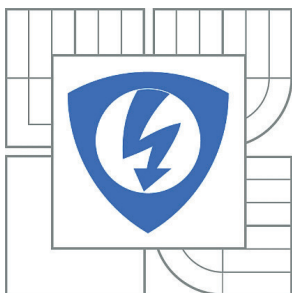


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## VODIVÉ VRSTVY REALIZOVANÉ NA NÍZKOTEPLTNÍ KERAMICE

THE CONDUCTIVE LAYERS IN LTCC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

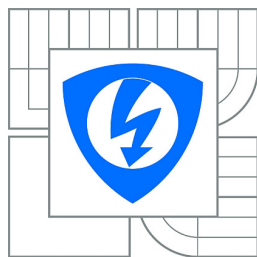
TOMÁŠ POLEDNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KOSINA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Tomáš Poledník

**ID:** 120797

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Vodivé vrstvy realizované na nízkoteplotní keramice**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti vytváření vodivého motivu na nízkoteplotní keramice. Zjistěte vlastnosti jednotlivých vrstev a stanovte způsoby hodnocení kvality. Proveďte měření proudové zatížitelnosti pro vrstvy na povrchu a uvnitř struktury. V závěru zhodnoťte získané výsledky a navrhnete možné využití nízkoteplotní keramiky (LTCC) ve výkonových aplikacích.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 31.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Kosina

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce byla zaměřena na určení limitních mezí sítotisku a stanovení výkonové zatížitelnosti vrstev na LTCC. Popisuje tisk vodivých motivů sítotiskovou metodou na substrátech. Obsahuje popis měření na vodivých vrstvách a zpracování jeho výsledků. Také bylo provedeno tištění vrstev na korundovou keramiku pro porovnání výsledků. Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy které znázorňují možnost výkonového zatížení vrstev v závislosti na teplotě a šířce tlustovrstvého vodiče.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Nízkoteplotní keramika, vrstva, folie, Heraeus, HL2000, sítotisk, proudová zatížitelnost, motiv, vzorek, laminace, pasta, přepal

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis was focused on a determination of the limits of screen printing and on establishing a power loading of layers on LTCC. It describes the print of the conductive themes via the screen-printing method on the substrata. The thesis contains the description of a measuring on the conductive layers, and a processing its results. It was also performed the printing of layers on a corundum ceramics in order to compare the results. From the measured values were formed the graphs, which represent the possibility of the power loading of layers depending on the temperature and on the width of the thick-layer guide.

## **KEYWORDS**

Low temperature ceramics, layer, foil, Heraeus HL2000, screen printing, current carrying capacity, motif, sample, paste, blow

**Bibliografická citace mé práce:**

POLEDNÍK, T. *Vodivé vrstvy realizované na nízkoteplotní keramice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma **Vodivé vrstvy realizované na nízkoteplotní keramice** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 15. května 2011

.....

podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kosinovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 15. května 2011

.....

podpis autora

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>2 LTCC Technologie</b> .....	<b>- 2 -</b>
2.1 Vlastnosti, složení LTCC .....	- 2 -
2.2 Multivrstvé obvodové struktury .....	- 3 -
2.3 Technologický proces výroby LTCC .....	- 4 -
2.3.1 Smrštivost vrstev LTCC .....	- 5 -
<b>3 Vytváření vodivého motivu</b> .....	<b>- 6 -</b>
3.1 Tlusté vrstvy .....	- 6 -
3.2 Materiály pro tištění tlustých vrstev na LTCC .....	- 7 -
3.2.1 Sítotisk .....	- 8 -
3.3 Tenké vrstvy .....	- 9 -
3.4 Integrace pasivních prvků .....	- 9 -
<b>4 Způsoby testování vrstev</b> .....	<b>- 10 -</b>
4.1 Optické testování .....	- 10 -
4.1.1 Měřicí technika .....	- 11 -
4.1.2 Motiv pro kvalitu sítotisku .....	- 11 -
4.2 Elektrické testování .....	- 12 -
4.2.1 Motiv pro měření proudové zatížitelnosti vrstev .....	- 13 -
4.3 Teorie výkonových pouzder .....	- 14 -
<b>5 Experimentální část</b> .....	<b>- 15 -</b>
5.1 Popis testovacích motivů .....	- 15 -
5.2 Výroba testovacích vzorků .....	- 15 -
5.3 Měření vrstev .....	- 18 -
5.3.1 Měření na optické soustavě .....	- 18 -
5.3.2 Optická kontrola natištěných vrstev .....	- 20 -
5.3.3 Zhodnocení výsledků optické kontroly .....	- 23 -
5.4 Elektrické testování vrstev .....	- 24 -
5.5 Proudová zatížitelnost nepřekrytých vzorků .....	- 25 -
5.6 Proudová zatížitelnost překrytých vzorků .....	- 27 -
5.7 Výkonové omezení vrstev LTCC .....	- 28 -
<b>6 Závěr</b> .....	<b>- 30 -</b>
<b>7 Seznam literatury</b> .....	<b>- 32 -</b>
<b>8 Seznam zkratk</b> .....	<b>- 33 -</b>
<b>9 Příloha</b> .....	<b>- 34 -</b>

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1.:</b> Struktura základního materiálu LTCC[3].....	- 2 -
<b>Obr. 2.:</b> Příklad vícevrstvé 3D struktury v technologii LTCC [5] .....	- 3 -
<b>Obr. 3.:</b> Struktura spojení dvou pásků nízkoteplotní keramiky [11].....	- 4 -
<b>Obr. 4.:</b> Vypalovací profil pro LTCC firmy Heraus, substrát HL2000 [1].....	- 5 -
<b>Obr. 5.:</b> Závislost viskozity na tlaku a napnutí síta síta na protažení[1] .....	- 7 -
<b>Obr. 6.:</b> Výrobní postup sítotisku.....	- 9 -
<b>Obr. 7.:</b> Interferenční mikroskop (zjednodušené schéma) [8].....	- 11 -
<b>Obr. 8.:</b> Testovací motiv kvality sítotisku[9], převzato z DP. Práce Viktora Valy.....	- 12 -
<b>Obr. 9.:</b> Detail motivu pro měření proudové zatížitelnosti vrstev[10].....	- 13 -
<b>Obr. 10.:</b> Testovací motiv pro měření proudové zatížitelnosti[10].....	- 16 -
<b>Obr. 11.:</b> Nadělený motiv pro testování .....	- 17 -
<b>Obr. 12.:</b> Korundová keramika natištěná zlatou pastou TC 8101 .....	- 18 -
<b>Obr. 13.:</b> Detail části vodivé vrstvy „Y“ na substrátu LTCC pro odečet tloušťky vrstvy .	- 19 -
<b>Obr. 14.:</b> LTCC natištěno pastou TC0306 v části „B“ pod úhlem 15°, je vidět natištěná vrstva, kde nedocházelo k soutisku jednotlivých částí do sebe, rozlišovací schopnost zde byla dostačující.....	- 21 -
<b>Obr. 15.:</b> LTCC, pasta TC0306 v části „B“ pod úhlem 15°, po zasušení jeví známky přetrhání vodivé dráhy na substrátu. Je pozorovatelné smrštění pasty v ose x a y... -	21 -
<b>Obr. 16.:</b> LTCC, pasta TC0307– část motivu „D“ pod úhlem 60°, po výpalu vrstvy se celý vodivý motiv ucelil, jednotlivé vodivé dráhy jsou pod mikroskopem bez zjevné vlásečnicové poruchy.....	- 22 -
<b>Obr. 17.:</b> LTCC, pasta TC0307 – část motivu „A“ pod nulovým úhlem, po tisku docházelo k nedokonalému natištění, přerušeni vodivých drah, rozlišovací schopnost je zde překročena .....	- 22 -
<b>Obr. 18.:</b> LTCC, Pasta TC0306 – část motivu „F“, pod úhlem 75°, po zasušení, rozlišovací schopnost sítotisku je na obrázku již překročena, dochází ke slití vodivých drah ....	- 23 -
<b>Obr. 19.:</b> Schéma zapojení měřicí soustavy pro měření proudového zatížení obvodu .....	- 24 -
<b>Obr. 20.:</b> Detail přerušeni vodivé vrstvy na LTCC, pasta TC 8101 a TC 0306.....	- 25 -
<b>Obr. 21.:</b> Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy $w = 550 \mu\text{m}$ , vzorek 8, pasta TC 0306.....	- 26 -
<b>Obr. 22.:</b> Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy $w = 500 \mu\text{m}$ , vzorek 7, pasta TC 8101.....	- 26 -
<b>Obr. 23.:</b> Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných zalaminovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy $w = 200 \mu\text{m}$ , vzorek 1, pasta TC 0306 .....	- 27 -
<b>Obr. 24.:</b> Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných zalaminovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy $w = 600 \mu\text{m}$ , TC 8101 .....	- 28 -
<b>Obr. 25.:</b> Druhé místo testovacího motivu kvality sítotisku pro odečet tloušťky vrstvy ...	- 34 -
<b>Obr. 26.:</b> Nízkoteplotní keramika natištěná pastou TC 8101 .....	- 34 -
<b>Obr. 27.:</b> Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 8101 po tisku.....	- 35 -
<b>Obr. 28.:</b> Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 8101 po zasušení-	35 -
<b>Obr. 29.:</b> Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 0306 po výpalu..	- 36 -
<b>Obr. 30.:</b> LTCC, Pasta TC8101 – část motivu D pod úhlem 15°, po výpalu jsou vodivé dráhy slité do jednoho celku. ....	- 36 -
<b>Obr.31.:</b> LTCC, Pasta TC8101 – část motivu „F“ pod úhlem 75°, je zde vidět přechod dostačujícího rozlišení vrstvy .....	- 37 -
<b>Obr. 32.:</b> Celkový vrchní schématický pohled na překrytou zalaminovanou vrstvu .....	- 37 -

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1.:</b> Parametry základního materiálu LTCC, Heralock HL 2000 .....	- 2 -
<b>Tab. 2.:</b> Základní parametry past pro LTCC od firmy Heraeus .....	- 7 -
<b>Tab. 3.:</b> Šířka přepalových vodičů na testovacím motivu .....	- 13 -
<b>Tab. 4.:</b> Tloušťky vrstev na LTCC a Korundu .....	- 20 -
<b>Tab. 5.:</b> Bezpečné výkonové zatížení vrstev .....	- 29 -

# 1 Úvod

Výroba elektronických systémů a obvodů na keramických substrátech se uplatňuje v elektronice řadu let. Relativně novým přístupem v chápání tlustovrstvých technologie je její modifikace s využitím LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics). Jedná se o nízkoteplotně vypalovanou keramiku. Parametry základního materiálu předurčují LTCC k použití pro vícevrstvou strukturu, které se využívají v mnoha technologických oborech. Nejčastěji nacházejí využití v elektrotechnice, elektronice, chemickém průmyslu a medicíně. Jejich výhoda spočívá v teplotní, chemické odolnosti a stálosti fyzikálních parametrů. Použití LTCC přineslo výrazné rozšíření vrstvou technologie. Efektivita výroby představuje skládání motivů do vrstev, kterými se docílí zmenšení celého obvodu a zlepšení výkonových parametrů. Potenciál LTCC se s úspěchem využívá při tvorbě multivrstvých struktur MCM-C (Multi Chip Modules Ceramic). [1]

Mezi nejběžněji používané materiály pro vytváření vodivých struktur patří korundová keramika. Tento materiál nachází uplatnění i pro velmi přesné motivy s velice širokým rozsahem použitelných výkonových zatížení které ovšem neumožňuje řazení do vrstev. Tento nedostatek odstranil materiál LTCC který použitím ve vrstvou obvodech dosahuje daleko lepších výkonových parametrů.

Technologie LTCC se stále vyvíjí, zlepšují se parametry základního materiálu a vytváří se stále nové pasty pro tištění na tento substrát, tím se zajišťuje zkvalitňování a rozšíření použitelnosti.

Tato práce v experimentální části má za úkol zjistit limitní meze natištěných vodivých vrstev na LTCC a porovnat je s naměřenými hodnotami na korundové keramice, následně změřit proudovou zatížitelnost a teploty vodivých motivů pro využití ve výkonových aplikacích.

## 2 LTCC Technologie

V této kapitole je obecně popsána technologie LTCC se zaměřením na substrát od výrobce Heraeus. Materiály od tohoto výrobce byly používán v celé práci.

### 2.1 Vlastnosti, složení LTCC

Základní materiál LTCC je dodáván výrobcem jako ohebná folie ve formě pásky tj.( nevytvrzený substrát. Tato folie materiálu určuje výsledné vlastnosti šíření tepla vrstvami, teplotní roztažnost a pevnost v ohybu. Flexibilita LTCC v nevypáleném stavu umožňuje ohýbání a také vytváření netradičních struktur laserovým zařízením, například kanálky, dutiny, otvory(vodivé prokovy mezi vrstvami) nebo technologické otvory pro sesouhlasení vrstev.

**Tab. 1.:** Parametry základního materiálu LTCC, Heraclon HL 2000

<b>Tepelná vodivost</b>	<b>Koeficient tepelné roztažnosti</b>	<b>Pevnost Rm</b>
<b>(W.m-1K-)</b>	<b>(10-6K-1)</b>	<b>(Mpa)</b>
2 - 4	4,3	190

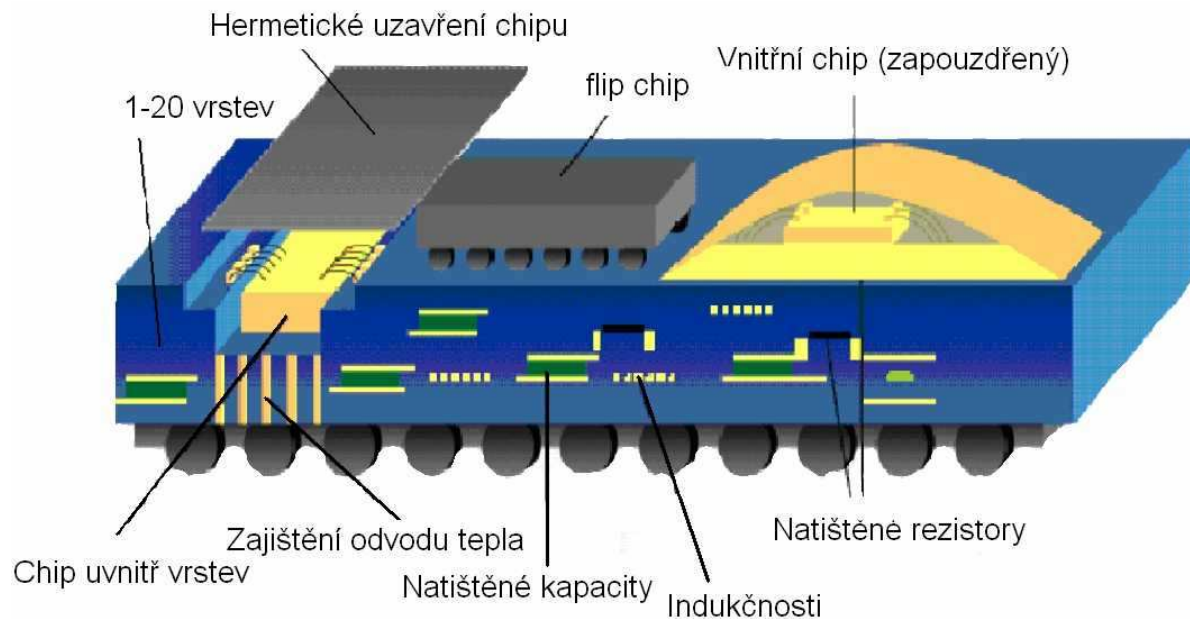
Substrát LTCC představuje poměr složení keramiky, skelných frit a stopových prvků které se v katalogových listech neuvádí. Tyto dvě složky jsou nejčastěji v poměru 1:3, kdy skelné frity tvoří zhruba třetinu hmotnosti směsi. Volba poměru keramiky a skla závisí především na požadavcích které má splňovat, z hlediska koeficientu TCE (Temperature Coefficient of Expansion) teplotní roztažnosti a mechanických vlastností. Pro nižší hodnotu teplotního koeficientu se přidávají prvky oxidu křemičitého, mulitu, cordieritu a zirkonu. [2]



**Obr. 1.:** Struktura základního materiálu LTCC[3]

## 2.2 Multivrstvé obvodové struktury

Technologie LTCC jako celek umožňuje snadněji realizovat takzvané „3D“ struktury. Jednotlivým vrstvám je technologií výroby umožněno zvolit parametry jako dobrý odvod tepla nebo správnou hodnotu dielektrika pro kondenzátory. Může být také dosaženo různých tepelných roztažností a vodivostí u jednotlivých vrstev. Paralelně tvořené vrstvy klasické technologie např. tlusté vrstvy na korundové keramice toto neumožňují. [4] Příklad typické 3D struktury je vidět na obr. 2.



**Obr. 2.:** Příklad vícevrstvé 3D struktury v technologii LTCC [5]

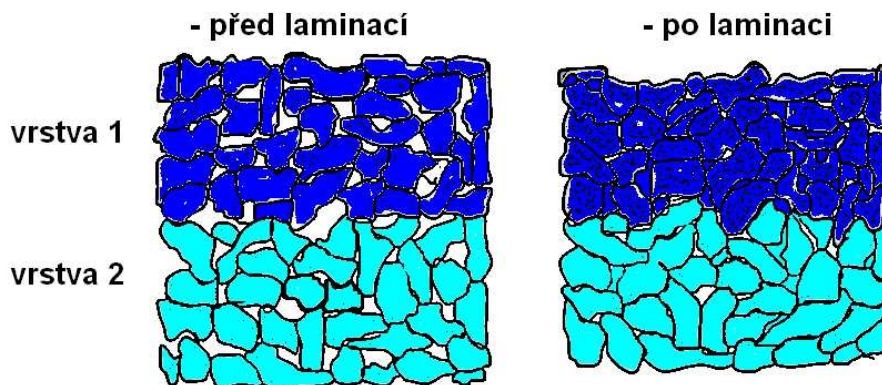
Jedná se o systémy, tvořené z vodivých drah plošně tisknutých a vzájemně vodivě propojených skrz izolační vrstvu [1]. Je možné docílit vnoření pasivních elektronických prvků (např. odporů nebo kondenzátorů) do struktury, tím se uvolní místo pro další komponenty obvodu na povrchu struktury.

