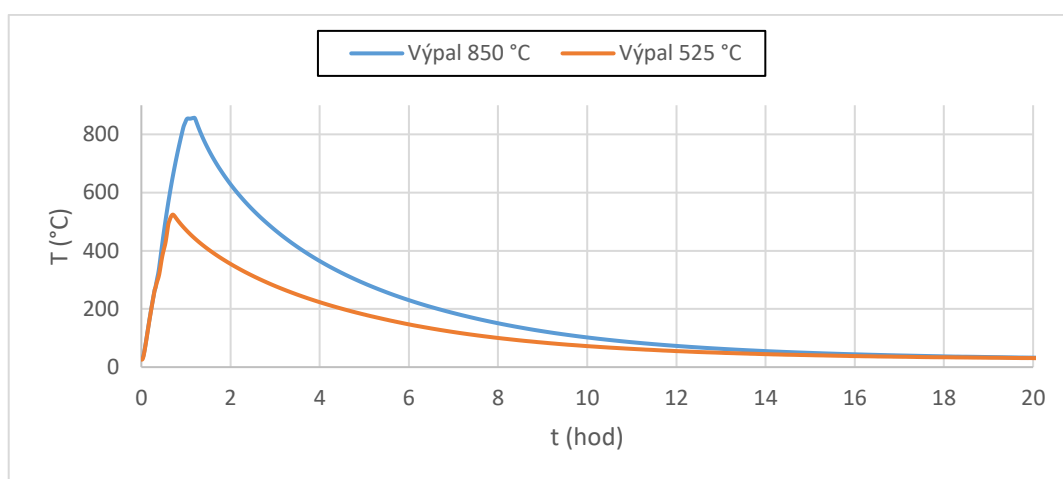
Celkem bylo měřeno 10 skupin vzorků. Nejdříve každá pasta samostatně a poté buď variace past nebo dvě vrstvy pasty, přičemž dvěma vrstvami se myslí nanesená druhá vrstva až po výpalu té první. Přehled jednotlivých skupin vzorků je uveden v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2: Jednotlivé skupiny vzorků

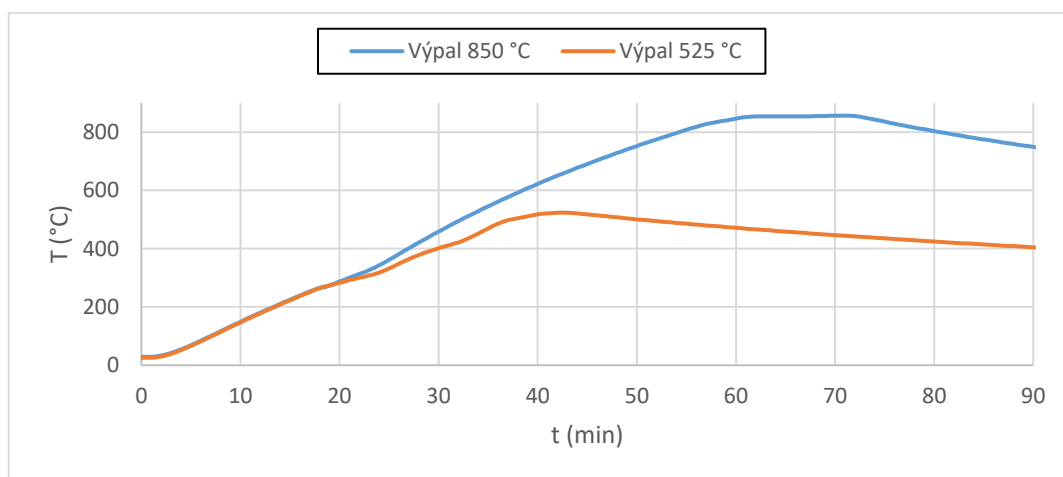
Skupina vzorků	Pasty
1.	1 vrstva vodivé pasty C 8717E
2.	1 vrstva vodivé pasty C1076SD
3.	1 vrstva dielektrické pasty QQ550
4.	1 vrstva dielektrické pasty 5704
5.	2 vrstvy vodivé pasty C 8717E
6.	2 vrstvy vodivé pasty C1076SD
7.	Spodní vrstva C 8717E a krycí vrstva QQ550
8.	Spodní vrstva C1076SD a krycí vrstva QQ550
9.	Spodní vrstva C 8717E a krycí vrstva 5704
10.	Spodní vrstva C1076SD a krycí vrstva 5704

3.5 Realizace vzorků

Před realizací samotných vzorků bylo potřeba vyzkoušet vypalovací program pece. Z předchozí kapitoly je patrné, že byly potřeba dva profily výpalu. První profil byl pro výpal na 850 °C s výdrží 10 minut na cílové teplotě. Druhý profil byl obdobný, jen pro 525 °C s výdrží 2 minuty. Zasušení jednotlivých vzorků probíhalo v jiné peci, kde se nastavila pouze teplota 150 °C a dodržel se čas zasušení 10 minut. Reálný teplotní průběh výpalu je pak zobrazen na (Obr. 18) a (Obr. 19).



Obr. 18: Celkový průběh výpalu - naměřená data



Obr. 19: Teplotní průběh výpalu - detail

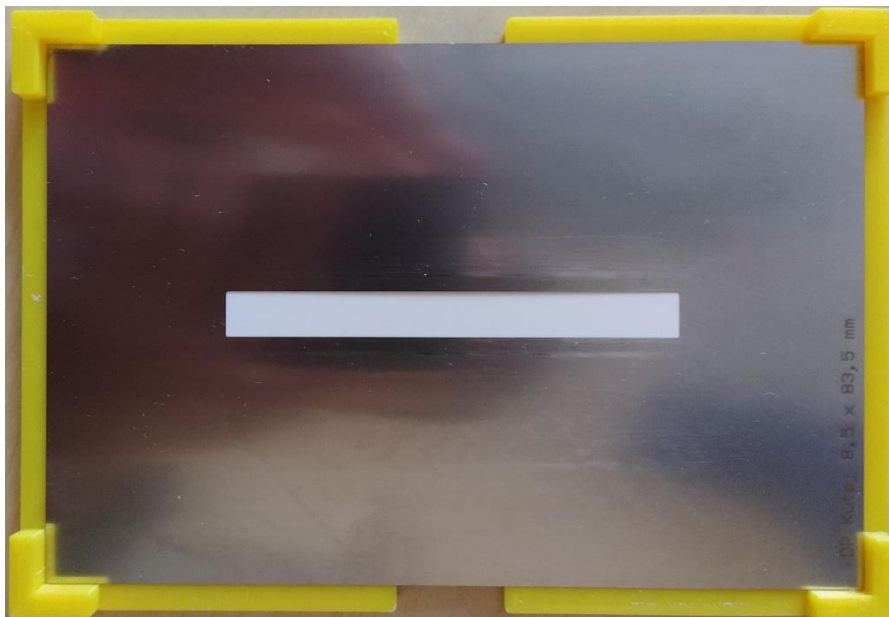
3.5.1 Postup a realizace vzorků

První potřebnou informací bylo zjistit, na které straně substrátu by se mělo tisknout. Byla snaha dodržet skutečný proces výroby, proto byla u všech 40 vzorků pod mikroskopem

identifikována strana rýhování způsobená laserem. Tato strana byla označena u všech vzorků.

Po označení správné strany rýhování byly všechny vzorky vyžehány na 850 °C a bylo změřeno jejich referenční prohnutí.

Po tomto kroku se již mohlo přesunout k natisknutí vzorků. Nejprve byl tedy umístěn první substrát do lůžka (substrát směrem vzhůru s ohledem na rýhování), byla přiložena šablona a těrkou se rovnoměrně natiskla první pasta.



Obr. 20: Lůžko, šablona a substrát



Obr. 21: Vzorky - pasta C 8717E (dole) a C1076SD (nahore) před sušením



Obr. 22: Vzorky - pasta C 8717E (dole) a C1076SD (nahore) po sušení

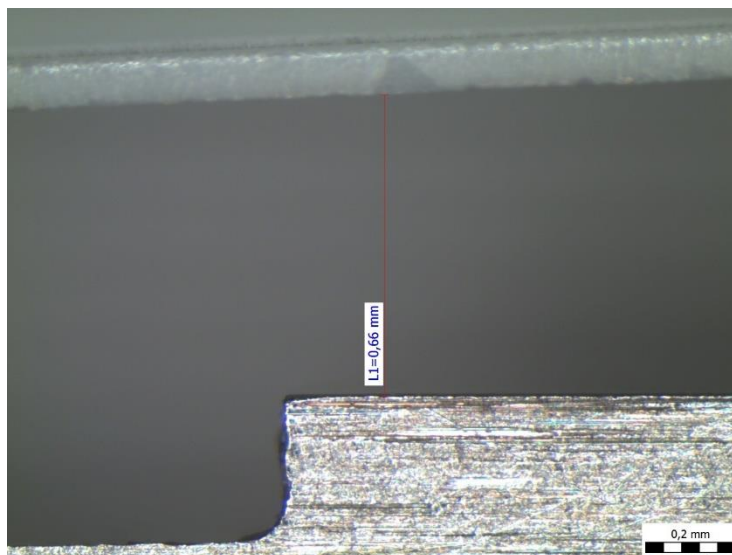
Po natištění vzorků byly vzorky zasušeny na 150 °C a poté bylo změřeno jejich prohnutí (Obr. 24). Dále byly vzorky vypáleny dle uvedené teploty v datasheetu a opět byla změřena jejich prohnutí. Tento postup byl opakován pro všechny skupiny vzorků. Příklad měřeného prohnutí je na (Obr. 25). Prohnutí bylo měřeno mikroskopem OLYMPUS SZX10 s objektivem OLYMPUS DF PL 0.75X.



Obr. 23: Vzorky - pasta C 8717E (dole) a C1076SD (nahore) po výpalu



Obr. 24: Upnutí vzorku v přípravku



Obr. 25: Vzorek 38 - 1. vrstva C 8717E - prohnutí po výpalu.

3.6 Měření prohnutí a výpočet pnutí

V této kapitole je uveden výpočet pnutí z měřeného prohnutí. V průběhu měření se zjistilo, že se vzorky mění s časem, proto byla provedena kontrolní měření. Nakonec byl proveden u vybraných skupin vzorků 2hodinový výpal a zjišťovalo se chování prohnutí vzorků a následné pnutí. Výsledky a diskuze k jednotlivým skupinám vzorků jsou uvedeny v kapitole 4 Výsledky měření.

Výpočet pnutí byl spočten ze vzorce (2.3), respektive (3.1), pro přehlednost uveden znovu:

$$S = \frac{hE_s t^3}{3L^2 c(t+c)(1-\gamma_s)}, \quad (3.1)$$

kde S je vnitřní pnutí (MPa), h je výchylka nosníku (mm), E_s je modul pružnosti substrátu (MPa), γ_s je Poissonův poměr substrátu nosníku, L je délka substrátu mezi bodem upnutí a bodem, kde se měří výchylka (mm), t je tloušťka substrátu (mm), c je tloušťka povlaku (mm). Pro jednotlivé skupiny vzorků se tento vzorec lišil pouze v tloušťce nanesené vrstvy. Zbylé hodnoty jsou již stejné pro všechny skupiny vzorků. V rovnici (3.2) je uveden výpočet pnutí pro vzorek 1 a měřeném prohnutí vzorku po vypálení:

$$S = \frac{0,95 * 32000 * 0,318^3}{3 * 80^2 * 0,065693 * (0,318 + 0,065693) * (1 - 0,21)} = 24,49, \quad (3.2)$$

kde S je výsledné pnutí v MPa .

Následující tabulka uvádí změřené tloušťky použitých past na laserovém konfokálním mikroskopu značky LEXT a změřených tloušťkách z výbrusů jednotlivých skupin past.

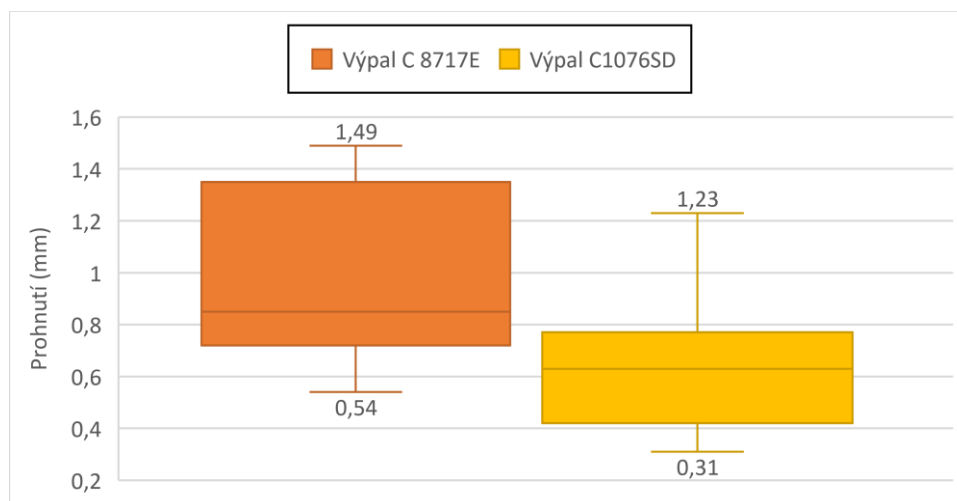
Tab. 3: Změřená tloušťka vypálených past

Pasta	Tloušťka (μm)
C 8717E	66
C1076SD	41
QQ550	37
5704	42
2 vrstvy C 8717E	133
2 vrstvy C1076SD	129
C 8717E + QQ550	101
C1076SD + QQ550	105
C 8717E + 5704	120
C1076SD + 5704	115

4 Výsledky měření

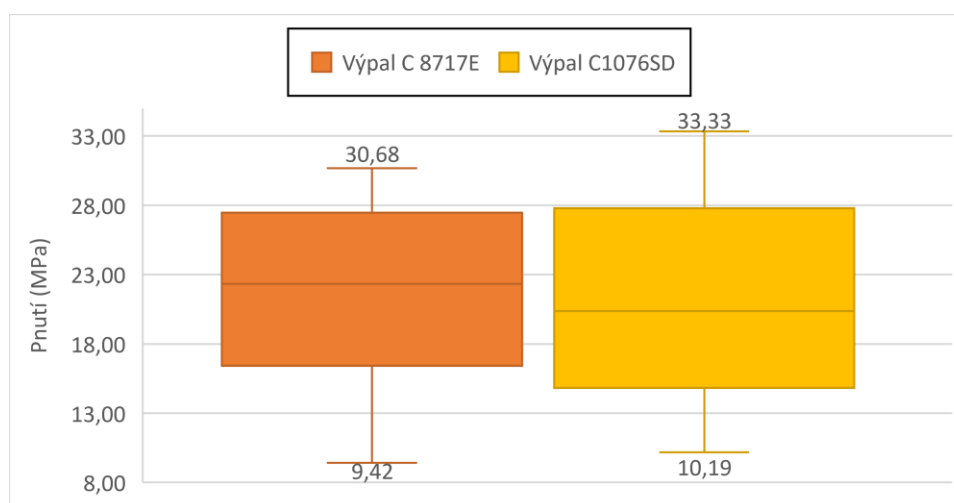
V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření přenesené do grafů. Je zde také popis výsledků u každé skupiny vzorků. Referenční hodnoty pro výpočet pnutí po vyžhání jsou uvedeny v příloze (Příloha 5).

