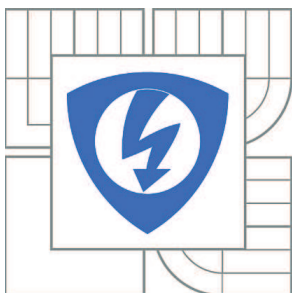


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

# STUDENÁ CHEMICKÁ LAMINACE KERAMIKY S NÍZKOU TEPLOTOU VÝPALU

COLD CHEMICAL LAMINATION OF LOW TEMPERATURE CO-FIRED CERAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

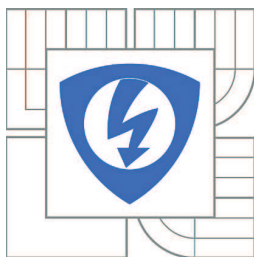
Bc. MATĚJ JURÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŠTEKOVIČ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Mikroelektronika**

**Student:** Bc. Matěj Jurásek

**ID:** 106509

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Studená chemická laminace keramiky s nízkou teplotou výpalu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku keramiky s nízkou teplotou výpalu se zaměřením na proces studené chemické laminace a zpracujte potřebnou teoretickou rešerši. Navrhněte různé experimentální metodiky výroby LTCC struktury pomocí studené chemické laminace. Cílem je navržení optimálního postupu výroby struktury a nalezení vhodného leptadla pro metodu studené chemické laminace. Dosažené výsledky porovnejte s termokompresní metodou laminace.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 29.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Štekovič

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## Abstrakt:

V této práci je rozebrána problematika výroby struktur pomocí nízkoteplotně vypalované keramiky s širším zaměřením na oblast laminace. Jsou zde zmíněny termokompresní metody, které jsou v dnešní době nejvíce rozšířenými a rovněž nové laminační techniky využívající pro spojení jednotlivých keramických pásků chemikálie. Popisuje nové technologie laminace a jejich výhody, jako jsou absence zvýšené teploty a vysokých tlaků. Zároveň zde vyvstávají nové problémy v podobě rovnoměrného nanášení či extrémní citlivosti chemikálie na znečištění prachem. Práce popisuje vytváření struktur chemickou laminací. Konkrétně výrobu vícevrstvých struktur metodou Cold Chemical Lamination a uvádí možné příklady depozice rozpouštědel potřebných pro naleptávání povrchu pásku LTCC během této laminace.

## Abstract:

This paper deals with production of the structures fabricated using low temperature co-fired ceramics. Focus is on the lamination of raw ceramic tapes. There are presented classical thermo-compressive methods and a new method using chemical solutions for tape bonding. Describes new lamination technology and their advantages are the absence of elevated temperatures and high pressures. This method reduces using of higher temperatures and high pressure during lamination. On the other hand, chemical process of tape bonding is not flawless. There are many problems including solvent deposition, extreme sensitivity to dust and other processing parameters. It also describes the fabrication of structures by chemical way. Specifically, analyzes the method Cold Lamination Chemical and provides examples of possible deposition solvents which are needed for etching the surface of the LTCC tape during the lamination.

## Klíčová slova:

Nízkoteplotně vypalovaná keramika, studená chemická laminace, deformace, nízký tlak

## Keywords:

Low Temperature Co-fired Ceramic, Cold Chemical Lamination, Deformation, Low pressure

## Bibliografická citace díla:

JURÁSEK, M. *Studená chemická laminace keramiky s nízkou teplotou výpalu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 53s. Vedoucí semestrální práce Ing. Michal Štekovič.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 27.5.2014

.....  
podpis autora

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Štekovičovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této práce.

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 NÍZKOTEPLTNĚ VYPALOVANÁ KERAMIKA .....</b>	<b>11</b>
1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV .....	11
1.2 KERAMIKA LTCC A JEJÍ VLASTNOSTI .....	12
1.2.1 <i>Smrštitivost keramických pásků</i> .....	13
1.3 KERAMIKA DUPONT 951 „GREENTAPE™“ .....	15
1.4 KERAMIKA HERALOCK® HL2000 „HERATAPE“ .....	15
<b>2 PROCES VÝROBY STRUKTURY TECHNOLOGIÍ LTCC .....</b>	<b>17</b>
2.1 VÝROBNÍ POSTUP .....	17
2.1.1 <i>Keramická suspenze</i> .....	18
2.1.2 <i>Výroba sklo-keramických pásků</i> .....	18
2.1.3 <i>Řezání</i> .....	19
2.1.4 <i>Stabilizace LTCC keramiky</i> .....	20
2.1.5 <i>Vrstvové technologie</i> .....	21
2.1.6 <i>Sesazení a laminace vrstev</i> .....	21
2.1.7 <i>Výpal</i> .....	22
<b>3 LAMINACE .....</b>	<b>24</b>
3.1 TERMOKOMPRESNÍ LAMINACE .....	24
3.1.1 <i>Uniaxiální laminace</i> .....	24
3.1.2 <i>Isostatická laminace</i> .....	24
3.2 JEDNORÁZOVÁ A POSTUPNÁ LAMINACE .....	25
3.3 NOVÉ ZPŮSOBY LAMINACE LTCC KERAMIKY .....	25
3.3.1 <i>Studená nízkotlaká laminace (CLPL)</i> .....	25
3.3.2 <i>Studená chemická laminace (CCL)</i> .....	26
3.4 VZNIK DEFEKTŮ VE STRUKTUŘE VLIVEM LAMINACE .....	29
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
4.1 NÁVRH TESTOVANÝCH STRUKTUR .....	30
4.1.1 <i>Pomocný vzorek</i> .....	30
4.1.2 <i>Hlavní testovací vzorek</i> .....	32
4.2 NÁVRH METODIKY LAMINACE STRUKTUR .....	33
4.3 METODIKA VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	34
4.3.1 <i>Dělení sklo-keramického substrátu</i> .....	34
4.3.2 <i>Vyhodnocení vzorků</i> .....	35
4.4 LAMINACE STRUKTUR METODOU CCL .....	37
4.4.1 <i>Dosažení potřebného tlaku pro spojení LTCC pásků</i> .....	37
4.4.2 <i>Nanášení pomocí sítotiskového poloautomatu</i> .....	39
4.4.3 <i>Nanášení válečkem s absorpčním povrchem</i> .....	41
4.4.4 <i>Nanášení štětcem</i> .....	43
4.5 LAMINACE STRUKTUR TERMOKOMPRESNÍ METODOU .....	43
4.6 SESAZENÍ JEDNOTLIVÝCH SKLO-KERAMICKÝCH PÁSKŮ .....	44

4.7	DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	46
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>52</b>

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1 :</b>	Struktura keramiky LTCC [4] .....	12
<b>Obr. 2 :</b>	Funkce skla ve struktuře LTCC a) před výpalem b) po výpalu .....	13
<b>Obr. 3 :</b>	Sled výrobních operací při vytváření vícevrstvé struktury z LTCC pásků [6] ...	17
<b>Obr. 4 :</b>	Princip výroby LTCC pásků .....	19
<b>Obr. 5 :</b>	Stabilizace vyřezaných tvarů v LTCC .....	20
<b>Obr. 6 :</b>	Nanášení pasty metodou sítotisku a) výchozí pozice b) proces tisku .....	21
<b>Obr. 8 :</b>	Příklad uniaxiální laminace .....	24
<b>Obr. 9 :</b>	Princip studené nízkotlaké laminace CLPL .....	26
<b>Obr. 10 :</b>	Princip studené chemické laminace CCL.....	26
<b>Obr. 11 :</b>	a) Delaminace LTCC pásků, b) bubliny, c) vertikální praskliny, d) vzájemné posunutí vrstev .....	29
<b>Obr. 12 :</b>	Vzorek pro první testování reakce LTCC na změkčovadla .....	30
<b>Obr. 13 :</b>	Struktura složená z 6. vrstev .....	31
<b>Obr. 14 :</b>	Nanesená vrstva rozpouštědla a) ihned po nanesení, b) po 120 sekundách (Heraeus HVS 100) .....	32
<b>Obr. 15 :</b>	Návrh hlavního testovacího motivu .....	32
<b>Obr. 16 :</b>	Testovací struktura a) Vrstva s vyřezaným motivem, b) vytváření vícevrstvé struktury .....	33
<b>Obr. 17 :</b>	Sestava pro termokompresní laminaci .....	34
<b>Obr. 18 :</b>	Řez strukturou a) rozpraskání struktury vlivem řezání diamantovým kotoučem, b) řez laserem .....	35
<b>Obr. 19 :</b>	Rozdělení struktury hlavního testovacího vzorku .....	35
<b>Obr. 20 :</b>	Výbrus struktury a) zalité v detakrylu b) bez zalití.....	36
<b>Obr. 21 :</b>	Rozdělení substrátu a) hloubka řezu po nařezání laserem b) rovinnost sledované plochy po rozlomení.....	36
<b>Obr. 22 :</b>	Metody vytváření tlaku a) laminace pomocí gravitační síly b) využití uniaxiálního lisu [2] .....	37

<b>Obr. 23 :</b>	Princip laminace přes porézni kámen a) vypnutý odvod vzduchu b) zapnutí odvodu vzduchu a jeho odsátí z oblasti umístění LTCC struktury .....	38
<b>Obr. 24 :</b>	Laminace testovacího vzorku pomocí porézniho kamene .....	38
<b>Obr. 25 :</b>	Struktura laminovaná s prodlevami 120 s a) Heraeus HVS 100, b) DuPont 4553 . .....	40
<b>Obr. 26 :</b>	Sestava pro nanášení rozpouštědla pomocí válečku a) laminační sestava b) upravený váleček .....	41
<b>Obr. 27 :</b>	Vícevrstvá struktura s vnitřními dutinami.....	42
<b>Obr. 28 :</b>	Výpalem zdeformovaná struktura vytvořená LTCC keramikou DuPont 951.....	43
<b>Obr. 29 :</b>	Delaminace ve struktuře vytvořené termokompresní metodou.....	44
<b>Obr. 30 :</b>	Princip sesazení pomocí hrany .....	45
<b>Obr. 31 :</b>	Sesazení LTCC vrstev tvořících můstek pomocí hran substrátů .....	45
<b>Obr. 32 :</b>	Sesazení LTCC vrstev tvořící můstek pomocí laminační masky.....	46
<b>Obr. 33 :</b>	Deformace ve struktuře zapříčiněné a) dlouhým laminačním intervalem, b) přílišným změkčením struktury, c) a d) použitím nedostatečného tlaku během laminace .....	47
<b>Obr. 34 :</b>	Řez pro sledování rovinnosti kruhové dutiny 15 mm a) termo-kompresní metoda b) CCL.....	48
<b>Obr. 35 :</b>	Mikro-kanálky vytvořené ve struktuře LTCC a), b) správné sesazení, c), d) špatné sesazení .....	49



## Seznam zkratk

3D	-	3 – Dimensional, trojdimenzionální
BSG	-	Borosilicate Glass, borito-křemičité sklo
CCL	-	Cold Chemical Lamination, studená chemická laminace
CG	-	Cordierite Glass, kordieritové sklo
CLPL	-	Cold Low Pressure Lamination, studená nízkotlaká laminace
CNC	-	Computer Numerically Controlled, číslicové řízení pomocí počítače
DI	-	Deionizovaná voda
DP	-	DuPont
HL	-	HeraLock®
HTCC	-	High Temperature Co-fired Ceramic, vysokoteplotně vypalovaná keramika
LTCC	-	Low Temperature Co-fired Ceramic, nízkoteplotně vypalovaná keramika
LTCC-M	-	Low Temperature Co-fired Ceramic on Metal, nízkoteplotně vypalovaná keramika na kovové podložce
LOC	-	Lab on Chip, laboratoř na čipu
MEMS	-	Micro-Elektro Mechanical Systems, mikroeletromechanické systémy
PPG	-	Polypropylenglykol
TOS	-	Tape On Substrate, Sklo-keramický pásek na substrátu

## Úvod

Slovo keramika je odvozeno z řeckého slova „Keramos“ a znamená jílu, hrnec nebo hrnčič. Nicméně s vývojem elektrotechnického průmyslu se začala díky jejím vlastnostem využívat i v tomto odvětví. Napomáhá elektronickým zařízením zlepšit jejich parametry nebo kompatibilitu pro lékařství, globální komunikační systémy, vojenské systémy a pro mnohé další obory elektrotechniky. Snaha optimalizovat vlastnosti pro konkrétní aplikace dala vzniknout již 1750 druhům keramických materiálů, které jsou využívány pro jejich chemickou odolnost nebo schopnost elektrické izolace. Dalšími velice důležitými vlastnostmi jsou vysoká teplotní odolnost a nízké dielektrické ztráty. V reakci na zvyšující se potřebu miniaturizace si větší celosvětovou pozornost získala oblast vícevrstvých keramických substrátů a keramických pouzder, což vedlo k vývoji keramiky s nízkou teplotou výpalu [1].

Nízkoteplotně vypalovaná keramika byla vyvinuta v 50. letech minulého století, ale spadala pod patent, který nedovoloval její komerční využití až do 80. let. Vývoj tohoto druhu keramiky byl iniciován snahou o zvýšení kapacity u kondenzátorů, nicméně se pozdějšími výzkumy ukázala jako vhodný substrát pro tvorbu vícevrstvých struktur [2]. Vyrábí se ve formě keramických pásků o tloušťce v řádech stovek  $\mu\text{m}$ , jejichž následným zpracováním dochází k postupnému vytvoření kompaktní vícevrstvé struktury. Forma, v jaké je nízkoteplotně vypalovaná keramika vyráběna, udává perspektivitu jejího využití v různých oblastech elektrotechniky jako např. sensorika, pouzdríká techniky, vysokofrekvenční zařízení a další. Nabízí velkou variabilitu výsledné struktury z pohledu její konstrukce zahrnující rozměry, počet vrstev nebo složitosti vytvářených dutin či mikro-kanálků.

Aby bylo možno vytvořit takové struktury, bylo nutno vymyslet sofistikovaný způsob výroby, obsahující úpravu jednotlivých pásků keramiky, jejich vzájemnou laminaci a výpal. Modifikace keramiky v nevypáleném stavu je díky její měkkému stavu bezproblémová a výpal se provádí dle profilů stanovených výrobcí. Problémy s sebou přináší termokompresní metody v oblasti laminace. Tyto nejrozšířeněji používané metody jsou realizovány zvýšenou teplotou (do 80 °C) a vysokým tlakem (do 30 MPa), což má často za následek vznik deformací během procesu výroby [3], [4], [5]. Chemický způsob laminace nízkoteplotní keramiky přináší minimalizaci deformací ve struktuře vzniklých během procesu laminace, při zachování obdobné kvality spojení vrstev jako u termokompresní metody. Metoda Studené chemické laminace (*Cold chemical lamination* dále jen CCL) využívá k naleptání povrchu rozpouštědla a probíhá za pokojové teploty a nízkého tlaku (do 5 MPa).

Tato práce je zaměřena na oblast laminace jednotlivých vrstev keramiky chemickou cestou. Jsou zde nastíněny způsoby a výsledky s jakými byly ve světě provedeny pokusy a na jejichž základě byl vybrán druh chemikálií vhodných pro použití u metody CCL. V rámci

praktické části byly navrženy testovací struktury a zjištěn vliv laminace CCL na pásy LTCC a následně chování slaminovaných struktur. Dále se zabývá nalezením vhodné metody depozice rozpouštědel za účelem nalezení nejvhodnější metody pro aplikaci různě viskózních rozpouštědel. Jsou zde nastíněny odlišné metody vytváření tlaku, které byly použity a popsán nejvhodnější způsob využitý během zbývajících testů. V závěru práce byl vytvořen vzorek termokompresní metodou sloužící jako reference pro porovnání vytvářených struktur.

# 1 Nízkoteplotně vypalovaná keramika

Uvolnění technologie nízkoteplotně vypalované keramiky (*Low Temperature Co-fired Ceramic*, dále jen LTCC) se datuje od počátku 80. let minulého století. Komercializace této technologie urychlená spoluprací výrobců Dupot, Heraeus a Ferro se společnostmi zaměřených na pouzdření rozšířily oblast využití v dalších odvětvích, jako jsou např. letecký průmysl, biomedicínský nebo automobilový [6].

Mezi výhody LTCC patří zejména nízká teplota výpalu, která se pohybuje do 1000 °C a flexibilita keramiky v surovém stavu. Díky možnosti tvarování v nevypáleném stavu je možno touto technologií vytvářet nejen planární, ale i trojrozměrné struktury.

## 1.1 Historický vývoj a současný stav

První zmínky o vývoji LTCC keramiky se objevily na konci 50. let minulého století, kdy byl zveřejněn výzkum společnosti AEROVOX Corporation zaměřený na zvýšení kapacity kondenzátorů. V následujícím desetiletí došlo k rozšíření využití o možnost realizace vícevrstvých struktur a v této oblasti je v dnešní době nejvíce rozšířena. Tyto aplikace spadaly pod patent držený firmou AEROVOX Corporation k jehož uvolnění došlo na počátku 80. let minulého století [2].

Nejnámější komerčně využívané LTCC materiály jsou vyráběny firmami DuPont (GreenTape), Heraeus (HeraTape), CeramTec, Ferro, ESL. Díky relativně snadné realizaci struktur a dobrým dielektrickým vlastnostem keramického substrátu po výpalu, je LTCC vhodná pro využití ve vysokofrekvenčních a mikrovlnných aplikacích, u kterých je vyžadovaná vysoká jakost.

**Tab. 1 :** Přednosti technologie LTCC

<b>PŘEDNOSTI LTCC PRO</b>	
<b>HYBRIDNÍ SYSTÉMY</b>	snížení počtu vypalovacích kroků, trojrozměrné elektronické propojení, efektivní realizace vícevrstvých struktur s aplikací Au a Ag past.
<b>SENZORIKA</b>	vysoká odolnost vůči agresivnímu prostředí, vhodné podmínky integrace sensorových aktivních vrstev.
<b>VYTVÁŘENÍ ZVLÁŠTNÍCH ASPEKTŮ A 3D STRUKTUR</b>	Realizace mechanických částí (MEMS, MST), speciální úprava povrchu sensorových prvků.

Současný vývoj a budoucí perspektiva je udávána dvěma limitujícími faktory: materiálová kompatibilita a chemické složení LTCC pásky. Proto se v posledním desetiletí

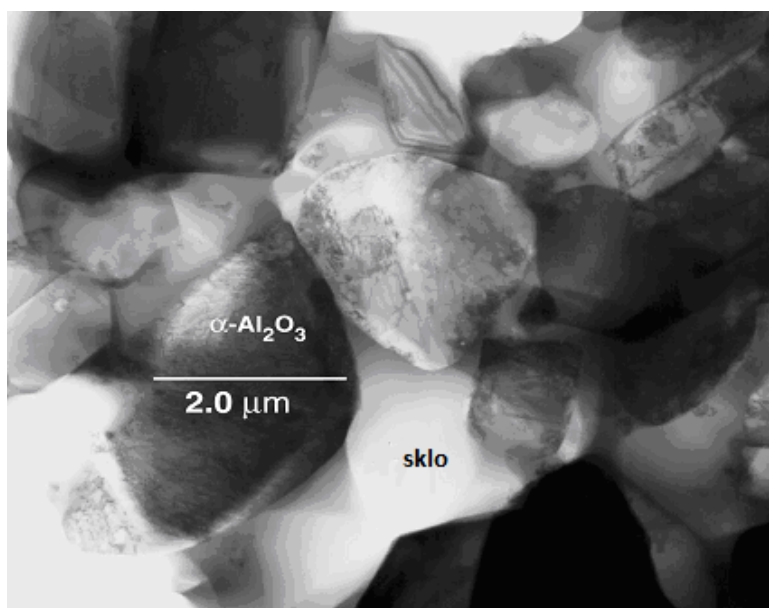
provádějí výzkumy v oblasti LTCC keramik s nízkou smrštitelností, bez obsahu skla nebo bez obsahu olova, které se zde vyskytuje jako přísada ve skle.