Multivrstvé struktury se mohou vyrábět z celých jednotlivých plátů LTCC keramiky, nemusí dojít k nadělení materiálu na rozměry které bude mít koncová aplikace, může dojít k pouze částečnému naryhování struktury pro následné snadné pozdější dělení. K nařezání rozměru dochází i po vyrobení celých aplikací. Po vysušení jsou řezány technologické otvory pro sesouhlasení vrstev. Případné řezání keramiky na potřebnou velikost, se provádí laserem. Výkon laserového zařízení je závislý na tloušťce použitého materiálu. Vodivé vrstvy a pasivní prvky se realizují pomocí filmové předlohy pro síťotiskové síto ve formě motivu. Pomocí zařízení pro tisk vrstev se následně vytváří vodivý motiv. Podle potřeby jsou pak na jednotlivé vrstvy substrátu vytvořeny další pasivní prvky.

## 2.3 Technologický proces výroby LTCC

Tenké fólie nízkoteplotní keramiky představuje základní materiál. Vytvoří se homogenní a tvarná směs nazývaná „slip“ která je nanášena na podložku, nejčastěji polyamidovou. Fólie postupuje do zařízení ve kterém se upravuje tloušťka na požadovanou hodnotu 50 až 200  $\mu\text{m}$ . Následně do vysoušecího procesu, ve kterém je vysušena až 30 minut, při teplotě 120°C. Po tomto procesu je keramika LTCC dodávána pro zpracování do výrobních procesů, a je připravena pro použití při výrobě multivrstvých struktur.

Pro použití ve vrstevných obvodech dochází k sesouhlasení a stlačení. Tyto kroky probíhají v jednom kroku, snadno se to realizují a případné rozdělení těchto procesů by mohlo vést k posuvům jednotlivých vrstev mezi sebou. Vrstvy jsou k sobě stlačeny po dobu přibližně 10 minut za stálého působení konstantního tlaku (2100 N/cm nebo 1500 psi) a teploty obvykle 70 °C. Ukázka spojení dvou pásků je uvedena na obr. 3. Při zahřátí pásky dochází k jejich měknutí a za působení tlaku k jejich vzájemnému spojení, které v této fázi není příliš pevné a proto není vhodné vytvořenou strukturu příliš mechanicky namáhat ohýbáním. K úplnému spojení dojde až při výpalu, kdy se vlivem teploty slinou skelné fáze pásků nízkoteplotní keramiky.

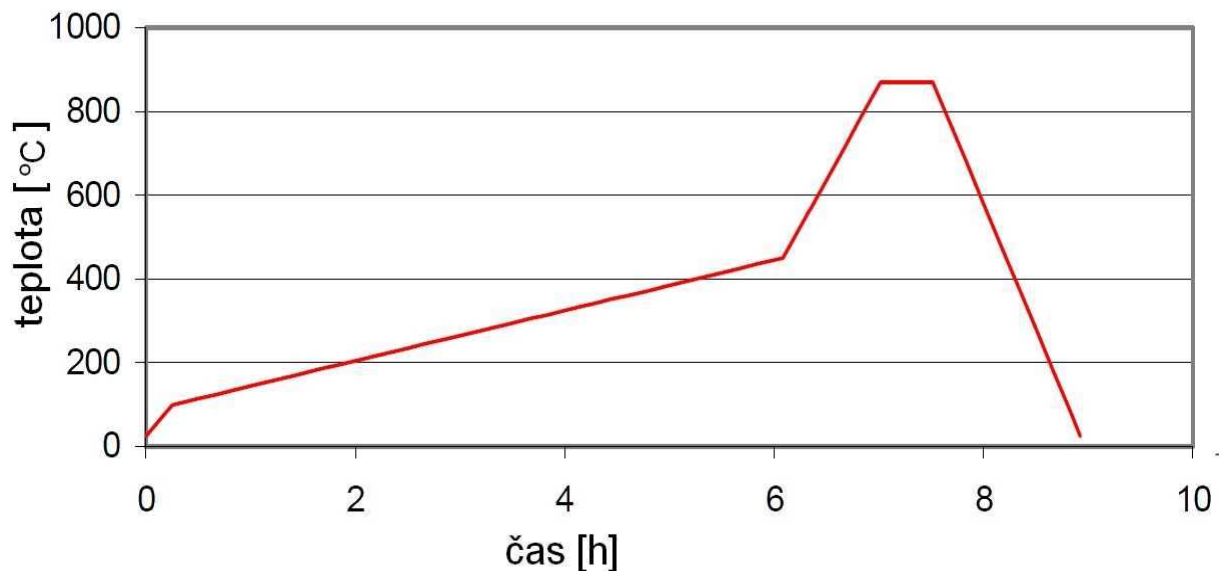


**Obr. 3.:** Struktura spojení dvou pásků nízkoteplotní keramiky [11]

Při laminaci se používá anaxiální tlak (působící v jedné ose), lze dosáhnout dobrých výsledků pouze u struktur s menším počtem pásků. Díky své jednoduchosti je to jeden z nejpoužívanějších způsobů.

Další způsob je izostatická laminace (tlak působí ve všech směrech). Patří mezi kvalitnější způsoby ale je náročnější na použité zařízení. Zhuštěním materiálu se dosahuje lepších parametrů a upravuje se tloušťka vrstev. Tento způsob laminace je realizován většinou v kapalném prostředí a používá se až při větším počtu pásků cca nad 20 ks.

Výpal vrstev probíhá podle daného vypalovacího profilu pro nízkoteplotní keramiku konkrétního výrobce, je časově a teplotně variabilní a závisí na tloušťce, smrštění a případného počtu vrstev. Při nedodržení vypalovacího profilu dochází k deformacím keramiky. Příklad vypalovacího profilu pro LTCC technologii od Heraeus je zobrazen na obr. 4.



**Obr. 4.:** Vypalovací profil pro LTCC firmy Heraeus, substrát HL2000 [1]

### 2.3.1 Smrštivost vrstev LTCC

Specifická vlastnost v procesu výpalu LTCC je smrštivost. Pro každý substrát je výrobcem definována jinak. Smrštění je třeba zahrnout do procesu návrhu vytváření celé požadované struktury. Zmenšení substrátu je zapříčiněno zejména odpařením pojivých složek. Vodivá struktura při výrobě aplikací, musí mít stejné parametry smrštění jako použitý substrát LTCC. Tento fakt nabývá významnosti při výrobě substrátů velkých rozměrů. [2], [7]. Substrát HL2000 od firmy Heraeus má smrštivost ve směru os x a y v rozmezí  $0,2 \pm 0,04$  % a ve směru osy z (tloušťky vrstvy) 32%.

## 3 Vytváření vodivého motivu

Procesy nanášení vodivých vrstev na keramické materiály se dělí podle tloušťky nanesené vrstvy na tenkovrstvé a tlustovrstvé. Existují různé technologie vytváření vrstev. Přenesení vrstvy materiálu na nosný substrát je vytvořena vodivá dráha nejvhodnějším technologickým procesem.

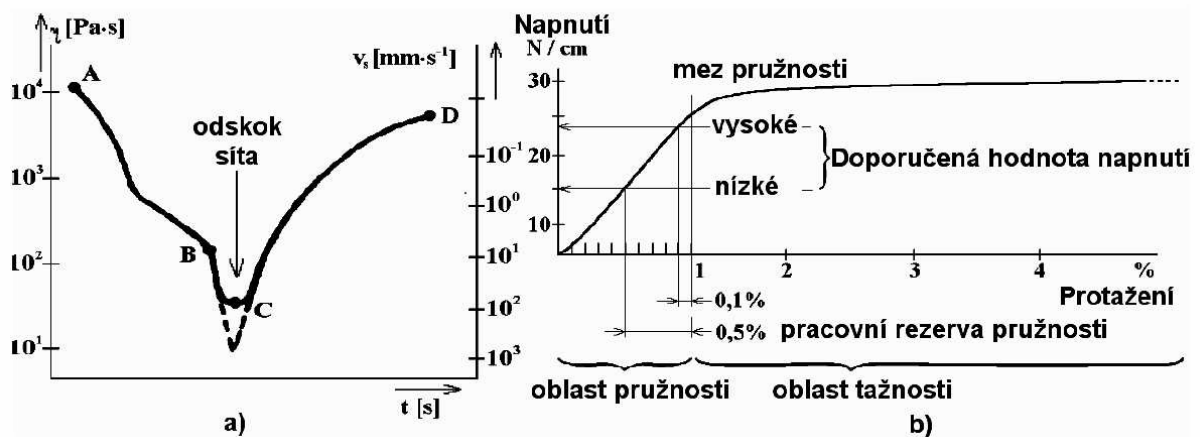
### 3.1 Tlusté vrstvy

Tlusté vrstvy jsou vytvářeny na keramických substrátech. Většina aplikací této technologie je charakteristická amorfni strukturou.[1] Pro vytvoření motivu na vrstvě se používá sítotisk a šablonový tisk. Výhoda tlustovrstvé technologie je v jednoduchosti výroby a použité atmosféře při výrobě.[2] Touto technologií se realizují vodivé, odporové a dielektrické vrstvy. Amorfni struktura bývá často vytvořena nevakovanými depozitními metodami s následným výpalem při teplotě 850°C, u dielektrik 550°C. Tloušťky po výpalu se pohybují řádově v desítkách  $\mu\text{m}$ , tedy přibližně o dva řády více než je tomu u tenkých vrstev. Na substrátu se tiskne materiály ve formě past, které se skládají ze složek.

- Funkční složka: - zajišťuje elektrické vlastnosti vrstvy. Je tvořena částicemi drahých kovů nebo částicemi dielektrických a skelných frit.. Velikost částic u jednotlivých složek se pohybuje řádově v mikrometrech z důvodu spolehlivého přenosu částic na síto.[6]

- Tavnivová složka: - složka která zajišťuje dostatečnou viskozitu pasty během nanášení. Pro tavnivové složky se používají nízkotavná skla s teplotou měknutí již někde kolem 600 °C. Při výpalu složky musí dojít k měknutí, nikoli však k roztavení. Organická složka je z tavnivové odstraněna během výpalu vrstvy při teplotě kolem 850 °C. [6]

- Pojivová složka (organické pojivo): - zajišťuje spojení všech složek, je obsažená v pastě a zlepšuje její tiskové vlastnosti. Viskozitu tvoří organické látky obsažené ve složce a to např. terpineol, butyldiglykolacetát. Složka zajišťuje i měkkost , kterou lze využít při vytváření struktur různých tvarů. V průběhu tepelného procesu se odpaří a nepodílí se na konečném zpracování a funkci vrstvy. [6]



Obr. 5.: Závislost viskozity na tlaku a napnutí síta síta na protažení[1]

Hybridní, komponentní a sensorové pasty pro LTCC obsahují všechny tyto tři základní složky. Každá z těchto složek je pro pastu nezbytná. Využívá se změn parametrů elektrických vlastností v procesu. Natištěné vrstvy se stávají funkčními až po výpalu.

### 3.2 Materiály pro tištění tlustých vrstev na LTCC

Heraeus HL2000 nabízí širokou nabídku past pro výrobu vodivých vrstev. V pastách pro vodivé vrstvy se používají kovy, nejčastěji zlato a stříbro. Pasty s těmito prvky jsou vyráběny s hrubostí zrn 75 mikronů. Základní parametry past jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2.: Základní parametry past pro LTCC od firmy Heraeus

Typ pasty	Rezistivita	Viskozita	Pájitelnost	Doba sušení
TC 0307	$\leq 3.0$ miliOhm	180-240 Kcps	ne	80°C/10-20 min
TC 8101	$< 10$ miliOhm	380-480 Kcps	ano	80°C/10 min
TC 0306	$\leq 3.0$ miliOhm	200-300 Kcps	ano	80°C/10 min

U TFT past jsou částice prvků rozpouštěné v pájce a proto se používají slitiny z kovů které tyto nevýhody eliminují. U LTCC se využívají pasty s čistými kovy. Vrstva po výpalu obsahuje pouze částice kovu který tvoří vodivou vrstvu. [5]

Práškové systémy které obsahují mikroskopické části kovů jsou značeny „KQ“ systémy. KQ je pouze označení rodiny materiálů a nemá hlubší význam. Kromě standardních tlustovrstvých, odporových a dielektrických past, které vlastnostmi odpovídají vlastnostem LTCC keramiky, přichází do úvahy použití těchto past. Ty se vyznačují společnou vlastností, kterou je možnost vytváření vodivých drah kolem 25  $\mu\text{m}$ , při použití vhodných substrátů a optimálních technologických podmínkách dokonce 10  $\mu\text{m}$ . Uvedené materiály se uplatňují především v mikrovlnných aplikacích. [3]

Rezinátové pasty jsou metalo-organického složení. Tyto pasty se skládají z metalo-organických sloučenin které jsou rozpuštěné v éterických olejích. Mohou také obsahovat pryskyřici jako pojivo pro úpravu vlastností vrstev. Tloušťka dosažené vrstvy se u rezinátových past pohybuje od 0,1 do 0,6  $\mu\text{m}$  po výpalu. Tloušťky před výpalem se v katalogových listech neuvádí.[3]

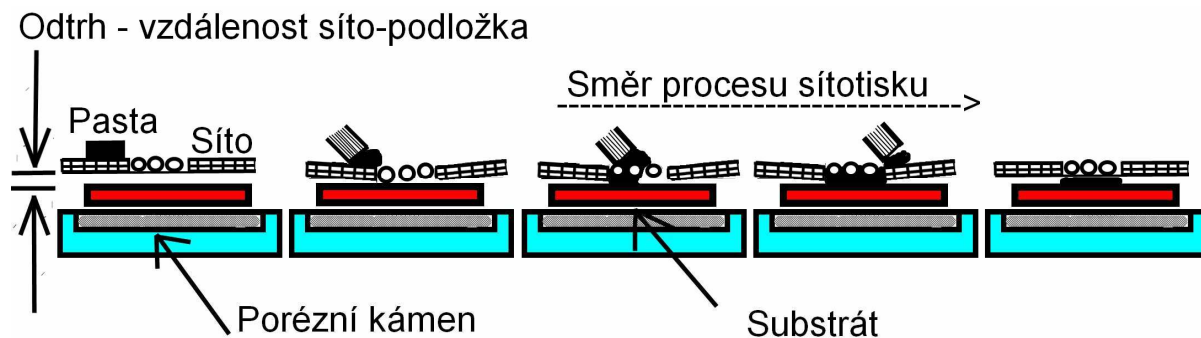
### 3.2.1 Sítotisk

K tištění vodivých vrstev na LTCC keramiku se používá klasických metod sítotisku. Minimální rozlišení vodič-mezera je zpravidla dána možnostmi použitého sítotiskového zařízení, síta a také velikostmi zrn v použité sítotiskové pastě. LTCC keramika je materiál se kterým se pracuje v nevypáleném stavu. Princip metody spočívá v nanášení vodivé pasty přes síto s předlohou. U sítotisku je na sítu navrstvena speciální fotocitlivá emulze. Požadovaný motiv se u síta vytvoří osvitěním šablony.

V mikroelektronice se využívá sítotisku pro vytváření vodivé nebo dielektrické sítě pro hybridní integrované obvody, takzvané „HIO“. Pasivní síť se realizuje prostřednictvím funkčních past s tixotropními vlastnostmi. Před tiskem dojde k rozmíchání pastové hmoty, tím se zlepšují tixotropnost pasty kterou zajišťuje pojivová složka, což znamená, že viskozita celé pasty se mění v závislosti na mechanickém tlaku. Nejnižší viskozity pasty se dosahuje v okamžiku odskoku síta zobrazený na obr.5, kdy dochází k přenosu pasty na substrát.

Těrka u sítotisku protlačuje pastu sítem. Důležitý parametr je sklon těrky ( $83^{\circ}$ - $45^{\circ}$ , od vodorovné polohy), hustota ok MESH(počet ok na palec), orientace a odtrh síta. Odtrh se většinou nastavuje v rozmezí (0,2-1 mm) a rychlost pohybu těrky (15 - 50  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).[5]

Princip sítotisku se u LTCC liší v uchycení pásku substrátu k podložce. Křehkost materiálu LTCC v nevypáleném stavu vyžaduje vakuové uchycení nebo jiné mechanické přichycení při tisku. Proto se při použití substrátu využívá podložka pod pásek nízkoteplotní keramiky. Jedná se o porézní kámen, k němuž se přivádí vakuum. Vytvořením podtlaku je pásek LTCC ze spodní strany přichycen k podložce. Nedochozí tak k jeho trhání, přilepování nebo posunům na podložce během tisku. Je ukázáno na obr. 6.



Obr. 6.: Výrobní postup sítotisku

### 3.3 Tenké vrstvy

Tloušťka tenkých vrstev, se pohybuje oproti tlustým vrstvám v rozmezí desetin až jednotek mikrometru. Existují dvě metody nanášení tenkých vrstev.

- Katodové napařování
- Vakuové napařování

Fyzikální podstatou je u obou metod uvolňování molekul materiálu, následkem jeho zahřívání v uzavřeném systému. Částice jednotlivých prvků následně kondenzují na přiložený substrát.