4.1 Stříbrné pasty – C 8717E a C1076SD



Obr. 26: Pasta C 8717E a C1076SD – změřené prohnutí

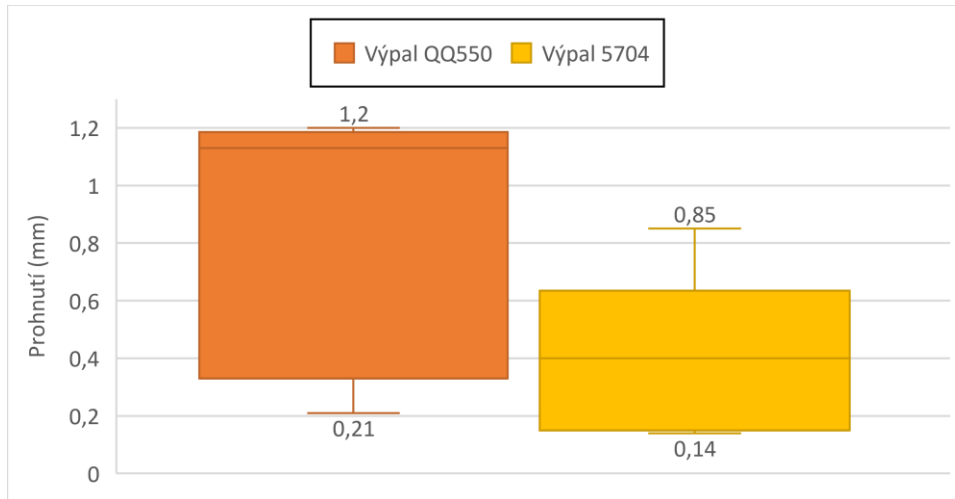
První dvě skupiny vzorků byly stříbrné pasty a hodnoty prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 6). Nejmenší hodnota prohnutí u pasty C 8717E po výpalu je 0,54 mm a nejvyšší hodnota prohnutí 1,49 mm. U pasty druhé, C1076SD je nejnižší hodnota po výpalu 0,31 mm a nejvyšší hodnota 1,23 mm.



Obr. 27: Pasta C 8717E a C1076SD – vypočtené pnutí

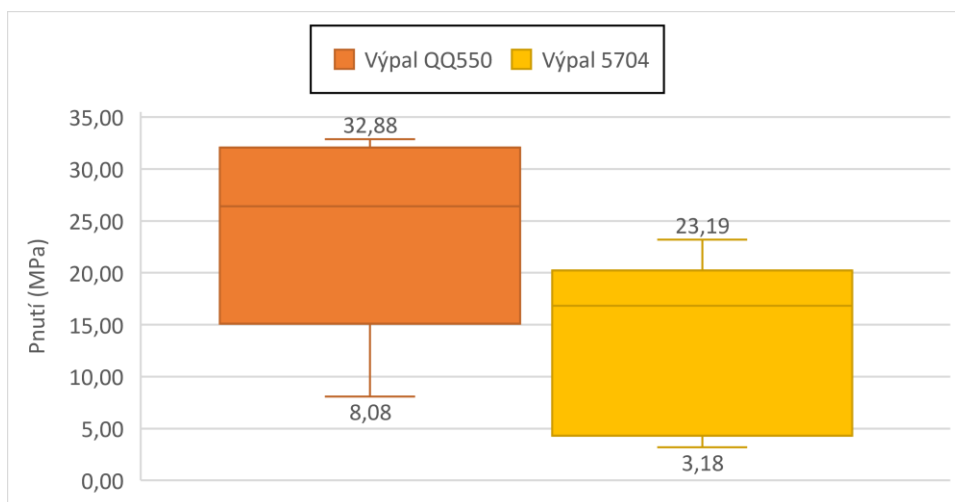
Pnutí stříbrných past je uvedeno v příloze (Příloha 7) a pohybovalo se po výpalu od 9,42 MPa do 30,68 MPa u pasty C 8717E, u pasty C1976SD od 10,19 MPa do 33,33 MPa. Pasta C1076SD, ač nepatrně, je vidět, že dosahuje většího pnutí než pasta C 8717E.

4.2 Dielektrické pasty – QQ550 a 5704



Obr. 28: Pasta QQ550 a 5704 - změřené prohnutí

Prohnutí u dielektrických past je uvedeno v příloze (Příloha 8). Dále je z grafu patrné, že po výpalu u pasty QQ550 se pohybovalo prohnutí od 0,21 mm do 1,2 mm. U pasty 5704 se prohnutí pohybovalo po výpalu od 0,14 mm do 0,85 mm.

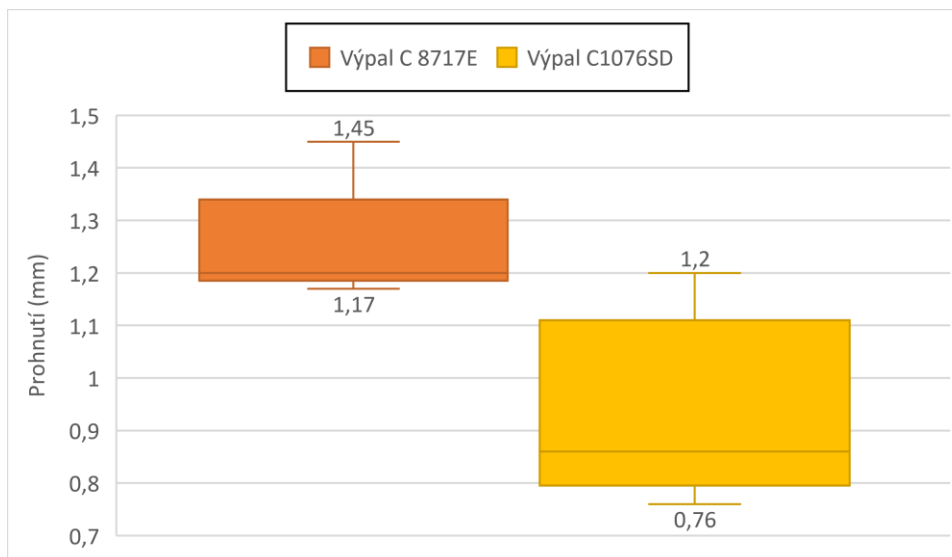


Obr. 29: Pasta QQ550 a 5704 - vypočtené pnutí

U pasty QQ550 se pnutí po výpalu pohybovalo od 8,08 do 32,88 MPa. U druhé dielektrické pasty 5704 se pnutí po výpalu pohybovalo pak od 3,18 do 23,19 MPa. Pasta

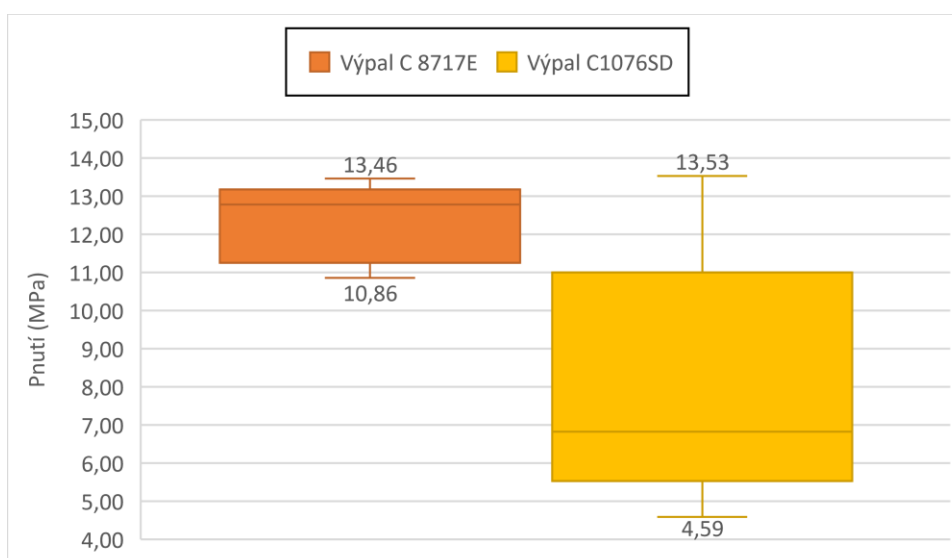
QQ550 tedy způsobila větší pnutí než pasta 5704. Hodnoty vypočteného pnutí jsou v příloze (Příloha 9).

4.3 Stříbrné pasty C 8717E a C1076SD – dvě vrstvy



Obr. 30: Pasty C 8717E a C1076SD dvě vrstvy - změřené prohnutí

Hodnoty prohnutí stříbrných past, na které byla nanesena druhá vrstva, jsou uvedeny v příloze (Příloha 10). U pasty C 8717E se pohybovalo prohnutí po výpalu od 1,17 do 1,45 mm. U druhé pasty, C1076SD, se prohnutí po výpalu pohybovalo od 0,76 mm do 1,2 mm.



Obr. 31: Pasty C 8717E a C1076SD dvě vrstvy - vypočtené pnutí

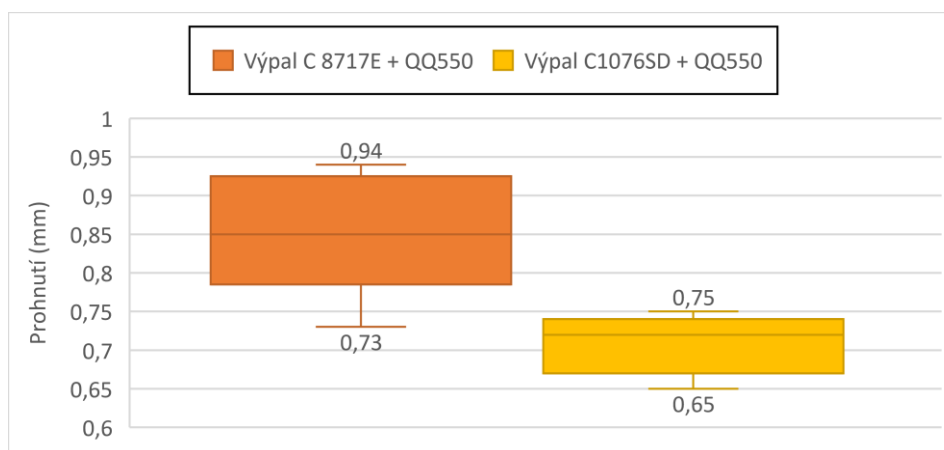
Pnutí u vzorků C 8717E se po výpalu pohybovalo od 10,86 MPa do 13,46 MPa. U pasty C1076SD se pnutí po výpalu pohybovalo pak od 4,59 MPa do 13,53 MPa. Z grafu je dále

patrné, že pasta C1076SD měla větší rozptýl hodnot pnutí než pasta C 8717E. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 11).

4.4 Stříbrné pasty s dielektrickou pastou QQ550 a 5704

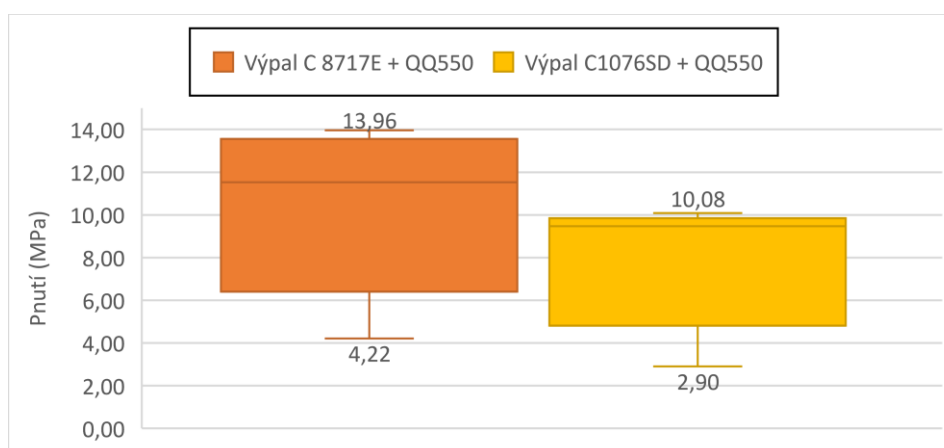
Na každou stříbrnou pastu byla nanесena krycí dielektrická pasta QQ550 a pasta pro vícevrstvé obvody 5704. Pro přehlednost budou nejprve porovnány vzorky jedné dielektrické pasty a poté druhé dielektrické pasty.

4.4.1 Krycí pasta QQ550 a stříbrné pasty C 8717E a C1076SD



Obr. 32: Dielektrická pasta QQ550 a stříbrné pasty C 8717E/C1076SD - změřené prohnutí

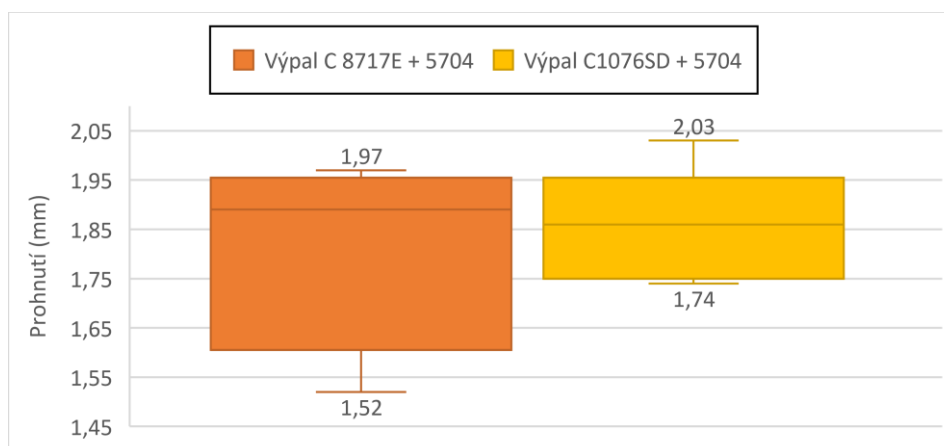
Pro vzorky se stříbrnou pastou C 8717E s nanесenou krycí pastou QQ550 se prohnutí po výpalu pohybovalo od 0,73 mm do 0,94 mm. U druhé stříbrné pasty pak od 0,65 mm do 0,75 mm. Hodnoty prohnutí jsou dále uvedeny v příloze (Příloha 12).



