

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

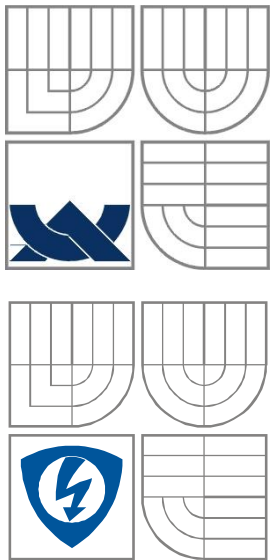
LAMINACE NÍZKOTEPLTNÍ KERAMIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ HUDEČEK

BRNO 2012



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

Laminace nízkoteplotní keramiky

The lamination of Low Temperature Co-fired Ceramic

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Ondřej Hudeček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Kosina

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Ondřej Hudeček

ID: 109659

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Laminace nízkoteplotní keramiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce prostudujte různé vlivy ovlivňující kvalitu laminace nízkoteplotní keramiky. Pokuste se nalézt vhodnou kombinaci laminačních parametrů (tlak, teplota, čas) na jedné velikosti vzorku (35 x 10 mm). Výslednou kvalitu laminace zjistěte použitím vhodné měřicí metody. Na závěr navrhnete systém vodního chlazení, který by bylo možné realizovat v technologii LTCC. Provedte diskuzi získaných výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Petr Kosina

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:

Diplomová práce se zabývá optimalizací procesu laminace nízkoteplotní keramiky, která ovlivňuje výslednou kvalitu 3D struktur (např. kanálky, dutiny, membrány). Práce hodnotí vliv laminačních parametrů (tlak, teplota, čas) na vznik defektů ve struktuře, které byly vhodnými metodami detekovány. V poslední části práce byl navrhnout a simulován systém vodního chlazení s využitím technologie LTCC.

Abstract:

Master's thesis deals with the optimization of low-temperature cofired ceramic lamination process that affects the final quality of 3D structures (eg., channels, cavities, membranes, etc.). The paper evaluates the influence of lamination parameters (pressure, temperature, time) on the formation of defects in the structure, which were detected by appropriate methods. The last parts describes designed and simulation cooling water system using LTCC technology.

Klíčová slova:

LTCC, mikrokanálky, laminace, defekty, chlazení.

Key words:

LTCC, microchannels, lamination, defects, cooling.

Bibliografické citace díla:

HUDEČEK, O. *Laminace nízkoteplotní keramiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2012. 50s., 9s. příloh. Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Kosina.

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 24. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování:

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

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	7
1 Technologie LTCC	8
1.1 Základní složky LTCC směsi a výroba základní pásky.....	9
1.2 Postup zpracování LTCC.....	11
1.2.1 Povrchové zpracování LTCC pásku.....	11
1.2.2 Vrstvové technologie	13
1.2.3 Sesouhlasení vrstev a laminace.....	15
1.2.4 Výpal.....	16
2 Laminace	18
2.1 Termokompresní laminace	18
2.2 Chladná chemická laminace	20
2.3 Vznik defektů ve struktuře.....	20
2.4 Konstrukce mikrokanálek v LTCC.....	23
2.5 Způsoby zjišťování kvality výsledné struktury.....	24
2.5.1 Optické detekční přístroje.....	25
2.5.2 Měření základních materiálových parametrů	25
2.6 Aplikační možnosti laminace substrátů různých materiálových vlastností	29
3 Praktická část	30
3.1 Výroba dvojvrstvého vzorku	30
3.1.1 Náhradní fyzikální model struktury	31
3.1.2 Měřicí pracoviště	32
3.1.3 Výsledky měření	32
3.1.4 Zhodnocení experimentu	35
3.2 Výroba testovaného vzorku s mikrokanálkem.....	36
3.2.1 Zhodnocení experimentu	37
3.3 Výroba testovaného vzorku se systémem mikrokanálek.....	39
3.3.1 Zhodnocení experimentu	39
3.4 Aplikační možnost chlazení pomocí LTCC.....	41
3.4.1 Úvod do programu COMSOL Multiphysic.....	41
3.4.2 Simulace pasivního chlazení.....	42
3.4.3 Simulace aktivního chlazení	45
4 Závěr	48
5 Použitá literatura	49
Seznam příloh	51

Seznam obrázků

Obr. 1: Vícerozměrná struktura vytvořená pomocí technologie LTCC [3].	8
Obr. 2: Princip výroby LTCC pásky.	11
Obr. 3: Typické defekty během ražení a) odštípnutí, b) přilepení.	12
Obr. 4: Postup sítotisku [6].	14
Obr. 5: Vrstvení LTCC pásek pomocí šablony [6].	15
Obr. 6: LTCC struktura a) před výpalem b) po výpalu [6].	16
Obr. 7: Vypalovací profil LTCC substrátu HeraLock® Tape HL2000 [5].	17
Obr. 8: Princip anaxiální a isostatické laminace [14].	19
Obr. 9: Vliv pozice vodičů na vznik delaminace a) dodržení návrhových pravidel b) nedodržení návrhových pravidel.	21
Obr. 10: Ukázka defektů laminace: (a) vertikální delaminace, (b) schodová delaminace, (c) kruhová delaminace, (d) mezivrstvá delaminace, (e) puchýřovitost povrchu [6].	22
Obr. 11: Progresivní laminace [14].	24
Obr. 12: Grafické vyjádření komplexní permitivity.	26
Obr. 13: Sériové náhradní schéma reálného kondenzátoru.	27
Obr. 14: Paralelní náhradní schéma reálného kondenzátoru.	28
Obr. 15: Struktura LTCC složená z pásek odlišných elektrických vlastností [11].	29
Obr. 16: Závislosti relativní permitivity jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 75°C . Měřeno při 1MHz.	33
Obr. 17: Závislosti relativní permitivity jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 80°C . Měřeno při 1MHz.	33
Obr. 18: Závislosti impedance jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 75°C . Měřeno při 1kHz.	34
Obr. 19: Závislosti impedance jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 80°C Měřeno při 1kHz..	35
Obr. 20: Jednotlivé vrstvy struktury obsahující mikrokanálek.	37
Obr. 21: Vzorky laminované a) 65°C , 25kN, 15min, b) 80°C , 15kN, 20min.	38
Obr. 22: Delaminace uvnitř struktury.	38
Obr. 23: Příčný řez struktury obsahující síť mikrokanálek.	39
Obr. 24: Příčný řez znázorňující nepřesné sesouhlasení jednotlivých kanálek.	40
Obr. 25: Puchýřek vytvořený na povrchu vzorku.	40
Obr. 26: Simulace odvodu tepla z křemíkového čipu.	44
Obr. 27: Simulace tepelného rozložení ve struktuře obsahující zlatý mikrodrátek.	44
Obr. 28: Rozvržení teploty ve 3D struktuře (teplota vody: 20°C).	46
Obr. 29: Rozvržení teploty ve 3D struktuře (teplota vody: 10°C).	46
Obr. 30: Rozvržení teploty ve 3D struktuře pro dvojici mikrokanálek (teplota vody: 20°C).	47

Úvod

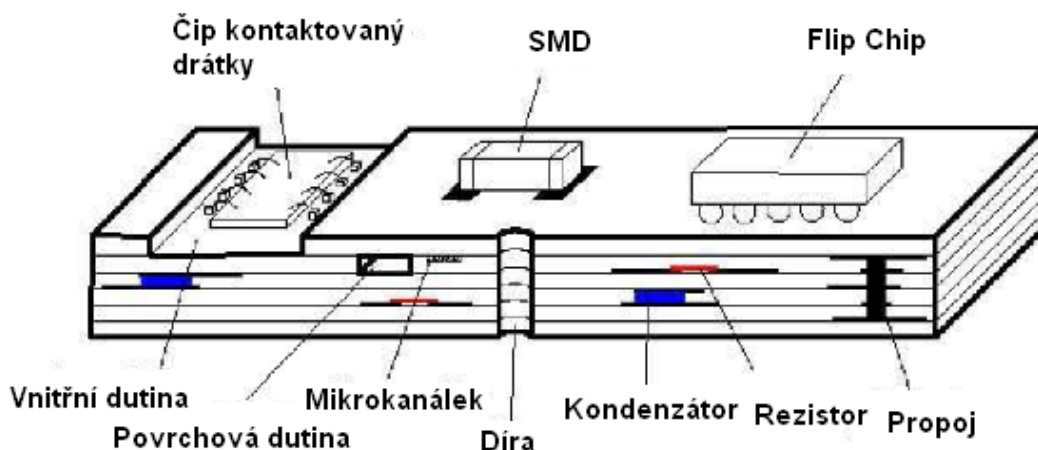
Nové elektronické systémy využívané v různých průmyslových odvětví kladou stále větší důraz na jejich výkon, vyšší mechanickou a chemickou odolnost a menší rozměry. Tyto požadavky zvyšují nároky na používané materiály a s tím související výrobní technologie. Jedním z moderních keramických materiálů splňující výše uvedené požadavky je nízkoteplotně vypalovaná keramika (Low Temperature Co-fired Ceramic). Poskytuje nové možnosti vytváření různých struktur a tím umožňují zvýšit aplikační možnosti této technologie.

Následující text je členěn do tří základních částí. Kapitola 1 stručně popisuje složení a postup výroby nevypálené keramické pásky, která se dále zpracovává do výsledné podoby. Nejdůležitějším technologickým procesem ovlivňující kvalitu výsledné struktury je laminace, která byla popsána v kapitole 2. Stále nejpoužívanější laminační technikou je termokompresní laminace založená na stlačení struktury za zvýšeného tlaku, teploty po určitý čas. Nedávný vývoj naznačil, že lze jednotlivé pásky LTCC laminovat i jinými metodami založené na chemické reakci, kdy dochází k naleptání povrchu pásky. Dále je v této kapitole stručně popsána možnost výroby mikrokanálek s použitím podpůrných materiálů, které zajišťují mechanickou oporu struktury při laminaci. Během tohoto technologického kroku často dochází díky nevhodně nastaveným parametrům ke vzniku defektů, které negativně ovlivňují výsledné chování struktury. Závěrečná část této kapitoly popisuje výčet nejčastějších delaminací a způsob zjišťování kvality laminace. Praktická část práce je obsažena v kapitole 3. V této části práce byl popsán postup výroby testovaných vzorků. Jednotlivé vzorky byly laminovány rozdílnými parametry teploty, tlaku a času a následně bylo provedeno zhodnocení a konzultace dosažených výsledků. V závěru této kapitoly byla demonstrována jedna z aplikačních možností využití LTCC v mikroelektronice, a to aktivní vodní chlazení křemíkového čipu.

1 Technologie LTCC

Historie vícevrstvých keramických substrátů sahá do padesátých let minulého století, kdy společnost RCA (Radio Corporation of America) jako první vytvořila technologický proces založený na zpracování nevypálené surové keramiky (green sheet), laminaci a výpalu. Tyto vícevrstvé desky byly vypalované při vysoké teplotě 1600°C a nazývaly se keramiky vysokých teplot HTCC (High Temperature Cofired Ceramic). Nízkoteplotně vypalovaná keramika (LTCC) byla vyvinuta později. Začátkem devadesátých let minulého století se podílely na vývoji zejména japonské a americké společnosti jakými jsou Fujicu a IBM, které jako první úspěšně komerčně aplikovali LTCC zejména ve vysokofrekvenčních aplikacích [11].

Jak již z názvu vyplývá, LTCC je keramika vypalována při nízké teplotě (do 1000°C), která umožňuje sloučit některé výrobní postupy do jednoho kroku, a tím redukovat dobu potřebnou na celý technologický proces. Univerzálnost použití LTCC materiálů spočívá v jednoduchém zpracování nevypálené pásky označované jako „tape“. Dále tato technologie nachází uplatnění v senzorové technice zejména pro její vynikající mechanické, chemické a tepelné vlastnosti. Další výhodou je možnost integrace pasivních obvodových prvků (R, L, C) v kombinaci s mechanickými komponenty do jedné struktury.



Obr. 1: Vícerozměrná struktura vytvořená pomocí technologie LTCC [3].

Trendem moderní elektroniky je zvyšovat počet elektronických komponentů na co nejmenší ploše. Díky možnosti integrace součástek dovnitř struktury lze snížit celkovou plochu potřebnou k výrobě požadovaného zařízení. Vrstvením struktury dojde ke zkrácení vodivých propojení mezi elektronickými součástkami, a tím dochází ke snížení parazitní indukčnosti a spotřeby materiálu nutného k výrobě pasivní elektrické sítě.

Zvýšením počtu aktivních prvků na povrchu substrátu roste množství tepla, které je nutné odvést. Schopnost odvádět teplo závisí především na tepelné vodivosti materiálu, která je u substrátu LTCC nižší v porovnání s klasickou korundovou keramikou. Technologie LTCC umožňuje integrovat tepelné propoje a případně vytvářet kovové vrstvy uvnitř systému [12]. Takto vzniklá struktura má vysokou tepelnou vodivost a dobré pasivní chladící vlastnosti.

Tab. 1: Srovnání tepelných vodivostí a TCE u různých materiálů [1].

Typ materiálu	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	TCE [10^{-6}K^{-1}]
Cu	400	18
Si	80	5
Korundová keramika	10	8
LTCC	3	4,6
Sklolaminát FR-4	0,2	14

1.1 Základní složky LTCC směsi a výroba základní pásky

Nejvýznamnější složky LTCC směsi jsou sklo a keramika (zejména korundová). Jedná se o polykrystalické pevné látky. Tyto složky výrazně ovlivňují výsledné parametry LTCC, kterými jsou teplota výpalu, relativní permitivita, ztrátový činitel, teplotní roztažnost, pevnost a tepelná vodivost. Příkladem složení pásky může být z 40% Al_2O_3 , 45% SiO_2 a 15% organických složek [2].

Výběr skleněného materiálu je velmi důležitý pro výsledné slinutí sklo-keramických složek během výpalu. Z důvodu největšího zastoupení oxidu křemičitého (křemenné sklo nebo také organické sklo) bývá tento substrát nazýván jako keramika na bázi skla. Základní složkou anorganického skla je síť Si – O iontů strukturovaných do aperiodické mřížky. Během výroby skla se zpravidla jako základ používá oxid křemičitý – SiO_2 , který může být doplněn případnými modifikátory ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$, PbO, Na_2O , CaO, BaO). Tyto modifikátory ovlivňují výsledné parametry skla, zejména jeho tekutost.

Modifikátory ovlivňující vlastnosti skla [6]:

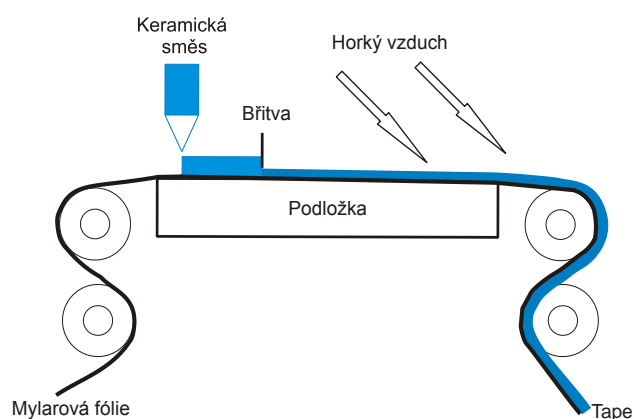
- SiO_2 Základní prvek, který formuje strukturu skla. Má vysoký bod tání a vysokou viskozitu. Pokud je obsah oxidu křemičitého ve skle vysoký, sklo má nízkou tepelnou roztažnost a vynikající chemickou odolností.
- B_2O_3 Snižuje viskozitu skla bez negativních dopadů na teplotní roztažnost a chemickou odolnost.
- PbO Je použit pro skla s velkou relativní permitivitou a velkým indexem lomu.
- Na_2O Snižuje měknutí skla. Zvyšuje teplotní roztažnost a také snižuje chemickou odolnost.
- Al_2O_3 Zvyšuje viskozitu skla.

Prvním krokem výroby surové LTCC směsi je příprava prášku. Příprava zahrnuje výběr vhodných surovin, které jsou tepelně, chemicky a mechanicky předpřipraveny pro míchání. Směs obsahuje anorganické materiály (keramický a skleněný prášek) a velké množství organických materiálů. Volba poměru množství organických a anorganických materiálů má výrazný vliv na výsledné vlastnosti LTCC. Směsi obsahující menší průměry částic a vyšší množství pojiva, mají větší tendenci ke smrštění během výpalu. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby průměry zrn keramického prášku byly velké a zároveň směs obsahovala takové množství pojiva, které zajistí dostatečnou mechanickou odolnost, při které nedojde k velkému smrštění během výpalu.

Základním organickým materiálem je pojivo, které určuje kompaktnost a tvárnost směsi. Má vliv na její viskózní chování, a tím i na tvorbu trhlin vyskytujících se v pásce během procesu formování, při kterém je směs litá na pohyblivý pás. Dále ovlivňuje velikost změn rozměrů během skladování LTCC substrátů vlivem působení vnějšího prostředí (teploty, vlhkosti atd.). Během procesu laminace hraje roly ve spojování jednotlivých vrstev do jednoho celku. Další organickou přísadou LTCC směsi jsou plasticitátory, které určují reologické vlastnosti směsi, její plasticitu a flexibilitu. Zajišťují perfektní kompatibilitu s pojivem a také stabilitu s ohledem na teplo, světlo a chemické látky. Disperzní látky jsou další složkou LTCC, zajišťující kontrolu pH směsi.