### 3.4 Integrace pasivních prvků

Přímo do vodivé vrstvy na substrátu LTCC je možné vytvářet pasivní prvky jako rezistory, kondenzory apod. Sítotisková metoda vytváření součástek je hodně rozšířená již od sedmdesátých let, v dnešní době jsou vrstvy osazovány SMD součástkami. Uplatnění osazení součástek do vrstevové aplikace zlepšuje její parametry, vrstva dokáže účinněji odvádět teplo. Například integrované rezistory mohou být realizovány sítotiskem v kombinaci s diskretními prvky.

## 4 Způsoby testování vrstev

Během výrobních procesů vrstev, je potřeba zajistit měření některých parametrů aby nedocházelo při využívání koncového obvodu k poruchám. Zkoumá se kvalita natištění jednotlivých motivů a tloušťka vrstev která by mohli mít vliv na funkčnost. Kontroly vrstev se provádí po kterékoli výrobní operaci. Zkvalitnění technologie je důsledkem správného testování vrstev. V případě, že je prováděno po výrobě vrstev, je to konečná operace z celého výrobního cyklu

Diagnostické metody se snaží svou existencí předcházet případným poruchám ve výrobních procesech vrstev. Zahrnují případné poruchy vlivem opotřebení při výrobním cyklu, včasné výměny jednotlivých částí systémů vytváření vodivých vrstev.

Funkcí těchto metod je zkvalitňování výrobních procesů z minimalizací výrobních vad. Součástí je také zahrnutí možností případných oprav špatně vyrobených vrstev s minimalizací nákladů na novou výrobní operaci. Z pohledu LTCC lze vadné části vrstev vyřadit a nahradit novými kusy pro kvalitní strukturu.

### 4.1 Optické testování

Optické testování zahrnuje měření geometrie pod mikroskopem. Při kontrole je stanoven diferenční model se zadanými parametry který slouží k porovnávání defektů.

Aspekty optické kontroly:

- geometrická přesnost natištění vodivých drah případně pasivních prvků
- chyby pájení připojovacích, testovacích vodičů
- šířka vrstev

Šířka natištěných vrstev se liší použitou metodou:

- sítotisku
- šablonový tisku

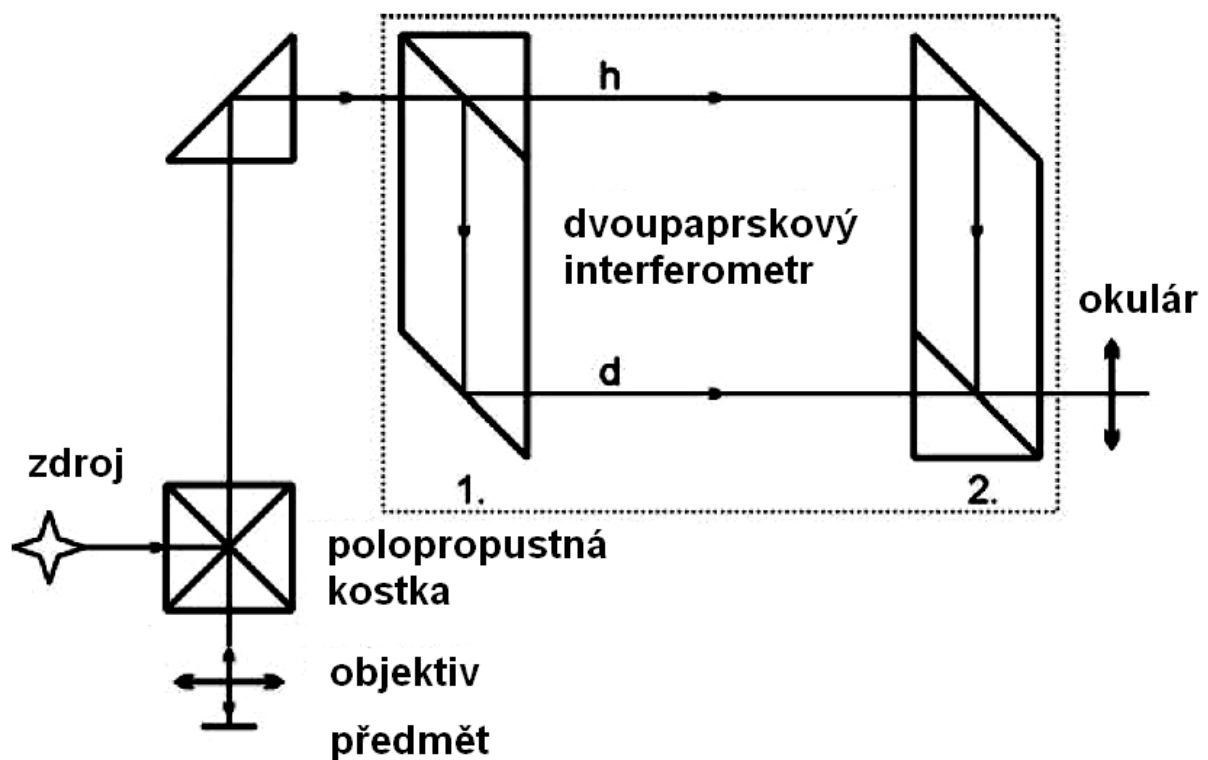
Každá z těchto metod má specifickou tloušťku. U šablonového tisku je šířka vrstvy daná šířkou použité šablony. Tloušťka vrstvy při použití sítotiskové metody je závislá na hodnotě odskoku síta a velikosti napnutí.

### 4.1.1 Měřící technika

Mikroskopem s kvalitní zaostřovací technikou dochází k nalezení okraje natištěné plochy a zaostření na vrstvu a následné odečtení hodnoty tloušťky. Stejným způsobem se zaostřuje na LTCC základní pásek materiálu. Výsledný rozdíl udává šířku vrstvy.

Nejčastěji využívaný mikroskop využívá k měření interferenční paprsky. Mikroskop se skládá ze dvou základních částí:

- optický mikroskop s osvětlovací soustavou pro pozorování v odraženém světle.
- dvou paprskový interferometr, který je vložen do optické soustavy mikroskopu před okulár jak je vidět v části obr. 7.

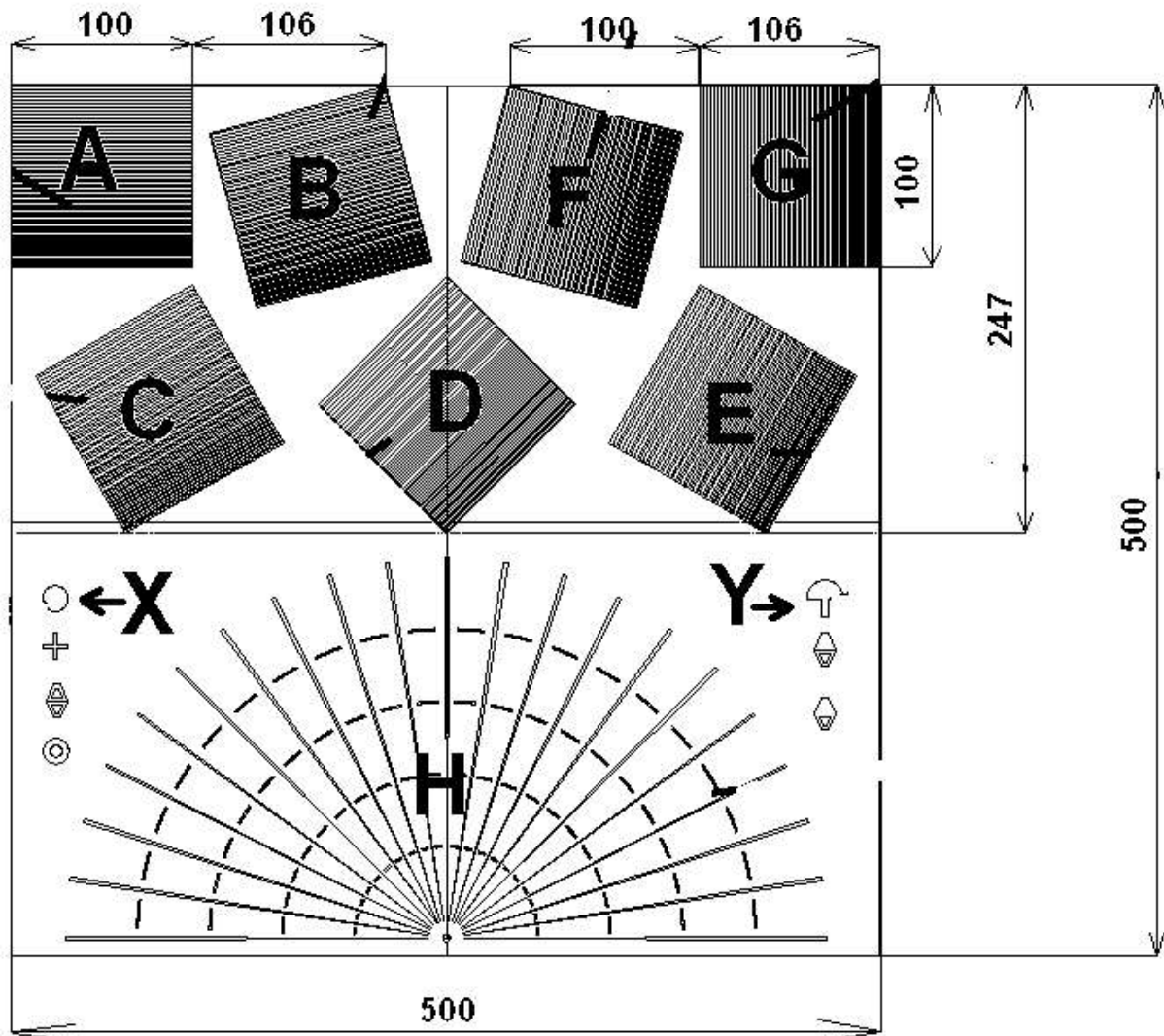


Obr. 7.: Interferenční mikroskop (zjednodušené schéma) [8]

### 4.1.2 Motiv pro kvalitu síťotisku

Testovací motivy jsou určeny pro danou velikost substrátu. Motiv na obr.7 byl určen pro substrát o velikosti 5x5 cm, skládá se z obrazce který je tvořen jednadvaceti paprsky rozmístěných pravidelně do rozsahu 0-180°, jsou tedy oproti sobě postupně pootočený vždy o 9°. Paprsky se lineárně zužují z 25 do 0  $\mu\text{m}$ . Pro lepší orientaci byl motiv rozdělen na sektory A-H. V těchto sektorech byla sledována rozlišovací schopnost motivu.

Na motivu je umístěno dalších sedm sestav. Jedna sestava se skládá z 34 čar o délce 10 mm. Sestavy jsou vedeny vertikálně a horizontálně. Každá z těchto sestav je oproti předchozí posunuta o úhel 15° z důvodu sledování kvality natištění pod různými úhly. Na obrázcích Z a X, byly zjišťovány tloušťky jednotlivých natištěných vrstev. Kompletní motiv je na Obr. 8. [9]



**Obr. 8.:** Testovací motiv kvality sítotisku[9], převzato z DP. Práce Viktora Valy

Z důvodu invertování barev obrázku a převodu z filmové předlohy, nemohlo být dosaženo lepší kvality zobrazení.

## 4.2 Elektrické testování

LTCC technologie je díky vrstvení realizována pro vyšší výkonové parametry. Jsou na ni kladeny nároky jako je proudová a teplotní zatížitelnost. Měření a stanovení mezi těchto elektrických veličin je závislé na použití kvalitních měřících přístrojů. Pro přesné měření se používají přístroje s laboratorní přesností.

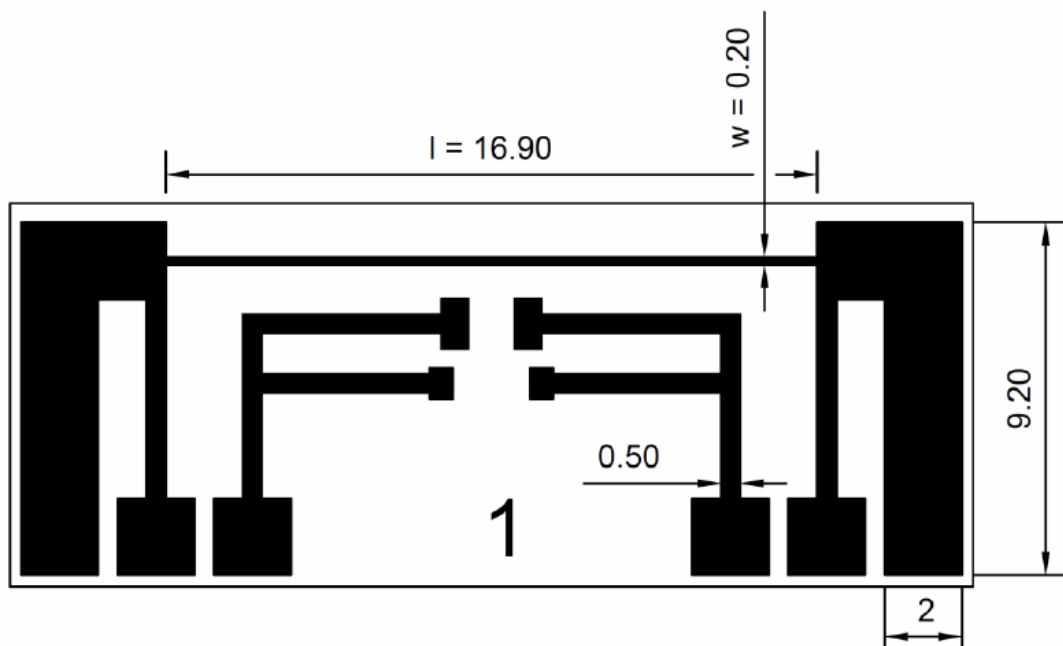
Pružnost LTCC v surovém stavu umožňuje vrstvení substrátu, kdy překrytí vrstev zvyšuje proudovou zatížitelnost celého obvodu a zlepšuje parametry pevnost a tepelnou vodivost. Při návrhu hybridních integrovaných obvodů je nutné dbát na celkový výkon obvodu. Navrhovaný obvod má určitou maximální mez výkonového zatížení. Obvodem prochází proud jehož část tvoří ztrátový výkon jednotlivých součástí a ztrátový výkon způsobený vodivou strukturou, dohromady by tyto dvě dílčí složky neměly přesáhnout stanovený maximální výkon celého hybridního integrovaného obvodu. V některých případech může být tato mez krátkodobě překročena. [10]

#### 4.2.1 Motiv pro měření proudové zatížitelnosti vrstev

Celá struktura je rozdělena do deseti testovacích meandrů. Motiv vytvořil Ing. Jindřich Strejček, proudová zatížitelnost zde mohla být měřena na deseti motivech. Každá z deseti částí motivu má odlišnou tloušťku jednotlivých vodivých drah, jejich tloušťku najdeme v tab. 3. Pro lepší orientaci byly části očíslovány. Detail meandru je vidět na obr. 9.

**Tab. 3.:** Šířka přepalových vodičů na testovacím motivu

Číslo obvodu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
w [mm]	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65



**Obr. 9.:** Detail motivu pro měření proudové zatížitelnosti vrstev[10]

Návrh vrstvy je omezen z hlediska teplotní odolnosti součástkou nebo vodivou drahou s nejnižší teplotní odolností v daném obvodu. Pokud obvod přesáhne destrukční teplotu nejcitlivějšího místa v obvodu, nastává průraz. Vlivem teplotní změny dojde k roztažení materiálu a jeho kroucení a odlepení od nosného substrátu, materiál se přestane ochlazovat a následně se přepálí, tím dojde k přerušení obvodu.

### 4.3 Teorie výkonových pouzder

Pouzdra pro výkonové aplikace vytvořené na substrátu LTCC využívají parametr efektivita pouzdření, který závisí na rozmístění čipů v pouzdru a vyjadřuje využití plochy substrátu. Čím lépe je plocha využita, tím je parametr efektivnosti vyšší. Efektivita neboli účinnost pouzdření je definována:

$$P(ef) = \frac{\text{celková}_{\text{ aktivní}_{\text{ plocha}_{\text{ čipu}}}}{\text{celková}_{\text{ plocha}_{\text{ substrátu}}}} \quad (1.0)$$

Výkonová pouzdra musí splňovat následující funkce:

- zajistit ochranu vodivých spojů mezi jednotlivými součástkami
- poskytnout propojení vysoce vodivým kovem při dané propojovací hustotě tak, aby byla zachována co nejmenší vzdálenost mezi jednotlivými čipy
- poskytnout přívody signálů a napájení pro multičipový substrát
- poskytnout ochranu pro všechny čipy před vnějšími vlivy

Výkonová pouzdra musí nadále efektivně odvádět teplo ze všech zapouzdřených součástek. Pro zadanou obvodovou složitost poskytnout propojení mezi všemi čipy s nejvyšší výkonností obvodu. Pouzdra musí zajistit snadný způsob připojení do obvodu na zvoleném typu substrátu.

Netradiční typy pouzder nelze vytvořit paralelně tvořenou technologií jako je korundová keramika. Jinou technologií než LTCC nelze tyto pouzdra vyrobit. Právě tento parametr vyzdvihuje použití nízkoteplotní keramiky jako nové technologie.

## 5 Experimentální část

Experimentální práce byla rozdělena na dvě části pro lepší přehlednost a orientaci. První část se zabývá popisem použitých motivů a přípravou testovacích vzorků sítotiskovou metodou na nízkoteplotní keramice, druhá je zaměřena na měření vodivých vrstev s výsledným testováním a vyhodnocením měření.

Testované vzorky byly posuzovány z hlediska vhodnosti použití sítotiskové metody pro tisk na LTCC a porovnávány s vytvořenými vrstvami na korundové keramice. Zaměřovalo se na limitní meze použití sítotisku. Porovnávala se také tloušťka vrstev vzhledem k jednotlivé části výroby vrstvy dále pak proudová zatížitelnost zalaminovaných a nelaminovaných obvodů vzhledem k teplotě pro výkonovou charakterizaci.