Obr. 33: Dielektrická pasta QQ550 a stříbrné pasty C 8717E/C1076SD - vypočtené pnutí

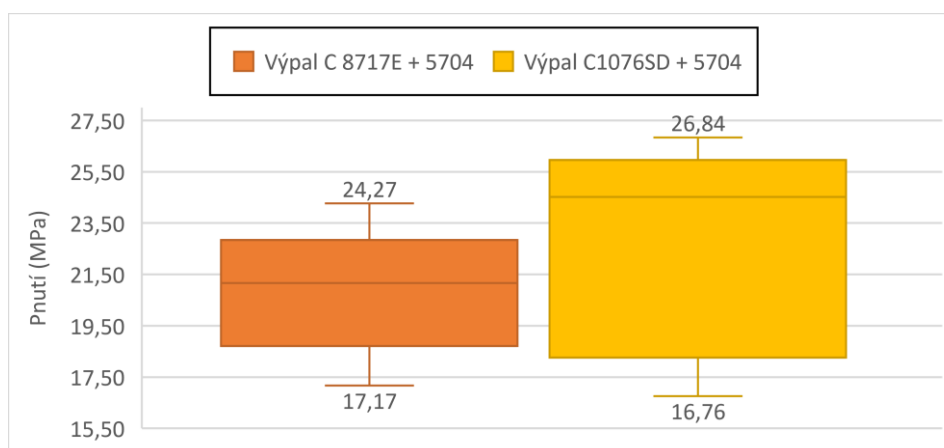
Pnutí u těchto vzorků se pohybovalo u pasty C 8717E s pastou QQ550 po výpalu od 4,22 MPa do 13,96 MPa. U druhé skupiny vzorků s pastou C1076SD se pnutí po výpalu pohybovalo pak od 2,9 MPa do 10,08 MPa. Je zde tedy patrné, že vzorky s pastou C 8717E dosahují větších hodnot pnutí než vzorky s pastou C1076SD. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 13).

4.4.2 Pasta pro vícevrstvé obvody 5704 a stříbrné pasty C 8717E a C1076SD



Obr. 34: Dielektrická pasta 5704 a stříbrné pasty C 8717E/C1076SD - změřené prohnutí

U této skupiny vzorků s pastou pro vícevrstvé obvody 5704 se prohnutí u pasty C 8717E pohybovalo od 1,52 do 1,97 mm. U pasty C1076SD se prohnutí pohybovalo od 1,74 mm do 2,03 mm. Hodnoty prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 14).

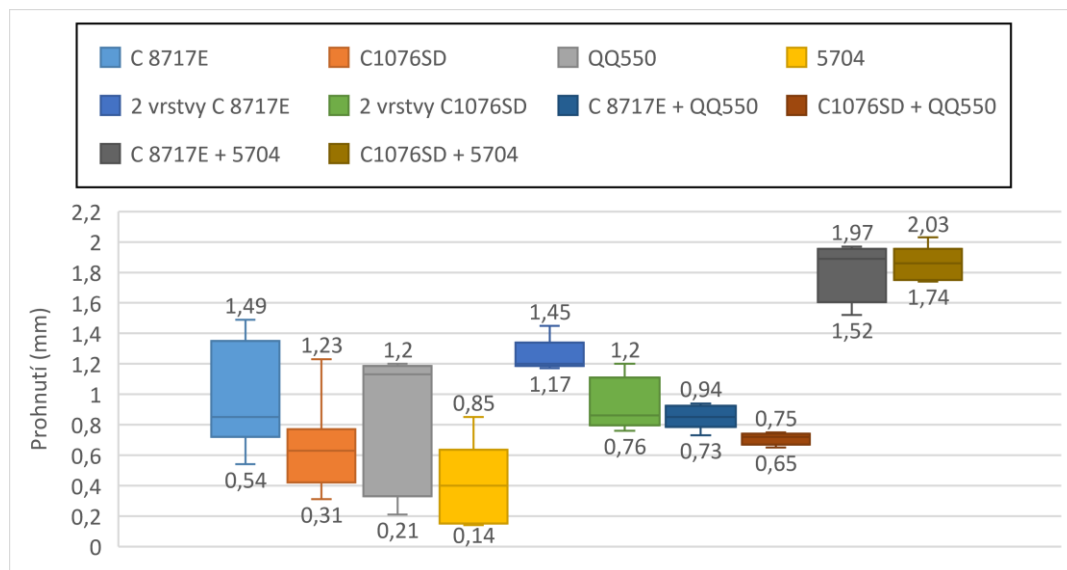


Obr. 35: Dielektrická pasta 5704 a stříbrné pasty C 8717E/C1076SD - vypočtené pnutí

Pnutí se u této dielektrické pasty pohybovalo u vzorků s pastou C 8717E od 17,17 MPa do 24,27 MPa po výpalu. U pasty C1076SD se pnutí po pohybovalo od 16,76 MPa do

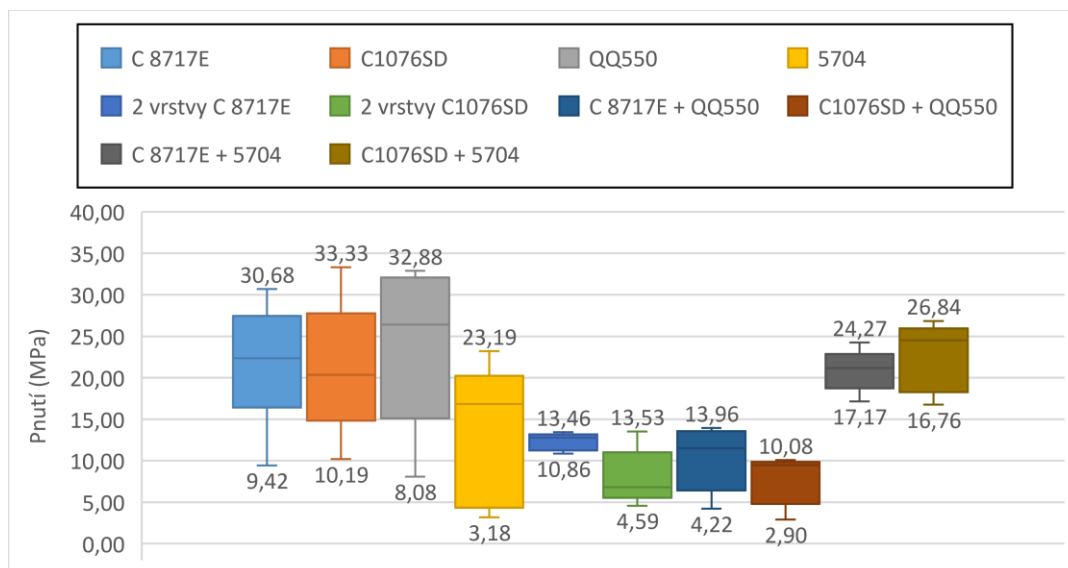
26,84 MPa. Z výsledků lze říci, tato pasta dosahovala větších hodnot pnutí u stříbrné pasty C1076SD než u vzorků s pastou C 8717E. Dále když se porovnají obě dielektrické pasty, krycí pasta QQ550 dosahovala většího pnutí u pasty C 8717E než u pasty C1076SD, kdežto pasta 5704 měla efekt opačný. Co se týče velikosti pnutí, dielektrická pasta pro vícevrstvé obvody 5704 dosahovala u obou stříbrných past většího pnutí než pasta QQ550. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 15).

4.5 Porovnání všech skupin vzorků po výpalu



Obr. 36: Změřené prohnutí u všech vzorků po výpalu

V grafu na Obr. 36 jsou uvedeny prohnutí všech vzorků po výpalu. Je zde patrné, že největší rozptyl vzorků je u pasty stříbrné C 8717E a u pasty dielektrické QQ550. Dále je z tohoto grafu patrné, že největšího prohnutí dosahovaly vzorky past C 8717E s pastou pro vícevrstvé obvody 5704 a vzorky pasty C1076SD opět s pastou 5704. Co se týká jen past jednotlivých, největší prohnutí bylo u pasty C 8717E a u pasty C1076SD, tedy u past stříbrných.



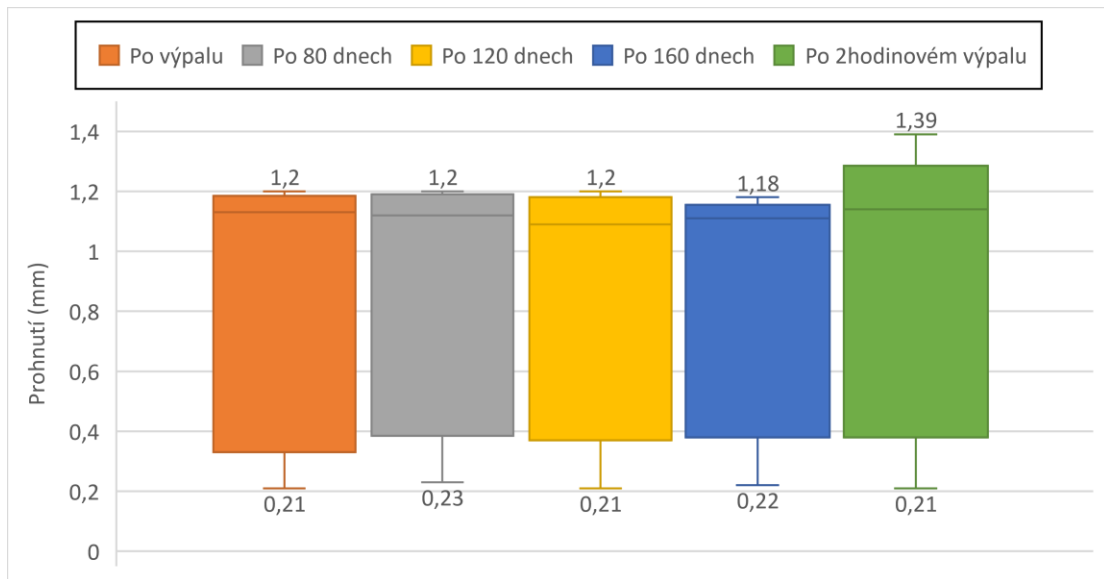
Obr. 37: Vypočtené pnutí u všech vzorků po výpalu

Z grafu pnutí na Obr. 37 je vidět, že největšího pnutí dosahovala pasta C1076SD (Ag pasta) a poté pasta dielektrická QQ550. Nejmenšího pnutí pak dosahovala pasta C1076SD s krycí pastou QQ550, což je zajímavé, protože jako samostatné pasty dosahovaly největších hodnot pnutí. Je zde ale také patrný velký rozptyl hodnot pnutí u obou zmíněných past (C1076SD i QQ550).

4.6 Změna pnutí v čase

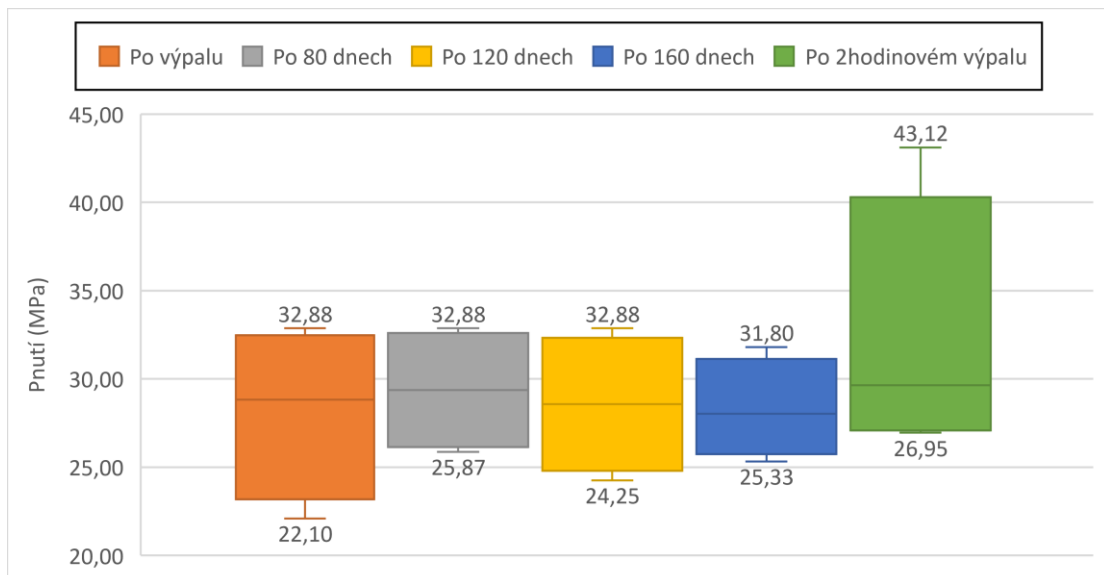
Během praktické části bylo pozorováno, že se prohnutí v čase mění, proto bylo provedeno kontrolní přeměření vzorků po 40, 80, 120 a 160 dnech od prvního výpalu. Poté byl proveden 2hodinový výpal u všech vzorků. Hlavním cílem tohoto výpalu bylo ověření, zda dojde k uvolnění pnutí.

4.6.1 Skupina vzorků QQ550



Obr. 38: Pasta QQ550 – změřené prohnutí

Tato skupina vzorků dosahovala prohnutí po výpalu od 0,21 do 1,2 mm. Během kontrolního měření se vzorky téměř neměnily. Po 2hodinovém výpalu se maximální odchylka zvětšila na 1,39 mm, což je rozdíl od prvního výpalu zhruba 0,2 mm. Hodnoty změřeného prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 16).