Zařízení sloužící pro odlévání směsi je zobrazeno na obr. 2. Směs je litá ze zásobníku na pohybující se pás. Pás je nejčastěji tvořen polyesterovou fólií (Mylar, Kapton). Následuje její úprava na požadovanou tloušťku pomocí břitvy. Vlivem smykového tření

působící na směs mezi pohybující se fólií a břitvou, dojde k zvýšení její tekutosti a následnému formování v nekonečný pásek. Po odlití viskozita opět vzroste, a tím je zajištěna rozměrová stabilita pásky, při které nedochází k rozlívání do stran. Viskozita směsi tedy závisí na rychlosti pohybující se nosné fólie a mezery mezi podložkou a břitvou. Dále následuje sušení odlité pásky pomocí infrazářeni, nebo horkého vzduchu. Během sušení dojde k odpaření rozpouštědla, což vede k vytvoření flexibilního listu s dostatečnou pevností.



Obr. 2: Princip výroby LTCC pásky.

1.2 Postup zpracování LTCC

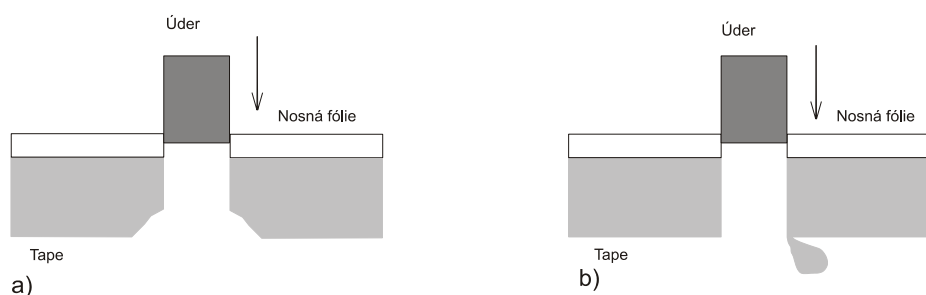
Výroba LTCC systémů je více krokový proces, který dovoluje kontrolu kvality po každém jednotlivém procesu. Díky této vlastnosti je vysoká pravděpodobnost výroby bezporuchové struktury. Výrobní proces lze uvést v následujících bodech.

1.2.1 Povrchové zpracování LTCC pásky

Za účelem vytvoření vodivých nebo tepelných propojů, mikrokanálek a dutin uvnitř struktur LTCC, je nutné najít spolehlivý postup mechanického zpracování pásky, který bude mít dostatečnou rozlišovací schopnost a nebude mít negativní vliv na neopracovanou část pásky ve formě prasklin či trhlin.

– Mechanické děrovače a razidla

Nejjednoduššími a nejlevnějšími zařízeními jsou mechanické děrovače a razidla. Při úderu dojde k snadnému oddělení zbytku od opracovávané části pásky. Nevýhodou této metody je častý vznik vad během ražení, jakými jsou jemné prasklinky, úlomky apod. Pokud je zvolená páska křehká, dojde na spodní straně k ulamování. Naopak, pokud je páska příliš měkká, dochází k zachytávání zbytků na její spodní straně. Dále mohou tyto zbytky zanášet otvory a v následných procesech způsobovat vady. Podstatnou nevýhodou je také nízká variabilita během ražení.



Obr. 3: Typické defekty během ražení a) odštípnutí, b) přilepení.

– Laserové zpracování

V dnešní době je nejrozšířenější laserové obrábění, které má několik zásadních výhod. Je velice flexibilní v rozsahu materiálů, které lze řezat. Umožňuje řez velmi malé šířky. Díky této vlastnosti je vhodný pro realizaci jemných motivů. Další podstatnou výhodou je rychlost a opakovatelnost řezání, vysoká variabilita řezaných tvarů, možnost nastavení intenzity laserového svazku. Při dělení materiálů laserem nedochází k mechanickému působení na zpracovávaný materiál, a proto je možné dělit materiály velmi lehce deformovatelné nebo křehké. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady na zařízení.

Přehled základních druhů laserů

V dnešní době jsou nejrozšířenější pevnolátkové a plynové lasery. Mezi pevnolátkové lasery lze začlenit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí je v pevném skupenství. Velikou výhodou těchto laserů je jejich vysoká stabilita a nízké nároky na údržbu a pracovní podmínky. Oproti plynovým laserům jsou pevnolátkové praktičtější, protože záření jimi produkované o vlnové délce okolo 1064nm lze přenášet skleněnými vlákny, což velmi usnadňuje přenos záření z laseru do místa procesu (obrábění). Nejrozšířenějším a dnes nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem je Nd: YAG. Jeho aktivním

prostředím je izotopní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y3Al5O12) dopovaný ionty neodymu (Nd³⁺). Tento laser našel bohaté uplatnění jak v průmyslu, tak v medicíně a vědě. Generuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce 1064nm.

Aktivní prostředí plynových laserů tvoří atomy (He-Ne laser), ionty (Ar laser), molekuly (CO₂ laser). Plynové lasery pracují převážně v kontinuálním režimu a jejich výhodou je jejich vysoká účinnost, pohybující se v desítkách procent (CO₂ – 40%). Nevýhodou je malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí. Proto jsou výkonné plynové lasery značně rozměrné [19].

1.2.2 Vrstvové technologie

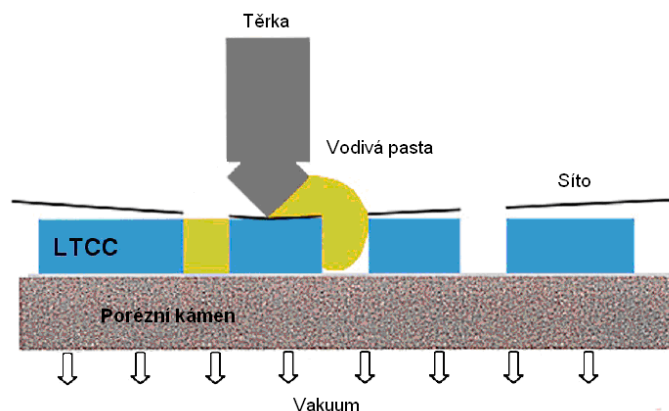
Základním rysem vrstevových technologií je postupné nanášení jednotlivých vrstev (vodivých, odporových a dielektrických) na povrch nosného izolačního substrátu. Podle způsobu nanášení vrstev a tomu odpovídajících vlastností se rozlišuje tlustovrstvá a tenkovrstvá technologie.

Tlustovrstvé technologie

Tlustovrstvý motiv se vytváří postupným nanášením jednotlivých vrstev na nosný substrát (nejčastěji sítotiskem) a následným výpalem při teplotě kolem 850°C. Tloušťky vrstev po výpalu se pohybují řádově v desítkách μm. Materiály používané v elektronice pro vytváření pasivních sítí jsou dodávány ve formě past. Pro technologii LTCC se nejčastěji používají pasty na bázi zlata a stříbra. Každá pasta se skládá z funkční složky (kovový prášek ve vodivých pastách, kovové oxidy v odporových pastách a keramikou nebo sklem v dielektrických pastách) obsažené v organickém nosiči sloužící jako pojivo. Tato směs je přidána k anorganickým vazebním materiálům (tavivová složka), která vytváří při výpalu oxidovou nebo skelnou vazbu na substrát.

– sítotisk

Během sítotisku je přes sítotiskovou šablonu přenesena pasta pomocí stěrky na nevytvrzený substrát LTCC [8]. Jelikož je nevypálená vrstva substrátu LTCC měkká, mohlo by během odtrhu síta dojít k přilepení některých částí substrátu k sítu, a tím způsobit rozmazání motivu nebo ztráty odtrhu. Aby nedošlo k poškození natištěného motivu, pokládá se substrát na porézní kámen, který zajišťuje optimální rozložení vakua působící na spodní část substrátu. Vlivem vakua dojde k přisátí substrátu k povrchu kamene a zajištění proti případnému pohybu.



Obr. 4: Postup sítotisku [6].

– šablonový tisk

Šablonový tisk je obdobou sítotisku. Rozdíl je v tom, že namísto síta je použita do rámu upnutá kovová šablona s vytvořeným motivem (leptáním nebo laserem). Šablona je přímo přiložená na substrát [8]. Tloušťka šablony určuje tloušťku nanesené pasty. Tento způsob tisku je vhodný pro nanášení souvislých ploch, nikoli však složitých tvarů. Proto se používá k vytváření kontaktních plošek a plnění propojů (vias).

Tenkovrstvé technologie

Tenké vrstvy jsou vytvářené řízeným nanášením materiálů v uzavřeném vakuovém prostoru. V elektronice nejčastěji fyzikálními metodami napařováním nebo naprašováním. Nanášení materiálů probíhá celoplošně a tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí desetin až jednotek μm .

– Katodové naprašování

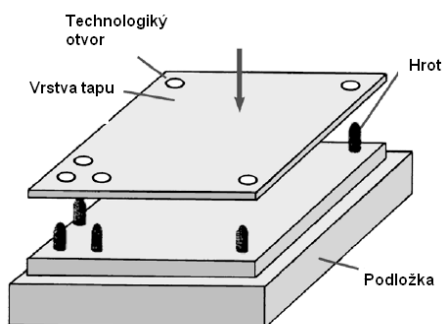
Princip katodového naprašování je založen na fyzikálním ději využívajícím uvolňování částic materiálu umístěného jako katoda (terč) ve vakuové komoře. Katoda je přivedena na vysoký záporný potenciál (řádově tisíce voltů). Do komory se přes jehlový ventil připouští pracovní plyn a tlak se udržuje na hodnotě řádově 10^{-2} pascalu. Před katodou se zapálí doutnavý výboj, přičemž kladné ionty „bombardují“ katodu a vyráží z ní částice naprašovaného materiálu, který se šíří prostorem a usazuje se na anodě na které jsou umístěné substráty, na nichž vzniká tenká vrstva. [8]

– Vakuové napařování

Tato technologie umožňuje depozici vrstev s vysokou čistotou a homogenitou. Materiál se zahřeje ve vakuu na teplotu, při níž se začne odpařovat. Páry kondenzují na chladnějších plochách (substrátu), kde dochází k růstu zárodků odpařeného materiálu, tvoření ostrůvků až do vytvoření souvislé vrstvy. Na výparníku ve tvaru lodičky je umístěn materiál, který se bude následně odpařovat.

1.2.3 Sesouhlasení vrstev a laminace

K sesouhlasení vrstev nevypáleného substrátu LTCC bývá nejčastěji použita laminační šablona obsahující hroty sloužící k fixaci pásků. Každá vrstva obsahuje technologické otvory, které slouží k přesnému umístění jednotlivých vrstev na laminační šabloně viz. obr. 5. Tento standardní způsob sesouhlasení patří mezi jednodušší a lze jím dosáhnout dobrých výsledků pouze u struktur s menším počtem pásků a méně jemných motivů. Přesnost sesouhlasení je dána rozdílem průměrů technologického otvoru a trnu. Čím větší bude tento rozdíl, tím menší bude přesnost sesouhlasení. V sériové výrobě bývá tento proces automatizován, během něhož je dosahováno daleko vyšší přesnosti než u běžného ručního sesouhlasení.



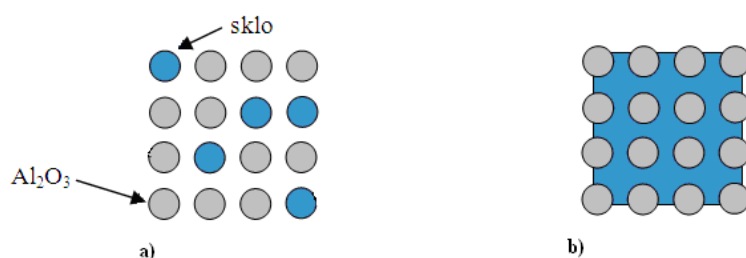
Obr. 5: Vrstvení LTCC pásků pomocí šablony [6].

Mezi nejpresnější způsoby sloužící k sesouhlasení patří kamerový systém, který snímá jednotlivé vrstvy a řídicí jednotce podává informace o jejich poloze. Využívá se zejména při sesouhlasení většího počtu vrstev [11].

Po sesouhlasení vrstev následuje laminace. Kvalita laminace ovlivňuje celkové mechanické i elektrické vlastnosti výsledné struktury. Nové chemické metody laminace mají za cíl snížit deformace 3D struktur, nicméně jsou nepoužitelné ve výrobě tenkých membrán a struktur obsahující tlustovrstvé pasivní sítě. Proto je termokompresní laminace stále nejrozšířenější typem laminace, která je závislá na parametrech teploty, tlaku a času. Každý výrobce LTCC přesně definuje laminační parametry pro konkrétní substrát. V některých případech jsou tyto hodnoty parametrů redukovány. Zejména jde-li o konstrukci 3D útvarů obsahující mechanické prvky jako jsou mikrokanálky a dutiny. V tomto případě se ideální laminační parametry určují experimentálně v závislosti na velikosti dutin a kanálků. Podrobnější přehled laminačních technik bude popsán v kapitole 2.

1.2.4 Výpal

Výpal je závěrečnou fází výrobního procesu, při kterém dochází ke změně chemických a mechanických vlastností doprovázené vytvrzením výsledné struktury. Během výpalu dochází k pronikání roztaveného skla do trojrozměrné sítě struktury tvořené keramickými částicemi a usnadňuje smáčení povrchu každé keramické částice roztaveným sklem. Na obr. 6 je zobrazena struktura keramiky v nevypáleném a vypáleném stavu. Důležitou nežádoucí vlastností během výpalu je smrštění keramiky vlivem vyhoření organických složek. Tato vlastnost musí být zahrnuta v návrhu pasivní tlustovrstvé, nebo tenkovrstvé sítě. Použité pasty musejí mít stejné smršťovací vlastnosti jako substrát, na který jsou nanášeny, tak aby nedocházelo na rozhraní keramiky a nanášeného materiálu k termomechanickému pnutí.

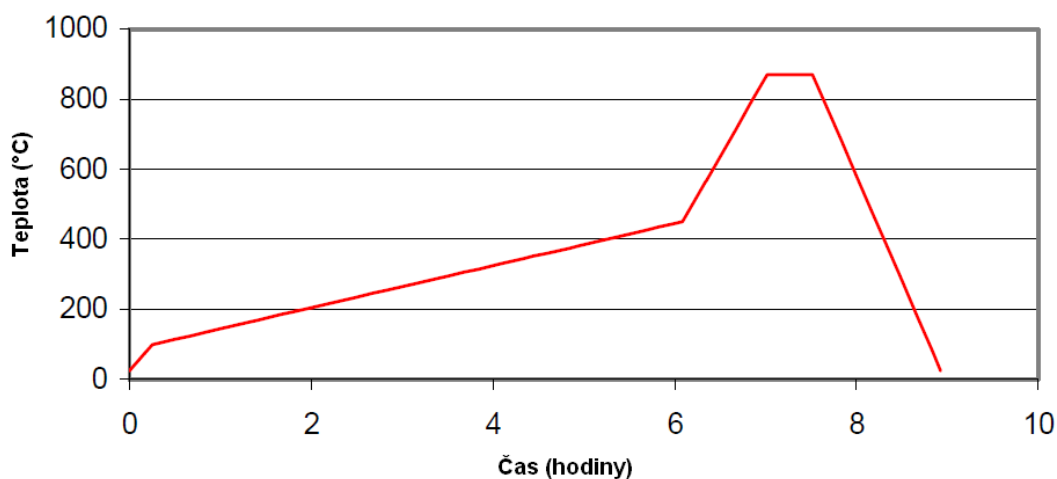


Obr. 6: LTCC struktura a) před výpalem b) po výpalu [6].

Samotný výpal probíhá v průběžné, nebo vsázkové peci rozdělené do několika teplotních zón. Teploty jednotlivých zón jsou nastaveny podle vypalovacího profilu konkrétního substrátu, který uvádí každý výrobce. Vypalovací profil pro substrát HL2000 od společnosti HERAEUS je na obr. 7 a bude použit u všech realizovaných vzorků v praktické části.

První zóna je předehřev. Doporučená doba předehřevu výrobcem je $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ do okamžiku, kdy je dosažena teplota 450°C . Během tohoto kroku dochází k rozpuštění a odpaření organických látek obsažených v LTCC pásce.

V druhé teplotní zóně je gradient nastaven na 8 až $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, dokud není dosaženo teploty okolo 850°C . Při této teplotě dochází ke slnutí částic skla a korundové keramiky. Doba setrvání na nejvyšší teplotě je obvykle mezi (10 – 30min) a udává ji výrobce. Posledním krokem je chlazení struktury. Doporučená doba chlazení je přibližně $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, až do dosažení teploty okolí. Při prudkém zchlazení může dojít k popraskání struktury.



Obr. 7: Vypalovací profil LTCC substrátu HeraLock® Tape HL2000 [5].