Ve většině běžných LTCC substrátů je sklo hlavní složkou, která po výpalu pojí zrna  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v jednolitou strukturu. Ovšem právě vysoký obsah skla snižuje chemickou kompatibilitu pásků. Navíc výskyt skla v jeho několika fázích během výpalu zvyšuje možnost reakce s kovovým materiálem a zvyšuje složitost výroby LTCC struktur. Jako potenciální náhrada za tuto složku se na základě současných studií jeví materiály  $\text{CaGeO}_3$  a  $\text{CaGe}_2\text{O}_5$  [6].

V současnosti je další populární oblastí výzkumu výroba bezolovnatých LTCC pásků. Tyto pásky se vytvářejí za účelem výroby multi-systémů jako LOC (*Lab On a Chip*) nebo pro biologické aplikace. Omezení běžných LTCC pásků vyplývají z možnosti vylučování toxických materiálů, které se nacházejí ve skle jako přísady (kadmium, olovo atd.) [6].

## 1.2 Keramika LTCC a její vlastnosti

Keramika LTCC je v surovém stavu materiál tvořený 85 % anorganickou a 15 % organickou složkou. Organická složka obsahuje pojiva a jiné výrobci často nespécifikované stopové prvky, díky kterým je zajištěna flexibilita keramických pásků v surovém stavu. Struktura LTCC keramiky je znázorněna na obrázku 1.

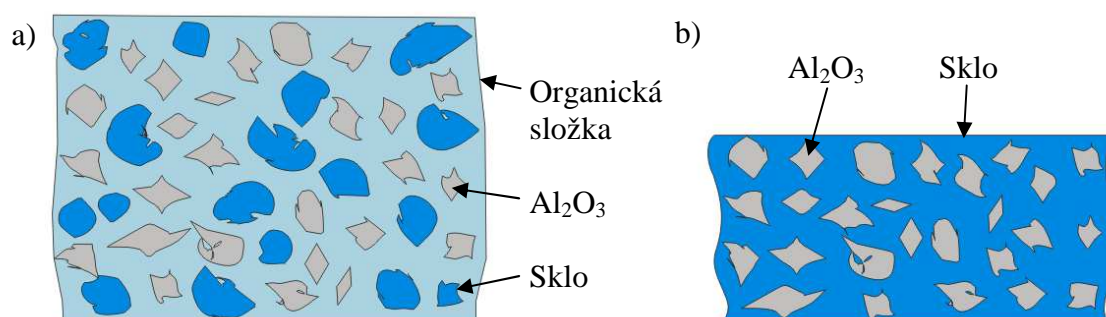


Obr. 1 : Struktura keramiky LTCC [4]

Anorganická složka obsahuje z 52 % skelnou fritu, která slouží po výpalu jako pojivo mezi zrny korundové keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Funkce skla a smrštění keramiky vlivem odpaření rozpouštědel je zobrazena na obrázku 2. Druh skla udává rovněž výsledné vlastnosti keramického pásku. Například bylo zjištěno, že přidáním kordieritového skla (*cordierite glass*

- CG) do borito-křemičitého skla (*boritosilicate glass BSG*) se výrazně zpomalí proces zhušťování skla, ale zvýší se aktivační energie. Tento jev má za následek prudkou reakci, která nastane mezi BSG a CG sklem během výpalu [1]. Sklo navíc napomáhá ke snížení teploty výpalu, čímž zlepšuje kompatibilitu vypalovacích profilů keramiky LTCC a tlustovrstvých past. Teplota výpalu se pohybuje okolo 850 – 875 °C v závislosti na složení sklo-keramické suspenze, které se pro jednotlivé výrobce liší. Korundová keramika je zastoupena obsahem 48 % z anorganické složky LTCC. Oba tyto materiály jsou přidávány ve formě zrn o velikostech do 2 μm [6], [8].

Organická složka je tvořena pojivem (např. Butvar 98), rozpouštědly (např. Xylen, Ethanol), disperzanty (např. menhadenový olej) a změkčovadly (např. Santicizer 160). Tyto složky i jejich poměr se mění podle výrobce a zpravidla se neuvádějí ani v datasheetu [5].



**Obr. 2 :** Funkce skla ve struktuře LTCC a) před výpalem b) po výpale

Mechanické a elektrické vlastnosti jsou definovány vzájemným poměrem jednotlivých přísad (skelná frit, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) v anorganické složce. Tato skutečnost umožňuje variabilitu parametrů keramiky (např. koeficient teplotní roztažnosti, mechanická pevnost atd.) pouze změnou jejího složení nebo velikostí zrn [6]. Mechanická pevnost u LTCC pásků je obdobná jako např. u steatitu nebo forsfeitu, ale pouze poloviční oproti korundové keramice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Výzkumy ukázaly, že přilnavost materiálů jako je zlato nebo měď je rovněž nižší než u korundových substrátů. Drsnost povrchu se v průběhu let mění v závislosti na vývoji keramických suspenzí a technologických operacích využitých pro výrobu LTCC pásků. Trend charakterizující drsnost má snižující se charakter a při použití finálních leštících operací se hodnota nerovnosti pohybuje v řádech několika desítek nm (cca 20 nm). Tato skutečnost ukazuje vhodnost použití pro systémy MEMS [9].

### 1.2.1 Smršťivost keramických pásků

Smršťivost je parametr, se kterým je nutno počítat již při návrhu struktury. Může se vyskytnout v různých fázích zpracování LTCC materiálu. Předurčuje výběr past (odporových, vodivých popř. dielektrických), které budou během výroby použity. Je nutné

zajistit, aby se koeficient teplotní roztažnosti pasty a keramiky LTCC co nejvíce shodoval a tím se zabránilo vzniku defektů v průběhu výpalu. Smrštivost je jev ovlivnitelný procesem výroby sklo-keramických pásků, ale také odpařováním organické složky (pojiva) ze struktury keramiky v průběhu výpalu, velikostí zrn a poměrem jednotlivých složek. Dále je ovlivněn parametry procesu laminace, jako jsou aplikovaný tlak, teplota a způsob laminace. Ovšem k největší změně rozměrových parametrů dochází během procesu vypalování LTCC keramiky. Zde dochází ke zvýšení teploty nad 660 °C resp. nad teplotu skelného přechodu, kdy se začíná tavit skelná fritta obsažená v keramické suspenzi [9]. Tento proces není izotropní ve všech směrech, a proto rozlišujeme z pohledu smrštivosti dva základní typy keramik:

- Keramiky LTCC se smrštivostí v osách x, y = 12 – 20 %; z = 14 – 18 % [8], [4];
- Keramiky LTCC s nulovou smrštivostí v osách x, y = 0,1 – 0,5 %; z = 32 % [6];

U keramik s větší smrštivostí v ose x, y je volba správné pasty s vysokým koeficientem teplotní roztažnosti kritickým faktorem. V případě keramik s tzv. nulovou smrštivostí v ose x, y vzniká problém s odvodem tepla, důvodem je větší poréznost tohoto typu LTCC keramiky [6], [8], [12]. Přehled smrštivosti u vybraných keramik je uveden v tabulce 1.

**Tab. 2 :** Přehled smrštivosti u vybraných typů LTCC keramik [6]

VÝROBCE A OZNAČENÍ LTCC		Heraeus CT700	Heraeus CT800	Heraeus HL800	Heraeus HL2000	CeramTEC CT320AG	DuPont 951
TLOUŠŤKA PŘED VÝPALEM [μm]		130	125	130	131	320	50, 112, 162, 250
SMRŠTIVOST [%]	x, y	14,4	14,1	0,5	0,2	21	12,7
	z	14,9	30	32	32	18	15

Jednou z možností výroby LTCC pásků s nulovou smrštivostí, využívanou firmou Heraeus, je výroba pásku ze 3 vrstev. Horní a spodní vrstva obsahuje sklo s nízkou teplotou tavení a částice keramiky, zatímco prostřední vrstva obsahuje smáčedla. Tato smáčedla umožňují přesun skla během výpalu z vnějších vrstev do střední více pórovité vrstvy.

Dalšími možnostmi, jak zabránit smršťování keramiky, může být využití systémů, které jsou uzpůsobeny k redukci tohoto efektu. Tyto tzv. constraining systémy jsou založeny na působení tlaku během výpalu (PAS – *Pressure Assisted Sintering*), kde pracovní tlak nepřesahuje 0,07 MPa nebo bez působení tlaku (PLAS – *Pressureless Assisted Sintering*). V neposlední řadě jsou využívány metody upevnění pásku na již vypálený substrát LTCC

(TOS – *Tape On Substrate*) nebo upevnění ke kovové podložce (LTCC-M – *LTCC on Metal*) [6], [9].

### 1.3 Keramika Dupont 951 „GreenTape™“

DuPont 951 je nízkoteplotně vypalovaná keramika, která umožňuje vytvářet „*low-cost*“ obvody a pouzdra s vysokou hustotou propojení, spolehlivostí a dlouhou životností. Firma DuPont vyrábí dvě verze LTCC keramik a to typ 951 a 9K7. Pro každou řadu pak byla vytvořena speciální řada vodivých past (Au a Ag), která zajišťuje maximální kompatibilitu vytvářených vodivých cest a plošek se substrátem. Hlavním rozdílem mezi těmito druhy LTCC je frekvenční oblast, pro kterou jsou výsledné výrobky určeny. Typ 951 je od výrobce určen pro všeobecné aplikace do 35 GHz, zatímco typ 9K7 je určen pro oblast vysokofrekvenčních aplikací (100 GHz a více) s nízkým ztrátovým činitelem.

Jako hlavní výrobcem udávané výhody, které poskytuje kompletní řada 951 jsou:

- Integrovaní komponent (rezistorů, kapacitorů a induktorů);
- Možnost vytvářet hermetická pouzdra;
- Vysoká stabilita po výpalu;

### 1.4 Keramika HeraLock® HL2000 „HeraTape“

Keramika HeraTape HL 2000, je produktem firmy Heraeus a označením HeraLock® HL2000 je charakterizována rodina produktů optimalizovaná pro použití v kombinaci s výše zmíněným druhem keramického pásku. Pod toto označení spadají další materiály v podobě tlustovrstvých vodivých past, které obsahují stříbro, paladium, zlato nebo kombinací těchto prvků.

Protože má keramika HL 2000 téměř nulovou smrštitivost v osách x,y , nabízí oproti typům CT 701, CT 700, CT 800 širší oblast využití, zjednodušení výrobního procesu a snížení celkové výrobní ceny. Při využití kompletní sady HeraLock® HL2000 je dosaženo vynikajících výsledků ve smyslu elektrických a mechanických vlastností. Přehled vlastností keramiky HeraLock® HL 2000 v porovnání s vlastnostmi keramiky DuPont 951 je uveden v tabulce 2 [12].

**Tab. 3 :** Porovnání vlastností keramiky Heraeus® HL 2000 a DuPont 951 [12], [10], [11]

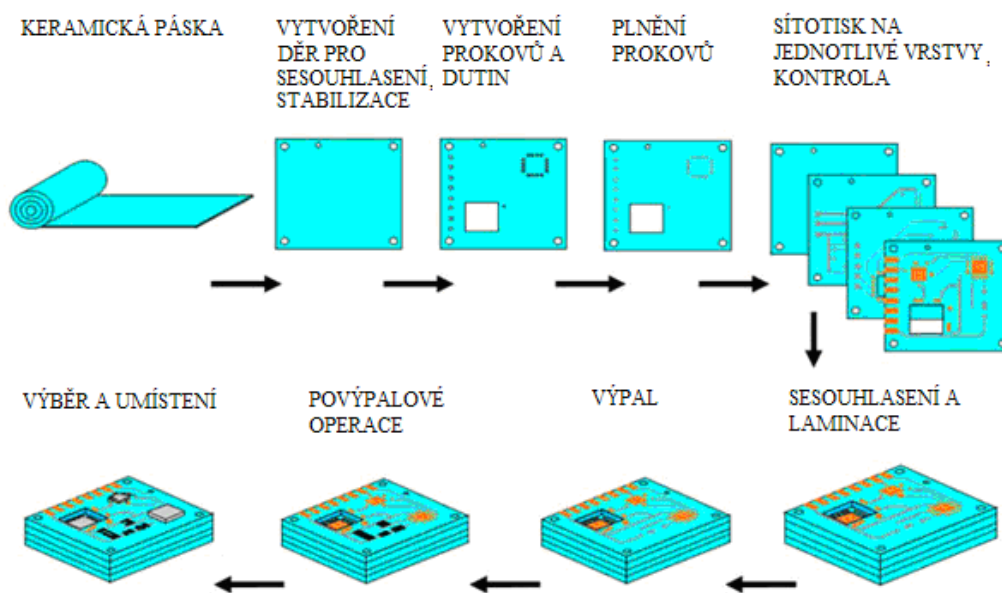
VLASTNOSTI	DUPONT 951	HERAEUS HL 2000	JEDNOTKY
<b>ELEKTRICKÉ</b>			
Relativní permitivita (2,5 GHz)	7,8	7,3	
Ztrátový činitel	0,0045	< 0,0026	



Průrazné napětí	> 1000	> 570	V / 25,4 μm
Izolační odpor	> 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>13</sup>	Ωcm
<b>MECHANICKÉ</b>			
Pevnost v ohybu	320	> 200	MPa
Drsnost povrchu	< 0,34	< 0,7	μm
<b>TEPELNÉ</b>			
Koeficient roztažnosti	5,8	6,1	ppm / °C (20 – 300°C)
Tepelná vodivost	3,3	3,0	W / mK
<b>VLASTNOSTI KERAMICKÉHO PÁSKU</b>			
Hustota keramického pásku	3,1	2,45	G / cm <sup>3</sup>
Tloušťka před výpalem	50, 112, 162, 250	131	μm
Tloušťka po výpalu	42, 95, 137, 212	87 - 94	μm
Smrštivost XY	12,7 ± 0,3	0,16 do 0,24	%
Smrštivost Z	15 ± 0,5	32	%
Barva	Tmavě modrá	Světle modrá	
Sušení	20 – 30 / 120	10 / 80	min / °C

## 2 Proces výroby struktury technologií LTCC

Jelikož je keramika LTCC vyráběna ve formě keramických pásků, je jednou z možných oblastí využití vytváření vícevrstvých struktur. Tyto soustavy jsou vytvářeny systematickým „skládáním“ jednotlivých keramických pásků, z nichž každá vrstva může obsahovat odlišný motiv vytvořený vrstvou technologií nebo různé rozměry či rozmístění dutin. Díky tomu mohou být zhotoveny nejrůznější dutiny či mikro-kanálky rozličných tvarů a velikostí. Pro výrobu takových struktur bylo nutno vyvinout sofistikovaný postup výroby. Jeden z možných postupů výroby je znázorněn na obrázku 3.



Obr. 3 : Sled výrobních operací při vytváření vícevrstvé struktury z LTCC pásků [6]

### 2.1 Výrobní postup

Výrobní postup při vytváření struktur složených z pásků LTCC keramiky je tvořen následujícím sledem operací:

- 1) Řezání – z role LTCC jsou nařezány požadované přířezy, na které se zhotoví díry, dutiny a mikro-kanálky dle motivu;
- 2) Stabilizace – vyrovnání tvarů jednotlivých vrstev působením tepla, parametry se liší dle výrobce;
- 3) Vrstvové technologie – zhotovení motivů (např. vodivých cest, pasivních prvků, prokovů);
- 4) Sesazení a laminace – zarovnání jednotlivých vrstev a jejich vzájemné spojení v ucelenou strukturu;

- 5) Výpal – keramika je vystavena působení tepla dle vypalovacího profilu, dochází k odpaření organického pojiva a rekrystalizaci skla;

### **2.1.1 Keramická suspenze**

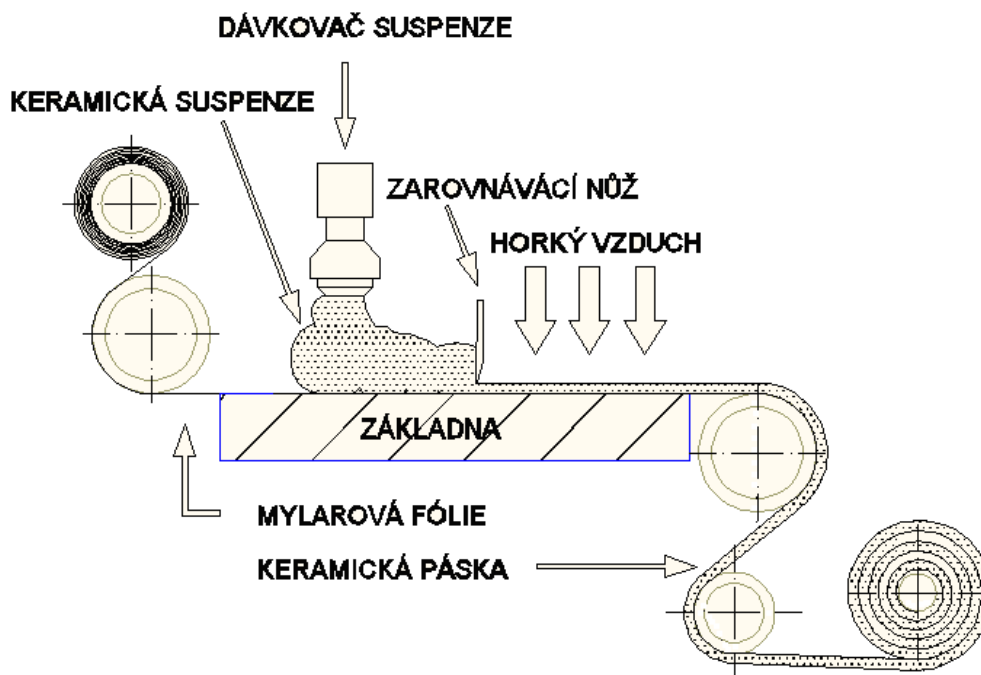
Základními složkami pro vytváření LTCC materiálu jsou skelná fritta, keramický prášek, organická rozpouštědla a jiné organické doplňkové materiály zajišťující stabilní parametry výsledného pásku. Po výpalu dojde k odpaření organických složek a zůstane pouze pevný sklo-keramický materiál. Rozpouštědla zajišťují rozpouštění organických přísad a k jejich odpařování dochází již při nízkých teplotách během odlévání.

Role těchto organik je velice důležitá během výroby keramických pásků a při následném zpracování. Tyto přísady obsahují změkčovadla, dispergační činitele a pojiva, které slouží pro nastavení vhodné viskozity výsledné suspenze. Rovněž napomáhají k rovnoměrnému rozptýlení keramických či skelných částic a zajišťují potřebnou flexibilitu i pevnost LTCC pásku. Množství organických přísad by mělo být omezeno na minimum, jelikož nadměrné množství může způsobovat deformace během výpalu, snížení hustoty po výpalu nebo tvorbu uhlíkových zbytků. Typické pojivové systémy jsou založeny buď na akrylových nebo polyvinilbutyralátových (PVB) plastech a rozpouštědlech neobsahujících vodu [5].