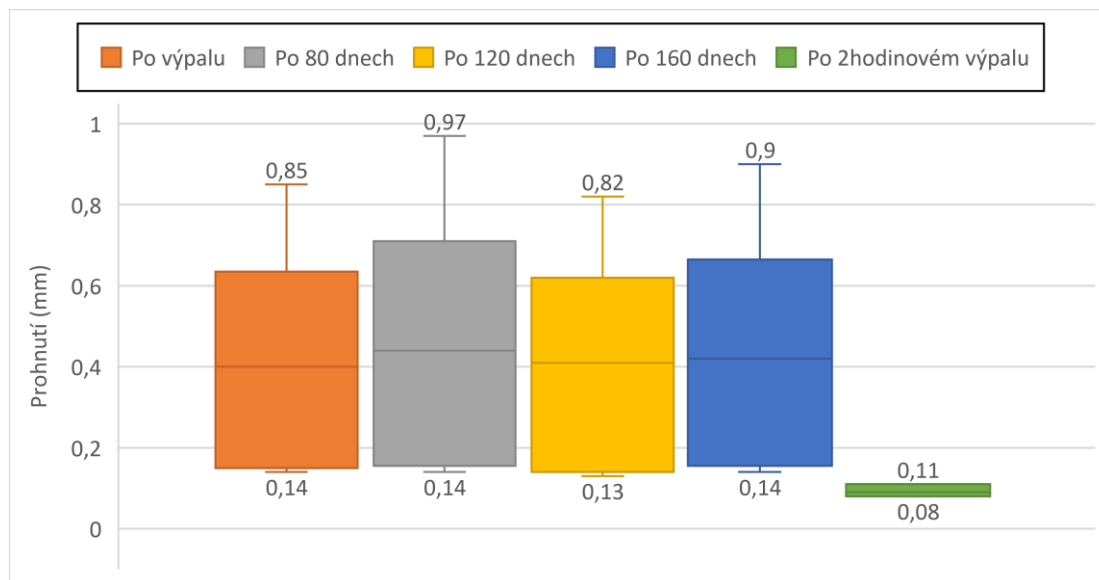


Obr. 39: Pasta QQ550 – vypočtené pnutí

Co se týká pnutí, po sušení dosahovalo největší hodnoty 11,32 MPa a po výpalu 32,88 MPa. V čase se pnutí téměř neměnilo, dá se tedy říci, že tato pasta je po výpalu

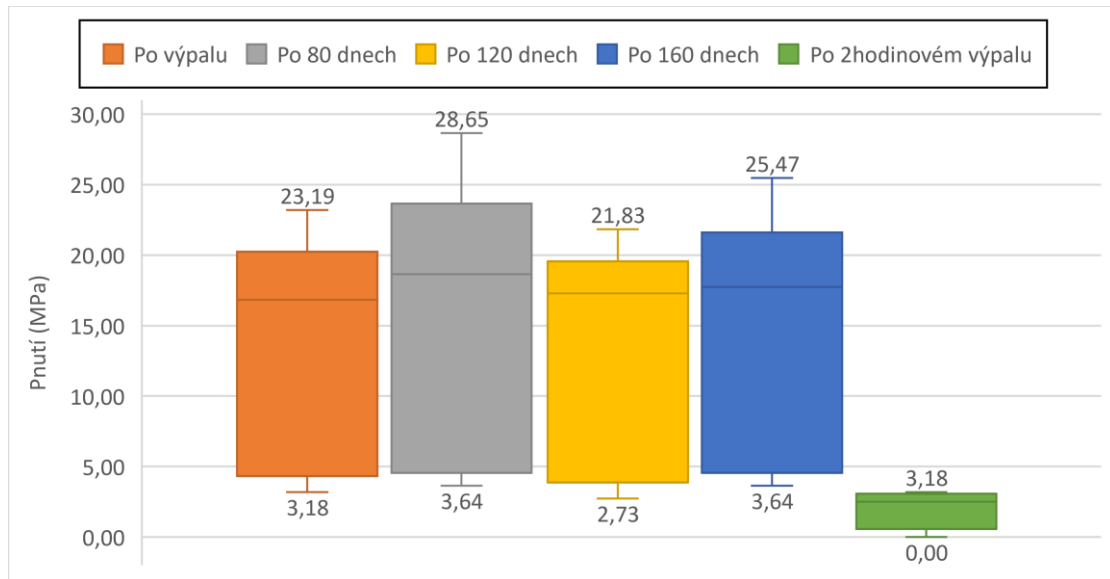
ustálená. Po 2hodinovém výpalu při teplotě 525 °C se pnutí pohybovalo v intervalu od 8,08 MPa do 43,12 MPa. Hodnoty vypočteného pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 17).

4.6.2 Skupina vzorků 5704



Obr. 40: Pasta 5704 – změřené prohnutí

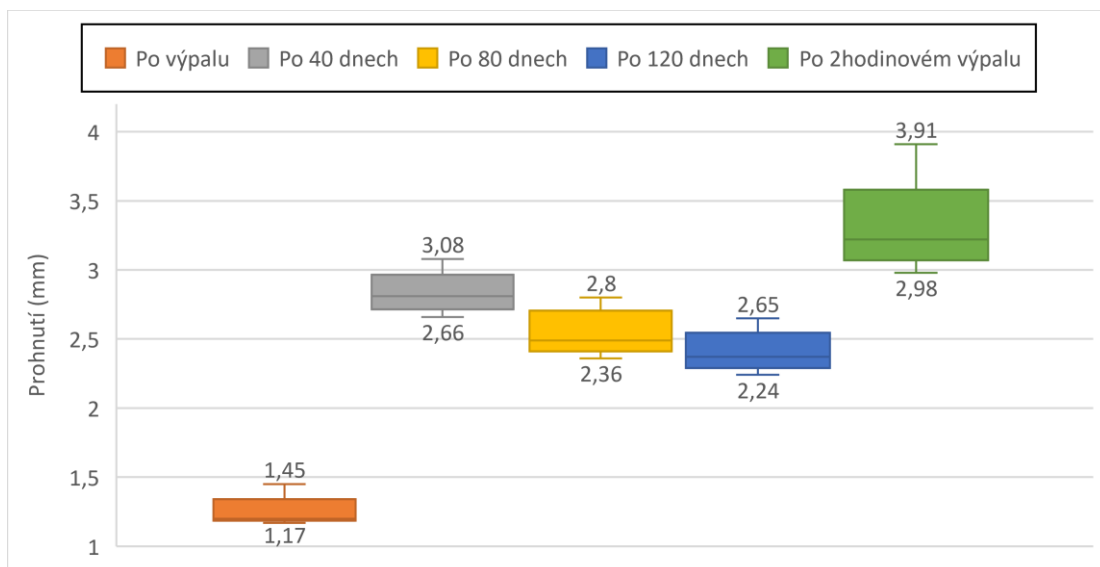
Skupina vzorků s pastou 5704 měla prohnutí po výpalu od 0,14 do 0,85 mm. Byly zde provedena tři kontrolní měření, aby se zjistilo, jak pasta pracuje v čase. Po prvním přeměření, které bylo po 80 dnech, se u některých vzorků prohnutí zvětšilo a prohnutí se tedy pohybovalo od 0,14 do 0,97 mm. Po druhém přeměření, které následovalo po dalších 40 dnech, tedy celkově po 120 dnech od prvního vypálení, se prohnutí celkově zmenšilo a pohybovalo se od 0,13 do 0,82 mm. Poslední kontrolní měření, které bylo provedeno po dalších 40 dnech (160 dnů od prvního výpalu), se opět mírně zvýšilo a pohybovalo se od 0,14 do 0,9 mm. Po posledním kontrolním měření následoval výpal na 850 °C trvajícím 2 hodiny. Po tomto výpalu se prohnutí extrémně změnilo oproti předchozím měřením, a to od 0,08 do 0,11 mm. Hodnoty změřeného prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 18).



Obr. 41: Pasta 5704 – vypočtené pnutí

Graf pnutí téměř odpovídá grafu prohnutí. Po výpalu se pnutí pohybovalo od 3,18 MPa do 23,19 MPa. Kontrolní přeměření odpovídá hodnotám z grafu prohnutí. Poslední 2hodinový výpal pak změnil hodnoty pnutí, které se dále pohybovaly od 0 do 3,18 MPa. Z této skupiny vzorků se dá vyvodit, že po dlouhém výpalu bude mít tato pasta charakter tlakového pnutí. Hodnoty vypočteného pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 19).

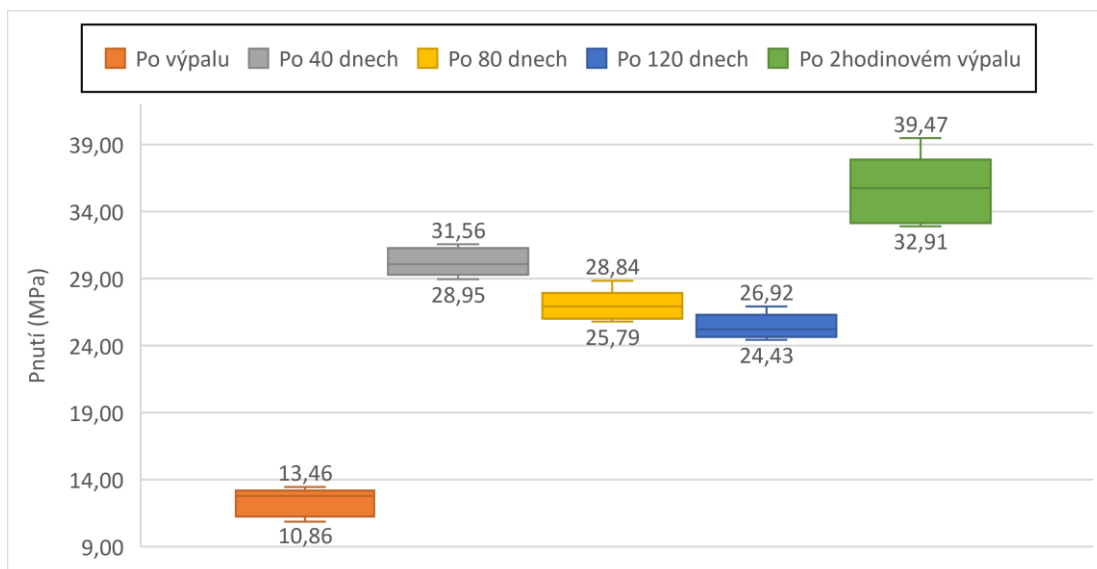
4.6.3 Skupina vzorků – 2 vrstvy C 8717E



Obr. 42: 2 vrstvy C 8717E - změřené prohnutí

Tato skupina vzorků byla realizována z části skupiny vzorků 1, na kterou přišla druhá vrstva stejné stříbrné pasty. Po vypálení bylo prohnutí od 1,17 do 1,45 mm. Po 40 dnech následovalo první kontrolní přeměření, které odhalilo nárůst prohnutí a to od 2,66 do 3,08

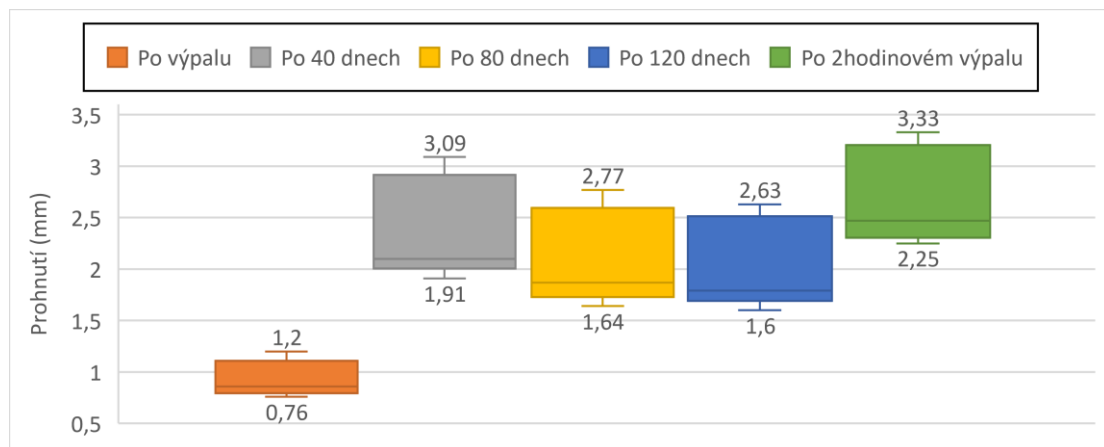
mm. Následné přeměření po dalších 40 dnech (celkově po 80 dnech od vypálení) se prohnutí zmenšilo a dosahovalo hodnot od 2,36 mm do 2,8 mm. Po posledním přeměření (celkově po 120 dnech od vypálení) se prohnutí opět snížilo a dosahovalo hodnot od 2,24 mm do 2,65 mm. Následoval 2hodinový výpal, po kterém se prohnutí zvětšilo na hodnoty od 2,98 mm do 3,91 mm. Změřené hodnoty jsou uvedeny v příloze (Příloha 20).



Obr. 43: 2 vrstvy C 8717E - vypočtené pnutí

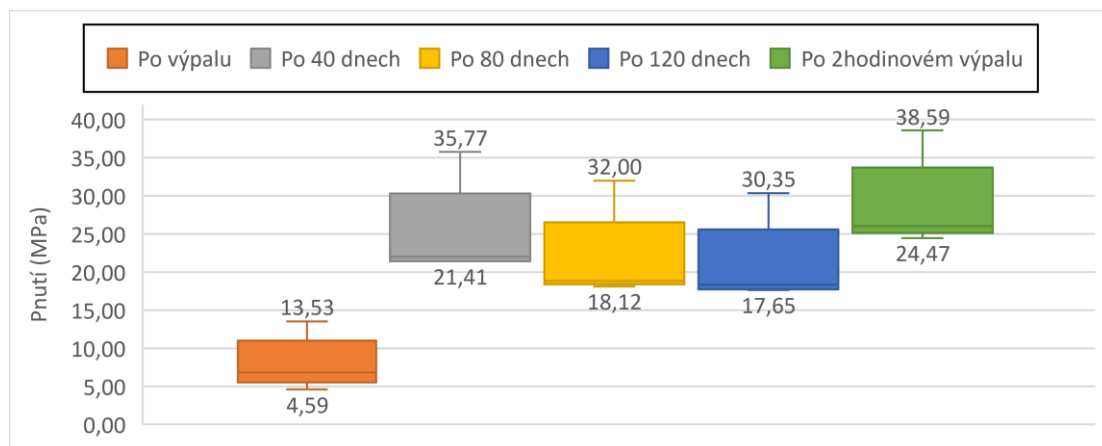
Graf pnutí nepřímo kopíruje graf prohnutí. Po prvním výpalu dosahovalo pnutí hodnot od 10,86 do 13,46 MPa a po prvním kontrolním měření dosahovalo více než dvojnásobné pnutí, tedy až hodnot 31,56 MPa. Dále se pnutí v čase postupně zmenšovalo až na hodnotu 26,92 MPa. Poté následoval 2hodinový výpal, po kterém se pnutí téměř zdvojnásobilo a dosahovalo hodnot 32,91 MPa do 39,47 MPa. Celkově tato pasta projevuje charakter tahového pnutí. Po prvních dnech výpalu se pnutí zvýší, ale s ubíhajícím časem toto pnutí klesá. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 21).

4.6.4 Skupina vzorků – 2 vrstvy C1076SD



Obr. 44: 2 vrstvy C1076SD - změřené prohnutí

Stejně tak jako část skupiny vzorků 1, i část skupiny vzorků 2 byla použita pro nanesení druhé vrstvy stejné stříbrné pasty C1076SD. Po výpalu dosahovalo prohnutí od 0,76 do 1,2 mm. I zde bylo provedeno po 40 dnech kontrolní přeměření, po kterém dosahovalo prohnutí 1,91 do 3,09 mm. Dále po dalších dvou kontrolních měření prohnutí mírně klesalo a po 2hodinovém výpalu se prohnutí zvětšilo na hodnoty od 2,25 mm do 3,33 mm. Hodnoty změřeného prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 22).

