



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**PROPOJOVACÍ TECHNOLOGIE PRO 3D ELEKTRONICKÉ
A MIKROELEKTRONICKÉ KONSTRUKCE**

INTERCONNECTION TECHNOLOGIES FOR 3D ELECTRONIC AND MICROELECTRONIC CONSTRUCTIONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Nicák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce je zaměřená na výzkum aplikačních možností pájených propojovacích struktur především pro použití s inovativními 3D strukturami sestavenými s využitím LTCC keramických materiálů, napařených i galvanicky upravených plošek a pájecích kuliček s pevným jádrem. Skládá se z několika hlavních částí. Na úvod navazuje teoretický rozbor současného stavu řešení a používaných technologií. Práce pokračuje definicí cílů s rozбором postupně prováděných experimentů s jejich výsledky. Závěr práce patří shrnutí výsledků a získaných poznatků.

Klíčová slova

Propojení, LTCC, keramika, 3D struktury, pouzdro, pájené spoje, pájecí kuličky

Abstract

The doctoral thesis is focused on research on application possibilities of soldered interconnection structures especially for the use with innovative 3D structures assembled using the LTCC ceramic materials, PVD deposited and galvanically modified pads, solid core solder balls. It consists of several main parts. Introduction is followed by theoretical survey of current situation and technologies. Thesis continues with introduction of main goals and with summary of successively performed experiments and their results. End of the work belongs to summary of results and gained knowledge.

Keywords

Interconnection, LTCC, ceramic, 3D structures, package, soldered joints, solder balls

Bibliografická citace

Nicák, M. *Propojovací technologie pro 3D elektronické a mikroelektronické konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 97 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci na téma „Propojovací technologie pro 3D elektronické a mikroelektronické konstrukce“ vypracoval samostatně pod vedením školitele Doc. Ing. Josefa Šandery, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 24.8.2016

.....

Ing. Michal Nicák



Tato práce vznikla v rámci centra CEITEC - Středoevropského technologického institutu s intenzivní pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.

Poděkování

Mé díky patří všem, kteří mě jakkoliv podporovali při tvorbě této práce, která vznikla na Ústavu mikroelektroniky. Děkuji mému školiteli Doc. Ing. Josefu Šanderovi, Ph.D. za rady, podněty a pomoc během realizace práce. Díky Doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za poskytnutí zajímavě vybavených laboratoří, materiál a mnoho možností prezentovat svoji práci. Velký dík patří i Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za poskytnutí cenných rad i laboratorního vybavení. Díky také patří Ing. Petru Kosinovi, Ph.D. za uvedení do problematiky LTCC a pomoc s realizací úvodních experimentů, dále Ing. Olze Švecové, Ph.D. a Ing. Boleslavu Psotovi, Ph.D. za pomoc se simulacemi struktur. Dík za pomoc s přístroji patří také Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. Za pomoc s výrobou osvitového zařízení a mnoho konzultací děkuji Ing. Martinu Klímovi, Ph.D. Vynechat nesmím ani cennou pomoc Ing. Vojtěcha Svatoše při depozici napařených vrstev.

Můj dík patří ale i mnoha dalším kolegům z VUT za drobnější, ale přesto důležité asistence a hlavně příjemnou spolupráci a přátelskou atmosféru, která provázela mé doktorské studium.

Na závěr bych také rád poděkoval svým rodičům za trpělivost a podporu nejen při psaní této disertační práce, ale i po celou dobu mého dlouhého studia na Vysokém učení technickém v Brně.

Tato práce vznikla za podpory grantů a v návaznosti na ně:

- Aplikace moderních montážních technologií a materiálů v elektrotechnickém průmyslu FR-TI1/072, 2009-2011.
- Integrované 3D vícevrstvé struktury a pouzdra s vnořenými (embedded) součástkami FEKT-S-10-18, 2010.
- Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů FEKT-S-11-5/962, 2011-2014.
- Pracoviště pro testování pevnosti pájených spojů FRVŠ G1 2738/2011, 2011.
- Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice FEKT-S-14-2168, 2014-2016.

Obsah

1	ÚVOD	11
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	13
2.1	KERAMICKÉ MATERIÁLY PRO ELEKTRONICKÉ VYUŽITÍ	13
2.2	TECHNOLOGIE LTCC	13
2.3	LTCC HERAEUS HERA-LOCK HL2000	15
2.4	MOŽNOSTI A POSTUPY REALIZACE STRUKTUR Z LTCC NA ÚSTAVU MIKROELEKTRONIKY	17
2.5	PÁJENÁ PROPOJENÍ MEZI KERAMICKÝMI SUBSTRÁTY	20
2.6	PROPOJENÍ MEZI KERAMICKÝMI SUBSTRÁTY FORMOU BGA	21
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	24
4	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	25
4.1	ÚVODNÍ TEST KOMPATIBILITY VODIVÝCH PAST PRO LTCC HL2000 V KOMBINACI S PÁJECÍMI KULIČKAMI	25
4.1.1	<i>Použité substráty a materiály</i>	<i>25</i>
4.1.2	<i>Pájení v parách a testy s LTCC</i>	<i>25</i>
4.1.3	<i>Zjištěné poznatky</i>	<i>26</i>
4.2	TEST REALIZACE „DIMPLED“ STRUKTUR SE SUBSTRÁTY LTCC HL2000	27
4.2.1	<i>Vytvoření otvorů v LTCC HL2000</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Testovací substrát BGA 225</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>Pájení struktury BGA 225</i>	<i>29</i>
4.2.4	<i>Teorie termomechanického namáhání struktur</i>	<i>30</i>
4.2.5	<i>Simulace struktur</i>	<i>31</i>
4.2.6	<i>Test pájených struktur</i>	<i>32</i>
4.2.7	<i>Zhodnocení prvních struktur</i>	<i>33</i>
4.3	POKROČILÝ TEST „DIMPLED“ STRUKTUR SE SUBSTRÁTY LTCC HL2000	34
4.3.1	<i>Nový testovací motiv BGA 64</i>	<i>34</i>
4.3.2	<i>Pokročilejší opracování LTCC</i>	<i>34</i>
4.3.3	<i>Laminace a finalizace LTCC struktury</i>	<i>35</i>
4.3.4	<i>Pájené struktury „dimpled“ LTCC a jejich inspekce</i>	<i>36</i>
4.4	TEST REALIZACE NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH STRUKTUR	38
4.4.1	<i>Postup přípravy základní měděné vrstvy</i>	<i>38</i>

4.4.2	Zesílení měděné vrstvy.....	39
4.5	PRUŽNÉ MĚDĚNÉ PLOŠKY NA KERAMICE.....	43
4.6	TEST PÁJENÍ NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH STRUKTUR	44
4.6.1	Příprava substrátů s měděným motivem BGA 64.....	44
4.6.2	Pájení substrátů s měděným motivem BGA 64.....	45
4.6.3	Zhodnocení substrátů s měděným motivem BGA 64.....	46
4.7	TEST REALIZACE NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH „DIMPLED“ STRUKTUR NA LTCC HL2000.....	48
4.7.1	Simulační rozbor „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami	48
4.7.2	Příprava „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami.....	50
4.7.3	Pájení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami.....	53
4.7.4	Zhodnocení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami	55
4.8	TESTOVACÍ STRUKTURA „DIMPLED“ LTCC S NAPAŘENÝMI SILNÝMI MĚDĚNÝMI VRSTVAMI.....	55
4.8.1	Příprava substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi.....	55
4.8.2	Pájení a zhodnocení substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi.....	56
4.9	SROVNÁNÍ PÁJECÍCH KULIČEK NA RŮZNÝCH SUBSTRÁTECH POMOCÍ TESTU STŘIHEM	58
4.9.1	Testovací zařízení pro zkoušky pevnosti.....	58
4.9.2	Příprava a postup srovnávacího testu stříhem	58
4.9.3	Vyhodnocení srovnávacího testu stříhem	59
4.10	TESTOVACÍ STRUKTURY VYUŽÍVAJÍCÍ PÁJECÍ KULIČKY S PEVNÝM JÁDREM	61
4.10.1	Zkoumané pájecí kuličky.....	61
4.10.2	Příprava substrátů a pájení.....	62
4.10.3	Vyhodnocení zapájených struktur.....	62
4.10.4	Propojení FR-4 + LTCC pájecími kuličkami SOL	63
4.10.5	Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami SOL.....	65
4.10.6	Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami Senju s Cu jádrem	66
4.11	VÍCEPATROVÁ LTCC STRUKTURA S PROKOVY A PÁJECÍMI KULIČKAMI S PEVNÝM JÁDREM	68
4.11.1	Příprava substrátů a pájení.....	68
4.11.2	Pájení a vyhodnocení zapájených struktur.....	70
4.11.3	Poznatky uplatnitelné při konstrukci univerzálního pouzdra:.....	72
4.12	SROVNÁNÍ SMÁČIVOSTI VYBRANÝCH POVRCHŮ.....	73
4.12.1	Příprava vzorků	73
4.12.2	Testovací metoda pro měření smáčivosti.....	74
4.12.3	Výsledky testů.....	75

4.12.4 Shrnutí zjištěných poznatků	79
5 ZÁVĚR.....	81
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85
VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ AKTIVITY	87
VLASTNÍ TVŮRČÍ AKTIVITY	90
ÚČAST NA PROJEKTECH.....	91
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	92
SEZNAM OBRÁZKŮ	94
CURRICULUM VITAE.....	97

1 Úvod

Již od chvíle, kdy byl použit první plošný spoj, bylo zřejmé, že planární provedení elektronických systémů nebudou ani při velké hustotě osazení malými pouzdry schopna uspokojit stále rostoucí požadavky na minimalizaci, využití obsazeného prostoru a rostoucí potřeby integrace více funkcí. Nejjednodušší řešení se nabízelo v podobě sestav desek plošných spojů propojených ať už kabeláží, nebo slotovým systémem, což zefektivnilo využití zastavěného prostoru. Stále naléhavější však byla potřeba s využitím třetího rozměru řešit i úroveň jednotlivých pouzder obsahujících integrované obvody, mikročipy apod. Brzy se tedy objevil důležitý pojem „3D pouzdření“. Třetí dimenze je totiž nevyhnutelná na cestě k výrobě stále komplikovanějších systémů ve stále se zmenšujících provedeních.

3D pouzdření prochází obdobím intenzivního vývoje. Zabývá se jím nespočet firem a s každým dnem se objevují nové konstrukce a postupy. Propojovací 3D technologie lze rozdělit na několik oblastí podle úrovně pouzdření. Za nejmenší jednotku považujeme pro následující shrnutí čip a za poslední úroveň připojení pouzdra k systémové základní desce. Již u křemíkových čipů se setkáváme s integrovanými 3D strukturami, které spadají pod označení Wafer Level Package (WLP). Spočívají v kombinaci několika vrstev obvodů a součástek přímo v aktivní vrstvě čipu. K čipu se pojí i technologie System on Chip (SoC) označující spojení několika funkčních bloků či součástek na jednom čipu.

Čipy je dále třeba propojit s nosnými substráty a tím se dostáváme k velmi dlouho používané technologii drátkových kontaktů (wirebonding) a k poněkud modernější technologii Flip Chip, která představuje čip s ploškami opatřenými výčnělky typu bump nebo stud a připojený k nosnému substrátu pájením, lepením, nebo s pomocí ultrazvuku. Odbočkou budiž Chip Scale Package (CSP), jež lze popsat jako pouzdro jen tak malé, aby obsáhlo čip připojený k substrátu nejčastěji technologií Flip Chip. V celkovém výčtu logicky následuje pojem Multi Chip Module (MCM), který označuje zpravidla planární strukturu s několika propojenými čipy na jednom nosném substrátu. Pokročilejší verzí je potom System in Package (SiP), jenž předchází technologii rozšiřuje v 3D kombinaci čipů, LTCC substrátů a dalších technologií do jedné struktury. Spojením technologií SoC (i s WLP) a SiP lze popsat novou generaci pouzder System on Package (SoP), která spojuje výhody obou zmíněných a všechny dílčí části integruje v jediném pouzdře. Za zmínku stojí také 3D technologie Package on Package (PoP) označující soubor vertikálně spojených pouzder.

Stranou předešlého výčtu je vhodné samostatně zmínit obsáhlou oblast technologie Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC), která také představuje jeden ze způsobů konstrukce trojrozměrných struktur na bázi nízkoteplotní keramiky.

S úrovní celých pouzder se pojí i technologie užívané k připojení pouzdra k základním substrátům. Patří sem například propoje pinové Pin Grid Array (PGA), pájené i pružnými kontakty realizované propoje Land Grid Array (LGA), válečkové

spoje Column Grid Array (CGA) a z hlediska pájených spojů nejzajímavější kuličkové pájené propoje Ball Grid Array (BGA). [1, 2, 3]

Zmíněné technologie by bylo možné dále dělit na množství dílčích kategorií v závislosti na použitých materiálech i rozměrech.

Konstrukce 3D struktur není jednoduchou záležitostí a zejména při kombinaci různých materiálů je třeba uvážit jejich vzájemnou kompatibilitu. Ať už z hlediska samotné stavby, kde nevhodná kombinace materiálu plošky, povrchové úpravy a zvolené pájky znamená krátkou životnost celé struktury, tak také z pohledu teplotního managementu a rozdílných délkových i objemových roztažností použitých materiálů.

Tato práce je zaměřena právě na průzkum některých technologií užívaných při sestavování trojrozměrných elektronických a mikroelektronických konstrukcí a pouzder za použití anorganických substrátů. Zejména jde o propojovací technologie realizovatelné dostupnými procesy v možnostech Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT.

Práce částečně navazuje na předchozí diplomovou práci na téma „Moderní pouzdření a 3D systémy“ a prohlubuje pomocí celé řady dílčích testů poznatky v oblasti návrhu a konstrukce různých typů propojení mezi jednotlivými substráty.

Získané poznatky jsou následně vzaty v úvahu při návrhu postupu pro konstrukci mikroelektronického pouzdra typu SOP na bázi LTCC technologie, které je schopno s využitím nesporných výhod keramických materiálů, jako jsou zejména chemická, teplotní i mechanická odolnost, sloužit jako nosič pro obsaženou technologii i vhodný kontaktní element pro spojení s dalšími obvody na základním modulu. Originální propojení konstrukce by mělo být schopno do určité míry kompenzovat i rozdílnou délkovou a objemovou roztažnost. Představme si pro ilustraci 3D pouzdro, jež nese na vnějším substrátu tlustovrstvý, nebo na křemíkovém čipu realizovaný senzor a propojuje jej se základními obvody a SMD součástkami na dalších vnitřních substrátech v pouzdru, jako jsou například zesilovače a převodníky. Celé pouzdro je následně pomocí vhodných spojů připevněno ke zbytku systému, kde si můžeme představit množství typů substrátu od klasických FR-4 desek plošných spojů přes flexibilní substráty až po keramické nosiče.

Možností využití multisubstrátových pouzder zkonstruovaných na bázi keramiky, zejména dobře opracovatelné nízkoteplotní nízkosmrštlivé keramiky, je samozřejmě více. Jako další možné využití lze uvést i pouzdra pro výkonné LED, neboť keramický materiál je schopen dobře odvádět generované teplo a hlavně mu dlouhodobě odolávat na rozdíl od organických substrátů. A to s výhodou podstatně menších změn rozměrů v souvislosti s měnící se teplotou, takže i propojení s osazeným čipem světlo emitující diody je méně namáháno. Velmi podobná je možnost využití substrátu pro osazení koncentračních fotovoltaických článků s optikou, u nichž se i přes chlazení vyskytují velmi vysoké teploty.

2 Současný stav problematiky

Kapitola je zaměřena zejména na rozbor dosavadního vývoje v oblasti trojrozměrného propojování keramických substrátů. Hlavní pozornost je věnována moderním substrátům typu LTCC, ale i propojení mezi keramickými a organickými substráty.

Jak je z úvodu patrné, výzkum v oblasti 3D propojení je dlouhodobý a velmi intenzivní. Jedná se ale o velice širokou tematiku sahající od vrstvených mikrostruktur na čipech až po objemné zapouzdřené moduly obsahující kompletní systémy na úrovni celých funkčních bloků zařízení. Proto bude vhodné záběr zúžit a zaměřit se na dosud používané metody propojování obdobných 3D struktur zhotovených s využitím kuličkových propojů a zejména nízkoteplotní keramiky.

2.1 Keramické materiály pro elektronické využití

Keramické materiály jsou užívány po několik tisíc let v mnoha aplikacích. Není proto divu, že se hojně rozšířily i do oblasti mikroelektronických konstrukcí. Mezi dlouhodobě nejvíce používané anorganické materiály patří korundová keramika (Al_2O_3), aluminium-nitridová keramika (AlN) a beryliová keramika (BeO). Jedná se o klasické keramické substráty s vysokou teplotou výpalu – HTCC – High Temperature Cofired Ceramic. Tyto materiály tvoří základ nespočetného množství hybridních integrovaných obvodů, pasivních součástek, senzorů a dalších prvků. S expanzí mikroelektroniky v šedesátých letech minulého století se ale stále více prosazují substráty s teplotou výpalu pod úrovní 1000°C zvané nízkoteplotní keramika - LTCC – Low Temperature Cofired Ceramic. Proces využití LTCC substrátů je obdobný, jako u klasických keramických materiálů, což se týká sítotisku vypalovacích past, sušení i výpalu. Nově ale tyto substráty umožnily vytvářet několik vrstev spojených laminací do 3D struktury, čímž se rapidně zvýšila integrace, zkrátila se doba potřebná pro technologický proces a v mnoha ohledech se zvýšila spolehlivost vytvořených struktur, neboť propoje mezi laminovanými vrstvami jsou realizovány přímo vodivými pastami podobně jako prokovy v běžných vícevrstvých deskách plošných spojů a odpadají tak mnohá pájená propojení. Značnou výhodou ve srovnání s klasickými substráty je i podstatně snadnější opracovatelnost ražením, CNC obráběním, nebo laserem, což umožňuje tvorbu dutin, kanálků atd.

2.2 Technologie LTCC

LTCC substráty jsou v surovém stavu zpravidla nanášeny na plastové nosné folii a dodávány ve formě listů. Nosná folie zajišťuje dostatečnou pevnost listu během zpracování a po základním řezání, nebo vyrážení je oddělena. Samotné substráty lze následně z obou stran potiskovat vypalovacími pastami a realizovat tak vodivé motivy i pasivní prvky podobně jako u tlustovrstvé technologie na alumině. Rezistory lze vytvářet jak ve formě planární, tak i trojrozměrně mezi několika vrstvami keramiky. Velmi

podobně lze realizovat i kapacitní prvky. Ať už na povrchu pomocí dielektrických past, ale lze využít i keramický materiál samotný, nebo v něm vytvořit dutiny se vzduchovou vrstvou, nebo vrstvou natištěného dielektrika. Také indukční prvky je možné realizovat v planární podobě i pomocí vnořených cívek, které prochází několika vrstvami. Velmi typické jsou antény pro komunikaci, nebo bezkontaktní přenos napájení.

Jak je z předchozího patrné, substráty lze laminovat k sobě do vícevrstevných struktur, nebo dále tvarovat. Materiál lze použít nejen jako nosný substrát pro elektrické obvody, ale také jako mechanické a elektromechanické funkční celky. Rozšířená jsou pouzdra – carryery, pro osazení a přikontaktování křemíkových čipů, která jsou následně pájením připojována k dalším substrátům. V současnosti je v keramických pouzdrech možné najít zapouzdřené i celé systémy několika navzájem propojených čipů. Využívá se velká tepelná odolnost keramických substrátů podobně jako u vysokoteplotně vypalované keramiky a maximální pracovní teploty se i s ohledem na změny elektrických parametrů substrátů pohybují mezi 575°C (DuPont 951) až 850°C (Heraeus CT 800). Velkou výhodou pro spojení s křemíkovými čipy představuje parametr délkové teplotní roztažnosti keramiky, jehož hodnota je podstatně bližší čipům ve srovnání se substráty plošných spojů na bázi FR4 a podobných laminátů skelných vláken a pryskyřic. Připojení čipů se po mechanické stránce řeší nejčastěji tvrdým pájením, případně osazením do vrstvičky roztaveného skla. Elektricky vodivá propojení jsou poté realizována hliníkovými, zlatými nebo palladiiovými mikrodrátkovými kontaktovanými propoji.

Rozsáhlou kapitolu využití keramických substrátů představují senzorické aplikace. Realizovat lze jak tlustovrstvé planární senzory s využitím speciálních vypalovacích nebo polymerních past, které jsou doplněny vnořenými topnými elementy, ale také senzory využívající tvary samotného keramického substrátu. Typickým představitelem může být tlakový senzor, který je sestaven z dutiny a membrány, které jsou opatřeny elektrodami. Dutina funguje jako kapacitor a pohyblivá membrána ovlivňuje jeho kapacitu, jež je dále sledována. Je možno dosáhnout velkého rozsahu citlivostí v závislosti na použitém materiálu membrány. Membrána může být tvořena přímo keramikou, nebo i z jiného materiálu připevněného ke keramické struktuře. Velmi podobně lze realizovat např. teplotní senzory, kde se membrána opatřená vrstvou kovu s definovanou teplotní roztažností deformuje. Ale sestavit je možné např. i složitější senzory pro měření malých průtoků kapalin, kde se k vedení zkoumaných kapalin také využívají kanálky tvořené dutinami v keramické sestavě. V poslední době nejsou výjimkou ani senzory optické, které využívají vychylování membrány pomocí topného elementu k vychylování laserových paprsků, případně senzory, v nichž se s pomocí světla procházejícího mikrokanálky v substrátu vyhodnocují vlastnosti nebo složení kapalin. Obdobně lze mikrokanálky v keramice využít i pro vedení chladícího média strukturou. [4]

Stranou nezůstávají ani radiofrekvenční aplikace, neboť LTCC umožňuje mj. zhotovení signálových vedení i pro mikrovlnné aplikace [10] a díky možnosti dostavování pomocí laserového trimování i přesné pasivní sítě.

S pomocí LTCC lze také zhotovit prvky mikro-elektro-mechanických-systémů „MEMS“ a jejich sestavy. Tyto prvky také nacházejí uplatnění v senzorech v podobě akcelerometrů, miniaturních snímačů tlaku, gyroskopů, mikro pohonů apod. Prvky MEMS lze na substrátech LTCC zhotovit standardizovanými procesními postupy, jen se u složených struktur využijí při laminaci dočasné výplně, které následně vyhoří během výpalu a pohyblivé prvky se tak uvolní.

LTCC substráty se díky své teplotní a chemické odolnosti uplatňují také v nepříznivých podmínkách s nároky na přesnost (měřicí přístroje, automobilový a letecký průmysl, kosmonautika).

Klasické LTCC materiály (např. nejpoužívanější LTCC produkty firmy DuPont) ale mají mimo řadu výhod i jistou závažnou nevýhodu. Ta spočívá v jejich smršťování během výpalu. Základem pro LTCC je totiž kombinace přibližně 40% Al_2O_3 granulí, 45% SiO_2 granulí a dalších 15% tvoří organické složky (substráty DuPont). Při výpalu následně dochází k tavení skla a odpařování organických složek, takže struktura se ve všech třech osách zmenšuje. Konkrétně až o 12% v osách x, y a až o 15% v ose z. Smršťování navíc závisí na tloušťce a tvaru konkrétního místa ve struktuře. Tento jev zvyšuje složitost návrhu u přesných struktur a klade značné nároky na procesní podmínky s minimálními tolerancemi (přesnost řezu, sesazení, tisku), a to hlavně v případě komponent integrovaných přímo do dutin připravených v substrátu, nebo u součástek vytvořených mezi vrstvami (např. kapacitory a cívky využívající substrát jako dielektrikum). [24]

2.3 LTCC Heraeus Hera-Lock HL2000

S určitou odpovědí na tyto problémy přišla společnost Heraeus. Vyvinuta a na trhu představena v roce 2002 byla tzv. nízkosmrštivá LTCC systému HeraLock HL2000, označovaná také jako zero-shrink LTCC [7]. Její mimořádnou předností je naprosto minimální smršťování v osách x a y (pod 0,2%) při výpalu ve srovnání s ostatními materiály. Dochází tak k výraznějšímu smrštění jen v ose z (tloušťka materiálu) a to přibližně o 32% [5, 6]. Díky tomu se hlavně u planárních struktur zjednodušil návrh a např. na Ústavu mikroelektroniky to umožňuje využití běžně dostupných návrhových systémů pro DPS a tlustovrstvé technologie. Malé smrštění také přispívá k omezení praskání průchozích otvorů a dutin během výpalu.

Zmíněný substrát brzy našel praktické uplatnění, a tak je již v roce 2002 na symposiu IMAPS prezentován článek o realizaci mikrovlnného modulu na bázi LTCC Heraeus HL2000 [10]. Autoři v článku rozebírají své praktické zkušenosti s tvorbou vodivých struktur na nízkosmrštivém substrátu, velká pozornost je věnována i realizaci integrovaných kapes a také využití technologie pro zabudování pasivních součástek přímo do dutin v substrátu. Propojení modulu s jinými nosnými substráty však v práci dále zkoumáno není.