### 5.1 Popis testovacích motivů

K měření vodivých vrstev byly dodány dva testovací motivy které jsou detailně rozepsány v teoretické části. První motiv byl použit pro zkoumání kvality sítotisku a tloušťky vrstev natištěných vodivých drah, na kterém byla po natištění provedena optická kontrola natištěných vrstev pod mikroskopem. Hodnocení probíhalo po tisku, zasušení a po výpalu vodivých motivů.

Oba byly převzaty ze starších prací. Základem pro testování kvality sítotisku byl motiv z diplomové práce studenta Viktora Valy. Motiv nebyl nijak pozměněn. z důvodu velmi složitého návrhu testovacích struktur a dobře pozorovatelné plošky pro odečítání tloušťky vrstev. Motiv byl rozdělen na sedm objektů pro lepší orientaci.

Druhý dodaný motiv byl převzat z práce která nese název “Přepal vodivých cest – MERIT“ od Ing. Jindřicha Strejčka který se zabýval vodivými vrstvami na TFT a tudíž mohly být použity dosažené výsledky pro porovnání naměřených vrstev. Testovací motiv byl přenesen na substrát o velikosti 50x50 mm v deseti různých šířkách vodičů pro přepálení. Celá struktura pro tisk je zobrazena na obr.9.

### 5.2 Výroba testovacích vzorků

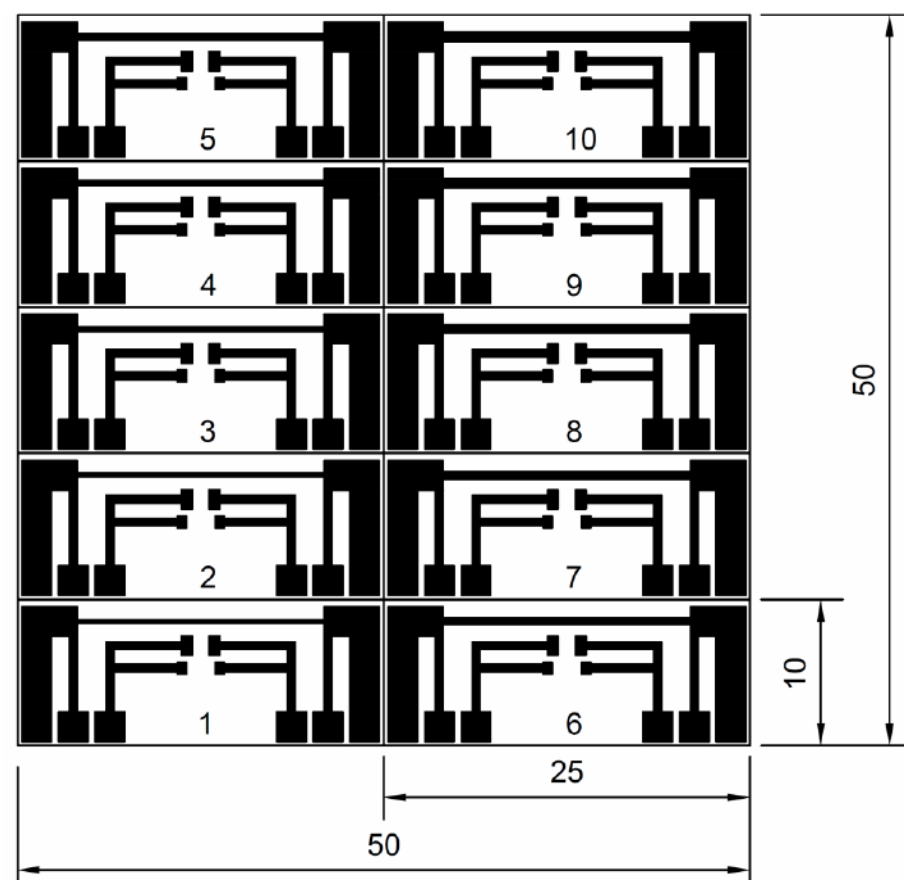
Sítotisková metoda vyžaduje výrobu síta pro přenesení filmové předlohy na jednotlivé substráty. Základem tedy bylo nerezové síto napnuté na kovovém rámu .

Jemným štětcem bylo provedeno očištění a následný několikanásobný oplach ve vodě. Pro odstranění malých nečistot na sítu, byl používán ultrazvuk. Následovala aplikace zředěného přípravku SIBAR 800 1:30 pro zvětšení přilnavosti.

Kvalitní přenos vodivého motivu na síto je důležitý pro výslednou kvalitu tištěných motivů. Vysušené síto se umístilo do demiralizované (DEMI) vody, kde vzniknul tenký film vody na sítu pro lepší přilnutí. Fotorezist se po namočení v DEMI vodě přenesl naválením na síto. Sušením síta se odstranila přebytečná voda. Pomocí přípravků bylo síto umístěno na neprůsvitnou podložku z důvodu podsvícení motivu ultrafialových světlem ze spodní strany síta. Na střed síta byl přiložen vodivý motiv a zdroj UV světla byl umístěn 10 cm nad ním. Osvit trval přesně osm minut, v polovině osvitové doby bylo síto o 90° otočeno z důvodu rovnoměrného osvitu UV zářivkou. Poté následovalo vyvolání v demiralizované vodě po dobu 1 minuty. Vše probíhalo v temné komoře s minimálním pracovním osvětlením.

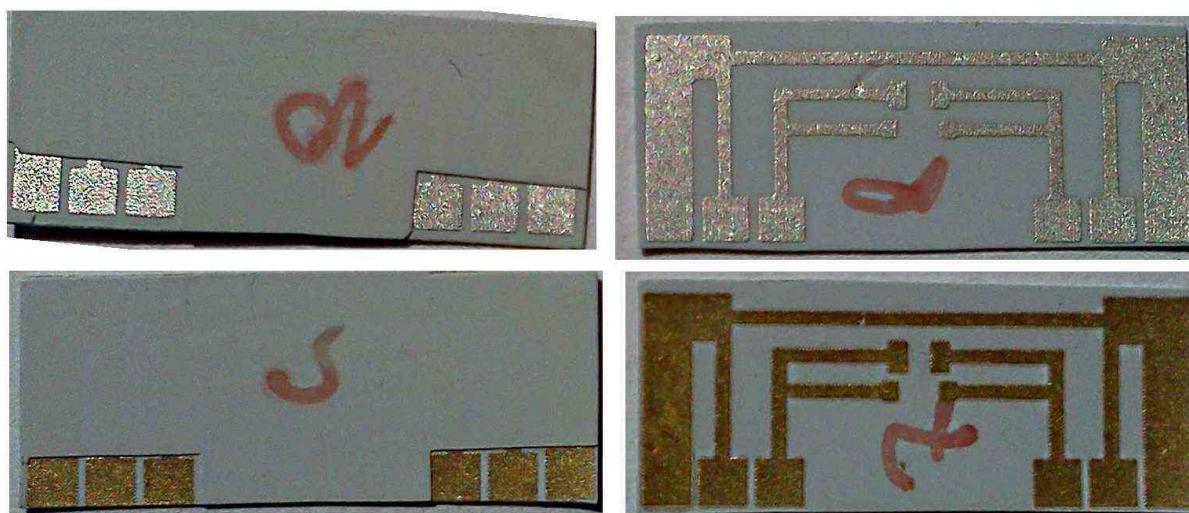
Z testovacího motivu kvality sítotisku byly natištěny tři sady vzorků po čtyřech kusech, celkem tedy 36 kusů. Byly použity všechny pasty od Heraus HL2000 uvedené v teoretické části tab. 2. Vrstvy se tiskly na substrát korundové keramiky i na LTCC pro možnosti srovnání.

Přes natištěním vodivého motivu proudové zatížitelnosti byly substráty LTCC nejprve naděleny na čtverce, které byly použity pro laserové nařezání na požadovanou velikost 80x80 mm. Do motivu byly vyřezány čtyři technologické otvory ve vzdálenosti 57 mm od sebe ve čtvercovém rozmístění pro sesouhlasení vrstev v laminovacím zařízení. Takto vyřezané motivy se zalaminovaly vrchní vrstvou pro minimalizování kroucení pásku LTCC při výpalu a následně natiskly. Celý motiv před laminací je na obr. 10.



**Obr. 10.:** Testovací motiv pro měření proudové zatížitelnosti[10]

Pro tisk vrstev na LTCC byly použity pouze pájitelné pasty TC 8101 a TC0306 pro možnost pozdějšího připojení měřících zařízení pro měření proudové zatížitelnosti. Před samotným výpalem došlo k nadělení motivu na deset stejných částí zobrazených na obr. 9. Po nařezání finálních rozměrů bylo nachystáno čtyřicet nezalaminovaných vzorků a čtyřicet vzorků které se překryly vrchní vrstvou pro testování. Nadělené vzorky jsou zobrazeny na obr. 11.



**Obr. 11.:** Nadělený motiv pro testování

Na trimovacím laseru „AUREL ALS 300“ se z pásek LTCC vyřezaly přesné rozměry pro přelaminování vrstev. Jako výchozí rozměr byl použit pásek 80x80 mm. Laser vyřezával otvory zadané do šablony řezání. Zůstaly odkryté pouze kontakty na vrstvě pro připojení měřícího zařízení. Celá struktura je zobrazena na obr.10.

Pro měření proudové zatížitelnosti vrstev byly použity jak nelaminované vzorky s vrstvami tak zlamované vzorky. Laminace probíhala na axiálním lisu s teplotní spirálou po dobu deseti minut a při teplotě 80 C. Zalaminována byla polovina testovacích vzorků tedy dvacet kusů natištěných motivů pastou TC8101 a dvacet kusů pastou TC0306 z každé série.

Do vypalovacího procesu byly všechny testovací vzorky s motivy umístění po zasušení. Vrstvy se suší v automatické sušičce při teplotě 80 °C po dobu deseti minut.

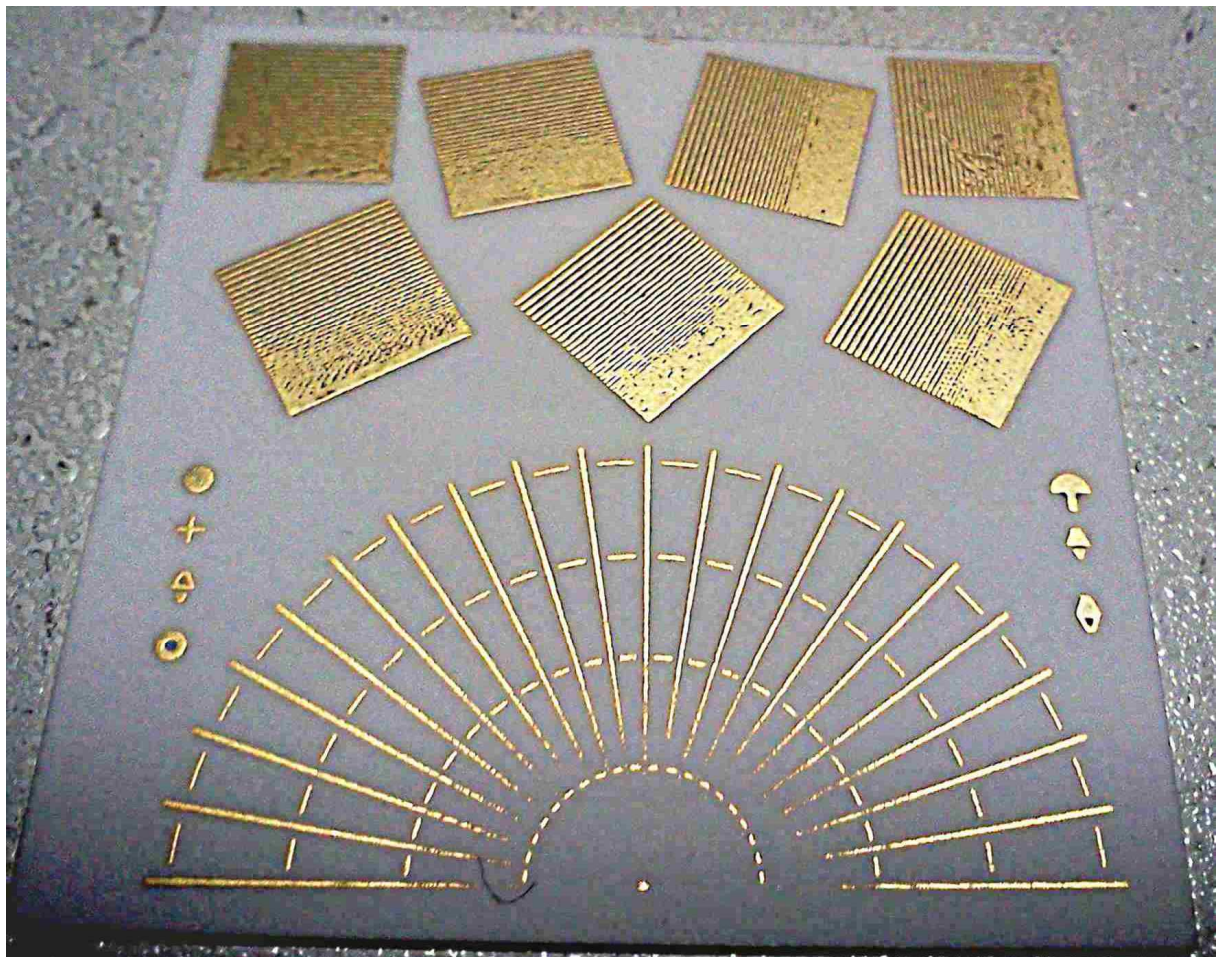
Vodivé vrstvy všech tří použitých sítotiskových past pro LTCC byly vypáleny v laboratorní peci podle vypalovacího profilu pro HERALOCK HL2000. Před samotným výpalem byly vzorky naděleny na deset kusů pro měření. Do omezeného prostoru vypalovací pece se nadělené motivy lépe umísťovaly. Nadělením vzorků před laminací vrstev došlo z důvodu omezené výkonnosti laseru.

## 5.3 Měření vrstev

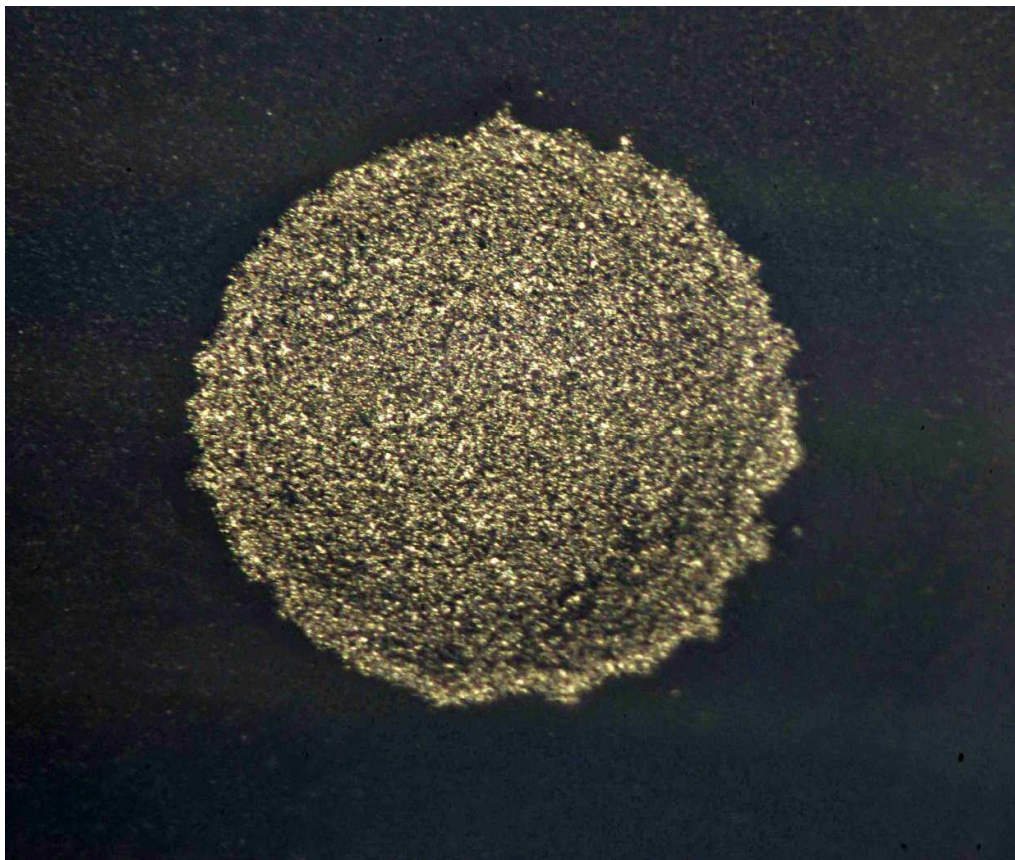
Při proměrování jednotlivých vrstev, byl použit mikroskop německého výrobce JENA Carl Zeiss, JENAVERT interphako [8]. Na sestavě mikroskopu byla nainstalována snímací optika tvořená snímacím zařízením s příslušným ostřením.

### 5.3.1 Měření na optické soustavě

Prvním úkolem bylo měření tloušťky vrstev, zaostřovalo se střídavě na nosný substrát a následně na vodivou vrstvu, měření probíhalo na třech místech natištěného motivu a to konkrétně na částech H, X, Y viz. Obr. 6. Hodnoty měření se odečítaly v jednotkách mikrometrů. Motiv na obr .11. Byl natištěn zlatou pastou TC8101 na korund. Další vrstvy jsou natištěné na keramický substrát a LTCC pastami TC0306 a TC0307. Detail „Y” (kolečko) pod mikroskopem zaostřený na podložku je vidět na obr.13.