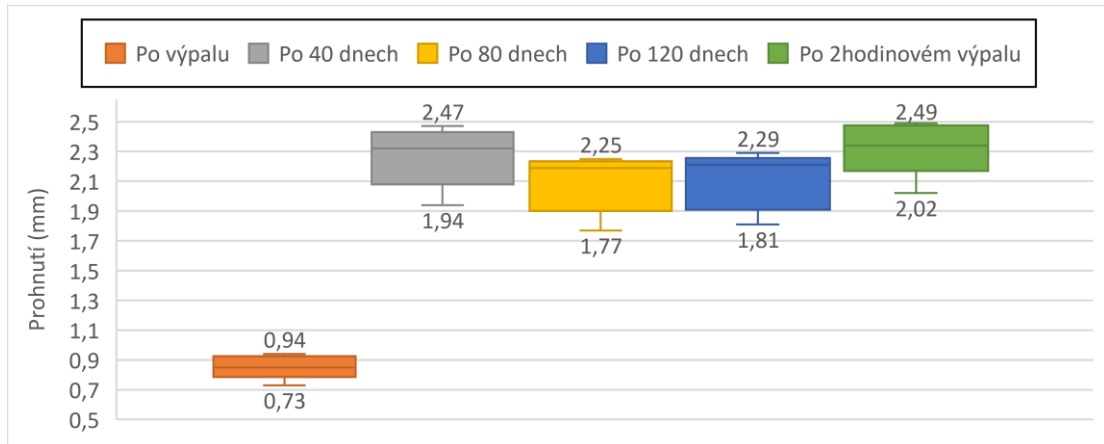


Obr. 45: 2 vrstvy C1076SD - vypočtené pnutí

Pnutí u této skupiny vzorků dosahovalo po výpalu 4,59 MPa až 13,53 MPa. Dále po 40 dnech se pnutí více než zdvojnásobilo, a to na hodnoty od 21,41 MPa do 35,77 MPa. S časem se toto pnutí zmenšovalo a po 120 dnech od prvního výpalu až na hodnoty od 17,65 do 30,35 MPa. Po 2hodinovém výpalu se pnutí zvětšilo na hodnoty od 24,47 MPa do 38,59 MPa. Opět tato pasta vykazuje charakter tahového pnutí. V prvních dnech po výpalu se pnutí zvýší

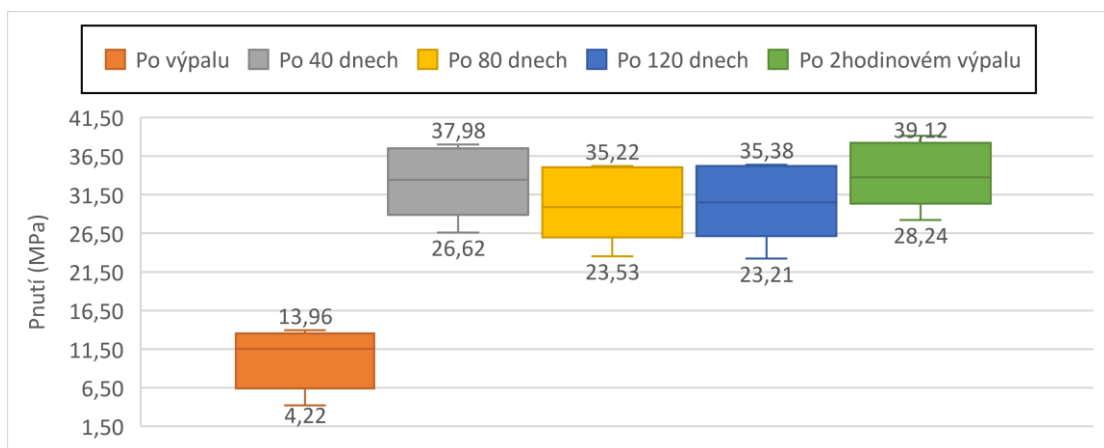
a s časem dále toto pnutí klesá. Hodnoty vypočteného pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 23).

4.6.5 Skupina vzorků – C 8717E a krycí pasta QQ550



Obr. 46: Pasta C 8717E s krycí pastou QQ550 – změřené prohnutí

Prohnutí u této skupiny vzorků se pohybovalo po výpalu od 0,73 mm do 0,94 mm. Po prvních 40 dnech od výpalu se prohnutí zvětšilo na více jak dvojnásobnou hodnotu a pohybovalo se od 1,94 mm do 2,47 mm. Druhé a třetí přeměření po 80 a 120 dnech neukázalo žádné významné změny prohnutí. Po 2hodinovém výpalu se prohnutí u této skupiny vzorků zvětšilo na 2,02 mm do 2,49 mm. Hodnoty změřeného prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 24).

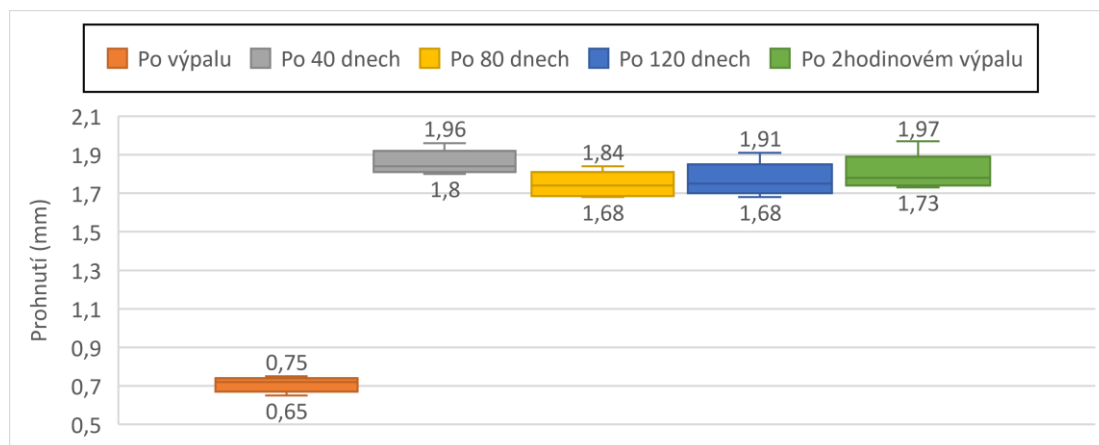


Obr. 47: Pasta C 8717E s krycí pastou QQ550 – vypočtené pnutí

Pnutí opět téměř kopíruje graf prohnutí, po výpalu se pohybovalo od 4,22 MPa do 13,96 MPa. Po prvním přeměření dosahovalo pnutí téměř 3x větších hodnot, tedy od 26,62 MPa do 37,98 MPa. Po druhém a třetím přeměření se hodnoty téměř neměnily, pnutí dosahovalo

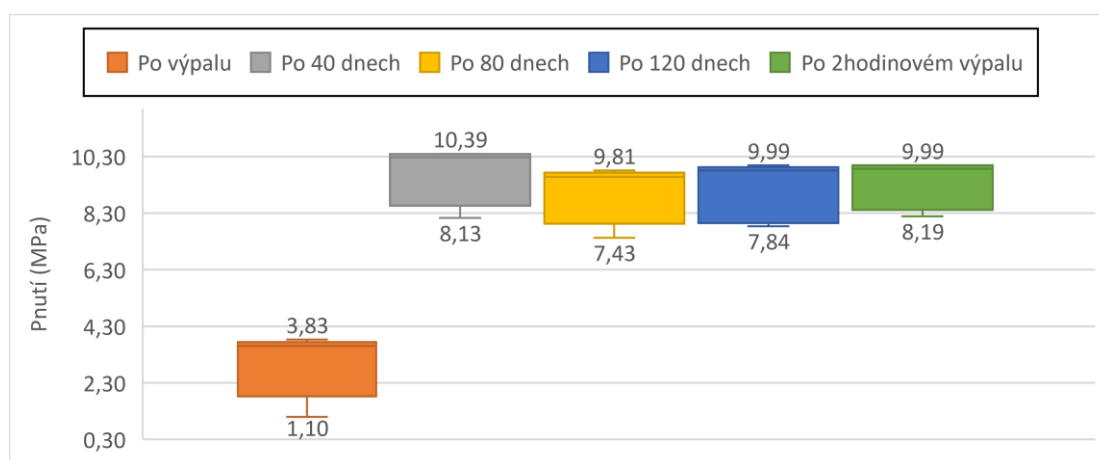
hodnot od 23,21 do 35,38 MPa. Po 2hodinovém výpalu poté dosahovalo pnutí od 28,24 MPa do 39,12 MPa. Z grafu lze říci, že kombinace těchto dvou past bude mít v prvních 40 dnech značné změny pnutí, které se dále v čase již téměř nemění. Hodnoty vypočteného pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 25).

4.6.6 Skupina vzorků – C1076SD a krycí pasta QQ550



Obr. 48: Pasta C1076SD s krycí pastou QQ550 – změřené prohnutí

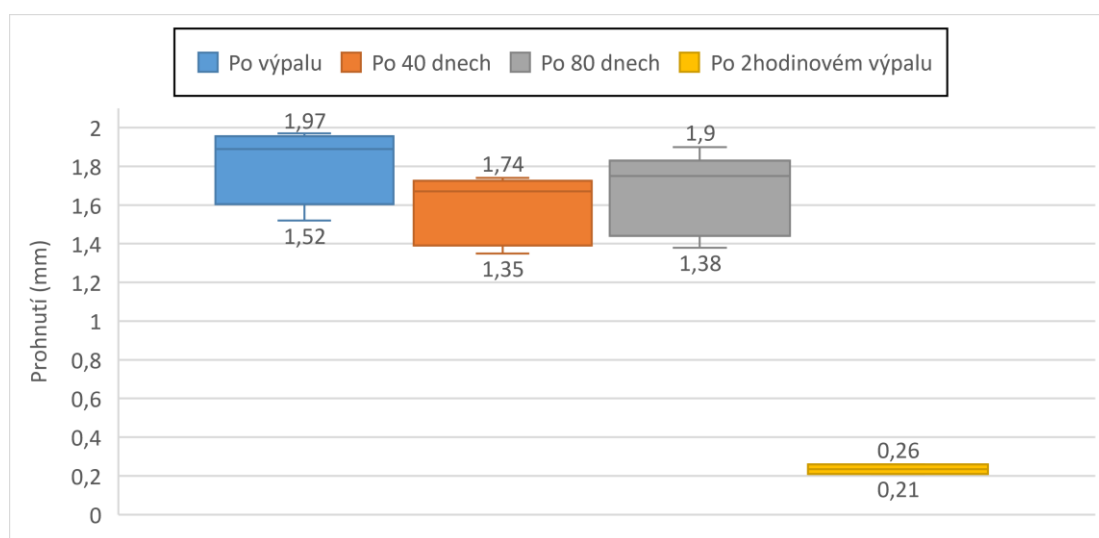
U této skupiny vzorků se prohnutí po výpalu pohybovalo od 0,65 do 0,75 mm. Podobně jako u předchozí skupiny, i zde se prohnutí razantně změnilo během prvních 40 dnů, a to na hodnoty od 1,8 mm do 1,96 mm. Po druhém přeměření se prohnutí pohybovalo od 1,68 mm do 1,84 mm a po dalších 40 dnech se u některých vzorků prohnutí zvětšilo až na hodnotu 1,91 mm. Po 2hodinovém výpalu se prohnutí mírně zvýšilo, a to na interval hodnot od 1,73 mm do 1,97 mm. Hodnoty prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 26).



Obr. 49: Pasta C1076SD s krycí pastou QQ550 – vypočtené pnutí

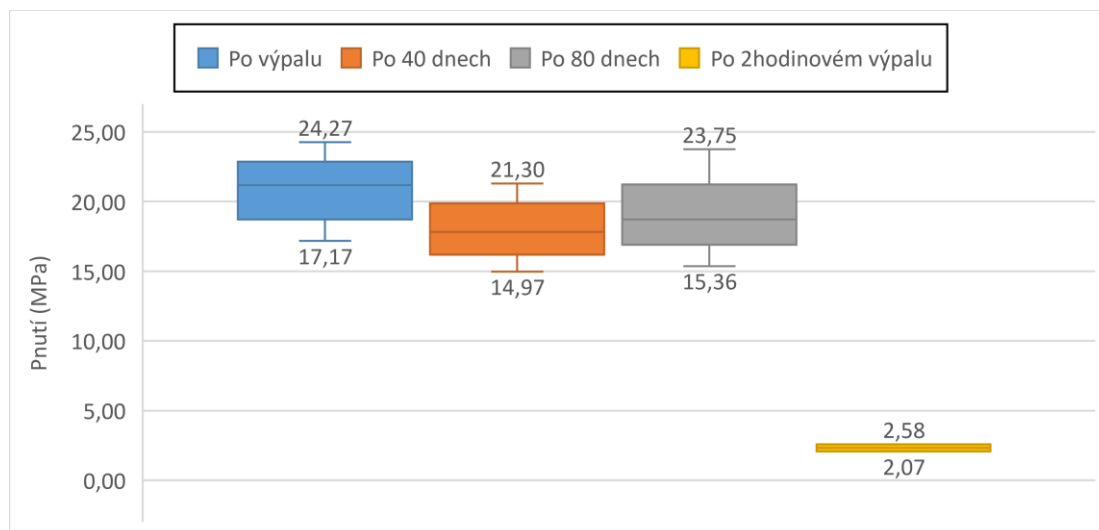
Vypočtené pnutí se po výpalu pohybovalo od 1,10 MPa do 3,83 MPa. Po prvním přeměření se pnutí téměř 3x zvětšily, a to na hodnoty od 8,13 MPa do 10,39 MPa. Po dalších 40 dnech se pnutí mírně snížilo na 7,43 MPa do 9,81 MPa a poslední přeměření ukázalo ještě nepatrnou změnu v pnutí, kdy se mírně zvýšila na hodnoty od 7,84 MPa do 9,99 MPa. Po 2hodinovém výpalu pak maximální hodnota pnutí zůstala na 9,99 MPa a minimální hodnota se zvýšila na 8,19 Mpa. Z grafu je opět patrné, že tato kombinace past bude v prvních 40 dnech měnit své pnutí, ale dále v čase je již stabilní a téměř se nemění. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 27).

4.6.7 Skupina vzorků – C 8717E a pasta pro vícevrstvé obvody 5704



Obr. 50: Pasta C 8717E s krycí pastou 5704 – změřené prohnutí

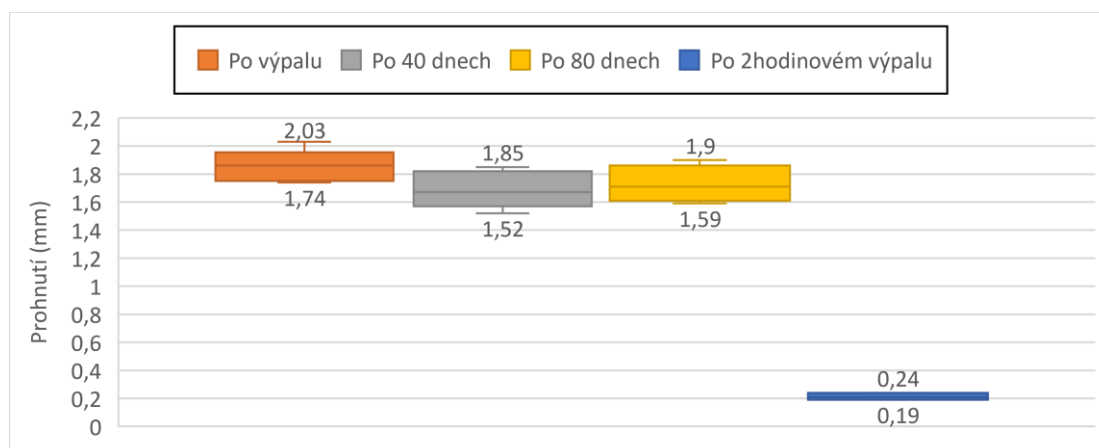
U této skupiny vzorků se prohnutí pohybovalo po výpalu od 1,52 mm do 1,97 mm. Po prvním přeměření se prohnutí zmenšilo na 1,35 až 1,74 mm a po druhém přeměření od 1,38 mm do 1,9 mm. Třetí přeměření zde nebylo provedeno z důvodu časového vytížení. Po provedení 2hodinového výpalu se pnutí snížilo na hodnoty 0,21 mm do 0,26 mm. Naměřené hodnoty prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 28).