2 Laminace

Účelem tohoto kroku je vytvořit kompaktní celek složený z několika opracovaných listů keramiky, které jsou pokládány na sebe a sesouhlaseny. Organické látky (zejména pojivo) v nevypálené pásce slouží jako lepidlo, které umožňuje prvotní spojení vrstev během laminace. Rozlišujeme dva principy laminace z hlediska teploty (termokompresní a chladnou chemickou), z pohledu počtu laminačních kroků (jednorázová a víceokrová) a z pohledu tlaku (anaxiální a isostatická).

2.1 Termokompresní laminace

V dnešní době stále nejpoužívanější metoda laminace LTCC substrátů. Jednotlivé pásky jsou spojeny za zvýšené teploty (65 - 90°C) a tlaku (5 - 20MPa) po určitý čas (3 - 15min). Každý nevypálený pásek je složen z korundových částic, skla a organických materiálů. Pásky jsou během laminace zahřívány a lisovány společně. Zvýšená teplota způsobí rozpuštění organických složek zejména pryskyřičného pojiva, které v této fázi slouží jako lepidlo a jednotlivé pásky spojí pevně k sobě. Konečná pevnost spoje závisí na třech hlavních mechanismech [13]:

- Vzájemné spojení rozpuštěných pryskyřičných složek (nastane během laminace).
- Tekutost skla zajišťující obtečení korundových částic (nastává během výpalu).

Termokompresní laminace umožňuje vytvářet struktury, které mají více jak 40 vrstev a současně neovlivňuje elektrické a jiné vlastnosti tlustovrstvých sítí. Nevýhodou jsou časté deformace tenkých membrán, mikrokanálek a dutin díky nevhodně zvoleným parametrům laminace.

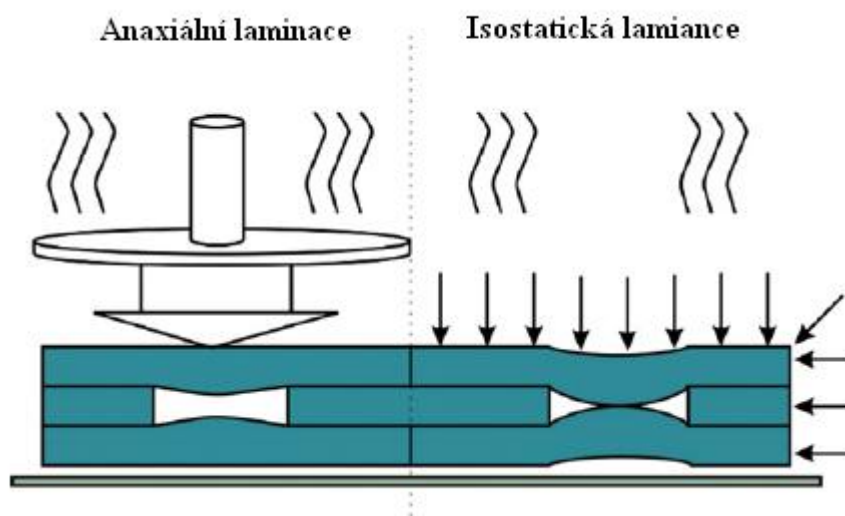
– Jednoosá (anaxiální) laminace

Při této laminaci působí na laminační šablonu síla ze dvou směrů. Tento způsob laminace patří mezi jednodušší a lze jí dosáhnout dobrých výsledků pouze u struktur s menším počtem pásek. Princip metody spočívá ve stlačení navrstvených a sesouhlasených pásek v jednoosém lisu za současného působení teploty a tlaku. Optimální teplota se liší podle druhu pojiva, typická hodnota teploty je kolem 80°C. Důležitým faktorem ovlivňující kvalitu výsledné laminace je pronikání tepla strukturou složenou z více pásek [11]. Žádoucí je, aby kovové pláty jednoosého lisu byly vyhřáté a působily na obě strany šablony současně stejnou teplotou. V horším případě lze použít

lis, který má vyhříváný pouze jeden kovový plát. V tomto případě je nutné k zajištění nejrovnoměrnějšího rozložení teploty uvnitř laminované struktury otočit šablonu po uplynutí poloviny času o 180°C. Při použití této metody laminace dochází k deformaci hran tím, že se snižuje jejich ostrost. Dále může dojít k nerovnoměrnému rozložení tlaku působící na laminovanou strukturu zejména, obsahuje-li pasivní tlustovrstvé sítě, které svoji vlastní výškou narušují rovinnost povrchu struktury.

– Isostatická laminace

Patří mezi kvalitnější způsoby laminace. Tento způsob je realizován většinou v kapalném nebo olejovém prostředí, kde síla působí ve všech směrech na danou strukturu stejně. Využívá se většinou při laminaci většího počtu pásků (nad 20 ks) a je u ní dosahováno velmi dobré ostrosti hran, a tím i kvality výsledné struktury. Mezi nevýhody lze zařadit vysoké pořizovací náklady na zařízení. Dalším problémem je laminace dutin nebo kanálků. Tlak kapaliny působí na všechny části struktury stejnou silou, a proto dochází k vyššímu průvěsu horní a spodní části kanálku než je tomu u anaxiální laminace.



Obr 8: Princip anaxiální a isostatické laminace [13].

– Jednorázová laminace:

Výhoda jednorázové laminace spočívá v laminaci struktury v jednom kroku. V tomto případě dochází k velké úspoře času. Pokud struktura obsahuje kanálky nebo dutiny, může dojít k jejich zborcení vlivem zvýšeného tlaku. Dále nastává problém s pronikáním tepla mezi jednotlivými vrstvami u vícevrstevných struktur. Použijeme-li jednoosý lis s vyhřátou spodní kovovou deskou, bude teplo pronikat od nejnižší vrstvy směrem k vyšší vrstvě,

a proto dojde k rozdílným laminačním teplotám mezi listy u spodní strany a vrchní strany struktury. Tento problém lze odstranit prodloužením času laminace nebo otočení šablony po uplynutí poloviny času o 180° [11].

– **Víceřoková laminace**

Další možností je víceřoková laminace. Princip této metody spočívá v tom, že se laminují zvláště jednotlivé části struktury, které se následně spojují v jeden celek. Efektivnost této metody spočívá v tom, že sesouhlasení a laminace je prováděna ve stejnou dobu. Tato metoda je vhodná zejména pro složitější víceřvké struktury obsahující několik mikrokanálek a dutin.

2.2 Chladná chemická laminace

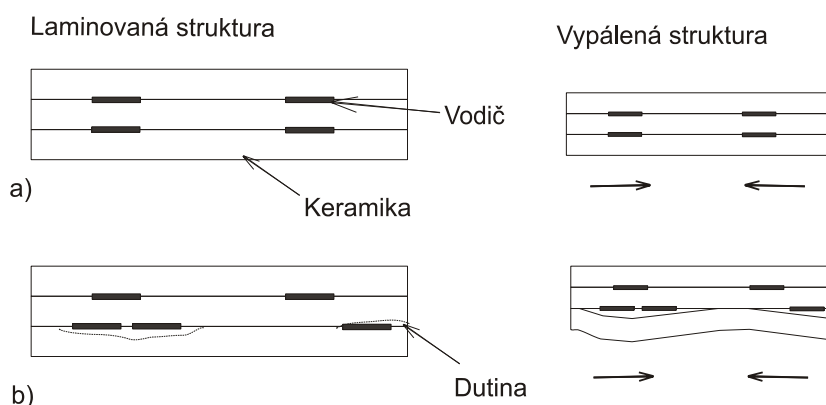
Chladná chemická laminace (Cold chemical lamination – CCL) je nová technika spojování keramických pásek do 3D struktur. Princip laminace spočívá v nanesení speciální chemické látky obsahující rozpouštědlo (např. polyethylentereftalát) na povrch pásky a chemickou reakcí dojde k naleptání povrchu. Následuje vrstvení jednotlivých pásek a stlačení tlakem menším než $0,5\text{MPa}$. K vytvoření kvalitního spoje musí být vytvořený tenký film stejné tloušťky po celém povrchu. Příliš silná vrstva filmu způsobuje deformace struktury, naopak tenká vrstva nevytvoří dostatečně silnou vazbu mezi vrstvami [13]. Hlavní výhodou této techniky je možnost realizace velkých uzavřených dutin a kanálek. Veškerý proces probíhá při pokojové teplotě (25°C) a za sníženého tlaku. Nevýhodou této metody je složitá homogenní aplikace chemické látky požadované tloušťky a také snižuje spolehlivost tlustovrstvových pasivních sítí a elektricky vodivých propojů.

2.3 Vznik defektů ve struktuře

Dojde-li k nedostatečnému spojení vrstev či jiným defektům ve struktuře LTCC, vznikají tzv. poruchy. Tyto poruchy způsobí negativně na výsledné mechanické vlastnosti, jako jsou delaminace a praskliny. Nejčastější poruchou bývá delaminace. Jedná se o slabé propojení jednotlivých vrstev v laminované struktuře, způsobené nevhodně zvolenými laminačními parametry. Další příčinou vzniku poruch uvnitř struktury bývá, když je povrch pásky znečištěn po předchozím zpracování, a proto je nutné dodržet určitou čistotu během výroby. Delaminace lze mnohdy pozorovat již po procesu laminace, ale častěji bývá objeven až po výpalu. V podstatě výpal tento nedostatek zviditelňuje.

Dalším faktorem ovlivňující kvalitu laminace je nanášení tlustovrstvé pasivní sítě. Výběr kompatibilní pasty se substrátem a dodržení základních návrhových pravidel je klíčovým faktorem, určující kvalitu laminace. Každý výrobce definuje přesné návrhové parametry jakými jsou rozměry šířek vodivých cest, minimální vzdálenosti od kraje substrátu atd. Nedodržení těchto pravidel může vést k delaminaci struktury zobrazenou na obr 9.

Bez ohledu na zvolený postup laminace je patrné, že čím více vrstev LTCC bude obsahovat tlustovrstvou pasivní síť, tím vzroste rozdíl v tloušťce mezi částmi struktury, která obsahuje motiv a částí keramickou. Výška nanesené pasty je přibližně 10 - 20 μ m. Laminací deseti vrstev obsahující tlustovrstvou pasivní síť vznikne rozdíl v tloušťce struktury přibližně jedné nevypálené pásky. Tento rozdíl může způsobit určité typy delaminací popsané níže.

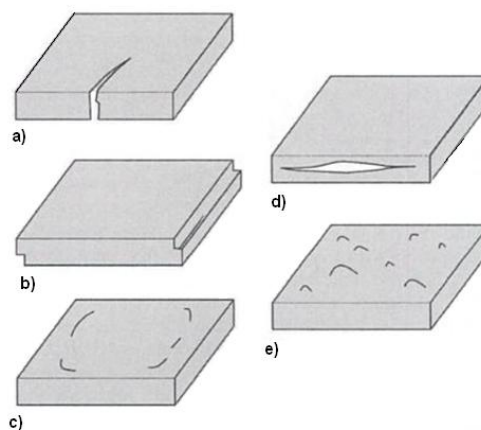


Obr 9: Vliv pozice vodičů na vznik delaminace a) dodržení návrhových pravidel b) nedodržení návrhových pravidel.

Výčet nejčastějších typů delaminací :

- a. Vertikální delaminace je tvořena prasklinkou, která se tvoří od středu okraje substrátu do jeho středu. Tento druh prasklinek vzniká při laminaci, kdy jsou deformační síly soustředěny na okraji každé vrstvy. Hlavní příčinou vzniku delaminace je působení nerovnoměrného tlaku na strukturu během průběhu laminace.

- b. Stupňovitá mezivrstvá delaminace vzniká odlepením substrátu obsahující tlustovrstvou pasivní síť větších rozměrů od substrátu ležící na této vrstvě. Příčinou vzniku této delaminace je rozdílný teplotní koeficient roztažnosti pásy a pasty. Během výpalu vzniká mechanické pnutí mezi vrstvami pásy a pasty, které způsobuje delaminaci struktury.
- c. Kruhová delaminace je tvořena v místech nerovného povrchu. Díky nerovnosti povrchu je tlak během laminace rozdílný a nepůsobí na všechny místa stejnou silou.
- d. Vnitřní mezivrstvá delaminace se tvoří na rozhraní vrstvy keramiky a vodivého motivu uvnitř 3D struktury. Příčinou problému je horší adheze mezi koramickou vrstvou a vodivou pastou uvnitř struktury, která je způsobena rozdílnou výškou přechodu mezi jednotlivými vrstvami.
- e. Puchýřkovitost povrchu se objevuje na povrchu struktury po výpalu. Během první fáze výpalu (oblast předehřevu) je zlamovaná struktura pórovitá a plyny vzniklé vypařováním organických složek mohou bez problému opustit strukturu. Puchýřkovitost je způsobena nevhodným nastavením vypalovacího profilu, během něhož nedojde v oblasti předehřevu k vypaření všech složek organického pojiva. Během slinování dojde k vytvrzení struktury a plyny, které nebyly odpařeny v oblasti předehřevu nyní nemají jak opustit strukturu a způsobují puchýřkovitost povrchu.



Obr. 10: Ukázka defektů laminace: (a) vertikální delaminace, (b) schodová delaminace, (c) kruhová delaminace, (d) mezivrstvá delaminace, (e) puchýřovitost povrchu [6].

2.4 Konstrukce mikrokanálek v LTCC

Kanálek a dutiny realizované technologií LTCC nabízí možnosti konstrukcí 3D mikrosystémů integrující různé funkce v jedné struktuře. Příkladem mohou být chladicí systémy, mikrofluidní a MEMS struktury. Během výroby vícevrstevných struktur obsahující kanálky, či dutiny dochází během termokompresní laminace k elastickým deformacím struktury tzv. průvěsům. Tomuto nežádoucímu jevu lze zabránit použitím přídavného materiálu, který slouží jako podpůrná vrstva během působení tlaku laminace [4].

– Prchavá látka

První metodou je využití pomocné vrstvy, která vyplňuje dutinu, či kanálek a mechanicky zabraňuje průvěsům kanálku během laminace. Nejčastěji se jako podpůrná vrstva používá grafit s organickým nosičem ve formě pasty. Organický nosič je směs pojiva a rozpouštědla, určující reologické vlastnosti obětní vrstvy během sítotisku nebo šablonového tisku.

Tato pomocná vrstva se během výpalu rozloží a unikne skrz pásek. Důležité je, aby teplota vyhoření obětní vrstvy byla nižší než teplota slinutí LTCC keramiky. Pórovitá struktura pásky dovolí během oxidace grafitové pasty přísun kyslíku obsaženého ve vzduchu, který je nutný k rozkladu pasty na CO_2 a následnému opuštění struktury ve formě plynu. Rychlost vyhoření vrstvy uvnitř kanálku lze řídit rychlostí zvyšování teploty přehřevu během výpalu, a tím zabezpečit dostatečnou mechanickou podporu kanálku.

– Dočasná výplň

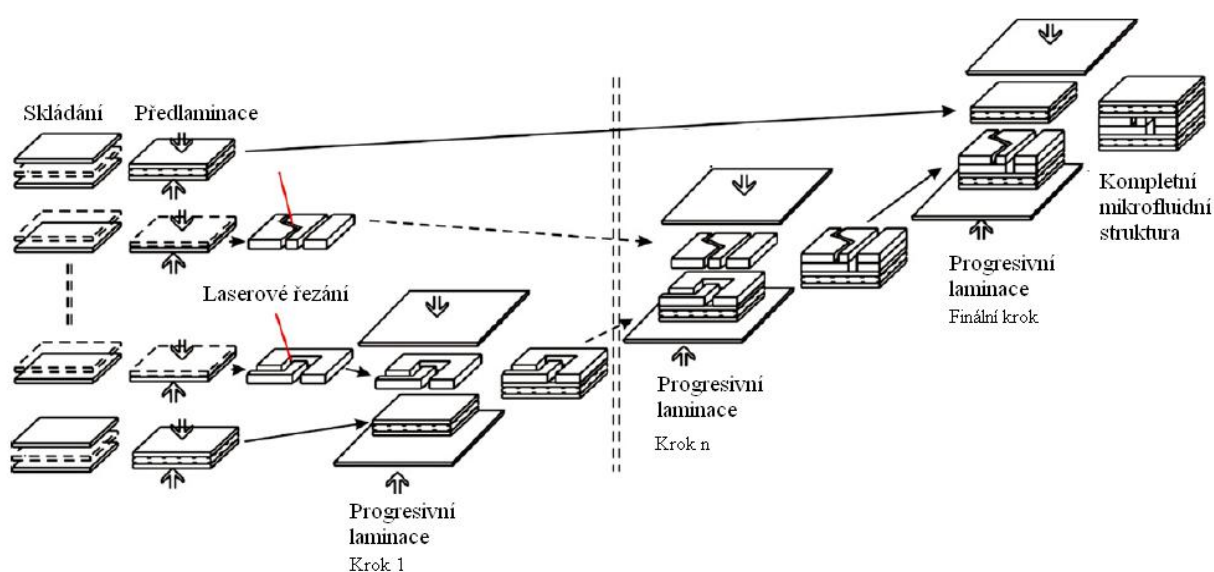
Další metoda spočívá v zaplnění kanálku či dutiny před laminací olovnato-křemičítým sklem. Tato vrstva slouží jako v předchozím případě k mechanické podpoře vrchní části kanálku, a tím se zabrání případnému průvěsu. Kompletní odstranění této vrstvy lze provést leptáním po výpalu. Odstranění této vrstvy je poměrně obtížné.