**Obr. 12.:** Korundová keramika natištěná zlatou pastou TC 8101



**Obr. 13.:** Detail části vodivé vrstvy „Y“ na substrátu LTCC pro odečet tloušťky vrstvy

Motivy natištěné na korundové keramice sloužily v celém měření pro porovnání. Použité sítotiskové pasty nebyly určeny pro tento substrát. Z mikroskopu pomocí jemného nastavení ostření jsme získali tloušťku vrstvy. Způsob odečítání jednotlivých hodnot probíhal vždy zaostřením na vodivou pastu a následně na nosný substrát. Získané hodnoty se odečetly od sebe a zaznamenaly.

V tabulce jsou naměřené tloušťky jednotlivých vrstev vzhledem k použitému materiálu nosného substrátu a typu použité pasty. Tyto hodnoty jsou aritmeticky zprůměrnované z třech míst odečítání tloušťky. Referenční hodnoty pro korundovou keramiku a vrstvy na nich natištěné a zasušené pastami Heraloku HL2000 nejsou výrobcem vedeny. V tabulce výsledků jsou uvedeny hodnoty po všech operacích při výrobě. Pro porovnání je zde uvedena i garantovaná hodnota výrobcem past na použitém substrátu LTCC.

**Tab.4.:** Tloušťky vrstev na LTCC a Korundu

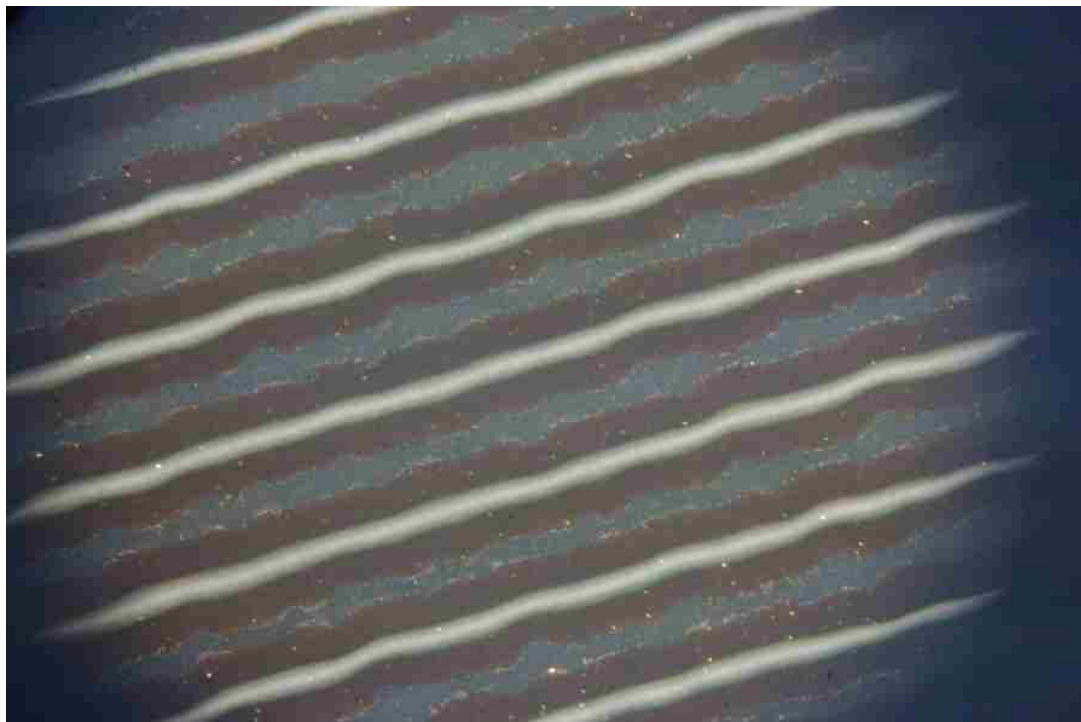
Substrát	Typ pasty	Tisk [ $\mu\text{m}$ ]	Zasušení [ $\mu\text{m}$ ]	Referenční hodnota po výpalu [ $\mu\text{m}$ ]	Výpal [ $\mu\text{m}$ ]
KORUND	TC 8101	25	21,5	8 - 12	18
	TC 0306	35,5	27	15 - 21	21
	TC0307	31,5	22,5	20 - 25	16
LTCC	TC 8101	23	16	8 - 12	16
	TC 0306	21,5	15	15 - 21	15
	TC0307	23,5	16	20 - 25	13

Z naměřených hodnot vyšla předpokládaná hodnota pouze pro nepájitelnou stříbrnou pastu TC0306. Je vidět, že pasty po natištění na LTCC odpovídají teoretickým hodnotám pro systém HL 2000 který je pro tento substrát vytvořen.

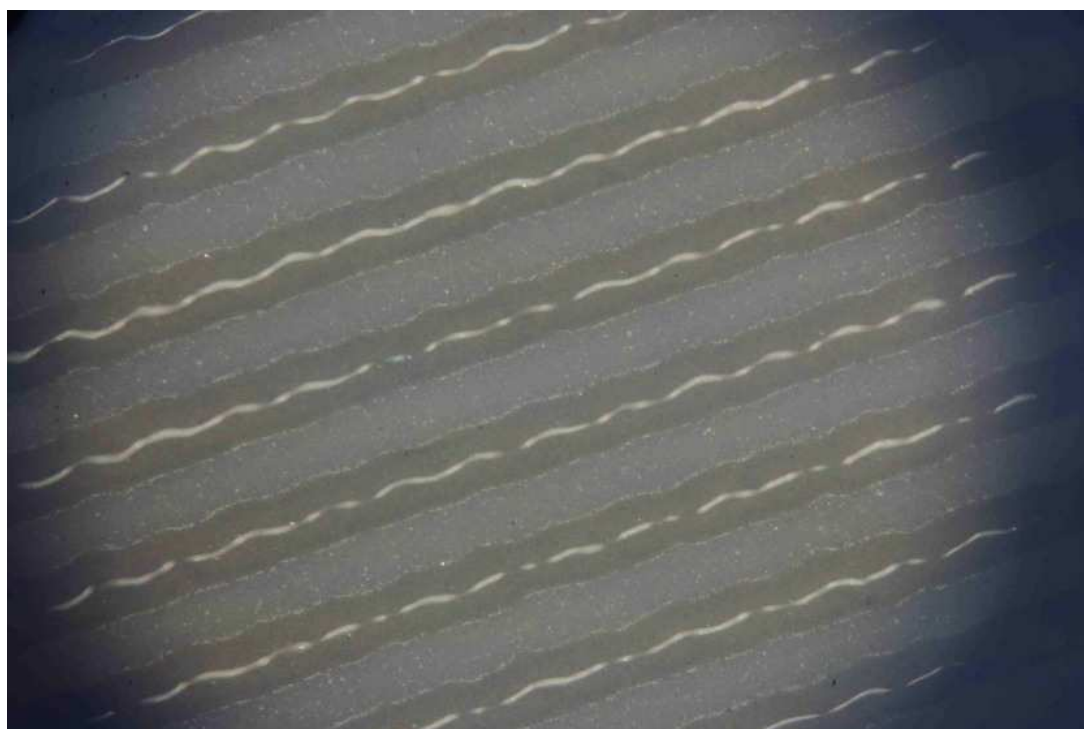
Výsledky měření nesouhlasily pro vrstvy natištěné pastami TC8101 a TC0307. Substrát z korundové keramiky na který se tisklo stejnými pastami sloužil pro porovnání výsledků, tloušťka byla dvakrát větší než na LTCC. Natištěné vrstvy dosahovaly po tisku tloušťky přes třicet  $\mu\text{m}$ . Parametr tloušťky zůstal výrazně větší i v výpalu.

### 5.3.2 Optická kontrola natištěných vrstev

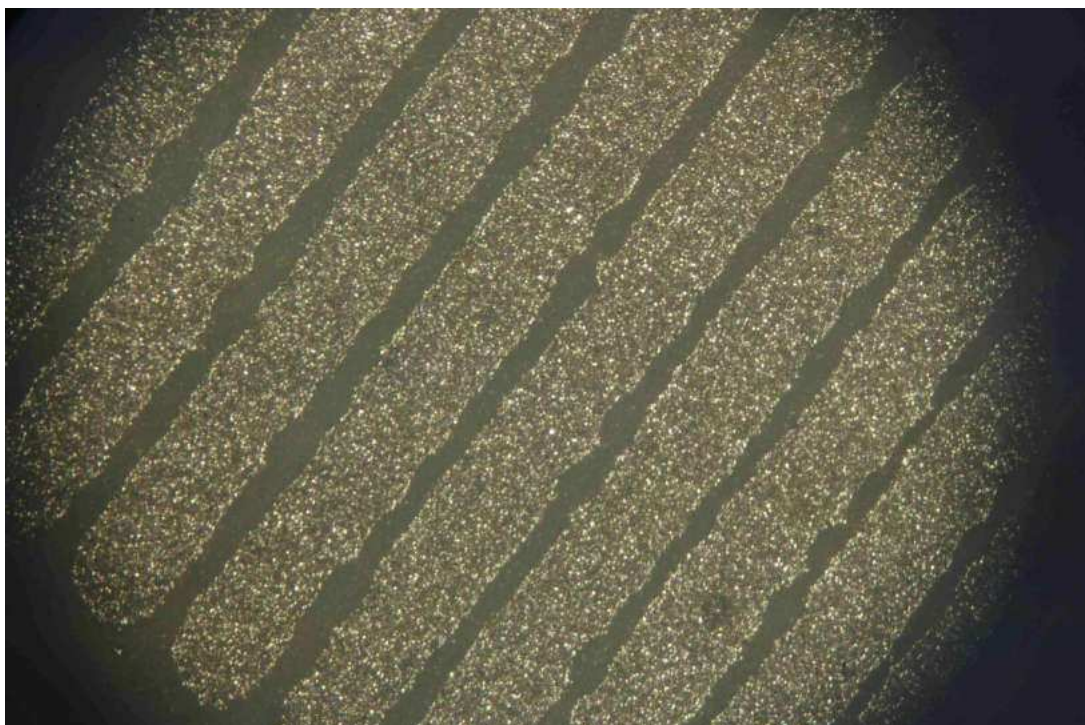
Prvním krokem při hodnocení limitů sítotisku, je optická kontrola motivu. Bylo kontrolováno, zda po každém z jednotlivých technologických kroků nedošlo k chybě umístění jednotlivých prvků motivu. Jestli nedošlo k posuvům, nedokonalostem, zkreslení motivu nebo k jiným opticky zřejmým chybám, a také pod kterým úhlem natištění je limitní mez sítotisku. Zvolený motiv pro měření vodivých vrstev měl velice rozsáhlé rozlišení jednotlivých čar.



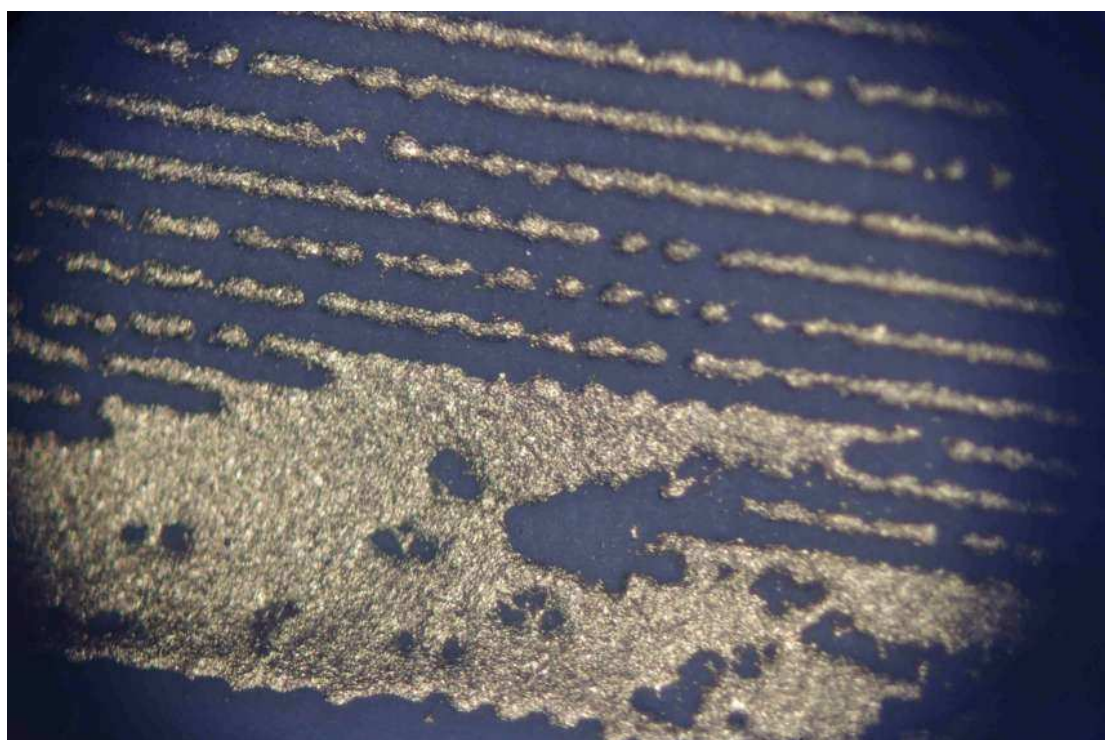
**Obr. 14.:** LTCC natištěno pastou TC0306 v části „B“ pod úhlem  $15^\circ$ , je vidět natištěná vrstva, kde nedocházelo k soutuisku jednotlivých částí do sebe, rozlišovací schopnost zde byla dostatečná



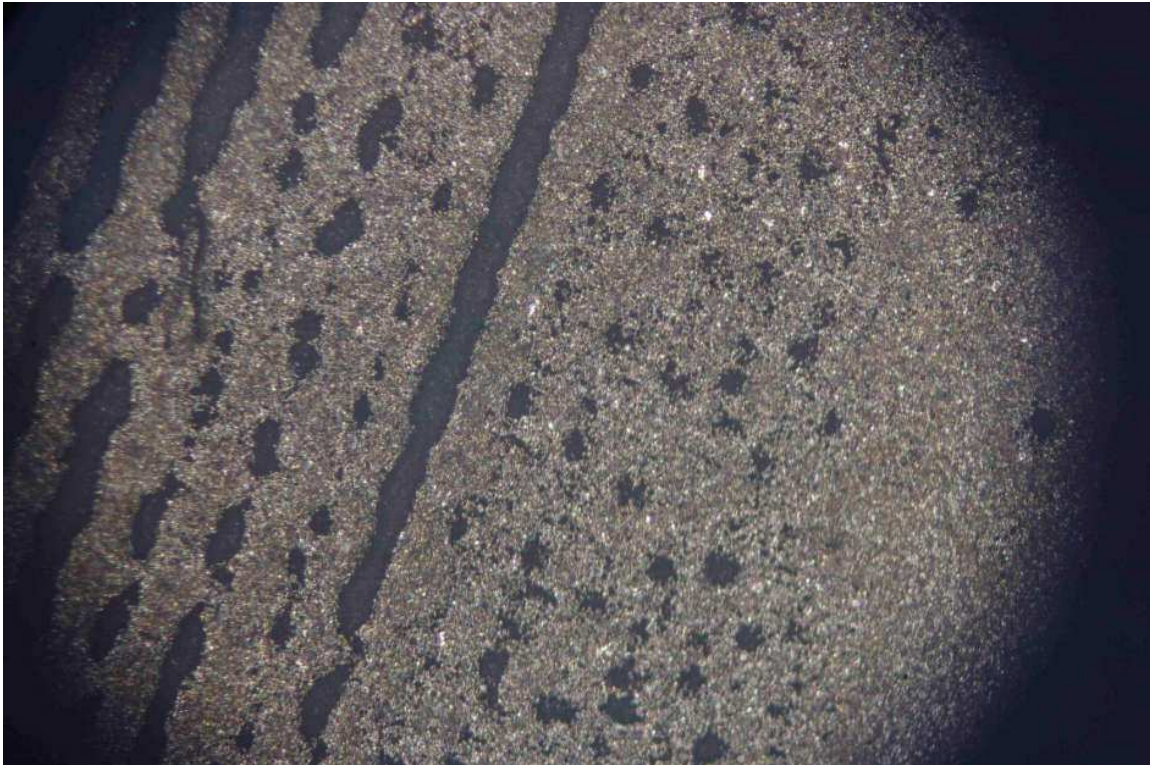
**Obr. 15.:** LTCC, pasta TC0306 v části „B“ pod úhlem  $15^\circ$ , po zasušení jeví známky přetrhání vodivé dráhy na substrátu. Je pozorovatelné smrštění pasty v ose x a y



**Obr. 16.:** LTCC, pasta TC0307– část motivu „D“ pod úhlem 60°, po výpalu vrstvy se celý vodivý motiv ucelil, jednotlivé vodivé dráhy jsou pod mikroskopem bez zjevné vlasečnicové poruchy



**Obr. 17.:** LTCC, pasta TC0307 – část motivu „A“ pod nulovým úhlem, po tisku docházelo k nedokonalému natištění, přerušení vodivých drah, rozlišovací schopnost je zde překročena



**Obr. 18.:** LTCC, Pasta TC0306 – část motivu „F“, pod úhlem 75°, po zasušení, rozlišovací schopnost sítotisku je na obrázku již překročena, dochází ke slití vodivých drah

### 5.3.3 Zhodnocení výsledků optické kontroly

Optická kontrola motivu zahrnuje posouzení přesnosti sítotisku a limitu motivu. Došlo ke zjištění parametrů vrstev po každém z jednotlivých technologických kroků. Na mikroskopu byla proměřena minimální dosažitelná šířka, při které byla zachována 100% spolehlivá funkčnost. Přesnost byla hodnocena u soustav čar / mezer o rozměrech 150 / 150  $\mu\text{m}$ , kde byla měřena šířka vodiče. Nejlépe je zde patrné o kolik mikrometrů se změnila požadovaná šířka čáry nežádoucími vlivy oproti požadované šířce 150  $\mu\text{m}$ .