Obr. 51: Pasta C 8717E s krycí pastou 5704 – vypočtené pnutí

Pnutí se u těchto vzorků pohybovalo po výpalu od 17,17 MPa do 24,27 MPa. Po prvním přeměření se pnutí snížilo na hodnoty 14,97 až 21,3 MPa a poslední přeměření pak ukazovalo pnutí od 15,36 MPa do 23,75 MPa. Po 2hodinovém výpalu se pnutí razantně snížilo na hodnoty od 2,07 MPa do 2,58 MPa. Další vzorky byly vynechány, protože byly silně prohnuty tlakovým pnutím, pro kterou tato metoda měření není vyhovující. Z předchozích grafů lze dále usoudit, že pasta C 8717E se projevuje tahovým pnutím a pasta 5704 pnutím tlakovým. Toto tlakové pnutí však převládlo nad tím tahovým. Hodnoty vypočteného pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 29).

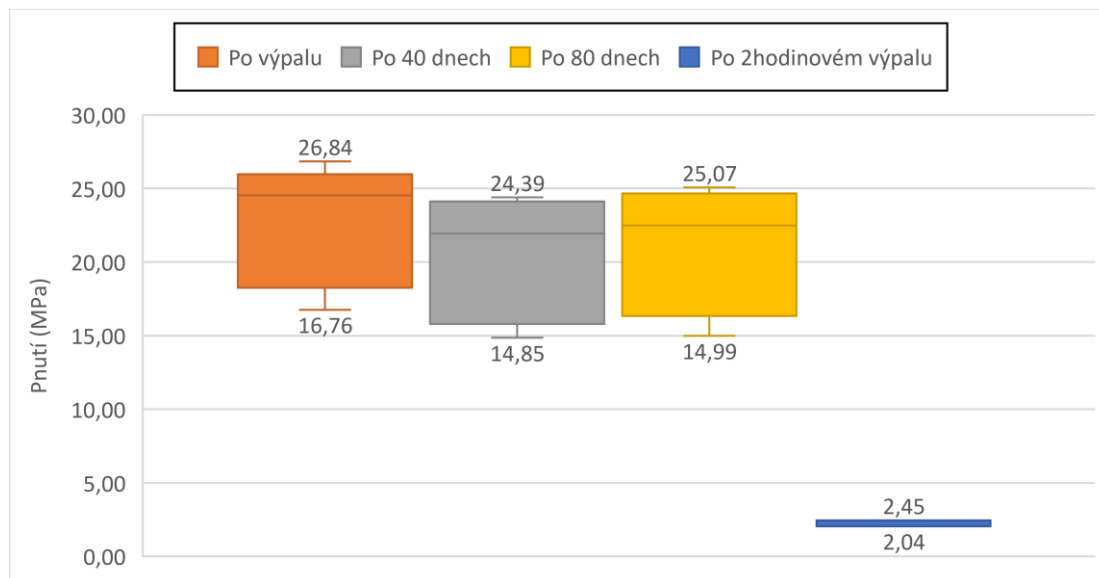
4.6.8 Skupina vzorků – C1076SD a pasta pro vícevrstvé obvody 5704



Obr. 52: Pasta C1076SD s krycí pastou 5704 – změřené prohnutí

Tato skupina vzorků se chovala obdobně jako ta předchozí. Prohnutí po výpalu se pohybovalo od 1,74 mm do 2,03 mm. Po prvním přeměření po 40 dnech se prohnutí snížilo na hodnoty od 1,52 mm do 1,85 mm a po druhém přeměření po dalších 40 dnech se mírně

zvýšilo na hodnoty od 1,59 mm do 1,9 mm. Po 2hodinovém výpalu se poté prohnutí rapidně snížilo na hodnoty od 0,19 mm do 0,24 mm. Hodnoty prohnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 30).

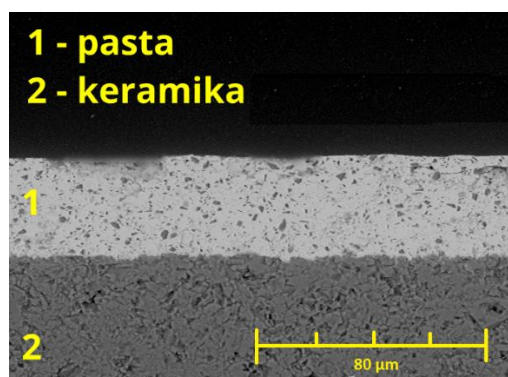


Obr. 53: Pasta C1076SD s krycí pastou 5704 – vypočtené pnutí

Pnutí se u této skupiny vzorků pohybovalo po výpalu od 16,76 MPa do 26,84 MPa. Po prvním přeměření pak od 14,85 MPa do 24,39 MPa a po druhém přeměření se nepatrně zvýšilo na hodnoty od 14,99 MPa do 25,07 MPa. Po 2hodinovém výpalu se pnutí pohybovalo od 2,04 MPa do 2,45 MPa. Byly zde opět vynechány vzorky, protože se projevilo tlakové pnutí takovým způsobem, že to touto metodou nebylo možné změřit. I zde je tedy patrné, že pasta C1076SD má charakter tahového pnutí, ale pasta 5704 má charakter pnutí tlakového, které opět převážilo. Vypočtené hodnoty pnutí jsou uvedeny v příloze (Příloha 31).

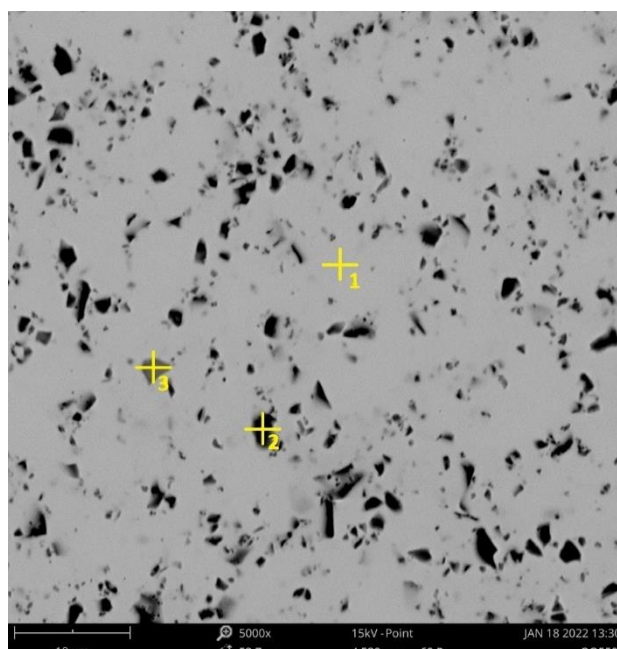
4.7 Další analýza past

Pro jednotlivé pasty byla provedena prvková analýza na elektronovém mikroskopu značky Phenom ProX.



Obr. 54: Vzorek s pastou QQ550

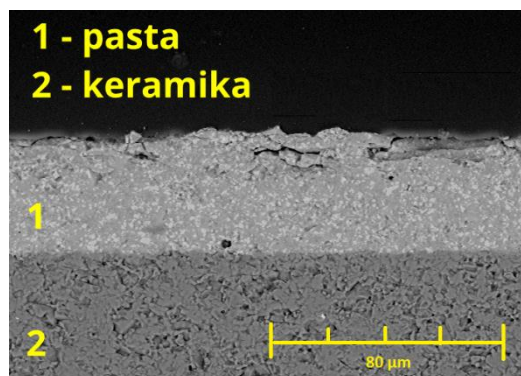
Na Obr. 54 je zobrazen výbrus vzorku QQ550. Z tohoto obrázku vidět, že pasta během výpalu nepronikla do pórů substrátu, jak je patrné u stříbrných past níže a může být náchylnější k delaminaci. Prvková analýza spolu se snímky povrchu je na Obr. 55 a v Tab. 4.



Obr. 55: Povrchová analýza pasty QQ550

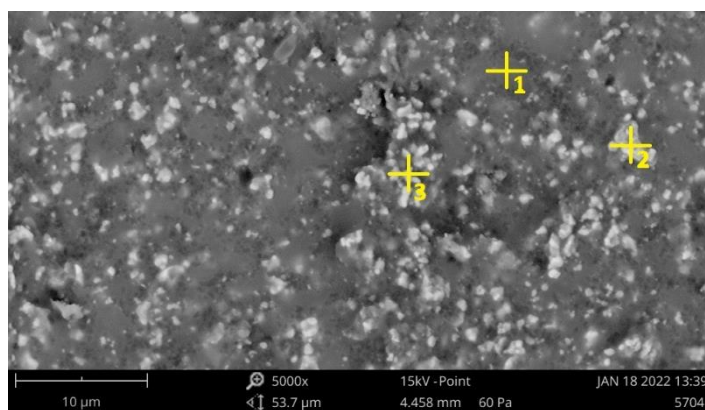
Tab. 4: Hodnoty prvkové analýzy pasty QQ550

Prvek	Váhová koncentrace (hm. %)		
	1. spot	2. spot	3. spot
Kyslík	21.60	44.68	32.76
Olovo	72.29	37.56	53.32
Křemík	5.35	16.66	9.76
Hliník	0.77	0.58	4.16
Chrom	-	0.52	-



Obr. 56: Vzorek s pastou 5704

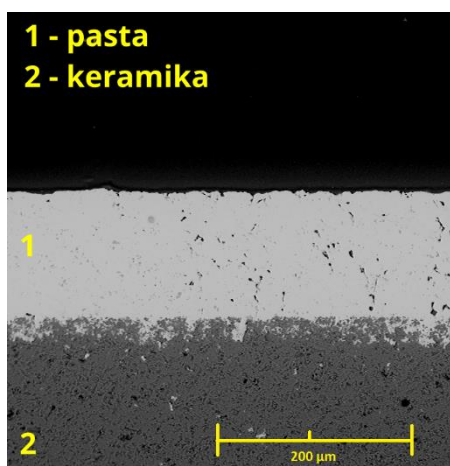
Na Obr. 56 je zobrazen vzorek s pastou 5704. Z obrázku je vidět, že tato pasta pokryla povrch substrátu a nezatekla během výpalu do pórů, jak je tomu u stříbrných past níže, tedy může být náchylnější k delaminaci. Dále je z tohoto obrázku patrný nerovný povrch pasty po výpalu, který byl nejspíše způsoben při tvorbě výbrusu vzorku. Povrchová analýza je zobrazena na Obr. 57 a v Tab. 5.



Obr. 57: Povrchová analýza pasty 5704

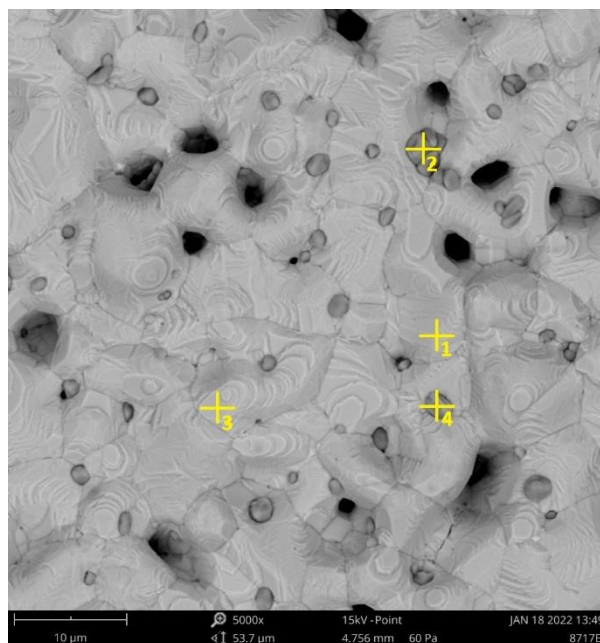
Tab. 5: Hodnoty prvkové analýzy pasty 5704

Prvek	Váhová koncentrace (hm. %)		
	1. spot	2. spot	3. spot
Kyslík	52.77	45.62	52.90
Křemík	17.12	3.21	6.49
Hliník	9.85	4.37	14.72
Vápník	3.75	1.45	6.18
Sodík	1.66	-	-
Olovo	10.09	-	-
Draslík	1.31	-	-
Hořčík	0.75	-	-
Zirkon	2.68	45.36	15.94



Obr. 58: Vzorek s pastou C 8717E

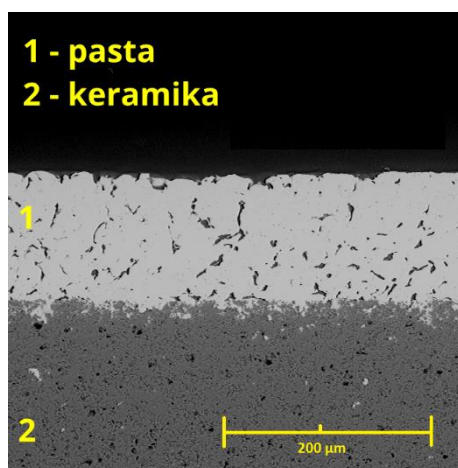
Na Obr. 58 je zobrazen vzorek s pastou C 8717E. Z obrázku je dobře viditelné, že tato pasta během výpalu pronikla do pórů substrátu, čímž bude odolnější proti delaminaci. Snímky povrchu a vzorková analýza je zobrazena na Obr. 59 a v Tab. 6.



Obr. 59: Povrchová analýza pasty C 8717E

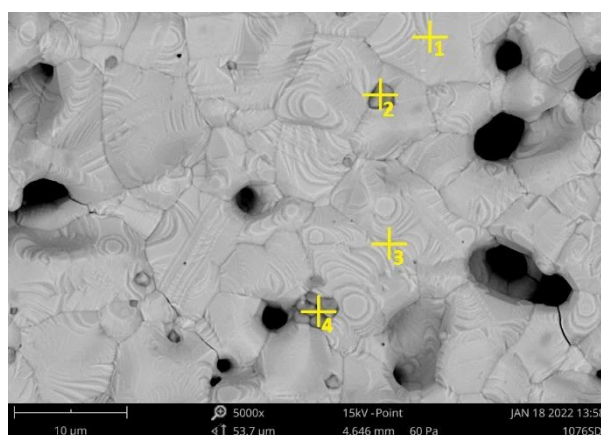
Tab. 6: Hodnoty prvkové analýzy pasty C 8717E

Prvek	Váhová koncentrace (hm. %)			
	1. spot	2. spot	3. spot	4. spot
Stříbro	98.47	26.38	99.28	21.75
Hořčík	0.80	-	0.72	-
Měď	0.47	46.17	-	37.92
Chrom	0.26	-	-	-
Kyslík	-	26.71	-	40.33
Uhlík	-	0.75	-	-



Obr. 60: Vzorek s pastou C1076SD

Na Obr. 60 je zobrazen vzorek s pastou C1076SD. I z tohoto obrázku je patrné, že pasta pronikla do pórů substrátu během výpalu. U této pasty je však patrný větší výskyt voidů ve vodivé vrstvě než u pasty předchozí, C 8717E. Snímky povrchu a prvková analýza je zobrazena na Obr. 61 a v Tab. 7.