### **2.1.2 Výroba sklo-keramických pásků**

Proces odlévání suspenze s následným zarovnáním pomocí třerky nebo nože je technika známá již mnoho desítek let z papírového průmyslu resp. z oblasti výroby papíru. Poprvé byla zavedena pro výrobu keramických pásků Glennem Howardem v 50. letech a od té doby je používána pro výrobu keramických substrátů, piezoelektrik a pro LTCC a HTCC aplikace. Tato metoda umožňuje vytvářet keramický pásek s velkou variabilitou tloušťky. Nejběžnější rozměry se pohybují v rozsahu od 50 do 300  $\mu\text{m}$  [5].

Substrát keramického pásku je tvořen ohebnou nosnou fólií (např. z Mylaru, teflonu či celofánu), která je ve formě role umístěna do zařízení pro odvíjení. Následně je fólie přes soustavu kladek dopravena k dávkovači keramické suspenze. Zde je na fólii nanášena vrstva sklo-keramické hmoty, která je stírací čepelí zarovnána na požadovanou tloušťku vrstvy. Tyto nože rovněž způsobí směrovou orientaci jednotlivých zrn materiálů, které jsou obsaženy v anorganické složce LTCC. Tímto způsobem je dosaženo anizotropních vlastností LTCC pásku [6], [3]. Výroba těchto pásků je principiálně zobrazena na obrázku 4.



Obr. 4 : Princip výroby LTCC pásků

Po zarovnání dojde k částečnému vysušení horkým vzduchem, a tím se z nanesené vrstvy odpaří rozpouštědla dodávající suspenzi kašovitou konzistenci. Takto upravený LTCC pásek je možné navíjet do role, která se v konečné fázi rozřeže na požadované velikosti a zabalí, aby se zabránilo úplnému vysušení [8], [4].

### 2.1.3 Řezání

Jak již bylo zmíněno výše, jednou z hlavních výhod keramiky LTCC je možnost realizace dutin a mikro-kanálků. Jednotlivé otvory jsou vytvářeny metodami od razících nástrojů po sofistikované metody jako je například metoda vyleptávání otvorů JVE (*Jet Vapor Etching*), která je zatím ve stádiu vývoje [6]. Jednotlivé metody jsou založeny na odlišných principech, proto se liší i výsledná kvalita stěn a rozměrů dutin, kterou je možno realizovat.

#### **Realizace dutin razíciemi nástroji**

Tato metoda je dnes hojně využívána pro svoji nízkou cenu a vysokou rychlost, na druhou stranu je spojena s nízkou kvalitou hran vytvářených dutin. Metoda ražení nenabízí velkou variabilitu tvarů a minimální průměr takto vytvořených dutin se udává 50  $\mu\text{m}$ . Princip je založen na protlačení keramického pásku razícím nástrojem o požadovaném tvaru. Touto technikou však dochází k zaoblení hran dutin těsně kolem místa průrazu. Navíc hrany protlačených dutin nejsou rovné, a v jejich okolí mohou vznikat mikro-praskliny [6], [2].

### **Realizace dutin mikro-obráběním**

Oproti metodě ražení vykazují hrany dutin lepší ostrost. Díky programovatelným strojům CNC vyniká variabilitou procesu. Tato metoda navíc umožňuje lokální ztenčení pásku. Takto ztenčená místa pak mohou být využita např. jako membrány u senzorů MEMS [3]. V laboratořích VUT byl sklo-keramický pásek bez problému lokálně ztenčen ze 130  $\mu\text{m}$  na cca 50  $\mu\text{m}$ .

### **Realizace dutin laserem**

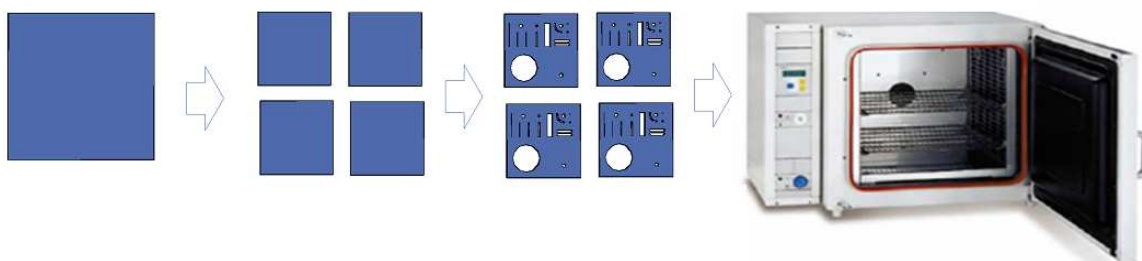
Hlavní nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena zařízení. Tímto způsobem je možné realizovat jemné přesné tvary a dosáhnout dobré ostrosti hran. Rozlišitelnost zařízení se liší podle použitých laserů. Nejvíce využívané jsou YAG lasery a nízkenergetické CO<sub>2</sub> lasery. Použitím nízkenergetického CO<sub>2</sub> laseru pro výrobu otvorů o velikost 50  $\mu\text{m}$  je možné vytvářet až několik tisíc otvorů za sekundu [6], [4].

### **Realizace dutin technologií Jet Vapor Etching (JVE)**

Pro vytváření velmi malých otvorů s průměrem okolo 10  $\mu\text{m}$  je v současné době vyvíjena metoda chemického odleptávání části organického pojiva. Základem této metody je nosný plyn (dusík), který obsahuje rozpouštědlo (acetón). Tento plyn se přes trysku aplikuje na požadované místo, kde dochází k odleptání organického pojiva a jeho odplavení společně se zrný keramického materiálu a skla [6].

#### **2.1.4 Stabilizace LTCC keramiky**

Pro vyrovnání tvaru řezaných hran jednotlivých LTCC pásků slouží operace zvaná stabilizace. Při tomto úkonu jsou jednotlivé již vyřezané pásky vloženy do pece o stanovené teplotě. Tento proces probíhá za podmínek stanovených výrobcem sklo-keramického substrátu např. firma Heraeus udává teplotu 80 °C po dobu 10 minut nebo DuPont 120 °C po dobu 20 – 30 minut v závislosti na velikosti vyřezaných substrátů a jejich viskoelastických vlastnostech [6], [6].

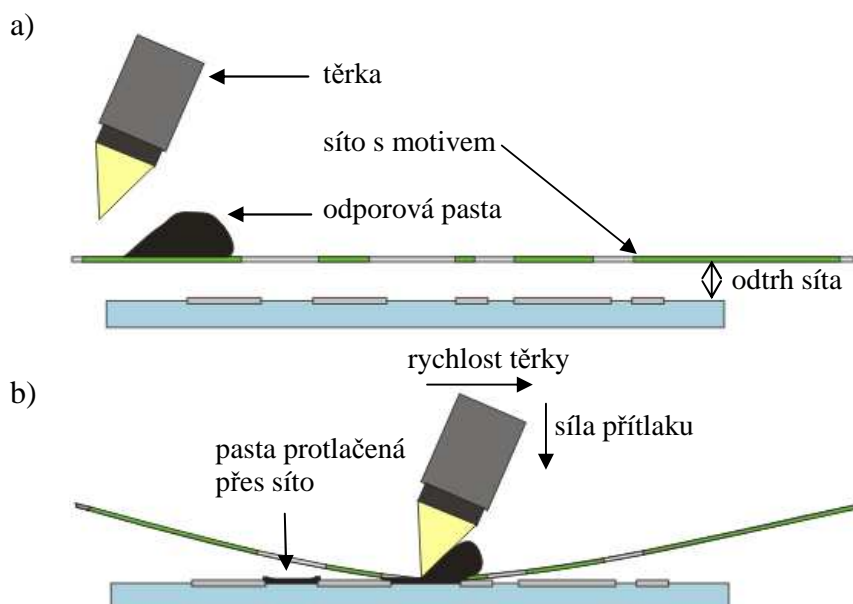


**Obr. 5 :** Stabilizace vyřezaných tvarů v LTCC

### 2.1.5 Vrstvové technologie

Jelikož se požadavky na integraci elektronických prvků neustále zvyšují, vyvstala potřeba nahrazovat klasické elektronické součástky alternativními metodami pro dosažení menších rozměrů. Jako jedna z metod, která je navíc spojena s nízkými výrobními náklady, je využívání tlustovrstvých technologií pro vytváření rezistorů, kapacitorů, induktorů nebo vodivých cest.

Vrstvové technologie jsou charakteristické tloušťkou vrstvy, kterou jsme schopni zrealizovat, a proto rozlišujeme tlustovrstvé a tenkovrstvé technologie. Základní myšlenkou je nanášení definované vrstvy (vodivé, odporové nebo dielektrické) na přesně definované místa povrchu substrátu. Tlustovrstvé technologie, které jsou využity během výroby LTCC, jsou nanášeny metodou šablonového tisku, sítotisku nebo dispenzerem [15]. Nejčastěji používanou metodou aplikace tlusté vrstvy na povrch LTCC je sítotisk. Proces nanesení pasty sítotiskem je zobrazen na obrázku 6.



**Obr. 6 :** Nanášení pasty metodou sítotisku a) výchozí pozice b) proces tisku

Výhoda, kterou nabízí technologie LTCC, vyvstává ze spojení tenkých pásků sklokeramického materiálu, na kterém mohou být nanесeny různé motivy a následné spojení v jednu vícevrstvou funkční strukturu. Vodivé propojení mezi jednotlivými vrstvami je realizováno pomocí prokovů.

### 2.1.6 Sesazení a laminace vrstev

Sesazení a následná laminace vrstev je kritická část výrobního procesu LTCC struktury. Kvalita laminace rozhoduje o výsledné přesnosti celé struktury. Proto by měla být věnována

pozornost této problematice již v etapě návrhu jednotlivých struktur. Optimální řešení je vytvoření otvorů sloužících pro vzájemné sesazení jednotlivých vrstev. Toto sesazení lze provádět buď opticky nebo pomocí laminační masky s pozičními kolíky, na které se jednotlivé vrstvy nasazují. Po této operaci následuje laminace.

Laminační procesy slouží ke spojení LTCC pásků do jedné struktury. Rozlišují se podle podmínek, za kterých probíhají:

- **Termokompresní laminace** – spojování pásků působením teploty a tlaku;
- **Chemická laminace** – za použití nízké teploty, tlaku a organických rozpouštědel;
- **Nízkotlaká laminace za studena** – za použití adhezivní vrstvy, nízké teploty a tlaku;

Podrobněji jsou tyto metody probrány v kapitole 3, která je věnována běžně využívaným i novým laminačním technikám.

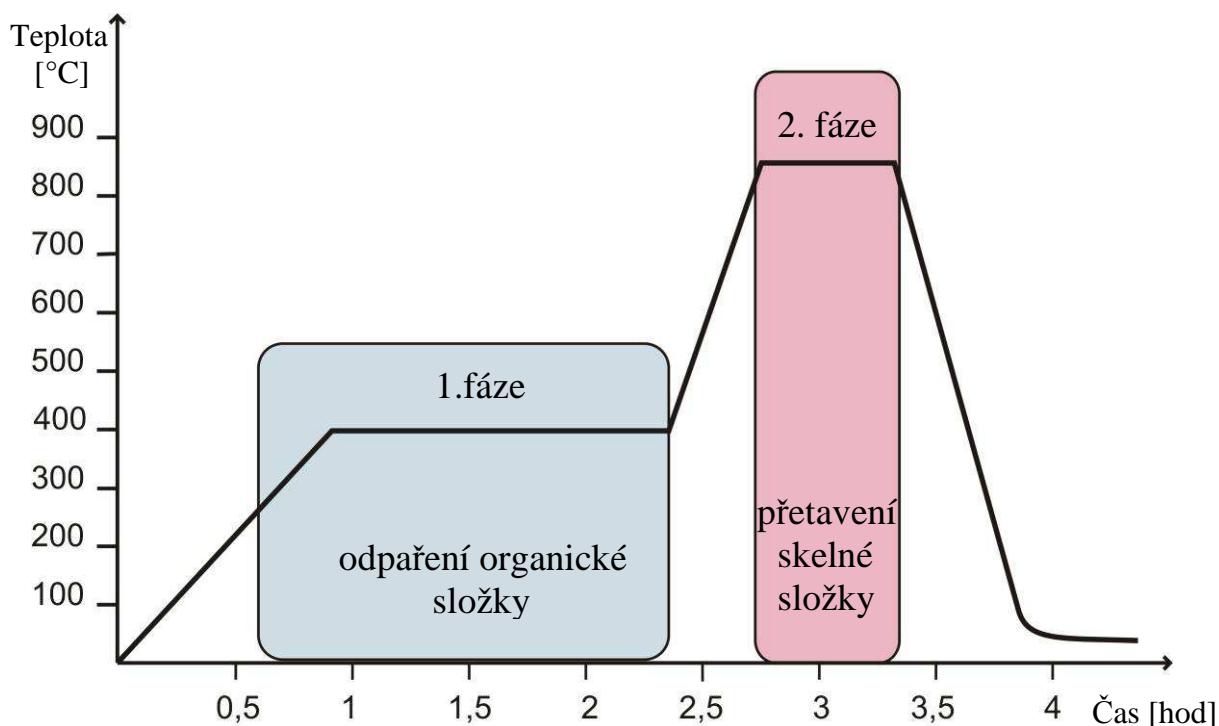
### **2.1.7 Výpal**

Laminované vrstvy, které mohou obsahovat prvky zhotovené tlustovrstvou technologií, jsou vypalovány v pecích s homogenní cirkulací vzduchu. Dochází zde k přechodu z nevypáleného flexibilního stavu do pevného stavu sklo-keramické struktury. Tento proces je založen na současném odpařování organických materiálů obsažených v nevypálených LTCC páscích a vypalování tlustovrstvých past, které mohou být při výrobním procesu použity. Jedná se o klíčový proces během výroby LTCC struktur. Profil výpalu se dělí na dvě části: fáze vyhoření organických látek a fáze výpalu [6].

Vyhoření organických látek v první fázi je usnadněno oxidací organického nosiče v pásce a v pastách za teploty, která je vyšší než teplota varu pojiva (obvykle 450 – 500 °C). Pokud nejsou parametry výpalu správně nastaveny, může být proces odpařování organických materiálů agresivní a mít za následek vznik delaminace, formujících se bublin v oblasti vytvořených pasivních prvků, zvýšenou lokální pórovitost atd.. Parametr, který je rovněž nutno zohlednit, je doba potřebná k úplnému odstranění pojiva, podle které musí být do profilu vnesena příslušná prodleva [6], [6]. Toho se může docílit několika způsoby:

- Vystavení vypalované struktury konstantní teplotě 400 – 450 °C, přičemž je důležitý parametr náběhu teploty, který musí být pomalý (2 až 5 °C/min);
- Vystavení pomalému nárůstu teploty až na teplotu 450 °C, kde nedochází k setrvání na konstantní teplotě. Pokud není tento nárůst dostatečně pomalý, může dojít ke vzniku bublin a prasklin v důsledku velké tenze par vystupujících ze struktury;

Fáze výpalu probíhá za teplot okolo 850 – 900 °C po dobu 10 až 30 minut. Typický vypalovací profil s vyznačenými důležitými oblastmi je zobrazen na obrázku 7.



**Obr. 7 :** Typický vypalovací profil LTCC

V druhé fázi výpalu probíhá nárůst teploty s rychlostí 5 až 10 °C za minutu. Při dosažení teploty skelného přechodu částic skla ve struktuře LTCC dochází k jejich vzájemnému spékání. Sklo se roztaví, čímž obklopí částice korundu a vytvoří kompaktní sklo-keramický materiál. Během roztavení dojde k přeskupení zrn korundové keramiky, což má za následek změnu rozměrů struktury. Tyto změny jsou nejvíce ovlivněny pohybem velkých zrn, zatímco malé způsobují pórovitost vypálené keramiky [6]. Výsledkem procesu výpalu je vytvoření pevné sklo-keramické struktury.



### 3 Laminace

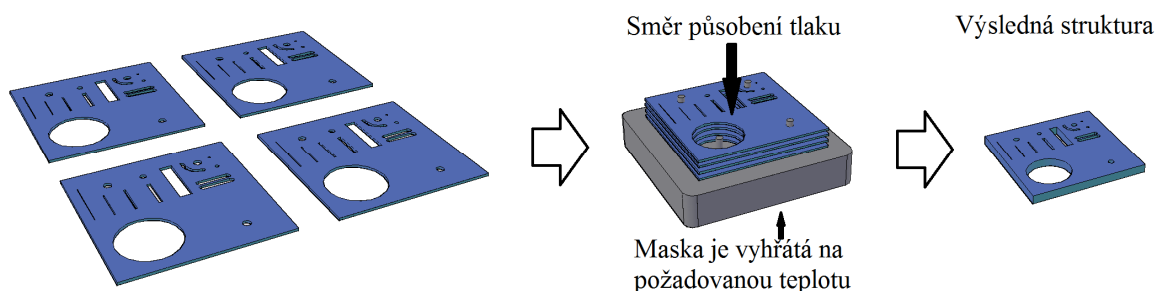
Laminací vrstev rozumíme proces, při němž dochází k navrstvení pásků LTCC s následným spojením v jednolitou strukturu ať už termokompresními metodami, nebo chemickou cestou. Výběr metody záleží na parametrech laminované struktury.

#### 3.1 Termokompresní laminace

Mezi nejrozšířenější metody laminace keramiky LTCC patří procesy založeny na působení teploty a tlaku. Během procesu se dosahuje teploty do 80 °C a tlaků 10 - 30 MPa po dobu 5 - 10 minut [3]. Mezi výhody této metody patří možnost laminování velkého počtu vrstev, jejich pevné spojení a vhodnost metody pro pouzdření. Pokud ovšem obsahuje pásek LTCC jemnou strukturu a dutiny, mohou během laminace vznikat nepřesnosti a deformace. Jako příklad takto vzniklé deformace může být zhroucení stěn u dutin ve struktuře. Jednou z možností jak tomu zabránit, může být vyplnění dutiny materiálem, který bude napomáhat udržení jejího tvaru během laminace a vypaří se při procesu výpalu (např. grafit) [13].

##### 3.1.1 Uniaxiální laminace

Tato metoda zajišťuje působení tlaku pouze ze dvou směrů. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších termokompresních metod díky malé náročnosti na vybavení potřebné pro laminační proces. Nízká náročnost a dostačující výsledná kvalita procesu je dosažena pouze u struktur tvořených malým počtem laminovaných pásků. S rostoucím počtem vrstev dochází ke snižování ostrosti hran vytvářené struktury. Je to metoda používaná pro tvorbu uzavřených dutin.



Obr. 8 : Příklad uniaxiální laminace

##### 3.1.2 Isostatická laminace

Jedná se o proces probíhající za působení tlaku ve všech směrech. Tato metoda se vyznačuje vysokou kvalitou výsledné struktury, ale zároveň vysokými nároky na vybavení. Je to dáno procesem všesměrové laminace, která probíhá v prostředí (nejčastěji tvořeném kapalinou) umožňujícím rovnoměrné rozložení působícího tlaku na povrch laminované

struktury. Předností isostatické laminace je možnost tvorby vícevrstvých struktur o tloušťkách nad 20 vrstev při zachování vysoké ostrosti hran [2].