Zobrazení natištění na LTCC bez zjevných defektů mají dostatečnou šířku vodivých drah. Šířka se pohybuje kolem 130  $\mu\text{m}$ . Přechod vzorků na nedostatečně natištěnou dráhu je kolem 60  $\mu\text{m}$ . U natištěných vzorků na pásku LTCC je šířka čáry kolem 10  $\mu\text{m}$  zobrazena na obrázku 16 a 17. Přechod natištění u LTCC je zde posunut až na 190  $\mu\text{m}$ , což je o 60  $\mu\text{m}$  více než u korundové keramiky.

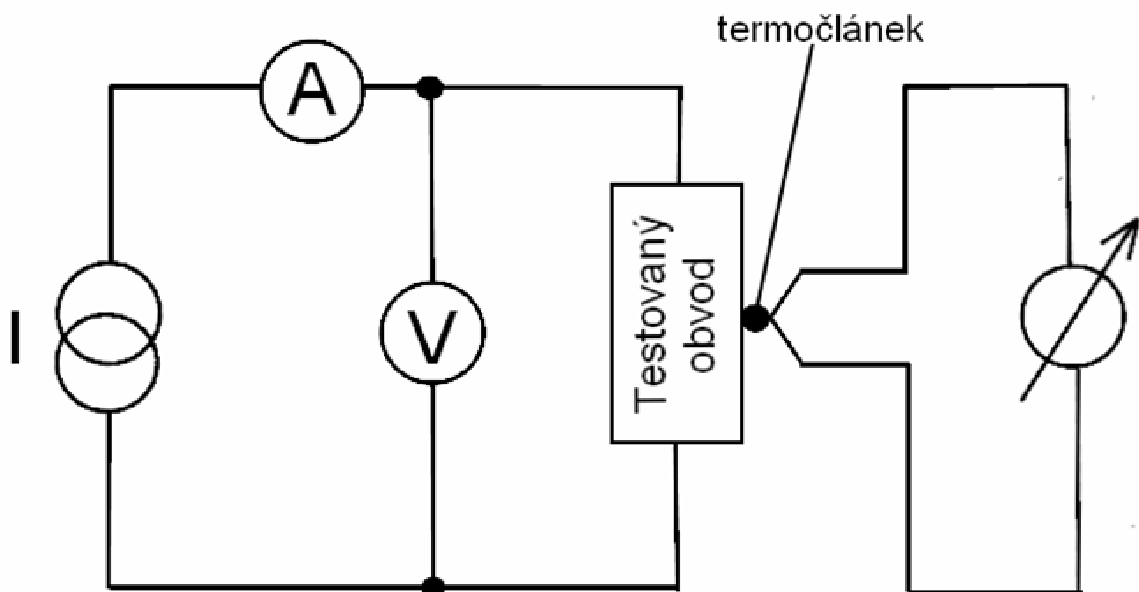
Z výsledků je patrné že substrát z korundové keramiky, při použití sítotiskových past pro LTCC heralock HL2000 nevyhovuje rozlišovací schopnosti 150  $\mu\text{m}$ . Substrát LTCC této podmínce vyhovuje s rezervou 60  $\mu\text{m}$ . Nejlépe natištěné byly také části motivu pod úhlem 15° kdy rozlišení vodič/mezera bylo v celé šíři testovaného pole. Jakýkoli další úhel natištění byl již znatelně horší než zmiňovaná část.

## 5.4 Elektrické testování vrstev

Testování patří do povývalových procesů ve výrobě struktur LTCC. Elektrická zatížitelnost obvodu je základním parametrem vrstevných obvodů. Provedené elektrické testování zjistí použitelné meze výkonového zatížení. Ze zjištěných výsledků se následně tato mez stanoví.

Motiv pro proudovou zatížitelnost je sestaven tak aby na něm mohly být v širokém spektru změřeny proud, napětí a teplota vodivé vrstvy. Deset částí motivu má odlišnou tloušťku jednotlivých vodivých drah, hodnoty jsou uvedeny v teoretické části. Jednotlivé vzorky byly otestovány v závislosti na teplotě. Z naměřených veličin napětí a proudu byl vypočten výkon pro stanovení výkonového zatížení vrstev pro použití ve výkonových aplikacích. Výkony a teploty příslušných vzorků o stejné šířce přepalového vodiče laminovaných a nelaminovaných vzorků od sebe byly odečteny. Z jejich rozdílu se stanovila delta těchto hodnot která se následně zprůměřovala a z celého měření byla stanovena mez použitelného výkonového zatížení.

Pro měření zatížitelnosti substrátů byla vytvořena soustava, kdy mohla být vrstva zatěžována proudem bez nebezpečného živého dotyku. Proud byl postupně navyšován od 0 A s variabilním krokem 0,2 až 0,5 A po dobu 10 sekund. Generování proudu probíhalo inteligentním zdrojem MANSON 3600, s tvrdou výstupní charakteristikou. Tento zdroj byl schopen generovat proud až do 50 A. Zdroj proudu měl rozsah napětí 1-15 VDC. Přimo na zdroji se odečítalo napětí a nastavovaný proud. K měření teploty se používal laboratorní multimetr UnitT - UT 70B který zaznamenával teplotu měřených vzorků díky připojenému termočlánek. Celá soustava pro měření je zobrazena na obr. 19.

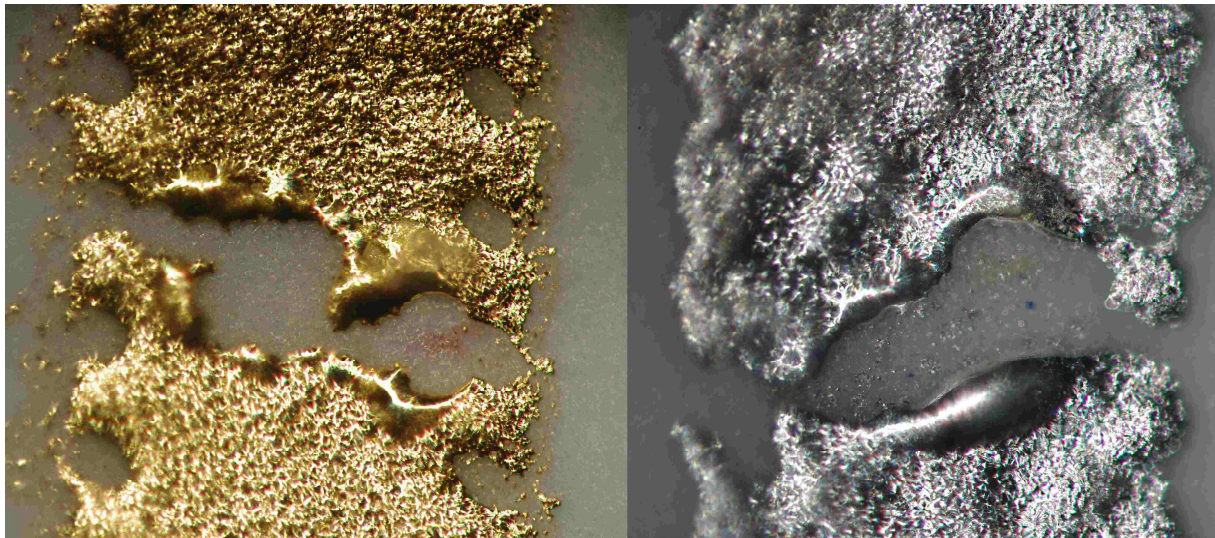


**Obr. 19.:** Schéma zapojení měřicí soustavy pro měření proudového zatížení obvodu

## 5.5 Proudová zatížitelnost nepřekrytých vzorků

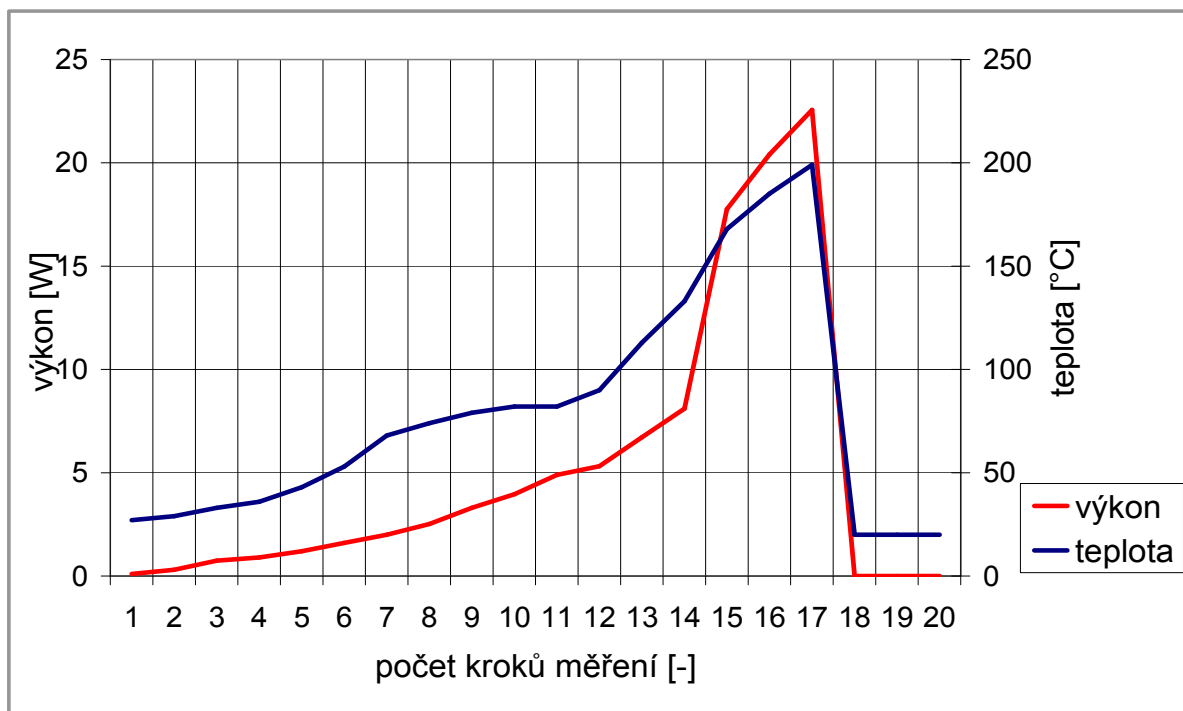
Vrstvy nebyly opatřeny vrchní ochranou laminací. Teplota vodivé vrstvy při protékajícím proudu měla vliv na bod přepalu vodivé dráhy. Počet kroků měření byl variabilní a závislý na kolik daná testovaná vrstva vydržela protékající proud než došlo k přerušení obvodu.

Vzorky byly tištěny pouze pájitelnými pastami TC 8101 a TC 0306. V grafických závislostech je výkonové zatížení vzorků vzhledem k teplotě. U všech vzorků bylo dosaženo destrukce zatěžováním proudem. Zkoumán byl především bod přepalu u různých šířek vodičů. U nezalaminovaných vrstev bylo pozorováno rozžhavení vodivé dráhy, kdy dojde k jejímu odlepení od pásku LTCC. Při odlepení vodivé vrstvy, dojde k přerušení ochlazování vodiče na substrátu a k jeho přepalu. Je zobrazeno na obr. 20.

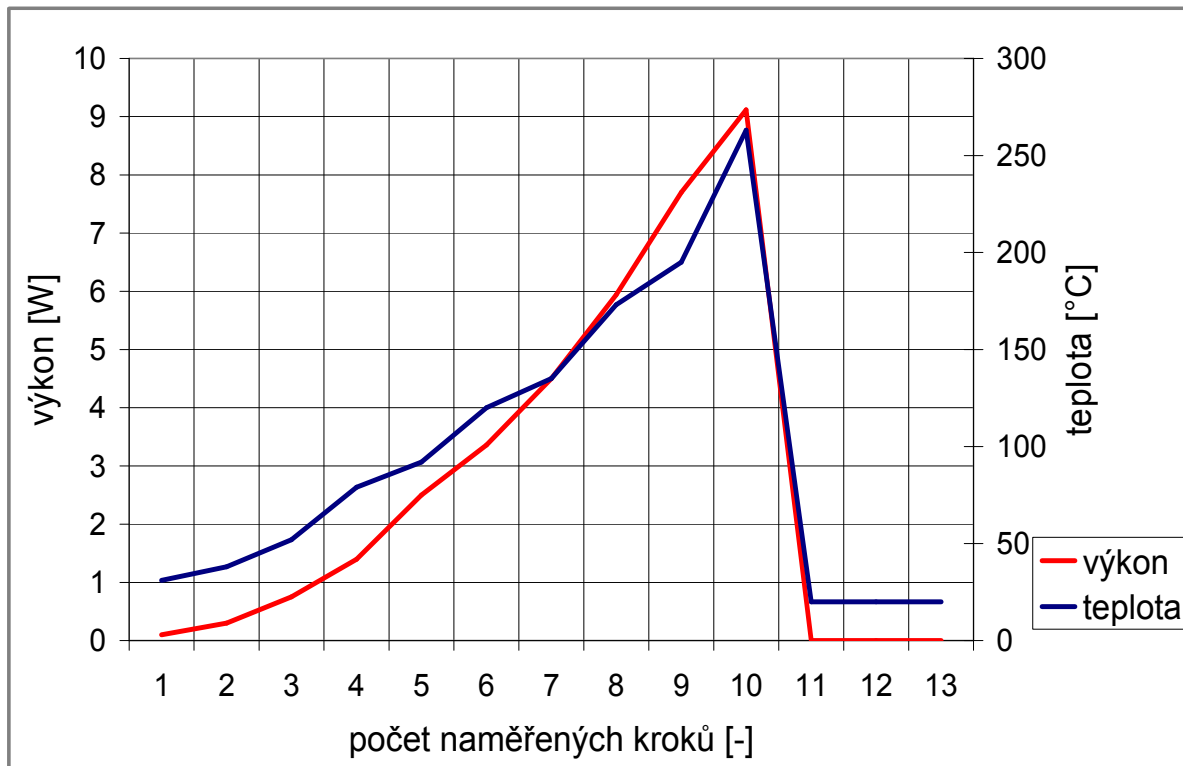


**Obr. 20.:** Detail přerušení vodivé vrstvy na LTCC, pasta TC 8101 a TC 0306

Poměr výkonu a teploty jedné vrstvy, se pohybuje u všech testovaných vzorků nad hranicí nebo kolem  $0,09 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . V grafu je možné vidět testovací vzorek č.8 kdy je šířka vodivé dráhy  $550 \mu\text{m}$  a bod přepalu je  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . U zlaté pasty TC 8101 na obr. 21 je bod přepalu posunut o  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  výše tedy poměr výkonu na teplotě se snížil na  $0,04 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . Přepal vrstev všech vzorků natištěných touto pastou byly za hranicí  $230^\circ\text{C}$ .



**Obr. 21.:** Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy  $w = 550 \mu\text{m}$ , vzorek 8, pasta TC 0306



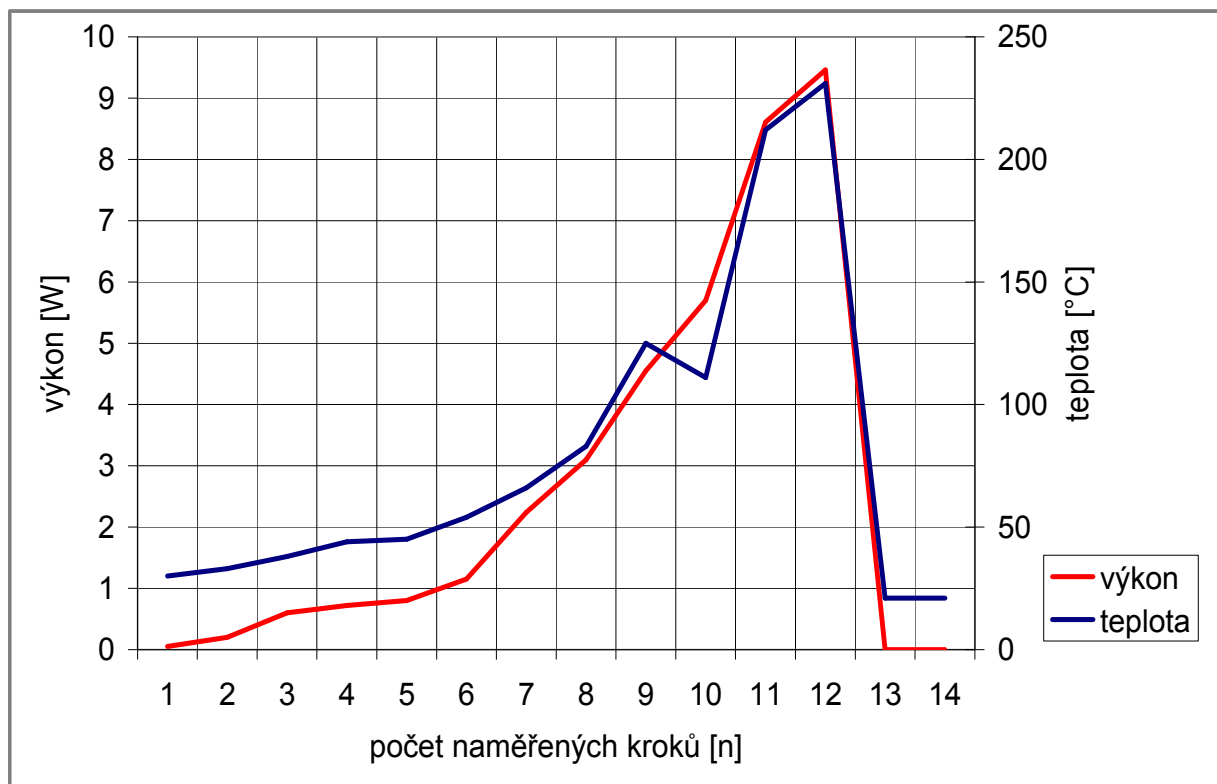
**Obr. 22.:** Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy  $w = 500 \mu\text{m}$ , vzorek 7, pasta TC 8101

## 5.6 Proudová zatížitelnost překrytých vzorků

Laminace tzn. překrytí substrátu LTCC vrchní vrstvou má teoretických podmínkách uvedených výrobcem Heraus u substrátu HL 2000 znamenat třikrát zvýšenou proudovou zatížitelnost obvodu.[11] Pro měření teploty se zde používal termočlánek který se přikládal na povrch měřené vrstvy.