Přesné složení substrátu HL2000 je bohužel předmětem utajení. Víme však, že obsahuje přibližně 45% Al_2O_3 , 22% SiO_2 , 8,5% TiO_2 , 7,5% CaO , 5% B_2O_3 , 4% SrO ,

3% BaO, necelá 2% K₂O a malé množství dalších příměsí. Dobře známé jsou však některé důležité parametry udávané v produktovém listu výrobcem:

Tab. 2.1: Parametry Heraeus Hera-Lock HL2000 [6]

Dielektrická konstanta (2,5 GHz)	$7,3 \pm 0,3$
Ztrátový činitel (2,5 GHz)	$< 0,0026$
Teplotní součinitel délkové roztažnosti TCE	6,1 ppm / K (20-300°C)
Teplotní vodivost	3 W/m · K
Drsnost povrchu	0,7 μm
Izolační odpor (25°C)	$10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$
Průrazné napětí	$> 3000 \text{ V}$ / vrstva substrátu
Hustota před výpalem / po výpalu	$2,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ / $2,9 \pm 0,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Tloušťka substrátu surového / po výpalu	$130 \pm 5 \mu\text{m}$ / $90 \pm 5 \mu\text{m}$
Pevnost v tlaku	$> 200 \text{ MPa}$

Pro srovnání si připomeňme i některé zásadní parametry klasických substrátů, které se vztahují k tématu této práce: Teplotní vodivost organických laminátů odpovídajících FR4 se pohybuje v úrovni 0,5 - 0,7 W/m·K, pro Al₂O₃ keramiku pak platí 10 - 35 W/m·K. TCE pro FR4 se pohybuje kolem 14 W/m·K.

Výrobce také dává k dispozici doporučené parametry pro proces zpracování substrátů. Tisk pasivních motivů pomocí tlustovrstvých past může být realizován na matnou stranu substrátů, ale po odstranění plastové nosné folie lze potisknout i hladkou stranu. Doporučená hustota síťotiskového síta je 9 025 až 16 400 ok/cm². Pro HL2000 je dostupná řada vypalovacích past:

TC0306 - Ag vodivá vnější pájitelná

TC0307 - Ag vodivá vnější

TC0308 - Ag vodivá vnitřní použitelná i pro prokovy

TC0401 - AgPd vodivá pasta pro plnění prokovů

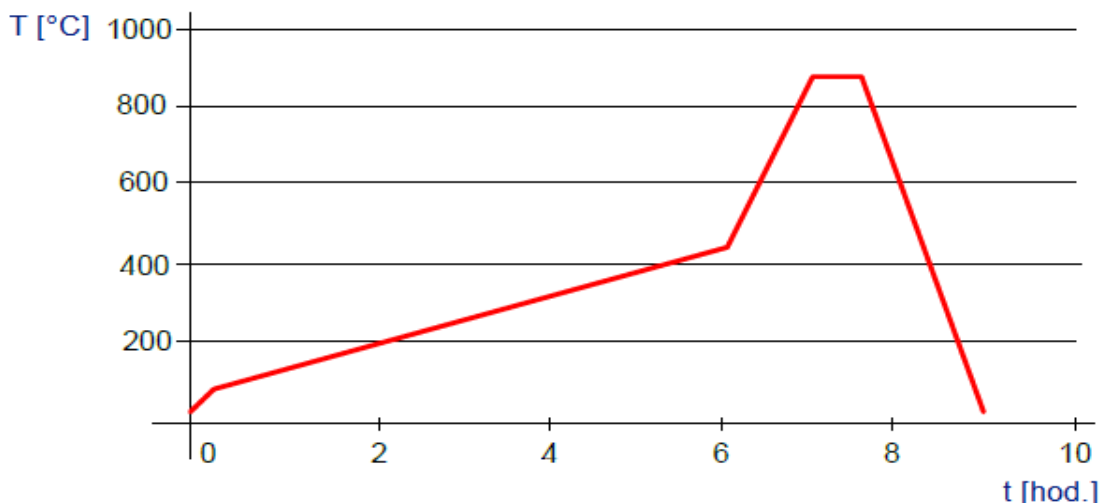
TC8101 - Au vodivá vnější pro tvorbu kontaktovacích plošek

TO2002 – nepájivá maska

Natištěné pasty je doporučeno zasušit při teplotě 80°C po dobu nejméně 10 minut.

Pro laminaci jednotlivých listů keramiky dohromady je doporučena izostatická laminace s tlakem 10,3 Mpa při teplotě 75°C a 10 min cyklu s 90 s špičkou.

Výpál surové keramiky je vhodné provádět s pomocí porézní matrice, která umožňuje volné odpařování organických složek ze substrátu. Doporučená teplota a doba výpálu jsou definovány teplotním vypalovacím profilem:



Obr. 2.1: Teplotní vypalovací profil LTCC substrátu Heraeus HL2000 podle [5]

2.4 Možnosti a postupy realizace struktur z LTCC na Ústavu mikroelektroniky

Vzhledem k velkému vlivu procesních podmínek na výsledné struktury je třeba si přiblížit postup vytváření LTCC struktur v laboratoři ústavu.

Výchozí substráty používané v laboratořích ústavu jsou firmou Heraeus dodávány ve formě listů surové keramiky s nosnou mylarovou folií. Listy jsou standardně baleny po 50 ks a mají rozměr 177,8 x 177,8 mm, tloušťku 130 μm a mají světle modrou barvu.

LTCC substráty se dělí a tvarují stříháním a řezáním. Drobnější detaily, přesné tvary nebo otvory se vytvářejí s pomocí laseru (Trimovací laser Aurel ALS 300, Nd-YAG, 1024 nm, 5 W kontinuální režim, 25 W pulsní režim). Na způsobu opracování závisí také výsledná přesnost tvarů po výpálu. Nevýhodou laseru je opálení a odpaření materiálu v okolí řezu, což v našich podmínkách poněkud limituje velikost a kvalitu otvorů, nebo jemných tvarů. Minimální průměr otvoru se pohybuje nad 100 μm , neboť samotná stopa řezu se pohybuje mezi 25 až 50 μm v závislosti na hloubce. Při průmyslovém zpracování a za použití odpovídající technologie je ale možno vytvářet otvory a řezy podstatně přesnější.

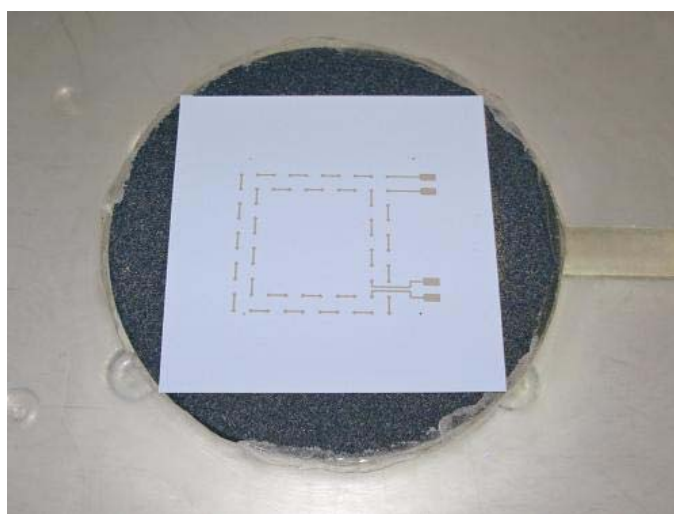
Na připravené substráty se v dalším kroku nanášejí tlustovrstvé vypalovací pasty. Nejprve se zaplní případné prokovy a následně jsou realizovány vodivé sítě pomocí sítotisku (Aurel C880) nebo pomocí tenkých mylarových šablon.

Sítotisk při práci je zachycen na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Detail sítotisku Aurel zobrazující sito s motivem krátce po tisku

Substráty jsou během procesu podepřeny s pomocí podložky s porézním kamenem, která umožňuje vakuovým odsáváním fixovat substrát na místě. Princip je znázorněn na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Porézní kámen s vakuovým odsáváním fixující list LTCC keramiky

Na obrázku 2.3. je při tisku zachycena budoucí základna ověřovacího substrátu, u které však vzhledem k rozměrům není kritická přesná poloha motivu. Pro zajištění soutisku u substrátů náročnějších na přesnost sesouhlasení je třeba na porézní kámen umístit doplňkovou šablonu z mylaru, nebo jiné fólie, která ponechává volné okno jen pro potiskovaný substrát a zbytek povrchu porézního kamene překryje. Tím je zajištěna jak možnost umístit během tisku všechny substráty shodně sesouhlasením na roh okna, a zároveň se tím zvyšuje účinek přísátí.

V případě více tisků musí mezi každým krokem dojít k zasušení poslední natištěné vrstvy. Rozlišení tisku se v závislosti na použitém sítu a motivu pohybuje v úrovni do 100 μm .

Po výpalu základní struktury se speciálními LTCC pastami lze hotový substrát z vnějších stran dále potiskovat klasickými tlustovrstvými pastami včetně rezistivních, kapacitních a polymerních, které standardně nejsou pro HL2000 nabízeny. Je však nutno brát v úvahu rozdílné výsledné parametry takto realizovaných prvků, neboť povrch LTCC se od povrchu aluminy poněkud liší a např. rezistivní pasty mohou i značně difundovat/vsakovat během výpalu do substrátu, což ve výsledku zvyšuje hodnotu odporu na čtverec vrstvy. Je tedy nutné na ověřovacích vzorcích vyladit potřebné hodnoty rezistivity.

Pro zásadní zefektivnění procesu vytváření sítotiskových sít s jemným rozlišením bylo v rámci mého projektu FRVŠ G1 2738/2011 ve spolupráci s firmou CIMA Zlín s.r.o. zkonstruováno základní zařízení s vakuovým rámem, které jsme následně s kolegou Ing. Martinem Klímou, Ph.D. zástavbou bodového 400 W UV zdroje včetně příslušné řídicí elektroniky, chlazení a clonami modifikovali do podoby finálního osvitového zařízení [F1]. Funkční zařízení je nyní již několikátý rok spolu s kapilárními filmy hojně využíváno k tvorbě sítotiskových sít jak pro experimenty, tak i pro výuku moderních mikroelektronických technologií a bakalářské, diplomové i disertační práce.

Jsou-li nanесeny všechny požadované tištěné vrstvy, je možné substráty sesouhlasit a laminovat. Kvalita laminace má výrazný vliv na výsledné mechanické i elektrické vlastnosti struktur. K laminaci jsou využívány kovové laminační přípravky několika velikostí, které jsou vybaveny kličky pro sesouhlasení. Právě pro laminaci větších substrátů byl v rámci mého projektu FRVŠ G1 2738/2011, navázaného i na tuto disertační práci, navržen a vyroben přípravek umožňující laminovat substráty do rozměru 82 x 82 mm. K laminaci je využíván mechanicko-hydraulický lis (Trystom H 62, 120 kN max.) opatřený vyhřívanou spodní plotnou, která umožňuje při laminaci využít teplotní rozsah od 25°C do 90°C. Nejvíce užívané teploty jsou 60°C a 70°C. Použitý tlak závisí na tvaru a počtu vrstev, obecně se pohybuje v úrovni 15 – 20 kN (cca 0,5 - 2 kN/cm²), ale u složitějších struktur je nutno volit tlak i výrazně nižší. Obvyklá doba laminace se pohybuje kolem 10 min, při laminaci s použitím nižšího tlaku se prodlužuje.

Lis je vhodný na struktury s menším množstvím laminovaných listů keramiky, neboť působí jen v jednom směru a může tak dojít k nerovnoměrné deformaci materiálu. Ze stejného důvodu je vhodné vícevrstvé struktury laminovat postupně po jedné vrstvě a nikoliv najednou. Vhodnější izostatický lis, který by působil na materiál ze všech stran současně kapalinou, bohužel není na ústavu dostupný.

Po postupné laminaci celé struktury následuje výpal ve vzduchové atmosféře vsázkové pece LAC, která umožňuje nastavení teplotních profilů se špičkou až v úrovni 1000°C. Délka výpalu se mírně liší podle velikosti a tloušťky struktury. Nejčastěji používané profily mají včetně předehřevu, špičky 20 min při 850°C a postupného chlazení trvají v rozmezí 6 až 14 hodin. Během ohřevu keramika výrazně změkne a její

tvár je ovlivněn povrchem, na kterém je umístěna. K vypalování se během experimentů jako rovinná podložka osvědčily obdélníkové keramické perforované vložky různých rozměrů, původním určením filtry pro filtraci roztavených kovových slitin, bezúplatně poskytnuté jako vzorky k otestování technologie firmou Keramtech s.r.o. ze Žacléře.

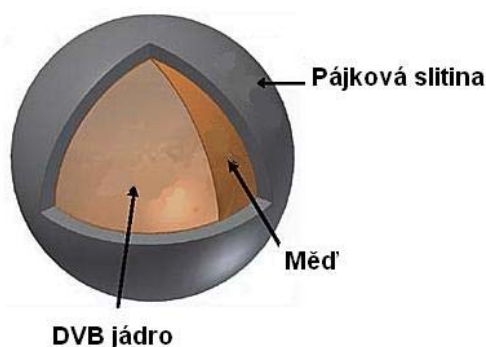
2.5 Pájená propojení mezi keramickými substráty

Propojení mezi keramickými substráty je možno realizovat celou řadou způsobů. V praxi používané metody vycházejí z technologií používaných u pouzder integrovaných obvodů – nejčastěji pájkové bumpy a pájecí kuličky.

Pájkové bumpy, půlkulaté útvary tvořené pájkovou slitinou, se obvykle vytvářejí přetavením pájecí pasty nanesené na pouzdro. Pouzdro s hotovými kontakty se následně osazuje na nosný substrát do pájecí pasty nebo tavidla v závislosti na konkrétní aplikaci.

Druhou nejrozšířenější variantou je využití pájecích kuliček, kterých lze rozeznávat mnoho typů podle složení i velikosti. Nejjednodušší variantou jsou kuličky tvořené pouze cínem. Daleko více používané jsou však kuličky zhotovené ze slitin. Příkladem mohou být klasické eutektické, nejčastěji Sn(63) Pb(37) s teplotou tání 183°C, nebo Sn(62) Pb(36) Ag(2) tající při 178°C. Existují i speciální kuličky, které se během pájení roztavit nemají, ale jsou osazeny do pájecí pasty, která po nich vzlíná. Jsou to např. Sn (10) Pb (90), které se taví až při 300°C. Pro bezolovnaté aplikace se používají např. kuličky Sn(96) Ag(3,5) Cu(0,5) s teplotou tavení 217°C. Nejběžnější průměry kuliček jsou 300 μm, 500 μm a 760 μm. Pro nejmenší moderní pouzdra ale i průměr 100 μm.

Existují i kuličky s pevným jádrem, které jsou schopné udržet definovanou mezeru mezi spojovanými substráty. Jádro může být kovové, jako např. u firmy Senju, kde je tvořeno měděnou nebo stříbrnou kuličkou s různými průměry, ale také plastové. Kuličky s plastovým jádrem (PCSB – Plastic Core Solder Ball) vyrábí firma Sekisui Chemical, jsou označeny jako Micropearl SOL. [8, 9, 35]



Obr. 2.4: Schéma Sekisui SOL podle [9]

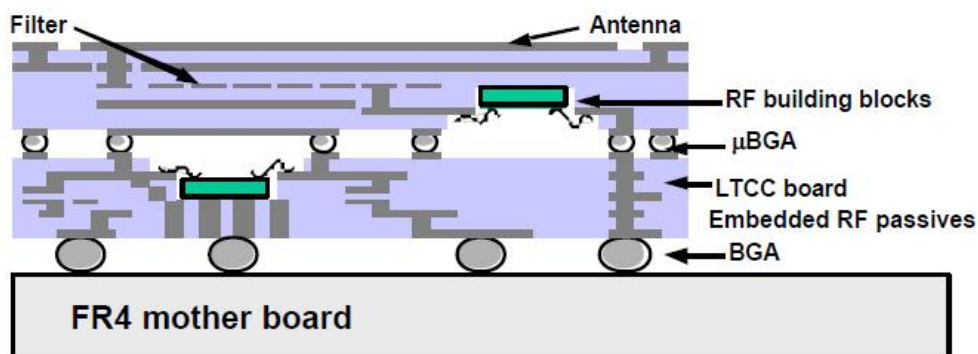
Jak je z obrázku 2.4 patrné, jejich jádro je tvořeno divynylbenzenem a je pokryto 5 μm vrstvičkou mědi. Konečnou povrchovou úpravu pak tvoří pájecí slitina o síle vrstvy 20 μm. Kuličky jsou vyráběny v průměrech 110 až 800 μm. Jádro funguje jako

pružný element, čímž pomáhá kompenzovat rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti spojených substrátů. Zároveň ale pomáhá definovat a udržet mezeru mezi dvěma spojenými substráty a tak zamezit zkratovým můstkům i v případě těžkých pouzder.

Pájecí kuličky se zpravidla pomocí vakuové manipulační hlavy osadí do vrstvičky pájecí pasty nanesené na plošky osazovaného substrátu a přetavením zafixují. Takto vybavený substrát nebo pouzdro se následně osadí s pomocí pájecí pasty nebo tavidla na plošky nosného substrátu a opět přetaví.

2.6 Propojení mezi keramickými substráty formou BGA

Jednou z velmi zajímavých 3D konstrukcí spojujících LTCC i pájecí kuličky je představa autorů publikace „3D Integrated LTCC Module using μ BGA technology for compact C-band RF Front-End Module“ [11]. Navrhovaná konstrukce je znázorněna na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Koncept 3D LTCC modulu podle [11]

Jak je z obrázku patrné, navrhovaný modul se skládá z dvojice vertikálně propojených LTCC substrátů obsahujících tlustovrstvé integrované obvody i drátkovými kontakty či metodou Flip Chip připojené čipy v kapsách. Substráty jsou propojeny pomocí Sn(63) Pb(37) μ BGA kuličkových propojů, což by podle autorů mělo s využitím standardních technologií pro μ BGA pouzdra snížit cenu struktury. Prostory v kapsách i mezi substráty by mělo být možné využít pro umístění MEMS struktur, jako je například přepínač. Anténa a sestava filtru jsou integrovány přímo do LTCC struktury. Výsledná sestava má být zapájena s použitím klasických BGA kuliček na nosný substrát typu FR-4. Vodivý motiv na povrchu LTCC substrátu je realizován depozicí tenké vrstvy zlata, jež je následně fotochemickou cestou odleptána do požadované podoby.

Zbytek článku se již věnuje pouze útlumovým vlastnostem signálových cest vzhledem k 5 GHz signálu, zatímco problematika konstrukce samotné je omezena. Autoři nijak nezkoumají jiná využití struktury, nezabývají se ani spolehlivostí zhotovených propojení. Pozornost není věnována ani typu a chování samotných LTCC substrátů, nicméně vzhledem k době vzniku a práci se společností Kyocera lze usuzovat

na použití klasických LTCC, jež se při výpalu smršťují ve všech osách, což do značné míry komplikuje design a klade značné nároky na velkou přesnost i čistotu procesu ve srovnání s nízkosmrštivými substráty. Zejména použití zabudovaných součástek v kapsách je s redukovanou smrštivostí násobně jednodušší. Problematika také postrádá další vývoj, neboť zmíněná publikace nemá navazující pokračování.

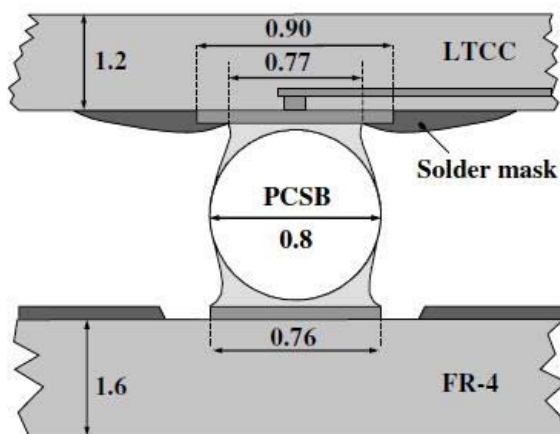
O rok později se na konferenci EMPC ve Friedrichshaffenu objevuje další tematicky příbuzná publikace „Reliability Investigations of BGA-Interconnections between RF-LTCC-Modules and PCBs“ [12]. V článku je popisována realizace struktury a testy rádio-frekvenčních LTCC modulů propojených BGA spoji provedené v rámci projektu PROKOSMOS. Substráty použité v práci jsou opět smrštivé ve všech osách (DuPont DP951 a DP943) a opatřené vodivými Au a AgPd pastami. Autoři se v článku kromě LTCC struktury věnují kuličkovým propojům typu BGA, a to z pohledu designu, materiálů i způsobu osazení kuliček. Postupně je rozebráno použití klasických Sn(63) Pb(37) kuliček s průměry 300 μm a 200 μm osazených do Sn(63) Pb(37) pájecí pasty. Autoři poukazují na potíže způsobené obtížně dosažitelnou rovnoměrností tisku pájecí pasty, což zapříčinilo vznik můstků mezi kontakty. Dále je zmíněn problém s nedostatečnou smáčivostí plošek, což způsobovalo snadné oddělování kuliček od pouzdra. Mnohem zajímavější je však další část, kde autoři při testech použili kuličky s plastovým jádrem od společnosti Sekisui. Bylo provedeno zapájení BGA struktury a tato byla následně oddělena roztržením silou. Test ukázal, že jen několik kuliček spojilo dohromady strukturu a také, že propojené kuličky při testu praskly. Tento jev je pro ilustraci přiblížen na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Zapájená kulička Sekisui SOL s pevným jádrem po teplotním cyklování [12]

Testy probíhaly s různými průměry těchto kuliček a ukázalo se, že jejich průměr a materiálové poměry hrají značnou roli ve výsledné životnosti spoje. Zatímco kuličky malých průměru 200 μm a 300 μm dosahovaly životnosti v úrovni desítek teplotních cyklů, kuličky s průměrem 800 μm dosáhly životnosti až 800 cyklů. Článek pokračuje rozбором využití tekuté tuhnoucí výplně pod pouzdem (underfill), u nějž se ukázalo, že jeho aplikace ovlivňuje životnost struktury při teplotním cyklování ještě více než volba kuliček.

Pokračující výzkumné aktivity na toto téma jsou v roce 2008 zveřejněny v disertační práci Tera Kangasvieriho z Univerzity v Oulu, nazvané „Surface-mountable LTCC-SIP module approach for reliable RF and millimetre-wave packaging“ [13]. Autor se v práci mimo jiné zabývá připojením LTCC modulu k organickému substrátu opět s využitím kuliček Sekisui s plastovým jádrem (Obr. 2.7).



Obr. 2.7: Schéma BGA spoje, měřítko je v milimetrech [13]

Při testování struktury pomocí teplotních cyklů -40 až $+125^{\circ}\text{C}$ se ukázalo, že ve srovnání s Pb(90) Sn(10) kuličkami se provedení s plastovým jádrem vyznačuje 75% nárůstem životnosti. Mimo schopnosti lépe odolávat termomechanickému namáhání díky značné pružnosti je vyzvednuta i další přednost kuliček s pevným jádrem - udržení rovnoměrné výšky spojů po celé ploše pouzdra. V práci použitý LTCC materiál je opět smršťivý DuPont 951.

Výzkumné práce s touto tematikou na univerzitě v Oulu pokračovaly i v dalších letech. V roce 2010 dokončil Olli Nousiainen disertační práci [14], kde navazuje na svého předchůdce a k průzkumu BGA propojů přidává tematiku povrchové úpravy kontaktních plošek imersním niklem s imersním zlatem (ENIG). Základní substrát je i tentokrát DuPont 951. Autor se mimo jiné potýkal s problémem „leachingu“, tedy absorpce materiálu plošky do pájeného spoje, což je poměrně častý jev při kombinaci tištěných stříbrných plošek a bezolovnatých pájecích slitin.

S ohledem na aktuální stav výzkumu v oblasti propojování moderních LTCC substrátů, ze kterého byly v této kapitole prezentovány určité poznatky, a také na základě dalších dosud neprobádaných možností, byly s přihlédnutím k dostupné technologii, materiálům i časovým nárokům zváženy následující směry výzkumu.

3 Cíle disertační práce

Oblast propojování je velmi široká a tak bylo zaměření přizpůsobeno technologiím dostupným na Ústavu mikroelektroniky. Smyslem této práce je rozšíření dosavadních a získání nových poznatků v oblasti propojování moderních substrátů do 3D struktur. Hlavní pozornost je věnována nízkoteplotně vypalovaným keramickým substrátům s nízkou smrštivostí, které jsou zatím využívány relativně málo a tak nabízejí mnoho prostoru pro bádání. Jak plyne z předchozího rozboru problematiky, při konstrukci propojovacích struktur na bázi LTCC bylo dosud využíváno kombinací běžných, ve všech osách smrštivých substrátů (nejvíce DuPont), s motivy zhotovenými tlustovrstvými vypalovacími pastami, nebo deponovanou zlatou vrstvou. Velkou neznámou pro LTCC HL2000 byla možnost realizace a vlastnosti vakuově napařených měděných motivů zesílených galvanickou cestou, jejichž cena je podstatně přijatelnější ve srovnání se zlatými vrstvami a které mají i některé technologické výhody zejména ve smyslu dobré pájitelnosti.