### **3.2 Jednorázová a postupná laminace**

Rozdělení laminárních metod z pohledu počtů cyklů laminace:

- *Jednorázová laminace* - je metoda zahrnující laminaci celé struktury během jednoho cyklu. Je vhodná pro jednodušší struktury s nižším počtem vrstev, neobsahující velké množství dutin nebo mikro-kanálků. Při laminaci složitějších struktur může dojít během procesu sesazení k deformacím nebo ke zhroucení stěn dutin u struktur s vyšším počtem vrstev.
- *Postupná laminace* - je vhodná pro složitější struktury. Proces laminace je rozdělen do předem zvoleného počtu laminačních cyklů. Při každém z těchto cyklů dojde k sublaminaci zvolených vrstev. Před proběhnutím poslední etapy je výsledná struktura tvořena určitým počtem bloků (slaminovaných vrstev), jejichž vzájemnou laminací vytvoříme výslednou strukturu [14], [2].

### **3.3 Nové způsoby laminace LTCC keramiky**

Vzhledem ke snaze docílit nízké míry deformací vzniklých při laminaci jednotlivých vrstev LTCC, byly vyvinuty metody založené na nízkém tlaku a teplotě. Oproti termokompresním metodám zde nedochází ke zvyšování teploty laminované struktury a tlak potřebný pro proces se pohybuje do 5 MPa [6], [6], [15], [3]. Díky těmto parametrům zde nedochází k deformacím jemných struktur. Jedná se o metody:

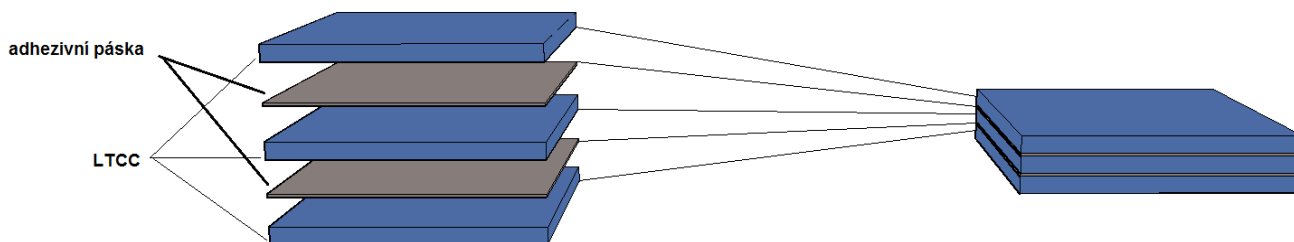
- Studená nízkotlaká laminace (CLPL - *Cold Low Pressure Lamination*);
- Studená chemická laminace (CCL - *Cold Chemical Lamination*);

U metody CCL jsou využity reakce organických rozpouštědel s keramikou LTCC. Metoda CLPL využívá kapilárních sil vzniklých v roztavené adhezivní vrstvě, která tvoří dočasné pojivo mezi keramickými pásky před výpalem.

#### **3.3.1 Studená nízkotlaká laminace (CLPL)**

Při této metodě zajišťuje dočasné spojení vrstev keramiky speciální oboustranná adhezivní páska nebo nanesená vrstva. Tento proces je realizován za působení pokojové teploty a nízkého tlaku. Během výpalu se adhezivní vrstva roztaví a působením kapilárních sil spojuje LTCC vrstvy dohromady a umožňuje přeskupení částic na rozhraní vrstev. Nevýhodou této metody je velké množství kapaliny vzniklé roztavením adhezivní pásky. Množství této kapaliny je natolik značné, že při jejím odpařování dochází k deformacím

v podobě výdutí a prasklin. Proto je tato metoda vhodná spíše pro otevřené kanálky a dutiny [14], [13], [6].



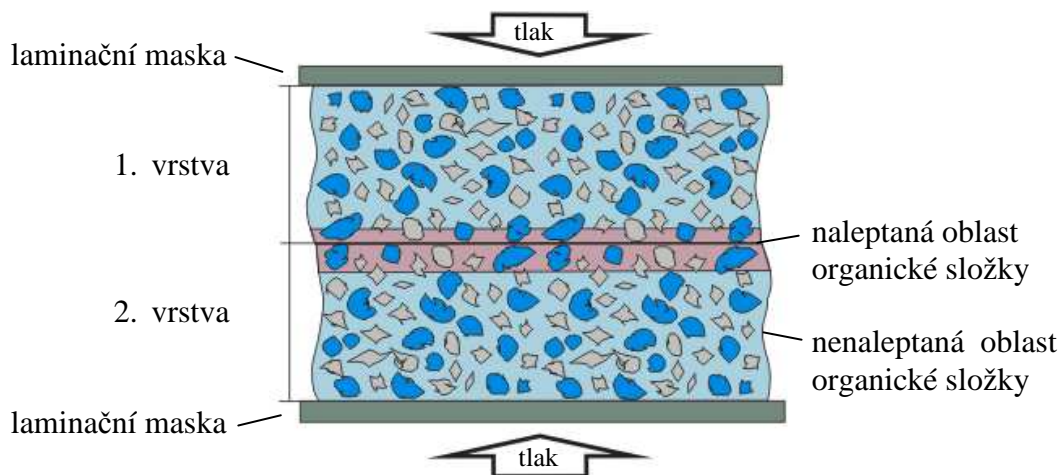
**Obr. 9 :** Princip studené nízkotlaké laminace CLPL

Nevýhoda vycházející z rozkladu pásky byla eliminována novou metodou vynalezenou A. Roosenem. Dochází k natištění adhezivní vrstvy na akrylové bázi přímo na LTCC substrát. Nahrazení adhezivní pásky filmem z jednoho materiálu poskytuje lepší výsledky laminace resp. hranice jednotlivých pásky nejsou po laminaci rozpoznatelné. Nová metoda je spojena s nevýhodou v podobě extrémní citlivosti chemikálie na prach [3].

Další metodou, opět popsanou A. Roosenem, bylo použití adhezivního filmu přeneseného na povrch keramiky pomocí přenosové pásky. Tato metoda odstraňuje problém s citlivostí na prach [3].

### 3.3.2 Studená chemická laminace (CCL)

Další metoda spojování vrstev keramiky LTCC chemickou cestou je založena na depozici organického rozpouštědla na povrch LTCC pásky. Působením rozpouštědla dojde ke změknutí povrchu pásky resp. narušení organického pojiva, na který se následně položí další vrstva laminované struktury. Po dosažení požadovaného počtu vrstev nastane proces laminace, který probíhá za pokojové teploty a nízkého tlaku (0,5 – 5 MPa) [14], [13], [6]. Princip metody CCL je zobrazen na obrázku 10.



**Obr. 10 :** Princip studené chemické laminace CCL

Vzájemné spojování jednotlivých vrstev je založeno na částečném naleptání povrchů LTCC vrstev a jejich vzájemnému spojení za současného působení nízkého tlaku. Dochází ke spojení organických pojiv jednotlivých pásků a vzniku jednotné struktury. Proces CCL poskytuje výhody např. v podobě možnosti vytvářet dutiny velkých rozměrů bez deformací. Nicméně jsou zde i nevýhody, jako problematika nanesení homogenní vrstvy na keramický pásek, opakovatelnost naneseného množství použitého rozpouštědla a změna parametrů pasivních prvků.

Nanesená vrstva musí mít tloušťku odpovídající agresivitě chemikálie využitě během laminace. Pokud je tato vrstva moc tlustá, dochází k deformacím struktury vlivem velkého množství vystupujících par vzniklých odpařováním rozpouštědla obdobně jako u metody CLPL. Navíc může docházet k nadměrnému změknutí jednotlivých pásků, a tím dojde ke ztrátě výsledné ostrosti struktury. Naopak pokud je naneseného rozpouštědla příliš málo, tak vytvořené spojení mezi vrstvami není dostatečně silné a ve struktuře se objevují místa s mezivrstvou delaminací zapříčiněnou nedostatečným naleptáním povrchu [14], [13].

Ve srovnání s metodou CLPL zavedenou A. Roosenem, umožňuje laminace za použití organických rozpouštědel selektivní depozici s využitím dostupných technologií a také rychlejší výrobu a nižší investiční náklady. Výhody laminování pomocí organických rozpouštědel lze shrnout takto [3], [4]:

- Vynikající funkce lepení a snadné sesazení pásků keramiky za pokojové teploty;
- Nízká teplota a procesní tlak;
- Jednoduchý způsob nanášení, který umožňuje tvorbu složitých tvarů;
- Nevzniká potřeba nového zařízení pro realizaci;

V praxi byla metoda chemické laminace za použití rozpouštědel naleptávajících povrch pásky testována s různými druhy chemikálií. Některé z metod jsou popsány níže.

### **CCL založená na polypropylen glykolu (PPG)**

Tato metoda byla popsána již v roce 2001 a zakládá se na chemikálii složené z toluenu, ethanolu a polypropylen glykolu. Po nanesení PPG pomocí pěnového válečku se vytvoří tenký film z rozpouštědla na povrchu keramiky. PPG se během výpalu pomalu vypaří. Hlavní a zásadní nevýhodou je vysoká agresivita toluenu, která značně narušuje keramické pásky [3].

### **CCL založená na přírodním medu**

Hlavní myšlenkou tohoto procesu je použití organické kapaliny jako prostředku pro slepení jednotlivých vrstev LTCC pásků během laminace. Na základě tohoto požadavku byl

vybrán med a jeho složky (glukóza, fruktóza, atd.). Téměř u všech vzorků proběhl proces laminace s dobrými výsledky. Přechod mezi jednotlivými vrstvami byl k nerozeznání od struktury jednotlivých LTCC vrstev [13], [6].

### **CCL založená na terpineolu**

Terpineol byl zvolen jako jedna z nejvíce důležitých složek organických pojiv u keramik LTCC (např. DuPont DP 951). Testy s tímto málo agresivním rozpouštědlem proběhly v roce 2006-2007. Terpineol byl zvolen na základě rychlých testů, během kterých byly současně aplikovány chemikálie jako:

**Aceton** - projevil se jako nevhodný, jelikož okamžitě rozpustil keramickou pásku;

**Isopropylalkohol** - nebyl tak silný jako aceton, ale vykazoval nižší lepící efekt než terpineol. Navíc znemožňoval sejmutí pásky, pokud nastala chyba během procesu laminace a to i v malém množství;

**Deionizovaná voda** - použití DI vody se jeví jako neúčinné, jelikož povrch keramické pásky se ukázal do značné míry hydrofobní [3];

V testech byly použity dokonce i lidské sliny. Ty vykazovaly podobné vlastnosti šíření po povrchu LTCC pásky jako isopropylalkohol, ale nepřilíhly se vstřebávaly do struktury LTCC podobně jako tomu bylo u DI vody. Pochopitelné problémy vyplývaly z reprodukovatelnosti a produkce dostatečného množství, proto nebyly při výsledných testech brány v potaz. Počítalo se i s testováním lidského potu, k těm nedošlo z obdobných důvodů, jako tomu bylo u slin [3].

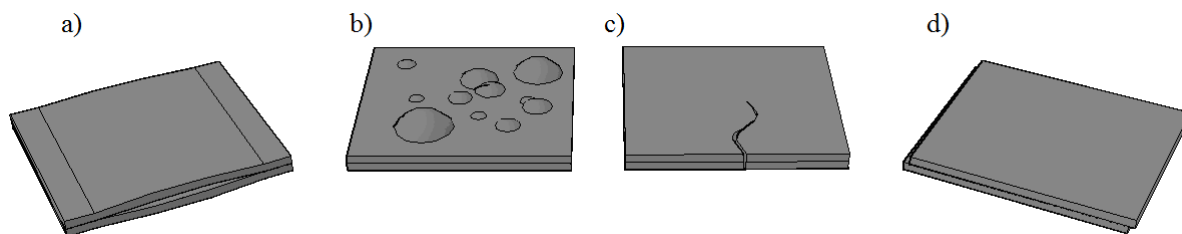
### **CCL založená na komerčních organických rozpouštědlech**

Metoda D. Jurkówa a L. Golonky, členů vědeckého týmu z Vratislavské univerzity techniky v Polsku, popsaná v roce 2008, je založená na komerčních rozpouštědlech, které byly nanášeny na povrch sklo-keramických pásek metodou sítotisku a pomocí štětce.

Povrch laminovaných pásek byl pokryt tenkým filmem chemikálie přes síto 450 mesh. Byly použity různé druhy rozpouštědel a acetonů. Následná analýza procesu laminace u jednotlivých vzorků ukázala jako nejvhodnější rozpouštědlo pro laminaci DuPont 4553. Proces probíhal za tlaku 0,5 MPa, při pokojové teplotě a vykazoval dobré výsledky pro druhy LTCC pásek jako ESL 41020, DP 951AT, DP 943, Heraeus HL 800 a HL 2000 [4]. Na základě těchto poznatků byla zvolena pro testování keramika HL 2000 a mezi chemikálie zařazeno rozpouštědlo DuPont 4553.

### 3.4 Vznik defektů ve struktuře vlivem laminace

Jedna z nejvýznamnějších poruch, která se vyskytuje během procesu laminace je tzv. delaminace. Pokud vzniknou vady během spojování jednotlivých vrstev, jako je např. špatné spojení jednotlivých vrstev v objemu laminované struktury, může se tato lokální porucha stát výchozím bodem pro delaminaci mezi jednotlivými vrstvami.



**Obr. 11 :** a) Delaminace LTCC pásků, b) bubliny, c) vertikální praskliny, d) vzájemné posunutí vrstev

Na obrázku 9 jsou znázorněny typické druhy delaminace. Mezivrstevová delaminace a) může vzniknout během procesu laminace přítomností nečistot na laminovaných plochách nebo špatným nastavením vstupních parametrů procesu (tlak, teplota, čas popř. množství rozpouštědla). Bubliny nebo výdutě společně s prasklinami mohou vzniknout při nadměrném odpařování rozpouštědel nebo adhezivních pásků ze struktury LTCC během procesu vypalování, nebo jednoduše špatně nastaveným vypalovacím profilem (např. strmý náběh teploty). Vertikální praskliny se mohou utvářet během výpalu, ale jejich příčina je spjata s laminací struktury. K této deformaci dochází vlivem rozdílného pnutí uvnitř struktury vlivem působení tepla během výpalu. Rozdílné pnutí je následkem špatného rozložení tlaku během laminárního procesu, které zapříčinilo vyšší hustotu keramiky v určitých oblastech struktury [3].

Dalšími defekty, které se ve struktuře mohou objevit, jsou zapříčiněny rozpouštědly během laminace metodou CCL. Jak již bylo uvedeno výše, u této metody dochází k naleptávání povrchu LTCC pásku. Pokud je doba působení rozpouštědla příliš dlouhá, může dojít k nadměrnému změknutí sklo-keramického pásku a ztrátě ostrosti výsledné struktury. Tento defekt je zapříčiněn přílišným změkčením organické složky LTCC resp. velkou hloubkou naleptané vrstvy. Obdobný problém je spojen s použitím rozpouštědla s příliš velkou agresivitou, při kterém dochází k nadměrnému změknutí v poměrně krátkém čase. V případě, kdy je aplikovaného rozpouštědla malé množství (nesmočí celý povrch pásky) nebo je jeho agresivita vůči organické složce malá, dochází po výpalu k oblastem delaminace. Vlivy různých organických rozpouštědel budou blíže popsány v praktické části.

## 4 Praktická část

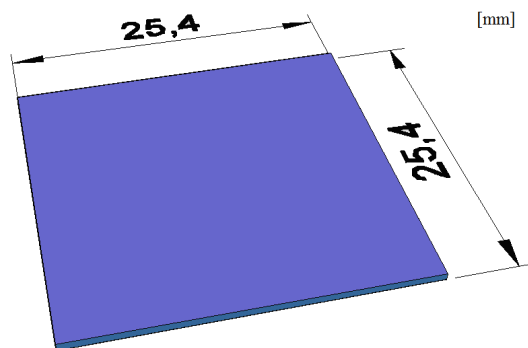
První část diplomové práce je věnovaná výběru laminačních metod, které budou během jednotlivých zkoušek realizovány. Dále se zabývá návrhem vhodného testovacího vzorku. Snahou je docílit takového vzorku, jehož motiv ponese prvky v praxi nejčastěji realizovaných struktur. Návrh byl vytvořen s ohledem na metodiku finální kontroly, které bude během vyhodnocování podléhat. Výběr výsledné kontrolní metody byl spojen s charakterem sledovaných parametrů a s možností jednoduché realizace z důvodu velkého počtu vyhodnocovaných vzorků.

### 4.1 Návrh testovaných struktur

Před začátkem testů v rámci této diplomové práce nebyly provedeny žádné testy metody CCL na ústavu Mikroelektroniky a podle dostupné literatury ani jinde v ČR. Cizojazyčná literatura uvádí možnost využití CCL jako metodu laminace, kterou je možné vytvářet vícevrstvé struktury a popisuje některé z výsledků, ovšem samotný postup a problematika s ním spojená již uvedena není. Vzhledem k této skutečnosti bylo nutné zjistit vliv rozpouštědel na organické pojiva obsažená ve sklo-keramickém pásku a vliv následné laminace na vícevrstvou LTCC strukturu. Z tohoto důvodu byl navržen pomocný vzorek, který sloužil ke sledování změn vlastností LTCC pásků a vlastností rozpouštědel po nanesení na jeho povrch.

#### 4.1.1 Pomocný vzorek

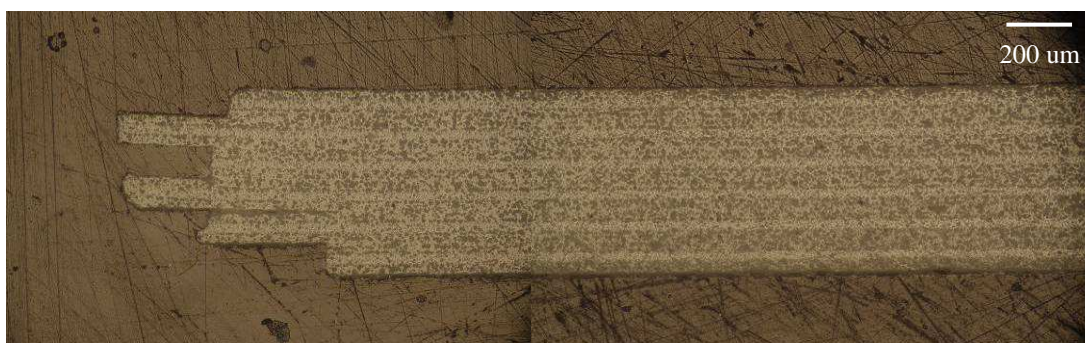
Pomocný vzorek byl vyroben z LTCC keramiky HL 2000 od firmy Heraeus. Vzorek neobsahoval motiv a rozměry byly stanoveny na 25,4 x 25,4 mm, aby nedocházelo ke vzniku nevyužitelných zbytků při dělení jednotlivých přířezů dodávaných výrobcem. Absence motivu byla důležitá z pohledu zjištění změn vlastností sklo-keramického pásku vlivem aplikace rozpouštědla, pro dobrou optickou kontrolu kvality tisku rozpouštědla a sledování jeho chování v čase. Znázornění pomocného vzorku je na obrázku 12.