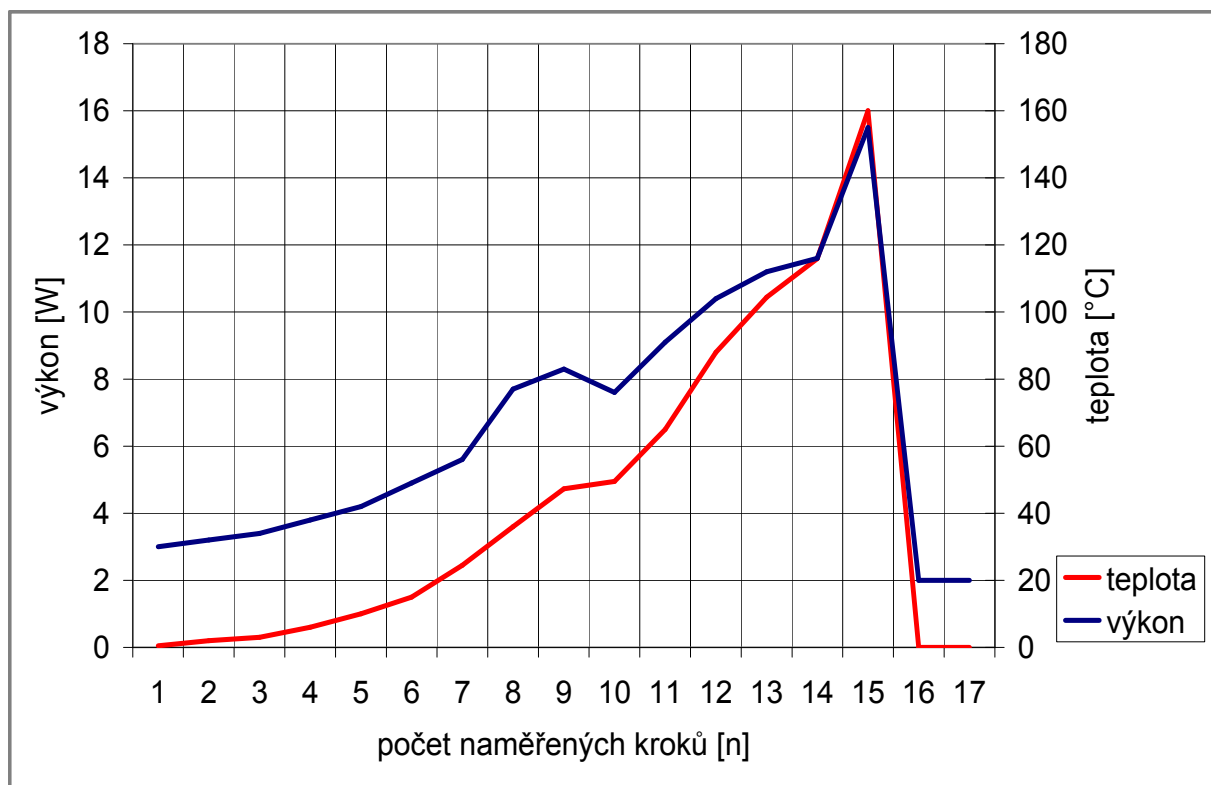
Zatěžování zalaminovaných vrstev probíhalo shodně jako zatěžování vrstev bez vrchní laminace postupným navyšováním proudu v obvodu do bodu přepalu testovaného vzorku. Přesto že měření teploty neodpovídá přesně teplotě testovaného vodiče má určitou vypovídací hodnotu z pohledu blízkého umístění termočlátku.

Zvyšováním proudu v obvodu docházelo k jeho postupnému zahřívání a tmavnutí i přes zalaminovanou vrstvu. Odlepení vodiče mezi vrstvami došlo k jeho zahřátí natolik, že došlo k přerušení a rozpojení obvodu. Na obrázcích 23 a 24 jsou vidět rozdílné teploty a proudy kdy docházelo k přepalu u vodivých vrstev o šířce 200 a 600  $\mu\text{m}$ .



**Obr. 23.:** Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných zalaminovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy  $w = 200 \mu\text{m}$ , vzorek 1, pasta TC 0306

Obvod při návrhu má určitou maximální mez výkonového zatížení, proto je nutné dbát na celkové výkonové zatížení celého obvodu. Návrh omezen z hlediska teplotní odolnosti součástkou s nejnižší teplotní odolností v daném obvodě. Pokud teplota obvodu přesáhne destrukční teplotu nejcitlivější součástky v obvodě, dochází ke vzniku poruchy na součástce a podle funkce dané součástky buď k částečné anebo úplné poruše obvodu.



**Obr. 24.:** Průběh závislostí výkonu a teploty testovaných zalaminovaných vzorků s šířkou vodivé dráhy  $w = 600 \mu\text{m}$ , TC 8101

## 5.7 Výkonové omezení vrstev LTCC

Z naměřených časových průběhů proudu a napětí bylo spočteno výkonové zatížení vrstev. Stanovily se grafické závislosti poměru teploty na výkonu s ohledem na počet naměřených kroků který byl variabilní podle velikosti nastavovaného proudu. Mohou sloužit pro informativní odečtení určité šířky použitého vodiče na substrátu LTCC a pomohou zvolit mez maximálního proudového zatížení. Teplota vzorků snižuje velikost průrazného napětí. Velké teplotní namáhání vrstev má nepříznivé účinky na životnost obvodu.

Lze použít pro výkonové součástky, kde vodivé vrstvy vydrží i větší proudové zatížení. Při porovnávání grafů sestavených z hodnot použitých past TC 0306 a TC 8101 bylo patrné, že vrstvy ošetřeny vrchní laminací vydrží větší proudové zatížení a zlatá pasta TC 8101 lépe snáší větší provozní teploty. Z vyhodnocených závislostí je patrné, že sklon jednotlivých křivek u obou typů má stejný charakter.

Jelikož parametrem křivek znázorňujících výkonovou zatížitelnost je teplota, byla dána do poměru s výkonem. Proto je nutné vzít v úvahu, že teploty používané pro sestavení tohoto grafu se mohou znatelně lišit od teplot samotných vodičů.

Díky práci Ing. Jindřicha strejčka který se zabýval přepalem vodivých vrstve na korundové lze přesně porovnat tyto grafy zatížitelnosti například s grafy zatížitelnosti vodičů na korundové keramice. Byl sestaven přehled určení výkonového omezení zatížení vrstev bez překrytí a s vrchní laminací, který je zobrazen v tabulce 5. Jsou v ní uvedeny hodnoty bezpečného zatížení vrstev.

**Tab. 5.:** Bezpečné výkonové zatížení vrstev

Vrstva	Bez překrytí	S překrytím
stříbrná TC 0306	0,076 [ $\frac{W}{^{\circ}C}$ ]	0,095 [ $\frac{W}{^{\circ}C}$ ]
zlatá TC 8101	0,039 [ $\frac{W}{^{\circ}C}$ ]	0,071 [ $\frac{W}{^{\circ}C}$ ]

Hodnoty byly spočítány z naměřených údajů napětí, proudů a teplot vrstev, kde se nejprve vypočítal výkon jednotlivých vrstev s vrchní ochranou vrstvou a následně se odečetl od výkonu vrstev bez zalaminované ochranné vrstvy.

Výpočet rozdílu výkonu :

$$\Delta P = (P2) - (P1) \quad [W] \quad (1.1)$$

Je vyjádřen vzorek kde P2 je výkon vrstev s vrchní ochranou vrstvou, které dosahovaly vyšších hodnot a P1 je výkon vrstev bez ochranné vrstvy které dosahoval nižších hodnot

$$\Delta T = (T1) - (T2) \quad [^{\circ}C] \quad (1.2)$$

Je vyjádřen vzorec kde T1 je teplota vrstvy bez vrchní ochranné vrstvy a T2 je teplota vrstev s vrchní ochranou vrstvou. Tímto bylo zjištěn jaký výkon dokáží jednotlivé materiály používané firmou Heraus na substrátu LTCC HL200 uchladiť vzhledem k zatížení v čase.

## 6 Závěr

Při seznamování se s vodivými vrstvami bylo využito měření tloušťky vrstev a optické kontroly natištěných substrátů jak na LTCC tak pro porovnání na korundové keramice z práce. Optická kontrola pomohla stanovit limity použitého sítotiskového zařízení a také výrobu vrstev pro následné měření tloušťky. Bylo použito měřící metody s využitím mikroskopu s velmi jemným ostřením pro odečtení tloušťky natištěných vrstev .

Z poznatků získaných při zkušebním testování a měření tloušťky byl vytvořen postup testování vrstev které vychází z principu metody pro měření výkonových pouzder. Na LTCC formátu 50\*50 mm byl přenesen převzatý testovací motiv. Na jednom formátu bylo natištěno 10 obvodů o rozměrech 10\*25 mm. Každý obvod měl odlišnou šířku testovaného vodiče od 200 do 650  $\mu\text{m}$ . Pro tisk vrstev bylo zvoleno tři pasty určených přesně pro substrát LTCC od Heraeus systému HL2000. Dvě pasty byly pájitelné jedna nepájitelná. Pro měření tloušťky vrstev a limit sítotisku byly použity všechny tři, dále pro měření zatížení vrstev jen pájitelných past se stříbrem TC0306 a zlatem TC8101.

Pro měření výkonového zatížení bylo vybráno zařízení které je schopno nastavovat proud a měřit napětí na testovaném vzorku. Tímto zařízením byl inteligentní zdroj proudu s dostatečně tvrdou výstupní charakteristikou měřením napětí který měl pro tyto veličiny měřící chybu  $\pm(0,2\% + 3 \text{ digity})$ . Pro měření teploty vrstev se využíval termočlánek připojený k multimetru s laboratorní přesností  $\pm(1\% + 3 \text{ digity})$  pro rozsah teplot ( $-40^{\circ}\text{C}$  až  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

Pro seznámení se všemi měřícími funkcemi zařízení a zjištění parametrů a limit LTCC bylo použito několik testovacích vzorků. U zkušebního měření na vzorcích u kterých nebyla vrchní laminace docházelo k opticky pozorovatelnému přepálení vodivé dráhy a tím i k přerušení elektrického obvodu. K tomuto jevu došlo vlivem působení tepla, které vzniklo průchodem proudu vodičem vytvořeného tlustovrstvou technologií. Nejprve došlo oddělení vodiče od vrstvy a následně k přepalu. Elektrický obvod testovaných vodičů překrytých vrchní vrstvou byl také přerušen, tento efekt nebylo možné pozorovat, docházelo pouze k změně barvy vlivem přepalu vrstvy na (žlutou až hnědou). Testovací vzorky byly připojeny pomocí „banánků“ přímo k vrstvě z důvodu vyloučení leachingu neboli roztavení pájky a pohlčení připojovací plošky z důvodu vysokých proudů. U všech testovaných vzorků natištěných pastami TC0306 A TC8101 došlo při testování k rozžhavení a rozpojení obvodu pro zjištění bodu přepalu.

Z naměřených hodnot napětí a proudu na vrstvách s laminací a bez laminace byl vypočten celkový výkon pro konkrétní šířku přepalového vodiče. Z těchto hodnot byly vytvořeny průběhy výkonu a teploty závislé na počtu naměřených kroků, které znázorňují postupné krokované zatěžovacího proudu a napětí. Teplotní zatížení testovacího vodiče vzniklo průchodem velkými proudy vrstvou. Dále lze rozpoznat rostoucí hodnotu napětí vlivem zvyšujícího se proudu ale také i odporu daného vodiče vlivem teploty. Dobré chlazení vlivem překrytí vrstev zvyšuje hodnotu průrazného napětí.

Z těchto časových průběhů byl spočítán rozdíl výkonového zatížení vrstev bez laminace a s laminací v závislosti šířce vodiče na oteplení. Při porovnávání grafů výkonové zatížitelnosti sestavených z naměřených hodnot na vzorcích natištěných zlatou a stříbrnou pastou, lze pozorovat, že charakter křivek u obou typů stejný. Oba grafy se liší pouze v tom, že u vrstev s vrchní laminací dochází k lepšímu odvodu tepla a tím k ochlazení vrstvy a ovlivnění proudové zatížitelnosti vrstev které zlepšuje parametry celého obvodu.

Materiál LTCC má mnohonásobně lepší parametry než korundová keramika a svou snadnou manipulovatelností v nevypáleném stavu umožňuje použití ve vrstevných aplikacích kterými lze výkonové parametry několika násobně vylepšit. Vrchní ochranné vrstvy slouží jako výkonová ochranná pouzdra a je možné je v důsledku tohoto pouzdření zatěžovat daleko vyššími proudy. Meze bezpečných výkonů na překrytých vrstvách jsou nejvyšší s použitou stříbrnou pastou TC 0306 a to 0,095 W/°C. LTCC s překrytou vodivou vrstvou představuje také lepší tepelnou vodivost a tím zajištění odvodu tepla oproti korundové keramice která sice dosahuje velmi dobrých vlastností při použití správných past ale materiál LTCC ji svým charakterem předčí.

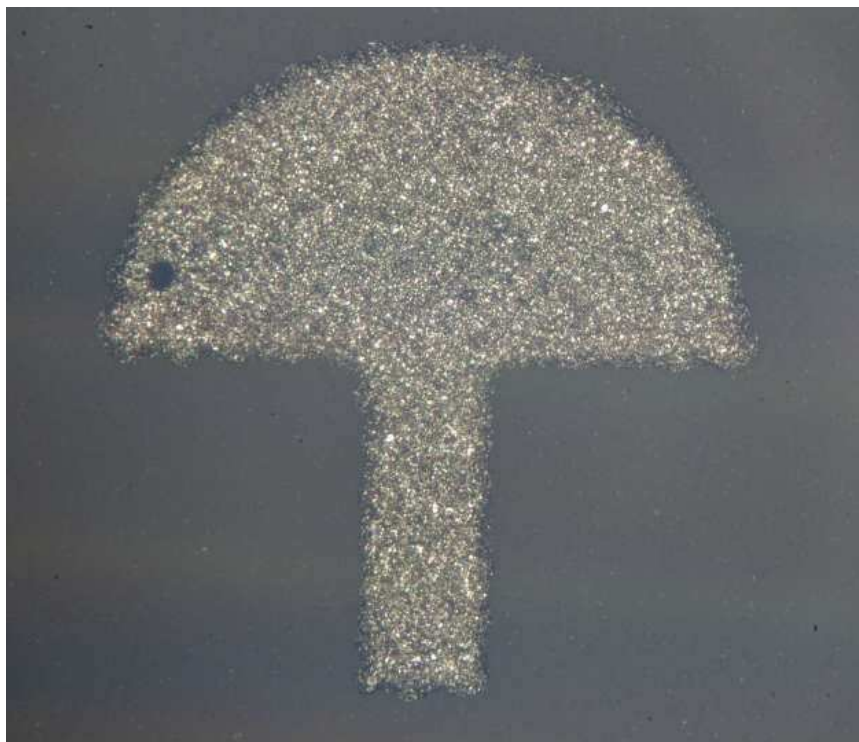
## 7 Seznam literatury

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Thusté vrstvy*. Osnova předmětu BMTS [online]. [cit. 2011-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/%7Eszend/vyuka/bmts/2009-BMTS-4>>
- [2] DZURDZIA, B. – MAGONSKI, Z. – NOWAK, S. *Photoimageable Thick-Films in Microwaves –An Advancing Microelectronics*, July-August 2004, p.28-32
- [3] HERAEUS. *LTCC Materials* [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <[http://heraeus-thickfilm.com/en/productsapplications/ltccmaterials/ltcc\\_materials\\_1.aspx](http://heraeus-thickfilm.com/en/productsapplications/ltccmaterials/ltcc_materials_1.aspx)>
- [4] TRNKA, P. – BUJALOBOKOV, M.: *Progresivní keramika v elektronických aplikacích*. Advances in EE, (in review), 2008, vol. 1.
- [5] STRAKA, MICHAL. *Měření tíhy s využitím LTCC technologie*. FEKT VUT Brno, 2010. 38 s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [6] Vrstvové technologie. *Multimediální výukový systém* [online]. 2009, 4, [cit. 2011-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/%7Evasko/multimedialni%2Ducebnice/vrstvove%2Dtechnologie/>>.
- [7] GOLONKA, L.J. –MARKOWSKI, A. –ROGUSZCZAK, H –ZAWADA, T –NEEDES, C. R. –BARKER, M. F. – OLLIVIER, P.T. et al.: *Constrained-sintered, Low Temperature Co-fired Ceramic for IC packaging applications*. In: Proc 53<sup>rd</sup> Electronic Company & Technology Conference IEEE, New Orleans, 2003, p. 30-35
- [8] TOMÁNEK, J. *Optimalizace tisku z hlediska dosažení minimálních rozměrů motivu*. FEI VUT Brno, 2001. 42 s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
- [9] VALA, VIKTOR. *Optimalizace technologie sítotisku z hlediska přesnosti*. Ústav Mikroelektroniky, 2002. 54 s. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [10] STREJČEK, JINDŘICH. *Dimenzování proudových vodičů tlustovrstvých obvodů*. Ústav Mikroelektroniky, 2010. 55 s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [11] KOSINA, P.; ŠANDERA, J.; HEJÁTKOVÁ, E. *Perspektiva LTCC technologie*. Bulletin of SMT/ISHM Int. Conference "New Trends in Microelectronics", 2009, roč. 2009, č. 64, s. 4-5. ISSN: 1211- 6947.