– Progresivní laminace

Nedávné studie prokázaly, že je možné vytvářet dutiny a kanálky novou technikou postupné laminace bez použití podpůrného materiálu. Je dokázáno, že snížení průvěsů dutin a kanálek může být dosaženo pouze změnou laminačního procesu. Změna spočívá v laminaci několika bloků struktury, které se následně skládají do finálního celku. Tato

technika laminace snižuje náklady na výrobu z hlediska dalších přídavných materiálů. Nehrozí kontaminace kanálku zbytky nevypařené podpůrné vrstvy, a tím odpadají náklady na čištění kanálků a dochází ke zvýšení spolehlivosti struktury.

Dalším obecným problémem vyskytující se u konstrukce struktur složených z kanálků malých rozměrů je jejich sesouhlasení v laminační šabloně. Jemné vychýlení jediného substrátu může způsobit deformaci kanálku. Aby nedošlo k tomuto nežádoucímu jevu, listy LTCC potřebné k dosažení požadované výšky kanálku se předlaminují a následně zpracují laserem. Tento předlamináčnı́ proces zajistı́ rovinatost stěn kanálku, i když je formován z více vrstev pásků. Aby se zabránilo případným průvěsům hornı́ části kanálku, je struktura laminovaná po etapách. Celý proces progresivní laminace je zobrazen na obr. 11.



Obr. 11: Progresivní laminace [13].

Během laminace je kovová deska umístěna na obou stranách navrstvených a sesouhlasených listech pásky uložených v šabloně. Po laminaci se kovové desky odstraní a na tuto vrstvu se umístí další vrstvy pásky, které se v dalším kroku opět laminují. Tento krok se opakuje dokud se nevytvoří kompletní struktura.

2.5 Způsoby zjišťování kvality výsledné struktury

Během zpracování LTCC substrátu může dojít k mnoha poruchám, které negativně ovlivní výsledné parametry struktury. Abychom předešli těmto nežádoucími jevům, je důležité umět tyto defekty úspěšně detekovat a následně vhodnou úpravou technologie odstranit. Nejvíce poruch vzniká během procesu laminace, kdy nevhodně zvolené parametry teploty, tlaku a času mohou zapříčinit delaminaci, prasklinky a jiné nežádoucí defekty.

2.5.1 Optické detekční přístroje

Jednou z možností detekce poruch je optická kontrola rozhraní dvou substrátů, které lze analyzovat pomocí mikroskopu. V dnešní době je nejrozšířenější optický mikroskop, zejména kvůli nižším pořizovacím nákladům. Dražší variantou jsou elektronové mikroskopy, které ovšem nabízejí nesrovnatelně lepší možnosti zobrazení než klasické mikroskopy. Elektronové záření s podstatně kratší vlnovou délkou (0,01 - 0,001nm), než má viditelné světlo (400-700nm), umožňuje dosáhnout mnohem většího rozlišení. Elektronové mikroskopy lze rozdělit do dvou kategorií. Skenovací (řádovací) elektronový mikroskop (SEM) a transmisní elektronové mikroskopy (TEM). Řádkovací elektronové mikroskopy se používají pro zobrazení a analýzu povrchů téměř libovolně velkých vzorků. Příkladem použití může být analýza povrchu LTCC struktury obsahující mikrokanálek nebo dutinu. Průvès horní části struktury zapříčiněný nevhodně nastavenými laminačními parametry lze nedestruktivně analyzovat a zpětně vyhodnotit.

Transmisní elektronové mikroskopy nacházejí uplatnění při pozorování a analýze vnitřní struktury vzorku, který musí být dostatečně tenký (10 - 500nm) aby jím svazek elektronů prošel.

2.5.2 Měření základních materiálových parametrů

Jiným přístupem k zjišťování poruch struktury může být měření základních materiálových parametrů. Vlastnosti všech látek vyskytujících se v elektrickém poli lze charakterizovat základními materiálovými parametry. Princip testování struktury spočívá v měření těchto parametrů a následné porovnávání změn naměřených hodnot. Například delaminace vzniklá mezi dvěma vrstvami vypáleného substrátu obsahuje dutinky, které jsou vyplněné vzduchem. Tento vzduch má jiné materiálové parametry než substrát LTCC a výsledná struktura bude mít odlišné chování v elektrickém poli než struktura bez dutin. Toto odlišné chování struktury bude zjištěno měřením základních elektrických veličin jakými mohou být impedance, kapacita nebo elektrická pevnost dielektrika.

Měření impedance

Pro vyjádření základních vlastností pasivních dvojpólu se používá pojmu impedance. Tu je možno měřit a to buď jako admitanci, nebo impedanci. Protože jde o komplexní čísla, je nutné měřit obě složky (reálnou a imaginární), nebo obě polární složky (modul a fázi). Obecně jsou obě složky závislé na kmitočtu.

a) Měření automaticky vyvažovaným mostem: Měření automaticky vyvažovaným mostem je hojně využívaná metoda pro měření impedancí v moderních měřicích přístrojích. Výhodou metody je velký frekvenční rozsah, od několika Hz až do několika MHz a zajišťuje velkou přesnost v širokém spektru měřených impedancí. Měřený obvod se dělí následujících tří částí:

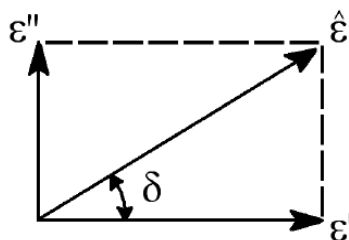
- *Zdrojová část:* generuje signál připojený na měřenou impedanci, nastavuje se jeho frekvence pomocí oscilátoru a zesilovačem je nastavena jeho amplituda.
- *Automaticky vyvažovaný most.*
- *Poměrový detektor vektoru:* měří dva vektory – DUT (Device Under Test: měřená impedance) a R_R (referenční odpor). Známe-li hodnotu referenčního odporu, je možno vypočítat neznámou impedanci [16]

b) Rezonanční metoda: Jsou z hlediska vývoje nejstarší. Měření pomocí nich je z hlediska experimentálních zkušeností a teoretických znalostí nejnáročnější. V dnešní době se s nimi setkáváme již málo.

c) Nulové metody: Jsou založeny na některých typech vf mostů (Scheringův). Měření pomocí nulových metod patří k nejpřesnějším. Nevýhodou mostů je, že jsou mechanicky náročné (přepínače, proměnné kondenzátory).

Měření kapacity

Vlastnosti dielektrika při buzení střídavých (harmonickým) elektrickým polem udává komplexní permitivita, což je v tomto případě konstanta úměrnosti mezi fázory elektrické intenzity E a indukce D :



Obr. 12: Grafické vyjádření komplexní permitivity.

Rozklad komplexní permitivity na jednotlivé složky vyjadřují vztahy:

$$\widehat{\varepsilon} = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'', \quad \varepsilon_r = \varepsilon', \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (1)$$

Všechny veličiny $\widehat{\varepsilon}$, ε' , ε'' , $\operatorname{tg} \delta$ jsou frekvenčně závislé. Reálná složka komplexní permitivity ε' (relativní permitivita) je mírou polarizace dielektrika, imaginární složka ε'' představuje ztráty v dielektriku vznikající jeho vložením do střídavého elektrického pole; označuje se jako ztrátové číslo. Více používanou veličinou je ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$.

Reálný kondenzátor můžeme nahradit spojením ideální kapacity a odporu, představující všechny reálné části impedance skutečného kondenzátoru, tj. svodový odpor dielektrika, ztráty v dielektriku způsobené polarizačními efekty, odpor přívodů apod. Toto náhradní spojení může být obecně sériové nebo paralelní.

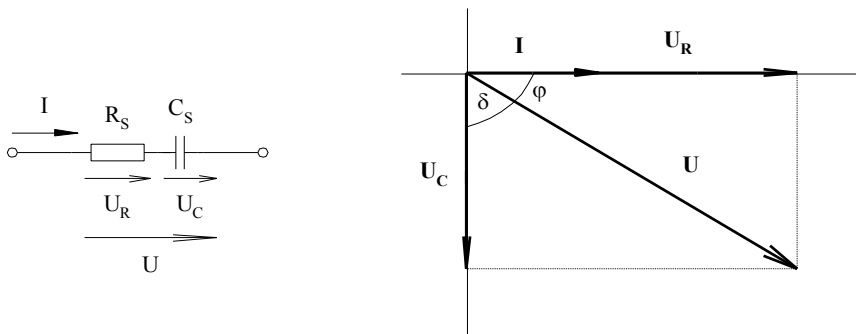
1. Sériové náhradní zapojení:

Impedanci sériového zapojení z obr. 13 lze vyjádřit následující rovnicí:

$$Z = R_s - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_s} \quad (2)$$

a ztrátový činitel:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R_s}{I \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_s}} = \omega \cdot R_s \cdot C_s. \quad (3)$$



Obr. 13: Sériové náhradní schéma reálného kondenzátoru.

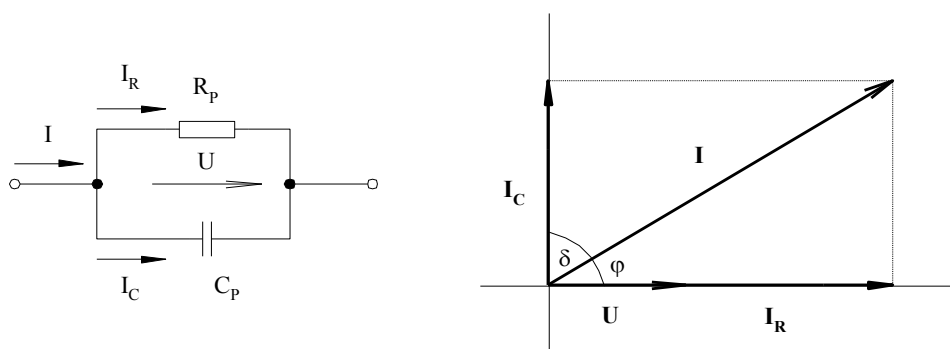
2. Paralelní náhradní zapojení:

Impedance paralelního zapojení z obr. 14 lze vyjádřit:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p}, \quad (4)$$

a ztrátový činitel:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{R_p}{U \cdot \omega \cdot C_p} = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p}. \quad (5)$$



Obr. 14: Paralelní náhradní schéma reálného kondenzátoru.

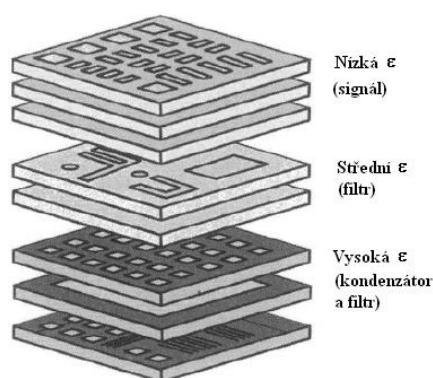
Z praktického hlediska se při měření malých kapacit používá paralelní náhradní obvod. Díky velké kapacitní reaktanci X_C má paralelní odpor R_p relativně větší význam než sériový odpor R_s , který lze zanedbat. Naopak, při měření velkých hodnot kapacit (nízká impedance) má sériový odpor R_s relativně vyšší význam než paralelní odpor R_p [15].

a) Mostové přístroje na měření kapacity: Mostové měření kapacity se vyznačuje širokým měřicím rozsahem a velmi dobrou přesností při vyvážení mostu. Každý přístroj obsahuje zdroj harmonického signálu, měřicího obvod, do kterého je zapojena měřená kapacita, a střídavého indikátoru reagující na výstupní signál z mostu. Chyby měření se pohybují v desetinách procenta.

b) Rezonanční přístroje na měření kapacity: U LC obvodů existuje jednoznačný vztah mezi rezonančním kmitočtem, indukčností a kapacitou. Tyto přístroje obsahují zdroj harmonického signálu, rezonančního obvodu, jehož součástí je měřená kapacita a indikátor reagující na napětí na rezonančním obvodu. Celkový rozsah rezonančních měřičů kapacity bývá od 1 pF do 100 μF a chyba nejméně 1% [18].

2.6 Aplikační možnosti laminace substrátů různých materiálových vlastností

Během laminaci lze kombinovat substráty s různými materiálovými parametry, čímž dochází k zvýšení univerzálnosti použití LTCC v praxi. Příklad funkčního bloku složeného z pásek o různých relativních permitivitách je na obr. 15. Základní substrát s nízkou relativní permitivitou ($\epsilon' = 5$) slouží jako nosná matrice pro signálové vodiče, tím je zajištěna vysoká přenosová rychlost signálu. Substrát se střední relativní permitivitou ($\epsilon' = 15$) je použit jako filtr a materiál s vysokou relativní permitivitou ($\epsilon' = 100$) slouží k odstranění signálového šumu a jako dielektrikum pro vrstevový kondenzátor.



Obr. 15: Struktura LTCC složená z pásek odlišných elektrických vlastností [11].

3 Praktická část

Experimentální část diplomové práce si klade za cíl nalézt optimální laminační parametry. Cílem prvního experimentu bylo prozkoumat vliv různých parametrů laminace na tvorbu defektů uvnitř dvojvrstvé struktury velikosti (35 x 30)mm. Množství poruch uvnitř struktury ovlivňuje materiálové vlastnosti vzorků. Měření a graficky vyhodnocované byly frekvenční závislosti impedance a kapacity jednotlivých vzorků.

V další části práce byly realizovány složitější struktury obsahující mikrokanálky. Byl zkoumán vliv parametrů laminace na výsledný tvar kanálek. Analýza tvaru byla zprostředkována pomocí optického stereomikroskopu Jenavert Carl Weiss Jena. Během práce s tímto mikroskopem bylo použito minimální zvětšení (50x), které bylo pro dané testování dostačující. Takto získané výsledky umožnily stanovit nejnižší laminační parametry, které zajistily dostatečné spojení jednotlivých vrstev bez přítomnosti delaminací a jiných deformací.

3.1 Výroba dvojvrstvého vzorku

Každý vzorek byl tvořen dvěma vrstvami pásků HL2000 od společnosti Heraeus. Hlavní rozdíl mezi substrátem HL2000 a ostatními LTCC substráty spočívá v unikátních smršťovacích vlastnostech během výpalu. Tento substrát se vyznačuje téměř nulovým smrštěním v osách x a y a z . K tomuto účelu byly speciálně vyvinuty pasty, které mají stejnou smrštivost jako nosný substrát a zajišťují dobrou přilnavost s páskem HL2000. Prvním krokem výroby vzorku bylo vyříznutí základního tvaru pomocí laserového řezání. V našem případě byl použit laser Nd: YAG Aurel.

Parametry laseru byly nastaveny:

- proud: 15A,
- rychlosti pohybu: 3mm/s,
- frekvence: 1,5kHz.

Řezán byl základní tvar včetně technologických otvorů, které sloužily k přesnému sesouhlasení pásků v laminační šabloně. Po sesouhlasení pásků následoval technologický krok a to termokompresní laminace pomocí anaxiálního lisu.

Laminační parametry:

- teplota: 65°C, 70°C, 75°C, 80°C,
- čas: 5min, 10min, 15min, 20min,
- tlak: 5kN, 10kN, 15kN, 20kN, 25kN, 30kN.

Dalším krokem bylo vytvoření vodivých elektrod na spodní a vrchní straně vzorků. Tyto elektrody sloužily k připojení měřícího přístroje a byly realizované vodivou pastou na bázi stříbra (TC0306). K nanesení této pasty bylo použito ruční sítotiskové zařízení. Během tisku byl kladen důraz na přesné sesouhlasení elektrod, tak aby byly umístěné na obou stranách substrátu a jejich plochy se překrývaly. Posledním krokem bylo vypálení všech LTCC vzorků podle doporučeného vypalovacího profilu. Pro substrát Heraeus HL2000 je vypalovací profil uveden v kapitole 1.2.4.

3.1.1 Náhradní fyzikální model struktury

Vytvořená struktura popsaná výše představuje deskový kondenzátor, který lze chápat jako dielektrický vzorek opatřený elektrodami. Dielektrikum je tvořeno dvěma nereagujícími látkami; LTCC substrátem a vzduchem, který je obsažen uvnitř dielektrického materiálu. Relativní permitivita ε_{rs} této struktury se určuje Lichtenekerovým mocninným vztahem:

$$\varepsilon_{rs}^k = v_1 \varepsilon_{r1}^k + v_2 \varepsilon_{r2}^k, \quad (6)$$

v němž v_1 a v_2 jsou objemové podíly obou látek, ε_{r1} a ε_{r2} jsou relativní permitivity obou látek a k je empirická konstanta. Hodnota konstanty k se mění v rozsahu $\langle -1; +1 \rangle$ podle tvaru a rozložení částic obou látek. Při chaotickém uspořádání částic $k \rightarrow 0$. V tomto případě přechází mocninný vztah ve vztah logaritmický

$$\log \varepsilon_{rs} = v_1 \log \varepsilon_{r1} + v_2 \log \varepsilon_{r2}. \quad (7)$$

Výslednou kapacitu soustavy vypočítáme ze vztahu:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rs} \cdot \frac{S}{h}, \quad (8)$$

kde C - naměřená kapacita vzorku,
 h - tloušťka vzorku (0,2mm),
 S - plocha elektrod (104mm²)
 ε_0 - permitivita vakua (8,85418.10⁻¹²F.m⁻¹)
 ε_{rs} - relativní permitivita struktury.