Obr. 12 : Vzorek pro první testování reakce LTCC na změkčovadla

Bylo zjištěno, že agresivita testovaných rozpouštědel (DuPont 4553 a HVS 100) je optimální a pokud je vzorek po laminaci zasušen, tak nedochází k nadměrnému měknutí. Zasušení je důležitý proces, při kterém dochází k odpaření přebytečných rozpouštědel ze struktury. Takto se zabrání deformacím vzniklých při i po laminaci kvůli nadměrnému změkčení organické složky LTCC keramického pásu.

Pomocný vzorek byl směrodatný pro návrh dalšího finálního vzorku (hlavní testovací vzorek). Sledovány byly změny vlastností keramiky jako např. míra změknutí po nanesení rozpouštědla v závislosti na čase. Podle teoretického předpokladu byla očekávána nejvíce změkčená oblast na okrajích výsledné struktury. Tato domněnka, která vycházela z práce Y.Fourniera [4], se ale v našem případě nepotvrdila. Naopak díky drobným nesrovnalostem při sesazení byly sledovány na okraji struktury drobné zcela nezdeformované detaily viz. obrázek 13. Tyto přesahy jednotlivých pásků by s velkou pravděpodobností nebyly zachovány při klasické termokompresní laminaci. Došlo by k jejich prohnutí či ohnutí působením zvýšené teploty.

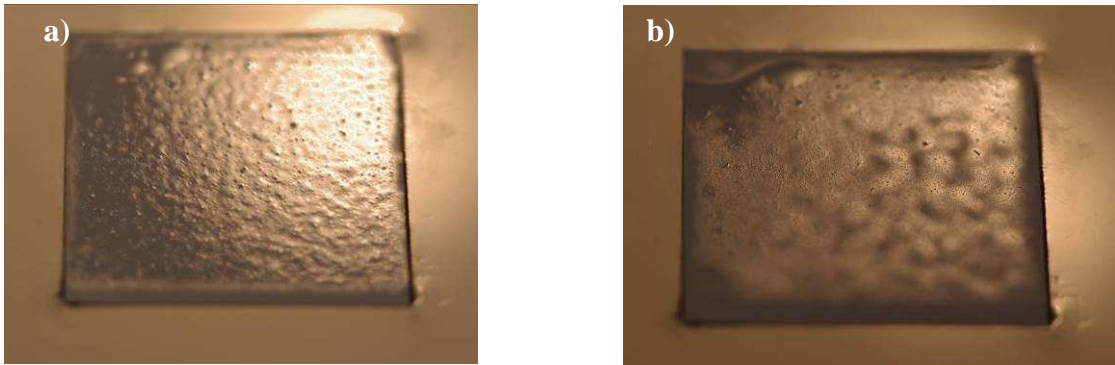


**Obr. 13 :** Struktura složená z 6. vrstev

Odpařování rozpouštědla z povrchu a z toho vyplývající rychlost s jakou musí laminace probíhat byl další zkoumaný parametr. Bylo důležité určit rychlost laminace, aby se zabránilo vzniku delaminovaných oblastí daných nedostatečným smočením změkčovadlem. Už při nanášení byly patrné rozdíly ve viskozitě jednotlivých rozpouštědel. Tato skutečnost předurčuje rozdíl v rychlosti jejich odpařování a vlastnostech při tisku. Vliv časové prodlevy na nanesenou vrstvu je zobrazen na obrázku 14.

Ze všech sledovaných parametrů bylo zřejmé, že ideální metoda nanášení bude pro jednotlivá rozpouštědla odlišná. Proto bylo v rámci diplomové práce zvoleno více metod depozice rozpouštědel, které budou uvedeny a jejich postup popsán níže.



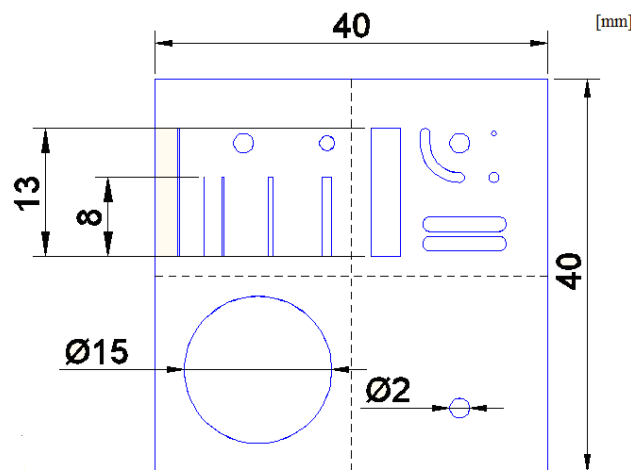


**Obr. 14 :** Nanesená vrstva rozpouštědla a) ihned po nanesení, b) po 120 sekundách (Heraeus HVS 100)

#### 4.1.2 Hlavní testovací vzorek

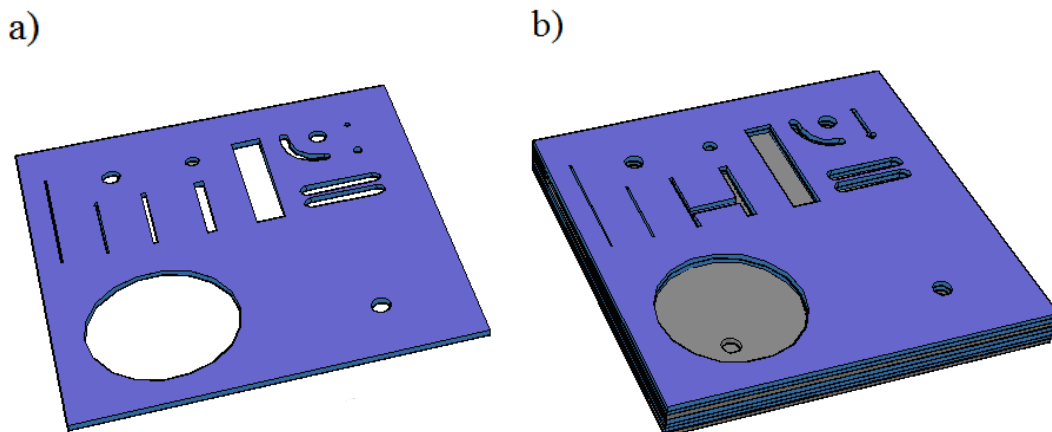
Pro testování vlivu CCL byla zvolena keramika od firmy Heraeus a po nalezení optimální metody nanášení rozpouštědel byl proveden test i na keramice od firmy DuPont. Rozměry přířezu pro zhotovení hlavního testovacího vzorku jsou 40 x 40 mm. Daný rozměr se zvolil s ohledem na velikosti dostupných laminačních masek a kontrolní metodu, kterou byl mikrovýbrus.

Testovací struktura obsahuje mikro-kanálky (o šířkách 200, 500 a 1000  $\mu\text{m}$ ) využívané většinou pro chlazení struktur LTCC v tzv. mikro-fluidních systémech. Kruhová dutina zde zastupuje vnitřní dutinu pro tvorbu kondenzátorů, které jsou používány např. v senzorech tlaku a obdélníkové dutiny používané např. pro "utopení" součástek. Takto vyřezaný LTCC pásek byl pokládán v několika vrstvách. Jednotlivé vzorky se vytvářely s různým počtem vrstev, aby se ukázala kvalita CCL laminace pro tvorbu vícevrstvé struktury s nízkým i vyšším počtem vrstev. Návrh testovacího motivu je zobrazen na obrázku 15.



**Obr. 15 :** Návrh hlavního testovacího motivu

Na obrázku 16 a) je znázorněna vrstva LTCC s vyřezaným testovacím motivem. Obrázek b) znázorňuje testovací strukturu, která je tvořena sedmi vrstvami, z nichž 2 jsou bez výřezů dutin a tvoří základnu pro vytvářenou strukturu. Další 5 vrstev je tvořeno sklokeramickými pásky s vyřezaným testovacím motivem.



**Obr. 16 :** Testovací struktura a) Vrstva s vyřezaným motivem, b) vytváření vícevrstvé struktury

#### **4.2 Návrh metodiky laminace struktur**

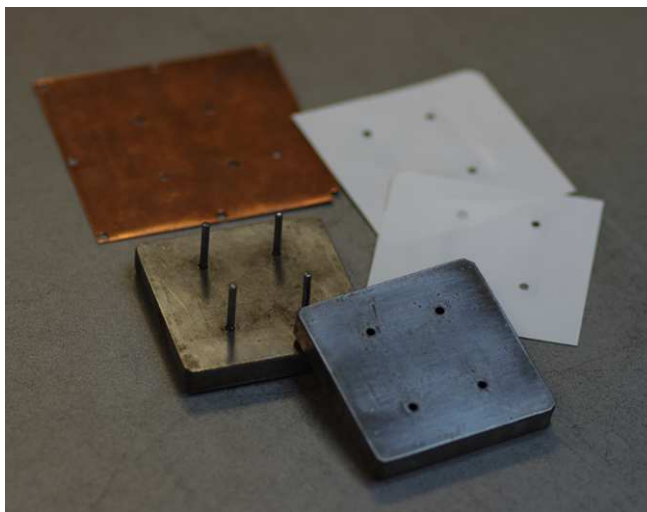
Proces chemické laminace probíhal za použití chemikálií DuPont 4553 a Heraeus HVS 100. Během závěrečných testů, kdy již byl nalezen vhodný způsob nanášení jednotlivých rozpouštědel na keramiku Heraeus HL 2000, byla přidána k otestování i keramika DuPont 951. Jako hlavní cíle práce jsou stanoveny tyto:

- Eliminace delaminací ve struktuře;
- Zjištění vhodného způsobu nanášení jednotlivých rozpouštědel;
- Nalezení optimálního množství a typu použitého rozpouštědla;
- Prozkoumání vlivu rozdílných tlaků na kvalitu laminace;

Laminace byla provedena CCL metodou a termokompresní metodou, která sloužila jako reference. Způsoby nanášení byly zvoleny s ohledem na vybavení laboratoře a jako vyhovující se jevíly následující:

- Sítotiskový poloautomat;
- Váleček s absorpční vrstvou;
- Jemný štěteček;

Pro termokompresní metodu se použila laminační maska o rozměrech 52 x 52 mm v níž je vložena měděná manipulační vložka zabraňující prohýbání struktury během vyjmutí vzorku po laminačním procesu. Mylarová fólie zamezuje během lisování přilepení LTCC materiálu k povrchu masky a zároveň usnadňuje manipulaci se vzorkem. Sestava pro laminaci LTCC struktury je zobrazena na obrázku 17.



**Obr. 17 :** Sestava pro termokompresní laminaci

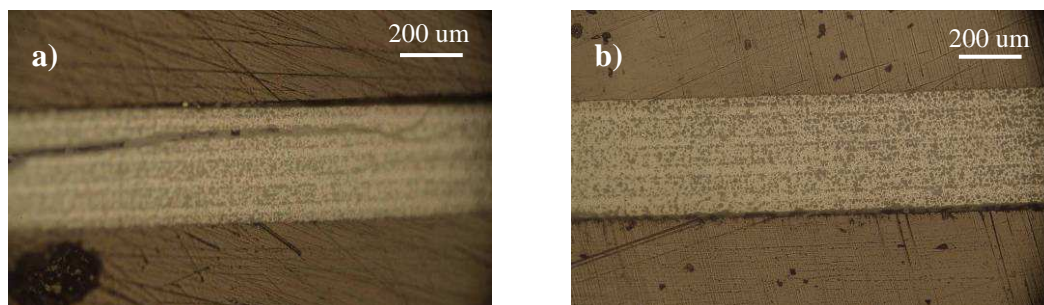
Pro CCL laminaci nemohla být maska použita jen v případě síťotiskového poloautomatu. Vzhledem k jejím rozměrům by se nevešla mezi síto a stolek, navíc by přes poziční kolíky nešlo tisknout na povrch LTCC pásky. V ostatních případech byla využita právě kvůli kolíkům pro sesazení, které dodaly výsledné struktuře lepší přesnost.

### **4.3 Metodika vyhodnocování výsledků**

První vzorky byly laminovány, vypáleny a po výpalu umístěny do forem pro zalití dentakrylem. Tento postup se ukázal jako nevhodný, protože některé roviny řezu byly příliš vzdálené od kraje a mechanické obrušování zabralo mnoho času. Proběhly pokusy o rozřezání struktur diamantovým kotoučem, jeho účinnost však byla destruktivní. Proto došlo k inovaci postupu a sice přidání etapy nařezání LTCC vzorků před jejich výpalem pomocí YAG laseru. Takto připravené vzorky byly po výpalu rozděleny rozlomením a následně vyhodnoceny.

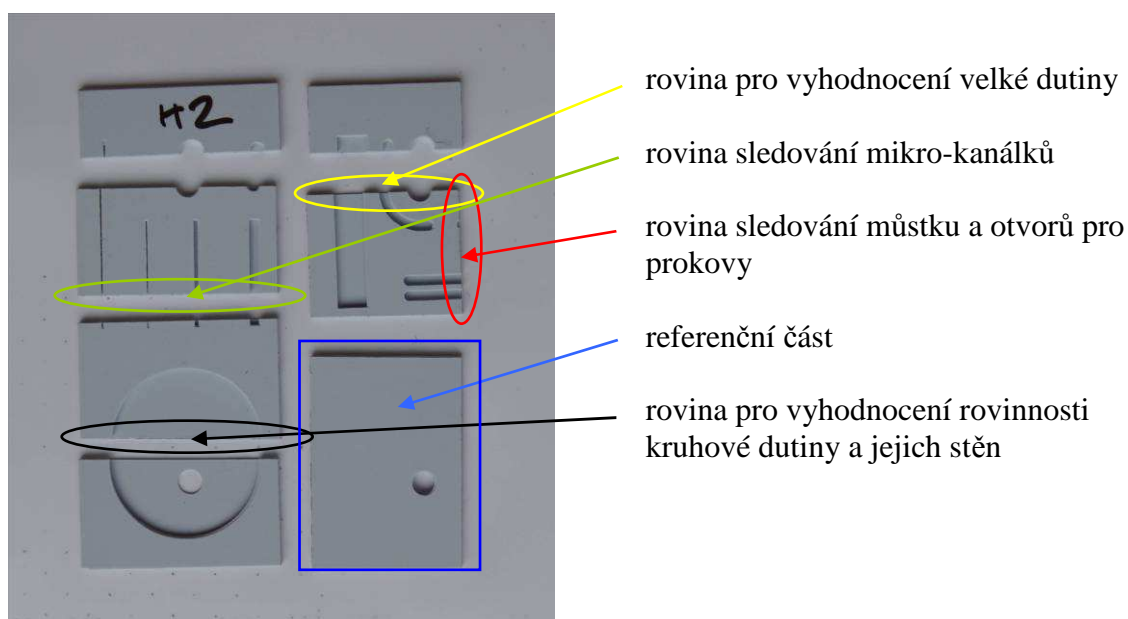
#### **4.3.1 Dělení sklo-keramického substrátu**

Jak již bylo zmíněno, první problémy nastaly s rozřezáním vzorku po jeho zalití dentakrylem. K požadované rovině řezu, která byla cca v půlce vzorku, bylo nejsnazší cestou rozřezání vzorku řezným kotoučem. Ovšem vysoké mechanické namáhání a rázy v průběhu řezání zapříčinily, že vypálená LTCC struktura popraskala podél celé roviny řezu viz. obrázek 18 a).



**Obr. 18 :** Řez strukturou a) rozpraskání struktury vlivem řezání diamantovým kotoučem, b) řez laserem

Tato skutečnost vedla k úpravě postupu a sice o naříznutí vzorku YAG laserem v rovinách požadovaných pro mikrovýbrus. Přidání etapy nařezání napomohlo ke snazšímu rozdělení vzorku po výpalu a vedlo k několika výhodám. První výhodou této úpravy procesu spočívá v rychlosti s jakou jsme schopni se dostat na požadovanou rovinu řezu. Další neoddiskutovatelnou výhodou je možnost inspekce rovin řezu bez nutnosti zalití dentakrylem. V neposlední řadě přináší výhodou v podobě velké variability řezů, díky které je možno nařezat pro vyhodnocení různé části substrátu v závislosti na potřebě. Rozřezání na požadované části je zobrazeno na obrázku 19.



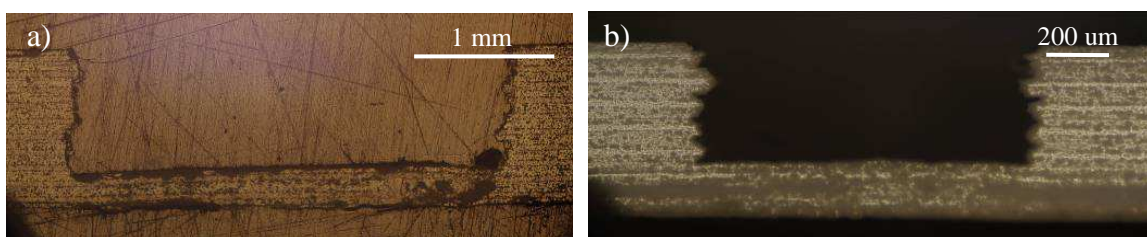
**Obr. 19 :** Rozdělení struktury hlavního testovacího vzorku

#### 4.3.2 Vyhodnocení vzorků

Kontrola vzorků byla zpočátku prováděna metodou mikrovýbrusu. Tato metoda byla vybrána s ohledem na vybavení laboratoří a byla sledována dostatečnou z hlediska stanovených cílů. Proto bylo z pohledu vyhodnocení kritické správné rozložení jednotlivých prvků během návrhu struktury. Tím bylo dosaženo zobrazení více prvků v jedné rovině řezu. Z důvodu

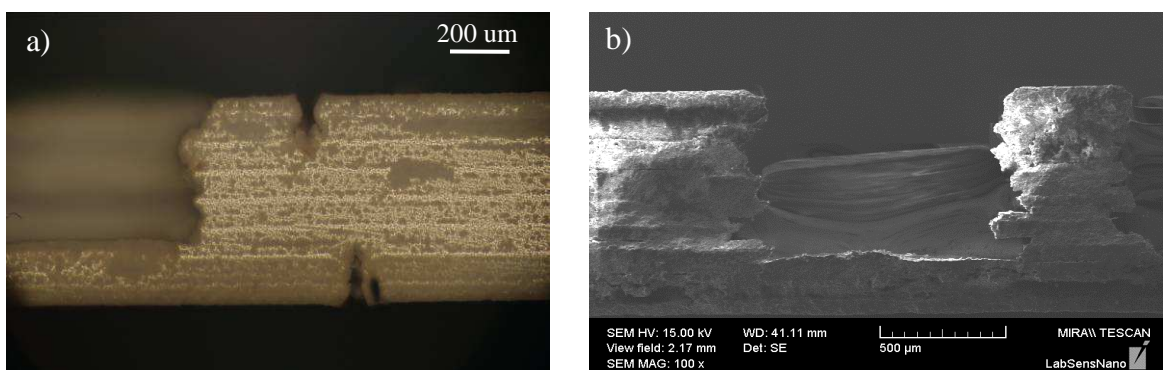
vyšší efektivity vyhodnocování, bylo do jedné formy pro zalití umístěno více vzorků. Při vyhodnocování se ukázalo, že během broušení zalitého sklo-keramického substrátu dochází k odlomení hran u jemných motivů a vzniku míst připomínajících mezivrstvou delaminaci. Ve skutečnosti se jedná o lokality, kde došlo k odtržení jednotlivých vrstev vlivem značného smykového tření vznikajícího během broušení. Tato místa vznikala zpravidla v nejtěsnější části substrátu resp. v prvních dvou vrstvách, které tvořily dno dutin. Velikost síly působící na vzorek během broušení, od které se odvíjí míra tření, byla nezbytná vzhledem k velké ploše broušeného odlitku.