Obr. 61: Povrchová analýza pasty C1076SD

Tab. 7: Hodnoty prvkové analýzy pasty C1076SD

Prvek	Váhová koncentrace (hm. %)			
	1. spot	2. spot	3. spot	4. spot
Stříbro	97.90	21.95	98.74	26.05
Hořčík	1.35	-	1.26	-
Zirkon	0.75	-	-	-
Kyslík	-	37.41	-	29.33
Měď	-	39.63	-	44.62
Dusík	-	1.01	-	-

Zhodnocení a závěr

Mým cílem bylo vytvořit literární rešerši na téma vnitřní pnutí ve vrstvách. Na základě této literární rešerše byl zvolen model metody nosníku, dle kterého jsem provedl návrh a realizaci přípravku, na kterém byla ověřena funkčnost. K ověření této metody byly zvoleny 4 pasty, přičemž 2 byly vodivé (C 8717E a C1076SD) a 2 dielektrické (QQ550 a 5704). Celkem bylo vytvořeno 10 skupin vzorků, na kterých byla metoda otestována.

Z výsledků měření lze vyvodit, že vzorky s pastou C 8717E a s pastou C1076SD dosahují po výpalu hodnot pnutí kolem 10 MPa, které se ale během 40 dnů trojnásobně zvětší. Toto pnutí dále s časem klesá. U těchto vzorků byl proveden 2hodinový výpal, aby se zjistilo, zda dojde k uvolnění pnutí. V případě stříbrných past tomu ale tak nebylo, ba naopak, jejich pnutí se ještě zvýšilo, a to zhruba 4x. Celkově tyto pasty silně projevují charakter tahového pnutí.

Vzorky s dielektrickou pastou QQ550 projevily po výpalu pnutí zhruba kolem 30 MPa, které se dále s časem téměř neměnilo. Tato pasta je po vypálení velmi stabilní, své vnitřní pnutí se po 160 dnech od prvního výpalu zmenšilo o 1 MPa. Po 2hodinovém výpalu tato pasta dosahovala zhruba o 10 MPa většího pnutí než po prvním výpalu. I tato pasta tedy projevuje charakter tahového pnutí.

Vzorky s pastou pro vícevrstvé obvody 5704 se zdají být taktéž stabilní. Během 160 dnů po výpalu měnily své pnutí jen o ± 5 MPa. Po 2hodinovém výpalu se vzorky s touto pastou změnila a projevovaly spíše charakter tlakového pnutí. Některé vzorky byly prohnuty natolik, že nebylo možné tyto vzorky změřit pomocí měřicího přípravku, který byl sestrojen. Z tohoto důvodu již nebylo možné spočítat u těchto vzorků jejich vnitřní pnutí.

Celkově z měřených past projevovaly největší pnutí pasty stříbrné, které se s časem i nejvíce měnily. Kombinace stříbrných past s dielektriky nejsou natolik zajímavé, protože je to v podstatě kombinace vlastností popsaných výše. Dále by bylo potřeba v měření pokračovat ještě po delší čas, aby se zjistilo, jak se pasty chovají a kdy se jejich pnutí ustálí. To bohužel nebylo možné z důvodu časové náročnosti.

Závěrem lze tedy říci, že mnou vybraná metoda, respektive navržený přípravek je vhodný pro měření pnutí tlustých vrstev, u kterých se předpokládá charakter tahového pnutí. Pro měření vzorků s charakterem tlakového pnutí není tento přípravek vhodný a bylo by potřeba provést jiný návrh přípravku.

Literatura

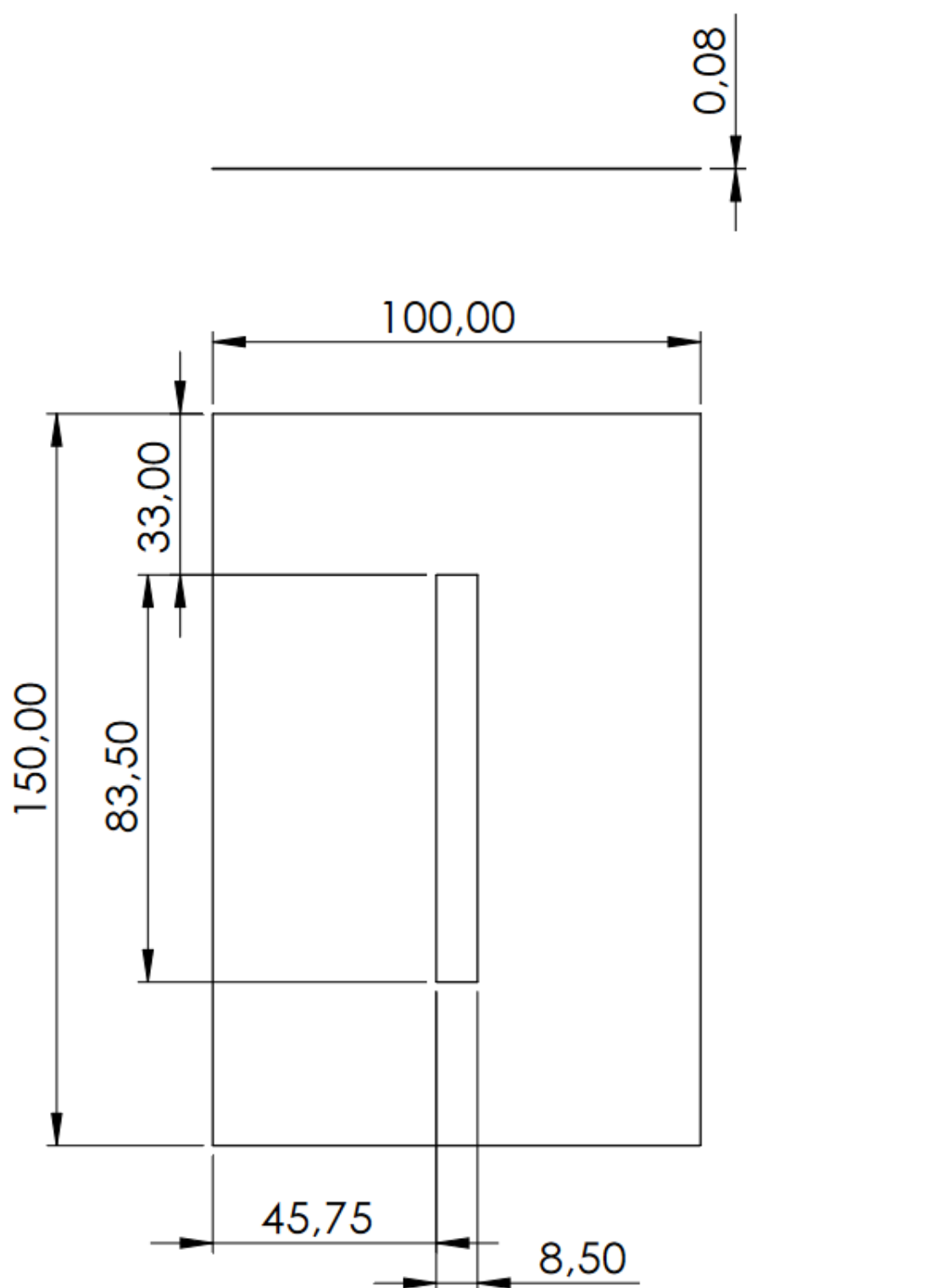
- [1] *Tlusté vrstvy a tlustovrstvé technologie* [online]. nedatováno [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1626/mod_resource/content/1/Tluste_vrstvy.pdf
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *TLUSTÉ VRSTVY (Thick Films)* [online]. 2012 [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41173783-Tluste-vrstvy-thick-films-2.html>
- [3] *TLUSTÉ VRSTVY TISK, VYTVRZENÍ, MĚŘENÍ* [online]. [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://adoc.pub/tluste-vrstvy-tisk-vytvrzeni-meni.html>
- [4] HLÍNA, Jiří, Jan ŘEBOUN, Aleš HAMÁČEK, Katedra TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ FAKULTA a Západočeská UNIVERZITA V PLZNI. *Vlastnosti měděných a stříbrných tlustých vrstev na keramických substrátech Properties of Copper and Silver Thick Films on Ceramic Substrates* [online]. nedatováno [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26467/1/Hlina.pdf>
- [5] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektrotechnice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [6] SOUTOR, Zdeněk, Josef ŠAVEL a Jaroslav ŽŮREK. *Hybridní integrované obvody*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [7] *Sheet Resistance Equations and Theory | Complete Guide | Ossila* [online]. [vid. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/sheet-resistance-theory>
- [8] SERGENT, Jerry E a Charles A HARPER. *Hybrid Microelectronics Handbook*. Second edi. 1995. ISBN 0-07-026691-3.
- [9] Thick Film Processes. *Hybrid Microcircuit Technology Handbook* [online]. 1998, 104–171. Dostupné z: doi:10.1016/B978-081551423-7.50006-7
- [10] CAO, Yu, Xiangyou LI a Xiaoyan ZENG. Frequency characteristics of the MIM thick film capacitors fabricated by laser micro-cladding electronic pastes. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology* [online]. 2008, **150**(3), 157–162. ISSN 09215107. Dostupné z: doi:10.1016/j.mseb.2008.04.007
- [11] FANG, Jun, Renli FU, Xiguang GU, Xinyao ZHANG a Guojun LI. Characterization of glass insulating thick films with ag conductors for multilayer packages. *Materials*

- [online]. 2021, **14**(3), 1–13. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14030494
- [12] MERUNKA, František a Josef SVETLÍK. *Technologie součástek a obvodů I: Hybridní integrované obvody*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987.
- [13] ČÁCHA, Martin. UV vytvrzování sítotiskových past. *ZČU, Plzeň* [online]. 2018 [vid. 2021-09-12]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/32371/1/BP_Martin_Cacha.pdf
- [14] *Plně automatický sítotiskový stroj* [online]. [vid. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.finish-pce.cz/plne-automaticky-sitotiskovy-stroj>
- [15] KOŘÍNEK, Ota. *Sítotisk a serigrafie*. Praha: Ota Kořínek, 1991. ISBN 80-900060-6-X.
- [16] *Sítotiskové rámy, síťoviny a šablony* [online]. 2011 [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_II/VY_32_INOVACE_A-03-15.pdf
- [17] *Schematic illustration of the dispenser printing process. The ink is... / Download Scientific Diagram* [online]. [vid. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-dispenser-printing-process-The-ink-is-deposited-in-form-of_fig3_274140946
- [18] SKOČIL, Vlastimil. *DIFERENCIACE, prezentace KET/Technologie elektroniky*. Plzeň: ZČU, nedatováno.
- [19] LOEHMAN, Ronald E. *Characterization of Ceramics - Ronald E. Loehman - Knihy Google* [online]. [vid. 2021-10-02]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=s9N19sGrKRkC&pg=PA66&lpg=PA66&dq=thick+film+stress+measurement&source=bl&ots=nHmochH6UFk&sig=ACfU3U24YXjQ3LmT81tL8iVkJVwOEHwxburA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjXiic7NHpAhWFLewKHT6CC6k4ChDoATAGegQIChAB#v=onepage&q&f=false>
- [20] MASSL, Stefan. Investigation of Residual Stress Profiles and Fracture Properties of Thin Films. 2008, (July).
- [21] PREISSIG, F. J. von. Applicability of the classical curvature-stress relation for thin films on plate substrates. *Journal of Applied Physics* [online]. 1998, **66**(9), 4262 [vid. 2021-10-02]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.343968
- [22] WILLCOCK, John David. Stress in thin films. 1967, **72**(2), 202–213.
- [23] NIX, William D a R F Mehl MEDALIST. Mechanical Properties of Thin Films. nedatováno.

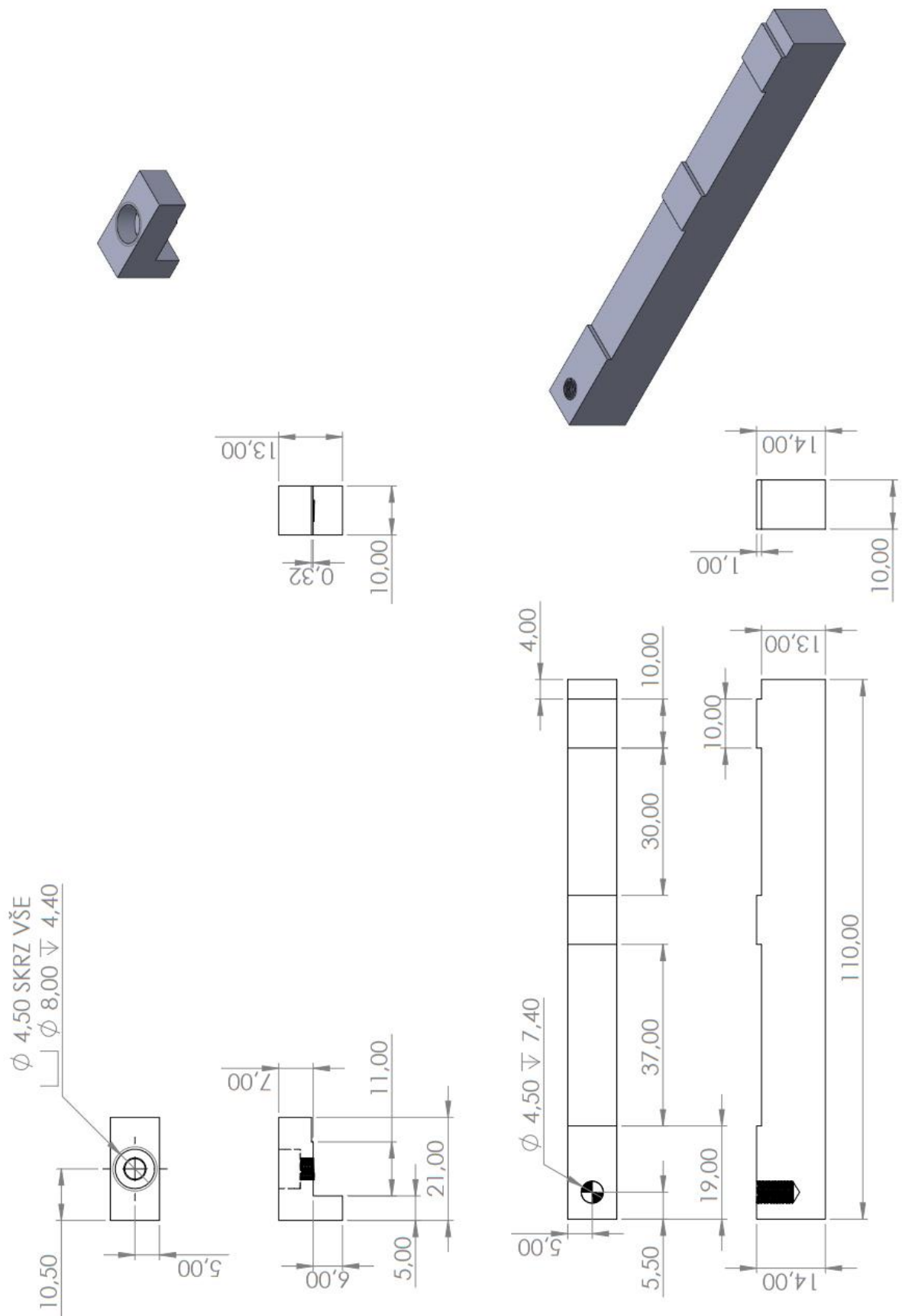
- [24] Analytické metody v mineralogii. nedatováno.
- [25] *Braggův zákon :: MEF* [online]. [vid. 2021-10-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1683-bragguv-zakon>
- [26] SANDER, Dirk, Zhen TIAN a Jürgen KIRSCHNER. Cantilever measurements of surface stress, surface reconstruction, film stress and magnetoelastic stress of monolayers. *Sensors* [online]. 2008, **8**(7), 4466–4486. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s8074466
- [27] OGAWA, H., K. SUZUKI, S. KANEKO, Y. NAKANO, Y. ISHIKAWA a T. KITAHARA. Measurements of mechanical properties of microfabricated thin films. *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* [online]. 1997, 430–435. Dostupné z: doi:10.1109/memsys.1997.581882
- [28] OGAWA, H., K. SUZUKI, S. KANEKO, Y. NAKANO, Y. ISHIKAWA a T. KITAHARA. Tensile testing of microfabricated thin films. *Microsystem Technologies* [online]. 1997, **3**(3), 117–121. ISSN 09467076. Dostupné z: doi:10.1007/s005420050067
- [29] CHASON, E. a B. W. SHELDON. Monitoring Stress in Thin Films During Processing. <http://dx.doi.org/10.1179/026708403225010118> [online]. 2013, **19**(5), 387–391 [vid. 2021-11-11]. ISSN 02670844. Dostupné z: doi:10.1179/026708403225010118
- [30] ROSAKIS, A. J., R. P. SINGH, Y. TSUJI, E. KOLAWA a N. R. MOORE. Full field measurements of curvature using coherent gradient sensing: application to thin film characterization. *Thin Solid Films* [online]. 1998, **325**(1–2), 42–54. ISSN 0040-6090. Dostupné z: doi:10.1016/S0040-6090(98)00432-5
- [31] FINOT, M., I. A. BLECH, S. SURESH a H. FUJIMOTO. Large deformation and geometric instability of substrates with thin-film deposits. *Journal of Applied Physics* [online]. 1997, **81**(8), 3457–3464. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.365042
- [32] *Standard Test Method for Measurements of Internal Stresses in Organic Coatings by Cantilever (Beam) Method* [online]. [vid. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.astm.org/d6991-17e01.html>
- [33] HERAEUS. *Technical Data Sheet: Conductors C 8717E* [online]. 2020. Dostupné z: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/power_electronics_led/Conductors_C8717_E.pdf