Cíle této disertační práce je možné rozdělit do následujících oddílů, z nichž značnou část představují praktické experimenty s cílem prozkoumat technologické možnosti, postupy a varianty propojení substrátů.

- Průzkum struktur zhotovených vakuovým napařením a galvanickým zesílením na substrátech Al_2O_3 a LTCC HL2000
- Prověření možnosti zhotovení pružných elementů propojení na bázi napařených a zesílených měděných struktur
- Realizace a otestování struktury „dimpled“ na bázi LTCC HL2000
- Testy různých typů pájených propojů s využitím více typů pájecích kuliček s měděným a plastovým jádrem
- Simulace namáhání různých typů spojů a jejich srovnání
- Testy vícepatrového pájeného propojení substrátů v 3D strukturu
- Návrh postupů pro konstrukci 3D pouzdra ve smyslu univerzálního nosiče pro integrované obvody, senzory nebo výkonné LED

Tyto body představují hlavní směry, jimž byla věnována pozornost během výzkumných a experimentálních aktivit. Během prací se však díky povaze využitých technologií objevila i celá řada dalších dílčích faktorů, které ovlivnily postup i výsledky, aniž s nimi bylo možno předem kalkulovat, nebo je zahrnout mezi cíle práce.

4 Výsledky disertační práce

V tomto oddíle jsou prezentovány jednotlivé části řešené problematiky. Na počátku výzkumu bylo mnoho neznámých a postupnými testy se dařilo nacházet nové možnosti, ale také některé zavrhnout pro nedostatek vhodného materiálu, technologickou náročnost nebo i dlouhodobé odstávky potřebných zařízení, což zejména u laseru, vakuové napařovací aparatury a vsázkové pece vyústilo v komplikace a zdržení...

4.1 Úvodní test kompatibility vodivých past pro LTCC HL2000 v kombinaci s pájecími kuličkami

První seznámení s materiálem HL2000 částečně navazovalo na předchozí diplomovou práci a bylo v počátku komplikováno teprve se budující technologickou základnou pro práci s LTCC materiály. S prvními dostupnými vodivými vypalovacími pastami pro HL2000 byly v roce 2009 nejprve provedeny testy sítotisku, laminace, výpalu a chování při pájení.

4.1.1 Použité substráty a materiály

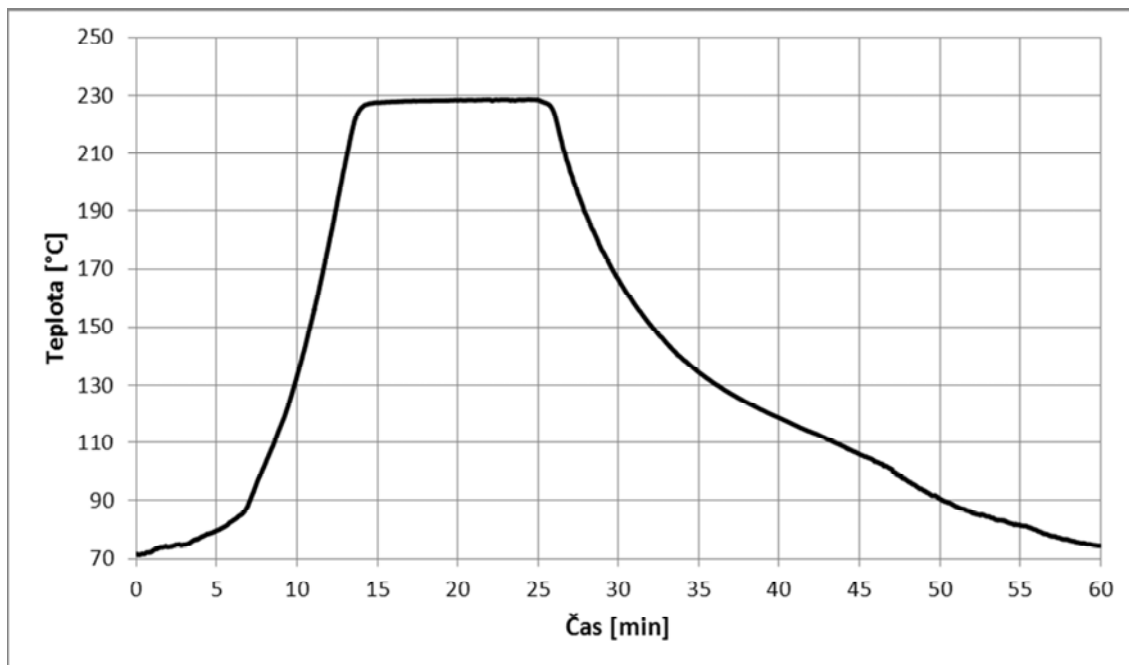
Na substráty s rozměrem 35 x 30 mm byly natištěny testovací motivy s řetězcovou strukturou „Daisy chain“ BGA s 225 ploškami za použití tehdy jediných dostupných vodivých past (vodivá stříbrná TC0307 a zlatá TC8101). Substráty byly laminovány zpravidla ze tří nebo čtyř vrstev keramiky pro dostatečnou výslednou pevnost a vypáleny.

4.1.2 Pájení v parách a testy s LTCC

Na hotové substráty byly postupně do vrstvy dostupných tavidel a různých pájecích past osazovány i pájecí kuličky (Senju 760 μm , SnAgCu). Osazené substráty byly pájeny v zařízení pro pájení v parách Asscon Quicky 300, kde je jako teplovodného media užito inertní kapaliny Galden 230. Páry ohřáté kapaliny nasytí prostor pece a postupně kondenzují na vložených substrátech, dokud je neprohřejí na stejnou teplotu. Výhodou je přesně daný teplotní strop a velmi rovnoměrný ohřev i u složitějších sestav, které byly již tou dobou plánovány. Další výhodou je samotná atmosféra nasycených par Galdenu, neboť redukuje přístup kyslíku k pájeným spojům a tím omezuje problémy způsobené oxidacemi. Výhodou je i dobrá opakovatelnost pájecích procesů.

Pec má však pro svoji vsázkovou povahu také nevýhody. Kromě časové náročnosti plynoucí z vsázkové povahy pece, kdy je každý pájecí proces provázen novým kompletním ohřevem média, ale po pájení i jeho dlouhým ochlazením, aby při vyjímání vzorků nedocházelo k výrazným únikům par drahé kapaliny ale i zamořování laboratoře nebezpečnými výpary tavidlových zbytků. Další nevýhoda plyne ze způsobu přenosu tepla, neboť pájecí kapalina i přes svoji netečnou povahu ovlivňuje funkci tavidel při pájení použitých, neboť ne všechna tavidla jsou schopna udržet se na požadovaném místě a můžou být odplavena. Podobně se v některých specifických případech stává, že

kapalina vzlíná mezi osazenou součástku a vrstvu natištěné pasty, což může vést k vytvoření bublin v pájeném spoji, nebo i k omezení smáčení a tím přispět k nezapájení spoje. Nejčastěji používaný teplotní pájecí profil zařízení pro pájení v parách pro 100% ohřev je znázorněn na obrázku 4.1.



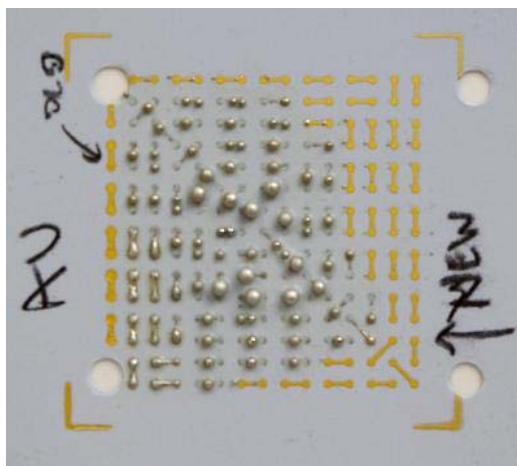
Obr. 4.1: Teplotní pájecí profil pece pro pájení v parách

Stejné zařízení bylo následně používáno pro pájení téměř všech dalších vzorků.

4.1.3 Zjištěné poznatky

Během pokusů se rychle ukázalo, že dostupné pasty nejsou vhodné pro standardní bezolovnaté pájení. U všech přetavených vzorků došlo k absorpci materiálu plošek do roztavené pájky, což je jev zvaný „leaching“ a je mu věnována pozornost v další části práce. Jako názorná ukázka může sloužit obrázek 4.2, na kterém je zobrazen substrát s motivem BGA 225 vytvořeným zlatou vodivou pastou.

Ukázalo se také, že smáčivost plošek není optimální a bylo rozhodnuto experimentovat s tlustovrstvými pastami určenými pro klasickou Al_2O_3 keramiku, které by byly nanášeny na již vypálené substráty a ty následně opět vypáleny hodinovým profilem podobně jako alumina. V mezidobě však firma Heraeus doplnila své portfolio a podařilo se sehnat pájitelnou vnější vodivou vypalovací pastu s označením TC0306, se kterou se výsledky obdobných testů poněkud zlepšily. Určitý problém s leachingem však přetrvával nadále zejména při opakovaných přetaveních.



Obr. 4.2: LTCC substrát s motivem tvořeným zlatou pastou po přetavení

Dále bylo tímto jednoduchým testem zjištěno, že vytváření planárních plošek se neobejde bez doplňující vrstvy, která by ponechala odkryté jen kontakty. Jednak bylo rozhodnuto otestovat různé varianty nepájivé masky, ale také využít další vrstvy LTCC s otvory pro plošky, čemuž se věnuje další díl experimentů.

4.2 Test realizace „dimpled“ struktur se substráty LTCC HL2000

Rozhodnutí otestovat další vrstvy LTCC substrátu jako krycí masku s sebou přineslo možnost vytvoření částečně vnořených plošek, tzv. „dimpled“ struktury. Výhoda této kombinace spočívá ve zlepšení spolehlivostních parametrů spoje, neboť se relativně prodlouží délka pájeného kuličkového propoje, který tak má více prostoru k vyrovnání pnutí, které vzniká rozdíly v teplotní délkové i objemové roztažnosti a nejvíce se projevuje při spojení substrátů z různých materiálů.

4.2.1 Vytvoření otvorů v LTCC HL2000

Jako základní problém ve vytváření složitějších útvarů z keramiky se ukázalo vytvoření matrice stejnoměrných otvorů malého průměru ve velkém počtu. Mechanické vytváření otvorů vyrážením by vyžadovalo zhotovení nákladného nástroje. Jako vhodný nástroj se jevil trimovací laser Aurel ALS 300, který bylo možno použít k řezání jednoduchých geometrických útvarů, což se využívalo k tvorbě obdélníkových LTCC plátek substrátů ze základních listů. Velké množství otvorů pro BGA strukturu však znamenalo podstatně složitější program a neustálé cyklování lampy laseru. Zároveň se ukázalo, že bude třeba pokusně vyladit rychlost řezu, výkon laseru, respektive použitý proud, a také správné zaostření paprsku. I tak ale řezání keramiky laserem přináší problémy s nepravidelným roztavením a opálením okrajů řezu, což ve výsledku snižuje rozlišení a přesnost řezaných tvarů.

K vyřezání prvních otvorů do testovacích substrátů byl vzhledem ke komplikacím s řezáním velkého množství kruhů a omezené programové výbavě použit externí

gravírovací laser, jehož výkon a snazší programování umožnily připravit několik prvních substrátů. Kvalita ani přesnost opracování substrátů však nebyly právě ideální.

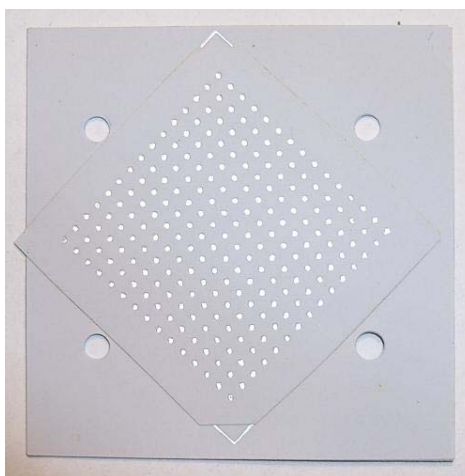
Další deformace tvaru nastává během laminace, kdy na keramiku působí tlak hydraulického lisu a v neposlední řadě jsou tvary ovlivněny během výpalu. Obrázek 4.3 zobrazuje reálný tvar zamýšleného kulatého otvoru v keramice po laminaci a výpalu.. Zároveň je na obrázku patrný další problém, kterým je dosažitelná přesnost sesouhlasení během laminace.



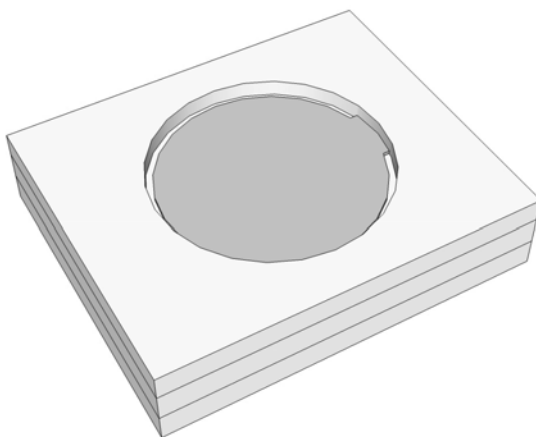
Obr. 4.3: LTCC substrát s laserem řezaným, laminovaným a vypáleným otvorem v krycí vrstvě

4.2.2 Testovací substrát BGA 225

Přes určité potíže byly postupně vytvořeny testovací „dimpled“ substráty ve formě jednoduchých BGA pouzder, kdy byl na dvojitou základní vrstvu keramiky natištěn Ag pastou motiv BGA 225 s řetězcovou testovací strukturou. Tuto sestavu překryla jedna vrstva LTCC s vyřezanými otvory o průměru 500 μm . Na obrázku 4.4. je zobrazen jeden z takových substrátů krátce po výpalu a na obrázku 4.5. je v detailu znázorněna struktura „dimpled“.



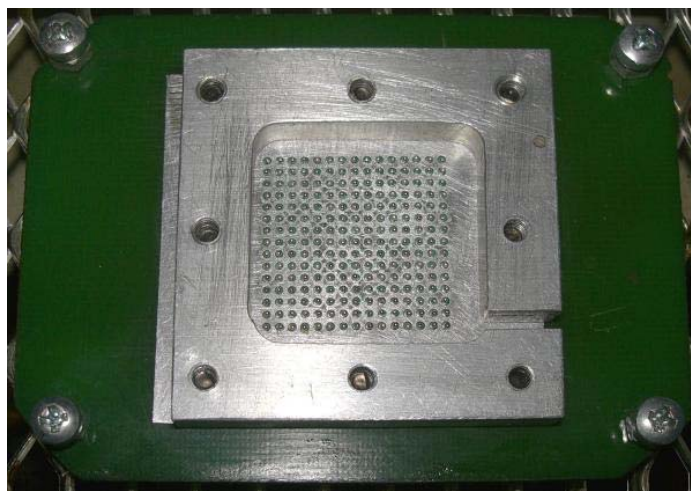
Obr. 4.4: LTCC substrát s BGA 225 motivem s „dimpled“ strukturou krátce po výpalu



Obr. 4.5: 3D schéma „dimpled“ LTCC struktury při použití dvou nosných a jedné krycí vrstvy

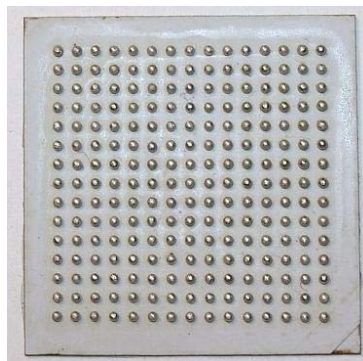
4.2.3 Pájení struktury BGA 225

Struktury byly následně pokryty vrstvou tavidla (Kester TSF 6592 pro BGA) a s pomocí nástroje pro osazení kuliček opatřeny kuličkami SnAgCu305 s průměrem 0,76 mm. Nástroj má v nerezovém plechu vyvrtanou matici otvorů, které slouží k fixaci kuliček na místě během procesu přetavení (reballing). Nástroj s upnutým substrátem a osazenými kuličkami je znázorněn na obrázku 4.6.



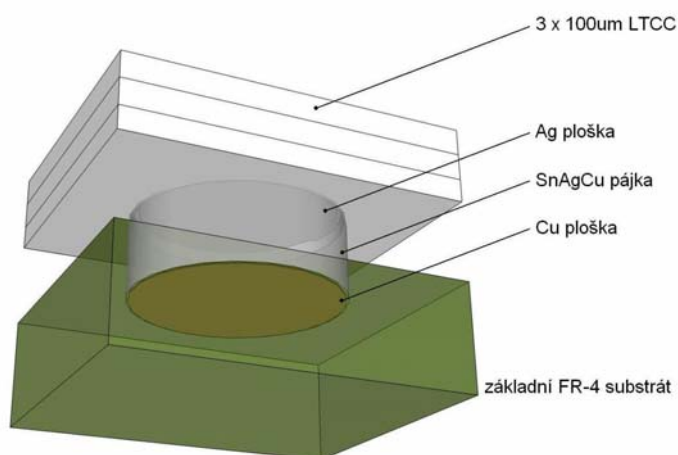
Obr. 4.6: Nástroj pro reballing s maticí pro BGA 225

Kuličkami osazené substráty byly přetaveny a po sejmutí nástroje zůstaly kuličky připájeny na vnořených ploškách, což je dobře vidět na následujícím obrázku 4.7, který byl pořízen po očištění větší části tavidlových zbytků izopropylalkoholem.



Obr. 4.7: Výsledné LTCC „pouzdro“ s maticí vývodů ve formě BGA225

Takto vzniklá testovací pouzdra bylo možné dále použít pro připájení ke standardním testovacím DPS (FR-4) s motivem základny pro BGA 225 a testování. Poněkud zjednodušené schéma zamýšleného spojení je znázorněno na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Schéma spojení struktury ve stavu po přetavení

4.2.4 Teorie termomechanického namáhání struktur

Teoretický výpočet životnosti pájeného spoje je možné získat s využitím mnoha únavových modelů, které kalkulují s teplotními cykly namáhajícími pájené spoje. Pro odhad životnosti, tedy počtu cyklů do poruchy, zamýšlených spojení bylo použito únavového modelu Engelmaiera [15], který počítá s počtem cyklů do 50% poruch z celkového počtu spojů podle rovnice 4.1:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left[\frac{2\varepsilon_f}{\Delta D} \right]^m, \quad (4.1)$$

kde celkový počet cyklů do poruchy je N_f , ε_f vyjadřuje koeficient únavové tažnosti, ΔD vyjadřuje cyklické únavové poškození a m je exponent tvárnosti. Cyklické únavové poškození lze získat z rovnice 4.2:

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right], \quad (4.2)$$

kde F je technický faktor, DNP je vzdálenost od nulového bodu/desky, ΔCTE je rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti a ΔT je rozdíl teplot ($T - T_0$) [K] při cyklech a h je výška pájeného spoje.

V rovnici 4.1 zmíněný exponent tvárnosti lze popsat rovnicí 4.3:

$$\frac{1}{m} = c_0 + c_1 \bar{T}_{SJ} - c_2 \ln \left(1 + \frac{t_0}{t_D} \right), \quad (4.3)$$

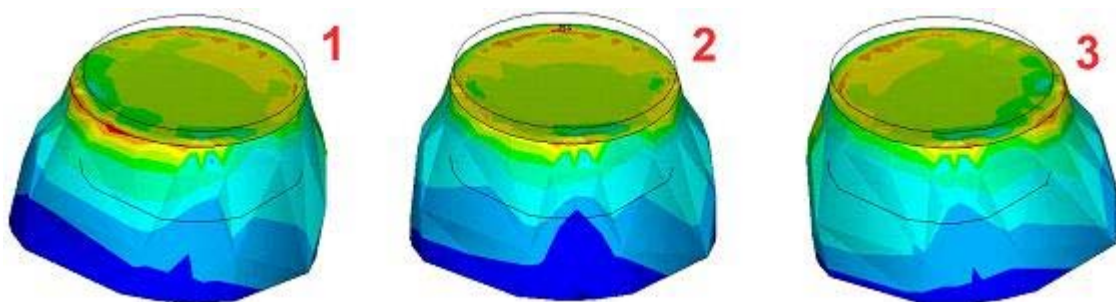
kde T_{SJ} vyjadřuje průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje, t_D je polovina doby trvání prodlevy za jeden cyklus [min] a t_0 , c_0 , c_1 , c_2 jsou specifické koeficienty pájecí slitiny. [15, 16]

Specifické koeficienty použité pro odhad vlastností struktury byly v případě SnAgCu pájky: $\varepsilon_f = 0,425$; $c_0 = 0,480$; $c_1 = 9,3 \cdot 10^{-4}$; $c_2 = -1,92 \cdot 10^{-2}$ a $t_0 = 500$. Rozměrové parametry BGA 225 struktury jsou: $F = 1$; $DNP = 13,5$ mm; $CTE = 6,1$ ppm/°C⁻¹; $h = 0,538$ mm. FR-4 základna má $CTE = 14$ ppm/°C⁻¹. Testovací podmínky pro výpočet byly: $T_{min} = -20^\circ\text{C}$, $T_{max} = 100^\circ\text{C}$, $T_{si} = 40^\circ\text{C}$, $\Delta T = 120^\circ\text{C}$ a $t_D = 15$ min. Tedy $m = 2,225$ a $\Delta D = 0,0237$.

Na základě propočtů bylo zjištěno, že medián odpovídá 1430 cyklům, kdy by měly spoje s 50% pravděpodobností vykazovat poruchu. Pro testovací BGA 225 je však nutné si uvědomit, že tento stav je orientační a odpovídá již naprosto nefunkční struktuře. U obdobného skutečného BGA pouzdra často i poškození jen jednoho z propojů znamená ukončení provozu. Podobně přerušení i jednoho spoje v řetězcové testovací struktuře znamená stav poruchy.

4.2.5 Simulace struktur

Při spojení keramického a organického materiálu pájeným spojením bylo také zajímavé provést analýzu namáhání pomocí simulačního programu Ansys a modelu konečných prvků (FEM). Testovací struktura však obsahuje příliš mnoho pájených spojů a tak bylo využito částečného modelu, který již bylo možno zpracovat na dostupném hardware. Vybrán byl segment s 25 propoji a použita teplota 100°C. Následující obrázek 4.9 znázorňuje vybrané tři pájené spoje struktury. Č. 1 představuje spoj z levého rohu struktury, č. 2 je spoj ze středu struktury a č. 3 je spoj z pravého okraje. Barevná škála znázorňuje největší namáhání červenou barvou a nejnižší modrou barvou. Černá linka reprezentuje tvar spoje bez teplotního namáhání.



Obr. 4.9: Výstup základní simulace namáhání struktury BGA 225

Z obrázku je patrné, že největší namáhání působí v místě spojení plošek na LTCC s pájkou spoje. Pro názornost poněkud přehnané zobrazení deformace spojů pak také znázorňuje rozdílné působení sil na různých místech struktury.

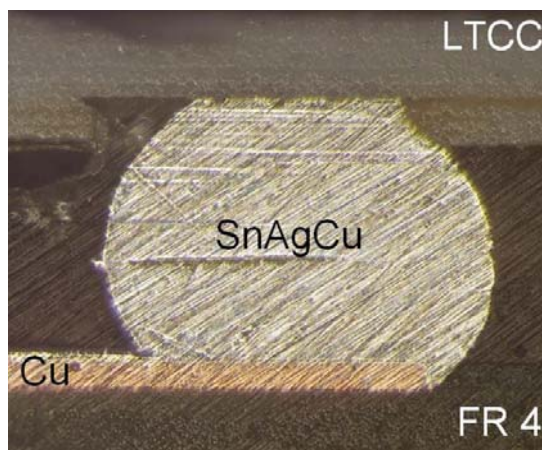
Pro praktický experiment tedy bylo možné očekávat životnost v řádu stovek teplotních cyklů, než dojde k poruchám propojů a největší namáhání v místě styku pájky a keramického substrátu.