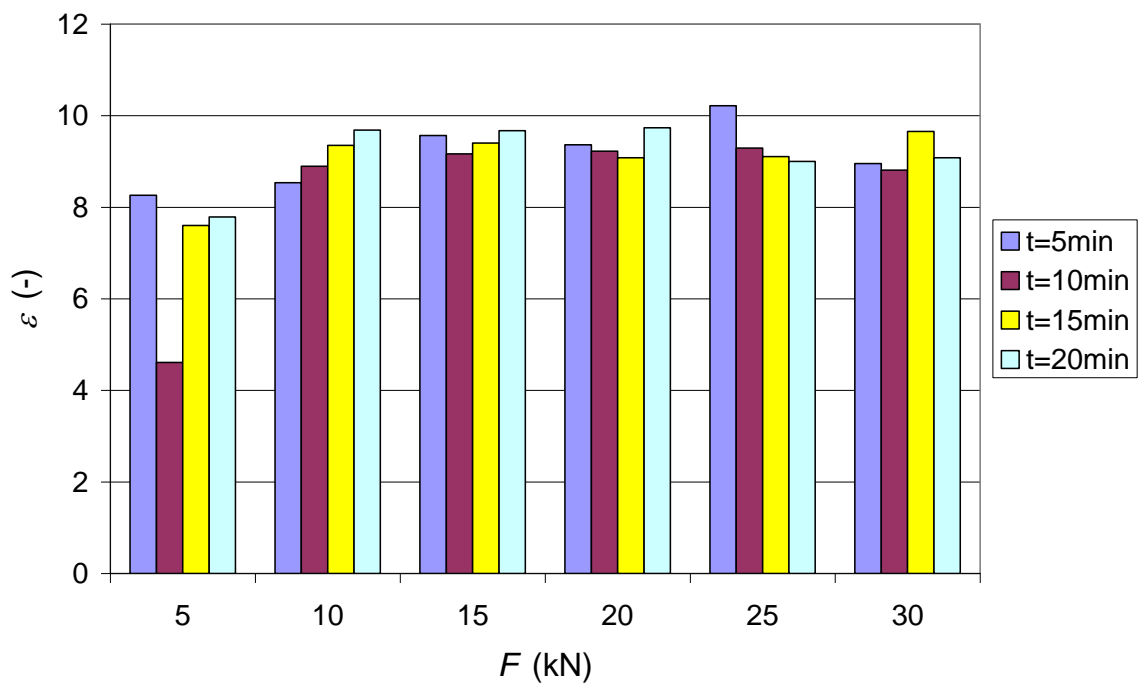
3.1.2 Měřící pracoviště

Vlastnosti zkušebních vzorků byly diagnostikovány RLC metrem HP Agilent E4980A. Rozsah měření lze provádět v rozsahu frekvencí 20Hz až 2MHz. Před začátkem měření bylo nutné nastavit základní parametry měření (frekvenční rozsah, počet hodnot na dekádu, výběr měřené veličiny a její náhradní model). Vlastní měření bylo v celém frekvenčním rozsahu plně automatizováno. Změřené hodnoty byly automaticky zapisovány do souboru MS Excel. Při měření byl použit tříelektroodový systém HP Agilent 16451B. Tento elektroodový systém byl připojen na vstupy H_{CUR} , H_{POT} , L_{CUR} a L_{POT} RLC metru HP E4980A. Při měření se výsledné hodnoty vztahují k definované referenční (kalibrační) rovině, ke které je připojen měřený objekt. Na této rovině se provádí kompenzace *OPEN* i *SHORT* z důvodu eliminace zdrojů chyb způsobené délkou spojovacího vedení, tedy vlastní impedancí a rozptylovou admitancí mezi vodiči.

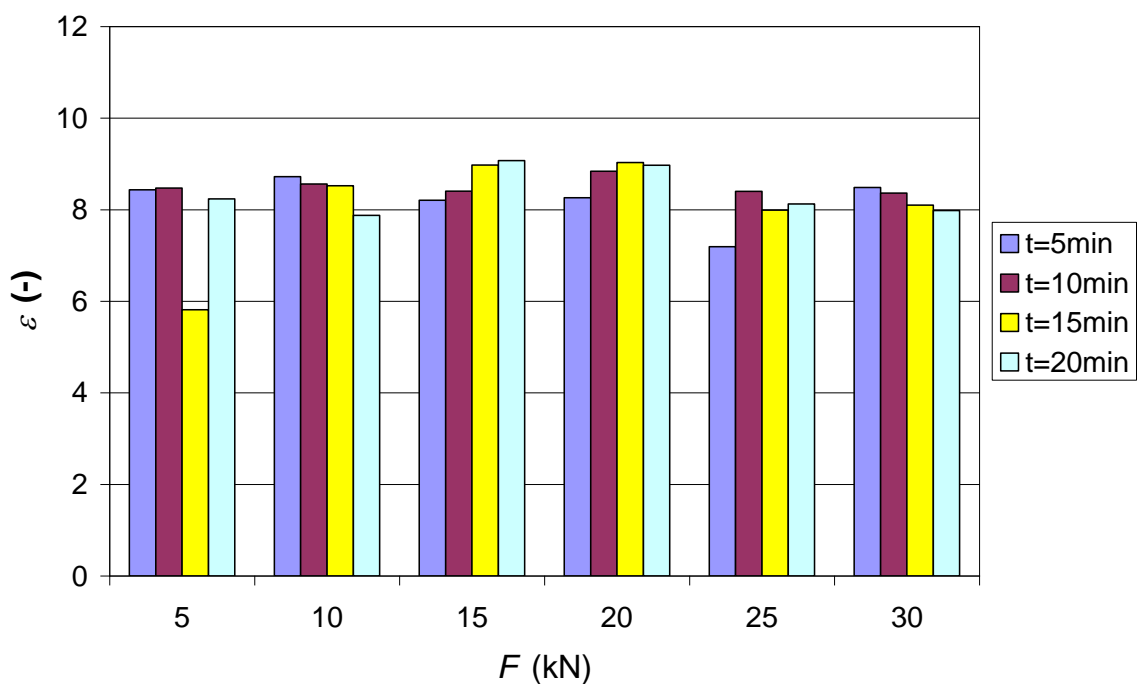
3.1.3 Výsledky měření

Výsledkem měření byl soubor hodnot frekvenčních závislostí kapacity a impedance všech realizovaných vzorků. Následovalo zpracování těchto dat a vytvoření grafických závislostí relativní permitivity a impedance jako funkce hodnot laminačních parametrů.

Měření kapacity: Pro jednotlivé vzorky byla vypočtená hodnota relativní permitivity (viz. rovnice 8).



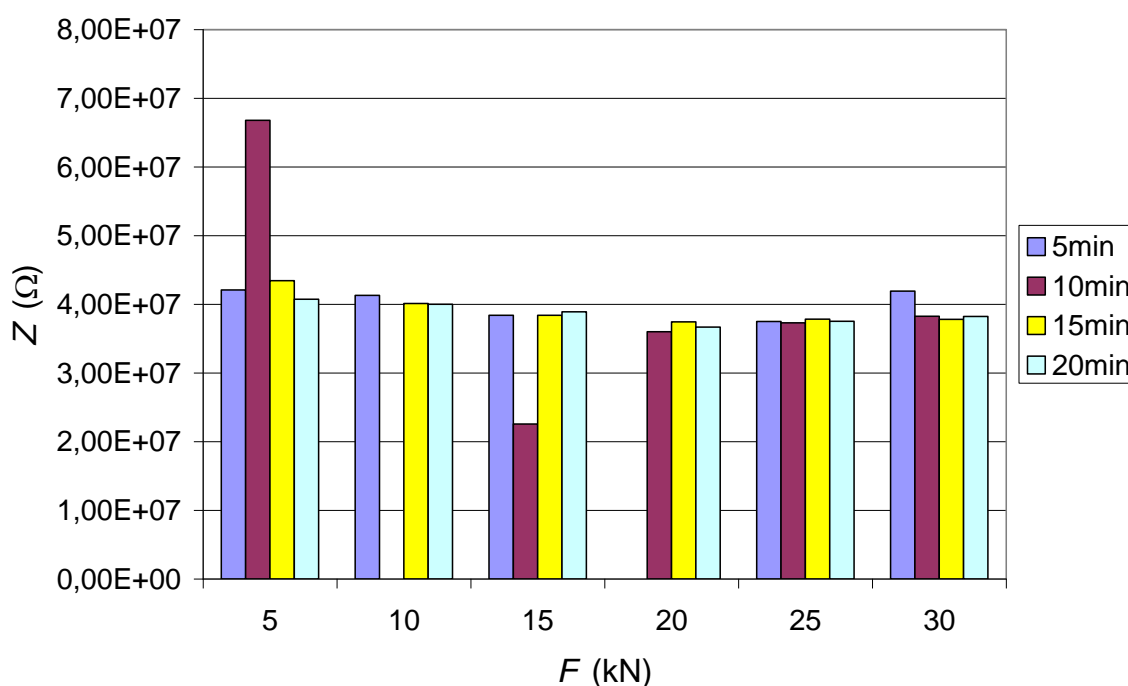
Obr. 16: Závislosti relativní permitivity jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 75°C . Měřeno při $f = 1\text{MHz}$.



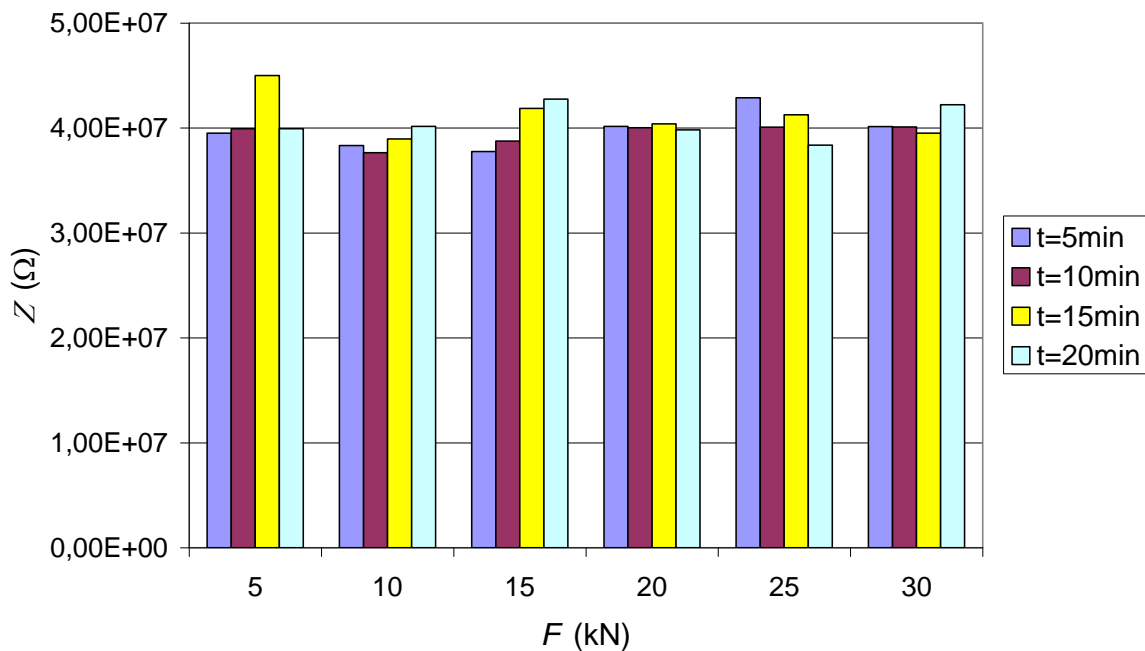
Obr. 17: Závislosti relativní permitivity jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 80°C . Měřeno při $f = 1\text{MHz}$.

Porovnáním jednotlivých grafických závislostí lze konstatovat, že nejlepších výsledků dosáhly vzorky laminované teplotou 75°C a tlaky 15kN až 25kN. Důkazem je naměření nejvyšších hodnot kapacit respektive relativních permitivit těchto vzorků a tudíž nejmenší počet defektů ve struktuře. Vyjdeme z předpokladu, že relativní permitivita vzduchu je rovna jedné a relativní permitivita LTCC substrátu HL2000 je udávaná výrobcem 7,3 (měřeno při frekvenci 2,5 GHz) [5]. Bude-li objemový podíl vzduchu v dielektriku vzrůstat vlivem vyššího počtu delaminací ve struktuře, bude výsledná kapacita struktury klesat. U ostatních vzorků nešlo s určitostí stanovit kvalitu laminace na základě měření kapacity, protože zbylé vzorky vykazovaly přibližně stejné hodnoty. Výjimkou byly dva vzorky. Vzorek laminovaný teplotou 75°C, tlakem 5kN po dobu 10min a vzorek laminovaný teplotou 80°C, tlakem 5kN po dobu 15min. Oba tyto vzorky měly nižší relativní permitivitu oproti ostatním vzorkům. Důvodem byla úplná delaminace struktury, při které došlo k vytvoření puchýřku po celé ploše struktury.

Měření impedance:



Obr. 18: Závislosti impedance jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 75°C. Měřeno při $f = 1\text{kHz}$.



Obr. 19: Závislosti impedance jako funkce hodnot laminačního tlaku F , času t a teploty 80°C
Měřeno při $f = 1\text{kHz}$.

Z naměřených hodnot opět plyne, že nejlepšími hodnotami dosahovaly vzorky laminované teplotou 75°C a tlaky 15kN až 25kN . Těmto vzorkům odpovídaly nejnižší hodnoty impedancí a tudíž nejmenší výskyt defektů ve struktuře. Výše zmíněné dva vzorky, u kterých došlo ke vzniku největších delaminací, vykazují nejvyšší naměřené hodnoty impedancí.

3.1.4 Zhodnocení experimentu

Z výsledků získaných experimentálním měření byla patrná změna parametrů testovaných vzorků v závislosti na měnících se laminačních parametrech. Tyto změny nebyly natolik výrazné a nešlo s jednoznačností říci, který z parametrů měl nejvýraznější vliv na tvorbu defektů ve struktuře. Z naměřených hodnot bylo možné určit přibližný interval ve kterém docházelo k laminacím s minimem defektů. Jednalo se o teplotu 75°C a tlaky v rozsahu 15kN až 25kN . Z měření dále plyne, že časový interval po kterou byl vzorek laminován má nejmenší vliv na tvorbu defektů ve struktuře.

Výrobce udává pro substrát HL2000 dobu laminace 10min . Tento čas bude vždy záviset na počtu laminovaných vrstev. S rostoucím počtem vrstev bude nutný delší čas nutný k prostupu tepla strukturou, tak aby byla zajištěna stejná teplota mezi všemi vrstvami

laminované struktury. V tomto experimentu byla doba laminace s ohledem na počet vrstev zkrácena na přibližně 5min.

Změny materiálových parametrů vyvolané tvorbou defektů ve struktuře byly často zkráceny nepřesnostmi, které byly způsobeny během výroby vzorků. Hlavním zdrojem nepřesnosti měření bylo nedokonalé sesouhlasení elektrod, které byly tisknuty na ručním sítotiskovém zařízení. Nepatrné nesouhlasení elektrod vedlo k snížení efektivní plochy, které vyvolalo zkrácení hodnot naměřené impedance a kapacity vzorků. Tyto změny způsobené nepřesnostmi během výroby měly často vyšší vliv na výslednou hodnotu kapacity, než dutiny vzniklé uvnitř struktury vlivem delaminace. Výše použité metody pro detekci poruch jsou vhodné zejména pro větší delaminace, při kterých má vzduch uvnitř dutiny měřitelný vliv na výsledné materiálové vlastnosti struktury.

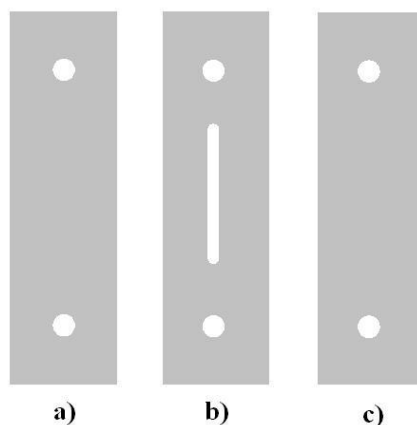
Další část práce byla zaměřená na zkoumání vlivu parametrů laminace struktur obsahující mikrokanálky. Kvalita laminace byla analyzována pomocí výše popsaného optického mikroskopu.

3.2 Výroba testovaného vzorku s mikrokanálkem

Struktura byla vytvořena ze tří vrstev substrátu HL2000 o rozměrech 10mm x 35mm. První vrstva je základní a tvoří dno kanálku (a). Základní vrstva byla překryta druhou vrstvou v které byl vyřezán kanálek šířky 500 μm (b). Třetí vrstva tvoří kanálek a celou strukturu uzavírá do jednoho hermeticky celku (c). Do každé ze tří vrstev byly vyříznuty technologické otvory potřebné k přesnému sesouhlasení během laminace. Celá struktura (základní tvar, technologické otvory a mikrokanálek) byly řezány Nd: YAG laserem Aurel. Jednotlivé vrstvy substrátů jsou zobrazeny na obr. 20.