- [34] HERAEUS. *Technical Data Sheet: C1076SD* [online]. 2020. Dostupné z: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/passive_components/resistors/Conductors_C1076SD.pdf
- [35] *DuPont | QQ550 - Datasheet PDF & Tech Specs* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.datasheets.com/en/part-details/qq550-dupont-37234294#datasheet>
- [36] *DuPont | 5704 - Datasheet PDF & Tech Specs* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.datasheets.com/en/part-details/5704-dupont-37234278#datasheet>

Příloha 3: Rozměry šablony



Příloha 4: Rozměry přípravku



Příloha 5: Prohnutí po vyžhání

Prohnutí po vyžhání (mm)			
Vzorek	pravá strana	Vzorek	pravá strana
1	0,04	21	0,64
2	0,02	22	0,59
3	0,05	23	0,59
4	0,58	24	0,06
5	0,06	25	0,04
6	0,42	26	0,04
7	0,21	27	0,02
8	0,41	28	0,03
9	0,04	29	0,09
10	0,07	30	0,34
11	0,29	31	0,29
12	0,04	32	0,53
13	0,28	33	0,06
14	0,28	34	0,06
15	0,09	35	0,04
16	0,03	36	0,05
17	0,63	37	0,06
18	0,05	38	0,32
19	0,03	39	0,31
20	0,56	40	0,19

Příloha 6: Vzorčky pasty C 8717E a C1076SD - prohnutí po zasušení a po vypálení

Po vypálení (mm)		Po vypálení (mm)	
Vzorek	C 8717E	Vzorek	C1076SD
1	0,95	11	0,89
2	0,85	12	0,31
3	1,07	13	0,68
4	1,49	14	0,72
5	0,82	15	0,63
6	1,42	16	0,54
7	1,35	17	1,23
8	1,47	18	0,77
9	1,08	19	0,65
10	0,79	20	1,1
36	0,66	31	0,51
37	0,7	32	0,42
38	0,72	33	0,46
39	0,79	34	0,41
40	0,54	35	0,36

Příloha 7: Vzorokly pasty C 8717E a C1076SD - vypočtené pnutí po zasušení a po vypálení

Po vypálení (MPa)		Po vypálení (MPa)	
Vzorek	C 8717E	Vzorek	C1076SD
1	24,49	11	27,78
2	22,34	12	12,50
3	27,45	13	18,52
4	24,49	14	20,37
5	20,46	15	25,00
6	26,92	16	23,61
7	30,68	17	27,78
8	28,53	18	33,33
9	27,99	19	28,70
10	19,38	20	25,00
36	16,42	31	10,19
37	17,23	32	-5,09
38	10,77	33	18,52
39	12,92	34	16,20
40	9,42	35	14,81

Příloha 8: Pasty QQ550 a 5704 - změřené prohnutí

Po vypálení (mm)		Po vypálení (mm)	
Vzorek	QQ550	Vzorek	5704
21	1,13	26	0,42
22	1,2	27	0,14
23	1,17	28	0,4
24	0,21	29	0,16
25	0,45	30	0,85

Příloha 9: Pasty QQ550 a 5704 - vypočtené pnutí

Pnutí vypálení (MPa)		Pnutí vypálení (MPa)	
Vzorek	QQ550	Vzorek	5704
21	26,41	26	17,28
22	32,88	27	5,46
23	31,26	28	16,83
24	8,08	29	3,18
25	22,10	30	23,19

Příloha 10: Pasty C 8717E a C1076SD dvě vrstvy - změřené prohnutí

Po vypálení (mm)		Po vypálení (mm)	
Vzorek	C 8717E	Vzorek	C1076SD
5	1,2	12	0,76
6	1,45	13	0,86
7	1,17	14	0,83
9	1,23	17	1,02
10	1,2	18	1,2

Příloha 11: Pasty C 8717E a C1076SD dvě vrstvy – vypočtené pnutí

Po vypálení (MPa)		Po vypálení (MPa)	
Vzorek	C 8717E	Vzorek	C1076SD
5	12,89	12	8,47
6	11,65	13	6,82
7	10,86	14	6,47
9	13,46	17	4,59
10	12,78	18	13,53

Příloha 12: Krycí pasta QQ550 nanesená na stříbrné pasty C 8717E/C1076SD - změřené prohnutí

Vzorek	Po vypálení (mm)		Vzorek	Po vypálení (mm)	
	C 8717E + QQ550			C1076SD + QQ550	
1	0,85		11	0,73	
2	0,73		15	0,72	
3	0,91		16	0,65	
4	0,84		19	0,69	
8	0,94		20	0,75	

Příloha 13: Krycí pasta QQ550 nanesená na stříbrné pasty C 8717E/C1076SD – vypočtené pnutí

Vzorek	Pnutí vypálení (MPa)		Vzorek	Pnutí vypálení (MPa)	
	C 8717E + QQ550			C1076SD + QQ550	
1	13,15		11	6,72	
2	11,52		15	9,62	
3	13,96		16	9,47	
4	4,22		19	10,08	
8	8,60		20	2,90	

Příloha 14: Krycí pasta 5704 nanesená na stříbrné pasty C 8717E/C1076SD – změřené prohnutí

Po vypálení (mm)		Po vypálení (mm)	
Vzorek	C 8717E + 5704	Vzorek	C1076SD + 5704
36	1,69	31	1,74
37	1,94	32	1,76
38	1,89	33	2,03
39	1,97	34	1,86
40	1,52	35	1,88

Příloha 15: Krycí pasta 5704 nanesená na stříbrné pasty C 8717E/C1076SD – vypočtené pnutí

Pnutí vypálení (MPa)		Pnutí vypálení (MPa)	
Vzorek	C 8717E + 5704	Vzorek	C1076SD + 5704
36	21,17	31	19,76
37	24,27	32	16,76
38	20,27	33	26,84
39	21,43	34	24,52
40	17,17	35	25,07

Příloha 16: Vzorky pasty QQ550 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	Přeměření 160 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	QQ550	QQ550	QQ550	QQ550	QQ550
21	1,13	1,12	1,09	1,11	1,14
22	1,2	1,2	1,2	1,18	1,18
23	1,17	1,18	1,16	1,13	1,39
24	0,21	0,23	0,21	0,22	0,21
25	0,45	0,54	0,53	0,54	0,55

Příloha 17: Vzorky pasty QQ550 – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	Přeměření 120 dnů (MPa)	Přeměření 160 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	QQ550	QQ550	QQ550	QQ550	QQ550
21	26,41	25,87	24,25	25,33	26,95
22	32,88	32,88	32,88	31,80	31,80
23	31,26	31,80	30,72	29,10	43,12
24	8,08	9,16	8,08	8,62	8,08
25	22,10	26,95	26,41	26,95	27,49

Příloha 18: Vzorky pasty 5704 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	Přeměření 160 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	5704	5704	5704	5704	5704
26	0,42	0,45	0,42	0,43	0,11
27	0,14	0,14	0,13	0,14	0,08
28	0,4	0,44	0,41	0,42	0,08
29	0,16	0,17	0,15	0,17	0,09
30	0,85	0,97	0,82	0,9	-

Příloha 19: Vzorky pasty 5704 - vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	Přeměření 120 dnů (MPa)	Přeměření 160 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	5704	5704	5704	5704	5704
26	17,28	18,64	17,28	17,73	3,18
27	5,46	5,46	5,00	5,46	2,73
28	16,83	18,64	17,28	17,73	2,27
29	3,18	3,64	2,73	3,64	0,00
30	23,19	28,65	21,83	25,47	-

Příloha 20: Vzorky pasty C 8717E - 2 vrstvy – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C 8717E	C 8717E	C 8717E	C 8717E	C 8717E
5	1,2	2,85	2,61	2,44	3,22
6	1,45	3,08	2,8	2,65	3,91
7	1,17	2,77	2,49	2,37	3,16
9	1,23	2,66	2,36	2,24	3,25
10	1,2	2,81	2,46	2,34	2,98

Příloha 21: Vzorky pasty C 8717E - 2 vrstvy – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 1 40 dnů (MPa)	Přeměření 2 80 dnů (MPa)	Přeměření 3 120 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C 8717E	C 8717E	C 8717E	C 8717E	C 8717E
5	12,89	31,56	28,84	26,92	35,74
6	11,65	30,09	26,92	25,22	39,47
7	10,86	28,95	25,79	24,43	33,37
9	13,46	29,63	26,24	24,88	36,31
10	12,78	30,99	27,03	25,67	32,91

Příloha 22: Vzorok pasty C1076SD - 2 vrstvy – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C1076SD	C1076SD	C1076SD	C1076SD	C1076SD
12	0,76	1,91	1,64	1,6	2,25
13	0,86	2,1	1,87	1,79	2,47
14	0,83	2,1	1,82	1,78	2,36
17	1,02	2,74	2,42	2,4	3,08
18	1,2	3,09	2,77	2,63	3,33

Příloha 23: Vzorok pasty C1076SD - 2 vrstvy – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 40 dnů (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	Přeměření 120 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C1076SD	C1076SD	C1076SD	C1076SD	C1076SD
12	8,47	22,00	18,82	18,35	26,00
13	6,82	21,41	18,71	17,77	25,77
14	6,47	21,41	18,12	17,65	24,47
17	4,59	24,82	21,06	20,82	28,83
18	13,53	35,77	32,00	30,35	38,59

Příloha 24: Vzorok pasty C 8717E s krycí pastou QQ550 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550
1	0,85	2,32	2,19	2,22	2,34
2	0,73	1,94	1,77	1,81	2,02
3	0,91	2,39	2,22	2,21	2,46
4	0,84	2,22	2,03	2,01	2,32
8	0,94	2,47	2,25	2,29	2,49

Příloha 25: Vzorok pasty C 8717E s krycí pastou QQ550 – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 40 dnů (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	Přeměření 120 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550	C 8717E + QQ550
1	13,15	37,01	34,90	35,38	37,33
2	11,52	31,16	28,40	29,05	32,46
3	13,96	37,98	35,22	35,06	39,12
4	4,22	26,62	23,53	23,21	28,24
8	8,60	33,43	29,86	30,51	33,76

Příloha 26: Vzorok pasty C1076SD s krycí pastou QQ550 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 1 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	Přeměření 120 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550
11	0,73	1,84	1,74	1,68	1,78
15	0,72	1,88	1,78	1,79	1,81
16	0,65	1,8	1,68	1,75	1,73
19	0,69	1,82	1,69	1,72	1,75
20	0,75	1,96	1,84	1,91	1,97

Příloha 27: Vzorok pasty C1076SD s krycí pastou QQ550 – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 40 dnů (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	Přeměření 120 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550	C1076SD + QQ550
11	2,55	9,00	8,42	8,07	8,65
15	3,66	10,39	9,81	9,87	9,99
16	3,60	10,28	9,58	9,99	9,87
19	3,83	10,39	9,64	9,81	9,99
20	1,10	8,13	7,43	7,84	8,19

Příloha 28: Vzorky pasty C 8717E s krycí pastou 5704 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704
36	1,69	1,43	1,5	0,21
37	1,94	1,71	1,9	0,26
38	1,89	1,67	1,75	-
39	1,97	1,74	1,76	-
40	1,52	1,35	1,38	-

Příloha 29: Vzorky pasty C 8717E s krycí pastou 5704 – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 40 dnů (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704	C 8717E + 5704
36	21,17	17,81	18,72	2,07
37	24,27	21,30	23,75	2,58
38	20,27	17,43	18,46	-
39	21,43	18,46	18,72	-
40	17,17	14,97	15,36	-

Příloha 30: Vzorčky pasty C1076SD s krycí pastou 5704 – změřené prohnutí

	Po vypálení (mm)	Přeměření 40 dnů (mm)	Přeměření 80 dnů (mm)	2 hodiny výpal (mm)
Vzorek	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704
31	1,74	1,52	1,59	-
32	1,76	1,62	1,63	-
33	2,03	1,85	1,9	0,24
34	1,86	1,67	1,71	0,21
35	1,88	1,79	1,82	0,19

Příloha 31: Vzorčky pasty C1076SD s krycí pastou 5704 – vypočtené pnutí

	Pnutí vypálení (MPa)	Přeměření 40 dnů (MPa)	Přeměření 80 dnů (MPa)	2 hodiny výpal (MPa)
Vzorek	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704	C1076SD + 5704
31	19,76	16,76	17,71	-
32	16,76	14,85	14,99	-
33	26,84	24,39	25,07	2,45
34	24,52	21,94	22,48	2,04
35	25,07	23,84	24,25	2,04