4.2.6 Test pájených struktur

Pro prozkoumání skutečných struktur bylo nutno nejprve takové struktury vytvořit. Jako základna posloužily již dříve zmíněné FR-4 desky plošných spojů s 35 μm vrstvou měděného motivu. Použity byly verze s povrchovou úpravou bezolovnatým cínem HAL (Hot Air Levelling). Pájecí pasta pro osazení kuliček byla použita bezolovnatá pasta Cobar SAC3-XF3 se složením 96,5% Sn, 3% Ag, 0,5% Cu. Pasta byla natištěná pomocí nerezové šablony s tloušťkou 150 μm a otvory o průměru 800 μm . Kuličky byly použity od firmy Senju stejného složení, jako má pájecí pasta. Průměr kuliček 760 μm . K pájení bylo použito zařízení pro pájení v parách.

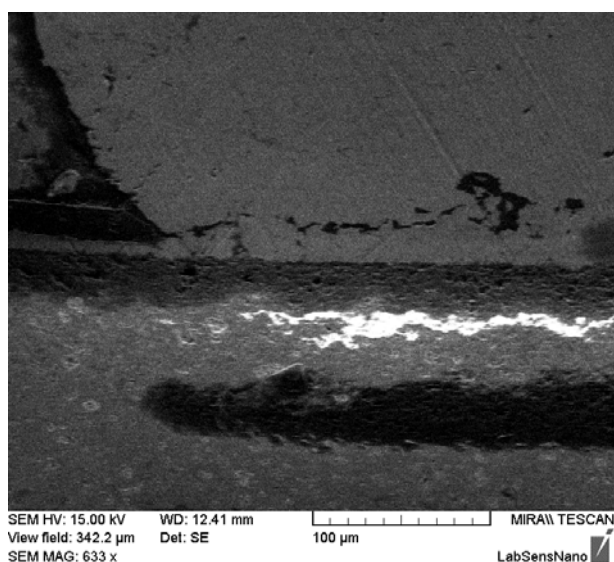
Na zapájené substráty bylo rozhodnuto použít mj. i teplotní cyklování v laboratorní teplotní komoře. Teplota v zařízení se průběžně cyklicky měnila od -20°C po $+100^{\circ}\text{C}$ a zpět každých 55 minut při setrvání 15 minut v obou extrémech. Řetězcová testovací struktura byla během testu připojena k detekčním pomocným deskám s obvody, které signalizují přerušení vodivé dráhy rozsvícením kontrolní diody. Struktury byly v komoře ponechány, dokud nedošlo k přerušení všech testovaných okruhů s cílem později detekovat místo poškození. Samotný počet cyklů se značně lišil, což bylo dáno limitovanými možnostmi konstrukce.

Na některých substrátech byl také proveden mechanický destruktivní test pomocí metalografického výbrusu, kdy je vzorek zalit Dentacrylem a po rozřezání na menší dílky postupně vybroušen do podoby řezu pájeným spojem zkoumatelného pod mikroskopem. Výsledek takového výbrusu u nepoškozeného spoje je možné pozorovat na obrázku 4.10, kde je dobře patrný jak základní FR-4 substrát, tak také kulovitý pájený spoj a otvor i vodivá cesta v horní vrstvě LTCC „pouzdra“.



Obr. 4.10: Mikrovýbrus zapájené „dimpled“ struktury BGA 225

Pro zkoumání mikrodetailů defektů u substrátů testovaných v teplotní cyklovací komoře bylo využito elektronového skenovacího mikroskopu Tescan Mira II, který je na ústavu dostupný a umožňuje dosáhnout za cenu ztáty barevnosti větších zvětšení i lepšího kontrastu ve srovnání s optickým mikroskopem. Na obrázku 4.11 je snímek z tohoto zařízení zobrazující detailně jeden z mnoha zkoumaných „cracků“ neboli prasklin na pomezí cínového materiálu pájeného spoje (horní část) a keramického substrátu (spodní pás). Praskliny se nacházely ponejvíce v místě, kde byly předpokládány na základě simulace teplotně mechanického namáhání viz Obr. 4.9.



Obr. 4.11: Mikrovýbrus zapájené „dimpled“ struktury BGA 225

4.2.7 Zhodnocení prvních struktur

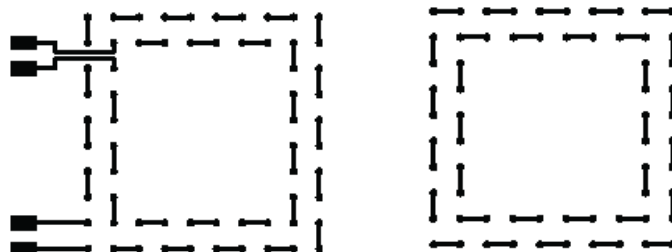
Při pájení se ukázalo, že SnAgCu pájka během přetavení ochotně narušovala stříbrné plošky v „dimpled“ struktuře a pohlcovala jejich stříbrný materiál, díky tomu značná část testovacích substrátů vykazovala problémy s propojením testovacího obrazce.

Obtížná byla také příprava děrovaného substrátu. Jak simulace, tak následné testy v teplotní cyklovací komoře ukázaly nejvíce namáhané části struktury, ale také ve spojitosti se souběžnými testy Al_2O_3 struktur se shodným vodivým motivem potvrdily teorii, že vyšší spoje s „dimpled“ strukturou lépe odolávají namáhání. První výsledky byly nakročením k novým možnostem a byly prezentovány na EEICT 2010 [33] i na mezinárodní konferenci ISSE 2010 ve Varšavě [38].

4.3 Pokročilý test „dimpled“ struktur se substráty LTCC HL2000

4.3.1 Nový testovací motiv BGA 64

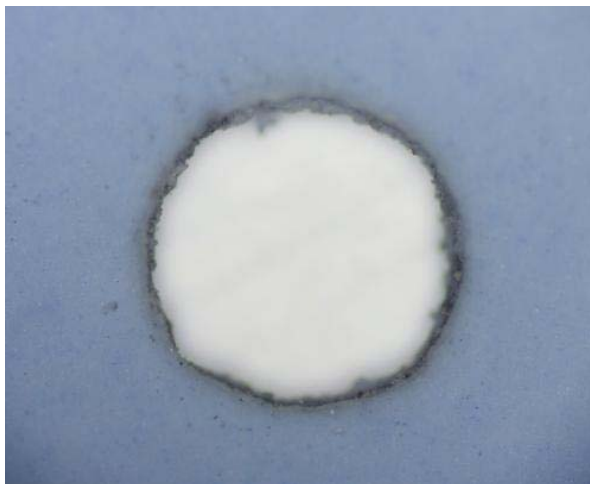
Prvotní testy mimo výše zmíněných poznatků také ukázaly potřebu nového testovacího motivu, který by více odpovídal technologickým možnostem a umožnil i lepší přístup k pozorování pájených spojů, nebo umístění otvoru či osazení pomocných prvků ve středu struktury. Navržen byl nový motiv typu „daisy chain“ s 64 propojenými ploškami, které po úspěšném zapájení vytvoří dva samostatné okruhy. Motiv respektuje standardizovanou velikost BGA pouzdra a také rozmístění plošek bylo zvoleno s ohledem na standard. Plošky mají průměr 0,6 mm a rozteč plošek je 2,54 mm střed – střed (tedy 2x standardní 1,27 mm). Šířka vodičů je 0,3 mm. Struktura se 64 otvory je také podstatně přijatelnější pro dostupný laser. Schéma testovacího motivu je znázorněno na následujícím obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Schéma testovacího motivu - spodní a horní díl

4.3.2 Pokročilejší opracování LTCC

Během několika technologických odstavek laseru se mimo jiné podařilo pokročit v bakalářské práci studenta, jehož úkolem byla modifikace ovládacího software nastavovacího laseru Aurel. Tato modifikace s postupem času umožnila provádět řezy na základě dat ve formátu Gerber. Přes počáteční problémy s převody dat, omezeními řezů na oblouky tvořené úsečkami apod. se postupně podařilo získat použitelný nástroj k práci s LTCC substráty. Následující obrázek 4.13. znázorňuje detail otvoru vyrobeného s pomocí laseru Aurel s novým řídicím programem.



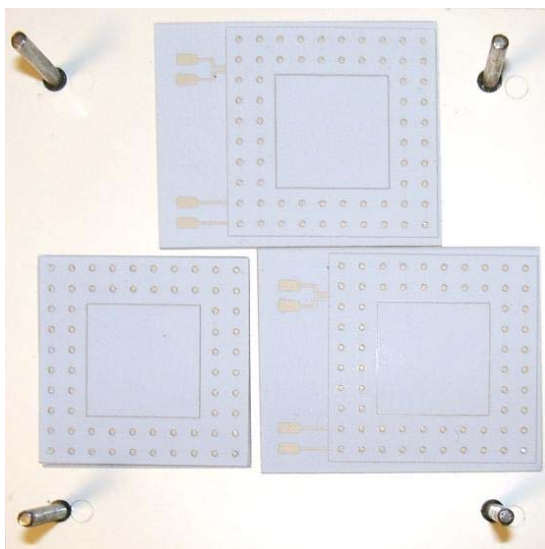
Obr. 4.13: Detail otvoru v LTCC HL2000 zhotovený pomocí laseru Aurel ALS 300

Jak je patrné, vyříznutý tvar je i přes opálené okraje a otřepy podstatně kvalitnější než předchozí otvory vytvářené pomocí externího laseru. Kromě otvorů samotných bylo již možné kompletní motivy zpracovat v návrhovém systému Eagle a celé vrstvy exportovat jako Gerber soubory.

4.3.3 Laminace a finalizace LTCC struktury

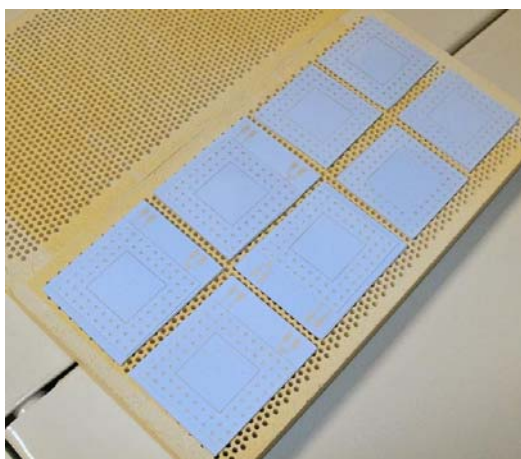
Vzhledem k deformacím testovacích vzorků s BGA 225 byly při laminaci používány zmírněné parametry lisu. Tlak (10 kN) a teplota (60°C) na úkor delších laminačních časů (10-15 min v závislosti na narůstající tloušťce). Laminace postupná po jedné vrstvě. Po natištění vodivého motivu s pomocí stříbrné pájitelné vypalovací pasty byly substráty zasušeny při teplotě 80°C po dobu 10 minut, aby se natištěná vrstva pasty zafixovala. Následně byla postupně laminována základna substrátu z trojice nepotištěných folií. Třetí vrstva je tvořena folií s vodivým motivem. Na závěr je laminována krycí vrstva s otvory. Použití dostatečného množství nosných vrstev je důležité pro zajištění dostatečné mechanické odolnosti výsledného substrátu, zároveň ale zhoršuje rovnoměrnou laminaci vrstev a ztěžuje jejich přesné sesouhlasení kvůli drobným deformacím.

Několik čerstvě laminovaných substrátů, 2x spodní a 1x horní díl spolu s lisovací matricí a mylarovou vložkou, je zobrazeno na obr. 4.14.



Obr. 4.14: LTCC substráty po laminaci

Po laminaci byly substráty vypáleny ve vsázkové peci LAC s pomocí perforovaných keramických podložek usnadňujících udržení rovinnosti (Obr. 4.15).



Obr. 4.15: LTCC substráty po laminaci

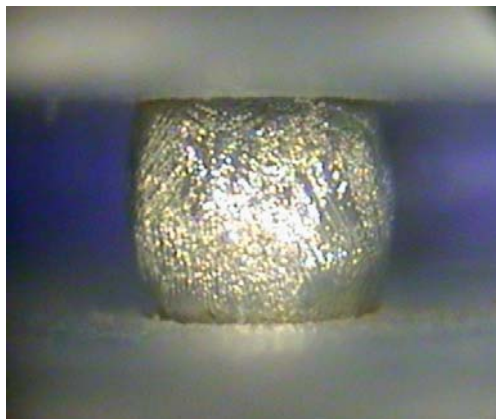
4.3.4 Pájené struktury „dimpled“ LTCC a jejich inspekce

Pro vytvoření propojení byla na protilehlé odpovídající substráty natištěna opět bezolovnatá pájecí pasta Cobar SAC3-XF3 s pomocí 100 μm šablony. Do natištěné vrstvy pasty byly osazeny pájecí kuličky Senju s průměrem 0,76 mm. Horní část sestavy byla po optickém sesouhlasení osazena s pomocí BGA opravárenské stanice Fritsch Mikroplacer a přetavena v zařízení pro pájení v parách.

Po zapájení byla u všech vzorků postupně provedena elektrická kontrola s pomocí testovacího obrazce. Několik substrátů vykazovalo chybná propojení, což lze přičíst celé řadě komplikací. Ne všechny plošky se daří tisknout a po laminaci udržet v přesně požadované tloušťce vrstvy a nerovnoměrným tlakem lisu dochází k narušení vodivých

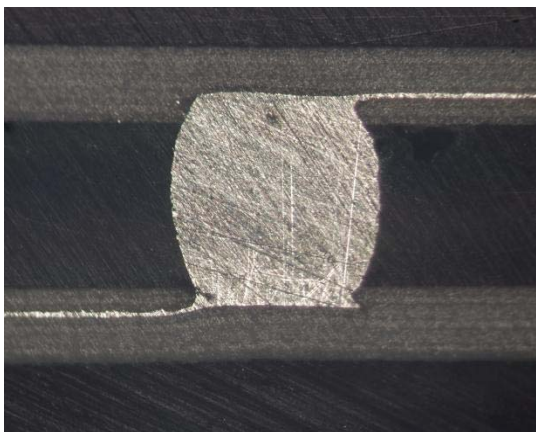
cest. Další vliv na spoje má pájecí proces, při kterém dochází u jakkoliv oslabených plošek ke kritickému odsátí stříbra do roztavené pájky.

Provedena byla také optická kontrola pájených spojů pomocí zařízení Ersascope, které umožňuje nahlédnout do mezery mezi substráty a zkontrolovat tvary pájených spojů. Při kontrole byly pořízeny snímky potvrzující rovnoměrně zapájené spoje, jako na obr. 4.16. Dobře patrné je zanoření pájky uvnitř „dimpled“ struktury na obou stranách.



Obr. 4.16: LTCC 3D „dimpled“ struktura po zapájení – detail pájeného spoje

Po optické kontrole byly nasazeny také destruktivní inspekční metody s cílem zjistit skutečný tvar jak u pájeného spoje, tak také u vnořených vodivých vrstev. Metalografický výbrus jednoho ze spojů nasnímaný optickým mikroskopem je znázorněn na obr. 4.17.



Obr. 4.17: LTCC 3D „dimpled“ struktura po zapájení – detail výbrusu pájeného spoje

Z výbrusu je velmi dobře patrný soudkovitý tvar pájky, vodivé propojení stříbrnou pastou uvnitř keramických vrstev i tvar keramické vrstvy po laminaci a výpalu. Patrná je určitá deformace tvaru, kdy se při laminaci materiál v lisu snaží přesunout do vytvořené dutiny, a zároveň tak deformuje i natištěné vodivé propoje. U různých spojů

napříč všemi výbrusy byla tato deformace více či méně rozsáhlá, což naznačuje limity dostupné technologie a ukazuje na nutnost použití sofistikovanějších metod laminace pro případné vytváření přesných struktur podobného typu.

4.4 Test realizace napařených a galvanicky zesílených měděných struktur

Jako další zajímavá technologie využitelná v propojování se jeví využití depozice měděné vrstvy napařením [17]. Jako slibná se jevila možnost zhotovit pomocí takové vrstvy na keramice pružný element, ale také plošky, které by odolávaly při pájení lépe než plošky vytvořené stříbrnými vodivými vypalovacími pastami.

4.4.1 Postup přípravy základní měděné vrstvy

Pro počáteční pokusy byly, vzhledem k vysoké ceně a technologickým komplikacím přípravy LTCC substrátů, jako hlavní materiál zvoleny Al_2O_3 substráty využívané mj. v tlustovrstvé hybridní technologii. LTCC substráty byly použity pro dílčí testy a porovnání. Substráty je nejprve třeba dokonale zbavit organických nečistot pomocí acetonu. Čisté substráty jsou následně přemístěny na nosič ve zvonu zařízení pro vakuové napařování. Jako zdrojový materiál je do napařovací lodičky umístěn měděný drát o garantované čistotě 99,9% Cu. Po dosažení potřebného vakua v úrovni alespoň $2,5 \cdot 10^{-3}$ Pa je pomocí průchozího proudu (primární cívka transformátoru nastavena na 45A) zdrojový materiál roztaven a jeho páry ve vakuu díky získané kinetické energii volně stoupají směrem k cílovým substrátům. Po dosažení vrstvy dostatečné ke zvodivění povrchu je proces ukončen a substráty vyjmuty. Na obr. 4.18 je zachyceno několik substrátů LTCC po napaření.



Obr. 4.18: Keramické substráty napařené vrstvou Cu

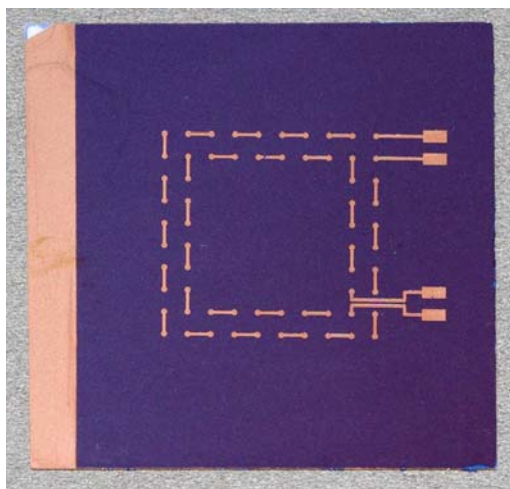
Na obrázku je také patrný snímač tloušťky napařené vrstvy umístěný uvnitř zvonu napařovacího zařízení. Testovány byly postupně různé tloušťky napařené vrstvy od cca

250 nm až po jednotky mikrometrů (5 - 7 μm). Ukázalo se však, že příliš silná vrstva napařené mědi, která snadněji překoná nerovnosti u LTCC vrstev nebo vrstev rezistu, má na druhou stranu větší problémy s přilnutím k podkladu. Tento poznatek se projevil u dalších pokusů, kde se tloušťka napařené vrstvy pohybovala zpravidla mezi 250 až 350 nm. Rychlost napařování se pohybuje v úrovni 0,10 až 0,15 nm za sekundu v závislosti na měnícím se zbytku mědi v lodičce a průchozímu proudu. Vzhledem k následnému galvanickému zesílení je napařená vrstva jen malým zlomkem v celkové tloušťce vrstvy a její tloušťka nad základní zvodivění povrchu tak není zásadní.

Povrchová rezistivita napařené vrstvy se u plochých LTCC substrátů pohybuje v rozsahu 0,4 - 0,6 Ω při měření z rohu do rohu substrátu, u substrátů se schodovým přechodem mezi LTCC vrstvami narůstá na 2 Ω při měření přes schod. Nejnižší rezistivitu dle očekávání vykazuje planární Al_2O_3 s poměrně konzistentní hodnotou 0,3 Ω , čemuž napomáhá velmi hladký povrch. Drobné rozdíly však pro experimentální galvanické zesílení nejsou rozhodující.

4.4.2 Zesílení měděné vrstvy

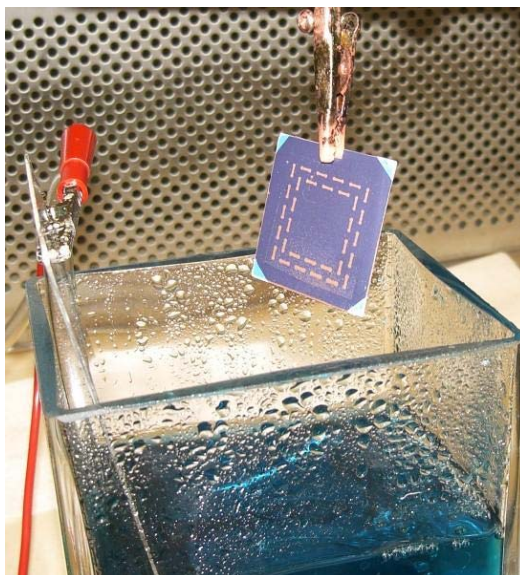
Napařený substrát je v následujícím kroku opatřen vrstvou fotocitlivého rezistu, který po osvětlení a vyvolání ponechá obnažené jen plochy určené k zesílení měděné vrstvy a pomocnou plochu nutnou k uchycení elektrody. Na obrázku 4.19. je zachycen keramický substrát s napařenou vrstvou mědi opatřený již vyvolaným fotorezistem, který odhaluje pouze budoucí vodivou strukturu.



Obr. 4.19: Keramický substrát s napařenou vrstvou Cu a vyvolaným fotorezistem

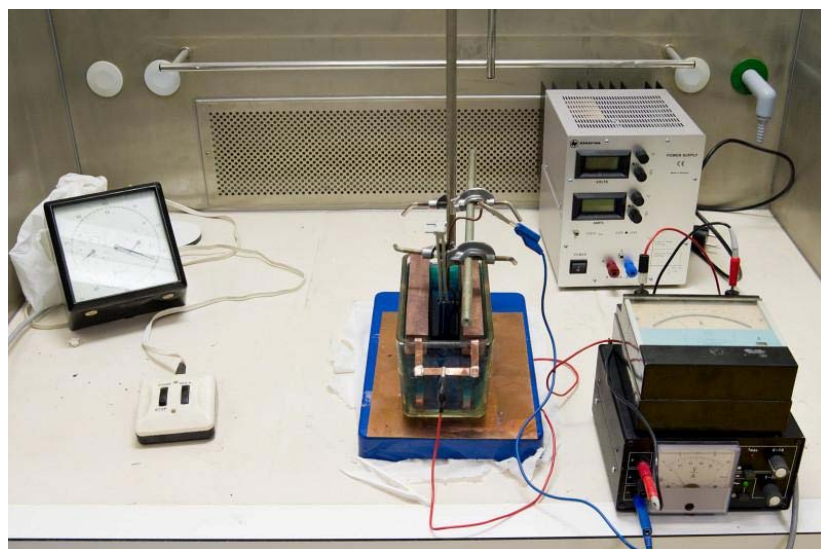
Tím jsou vytvořeny podmínky pro další část procesu, kdy se pomocí přípravku pro galvanické nanášení mědi (Obr. 4.20) zesílí vrstva v oblasti nezakryté rezistem. Jako mědicí lázeň slouží kyselý roztok síranu měďnatého a kyseliny sírové připravený v poměru 100 g CuSO_4 + 25 g H_2SO_4 na 0,5 l destilované vody [18]. V lázni byla jako anoda umístěna nerezová elektroda, zatímco pokovované vzorky se připojují jako katoda. Při procesu je používán proud v úrovni 0,3 A v závislosti na konkrétním

motivu. Čas procesu se pohyboval v rozsahu 4 - 5 min, opět v závislosti na motivu, použitém proudu a kondici lázně. Cílem bylo vytvoření 25 μm vrstvy, která byla kontrolována opticky porovnáním s vrstvou rezistu.



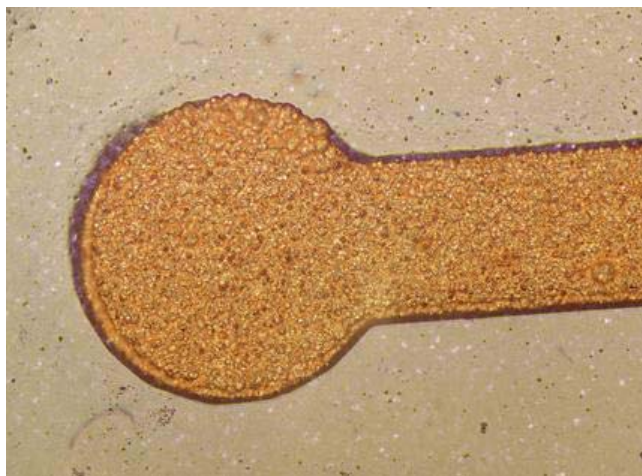
Obr. 4.20: Přípravek pro galvanické zesilování napájené vrstvy a detail LTCC substrátu

V pozdější fázi bylo pro úpravu LTCC substrátů s „dimpled“ vrstvou používáno i pokročilejší zařízení vybavené měděnými elektrodami o vysoké čistotě a komerčně připraveným poměďovacím roztokem s přísadami napomáhajícími zlepšit kvalitu povrchu zesílené vrstvy. (Obr. 4.21)



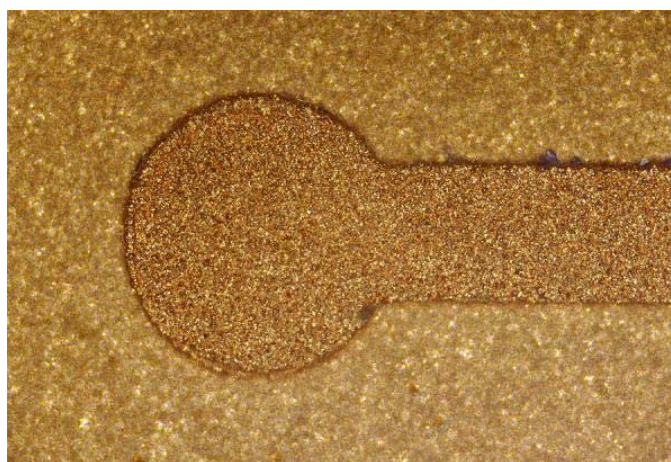
Obr. 4.21: Pracoviště pro galvanické pokovení s měděnými elektrodami a komerční lázní

Výsledek procesu je zobrazen na obrázku 4.22. Na okrajích motivu jsou patrné drobné nerovnosti a přesahy mědi přes rezist, avšak průměr plošky je v tomto případě 0,6 mm a poměr nerovností k velikosti plošky je pro testování zanedbatelný.