Parametry řezů byly nastaveny na hodnoty:

- proud: 17A,
- rychlosti pohybu: 3mm/s,
- frekvence: 1,5kHz.



Obr. 20: Jednotlivé vrstvy struktury obsahující mikrokanálek.

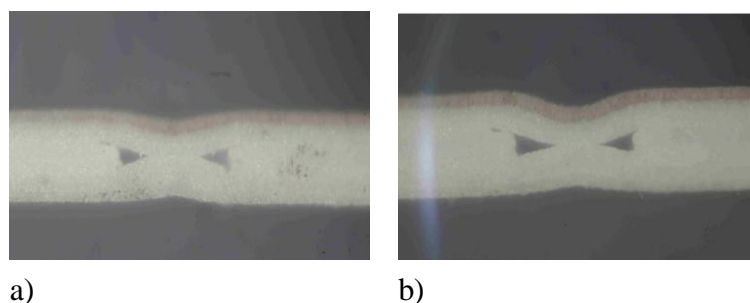
Po sesouhlasení pásků následoval technologický krok a to anaxiální laminace při které byly použity stejné laminační parametry jako v předchozím případě. Následně byly všechny LTCC vzorky vypáleny v peci podle definovaného vypalovacího profilu pro substrát HL2000, který je uvedený v teoretické části. Po výpalu následovalo příčné narýchování všech vzorků pomocí laseru a jejich zlomení. Dále byla provedena analýza příčného řezu struktury.

3.2.1 Zhodnocení experimentu

Z výsledku pozorování vyplývá, že největším problémem byl průvės horní části kanálku. Z pohledu laminační teploty a působícího tlaku bylo patrné, že k nejmenším deformacím docházelo u teploty 65°C. V rozmezí tlaků od 10kN do 20kN si struktura zachovávala tvarovou stálost a nedocházelo vůbec nebo k nepatrným průvėsům horní části kanálku. Působením vyšší laminační teploty (70-80°C) docházelo k tomuto nežádoucímu jevu při stále nižším laminačním tlaku. Zvyšující se laminační teplota způsobila pokles meze průtažnosti (kluzu) struktury, při které začíná docházet k výrazné nevratné plastické deformaci.

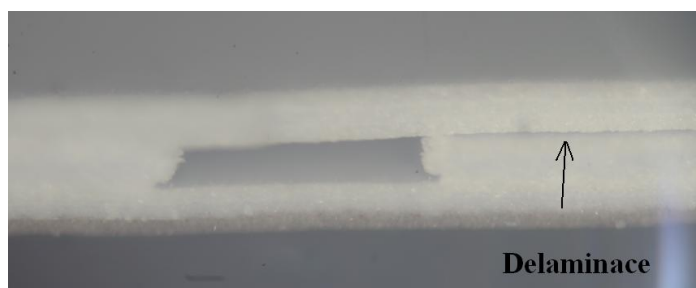
Tento fakt byl ověřen během analýzy jednotlivých vzorků (viz. obr. 21 a příloha 1). Porovnávány byly vzorky, při kterých byl kanálek zcela zhroucen, tedy došlo k spojení spodní i vrchní části, a tím byla značně omezena průchodnost kanálku. U teploty 65°C došlo k prvnímu zániku kanálku při tlaku 25kN (čas 15min). U teploty 80°C došlo k zániku již při tlaku 15kN (čas 20min). Z výsledků vyplývá, že kvalita laminace závisí na kombinaci působícího tlaku a teploty v určitém časovém intervalu. U nižší laminační

teploty může být aplikován vyšší tlak a u vyšší laminační teploty naopak nižší tlak. Výsledek laminace byl v obou případech stejný.



Obr. 21: Vzorky laminované a) 65°C, 25kN, 15min, b) 80°C, 15kN, 20min.

Opačným případem byl vznik delaminací vyskytující se nejčastěji u tlaku 5kN. Tento tlak byl z pohledu laminace zcela nevyhovující pro jakoukoli teplotu. V nejhorším případě nedošlo během laminace vůbec ke spojení vrstev LTCC a struktura se po vyjmutí z laminační šablony rozpadla na jednotlivé pásy (vzorek laminovaný teplotou 65°C, tlakem 5kN po dobu 5min). Příklad vzniklé delaminace po výpalu je zobrazen na obr. 22.



Obr. 22: Delaminace uvnitř struktury.

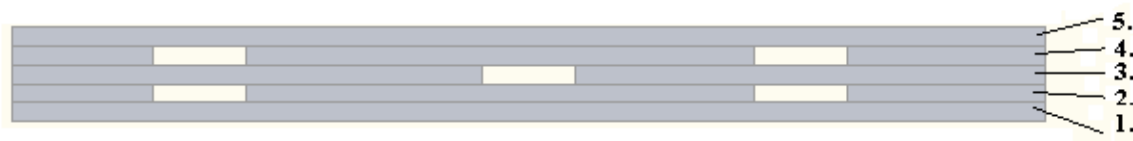
Z pohledu času po kterou byla prováděna laminace nelze s určitostí konstatovat, jaká je ideální hodnota tohoto parametru. Vždy bude doba laminace závislá na zvolené teplotě, tlaku a počtu laminovaných vzorků. Optimální je volit čas tak, aby došlo k vyhřátí celé struktury. V našem případě máme strukturu složenou ze tří pásků. K vyhřátí struktury dochází v relativně krátkém čase. Proto je doporučená doba přibližně kolem 5 min.

3.3 Výroba testovaného vzorku se systémem mikrokanálek

Z výsledků předchozího experimentu byly vybrány neoptimálnější parametry teploty, tlaku a času, při kterých docházelo k nejmenším deformacím kanálek a tyto laminační podmínky byly aplikovány na strukturu složenou z pěti vrstev keramiky LTCC HL2000 o rozměrech (30 x 35mm). Cílem tohoto experimentu bylo prozkoumat vliv parametrů laminace na síť mikrokanálek šířky 500 μ m. Minimální vzdálenost mezi jednotlivými kanálky byla volena 1mm s ohledem na návrhové pravidla pro dimenzování vícevrstevných struktur obsahující propoje, mikrokanálky nebo dutiny. Příčný řez struktury je zobrazen na obr. 23. Postup výroby struktury byl shodný jako v předchozím experimentu (nařezání substrátu, sesouhlasení vrstev, laminace, výpal, naryhování, zlomení).

Optimalizované laminační parametry:

- teplota: 65°C, 70°C, 75°C, 80°C,
- čas: 5min, 10min,
- tlak: 10kN, 15kN, 20kN.



Obr. 23: Příčný řez struktury obsahující síť mikrokanálek.

3.3.1 Zhodnocení experimentu

Z pozorování vyplývá, že u centrálního kanálku nedocházelo k výrazné tvarové deformaci prakticky u žádného zkoumaného vzorku (spojení vrchní a spodní části kanálku bylo pozorováno pouze u vzorku laminovaného teplotou 80°C, tlakem 20kN po dobu 10min). Tyto výsledky odpovídaly hodnotám předchozího experimentu. Odlišným případem byly dvojice kanálek umístěných na levé a pravé straně vzorku. Z pohledu sesouhlasení jednotlivých vrstev byla patrná poměrně velká nepřesnost mezi vrstvou 2 a 4. Požadavkem bylo umístění jednotlivých vrstev v laminační šabloně tak, aby byly kanálky osově souměrné. Z obr. 24 je patrná nepřesnost sesouhlasení řádově v desítkách mikrometrů. Z pohledu laminace lze konstatovat, že průvěsy stěn kanálek závisejí nejen na aplikovaném tlaku, teplotě a času, ale i na počtu vrstev. Největší vliv na tvar sousedních kanálek má vrstva 3, která projevovala největší plastickou deformaci ve formě zvlnění zapříčiněnou pravděpodobně až během výpalu.



Obr. 24: Příčný řez znázorňující nepřesné sesouhlasení jednotlivých kanálků.

Dalším nežádoucím jevem byla puchýřkovitost povrchu vyskytující se u několika vzorků. V tomto případě výsledky neukazují, že by jejich vznik závisel na laminačních parametrech. Puchýřky byly pozorované nahodile u vzorků laminovaných teplotou 70°C a 80°C (nezávisle na tlaku a době laminace). S největší pravděpodobností byl vznik tohoto defektu způsoben znečištěním substrátu během předvýpalových operací. Plyny vzniklé rozkladem nečistot neměly kudy opustit strukturu a tím způsobily vznik puchýřků na povrchu substrátu. Teplota vyhoření nečistot byla pravděpodobně nad hranicí první fáze výpalu (předehřevu).



Obr. 25: Puchýřek vytvořený na povrchu vzorku.

Obecně lze konstatovat, že struktura obsahující systém mikrokanálků vykazovala nejmenší deformace při laminačním tlaku 10kN, 15kN a teploty 65°C, 70°C. Vyšší aplikovaný tlak (20kN) nevratně deformoval zejména vrstvu 3, která projevovala největší plastickou deformaci ve formě zvlnění a tím negativně ovlivnila výsledný tvar krajních dvojic kanálků. Z pohledu času po kterou byla prováděna laminace i nadále nelze s určitostí konstatovat, jaká je ideální hodnota tohoto parametru. V tomto případě máme strukturu složenou z pěti vrstev, proto je doporučena doba stejná jako v předchozím experimentu, a to 5 min.

3.4 Aplikační možnost chlazení pomocí LTCC.

Teplotní management je v dnešní době jedním z hlavních problémů v návrhu pouzder pro elektronické systémy. Moderní pouzdra polovodičových čipů se svojí velikostí stále přibližují vlastní velikosti čipu. S tímto trendem roste hustota montáže aktivních prvků na jednotku plochy a tím dochází ke generaci většího množství tepla, které je nutné odvést ze substrátu.

Tato část práce poskytuje přehled o aplikační možnosti využití LTCC technologie obsahující mikrokanálek, kterým protéká chladicí kapalina. Tato koncepce zvyšuje schopnost odvodu tepla z čipu, který je připojen na substrát. Výhodou tohoto systému je jeho kompaktnost a možnost zvýšení chladicího účinku změnou některého z parametrů chladicí kapaliny (teplota nebo rychlost proudění).

Pro provedení analýz teplotních modelů byla použita metoda konečných prvků, která slouží k simulaci daného fyzikálního modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého prostředí do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Na tomto principu pracuje několik simulačních programů. V praxi nejpoužívanějšími zástupci jsou ANSYS a COMSOL Multiphysic. V této práci byl využit simulační program COMSOL Multiphysic.

3.4.1 Úvod do programu COMSOL Multiphysic

Program umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) metodou konečných prvků. Obecně jsou všechny úlohy řešitelné na základě definice prostředí, které PDE popisuje a zadaným okrajovým podmínkám na plochách, hranách nebo bodech v daném geometrickém modelu. Řešený geometrický model, který může znázorňovat montáž čipu na substrát LTCC, je zobrazen v grafickém editoru. Je nutné zvolit fyzikální vlivy působící na zobrazenou geometrii. Pokud je sledován proces zahřívání nebo chlazení součásti, je třeba zvolit PDE popisující šíření tepla v tuhém, kapalném, či jiném prostředí. Comsol Multiphysics obsahuje knihovnu PDE, které definují různé aplikační režimy (Heat Transfer Module, MEMS module atd.)[17].

Pracovní postup při modelování úlohy lze shrnout do několika kroků. Prvním krokem je vytvoření geometrie řešeného modelu ve zvoleném geometrickém prostoru. Dále následuje zadání okrajových podmínek pro zvolenou aplikaci. Pokud je aplikací více (multifyzikální úlohy), je třeba postupně zadávat okrajové podmínky pro každou aplikaci zvlášť. Po nastavení okrajových podmínek modelu následuje vytvoření výpočetní sítě, v jejíchž uzlových bodech budou vypočtena potřebná data. Pro řešení modelu lze využít několik typů řešičů, které řeší lineární i nelineární úlohy, úlohy ve frekvenční a časové oblasti. Konečné zpracování výsledků spočívá v zobrazení vypočtených proměnných ve zvolených jednotkách pomocí barevných map, izočar, šipek, řezů a mnoho dalších.

3.4.2 Simulace pasivního chlazení.

V prvním případě byla provedena simulace rozložení teploty uvnitř struktury obsahující čip vsazený do keramického pouzdra. Požadavkem byl optický přístup k oběma stranám čipu z důvodu zachování správných optických vlastností čipu. Tímto požadavkem však došlo k snížení efektivní plochy určené k chlazení čipu.

Simulovaný model byl nejprve modelován ve 2D zobrazení. Jelikož je struktura symetrická, je z důvodu ušetření výpočetního výkonu simulováno pouze jedno rozhraní mezi čipem a substrátem LTCC. Jemnější volba sítě konečných prvků umožní získat přesnější výsledky simulované struktury. Pro simulování tepelných účinků modelu byl použit Heat Transfere Module. Tento model poskytuje kombinaci přenosu tepla pomocí proudění, vedení a záření. Je vhodný zejména pro aplikační úlohy jako je chlazení elektroniky a energetických zařízení, tepelné zpracování ve výrobě, technologie v medicíně a bioinženýrství.

Definice modelu:

Prvním krokem bylo vytvoření geometrie v grafickém editoru COMSOLu. V další části byl jednotlivým elementům přiřazen materiál z knihovny prvků. Parametry materiálů jsou uvedeny v tab. 2. Po přiřazení materiálů následovalo nastavení okrajových podmínek. Nejprve byl vybrán tepelný zdroj reprezentovaný křemíkovým čipem, jehož maximální teplota by neměla přesáhnout 150°C (rozptýlený ztrátový výkon ve formě tepla). Výchozí model byl dále rozšířen o zlatý mikrodrátek, který slouží k elektrickému propojení čipu s okolím a současně odvádí teplo z jeho povrchu. Zpravidla bývá mikrodrátek „zakápnut“ epoxidovým lepidlem, které slouží k jeho mechanické ochraně a současně se částečně podílí na odvodu tepla ze struktury.

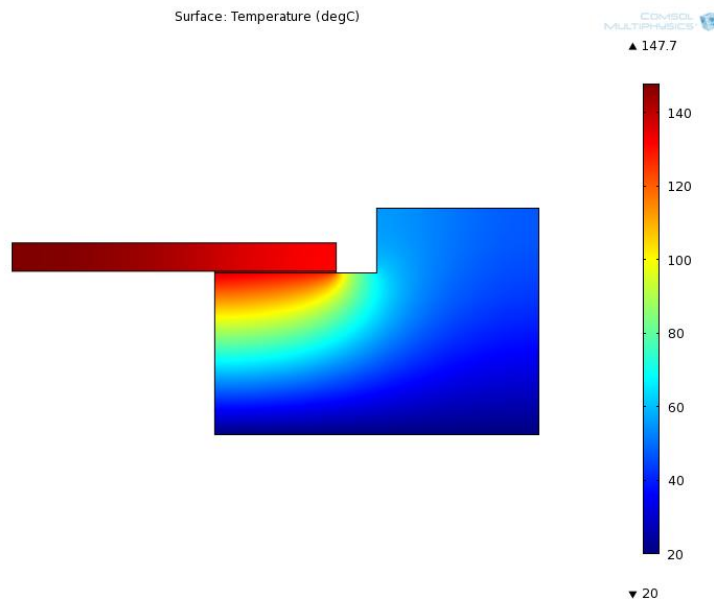
Šíření tepla v tomto modelu je zprostředkováno dvěma jevy a to vedením tepla (*Conduction*) a prouděním (*Covection*). Podmínkou vedení tepla je existence spojitého látkového prostředí a umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie. V našem případě je to rozhraní mezi čipem, lepidlem EPO-TEK H31D, zlatým mikrodrátkem a substrátem LTCC. Jelikož simulovaný model není ve vakuu, bylo nutné nastavit odvod tepla do okolí prouděním. Povrchové chlazení lze popsat pomocí nástroje Convective Cooling. Tento nástroj umožňuje volbu externího chladicího prostředí (voda, vzduch nebo transformátorový olej). V našem případě byl zvolen vzduch, kterému byla dále dodefinována jeho teplota (20°C) a tlak (101,3kPa) a rychlost (1m.s⁻¹).

Tab. 2: Materiálové parametry struktury.