Aby se zabránilo deformacím obdobného charakteru, muselo dojít ke snížení tření působícího na broušenou strukturu. Toho se dalo dosáhnout snížením drsnosti brusného smirkového papíru a snížením působící přítláčkové síly. Současně bylo nutno zmenšit broušenou plochu, proto se vypálené a rozdělené vzorky v konečné fázi již nezalévaly do dentakrylu a byly broušeny samostatně. Rozdíly jsou patrné z obrázku 20, kde je na příkladu a) vidět odlámání okraje hran charakterizovaných tmavou barvou.



**Obr. 20 :** Výbrus struktury a) zalité v dentakrylu b) bez zalití

Protože se poslední vzorky již nezalévaly do dentakrylu, naskytla se možnost vyhodnocení hned po rozlomení. Ale již při prvním pohledu přes mikroskop byly patrné drobné deformace a velice špatná rovinnost plochy vzniklá rozlomením substrátu viz. obrázek 21 b). Z obrázku 21 a) je také patrná schopnost YAG laseru nařezat pouze 3 okrajové vrstvy LTCC.



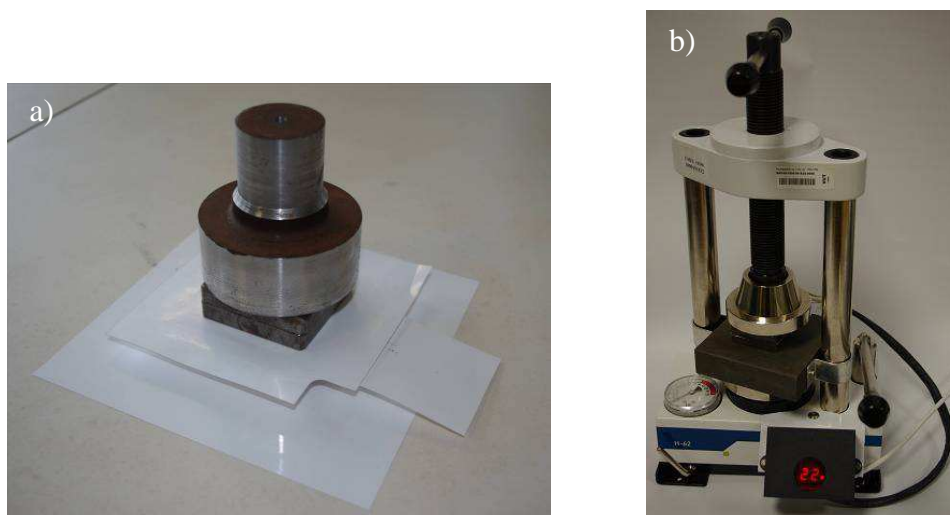
**Obr. 21 :** Rozdělení substrátu a) hloubka řezu po nařezání laserem b) rovinnost sledované plochy po rozlomení

#### 4.4 Laminace struktur metodou CCL

Pro zajištění dobré kvality laminace bylo nutno najít vhodné parametry CCL metody. Jako první v pořadí testovaných parametrů bylo nalezení vhodného tlaku a způsobu, jakým bude tlak na substrát působit. Jako další krok bylo nalezení vhodného způsobu depozice rozpouštědel. V neposlední řadě bylo nutné zajistit vhodnou metodu sesazení sklo-keramických pásků s ohledem na metodu depozice rozpouštědel.

##### 4.4.1 Dosažení potřebného tlaku pro spojení LTCC pásků

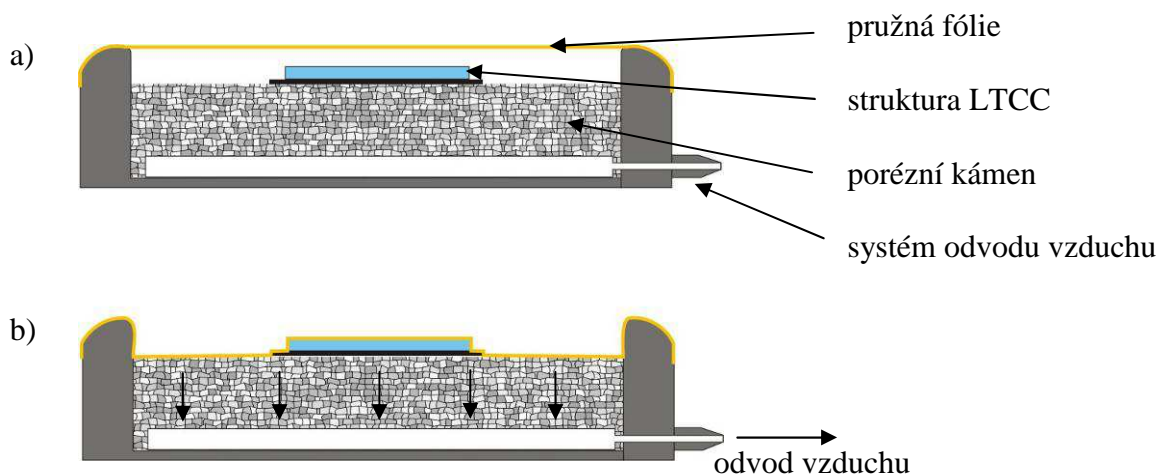
Laminace prvních struktur byla provedena na uniaxiálním lisu, ale setkávala se s problémem nastavení reprodukovatelného tlaku u všech vzorků. Problém byl dán malou přesností stupnice pro nízké tlaky. Proto byla vyzkoušena i další metoda, která spočívala v naskládání závaží o definované hmotnosti na laminační masku. Tato metoda byla, co se velikosti tlaku týká, přesná, ale objevil se problém s přesným umístěním závaží na střed laminační masky. Pokud bylo závaží nepřesně naskládáno resp. nebyly středy závaží a masky přesně sesazeny v rovině x, y, docházelo k nerovnoměrné distribuci tlaku na laminovanou strukturu. Oba způsoby jsou vidět na obrázku 22.



**Obr. 22 :** Metody vytváření tlaku a) laminace pomocí gravitační síly b) využití uniaxiálního lisu [2]

Vyskytující se problémy byly eliminovány novou metodou, která byla vytvořena za účelem zajištění rovnoměrného rozložení působícího tlaku a nastavení jeho definované neměnné hodnoty. Tato technika laminace je založena na vytvoření podtlaku okolo vzorku. Metoda spočívala v položení Mylarové fólie (o rozměrech 45 x 45 mm) na porézní kámen, aby nedocházelo k otisknutí povrchové struktury kamene do laminované struktury. Tento kámen rovněž obsahuje systém pro připojení rozvodu vzduchu. V našem případě byl připojen systém k rozvodu vakua v laboratoři. Výsledný podtlak zajistil uchycení Mylarové fólie na povrchu porézního kamene a na takto přichycenou fólii se následně umístila LTCC struktura

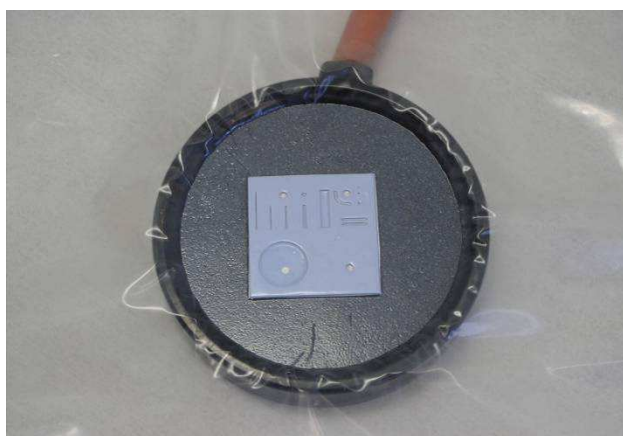
určená k laminaci. Poslední a nejdůležitější krok je překrytí kamene s vloženou strukturou pružnou fólií, která slouží k vytvoření podtlaku v oblasti okolo struktury. Princip této metody je zobrazen na obrázku 23.



**Obr. 23 :** Princip laminace přes porézní kámen a) vypnutý odvod vzduchu b) zapnutí odvodu vzduchu a jeho odsátí z oblasti umístění LTCC struktury

Jediný problém, který byl s touto metodou spojen, spočíval v délce vedení vakua od rozvodu v laboratoři po pracoviště LTCC. Řešení se naskytlo v podobě olejové rotační vývěvy umístěné přímo k pracovišti. Délka vedení se zkrátila na potřebné minimum (1,5 m oproti původním 6 m) a byl použit přívod s větším průměrem. Následný podtlak vyvíjený skrze vývěvu byl naprosto dostatečný pro zajištění dobrých podmínek pro laminaci.

Tato metoda se dá označit jako pseudo-isostatická a již z tohoto označení je patrné, že není vhodná pro tvorbu uzavřených dutin. Zde by docházelo vlivem téměř rovnoměrné distribuce tlaku na horní část substrátu ke stlačení horní části dutiny ke spodní. Míra deformace je závislá na rozměrech dutiny. Na obrázku 24 je ukázka laminace testovacího vzorku metodou využívající porézní kámen.



**Obr. 24 :** Laminace testovacího vzorku pomocí porézního kamene

#### **4.4.2 Nanášení pomocí sítotiskového poloautomatu**

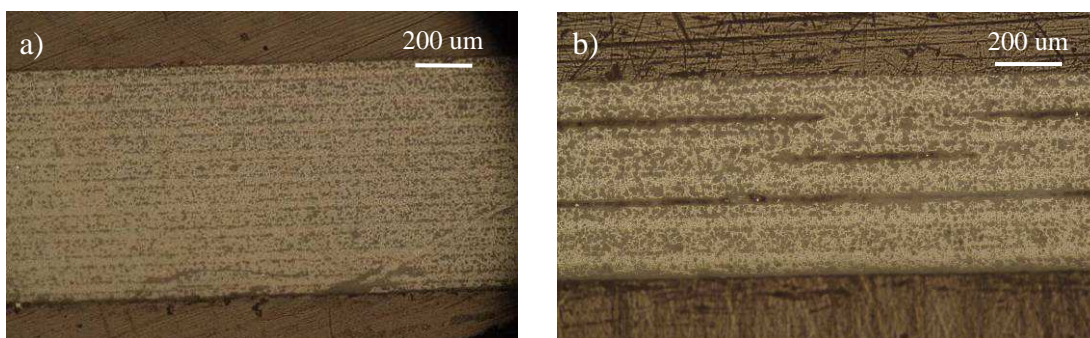
První testy byly provedeny na poloautomatu Aurel C880 a bylo pro ně zhotoveno síto s motivem testovací struktury. Tento motiv byl vytvořen pro zamezení hromadění rozpouštědla v dutinách vytvářené struktury. Hrany motivů byly posunuty o 200  $\mu\text{m}$ , aby nedocházelo k protékání rozpouštědla kolem hran dutin. Při nanášení rozpouštědla touto metodou je důležité správné nastavení sítotiskového poloautomatu. Tím se minimalizují ztráty rozpouštědla a zajistí se homogenita nanesené vrstvy na celém povrchu LTCC. Jako nejdůležitější z vnitřních parametrů tisku se ukázala síla přítlaku těrky. Nastavení tohoto parametru má velkou závislost na viskozitě použitého rozpouštědla a na rozměrech motivu. Proto je nutná jeho optimalizace pokaždé při změně jednoho z ovlivňujících faktorů.

Pro dosažení optimálního pokrytí celé plochy vzorku je také nutno optimalizovat dávku rozpouštědla podle velikosti substrátu a plochy, která má být pokryta. Dosažení optimálního množství se nepovedlo nikdy na první pokus. Pro hrubé odhadnutí dávky se použila místo LTCC pásky Mylarová fólie, která zbyla jako odpadní materiál po zpracování LTCC pásků. Posloužila také pro prvotní „oživení“ síta, které je nutné pro dobrý tisk rozpouštědla. Samotné oživení znamená rovnoměrné pokrytí celé plochy motivu rozpouštědlem. Tento proces je velice důležitý jelikož se ukázalo, že je díky němu spotřebováno při prvním tisku 3x více rozpouštědla než na tisky následující. Takto nachystané síto je pak připraveno k definovanému nanesení rozpouštědla na povrch LTCC. Dávkování rozpouštědla je u všech metod prováděno pomocí pipety. U metody nanášení pomocí sítotiskového poloautomatu je nutné nanášet rozpouštědlo na začátek i konec motivu a mít zapnutou funkci *double print* (tisk oběma směry). Tak se zajistí menší ztráty rozpouštědla a lepší pokrytí povrchu LTCC pásku.

#### **Heraeus HVS 100**

Rozpouštědlo Heraeus HVS 100 má poměrně vysokou viskozitu a nastavení tisku se podobá nastavování parametrů tisku s tlustovrstvými pastami. Jelikož toto rozpouštědlo nemá velkou tendenci se roztékat do stran, byla vrstva rozpouštědla celistvá a téměř rovnoměrná po celém povrchu. Charakteristickou vlastností rozpouštědla HVS 100 byla vynikající schopnost kopírovat motiv síta, přes které bylo rozpouštědlo nanášeno. Laminované struktury byly tvořeny 4-mi až 9-ti vrstvami, se zvolenými prodlevami (10 a 120 s) mezi nanesením rozpouštědla a položením další LTCC vrstvy. Výsledné vzorky neprojevovaly známky delaminace mezi vrstvami nebo známku nadměrného změkčení. Očekávány byly delaminace u vzorků laminovaných s prodlevou 120 s, ale ani zde se nevytvořily žádné oblasti s defekty, jak je patrné z obrázku 25.





**Obr. 25 :** Struktura laminovaná s prodlevami 120 s a) Heraeus HVS 100, b) DuPont 4553

Rozpouštědlo HVS 100 se jevílo jako méně náchylné na změny parametrů laminačního procesu. Díky vyšší viskozitě působilo rozpouštědlo během sesazení i jako adhezivní vrstva. Vzhledem ke schopnosti naleptávat povrch LTCC keramiky, byla kalibrace sesazení jednotlivých pásků během vrstvení možná jen po dobu krátkého časového intervalu (cca 5 - 10 s).

### **DuPont 4553**

Rozpouštědlo DuPont 4553 bylo výrazně méně viskózní v porovnání s Heraeus HVS 100, proto nanosená vrstva nebyla nikdy zcela rovnoměrná. Díky nízké viskozitě je kritickým faktorem přesné nastavení parametrů tisku. Ihned po tisku měla nanosená vrstva tendenci vsakovat se do povrchu LTCC materiálu a rychle se odpařovat. Za pouhé 3 minuty rozpouštědlo z povrchu sklo-keramického pásku zcela zmizelo. Což bylo dáno především částečným vstřebáním rozpouštědla LTCC materiálem a částečně jeho odpařením. Podle teoretického předpokladu byly očekávány delaminované lokality v místech, kde nebyl povrch keramiky zcela pokryt aplikovaným rozpouštědlem, ovšem ve výsledných strukturách se toto nepotvrdilo. Pokud se položila další LTCC vrstva během krátkého časového intervalu od nanosení rozpouštědla (cca 30 – 60 s - podle naneseného množství), došlo k jeho rozprostření vlivem přitlačení vrstvy LTCC k laminované struktuře.

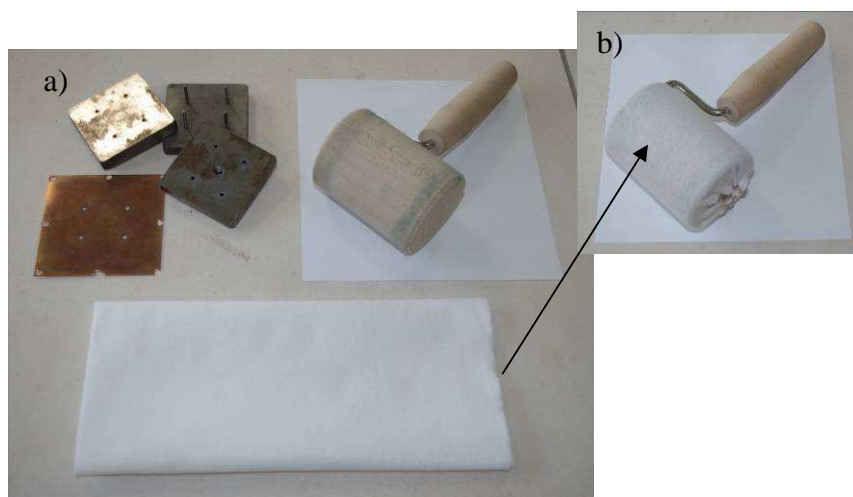
Během pokusů s rozdílnou délkou laminačního intervalu se ukázal jako nejdůležitější faktor čas potřebný pro položení další vrstvy LTCC keramiky od nanosení rozpouštědla. Obdobně jako u rozpouštědla HVS 100 byly zvoleny intervaly 10 a 120 s. Výsledky ukázaly výrazné oblasti delaminace u vzorků laminovaných s časovou prodlevou 120 s, zapříčiněné odpařením velké části naneseného ředidla. Porovnání vzorků s časovou prodlevou 120 s před laminací je zobrazeno na obrázku 25.

Velkou nevýhodou rozpouštědla DuPont 4553 se jevila jeho nízká viskozita, která zapříčinila podleptávání spodních vrstev vlivem protečení kolem laminovaného vzorku. Protečené rozpouštědlo se pak hromadilo na Mylarové fólii, která sloužila jako podložka

LTCC keramiky, a naleptávalo spodní vrstvu ve velkém objemu. Naleptání spodní vrstvy pak záviselo na počtu vrstev laminované struktury. Zvyšující se počet vrstev laminované struktury prodlužoval celkovou dobu laminace, tím i dobu působení rozpouštědla a jeho množství nahromaděné na podkladové fólii. Tomuto jevu se dá částečně zabránit vhodnou optimalizací dávky aplikovaného rozpouštědla (většinou zmenšením objemu) nebo vhodnou úpravou motivu vytvořeného na sítu.

#### 4.4.3 Nanášení válečkem s absorpčním povrchem

Pro tuto metodu nebyl nalezen vhodný komerčně prodáváný váleček. Problém spočíval v hloubce absorpční vrstvy, kterou mají běžné malířské válečky příliš velkou, a docházelo by tak zbytečně k velké spotřebě rozpouštědla. Jako vhodná alternativa se ukázalo vytvoření tenké absorpční vrstvy na dřevěný váleček pomocí bezvlákné utěrky. Vytvoření vrstvy spočívalo v upravení rozměrů utěrky podle velikosti povrchu válečku a následnému obšití okrajů, čímž se zajistilo vhodné obepnutí celého povrchu válečku. Sestava využitá pro laminaci touto metodou a úprava válečku je znázorněna na obrázku 26.