Obr. 4.22: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv (mikroskopický detail)

Po vytvoření požadované vrstvy je 10 % roztokem hydroxidu sodného odstraněn zbývající fotorezist, čímž se opět obnaží napařená pomocná vrstva mědi, ze které vystupuje zesílený motiv. Detail takové struktury je zachycen na obrázku 4.23.



Obr. 4.23: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv (mikroskopický detail)

Pomocná vrstva napařené mědi je v dalším kroku odstraněna mikroleptem za pomoci silně ředěného roztoku kyseliny chlorovodíkové a peroxidu vodíku, neboť by zamezila fungování vytvořeného motivu. (Obr. 4.24).

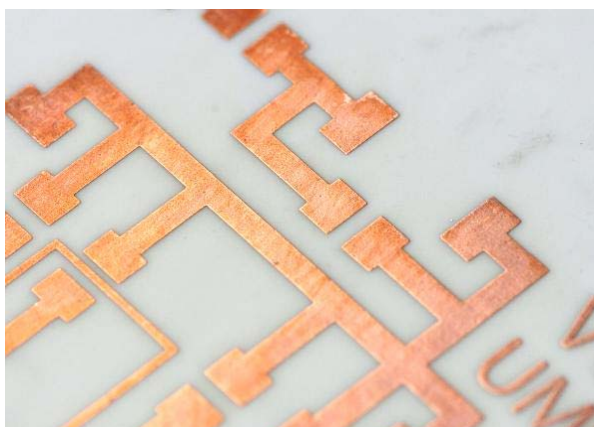


Obr. 4.24: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv během mikroleptu

Po odleptání a oplachu na keramickém substrátu zůstává jen požadovaný zesílený motiv. Povrch je vhodné mechanicky, s pomocí kovového kartáče pro čištění DPS, mokrým procesem zbavit povrchových defektů, nerovností a případných zbytků rezistu. Výsledný vzhled motivu po všech procesech je možné vidět na obrázcích 4.25 a 4.26.



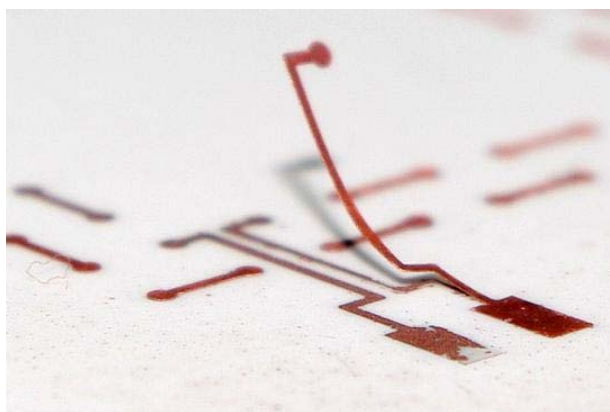
Obr. 4.25: Výsledná podoba galvanicky zesíleného motivu (mikroskopický detail)



Obr. 4.26: Výsledná podoba galvanicky zesíleného testovacího motivu po kartáčování

4.5 Pružné měděné plošky na keramice

Během testování technologie vytváření plošek na keramických substrátech se jako zajímavá varianta jevílo použití vakuově napařené a galvanicky zesílené vrstvy mědi k vytvoření pružné, tedy nefixované, plošky umožňující větší rozsah pohybu (pružnosti) ve srovnání s ploškami pevnými během teplotního namáhání substrátu a spoje. Základní idea vznikla na základě problémů s ploškami, vzniklými na příliš silné vrstvě napařené mědi (7 - 10 μm), u kterých po zesílení Cu a stripování rezistu docházelo k loupání celé vrstvy z povrchu základního substrátu. Detail takového případu je zobrazen na Obr. 4.27:



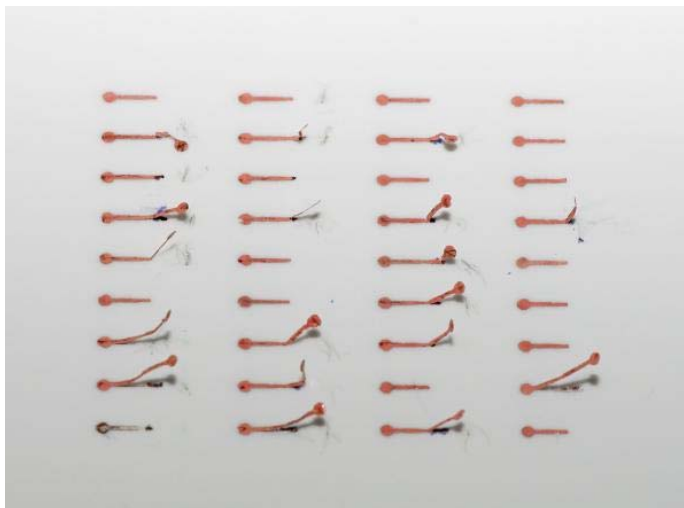
Obr. 4.27: Detail částečně odtržené pružné měděné plošky

Materiál, přestože se nechal loupat z podkladu, vykazoval dostatečnou pevnost použitelnou v případě vícenásobné struktury i k nesení menšího pouzdra. Objevila se tedy idea tohoto jevu využít a pokusit se vytvořit plošky, které by byly na jedné straně pevně fixované k substrátu, a opačný konec by sloužil k připájení neseného substrátu.

Jako vhodný výrobní postup se jevila modifikace procesu zmíněného v bodech 4.4.1 a 4.4.2. Úprava spočívala v nanesení, vytvrzení a vyvolání fotorezistu na část Al_2O_3 substrátu ještě před procesem napařením tenké vrstvy Cu. Těmito kroky by rozpuštěním fotorezistu pod mědí vznikl později uvolněný díl měděné struktury.

Po napaření vrstvy mědi na keramický substrát s fotorezistem již proces pokračoval klasicky. Na napařenou vrstvu byl nanesen další fotorezist, v němž byl pomocí osvětlení přes filmovou předlohu vytvořen a následně vyvolán testovací motiv s ploškami, který v rezistu otevřel přístup k napařené mědi. Následně bylo použito galvanické zesílení motivu odhalených plošek, po kterém následovalo rozpuštění rezistu, odleptání pomocné napařené tenké měděné vrstvy a zdlouhavé rozpouštění zbytků rezistu pod zesílenou měděnou vrstvou.

Jeden z mnoha výsledků těchto experimentů s dobře patrným poškozením motivu po odstranění fotorezistu je zobrazen na obrázku 4.28:



Obr. 4.28: Testovací sestava částečně uvolněných měděných plošek po odstranění fotorezistivních vrstev

Zatímco teoretická představa počítala s oddělením plošek po odstranění první vrstvy rezistu, v praxi se ukázalo, že právě onen rezist pod napařenou měděnou vrstvou je velmi obtížné odstranit tak, aby nedošlo k přílišnému poškození uvolňovaných částí měděného motivu. Zejména oblast v místě schodu mezi keramikou a původní vrstvou, nyní již rozrušeného nebo úplně odstraněného fotorezistu, byla velmi oslabena. Postupně bylo otestováno několik různých tvarů (přímé, zahnuté, spirálovité) a šířek takovýchto struktur, ale zamýšlený postup se ukázal být náročnější na materiály, které byly k dispozici, než se očekávalo. Opakovatelný a k pájení použitelný výsledek se ale nepodařilo dosáhnout.

Experimenty s vrstvením fotorezistu s měděnými vrstvami však vyústily v myšlenku využít podobným způsobem laminovanou fóliovou nepájivou masku. Bylo by tak možné vytvořit trojrozměrnou strukturu podobnou plošnému spoji. Uplatnit by se mohlo zejména přemostění vodičů, nebo vytvoření pájitelných plošek nad vnořenými planárními tlustovrstvými strukturami na povrchu keramického nosného substrátu.

Vzhledem k zaměření práce hlavně na LTCC a také nedostatek vhodné laminovací nepájivé masky však byly další praktické experimenty v této oblasti odloženy.

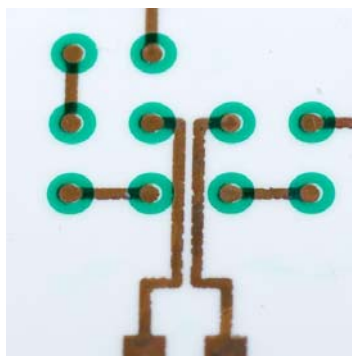
4.6 Test pájení napařených a galvanicky zesílených měděných struktur

Dalším testem v pořadí bylo zhotovení pájitelných planárních motivů vhodných pro propojení substrátů do 3D struktur. Bylo rozhodnuto otestovat jak propojení keramika - keramika, tak také propojení keramika - FR-4. Vzhledem k již hotovým FR-4 testovacím substrátům i šablonám pro tisk pasty byl opět použit motiv BGA 64.

4.6.1 Příprava substrátů s měděným motivem BGA 64

Pomocí postupu popsaného v oddílech 4.4.1 a 4.4.2 byl na povrchu Al_2O_3 i LTCC HL2000 keramických substrátů realizován vodivý motiv. Pro zajištění správného tvaru

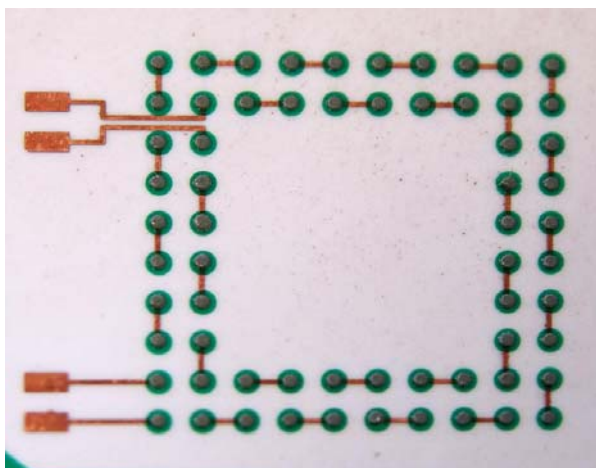
pájecích plošek byla na substráty v poslední fázi aplikována pomocí sítotisku nepájkivá maska. Přítomnost nepájkivé masky také představuje pomocnou fixaci motivu ke keramickému substrátu. Otestovány byly postupně různé varianty krytí substrátu: celistvá vrstva masky přes celý substrát pouze s otvory pro plošky, maska zakrývající lokálně vodivé cestičky mezi ploškami ale i kruhový motiv masky, tvořící zákryt pouze kolem plošky, který se ukázal jako nejvhodnější z hlediska minimalizace. Zmíněné provedení masky je patrné na obrázku 4.29.



Obr. 4.29: Detail provedení kruhové nepájkivé masky

4.6.2 Pájení substrátů s měděným motivem BGA 64

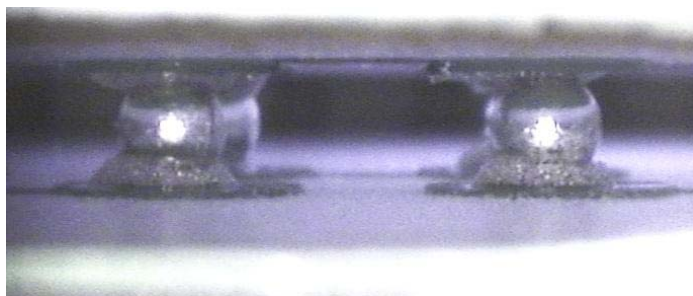
Pro pájení substrátů bylo použito pro konzistenci s předchozími pokusy pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 natištěné na obě styčné plochy substrátů s pomocí 100 μm šablony. Natištěná pasta je zachycena na Obr. 4.30. Jako základny byly použity kromě Al_2O_3 a LTCC také FR-4 substráty.



Obr. 4.30: Testovací motiv BGA 64 s kruhovou nepájkivou maskou a natištěnou pájecí pastou

Na spodní základnu byly do natištěné pasty osazeny bezolovnaté pájecí kuličky Senju SnAgCu 305 s průměrem 0,76 mm. Následně byl pomocí stanice Fritsch sesouhlasen

a osazen horní díl sestavy. Detail této sestavy pořízený při optické kontrole na zařízení Ersascope je dobře patrný na obrázku 4.31.

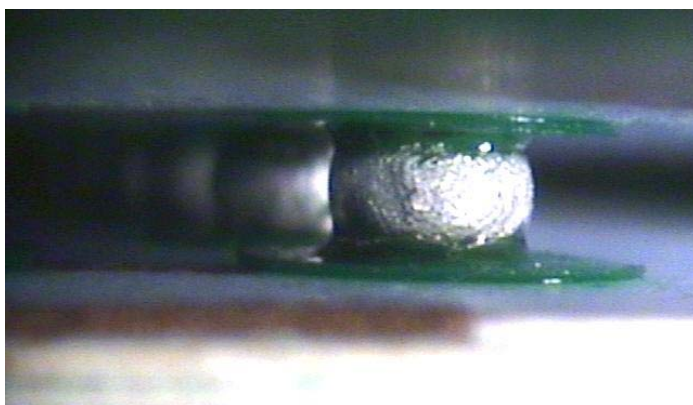


Obr. 4.31: Sestava substrátů a kuliček před přetavením

Substráty byly v dalším kroku umístěny do zařízení pro pájení v parách a přetaveny. Použitý teplotní profil odpovídal Obr. 4.1.

4.6.3 Zhodnocení substrátů s měděným motivem BGA 64

Po přetavení byla provedena optická kontrola (Obr. 4.32) prozrazující rovnoměrné tvary pájených spojů jak u spojení keramika – keramika, tak u spojení keramiky s organickými substráty FR-4.

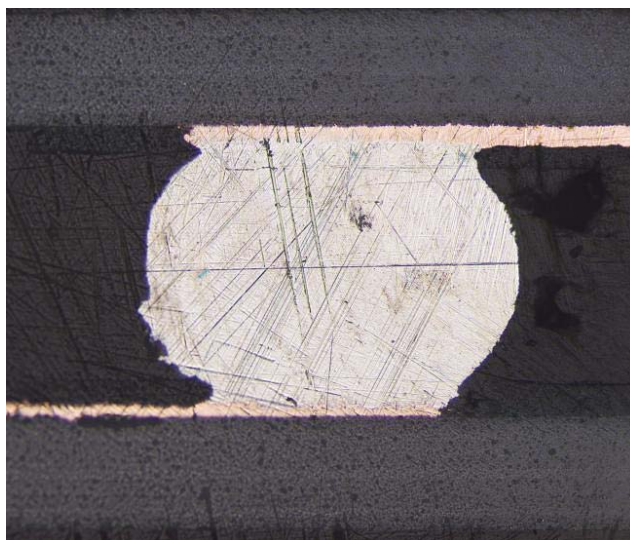


Obr. 4.32: Sestava substrátů po přetavení

Rovnoměrným tvarům pájených spojů mezi keramikou a FR-4 substráty napomáhá prakticky shodná úroveň smáčivosti mezi oběma měděnými povrchy. Přestože galvanicky zesílená měď je více porézní, je podstatně lépe smáčivá ve srovnání s vypalovanou stříbrnou vodivou tlustovrstvou pastou.

Proveden byl také elektrický test vodivých řetězcových motivů. Pájení bylo z hlediska propojení úspěšné.

Kromě optické a elektrické nedestruktivní kontroly byly provedeny také mikrovýbrusy s cílem prověřit detaily spojení mezi jednotlivými kovy, ale také ověřit tvar spojů, nebo zjistit přítomnost případných bublin v pájce. Detail jednoho z mikrovýbrusů byl pomocí mikroskopu zachycen na následujícím obrázku 4.33.



Obr. 4.33: Mikrovýbrus zapájené sestavy LTCC substrátů s měděnými vrstvami

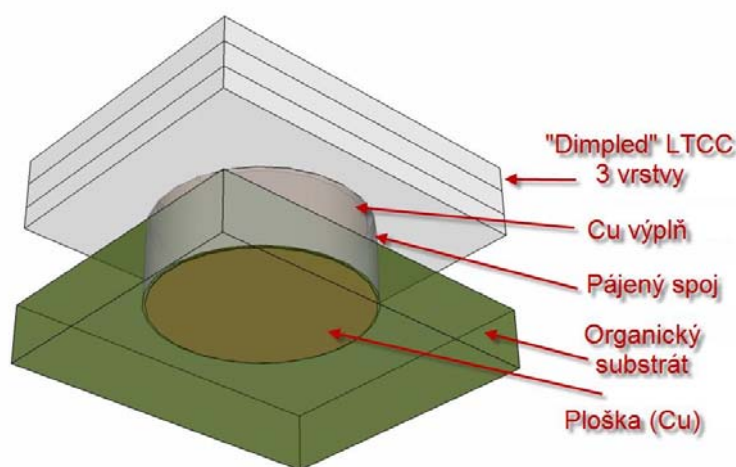
Na obrázku je řez strukturou zhotovenou pomocí dvojice keramických substrátů skládajících se ze tří vrstev LTCC HL2000 s měděnými vrstvami. Při detailním zkoumání jsou dobře patrné intermetalické vrstvy na obou rozhraních, což poukazuje na kvalitně zapájené spoje. Stejně tak soudkovitý až mírně kulovitý tvar pájkového spoje s naprostým minimem bublin nebo prasklin je dokladem úspěšného pájení.

Z hlediska propojení se podařilo zhotovit velmi kvalitní spoje i pro keramické substráty, jejichž vlastní vypalovací vodivé Ag a Ag-Pd pasty poskytují sice mechanicky a chemicky odolnější, ale relativně hůře pájitelný kontaktní povrch. Otázkou však zůstává technologie samotná. V laboratorně dostupných podmínkách je proces omezen hned na několika místech dosažitelnou přesností. Ať už při osvitu a vyvolání použitého fotorezistu, tak také při galvanickém procesu samotném, kdy je obtížné dosáhnout u všech vzorků po celé ploše konzistentní tloušťky i struktury zesílené vrstvy. Do procesu vstupuje celá řada procesů obtížně ovlivnitelných bez vyladěné sériové přípravy.

Zkušenosti získané s tímto procesem však byly využity při konstrukci složitějších struktur popsanych dále.

4.7 Test realizace napařených a galvanicky zesílených měděných „dimpled“ struktur na LTCC HL2000

Logickým vyústěním předchozích experimentů byla kombinace technologií do podoby „dimpled“ struktury s otvory v keramice opatřeny vrstvou napařené a galvanicky zesílené mědi. Cílem byla maximalizace vrstvy dobře pájitelného kovu, která zároveň vytváří pomocnou vyrovnávací hmotu pro kompenzaci pnutí během teplotně-mechanického namáhání spojů. Samozřejmě bylo zároveň snahou zamezit odsávání stříbra z plošek do roztavené pájky a zajistit dobrou pájitelnost s běžnými tavidly a pájkami. Schéma takové možné sestavy znázorňuje obrázek 4.34.



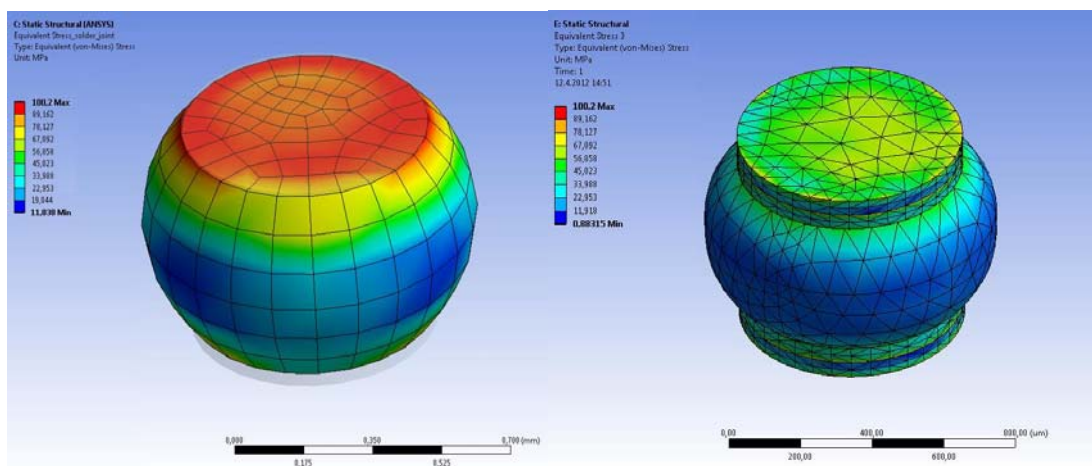
Obr. 4.34: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami

Na obrázku je patrná keramická struktura ve spojení s organickým materiálem FR-4 desky plošných spojů, což je spojení vyznačující se velkým rozdílem koeficientů teplotní i objemové teplotní roztažnosti a na pájený spoj jsou tak přeneseny velké nároky. Testovány ale byly i struktury navzájem propojující keramické substráty, což umožnilo získat více vzorků jednotlivých propojů pro zkoumání.

4.7.1 Simulační rozbor „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

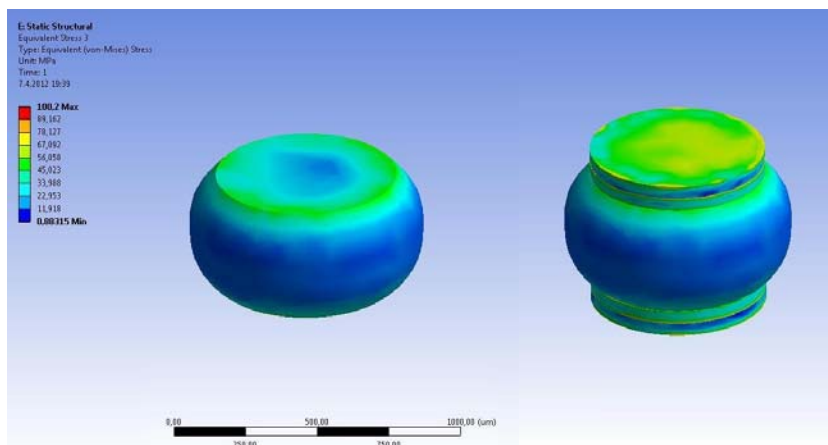
Jako jeden z prvních kroků před realizací vzorků však byla provedena simulace mechanického namáhání spojů při potenciálním teplotním cyklování s teplotním rozsahem -20°C až $+100^{\circ}\text{C}$. Pro porovnání byly stejné parametry použity i pro strukturu klasicky připájenou pouze pájkou přímo na stříbrné plošky keramického substrátu. Tato situace je zobrazena na obrázku 4.35, kde je v levé části zobrazena struktura pouze s pájkovou kuličkou na Ag plošce, zatímco pravá strana popisuje situaci u „dimpled“ LTCC struktury s vrstvou mědi. Z výstupu simulace je velmi dobře patrný výsledek s charakteristikou podobnou simulaci v oddíle 4.2.5. Největší namáhání klasického spoje je v místě spojení pájky s ploškou, zatímco samotné tělo pájkového spoje je již namáhání vystaveno méně. Situace „dimpled“ struktury nám připomíná ve větším

detailu „dimpled“ strukturu z předchozích simulací. Menší rozdíl je tvořen další vrstvou, která zvětšuje množství materiálu, jenž je k dispozici pro rozložení působení sil, které při teplotním namáhání vytvářejí pnutí ve spoji.



Obr. 4.35: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami

Následující obrázek 4.36 je potom rozčleněným zobrazením, které nám dává možnost nahlédnout mezi jednotlivé části vrstev pájeného spoje. Je zde patrné, jaký rozdíl je v místě, kde pájkový spoj přechází z prohlubně dimpled části do úrovně keramické vrstvy.



Obr. 4.36: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami

Simulace však vždy představují pouze orientační náhled na situaci a vzhledem ke složitosti detailů jsou simulované objekty záměrně zjednodušeny, neboť sestava beroucí v úvahu také tlustovrstvé plošky a nepravidelnosti realistických spojů by byla příliš hardwarově náročná pro zpracování.