Název materiálu	Název parametru	Hodnota
LTCC	Hustota	2900kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	3W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	730J.kg.m ⁻³
Si(C)	Hustota	2329kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	130W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	700J.kg.m ⁻³
EPO-TEK H31D	Hustota	5900kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	3,48W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	730J.kg.m ⁻³
HYSOL EO 7038	Hustota	3100kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	0,4W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	990J.kg.m ⁻³
Zlato	Hustota	19300kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	317W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	129J.kg.m ⁻³

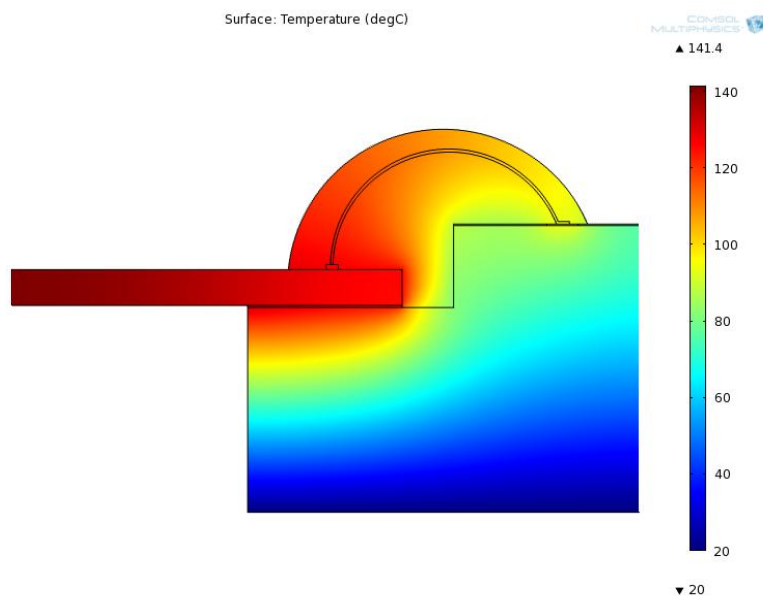
Výsledek simulace:

Na obr 26 je zobrazeno rozložení teploty v rovnovážném stavu. Nejvyšší teplota je přibližně 147°C vyskytující se na levém okraji čipu simulovaného modelu (reprezentující střed reálného modelu), kde dochází k odvodu tepla mezi čipem a okolním prostředím prouděním. Tento mechanismus přenosu energie má nejmenší vliv na odvod tepla. Naopak nejchladnější místo na čipu se nachází na rozhraní čipu, lepidla a substrátu LTCC (přibližně 137°C). V tomto místě je nejintenzivnější odvod tepla způsobený vedením.



Obr 26: Simulace odvodu tepla z křemíkového čipu.

Rozšířením modelu o mikrodrátek došlo k intenzivnějšímu odvodu tepla díky vysoké tepelné vodivosti zlata. Tento jev zapříčinil pokles maximální teploty na čipu přibližně o 6°C. Tepelná vodivost epoxidového lepidla je v porovnání se zlatem několikanásobně nižší a v odvodu tepla se podílí jen nepatrně.



Obr. 27: Simulace tepelného rozložení ve struktuře obsahující zlatý mikrodrátek.

3.4.3 Simulace aktivního chlazení

V tomto případě byla provedena simulace rozložení teploty struktury obsahující čip uložený na substrátu LTCC. Struktura LTCC obsahovala mikrokanálek, kterým proudila chladicí kapalina reprezentována vodou. Navržený model byl díky větší přehlednosti modelován ve 3D zobrazení. Touto volbou byla získána komplexnější představa o šíření tepla celou strukturou. Šířka a výška kanálku byla zvolena 500 μ m.

Jako výchozí model této simulace byl zvolen Conjugate Heat Transfer z modulu Heat transfer, který umožňuje simulovat společné šíření tepla v pevných látkách a v kapalinách. Následující simulace byla řešena pro šíření tepla při laminárním průtoku a statickém průběhu.

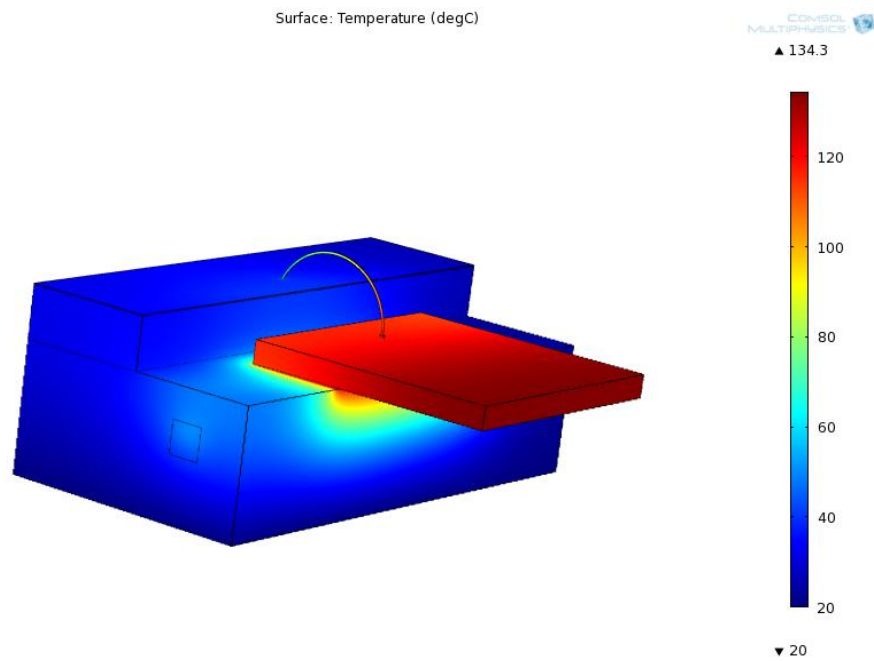
Definice modelu:

Vytvoření geometrie bylo provedeno v programovém prostředí Autodesk Inventor, který nabízí sadu nástrojů pro 3D navrhování modelů. Výsledný model byl importován do grafického prostředí COMSOLu. V další části byl jednotlivým elementům přiřazen materiál z knihovny prvků. Parametry materiálů jsou uvedeny v tab 3. Následovalo nastavení okrajových podmínek totožných jako v předchozím případě. Jedinou změnou bylo rozdělení modelu na oblast ve kterých se teplo šíří v pevných látkách a v kapalině. Následně bylo nutné dodefinovat vlastnosti kapalného prostředí. Základní podmínkou bylo přiřazení vstupu a výstupu chladicí kapaliny a její rychlost včetně teploty. Pro níže uvedené modely platí rychlost proudící kapaliny 0,09m/s.

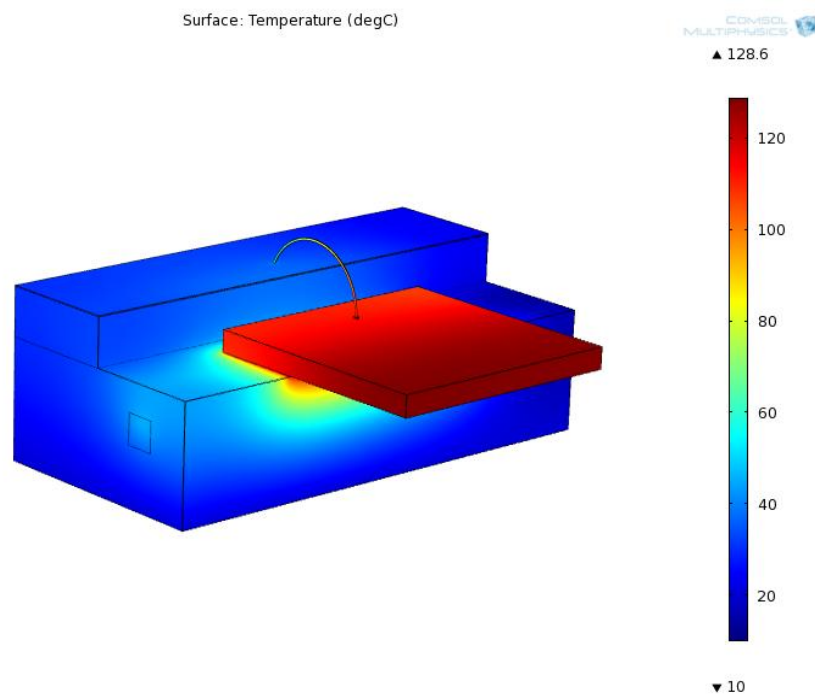
Tab. 3: Materiálové parametry.

Název materiálu	Název parametru	Hodnota
LTCC	Hustota	2900kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	3W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	730J.kg.m ⁻³
Si(C)	Hustota	2329kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	130W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	700J.kg.m ⁻³
EPO - TEK H31D	Hustota	3900kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	3,48W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	690J.kg.m ⁻³
Voda	Hustota	999kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	0,169W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	4193J.kg.m ⁻³
Zlato	Hustota	19300kg.m ⁻³
	Tepelná vodivost	317W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	Tepelná kapacita	129J.kg.m ⁻³

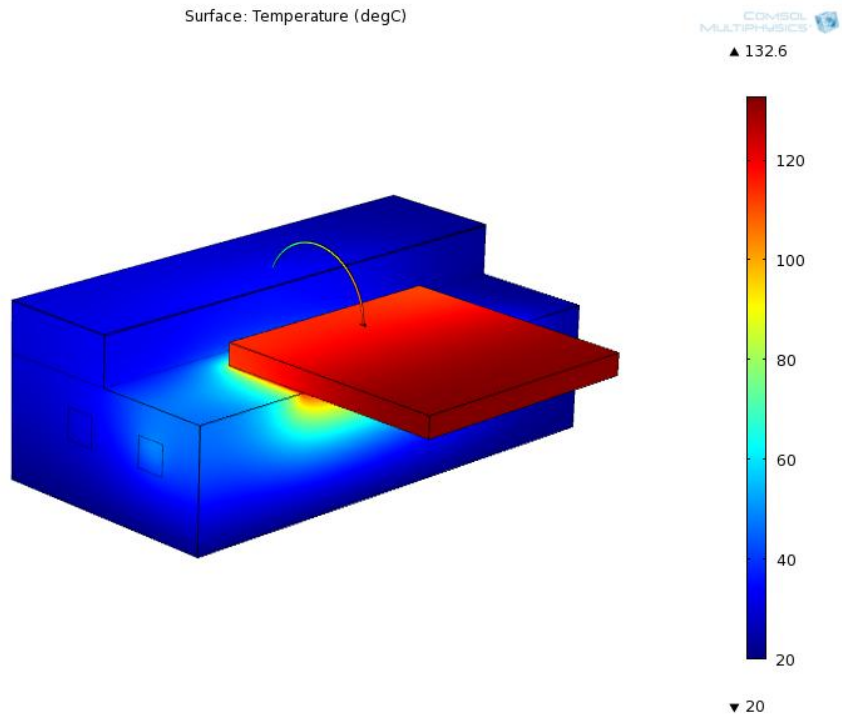
Zpracování výsledků:



Obr. 28: Rozvržení teploty ve 3D struktuře (teplota vody: 20°C).



Obr. 29: Rozvržení teploty ve 3D struktuře (teplota vody: 10°C).



Obr. 30: Rozvržení teploty ve 3D struktuře pro dvojici mikrokanálek (teplota vody: 20°C).

Zhodnocení simulovaných výsledků:

Z výsledků simulací aktivního chlazení je patrný pokles teploty celé struktury. Simulovaná 3D struktura obsahovala mikrokanálek, který byl dimenzován, tak aby se nacházel v nejtěsnější blízkosti tepelného zdroje (čipu). V tomto místě přejímala kapalina největší množství ztrátového výkonu ve formě tepla a odváděla jej pryč ze struktury (obr. 28). Chladicí účinnost struktury byla možná zvýšit snížením teploty kapaliny v mikrokanálku. Tím vzrostl teplotní gradient a tedy i tepelný tok mezi kapalinou a čipem, který způsobyl výraznější odvod tepla chladicí kapalinou, a tím následovalo snížení teploty struktury (obr. 29). Poslední model byl doplněn o druhý mikrokanálek, který byl umístěn vedle stávajícího. Ze simulace vyplývá, že druhý mikrokanálek měl výrazně nižší vliv na odvod tepla (obr. 30).

4 Závěr

Cílem práce s názve Laminace nízkoteplotní keramiky bylo prostudovat různé vlivy ovlivňující kvalitu laminace nízkoteplotní keramiky s pokusem nalézt vhodnou kombinaci laminačních parametrů (tlak, teplota, čas) a následně vhodnou metodou ověřit výslednou kvalitu laminované struktury.

V první části této práce byl zkoumán vliv laminace na jednoduchou dvojrstvou strukturu velikosti 30 x 35mm. Kvalita laminace byla zjišťována pomocí měření základních materiálových veličin a to impedance a kapacity. Z naměřených hodnot bylo možné určit přibližný interval ve kterém docházelo k laminaci s minimem defektů. Jednalo se o teplotu 75°C a tlaky v rozsahu (15-25)kN po dobu 5min. U ostatních vzorků nebyl výsledek natolik průkazný, aby bylo možné stanovit jaký vliv má laminace na vznik defektů uvnitř struktury. Důvodem byla nepřesnost metody dána konstrukčními nepřesnostmi při realizaci elektrod (viz. blíže kapitola 3.1.4).

Další část práce byla zaměřena na zkoumání vlivu laminace na deformace mikrokanálek šířky 500 μ m. První struktura byla složena ze tří vrstev, kde byl kanálek tvořen prostřední vrstvou. Z výsledků experimentu bylo patrné to, že kvalita laminace závisí na kombinaci působícího tlaku a teploty v určitém časovém intervalu. Tudiž lze dosáhnout stejného výsledku při odlišných parametrech laminace (viz. příklad uvedený v kapitole 3.2.1). Z tohoto experimentu byly vybrány neoptimálnější laminační parametry, při kterých nedošlo úplnému zhroucení kanálku (spojení vrchní a spodní části) a těmito parametry byly laminovány vzorky obsahující síť mikrokanálek viz obr. 23. V tomto experimentu vykazovaly největší deformace dvojice kanálek umístěné na obou stranách od centrálního kanálku. Změna tvaru byla způsobena deformací prostřední vrstvy oddělující oba kanálky. Tento jev nastal pravděpodobně až během výpalu, při kterém došlo k snížení viskozity skelné složky a vlivem vnitřního pnutí vyvolané po laminaci došlo k zvlnění vrstvy. Během výpalu byl pozorován vzniku puchýřků na povrchu několika vzorků, které byly pravděpodobně zapříčiněné kontaminací povrchu substrátu během předvýpalové fáze. Jako neoptimálnější laminační parametry se v tomto experimentu jevily tlaky 10kN, 15kN a teploty 65°C, 70°C.

V poslední části práce byla demonstrována aplikační možnost využití LTCC jako pouzdra s integrovaným chladícím systémem. Veškeré simulace byly provedeny v programovém prostředí COMSOLu. Z výsledků je patrná možnost zvýšení chladícího účinku díky možnosti snadné realizace mikrokanálek uvnitř struktury.

5 Použitá literatura

- [1] Advanced ceramics in electronics application. In TRNKA, Pavel. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. Katedra technologií a řešení : Elektrotechnická fakulta Plzeň, 2003 [cit. 2010-12-07]. Dostupné z WWW: <http://advances.uniza.sk/journal/2008/AEEE_Vol7_No3_2008/440-443_p_trnka.pdf>.
- [2] BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna, et al. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích* [online]. Praha : FCC Public s.r.o, 2008 [cit. 2010-11-26]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36505>.
- [3] HANUS, M. *Snímače tlaku vytvořený strukturou 3D*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 48 s.
- [4] HORVÁTH, Eszter. *Realizing fluidic microchannel in LTCC substrate*. Budapest, Hungary, 2009. 8 s. Oborová práce. Budapest University of Technology and Economics. Dostupné z WWW: <<http://mycite.omikk.bme.hu/doc/75549.pdf>>.
- [5] Heraeus [online]. 2007 [cit. 2010-12-10]. DESIGN GUIDELINES FOR LTCC. Dostupné z WWW: <<http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf>>.
- [6] IIT.Ltd [online]. 2007 [cit. 2010-11-26]. LTCC Consulting. Dostupné z WWW: <http://www.ltcc-consulting.com/What_is_the_LTCC>.
- [7] MALECHA, Karol; GOLONKA, Leszek J. *Microchannel fabrication process in LTCC ceramics*. Microelectronics Reliability [online]. 6.5.2008, 1, [cit. 2011-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [8] SZENDIUCH, Ivan, et al. *Mikroelektronika a technologie součástek*. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2007. 190 s.
- [9] ŠNITA, Dalimil. Metody a materiály pro vytváření chemických a biologických mikrosystémů. In *VÍCEFUNKČNÍ CHEMICKÉ A BIOCHEMICKÉ MIKROSYSTEMY* [online]. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2008 [cit. 2010-12-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.sbb.cz/docs/prednasky/vscht/pr11.materialy2.pdf>>.
- [10] TESARŮ, Václav. Mikrofluidika. *Automa* [online]. 2008, 10, [cit. 2011-04-24]. Dostupný z WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37953
- [11] IMANAKA, Yoshihiko. Multilayered LTCC. *Google books* [online]. 2006 [cit. 2012-02-06]. Dostupné z: <http://books.google.cz/>

- [12] THELEMANN, Torsten, Heiko THUST, Gernot BISCHOFF a Torsten KIRCHNER. *Liquid Cooled LTCC-Substrates for High Power*. [online]. 2000, 1-6 [cit. 2012-02-06]. Dostupné z <http://www.imaps.org/journal/2000/Q2/thelemann.pdf>.
- [13] JURKOW, Dominik. *Cold chemical lamination of ceramic green tapes*. Sciencedirect [online]. 2009[cit. 2012-02-06]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [14] SHAFIQUE, Farhan. *Fabrication of embedded microfluidic channels in low temperature co-fired ceramic technology using laser machining and progressive lamination*. Sciencedirect [online]. roč. 2010 [cit. 2012-02-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221911002846>
- [15] Agilent E4980A Precision LCR Meter [online]. [cit 2012-02-11]. Dostupné z WWW:[http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=715495&pageMode=OV &cc=US&lc=eng](http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=715495&pageMode=OV&cc=US&lc=eng)
- [16] SLOVÁK, M. *Obslužný SW pro RLC metr HIOKI 3532*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Kepr
- [17] HUMUSOFT. *HUMUSOFT* [online]. 2012 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>
- [18] Měření v elektrotechnice [online]. 2005[cit. 2012-05-07]. Dostupné z: http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni_v_elektrotechnice.pdf
- [19] KAVAN, P. *Analýza a využití laseru při obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 88s.