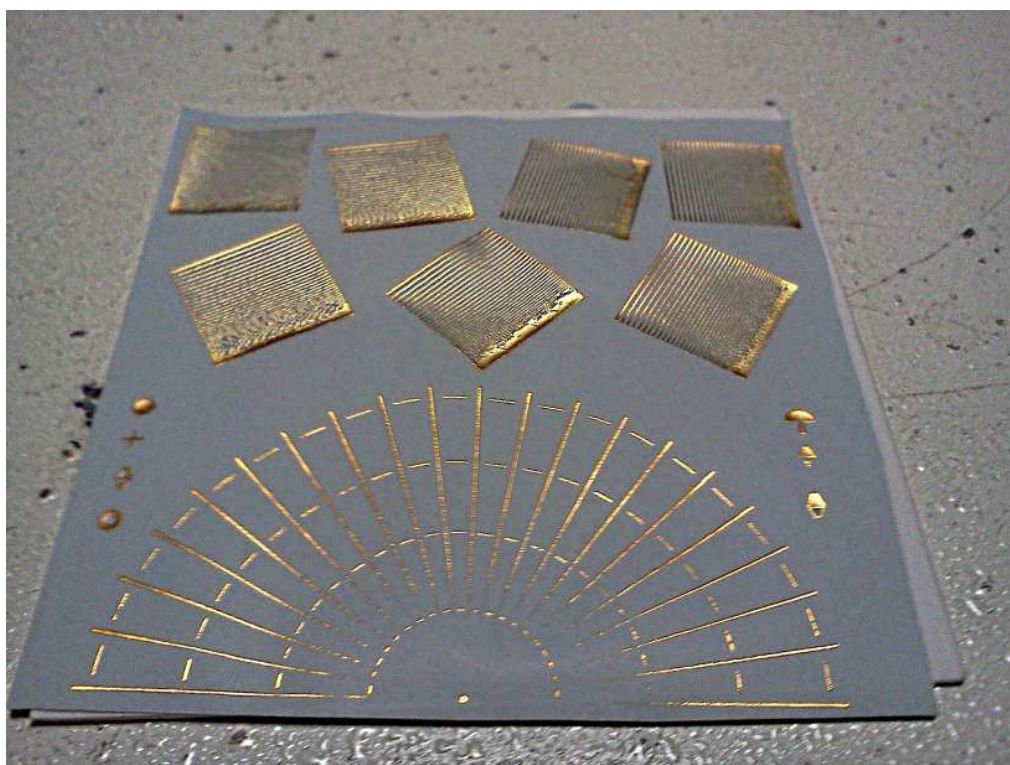
## **8 Seznam zkratek**

MCM-C	Multi Chip Modules Ceramic
LTCC	Low Temperatur Cofired Ceramics
TCE	Temperature Coefficient of Expansion

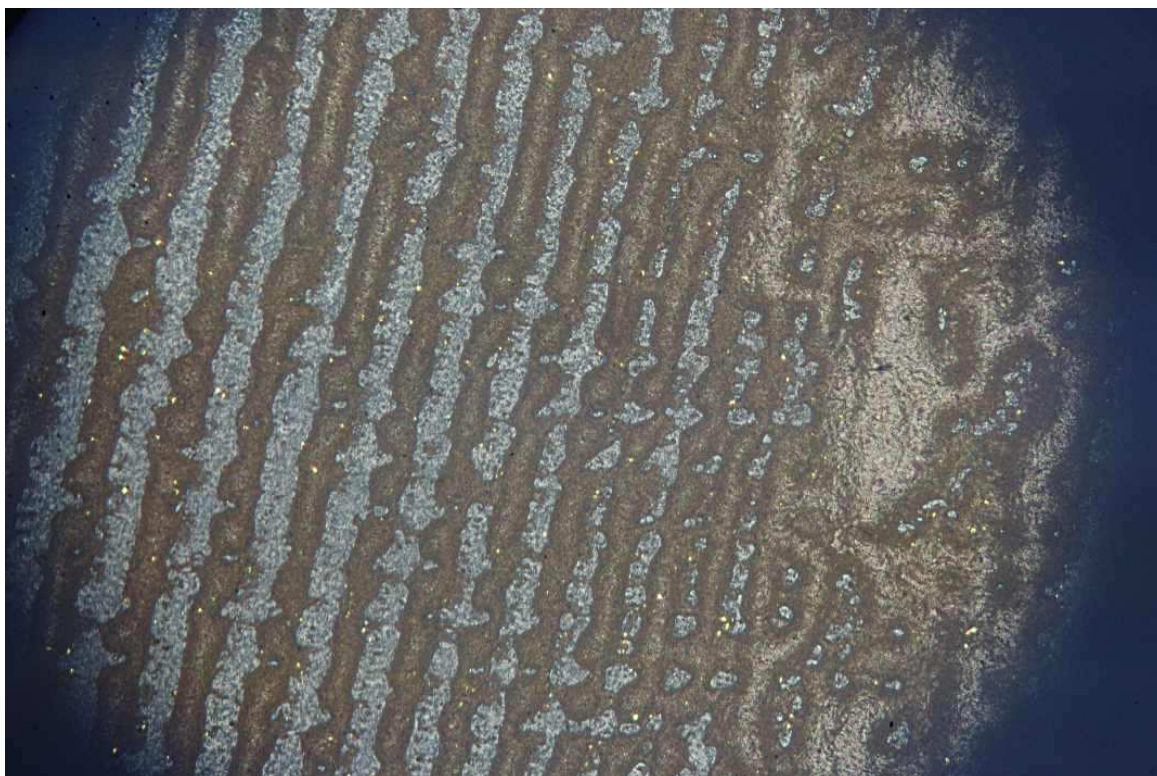
## 9 Příloha



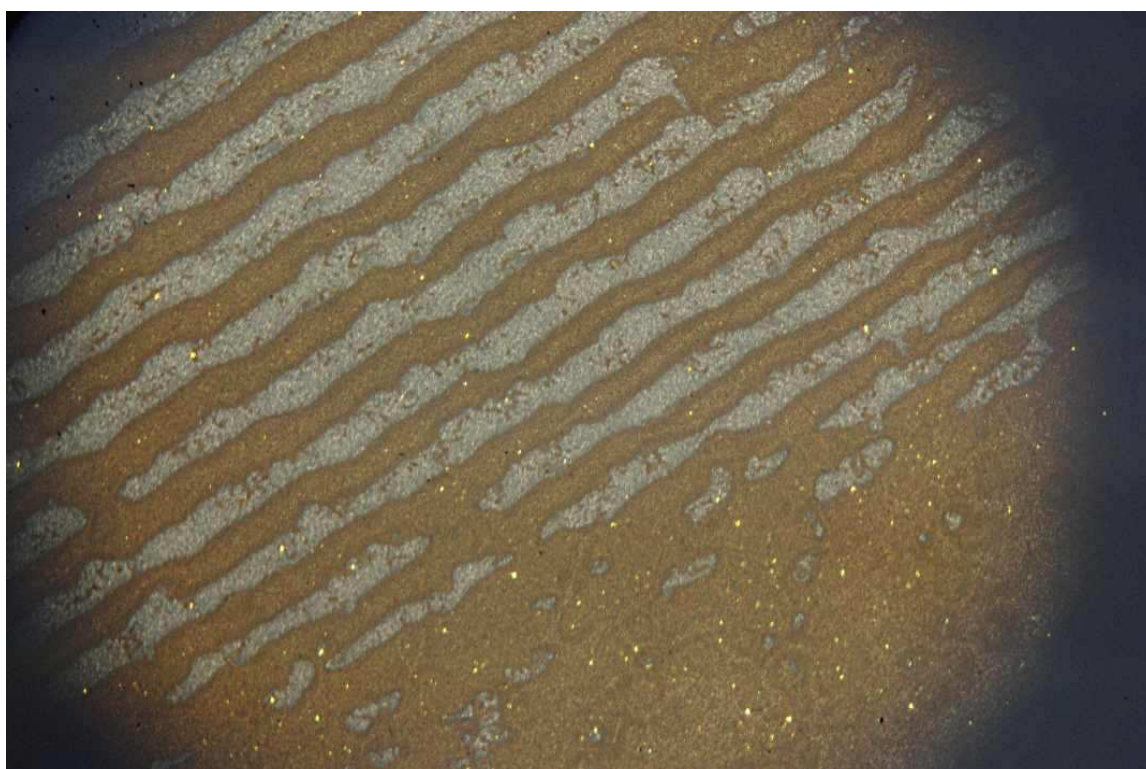
**Obr. 25.:** Druhé místo testovacího motivu kvality sítotisku pro odečet tloušťky vrstvy



**Obr. 26.:** Nízkoteplotní keramika natištěná pastou TC 8101



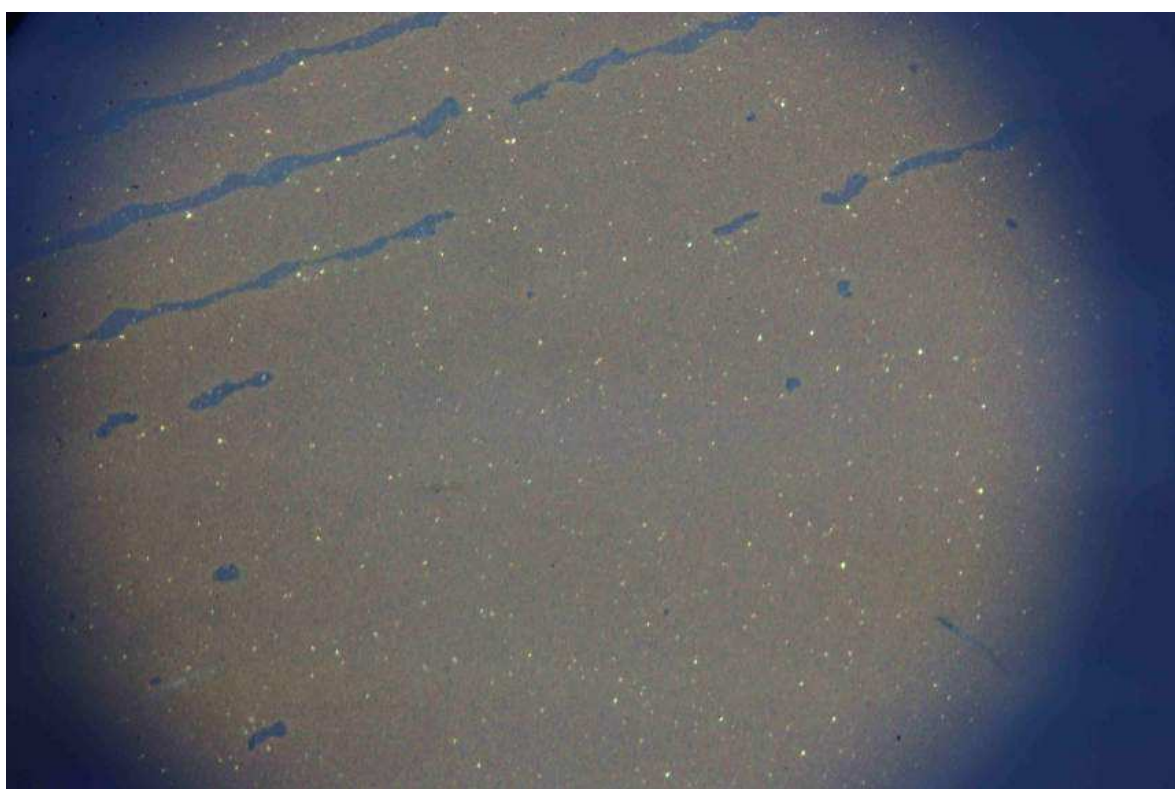
**Obr. 27.:** Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 8101 po tisku



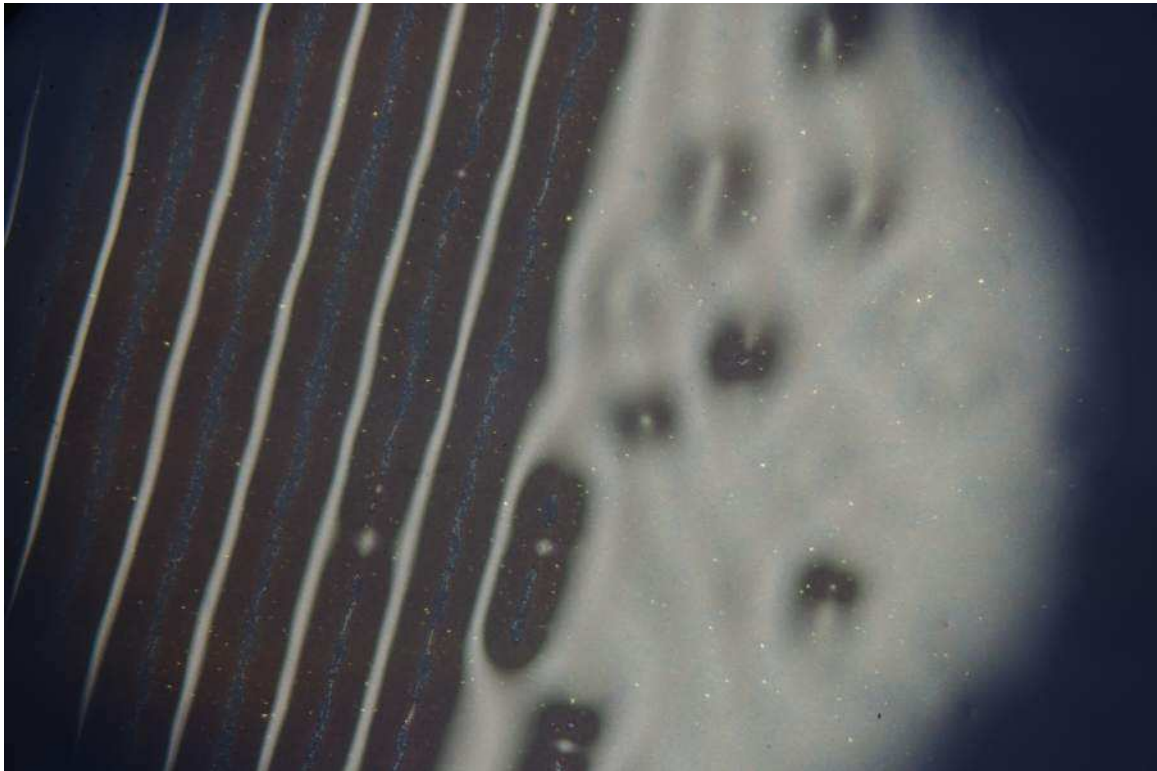
**Obr. 28.:** Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 8101 po zasušení



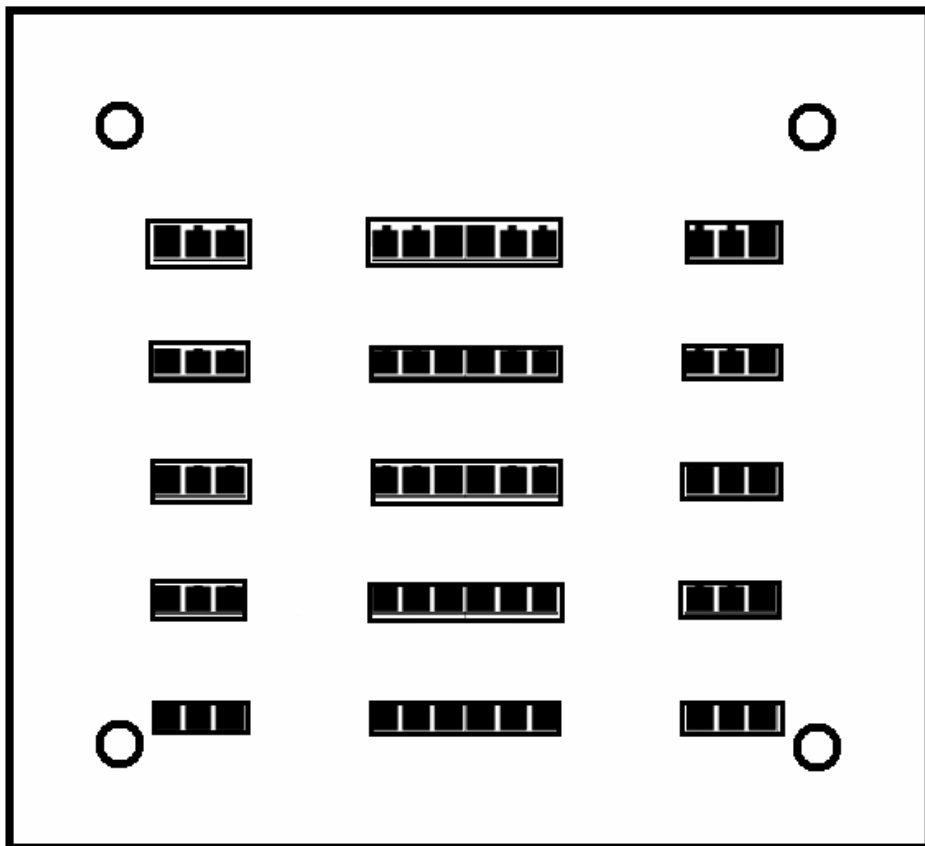
**Obr. 29.:** Nejhůře natištěná vrstva na LTCC, pod úhlem 45°, pasta TC 0306 po výpalu



**Obr. 30.:** LTCC, Pasta TC8101 – část motivu D pod úhlem 15°, po výpalu jsou vodivé dráhy slité do jednoho celku.



**Obr.31.:** LTCC, Pasta TC8101 – část motivu „F“ pod úhlem 75°, je zde vidět přechod dostatečného rozlišení vrstvy



**Obr. 32.:** Celkový vrchní schématický pohled na překrytou zalaminovanou vrstvu