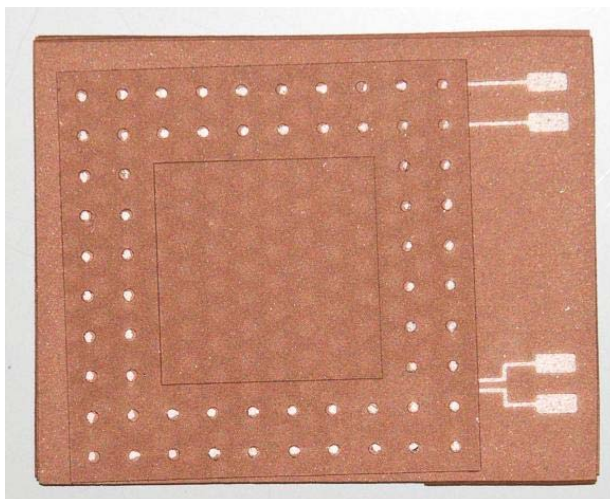
4.7.2 Příprava „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

Pro získání praktického náhledu na skutečnou strukturu bylo třeba zhotovit skutečné vzorky a podrobit zkoumání.

Postupné kroky přípravy vzorků vycházejí z technologií popsaných v předchozích kapitolách, což umožňuje poněkud zestručnit celý proces. Jako testovací motiv byl opět zvolen řetězcový BGA 64, který umožňuje provedení elektrických testů zapájených sestav.

LTCC substráty byly vytvořeny obdobně jako u bodu 4.3. Laserem vyřezané a stříbrným tlustovrstvým motivem potištěné substráty byly postupně po jedné vrstvě laminovány a následně vypáleny ve vsázkové peci.

Změnou je však krok následující, kdy byly vypálené substráty obratem umístěny do zařízení pro vakuové napařování, kde byly opatřeny 280 - 320 nm vrstvou mědi. Otestován byl sice větší rozsah tloušťky vrstvy, nicméně hodnota v úrovni 300 nm byla zvolena jako průsečík požadavku na dostatečnou vodivost vrstvy i v místě schodků mezi vrstvami, a zároveň požadavkům na co nejkratší proces napařování. Roli samozřejmě hrála i minimalizaci spotřeby čisté zdrojové mědi a náročnost konečného odleptání zbytků této pomocné vrstvy, kdy příliš silná vrstva napařené mědi prodlužovala mikrolept, který zároveň zbytečně poškozoval chtěnou zesílenou vrstvu. Na obrázku 4.37 je zachycen LTCC substrát s „dimpled“ vrstvou krátce po vyjmutí z vakuové napařovací aparatury.



Obr. 4.37: „Dimpled“ LTCC substrát krátce po napaření měděné vrstvy

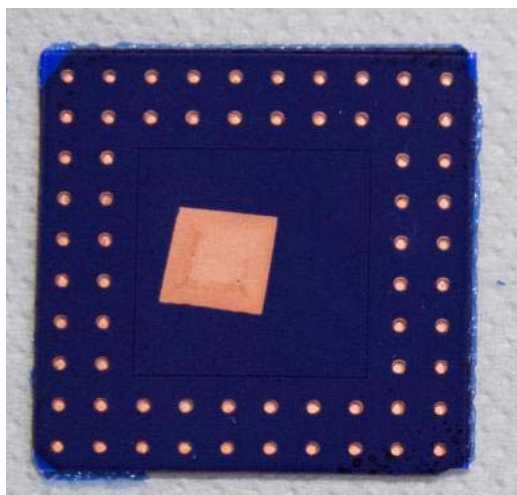
Na obrázku dobře patrný obrazec připomínající oka síta na keramice vzniknul během výpalu. Jedná se o otisknutou keramickou vypalovací podložku. Napařením mědi byla tato struktura následně zvýrazněna. Z hlediska povrchu se však jedná pouze o kosmetický vjem bez jakéhokoli vlivu na kvalitu povrchu keramického substrátu.

Substráty opatřené napařenou vrstvou byly dále potaženy laminovaným fotorezistem (Obr. 4.38), ve kterém byly pomocí osvitu přes filmovou předlohu a vyvolání vytvořeny otvory korespondující s otvory v krycí vrstvě LTCC.



Obr. 4.38: Substráty na podložce opatřené fotorezistem

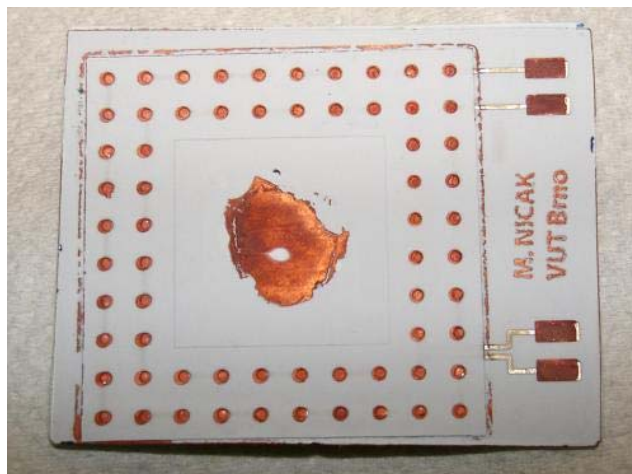
Kromě otvorů nutných pro pokovení samotných pájecích plošek byl ponechán odhalen také pomocný otvor ve fotorezistu pro uchycení elektrody, jak znázorňuje obrázek 4.39.



Obr. 4.39: Substrát s vyvolaným fotorezistem odhalujícím budoucí vnořené pájecí plošky a pomocnou plochu pro elektrodu

Takto připravené substráty bylo možné v dalším kroku upevnit do pokovovacího přípravku a odhalenou vrstvu napařené mědi galvanicky zesílit. Po galvanickém

procesu byl odstraněn nyní nepotřebný fotorezist a byla odleptána pomocná napařená vrstva mědi. Jeden z prvních výsledných substrátů je zachycen na následujícím obrázku 4.40.



Obr. 4.40: Substrát se zesílenými ploškami po odstranění fotorezistu a mikroleptu

Na obrázku je kromě pokovených plošek zachyceno i několik problémů, které byly předmětem dalšího ladění procesu. Například bublinky plynů uvolňujících se na ploškách během procesu v některých případech narušily výsledné plošky. Jako řešení tohoto problému se nabízelo cílené víření roztoku probubláváním. Výsledek probublávání však nebyl jednoznačný. Podařilo se sice zmírnit poškození plošek bublinkami generovaných plynů, na druhou stranu množství vzduchu v roztoku zajistilo nárůst problémů s oxidací vznikající vrstvy, kdy povrch obsahoval podstatně více pórů, a kvalita mědi byla ovlivněna oxidovými vrstvami, což následně zhoršovalo pájitelnost plošek.

Dalším testovaným opatřením bylo využití magnetického míchadla. Rozvířený roztok relativně účinně odtrhoval v otvorech uchycené bublinky a mj. zrovnoměrňoval působení roztoku. Na druhou stranu větší pohyb roztoku zhoršil stabilitu elektrického obvodu a určení tloušťky zesilované vrstvy pomocí času nebylo dostatečně spolehlivé. Detail pokovených plošek v otvorech, ukazující větší míru oxidace u levé plošky, je na obr. 4.41.

Tloušťka výsledné vrstvy zesílené mědi se u vzorků pohybovala mezi 20 a 30 μm (měřeno na mikrovýbrusu s pomocí software pro kameru u mikroskopu). Původně plánované tloušťky v úrovni 80 - 100 μm se v dostupných podmínkách vytvořit s uspokojivým povrchem již nedařilo, neboť při déletrvajících pokoveních byl povrch velmi nerovnoměrný a tvořily na něm vystupující útvary i větší množství oxidů.



Obr. 4.41: Detail výsledných plošek

4.7.3 Pájení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

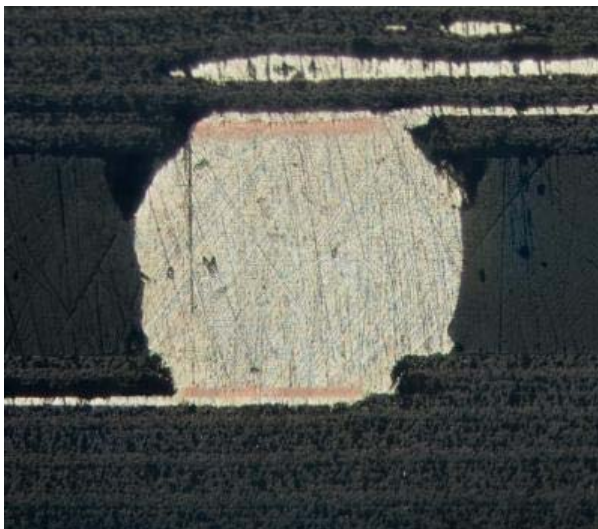
Pájení struktur bylo provedeno obdobně jako pájení „dimpled“ struktur bez měděné vrstvy v bodě 4.3. Na hotové substráty byla pomocí 100 μm šablony nanесena pájecí pasta Cobar SAC3-XF3 a do ní osazeny pájkové kuličky Senju s průměrem 0,76 mm. Sestavy byly poté sesazeny s pomocí optického hranolu stanice Fritsch.

Pájení bylo opět provedeno v inertní atmosféře zařízení pro pájení v parách a zapájené vzorky (Obr. 4.42) byly podrobeny optické inspekci a elektrické kontrole obvodu.



Obr. 4.42: Zapájená sestava LTCC substrátů

Na vybraných vzorcích byly také provedeny mikrovýbrusy (Obr. 4.43) umožňující prozkoumání jednotlivých vrstev. Jak je z řezu patrné, vrstvy byly úspěšně spojeny jednotlivé vrstvy kovů. Při větším zvětšení detailů byly na vzorcích dobře detekovatelné i tenké vrstvy intermetalických slitin na rozhraních jednotlivých přechodů. Dobře patrné jsou také navazující vodivé cesty utopené ve vrstvách LTCC keramických substrátů.



Obr. 4.43: Detail mikrovýbrusu pájeného spoje

Zajímavou částí obrázku je horní LTCC sestava laminovaných substrátů, ve které jsou patrné další utopené stříbrné vodivé cesty. Ty vznikly díky využití některých LTCC substrátů s chybou tisku jako součásti nosného těla struktury s cílem uspořít nákladný materiál. Tato věc také ukazuje na jednu z nevýhod LTCC substrátů, kterou je nemožnost zbavit substrát chybně natištěné vrstvy, neboť při styku s xylenem, používaným k setření nechtěných tisků u Al_2O_3 substrátů, dochází k okamžitému rozpuštění a nenávratnému zničení nevypálených LTCC HL2000 substrátů. Tato situace provázela i mnoho dalších vzorků LTCC struktur používaných s kuličkami s pevným jádrem v dalších experimentech.

Řez řetězcovou navazující sestavou elektricky propojených plošek je pak zachycen na obrázku 4.44.



Obr. 4.44: Mikrovýbrus pájeného spoje ukazující návaznost propojených plošek

4.7.4 Zhodnocení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

Jak je z mikrovýbrusu patrné, nepodařilo se uspokojivě dosáhnout předpokládané tloušťky měděné zesílené vrstvy v „dimpled“ struktuře. Nicméně experiment i tak ukázal zajímavou konstrukční možnost a také technologické limity dostupných přípravků. Je velmi pravděpodobné, že v odladěném výrobním procesu s využitím pouze standardních pokovovacích lázní s definovanou koncentrací a přesně dodrženým proudem i časem pokovení by bylo možné dosáhnout vrstvy silnější, rovnoměrnější a více se přiblížit k simulované struktuře. Ovšem i s vrstvou o tloušťce jedné čtvrtiny oproti plánu se podařilo zhotovit sady vzorků, které úspěšně prošly elektrickým testem řetězce plošek a také optickými kontrolami spojů s pomocí Ersascope.

U praktické aplikace však vyvstává otázka rentabilnosti technologie, neboť zhotovení vrstvy mědi uvnitř „dimpled“ struktury přidává další sestavu nutných procesních kroků k už tak náročnému zhotovení LTCC substrátů. Velmi vhodné by také bylo opatřit vrstvu mědi vhodnou povrchovou úpravou, neboť ve srovnání se stříbrnými tlustovrstvými ploškami dochází k oxidaci měděného povrchu, zvláště pokud je výrazně pórovitý po galvanickém zesilování.

4.8 Testovací struktura „dimpled“ LTCC s napařenými silnými měděnými vrstvami

Během tvorby předchozího experimentu vyvstala myšlenka alternativního nanesení vrstvy mědi s pomocí napaření silné vrstvy přes šablonu s otvory. Takto zhotovená výsledná vrstva by poskytla dostatečnou ochranu pájecích plošek proti odsávání stříbra roztavenou pájkou a také by zajistila velmi dobrou smáčivost a pájitelnost povrchu.

4.8.1 Příprava substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi

Substráty pro tento experiment byly připraveny obdobně jako pro předchozí testy. Rozdílný byl však proces napařování. LTCC „dimpled“ substráty byly po vypálení a prověření vodivých vrstev překryty mosaznými šablonami o tloušťce 100 μm s vyleptanými otvory pro motiv BGA 64. Na obrázku 4.45 je zachyceno umístění substrátů se šablonami v napařovací aparatuře po ukončení napařovacího procesu.

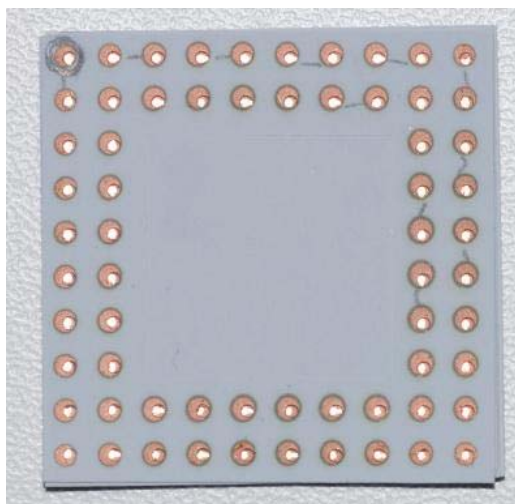
Testováno bylo několik různých průměrů otvorů od 0,5 mm až po 0,9 mm. Motiv napařený přes nejmenší otvory však vzhledem k síle šablony trpěl stíny, tedy zakrytými částmi motivu, kde šablona při jiném než kolmém nastavení vzhledem ke zdroje lodičky s mědi znemožnila pokrytí celé plošky.

Pro další ověřování tak byly zvoleny šablony s většími otvory i za cenu určitého přesahu napařené vrstvy přes otvory v krycí vrstvě LTCC. Postupně bylo napařeno několik různých vrstev, z nichž nejsilnější dosáhly až úrovně 9 - 10 μm .



Obr. 4.45: LTCC substráty v napařovací aparatuře

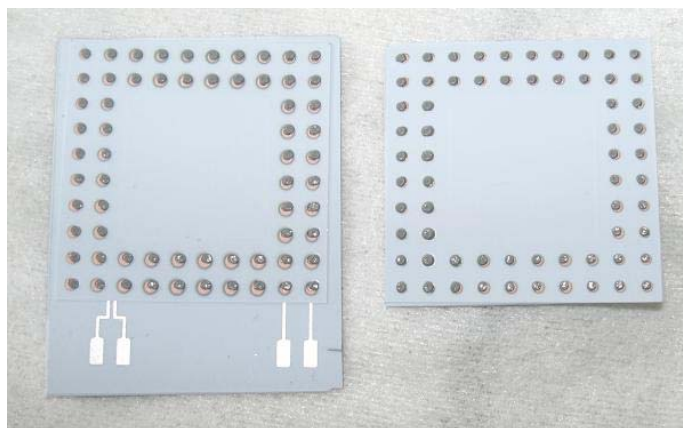
Na obrázku 4.46 je zachycen hotový substrát po odejmutí šablony. V tomto konkrétním případě se jednalo o šablonu s největšími otvory. Doplňkové značení je na substrátu z důvodu zajištění správné orientace při osazení.



Obr. 4.46: LTCC substrát s napařenou velmi silnou vrstvou mědi

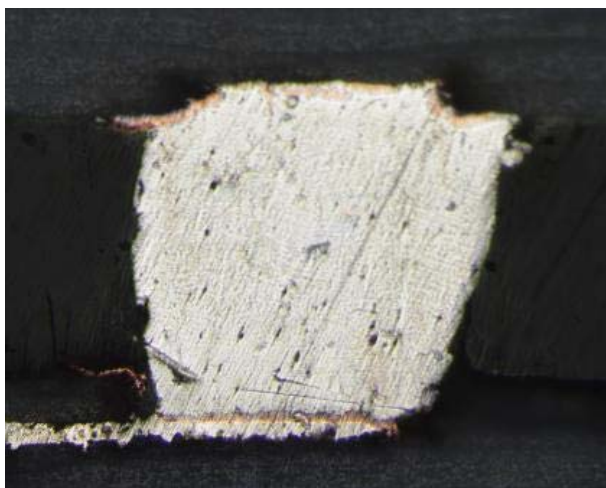
4.8.2 Pájení a zhodnocení substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi

Na hotové substráty byla podobně jako u předchozích experimentů nanесena bezolovnatá pájecí pasta Cobar SAC3-XF3 pomocí 100 μm šablony (Obr. 4.47). Následně byly do pasty osazeny pájecí kuličky Senju o průměru 0,76 mm. Substráty byly sesouhlaseny s pomocí stanice Fritsch a poté pájeny v zařízení pro pájení v parách.



Obr. 4.47: LTCC substráty s ploškami pokrytými pájecí pastou

Po pájení byla u substrátů úspěšně provedena elektrická a optická kontrola. Pro nahlédnutí do struktury pájených spojů byly provedeny mikrovýbrusy. Jeden z detailů byl s pomocí mikroskopu zachycen na obrázku 4.48



Obr. 4.48: Mikrovýbrus pájeného propoje mezi LTCC substráty se silnou vrstvou napařené Cu

Na fotografii mikrovýbrusu je patrná tenká vrstvička napařené mědi, která i po pájecím procesu kryje stříbrnou plošku z tlustovrstvé pasty, přes kterou je napařena. Je evidentní, že ani v tomto případě nedošlo k poškození plošek odsátím stříbra do pájkového propoje. Při posuzování užitečnosti této metody aplikace měděné vrstvy je však třeba přihlídnout k velmi dlouhému napařovacímu procesu a nadměrné spotřebě zdrojového čistého materiálu v tavící lodičce, který je navíc z velké části neefektivně napařen pouze na krycí šablony. Nicméně metoda může být využita tehdy, když není možné provést zesílení galvanické například z důvodu velmi složitého motivu. Vhodné pak také bude použít výrazně tenčí šablonu (např. 25 μm fólii), což omezí stínění vysokou hranou otvorů. Takto tenkou šablonu je navíc možné místo leptání snadno a přesně vyřezat s pomocí laseru.

4.9 Srovnání pájecích kuliček na různých substrátech pomocí testu stříhem

Pro porovnání jednotlivých typů kuličkových propojení byl mj. proveden test pevnosti stříhem. Test se provádí na pouzdrech nebo substrátech s osazenými a zapájenými kuličkami. Kuličky jsou s pomocí nástroje testovacího zařízení namáhány silou působící ze strany, dokud nedojde k odtržení pájkového materiálu nebo i celého spoje včetně plošky. Síla působící na kuličku je průběžně měřena a zaznamenána je maximální hodnota před poklesem odporu hmoty, tedy zlomem, stříhem, odtržením.

4.9.1 Testovací zařízení pro zkoušky pevnosti

Pro testy bylo použito v laboratoři dostupné trhací zařízení Nordson Dage Bond Test 2400 PC. Jedná se o víceúčelový testovací prostředek s několika výměnnými moduly pro různé typy zkoušek. Zařízení je přesně kalibrováno a primárně je určeno pro testování pevnosti (vertikální namáhání, nebo trhání) kontaktovacích mikrodrátků používaných pro připojování čipů integrovaných obvodů k ploškám nosných substrátů a pouzder. Pro testování pevnosti pájecích kuliček, pájkových bumpů, ale také připájených SMD součástek je však zajímavější druhý dostupný výměnný modul. Ten je vybaven hlavou umožňující uchycení různě širokých nástrojů pro horizontální test pevnosti stříhem, kdy nástroj ze strany působí silou na zkoumaný spoj. Zařízení je schopno provádět dva druhy testu.

První možností je nastavení požadované pevnosti spoje, kdy zařízení namáhá zkoumaný spoj pouze do nastaveného limitu. Odolá-li vzorek bez odtržení, je označen za vyhovující. Takto otestovaný vzorek lze, při dodržení úměrně menšího testovacího namáhání vzhledem k maximální možné odolnosti spoje, dále používat s jistotou určité úrovně jakosti.

Druhou možností zkoušek na zařízení je test plně destruktivní, který má za cíl odhalit maximální odolnost zkoumaného vzorku. Zařízení na zkoumané místo působí stále narůstající silou, dokud nedojde k odtržení, nebo deformaci. Při tomto testu je zaznamenáno dosažené maximum působící síly před utržením spoje nebo poklesem mechanického odporu. Nevýhodou je ovšem zničení zkoumaného spoje.

Vzorky jsou v zařízení uchyceny pomocí mechanického upínacího stolečku, který je zafixován vakuovým přísátím. Stoleček je fixován k pohyblivé plošině, kterou je možno přesně polohovat v osách x a y.

4.9.2 Příprava a postup srovnávacího testu stříhem

K testu byly zvoleny substráty zastupující několik technologií: HL2000 LTCC „dimpled“ struktura, LTCC s měděnou zesílenou vrstvou, Al_2O_3 s měděnou vrstvou, Al_2O_3 se stříbrnými tlustovrstvými ploškami a také FR-4 substrát.

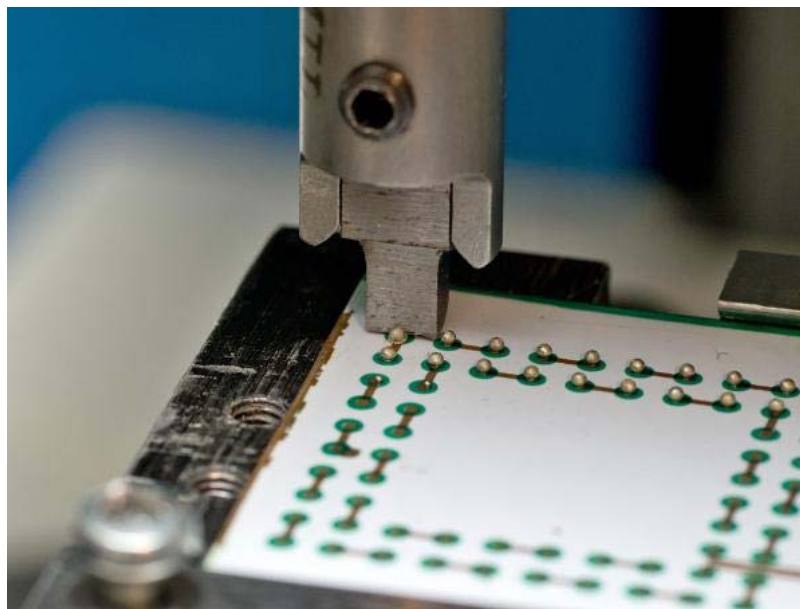
Substráty byly opatřeny 100 μm vrstvou pájecí pasty Cobar SAC3-XF3, do které byly osazeny pájkové kuličky Senju s průměrem 0,76 mm. Osazené sestavy byly zapájeny v zařízení pro pájení v parách.

Hotové vzorky byly v dalším kroku po jednom uchyceny do zařízení a na zapájených kuličkách byl proveden test stříhem. Použitý nástroj měl šířku 5 mm. V zařízení byly nastaveny tyto parametry:

Rychlost posuvu při přiblížení	[LandSpeed]	300 $\mu\text{m/s}$,
vzdálenost nástroje od substrátu	[TestHeight]	100 μm ,
rychlost posuvu při stříhu	[TestSpeed]	17 $\mu\text{m/s}$,
cílová maximální úroveň síly	[Treshold]	50 N,
přesah při testu	[OverTravel]	350 μm .

Zvolen byl test druhé varianty detekující destrukčním způsobem maximální výdrž vzorku, aby bylo možno mezi sebou jednotlivé technologie následně porovnat.

Na obrázku 4.49. je zobrazena testovací hlava pro test stříhem v momentě odtržení pájkové kuličky.



Obr. 4.49: Detail nástroje pro test pevnosti stříhem

Kromě síly potřebné k odtržení je také možno pozorovat chování pájky během namáhání. Projevit se může postupným shrnutím, kdy pozvolna vzrůstá působící síla a po překonání maxima ještě utržená kulička klade dále odpor. Druhá varianta bývá u pevných, ale křehkých spojů doplněna efektem, kdy při dosažení maximální síly spoj praskne a kulička z místa odskočí, nebo i odletí.