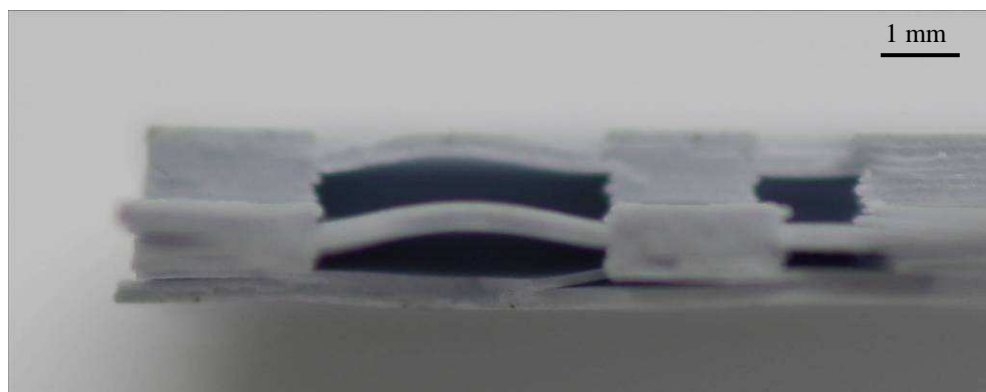
Obr. 26 : Sestava pro nanášení rozpouštědla pomocí válečku a) laminační sestava  
b) upravený váleček

Nanášení rozpouštědel na váleček bylo opět prováděno pipetou. Obdobně jako u metody sítotisku bylo nutné nejprve váleček připravit pro laminaci nanesením většího množství rozpouštědla na jeho povrch před začátkem laminace. Aby se dosáhlo rovnoměrného smočení absorpční vrstvy válečku, byla nanesená plocha několikrát převálena na Mylarové fólii, která je vidět na obrázku 26 pod válečkem. Poté mohl začít samotný proces laminace, který spočíval v položení LTCC vrstvy na Mylarovou fólii, nanesení rozpouštědla na povrch LTCC vrstvy a následném vložení do laminační masky pro snazší sesazení laminovaných vrstev.

Oproti metodě využívající sítotiskový poloautomat, nebylo nanášení rozpouštědel doprovázeno žádnými problémy v podobě podleptaných spodních vrstev struktury nebo

nedostatečného smočení. Podleptávání bylo zamezeno, jelikož nanášení rozpouštědla probíhalo mimo laminační masku. Tím se zajistilo, že přebytek naneseného rozpouštědla zůstal na Mylarové fólii. LTCC pásek s naneseným rozpouštědlem byl poté přenesen do laminační masky. Rovnoměrnost nanesené vrstvy byla kontrolována opticky a pokud bylo objeveno místo s nedostatečným smočením, stačilo tuto plochu znovu „převálet“. Po dosažení požadovaného počtu vrstev se struktura slaminovala metodou využívající porézní kámen.

Během testů se jevila metoda nanášení pomocí válečku jako nejvhodnější, proto byla tato technika depozice použita pro vytvoření struktur s vnitřními dutinami a pro otestování kompatibility metody CCL pro keramiku DuPont 951. Vícevrstvá struktura s vnitřními dutinami se skládá z 20 vrstev, přičemž obsahuje vnitřní dutiny o výškách 3 a 6 vrstev a otevřené dutiny o výšce 3 vrstev. Problém nastal s rozdělením substrátu, jelikož YAG laser „použitý pro nařezání, nedokázal zaostřit paprsek hlouběji do struktury. Tato skutečnost vedla k nařezání pouze 3 okrajových vrstev a zapříčinila rozlámání vnitřní struktury vytvořeného vzorku. Ty části, které se podařilo rozdělit a vyhodnotit pak ukázaly, že jednorázová CCL laminace je pro tvorbu uzavřených dutin nevhodná. Vede k vytvoření výdutí v místech, kde jsou realizovány vnitřní dutiny o šířce 3 mm. Dutiny se šířkou 0,2, 0,5 a 1 mm zůstaly nedeformovány. Tomuto jevu by se dalo zabránit vytvářením vícevrstevných struktur postupnou laminací, protože by se zmenšil objem vystupujících par ze struktury, a tím i jejich tlak způsobující výdutě. Porovnání vnitřních dutin o šířce 1 a 3 mm je zobrazeno na obrázku 27. Z obrázku jsou také patrné oblasti delaminace ve spodní části substrátu, které byly způsobeny povýpalovým rozlomením jednotlivých částí.



**Obr. 27 :** Vícevrstvá struktura s vnitřními dutinami

Pokus s LTCC keramikou DuPont 951 se nedostal do fáze vyhodnocení, protože se vzorky zdeformovaly již během výpalu důsledkem smrštivosti daného typu sklokeramického materiálu. Pro eliminaci tohoto efektu byly jednotlivé vrstvy skládány s pootočením o úhel 90°. Tím se mělo dosáhnout eliminace deformací vzniklých odlišným smršťováním v osách x, y. Jestli byl tento vliv narušen nařezáním struktury laserem,

nebo špatným nastavením parametrů laminace či výpalu, je otázkou pro další výzkum. Ukázka zdeformované struktury je na obrázku 28.



**Obr. 28 :** Výpalem zdeformovaná struktura vytvořená LTCC keramikou DuPont 951

#### **4.4.4 Nanášení štětcem**

Tato metoda byla zvolena pro svoji principiální jednoduchost, rychlost realizace příprav i samotné laminace. Pro nanášení byl použit plochý jemný malířský štětec s přírodními vlasy vel. 8. Obdobně jako při nanášení rozpouštědla pomocí válečku byl sklo-keramický pásek umístěn na Mylarovou fólii, na které probíhalo samotné nanášení. Pomocí pipety se rozpouštědlo nanaslo v odpovídajícím množství na povrch LTCC pásy. Následně došlo za pomoci štětce k rozetření rozpouštědla po celém povrchu a přenesení pásy do laminační masky pro sesazení. Po vytvoření struktury s odpovídajícím počtem vrstev se vzorek přemístil na porézní kámen pro pseudo-isostatickou laminaci.

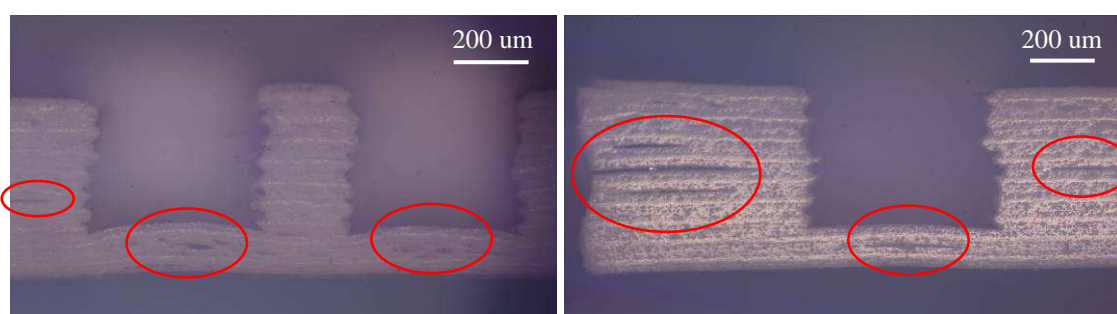
Problém této metody je ve špatné kontrole tloušťky vrstvy a opakovatelnosti. Štětcem rozprostřené rozpouštědlo bylo sice po celém povrchu LTCC pásy, ale štětec nezanechal na povrchu pouze nezbytné množství pro smočení povrchu. Objem naneseného rozpouštědla se musel neustále korigovat v závislosti na množství absorbovaného ředidla do štětce. Během vysoušení ředidla po laminaci došlo ke vzniku výdutí na povrchu slaminované struktury. Tyto výdutě, zapříčiněné velkým objemem vystupujících par ze struktury, začaly během chlazení vzorků na pokojovou teplotu pomalu mizet, ale nezmizely úplně.

#### **4.5 Laminace struktur termokompresní metodou**

Termokompresní laminace byla provedena postupnou laminací podstavy, těla struktury a následným spojením obou částí v jeden celek. Pro vytváření tlaku byl použit uniaxiální lis popsáný v kapitole 4.4.1. Tento lis byl nevyhovující pro metodu CCL, kde je zapotřebí přesné nastavení nízkého tlaku, ale pro potřeby termokompresní metody je zcela dostatečný. Lis

je upraven pro možnost vyhřívání vzorku během působení tlaku. Rozmezí teplot je možné měnit od hodnoty pokojové teploty po 99 °C.

Laminační proces spočíval v seskládání jednotlivých vrstev do laminační masky a následném slaminování v jednotnou strukturu. Nejprve byla vytvořena podstava tvořená vrstvami obsahující otvory pro poziční kolíky, následně tělo z vrstev nesoucí testovací motiv a nakonec se spojily obě tyto části dohromady. Pro termokompresní metodu nebyly využity doporučené parametry od výrobce, ale parametry vyhodnocené jako nejvhodnější na základě proběhlých testů. Jako optimální byly shledány parametry: teplota 40 °C; tlak 10 MPa. Při vyhodnocení se však ve struktuře objevovaly lokality s mezivrstevovou delaminací, které byly zapříčiněny nedostatečným prohřátím struktury. Vzniklé delaminace jsou znázorněny a zvýrazněny na obrázku 29.



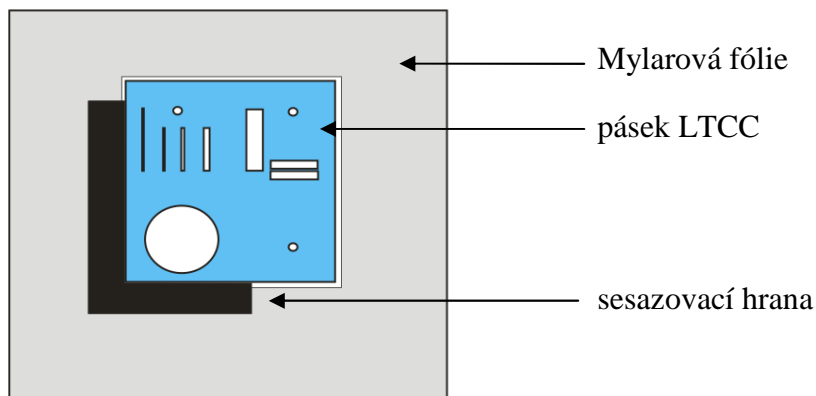
**Obr. 29 :** Delaminace ve struktuře vytvořené termokompresní metodou

Velkou výhodou termokompresní metody laminace je snadné sesazení jednotlivých vrstev LTCC a poměrně jednoduchý postup při výrobě vícevrstevných struktur. Na druhou stranu je nevýhodou nepřesné nastavení jednotlivých parametrů. Tento problém se týká použitého laboratorního zařízení a není obecným pravidlem pro termo-kompresní metodu laminace. Měření aplikované síly je na použitém lisu přesné pro vzorky s větší plochou, kde je nutné nastavit pro dosažení požadovaného tlaku vyšší laminační sílu. Pokud ovšem vytváříme vzorky s malou plochou, setkáváme se zde se stejným problémem jako u metody CCL, tedy s nepřesným nastavením nízkých hodnot. Použitý lis navíc nezajišťuje rovnoměrnou distribuci tepla na vzorek, jelikož je vyhřívána pouze spodní část lisu. Takto může docházet k nedostatečnému prohřátí celého objemu laminované struktury.

#### **4.6 Sesazení jednotlivých sklo-keramických pásků**

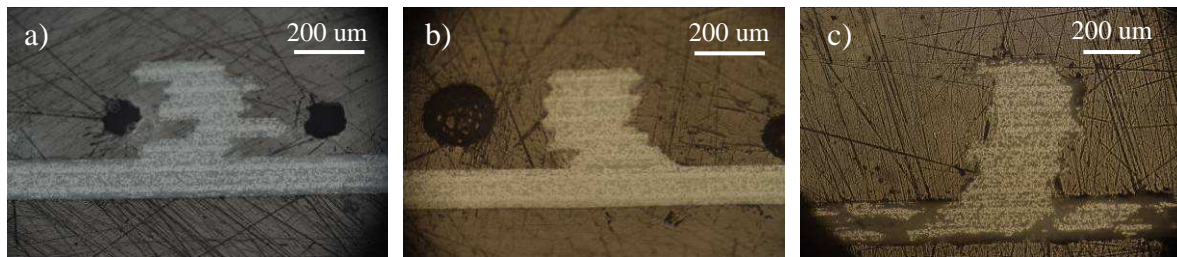
V závislosti na metodě nanášení rozpouštědel bylo nutno zvolit i vhodnou metodu sesazení. Jako neoptimálnější způsob se od počátku jevílo použití laminační masky s pozičními kolíky. Tato metoda ovšem nemohla být použita v rámci prvních testů, které probíhaly na sítotiskovém poloautomatu. Problém byl v rozměrech laminační masky resp. v její výšce a hlavně ve velikosti pozičních kolíků, které byly příliš rozměrné, než aby mohly

být umístěný pod síto. Proto byla zvolena metoda sesazení pomocí hran substrátů. Jednotlivé vrstvy byly vkládány do šablony vytvořené z Mylarové fólie. Vytvoření šablony bylo důležité z hlediska zajištění co nejvyššího podtlaku skrze porézní kámen v oblasti, kam byly pokládány jednotlivé pásy. Po nanesení rozpouštědla na pásek LTCC byla položena na tento pásek další LTCC vrstva a takto se pokračovalo dokud, se nenavršil požadovaný počet vrstev. Princip metody sesazení je zobrazen na obrázku 30.



**Obr. 30 :** Princip sesazení pomocí hrany

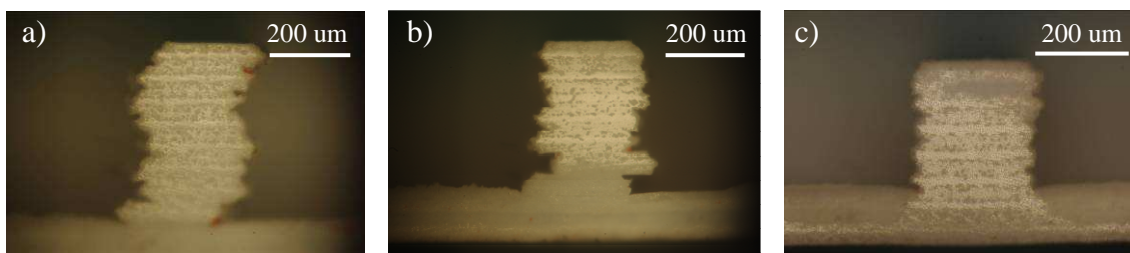
Přesnost metody závisela na preciznosti, s jakou jsme schopni položit vrstvy na sebe. Lidské oko je schopno rozeznávat details okolo 200  $\mu\text{m}$ , a tato skutečnost se projevila i ve výsledku laminace. Tato metoda byla proto méně přesná v porovnání s metodou sesazení pomocí pozičních kolíků. Chyba sesazení se pohybovala okolo 50  $\mu\text{m}$  na každou vrstvu, ovšem v extrémech se pohybovala okolo 150  $\mu\text{m}$ . Problém spočíval ve špatné korekci pozice přiložené LTCC pásky, která se takřka ihned po kontaktu s nanesenou vrstvou ředidla začala naleptávat. Pohyb přiložené LTCC pásky po povrchu struktury s naneseným ředidlem byl možný po velmi krátkou dobu (5 – 10 s) v závislosti na použitém rozpouštědle. Ukázky přesnosti sesazení jsou nejlépe vidět na výsledcích můstek vytvořených ve struktuře. Tyto můstky jsou vidět na obrázku 31. Pro lepší sesazení by bylo nutné vyrobit vhodný sítotiskový stolek s nízkými pozičními kolíky, které by nepůsobily problém během tisku.



**Obr. 31 :** Sesazení LTCC vrstev tvořících můstek pomocí hran substrátů

Lepších výsledků bylo dosaženo za pomoci masky pro termokompresní laminaci s pozičními kolíky. Tato metoda sesazení byla použita pro metody nanášení rozpouštědla

pomocí štětce a válečku s absorpční vrstvou. Do masky se postupně vkládaly LTCC pásy s nanosenou vrstvou rozpouštědla. Přesnost sesazení byla výrazně lepší, ale stále zde byly malé nepřesnosti vlivem vůle vzniklé rozdílným průměrem pozičních kolíků a děr ve sklo-keramické pásce. Průměr děr pro poziční kolíky byl při návrhu zvětšen o 200  $\mu\text{m}$  oproti průměru kolíku, z důvodu snadnějšího vložení LTCC pásek do masky a nepřesnosti laminační šablony. Můstky vytvořené touto technikou jsou zobrazeny na obr. 32. Na první pohled je patrná větší přesnost sesazení v porovnání s předchozí metodou.



**Obr. 32 :** Sesazení LTCC vrstev tvořící můstek pomocí laminační masky

#### 4.7 Diskuze dosažených výsledků

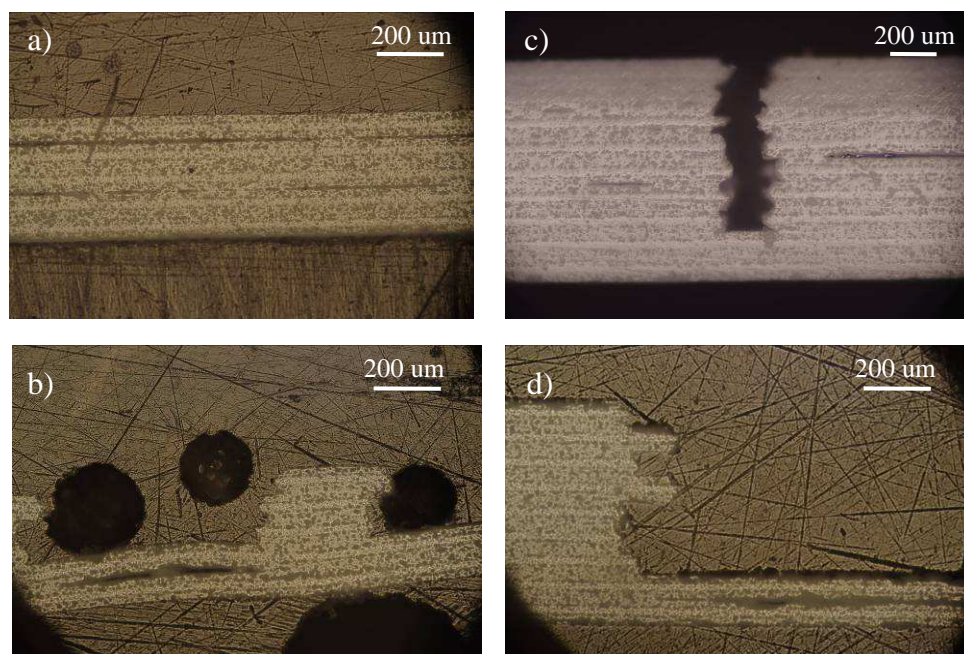
Pro porovnání jednotlivých výsledků laminace byly sledovány parametry uvedené v tabulce 4. Je nutné zdůraznit, že postupy jednotlivých technik depozice rozpouštědla během laminace CCL jsou optimalizovány pro vytváření struktur pomocí LTCC keramiky HL 2000. Použity byly rozpouštědla Heraeus HVS 100 a DuPont 4553. Jak již bylo zmíněno v popisu keramiky HL 2000, její velkou výhodou je téměř nulová smrštitivost v rovině x, y. Od tohoto parametru se odvíjí možnost nařezání vytvářené struktury před jejím výpalem.