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulky obrázků znázorňující vliv laminačních parametrů na deformace mikrokanálku třívrstvé struktury LTCC.

Příloha 2: Tabulky obrázků znázorňující vliv laminačních parametrů na deformace mikrokanálků pětivrstvé struktury LTCC.


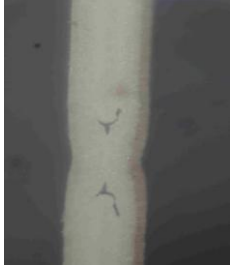
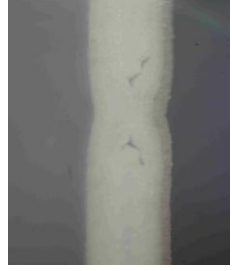
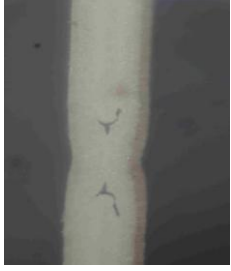
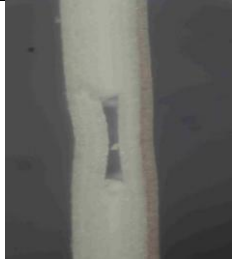
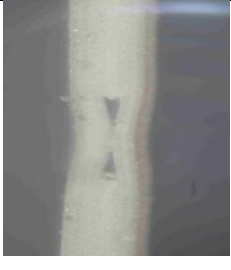


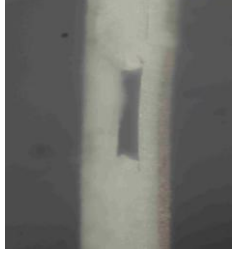


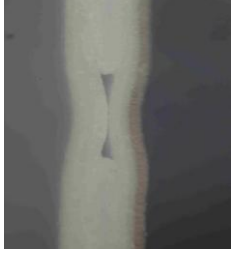
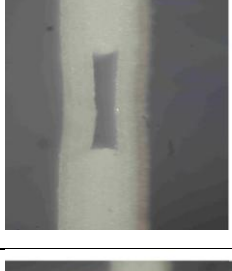




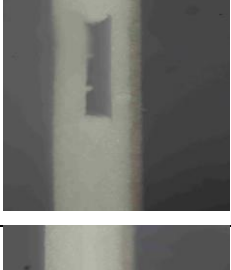

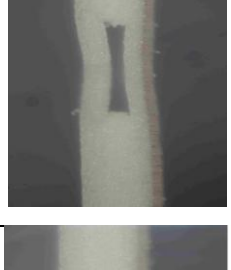
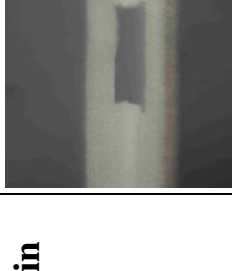
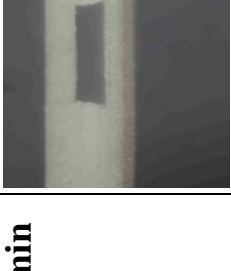
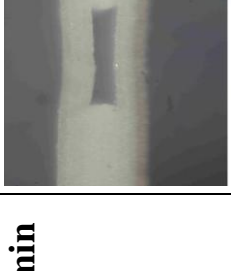
Příloha 3: Rozložení teploty na jednoosém lisu během laminace. Laminační teplota byla nastavena na 75°C .

Příloha 1


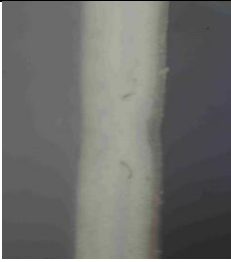


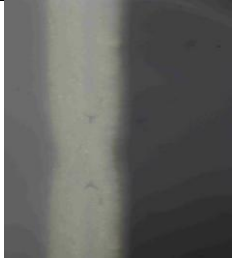
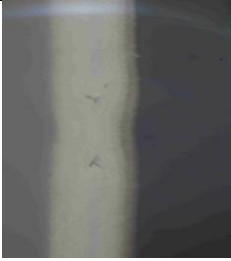


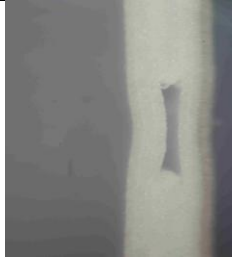
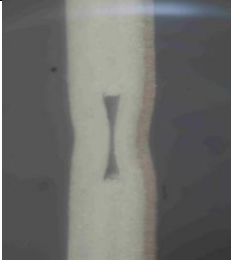
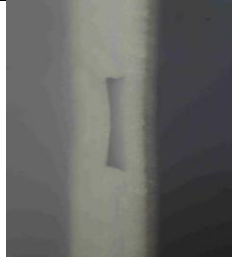
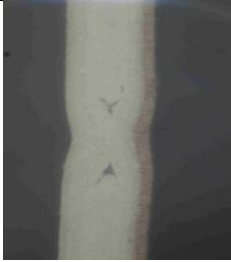

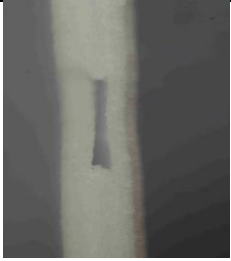




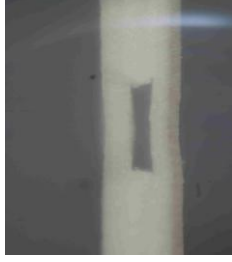
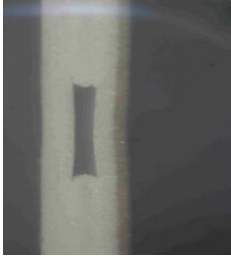

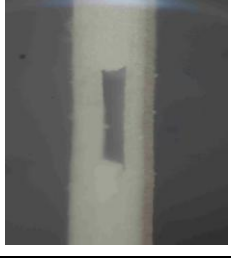
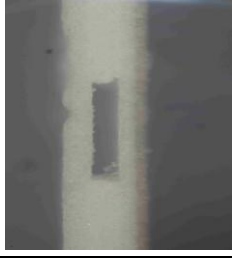

Tab. 1.1: Příčné řezy vzorků laminované různými parametry tlaku a času při teplotě 65°C.

30 kN				
25 kN				
20 kN				
15 kN				
10 kN				
5 kN				
	5 min	10 min	15 min	20 min


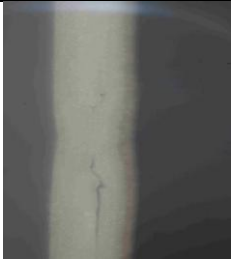
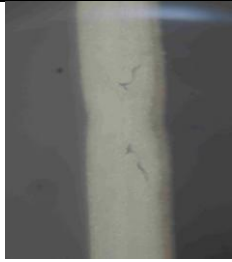
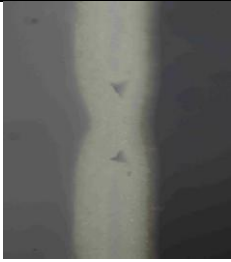
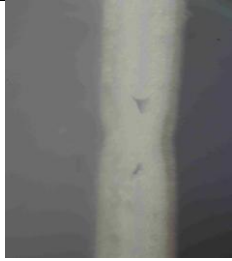



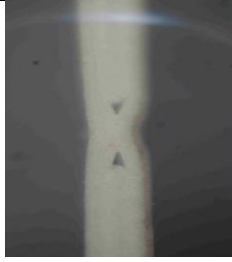
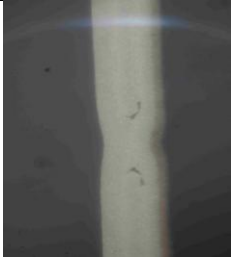
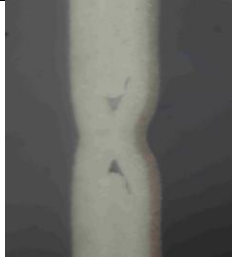






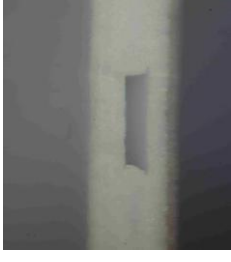



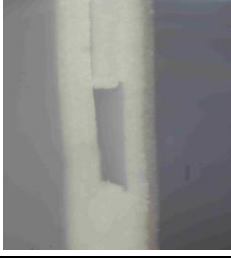
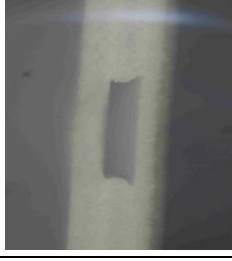

Tab. 1.2: Příčné řezy vzorků laminované různými parametry tlaku a času při teplotě 70°C.

30 kN				
25 kN				
20 kN				
15 kN				
10 kN				
5 kN				
	5 min	10 min	15 min	20 min

Tab. 1.3: Příčné řezy vzorků laminované různými parametry tlaku a času při teplotě 75°C.


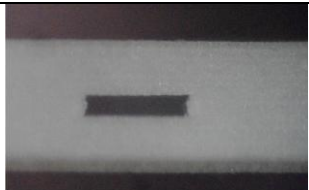





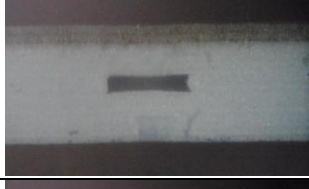
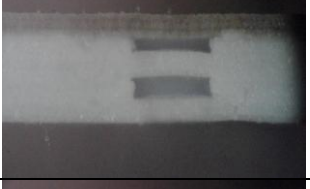

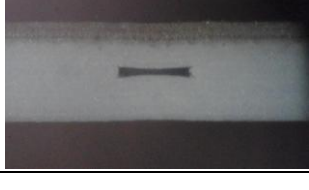


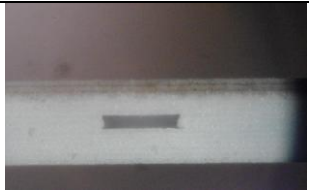

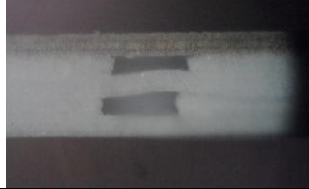
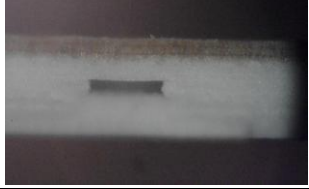
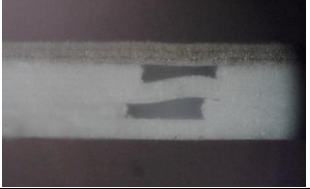

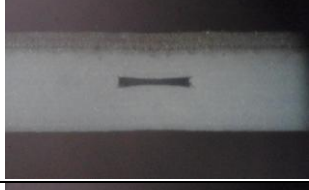


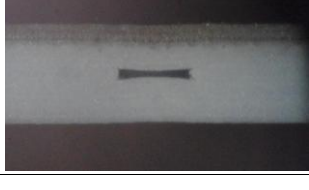

30 kN				
25 kN				
20 kN				
15 kN				
10 kN				
5 kN				
	5 min	10 min	15 min	20 min


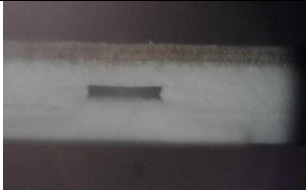
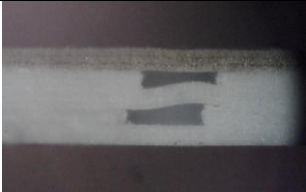
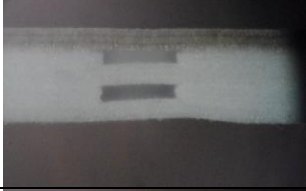
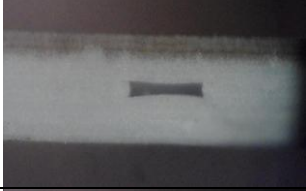

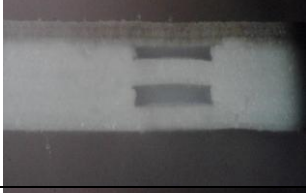
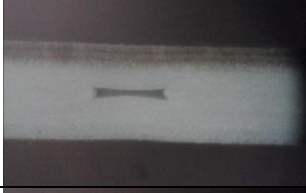




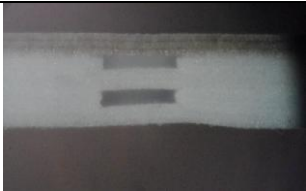

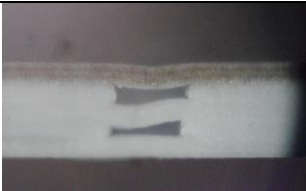
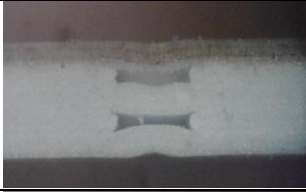




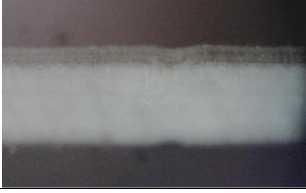
Tab. 1.4: Příčné řezy vzorků laminované různými parametry tlaku a času při teplotě 80°C.

30 kN				
25 kN				
20 kN				
15 kN				
10 kN				
5 kN				
	5 min	10 min	15 min	20 min

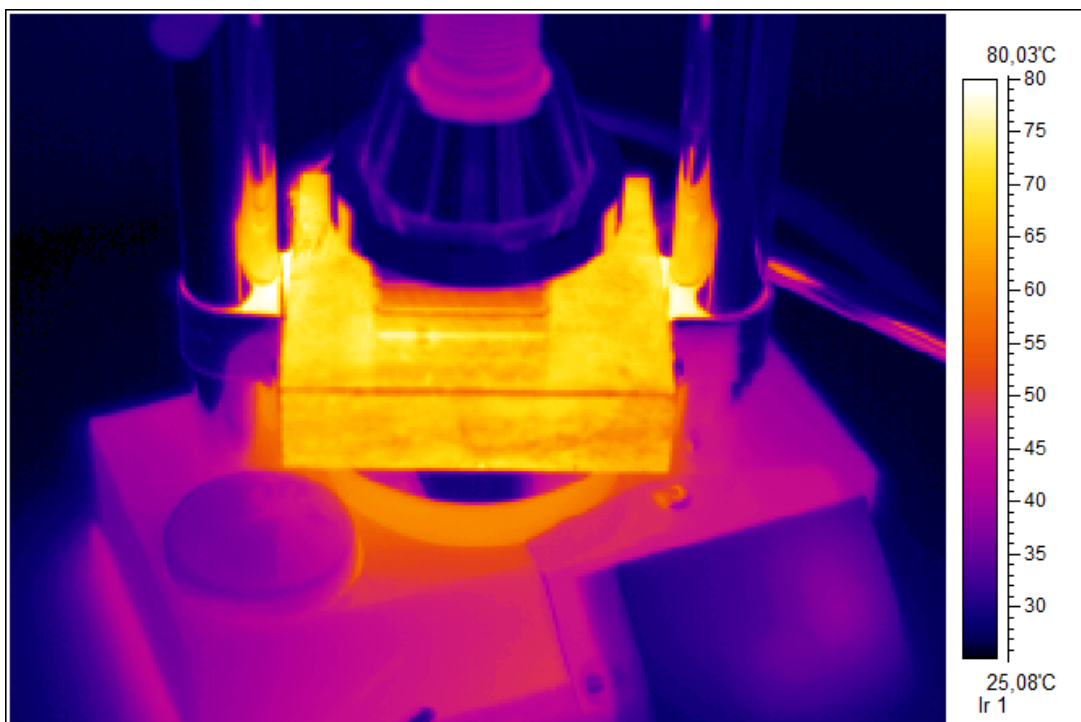
Příloha 2

Tab. 2.1: Příčné řezy vzorků laminované různými parametry tlaku po určitý čas při konstantní teplotě. Pzn. Každý řádek tabulky odpovídá průřezu jednoho vzorku.

65°C 10kN 5min			
65°C 15kN 5min			
65°C 15kN 10min			
65°C 20kN 10min			
70°C 10kN 10min			
70°C 15kN 10min			
70°C 20kN 5min			
70°C 20kN 10min			

75°C 10kN 5min			
75°C 10kN 10min			
75°C 15kN 5min			
75°C 20kN 5min			
80°C 10kN 10min			
80°C 15kN 10min			
80°C 20kN 10min			

Příloha 3



Obr. 3.1: Snímek z termokamery znázorňující rozložení teploty na jednoosém laminačním lisu.