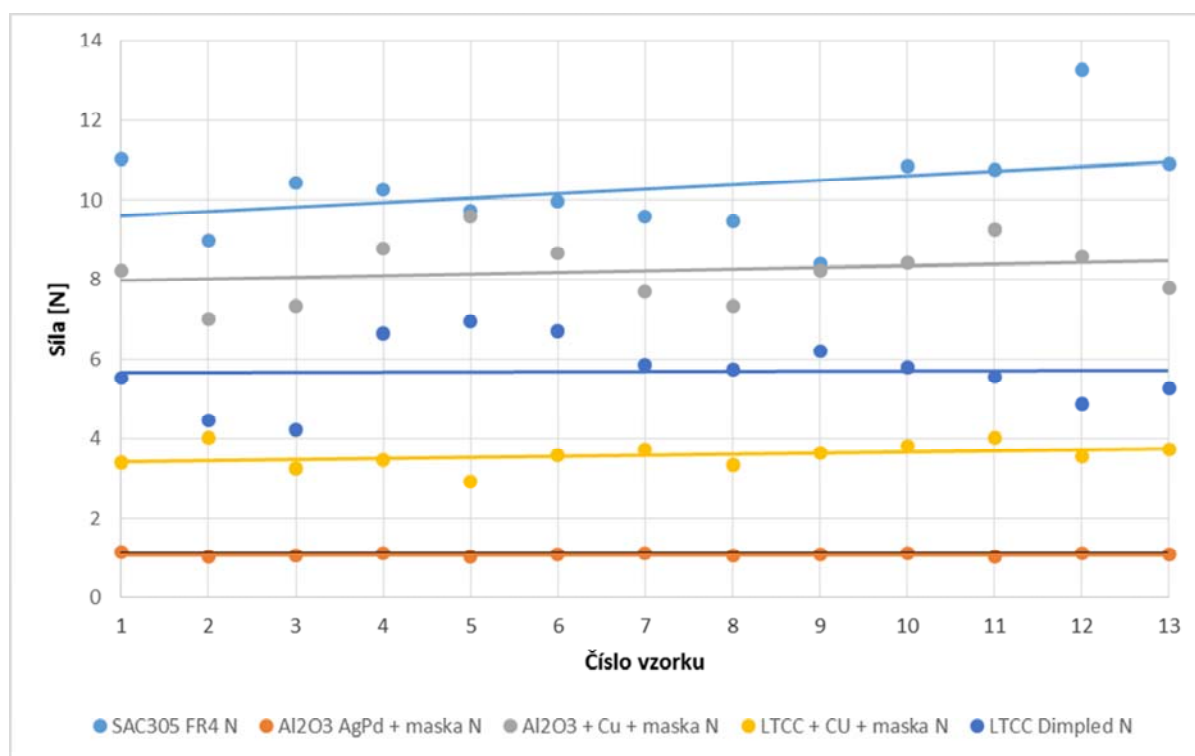
4.9.3 Vyhodnocení srovnávacího testu stříhem

Soubor výsledných maximálních hodnot sil působících na spoje během experimentu zaznamenaný trhacím zařízením je zpracován v následující tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Srovnání sil potřebných k odtržení pájecích kuliček na testovacích substrátech

Vzorek	FR4	Al ₂ O ₃ AgPd	Al ₂ O ₃ + Cu	LTCC + CU	LTCC „Dimpled“
Č.	[N]	[N]	[N]	[N]	N
1	11,044	1,132	8,231	3,397	5,526
2	9,005	1,027	7,023	4,016	4,452
3	10,456	1,071	7,332	3,242	4,238
4	10,278	1,116	8,782	3,463	6,651
5	9,741	1,027	9,577	2,934	6,935
6	9,962	1,085	8,658	3,576	6,717
7	9,577	1,106	7,691	3,725	5,846
8	9,464	1,065	7,336	3,339	5,743
9	8,413	1,074	8,232	3,635	6,223
10	10,865	1,127	8,437	3,822	5,798
11	10,776	1,024	9,256	4,005	5,569
12	13,278	1,116	8,568	3,556	4,885
13	10,928	1,079	7,765	3,723	5,251

Údaje z tabulky byly pro jednodušší srovnání vyneseny do následujícího grafu:



Obr. 4.50: Grafické zobrazení hodnot tabulky 4.1.

V grafickém zobrazení je možné snadno porovnat výsledky. Jako nejpevnější se ukázaly kuličky pájené na plošky organického FR-4 substrátu, což bylo možné předpokládat vzhledem k vynikající kvalitě průmyslově zhotoveného motivu

i mechanické odolnosti samotného substrátu, který nemá tendenci povrchově se vyštípnout jako keramika.

Pouze s malým rozdílem se jako další v pořadí umístil Al_2O_3 substrát s napařenými a galvanicky zesílenými ploškami doplněnými nepájkivou maskou. Určitou roli zde jistě sehrála velmi dobrá smáčivost měděné vrstvy a odolnost korundového keramického nosiče, který poskytuje zesílené mědi oporu.

Na dalším místě s jen mírným odstupem se umístil „dimpled“ LTCC substrát HL2000. Ačkoliv je odolnost této kombinace ve srovnání s FR-4 přibližně poloviční, jde v oblasti LTCC o velmi dobrý výsledek, neboť LTCC substráty jsou oproti Al_2O_3 substrátům podstatně méně mechanicky odolné.

To se projevuje na hned dalším vzorku v pořadí, kterým je LTCC HL2000 substrát s měděnými galvanicky zesílenými ploškami. Při testu u tohoto vzorku docházelo k destrukci (natržení) měděných plošek v místě kontaktu s nosným substrátem, což potvrzuje odolnost měděné vrstvy i křehkost LTCC keramiky.

Jako poslední se umístila standardizovaná tlustovrstvá technologie využívající AgPd vodivou pastou vytvořený motiv. U těchto plošek docházelo ke skokovému utržení kuličky při dosažení úrovně 1 N. Tento projev lze zřejmě přičíst citelně horší smáčivosti planárních plošek tvořených vypalovací tlustovrstvou pastou. Roztavená pájka během přetavení část stříbra odsaje do spoje, čímž kontakt oslabuje. Zároveň s tím zbytky stříbrné plošky držené na místě tavivovou složkou poskytují pájce jen malou plochu k přichycení. Určitý vliv má i konkrétní typ použité vodivé pasty a jistě by bylo možné otestovat mnohem více vzorků stříbrných a stříbro-palladiových tlustovrstvých past, kde je možné čekat i mírně odlišné hodnoty oběma směry, ale testování tlustovrstvých vodivých past na alumině a na nich zhotovených pájených spojích bylo provedeno již mnohokrát a není pro tuto práci ničím přínosné. Spokojíme se tedy s orientačním porovnáním.

Z hlediska pájených propojení keramických substrátů se tedy pro Al_2O_3 variantu jako vhodný jeví motiv z napařené a galvanicky zesílené mědi. Pro LTCC substráty, s možností využití 3D tvarovaného povrchu a více vrstev, se pak jako nejvhodnější jeví „dimpled“ struktura, která poskytuje pájce jistou úroveň opory svým tvarem.

4.10 Testovací struktury využívající pájecí kuličky s pevným jádrem

Jak již bylo v kapitole 2.5 zmíněno, kromě pájecích kuliček tvořených pouze pájovou slitinou existují také kuličky obsahující pevné jádro obalené vrstvou pájecí slitiny. Podle použitého jádra je možno rozlišovat i jejich výhody a nevýhody.

4.10.1 Zkoumané pájecí kuličky

Je-li jádro tvořeno kovovou kuličkou, představuje velmi pevnou součást pájeného spoje, která, jakožto mechanická bariéra, nedovolí za žádných okolností přílišný pokles pájeného substrátu nebo pouzdra k základně. Takovýto pokles zpravidla ústí v tvorbu zkratových můstků a nefunkčnost připojených obvodů. Jádro tvořené mědí je také

výtečný vodič nejen elektřiny, ale i tepla. To pomáhá rovnoměrnému přetavení během pájecího procesu i odvodu případného odpadního tepla (chlazení) během provozu. Nevýhodou těchto kuliček je několikanásobně vyšší cena ve srovnání s běžnými pájkovými kuličkami a podstatně horší dostupnost. Na druhou stranu jejich pevnost umožňuje tyto kuličky použít pouze na části propojů pouzdra, čímž lze využít výhodu v udržení mezery, a zároveň příliš nezvyšovat výrobní náklady. Typickým zástupcem takovýchto kuliček jsou Sparkle Ball Sphere s měděným jádrem od firmy Senju, které se podařilo z Japonska získat pro testy 3D propojení. Získané kuličky mají průměr měděného jádra 0,5 mm a celkový průměr 0,6 mm.

Druhou variantou jsou kuličky vybavené plastovým jádrem. Aby bylo možné jádro z nepájlivé hmoty udržet uvnitř pájeného spoje, je pokoveno tenkou vrstvou mědi. Pro testy se podařilo jako zástupce těchto kuliček získat Sekisui SOL-800 kuličky s jádrem z divinylbenzenu (DVB), jejichž struktura je popsána v kapitole 2.5. Jejich výhodou je opět udržení mezery mezi spojovanými povrchy, nicméně plastové jádro poskytuje místo tepelné vodivosti mědi spíše pružný element pájenému spoji, který je schopen do jisté míry absorbovat a vyrovnávat mechanická pnutí v materiálu. Měděná vrstva na plastovém jádře svojí vodivostí z části kompenzuje ekvivalentní volný průřez cínové slitiny ve spoji. Vnější průměr pro testy získaných kuliček je 0,8 mm, jejich jádro má průměr 0,75 mm a je obaleno 5 μ m vrstvičkou mědi. Zbývající vrstva je tvořena SnAg pájecí slitinou.

4.10.2 Příprava substrátů a pájení

Pro testy struktur s pájecími kuličkami s pevným jádrem bylo zvoleno několik kombinací substrátů keramických i organických. LTCC HL2000 substráty v „dimpled“ verzi byly zhotoveny stejným postupem jako v předchozích experimentech s využitím ověřených postupů. Laserem opracované základní vrstvy byly pomocí sítotisku opatřeny vodivou vrstvou stříbrné vypalovací pasty TC0306. Použit byl opět motiv BGA 64. Po tisku byly substráty zasušeny, sesouhlaseny, laminovány a vypáleny.

Substráty byly v dalším kroku opatřeny 100 μ m vrstvou pájecí pasty Cobar SAC3-XF3, do které byly osazovány pájecí kuličky. Substráty byly následně sesouhlaseny a osazeny na sebe pomocí hranolu opravárenské horkovzdušné stanice Fritsch Mikroplacer. Osazené substráty byly poté pájeny v parách v zařízení Asscon Quicky 300 dle standardního teplotního pájecího profilu.

4.10.3 Vyhodnocení zapájených struktur

Po pájení byly sestavy vyjmuty a podrobeny elektrickému testu řetězcového motivu. Vyhověly. Provedena byla také optická kontrola, při níž byly pomocí zařízení Ersascope pořízeny snímky tvaru pájených spojů. U části struktur byla také provedena 3D rentgenová analýza s cílem nahlédnout do struktury jakožto propojeného celku. Jako poslední pak byly provedeny rozbory detailů pájených spojů pomocí destruktivních mikrovýbrusů.

Výsledky si rozeberme postupně podle typu propojených substrátů a použitých pájecích kuliček.

4.10.4 Propojení FR-4 + LTCC pájecími kuličkami SOL

První variantou je spojení základního substrátu FR-4, na kterém je s pomocí kuliček SOL-800 s plastovým jádrem osazena HL2000 LTCC „dimpled“ struktura. Na obrázku 4.51 je zobrazena tato zapájená sestava jako celek.



Obr. 4.51: Spojení FR-4 + LTCC

Na obrázku 4.52 je struktura zachycena tak, jak ji pohledem mezi substráty umožňuje vidět zařízení Ersascope.



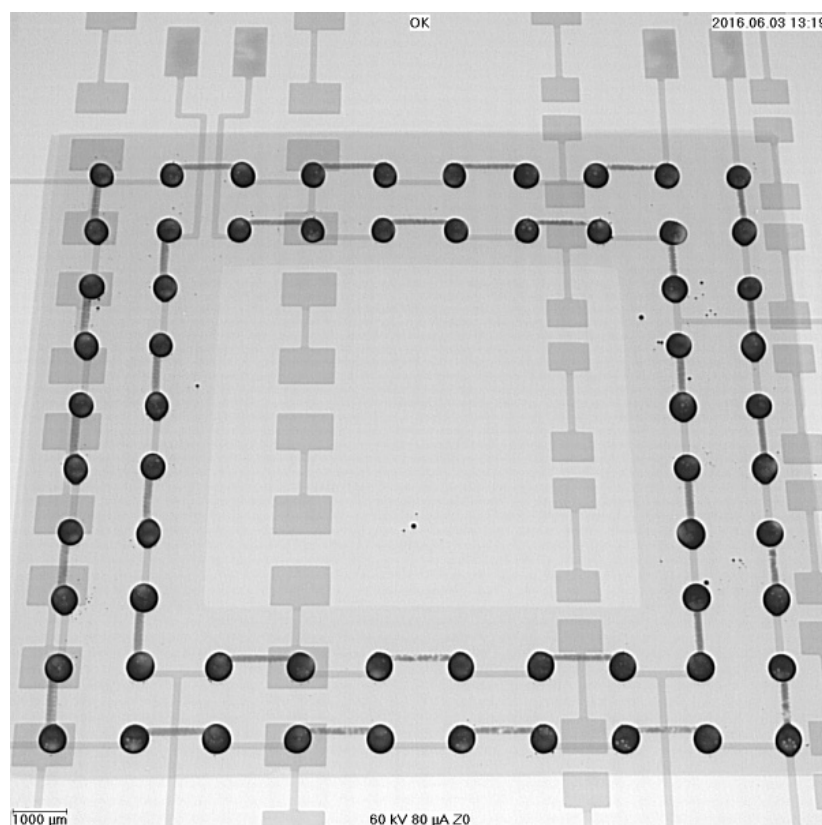
Obr. 4.52: Pohled zařízením Ersascope na spojení FR-4 + LTCC

Pájené spoje působí velmi souměrně a mají soudkovitý tvar s hladkým povrchem. Výška spojů je po celém substrátu identická, čemuž jistě napomohlo pevné jádro použitých kuliček. Na obrázku 4.53 následuje snímek z rentgenové analýzy tohoto spojení. Na snímku jsou dobře patrná jádra kuliček v jednotlivých pájených spojích

i souměrnost spojů. Zároveň jsou velmi dobře patrná propojení jak měděným motivem na FR-4 substrátu, tak i uvnitř HL2000 LTCC „dimpled“ struktury.

Při detailnějším pohledu je možné vidět, že vrstva vypálené vodivé pasty uvnitř keramické struktury vykazuje drobné nedostatky. Ty jsou částečně způsobeny již během síťotisku, kdy díky síťovině a reologickým vlastnostem použité pasty dochází k přenosu motivu ok síta i na potištěný substrát, kde se již natištěná pasta nedokonale rozlije. Dalším problematickým krokem je laminace, při které se všechny drobné nedostatky natištěné vrstvy zvýrazní díky deformaci substrátu. Finální vliv má pak i výpal substrátu, neboť i přes minimální smrštění v planární úrovni dochází vlivem tloušťkového smrštění k dalším drobným deformacím. Během výpalu také dochází k částečnému vsáknutí natištěné pasty do hmoty substrátu a odpařování dalších pomocných složek, což dále narušuje souvislost vrstvy. I přes tyto nepříznivé vlivy si však použitý motiv udržel průchozí vodivé cesty.

Kromě detailů LTCC struktury je na obrázku také dobře vidět soustava testovacích plošek pro SMD součástky, která se nachází na spodní straně FR-4 destiček plošných spojů.



Obr. 4.53: Rentgenová analýza spojení FR-4 + LTCC

Na obrázku 4.54 je dále zobrazen mikrovýbrus zkoumaného spojení. V řezu je dobře patrný jak pájkový spoj, tak i SOL kuličky v pájce připájené.



Obr. 4.54: Detail výbrusu pájeného spoje mezi FR-4 + LTCC se SOL pájecí kuličkou

Zachycený řez spoje také ukazuje velmi souměrný případ pozice kuličky s plastovým jádrem. Je obklopena téměř souměrnou vrstvou cínu. Shodná vzdálenost od obou substrátů také potvrzuje funkci kuličky ve smyslu udržení mezery mezi substráty během přetavení. Při poklesu horního substrátu po přetavení pasty dosedají plošky až na těleso kuličky. Při ukončení pájení a ochlazení spoje se vrstva pájky opět poněkud roztáhne. (Při pohledu na mikrovýbrus je třeba si uvědomit, že nemusí jít z technických důvodů o řez přesně v polovině spoje, neboť poloha se dá určit jen s jistou tolerancí.)

4.10.5 Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami SOL

Další obdobnou variantou propojů s použitím SOL kuliček byly spojení LTCC + LTCC. Vzhledem k podobnosti s předchozí variantou je na obrázku 4.55 prezentován jen jeden z mnoha mikrovýbrusů tohoto provedení spojení.



Obr. 4.55: Detail výbrusu pájeného spoje mezi „dimpled“ LTCC se SOL pájecími kuličkami

Pro snímání bylo záměrně užito menšího zvětšení, aby bylo možné kromě samotného spoje pozorovat také propojení uvnitř keramických substrátů. Vnořená stříbrná vodivá cesta je mezi spoji dobře patrná. Zároveň je dobře vidět tvar „dimpled“ struktury, zde

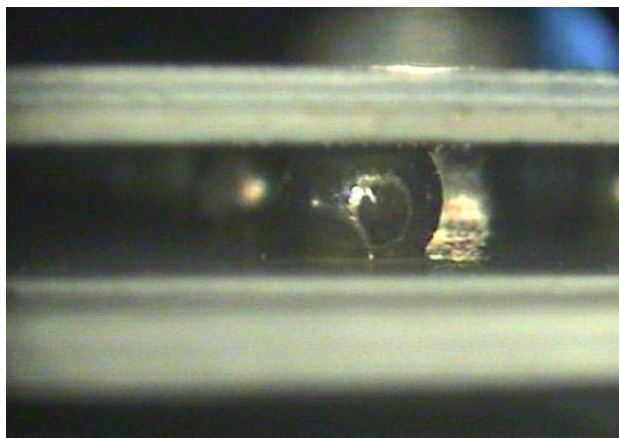
bez viditelných deformací zanesených u mnohých jiných vzorků při laminaci i přes postupné laminování se sníženým tlakem lisu.

4.10.6 Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami Senju s Cu jádrem

S použitím kuliček s měděným jádrem vznikla třetí varianta propojení. Tyto kuličky byly testovány v propojení LTCC substrátů, neboť jejich výhodu lze spatřovat jak v udržení definované mezery mezi spojovanými substráty, tak také ve velmi dobré vodivosti elektrické a hlavně tepelné. Právě tepelná vodivost mědi ve spojení s teplotně orientovanými parametry keramických materiálů jako jsou odolnost teplotnímu namáhání, menší teplotní délková i objemová roztažnost oproti organickým substrátům a výhodná vysoká tepelná vodivost zejména u Al_2O_3 , ale i relativně nižší, avšak stále dobře využitelná, u rozličných LTCC substrátů.

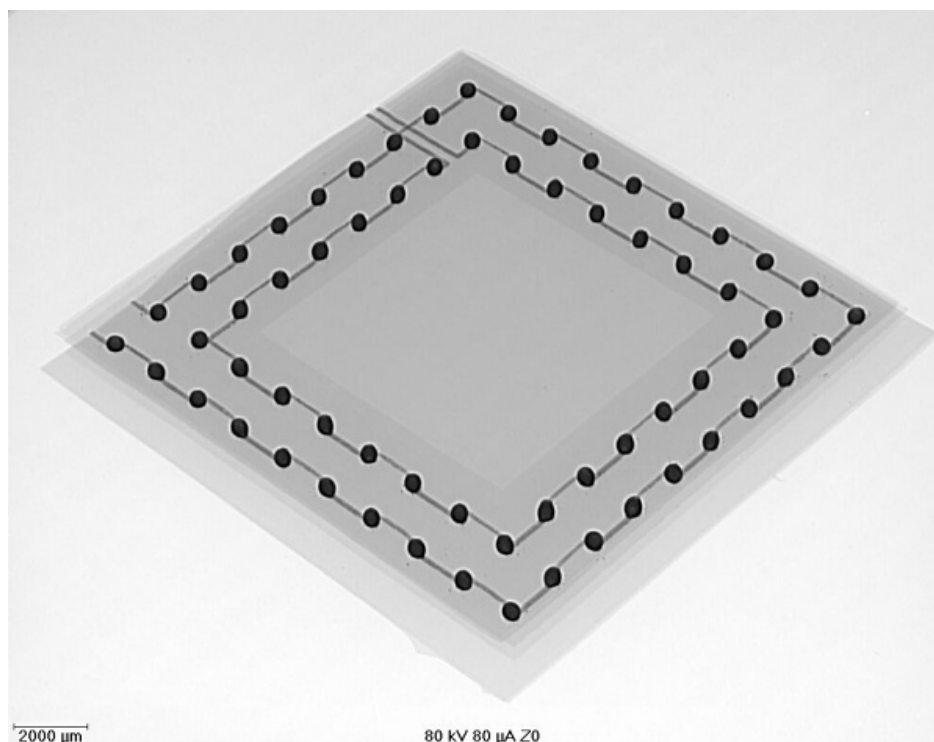
V závislosti na průměru kuliček lze spoje s nimi realizovat buď tak, že je jádro těsně obtékáno cínovou pájecí slitinou, nebo tak, že je jádro obklopeno silnější vrstvou pájky. První varianta vzniká při osazení do tavidla, druhá varianta při osazení do pájecí pasty a poskytuje více materiálu k absorpci teplotně mechanického namáhání během pájení. Pro testy byla použita varianta osazení do pájecí pasty.

Obrázek 4.56 zachycuje strukturu s kuličkami s měděným jádrem po zapájení. Obrázek byl pořízen zařízením Ersascope při optické kontrole a patrný je soudkovitý tvar spojů bez zjevných defektů na povrchu.



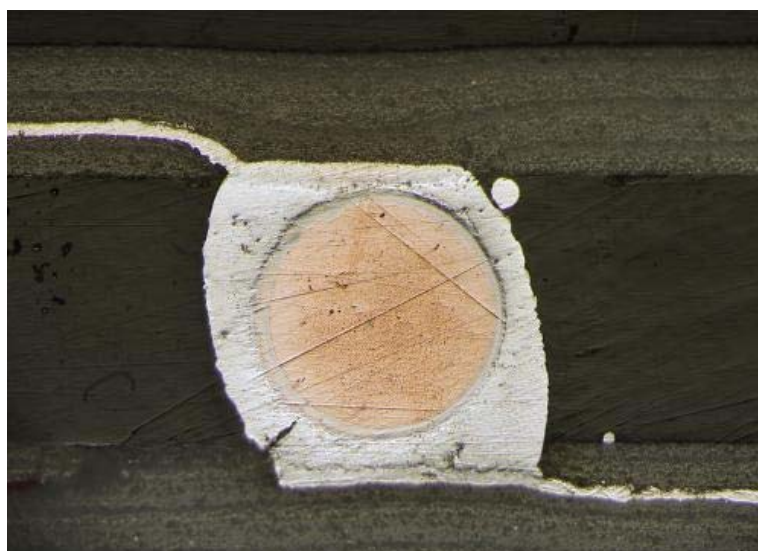
Obr. 4.56: Detail pájeného spoje mezi „dimpled“ LTCC s pájecími kuličkami s Cu jádrem

Na obrázku 4.57 je dále k dispozici pohled na strukturu zachycený pomocí rentgenu. Tak jako u předchozích variant je zde dobře viditelné propojení testovacího obvodu. Rentgenovaná sestava byla kuličkami s měděným jádrem osazena pouze v rohových čtveřicích, což by bylo při praktickém nasazení výhodné spojení výhody udržení rovnoměrné mezery mezi spojovanými substráty, a zároveň snížením cenové náročnosti.



Obr. 4.57: Rentgenový pohled na spojení LTCC substrátů pájecími kuličkami s Cu jádrem

Pro nahlédnutí dovnitř pájených spojů byly opět zhotoveny mikrovýbrusy. Obrázek 4.58 zobrazuje v řezu jeden ze zkoumaných spojů.



Obr. 4.58: Detail výbrusu pájeného spoje LTCC substrátů s pájecími kuličkami s Cu jádrem

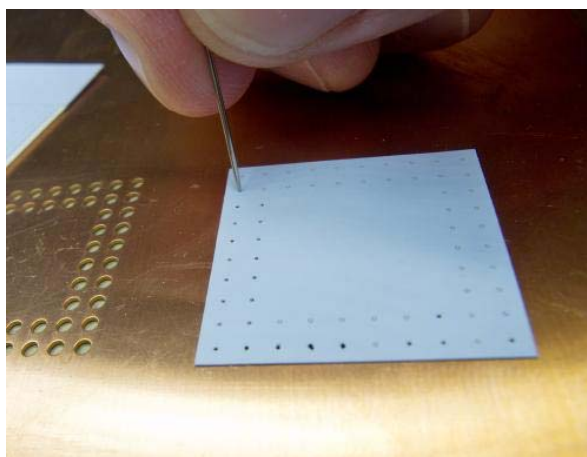
Měděné jádro je u tohoto spoje i přes množství pájecí slitiny dominantní a snímek podobně jako u SOL kuliček také ukazuje souměrnost mezery a umístění kuličky ve spoji. Na okrajích kuličky je také dobře vidět vrstva intermetalické slitiny na okraji kuličky, kde se setkává med', pájkový obal kuličky a pájecí slitina přidané pájecí pasty.