**Tab. 4 :** Porovnání sledovaných parametrů depozičních technik

METODA DEPOZICE	SÍTOTISK	VÁLEČEK	ŠTĚTEC
ROVINNOST	STŘEDNÍ	VYSOKÁ	STŘEDNÍ
PŘESNOST SESAZENÍ	NÍZKÁ	VYSOKÁ	VYSOKÁ
NÁROČNOST NASTAVENÍ	VYSOKÁ	NÍZKÁ	NÍZKÁ
UNIVEZÁLNOST METODY	NÍZKÁ	VYSOKÁ	VYSOKÁ
KVALITA LAMINACE	VYSOKÁ	VYSOKÁ	VYSOKÁ
ZACHOVÁNÍ DETAILŮ	VYSOKÁ	VYSOKÁ	STŘEDNÍ
NÁROČNOST NA VYBAVENÍ	VYSOKÁ	NÍZKÁ	NÍZKÁ
OBJEM VÝROBY	STŘEDNÍ	VYOSKÁ	NÍZKÁ
KONTROLA TLOUŠŤKY VRSTVY	VYSOKÁ	VYOSKÁ	NÍZKÁ

Pro použití keramiky DuPont 951 by bylo nutno tyto výrobní postupy optimalizovat či zcela přestavět posloupnost operací. Nutnost optimalizace vyplývá právě ze smrštivosti tohoto sklo-keramického substrátu, což zapříčiňuje deformace struktury během výpalu. Pro eliminaci různé smrštivosti LTCC keramiky DuPont 951 v osách x, y byly jednotlivé vrstvy tvořící strukturu pokládány s pootočením o úhel 90 °. Procesem nařezání však došlo k oslabení či rozřezání některých vrstev kolem okrajů struktury, vlivem čehož došlo k narušení rovnoměrnosti sil působících smršťování během výpalu a vzniku deformované struktury (obr. 28).

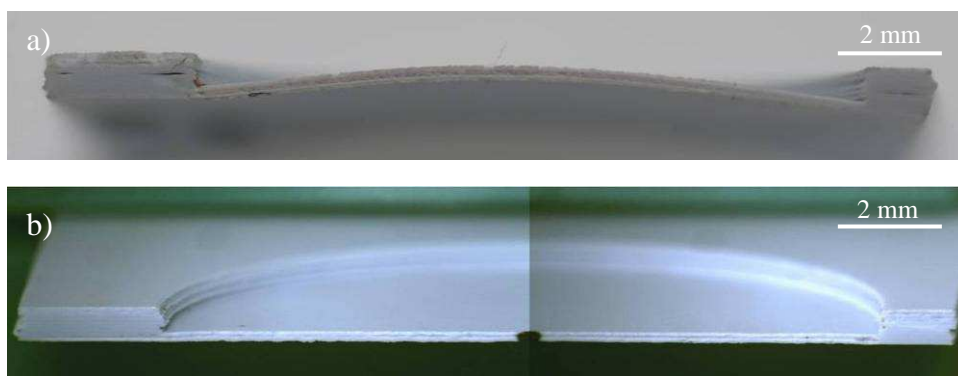
Kromě parametrů uvedených v tabulce 4 byly opticky vyhodnocovány prvky výsledné struktury jako jsou mikro-kanálky, dutina pro integraci součástek, oblouková dutina, můstky a kruhové dutiny pro prokovy. U těchto prvků byla kontrolována míra deformace vlivem nadměrného změkčení, delaminace které mohly vzniknout nedostatečným naleptáním nebo nízkou hodnotou tlaku. Ukázalo se, že nadměrné měknutí ve struktuře vzniklo pouze u vzorků, kde byla doba působení rozpouštědla prodloužena nad 2 hod. Pokud došlo po laminaci k úplnému odpaření rozpouštědla, tak u žádné z použitých technik depozice k tomuto jevu nedocházelo. Během hledání optimálních parametrů CCL laminace byly vytvořeny struktury, u kterých se vyskytovaly oblasti delaminace. Tyto delaminace vznikaly buď dlouhým intervalem mezi nanesením rozpouštědla a sesazením další vrstvy pásky LTCC, nebo nedostatečným množstvím rozpouštědla. Příklady delaminací a jiných deformací jsou zobrazeny na obrázku 33.



**Obr. 33 :** Deformace ve struktuře zapříčiněné a) dlouhým laminačním intervalem, b) přílišným změkčením struktury, c) a d) použitím nedostatečného tlaku během laminace



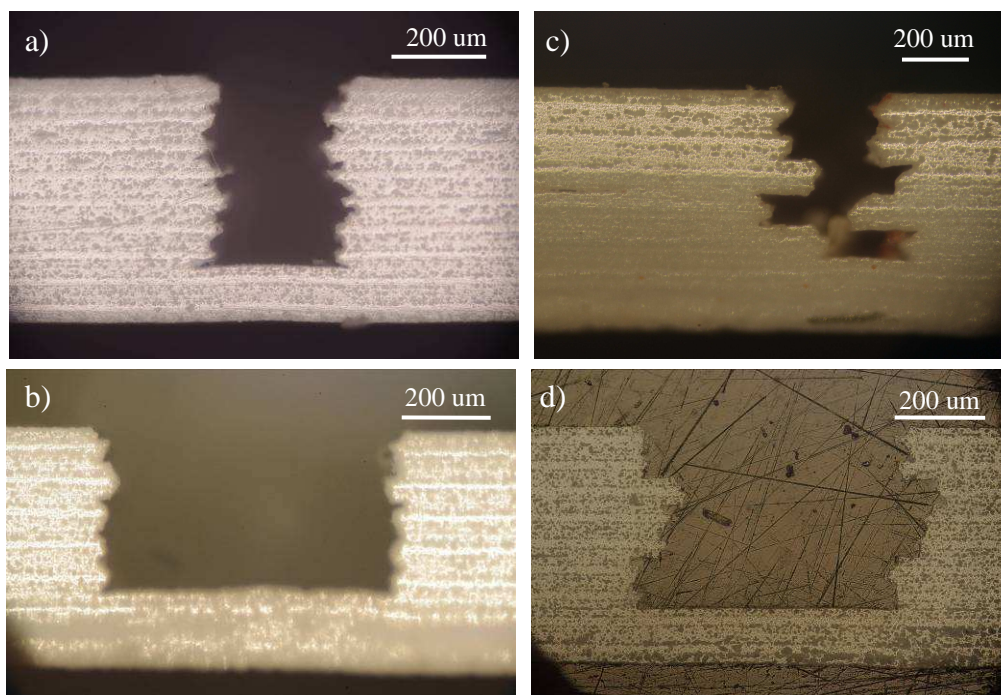
Rovinnost plochy velké otevřené dutiny je zobrazena na obrázku 34. Na obrázku 34 a) je vidět prohnutí způsobené termokompresní laminací a na obrázku 34 b) zachování rovinnosti dna dutiny u metody CCL. Prohnutí u termokompresní laminace je možné částečně eliminovat vhodným nastavením parametrů laminace, ale z časových důvodů nebyla tato optimalizace provedena. Vzorek zobrazený na obrázku b) byl laminován metodou CCL a jako depoziční technika byl použit váleček s absorpční vrstvou. Obdobných výsledků bylo dosaženo i ostatními metodami nanášení rozpouštědel.



**Obr. 34 :** Řez pro sledování rovinnosti kruhové dutiny 15 mm a) termo-kompresní metoda b) CCL

Další důležitý sledovaný parametr byl nazván univerzálnost metody. Tento parametr má poukázat na vhodnost jednotlivých depozičních technik pro obě použité rozpouštědla. Rozdílná viskozita předurčovala jako vhodnější rozpouštědlo pro nanášení na sítotiskovém poloautomatu Heraeus HVS 100. Toto rozpouštědlo mělo menší roztékavost danou vyšší viskozitou, díky této vlastnosti bylo i snazší nastavení sítotiskových parametrů. Metoda nanášení válečkem s absorpční vrstvou se jevila jako vhodná pro oba typy rozpouštědel. Navíc se vyznačovala vynikající kontrolou tloušťky nanesené vrstvy, která závisela na množství naneseného rozpouštědla na povrch válečku a počtu „převálení“ LTCC vrstvy určené k laminaci. Nanášení štětcem je použitelné rovněž pro obě rozpouštědla, ale tato metoda je spojena se špatnou kontrolou nanesené tloušťky vrstvy. Při nanášení zůstávalo na LTCC pásku větší množství rozpouštědla než by bylo optimální, a to se projevilo vznikem výdutí během výparu rozpouštědla ze struktury.

Díky vlastnostem metody CCL bylo vytváření mikro-kanálek bezproblémové. Po optimalizaci procesu CCL laminace nevykazovala LTCC struktura náznaky delaminací nebo jiných deformací. Největší problémy a nepřesnosti vnášelo do celého procesu laminace sesazení jednotlivých vrstev. Pokud by se podařilo docílit metody sesazení zaručující položení jednotlivých vrstev s odchylkou v řádech jednotek  $\mu\text{m}$ , dosáhlo by se vysoké přesnosti vyráběných struktur obsahující jemné motivy s vynikající kvalitou laminace. Některé z vytvořených mikro-kanálek jsou zobrazeny na obrázku 35.



**Obr. 35 :** Mikro-kanálky vytvořené ve struktuře LTCC a), b) správné sesazení, c), d) špatné sesazení

Z obrázku 35 a) a b) je patrná dobrá kvalita procesu CCL laminace i sesazení. Uvedené mikro-kanálky jsou vytvořeny o šířce 200 a 500  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 35 c) a d) jsou uvedeny mikro-kanálky se stejnými rozměry, dobrou kvalitou laminace, ale špatným sesazením jednotlivých vrstev. Tento problém se nejvíce projevil u mikro-kanálků s malou šířkou (např. 200  $\mu\text{m}$ ). Důležitý je účel, za jakým jsou mikro-kanálky vytvářené. Pokud je nutná extrémní rovinnost stěn, bylo by opět potřeba optimalizovat sesazovací metodu. Ovšem v případě, že by podobné prvky sloužili pro vedení kapalin uvnitř mikro-fluidního zařízení, je výsledná přesnost kanálků s rozměrem  $\geq 500 \mu\text{m}$  dostatečná.

Závěrem hodnocení lze říci, že pro laminaci LTCC struktur metodou CCL je nejvhodnější metoda depozice rozpouštědla pomocí válečku s absorpční vrstvou na povrchu. Prokázala se jako nejpřesnější z pohledu reprodukovatelnosti a kontroly nanášené vrstvy a nízké náročnosti celé operace. Metoda síťotiskového poloautomatu je nejtěžší, co se týče nastavení tiskových parametrů a setkává se s celou řadou problémů (podleptávání spodní vrstvy, sesazení, apod.). Proto od ní bylo postupně upuštěno a věnovaná pozornost se soustředila na metody, u nichž mohla být použita pro sesazení laminační maska s pozičními kolíky. Jako další možnost nanášení rozpouštědla na povrch LTCC byla testována realizace pomocí štětce. Zde však docházelo k nanášení nadměrného množství rozpouštědla vlivem špatné kontroly tloušťky nanášené vrstvy a k vytváření výdutí během zasoušení struktury LTCC.

## 5 Závěr

Jelikož jsou možnosti využití nízkoteplotně vypalované keramiky v oblasti elektroniky široké, je nutné s neustále narůstajícími nároky zdokonalovat i proces výroby a zpracování LTCC keramiky. Ten se skládá z několika dílčích procesů udávajících výslednou kvalitu vyrobené struktury. Jedny z nejdůležitějších operací při utváření struktur je sesazení a laminace jednotlivých vrstev, která je v dnešní době řešena hlavně termokompresními metodami. Tyto techniky s sebou přinášejí řadu problémů, které působí defekty ať už vlivem zvýšené teploty, nerovnoměrného rozložení tlaku nebo jeho vysoké hodnoty. Tyto nevýhody odstraňují nové techniky laminací, založených na chemických reakcích organických pojiv ve sklo-keramických páscích s rozpouštědly, či deposici adhezivních vrstev mezi jednotlivé vrstvy LTCC. Využití chemických laminací se jeví jako perspektivní řešení problému deformací vznikajících při vytváření vícevrstvých struktur technologií LTCC. Tyto metody jsou výhodné především díky jejich principu, který umožňuje spojování jednotlivých LTCC pásků bez působení vysokých tlaků a teplot. To vede k možnosti vytváření přesných jemných motivů a 3D prvků, které by při klasických termokompresních metodách mohly být deformovány. Tyto nové metody jsou výhodné i z pohledu nenáročnosti na technické vybavení, jelikož pro samotnou realizaci není zapotřebí žádných speciálních přístrojů.

V rámci diplomové práce byly provedeny testy vlivu rozpouštědel na pomocném vzorku za cílem zjištění jejich vlivu na LTCC pásku. Následně byl na základě získaných zkušeností navrhnout hlavní testovací vzorek, ve kterém byly realizovány v praxi často vytvářené prvky jako jsou mikro-kanálky, kruhové dutiny, můstek atd. Navržená struktura se využívala po celou dobu výzkumů a byly na ní testovány rozdílné metody nanášení rozpouštědla. Dále se provedly testy za účelem nalezení vhodné metody stlačení LTCC struktury a vybrána nejvhodnější pro požadavky diplomové práce. Potřeby nejlépe splnila metoda laminace pomocí porézního kamene, která byla pro tento účel vyvinuta v průběhu řešení diplomové práce. V rámci přípravy před začátkem pokusů na sítotiskovém poloautomatu se vytvořilo síto, které obsahovalo motiv vytvářené struktury s okraji o velikosti 200  $\mu\text{m}$ . Tím se mělo zabránit obtékání rozpouštědla kolem hran motivu. Během testů se však ukázalo, že přesah byl příliš malý a k podtékání i přes tento fakt došlo.

Prvotní testy, které proběhly pro seznámení se s vlivem rozpouštědel na sklo-keramický pásek, prokázaly bezproblémový průběh procesu laminace. Zkoumání probíhalo za použití rozpouštědel DuPont 4553 a Heraeus HVS 100. U obou se povedlo dosáhnout slaminovaných struktur bez defektů způsobených delaminací nebo nadměrným měknutím LTCC materiálu vlivem rozpouštědla. Rozdílly ve viskozitách jednotlivých rozpouštědel vedly k testu více metod deposice s cílem nalézt nevhodnější metodu pro jednotlivá rozpouštědla. Byly

ošetřovány metody depozice pomocí sitotiskového poloautomatu, válečku s absorpčním povrchem a štětce. U všech metod se povedlo vytvoření struktur bez defektů. Každá metoda však zahrnovala optimalizaci parametrů, která byla různě složitá. Jako nejtěžší se ukázalo nastavení parametrů sitotiskového poloautomatu. Tato metoda byla rovněž spojena s největším počtem problémů od sesazení jednotlivých vrstev po nastavení tiskových parametrů. Naopak jako nejvhodnější metoda se projevilo nanášení pomocí válečku s absorpční vrstvou, které bylo z pohledu parametrů nanášené vrstvy nejpřesnější (celistvost, tloušťka, atd.). Problémy nastaly během posledních pokusů, kde byla vytvořena struktura s uzavřenými dutinami. Zde došlo k výdutím v oblastech vnitřních dutin. Tato deformace byla způsobena špatným postupem laminace, která měla být provedena postupnou laminací a ne jednorázovou. Postupnou laminací se zasušovací mezikrokem by došlo ke zmenšení objemu vystupujících par ze struktury a jejich hromadění v oblasti vnitřních dutin, kde způsobují vydutí horních vrstev. Další problémy byly spojeny při pokusech na LTCC keramice DuPont 951, která se zdeformovala již během výpalu, a tím zabránila pozdějšímu vyhodnocení. Proces vytváření tlaku za pomoci porézního kamene se rovněž ukázal jako vyhovující pro laminaci struktur s otevřenými dutinami. Princip této metody se dá označit za pseudo-isostatický, který využívá k vytváření potřebného tlaku podtlak vzduchu. V našem případě sloužila pro vytvoření potřebného podtlaku olejová rotační vývěva.

Metoda CCL laminace a poměrně mladé odvětví elektrotechnického průmyslu zabývajícího se technologií LTCC určují perspektivní možnost vytváření 3D keramických struktur. Provedené testy prokázaly schopnost kvalitní laminace LTCC struktur metodou CCL. Výsledky dále ukázaly schopnost CCL zachovat velice jemné detaily a ostrost hran realizovaných prvků oproti klasické termokopresní metodě. Pro vytváření uzavřených dutin je nutné navržené postupy optimalizovat. Z důvodu časové tísně však nebylo možné se problematice tvorby uzavřených dutin podrobněji věnovat.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] BURCU, E., Sintering application. Chorvatsko: Rijeka, 2013. 342 s. ISBN 978-953-51-0974-7
- [2] KOSINA, P. Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 88 s.
- [3] IMANAKA, Y., Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC)Technology, Japan: Fujitsu laboratories, 2005. 261 s. eBook ISBN: 0-387-23314-8
- [4] FOURNIER, Y., 3D Structuration techniques of LTCC for microsystems applications. Lausanne: Univerzita polytechniky v Lausanne, 2010. 268 s.
- [5] JANTUNEN, H., A novel low temperature forint ceramic (LTCC) material for telecommunication device. Oulu: Universita v Oulu, Fakulta technologie, 2001. 50 s.
- [6] BIROL, H., Fabrication of low temperature co-fired ceramic (LTCC) - based sensor and micro-fluidic structures. Lausanne: Univerzita polytechniky v Lausanne. 2007. 160 s.
- [7] VEHEC, I. Návrh a vývoj 3D – LTCC modulu pro tlakové senzory. Košice: Technická univerzita Košice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2007. 147 s.
- [8] TRNKA, P., BUJALOBOKOVÁ, M., Progresivní keramika v elektrotechnických aplikacích. Plzeň: Katedra technologií a měření, Elektrotechnická fakulta ZČU v Plzni. 2008.
- [9] LATHI, M., Gravure offset printing for fabrication of electronic devices and integrated components in LTCC. Oulu: Universita v Oulu, Fakulta technologie, 2008. 76 s. ISBN 978-951-42-8894
- [10] DuPont 951 Green Tape™, DuPont microcircuit materials 951 Green Tape™ thick film compositon. Dostupné z WWW: [www2.dupont.com/MCM/en\\_US/assets/downloads](http://www2.dupont.com/MCM/en_US/assets/downloads)
- [11] GOLONKA, L. J., Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems. Vratislav: Vratislavská univerzita technologií, 2006. 11 s.
- [12] Hearlock® HL2000, Design guidelines for LTCC, Hearlock HL2000 materials systém. Dostupné z WWW: [www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf](http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf)

- [13] JURKOW, D., GOLONKA, L., Cold Chemical Lamination - New Bonding Technique of LTCC Green Tapes. Vratislav: Vratislavská univerzita technologií, Fakulta elektroniky a fotoniky, 2009
- [14] JURKOW, D., ROGUSZCAK, H., GOLONKA, L., Cold chemical lamination of ceramic green tapes. Vratislav: Vratislavská univerzita technologií, 2008. 7s.
- [15] STRAKA, M., Měření tíhy s využitím LTCC technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 52 s.
- [16] TARR, M., Screen and pencil printing. Dostupné z WWW: [http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0222\\_print](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0222_print)