4.11 Vícepatrová LTCC struktura s prokovy a pájecími kuličkami s pevným jádrem

Dosud zkoumané varianty spojení si braly za cíl propojit vertikální cestou dva sousedící substráty formou pájeného spojení. V případě použití takové technologie pro pokročilejší sestavy je však třeba počítat i s propojením do dalších pater vzniklé struktury, nebo pouzdra.

4.11.1 Příprava substrátů a pájení

K tomu, aby bylo možné vést vodivou cestu přes substrát, je nutné nejprve substrát opatřit otvory v místě zamýšlených propojů. Využit k tomu byl opět dostavovací laser Aurel, ale program užívaný k vyřezávání „dimpled“ struktury byl modifikován pro tvorbu otvorů s podstatně menším průměrem. Z technických důvodů byly zvoleny otvory o průměru 0,5 mm umožňující manuální odstranění středů vyříznutých kruhů pomocí ostrého hrotu a podkladové šablony s otvory. Příprava otvorů po vyřezání je zachycena na obrázku 4.59.

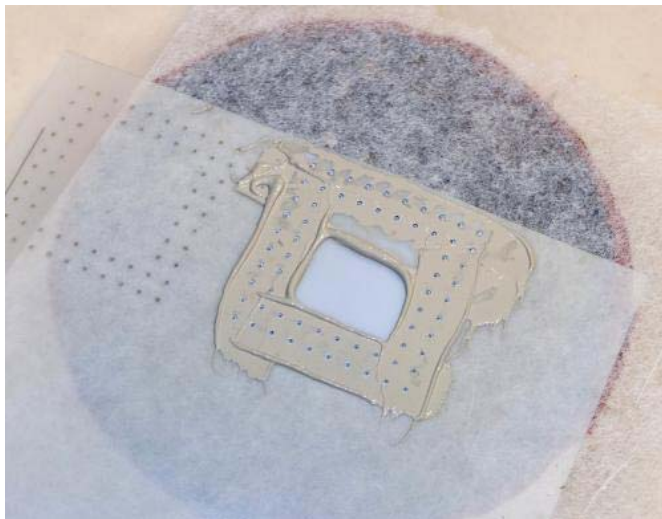


Obr. 4.59: Příprava otvorů v laserem předřezaném LTCC substrátu

Zároveň bylo třeba pro nanesení pasty do otvorů zhotovit vhodnou šablonu. Vzhledem k tloušťce dostupných šablonových plechů i složitosti výroby motivu s velmi malými otvory se jako schůdná varianta ukázala částečně čirá mylarová folie. Fólii lze snadno obrobit laserem a drobné nepřesnosti tvaru způsobené roztavením okrajů kruhů, které nepříznivě ovlivňují kvalitu otvorů v keramice, lze u šablony bez obav zanedbat, neboť v tomto případě se jedná pouze o otvor, kterým je později protlačena vypalovací pasta. Pro případ experimentálních vzorků nejsou problémem ani malá mechanická odolnost a trvanlivost takových šablon. Průhledný materiál šablony také usnadňuje sesouhlasení motivu se substrátem. Tloušťka šablony je 100 μm .

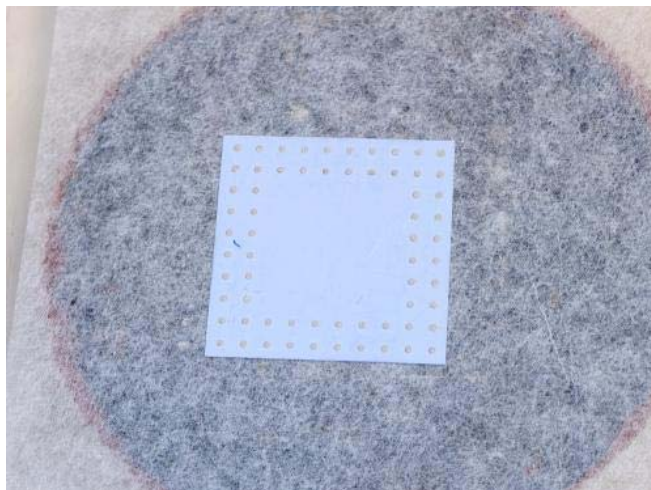
K vyplnění vytvořených kanálků byla použita vnitřní vodivá vypalovací stříbrná pasta Heraeus TC0308, která je pro substráty HL2000 k tomuto účelu dodávána. Pasta byla do otvorů přes šablonu protlačena manuálně s pomocí nerezové špachtle plnící

funkci těrky. Substráty i šablona byly během procesu vakuově přisáty porézním kamenem. Tisk byl proveden za použití papírové mezivrstvy, která měla za úkol zabránit kontaminaci porézního kamene pastou. Na obrázku 4.60 je zachycena situace během tisku i používaná šablona.



Obr. 4.60: Tisk pasty do otvorů v LTCC substrátu

Následující obrázek 4.61 pak zobrazuje hotové natištěné prokovy.



Obr. 4.61: Potištěné otvory v LTCC substrátu

Potištěný substrát je před dalším využitím nutno zasušit. Následuje natištění pájecích plošek přes otvory z obou stran substrátu za použití pájitelné stříbrné vypalovací pasty TC0306. Pomineme-li podstatně složitější sesouhlasení síta na potištěné otvory, je další postup již obdobou vytváření LTCC „dimpled“ struktury. Potištěné substráty s prokovy jsou spojeny s krycími substráty s „dimpled“ otvory po obou stranách a postupně

laminovány. Následuje klasický výpal, během kterého dochází mj. k propojení vnitřní výplňové pasty s vnější pájitelnou.

4.11.2 Pájení a vyhodnocení zapájených struktur

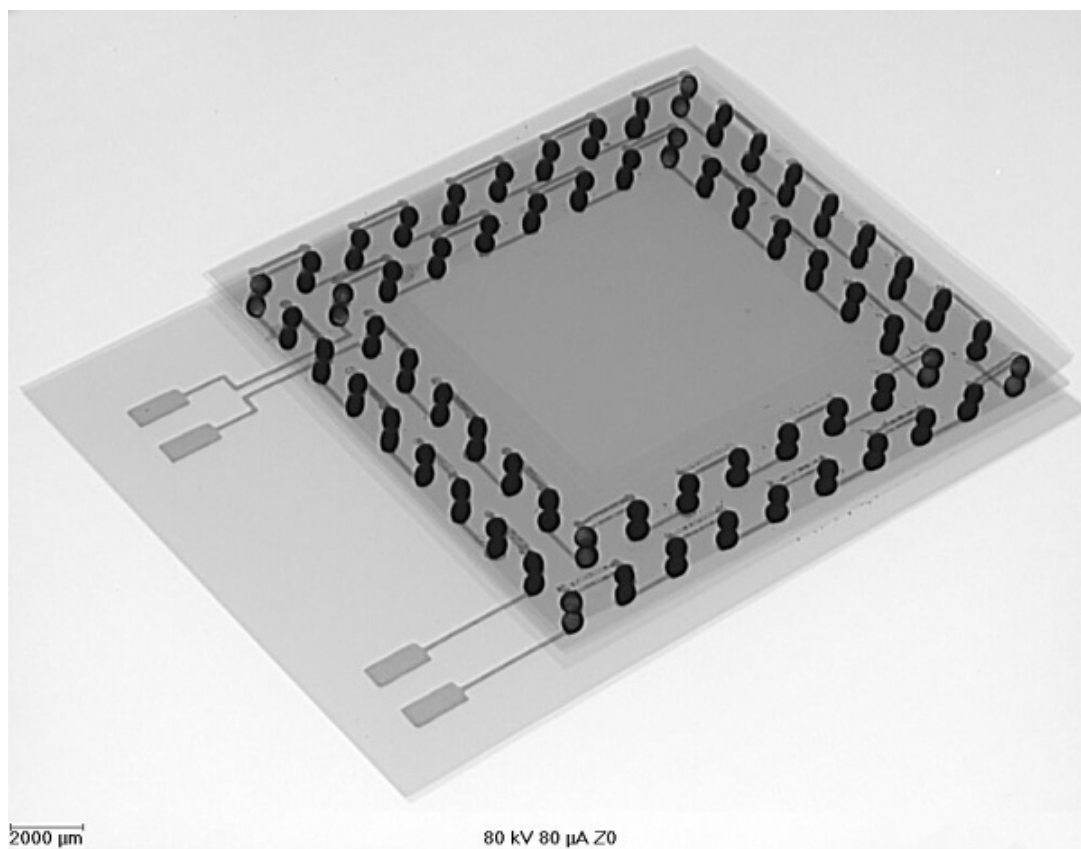
Hotové substráty byly potištěny 100 μm vrstvou pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 a osazeny pájecími kuličkami Senju SAC 305 o průměru 0,76 mm. Pro udržení stejnoměrné mezery mezi substráty byly v rozích substrátu osazeny dvojice Sekisui SOL kuliček s plastovým jádrem. Do 3D sestavy byly substráty sestaveny po sesouhlasení s pomocí hranolu a vakuového manipulátoru stanice Fritsch Mikroplacer. Přetavení bylo provedeno v zařízení pro pájení v parách standardním profilem.

Zapájené substráty byly nejprve zkontrolovány elektrickým testem s potěšujícím výsledkem funkčních propojení. K testu sloužil opět motiv BGA 64, ovšem upravený o průchozí mezivrstvu. Náhled z boku na jeden ze zapájených substrátů pořízený pomocí stanice Ersascope během optické kontroly je zachycen na obrázku 4.62.



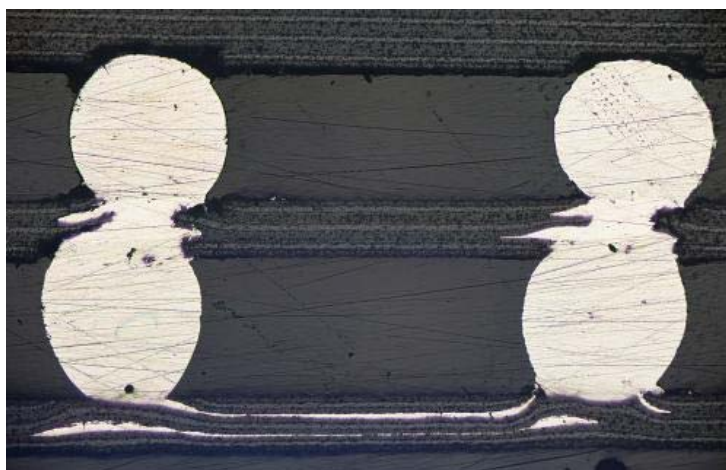
Obr. 4.62: 3D LTCC pájená vertikální struktura při pohledu ze strany (detail)

Pro náhled dovnitř struktury bylo provedeno rentgenové snímání, jehož výsledek je k dispozici na obrázku 4.63. Zde je nutno upozornit na několik zajímavých detailů. Nejvíce na první pohled upoutají jakoby zdvojené vodivé cesty v horním dílu sestavy. Tyto však nejsou propojeny dále a nemají vliv na funkci substrátu. Způsobilo je využití substrátů s porušeným tiskem v roli nosné nezapojené části substrátu. Dále jsou na obrázku poměrně dobře detekovatelná velká plastová jádra u rohových dvojic, respektive u celé sestavy čtveřic, SOL kuliček. Snímek také dokumentuje řetězec testovací struktury, který prochází všemi vrstvami a umožňuje tak snadno otestovat elektrické propojení celou 3D strukturou.



Obr. 4.63: 3D LTCC pájená vertikální struktura – rentgenové zobrazení

Pro doplnění přehledu je na obrázku 4.64 zachycen i mikrovýbrus struktury v místě propoje klasických pájkových kuliček.



Obr. 4.64: 3D LTCC pájená vertikální struktura – mikrovýbrus

I zde je dobře vidět utopenou vrstvu stříbrné pasty na substrátu, který byl po neuspokojivém tisku využit jako nosná výplň. U prokovů je patrná vrstva stříbra včetně přesahů kolem středové vrstvy LTCC keramiky, která vznikla při tisku pájecích plošek

pro „dimpled“ strukturu. Přesnost tvaru i sesouhlasení by jistě bylo možno za použití pokročilejších metod kontroly soutisku a hlavně laminace výrazně zlepšit, v tomto případě se však jedná o ověřovací sestavy vyrobené dostupnými prostředky. Výhledové možnosti využití vrstvení jsou však široké a opakováním postupu se ani 5 - 6 vrstev vertikálně nad sebou nejeví jako problematická sestava, neboť kuličky s pevným jádrem budou schopny udržet i větší hmotnost. Další z možností, využívající jako mezivrstvu pružnou folii, je diskutována v závěru práce.

4.11.3 Poznatky uplatnitelné při konstrukci univerzálního pouzdra:

Při výchozí rozvaze o budoucí konstrukci je třeba vycházet ze zamýšlené funkce kompletní sestavy, z osazených komponent i z prostředí pro danou aplikaci. Rozdělme si možné případy do několika příkladů:

Vícevrstvé pouzdro pro vytvoření kompaktního snímače s doplňkovými obvody

V tomto případě lze předpokládat snahu o minimální rozměry z důvodu možné instalace i do obtížně přístupných prostor. Svrchní vnější substrát bude pravděpodobně osazen snímacím prvkem na bázi elektrod. Tyto mohou být doplněny vytápěcím elementem z odporové vrstvy pro stabilizaci podmínek měření. Svrchní substrát bude dále elektricky propojen do další vrstvy struktury tak, aby byly pomocné obvody s převodníky a napájením co nejméně vystaveny působení snímaného prostředí. Při takovémto provedení by bylo vhodné použít „dimpled“ strukturu s prokovy vedenými přes substrát ve formě obvodového věnce kontaktů (podobně jako má motiv BGA 64) a na rohové plošky osadit kuličky s plastovým jádrem, které umožní dodržet rovnoměrný odstup mezi substráty. V případě agresivního prostředí bude vhodné vnitřní substráty opatřit krycí vrstvou (např. napařený Parylen), ochranným lakem, nebo i kompletní výplní mezer například epoxidem.

Vícevrstvé pouzdro pro výkonné součástky

Při konstrukci sestavy pro součástky generující množství problematického tepla, jako můžou být například výkonné LED diody, je nutno přizpůsobit dobrému odvodu tepla i samotnou strukturu svrchního vnějšího substrátu. Předpokládáme výkonnou diodu opatřenou nejlépe vlastním kovovým chladičem. Teplo z takové součástky je nutno co nejefektivněji rozvést do hmoty substrátů a odvádět dále na základní nosný substrát nebo další chladič. Výrazně zvýšit tepelnou vodivost vícevrstvé laminované LTCC keramiky lze oboustranným potiskem jednotlivých listů keramiky stříbrnou pastou a využitím velmi hustě zhotovených prokovů opět s výplní provedenou pomocí stříbrné vypalovací pasty. V místě kontaktu horního vnějšího substrátu s chladičem diody může absorpci tepla velmi dobře posloužit i dodatečná silná vrstva galvanické mědi překrývající dále vedoucí prokovy. V místě montáže na další substráty bude vhodné zvážit i využití kuliček s měděným jádrem, neboť jejich tepelná vodivost ($360 \sim 400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ pro Cu jádro) je ve srovnání s čistě pájkovými kuličkami prakticky dvojnásobná. Měděná jádra navíc neobsahují po pájecím procesu duté voidy, neboli

plynové bubliny, způsobené uvolňováním plynů z tavidel i roztavených materiálů do kapalných pájek, které přenos tepla pájeným spojem ještě dále zhoršují. Vzhledem k předpokládanému značnému tepelnému namáhání by jako základna dobře posloužil Al_2O_3 substrát dostatečné tloušťky, nebo deska plošných spojů s výraznou vrstvou metalického jádra z mědi či hliníku.

Propojovací element mezi keramickým pouzdrem a DPS

Vzhledem k širokým možnostem využití LTCC se naskytá i možnost substrát „dimpled“ struktury s prokvy osadit jako mezistupeň pro montáž keramického pouzdra, nebo křemíkového čipu s pájkovými kontakty (CSP) k dalším nosným substrátům. Cílem takového propojení je regulace teplotního mechanického namáhání, které je problémem v případě pájení CSP nebo keramických pouzder přímo na organické desky plošných spojů. Takto osazený prvek je zpravidla namáhán velkým rozdílem teplotní roztažnosti obou propojených materiálů a veškerá kompenzace spočívá na samotné pájené spoje. Při pájení i při provozu se namáhání nezdědka projeví prasklinami v pouzdře, nebo ještě častěji poruchami pájených spojů. V případě použití mezipatra vytvořeného díky opracovatelnosti LTCC přesně na míru, by bylo možné zvláště s využitím kuliček s plastovým jádrem výrazně zredukovat mechanický stres působící na spojené díly. Zdvojení výšky propojů také dále rozloží působící síly.

4.12 Srovnání smáčivosti vybraných povrchů

Pro doplnění dosavadních poznatků z pájení byl také proveden srovnávací test smáčivosti povrchů, které byly v této práci na LTCC HL2000 substrátech testovány. Jedná se o trojici stříbrných vypalovacích past TC0306, TC0307, TC0308 a dále povrchu s napařenou vrstvou mědi a povrchu s napařenou a galvanicky zesílenou vrstvou mědi. Cílem experimentu bylo vzájemně porovnat vzorky mezi sebou.

4.12.1 Příprava vzorků

Pro test byly zhotoveny substráty o rozměru 14 x 14 mm sestávající vždy z trojice laminovaných vrstev LTCC. Vzorky pro testy vypalovacích past byly z části překryty vrstvou testovaných past a standardním procesem zasušeny a vypáleny. Vzorky určené pro testy měděných vrstev byly vypáleny holé. Po výpalu byly tyto vzorky s pomocí acetonu zbaveny potenciálních nečistot, upevněny na pomocný substrát a opatřeny vrstvou 300 nm mědi. Vzorky dále určené pro test galvanicky zesíleného měděného povrchu byly již v předchozích experimentech ověřenou cestou pokryty galvanickou vrstvičkou mědi na úroveň přibližně 15 μm . Jeden ze vzorků byl pokoven pomaleji menším proudem (0,1 A; 4 min), druhý vzorek vyšším proudem (0,2 A; 2 min).

4.12.2 Testovací metoda pro měření smáčivosti

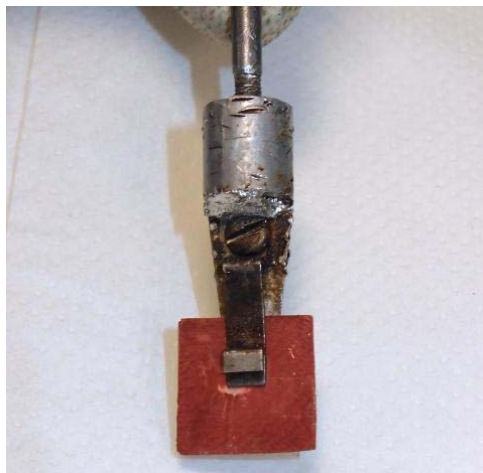
Přestože se v případě zjišťování exaktních hodnot smáčecích sil jedná o poměrně složitě definovatelnou metodu s množstvím kompenzačních výpočtů, bylo v tomto případě možno proces poněkud zjednodušit. Předpokládaným cílem bylo totiž místo zjištění konkrétních hodnot u testovaných vzorků spíše vzájemně porovnat smáčivost stejně velkých vzorků stejného substrátu. Při testu nebyly mimo LTCC HL2000 použity další nosné materiály a shodné jsou i vstupní podmínky měření. Snahou je vytvořit si srovnání aplikovatelné na povrchy pájecích plošek, takže hodnoty zjištěné na testovacích substrátech mají být spíše vodítkem než etalonem.

Pro test smáčivosti se užívá zařízení známé jako meniskograf. Zachyceno je na obrázku 4.65.



Obr. 4.65: Meniskograf pro testování smáčivosti povrchu vzorků

Zařízení se skládá z pohyblivé nádoby s roztavenou pájecí slitinou, která je během testu zvedána vzhůru proti vzorku. Nad nádobou je umístěno raménko s úchytem pro zkoumaný vzorek. Raménko je zavěšeno na měřící váze. Princip zařízení je založen na měření sil, které působí ve vertikále na raménko s uchyceným vzorkem (Obrázek 4.66), je-li ke vzorku zvednuta nádobka s tekutou pájecí slitinou.



Obr. 4.66: Vzorek LTCC s galvanicky zesílenou mědí v úchytu raménka

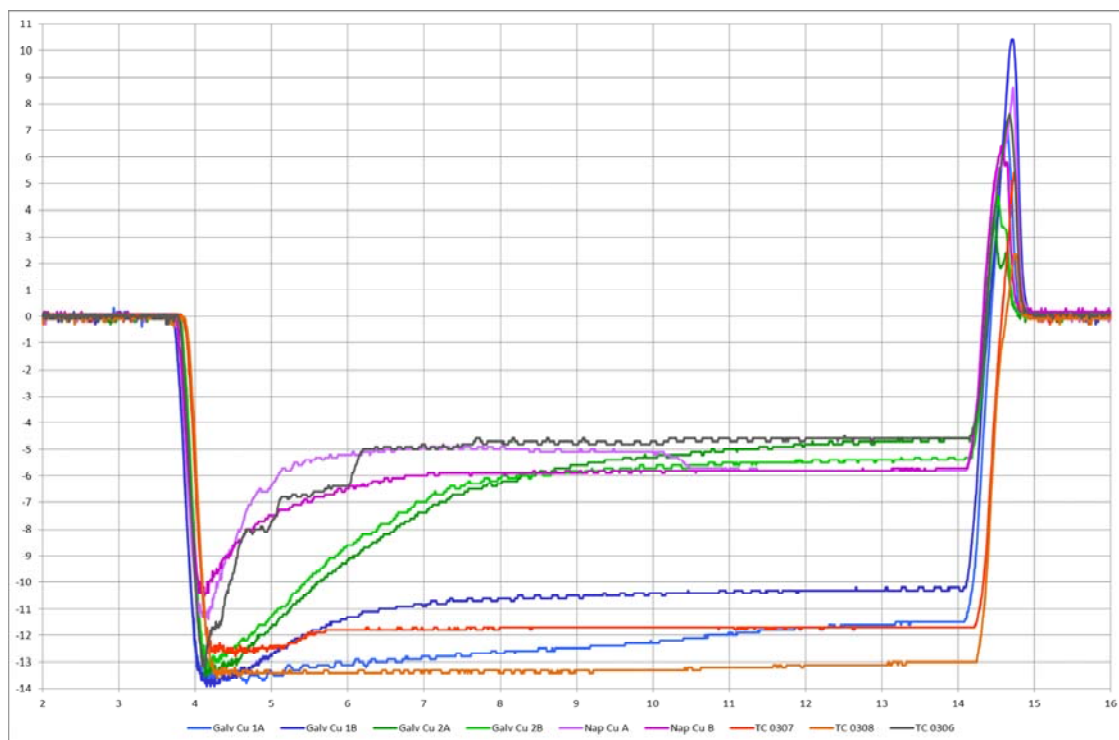
Vzorek se při postupném ponoření nejprve chová nesmáčivě, ale po chvíli ke zkoumanému povrchu, obvykle pokrytém tavidlem, začne vzlínat roztavená pájka z nádoby. Po nastavené prodlevě je opět nádobka s pájkou spuštěna a provádí se měření síly, kterou působí na vzorek přilnutá pájka. Změny sil působících na vzorek (úroveň jednotek až desítek mN) jsou během měření zaznamenány do grafu. Kontakt vzorku s pájkou je spuštn uzavřením elektrického obvodu.

Pro měření byla použita bezolovnatá pájecí slitina SnAgCu 305 rozeřtá v nádobce na teplotu 245°C. Vzorky byly do roztavené pájky ponořeny 3 mm hluboko. Tavidlo Cobar 396-DRX-M+ použité pro experiment bylo zvoleno na základě největší příbuznosti s tavidlem pájecí pasty Cobar SAC3-XF3, která byla používána během ostatních testů. Vzorky byly před experimentem zbaveny povrchových nečistot a mastnoty pomocí acetonu. Vždy těsně před zavěšením raménka na váhy byly také částečně ponořeny do nádoby s tavidlem. Z povrchu roztavené pájky v nádobce zařízení byla vždy před měřením vzorku stěrkou odstraněna vrstva oxidů. Smočení vzorku v pájce trvalo 10 sekund. Měděné vzorky byly použity z obou stran pro lepší prozkoumání opakovatelnosti.

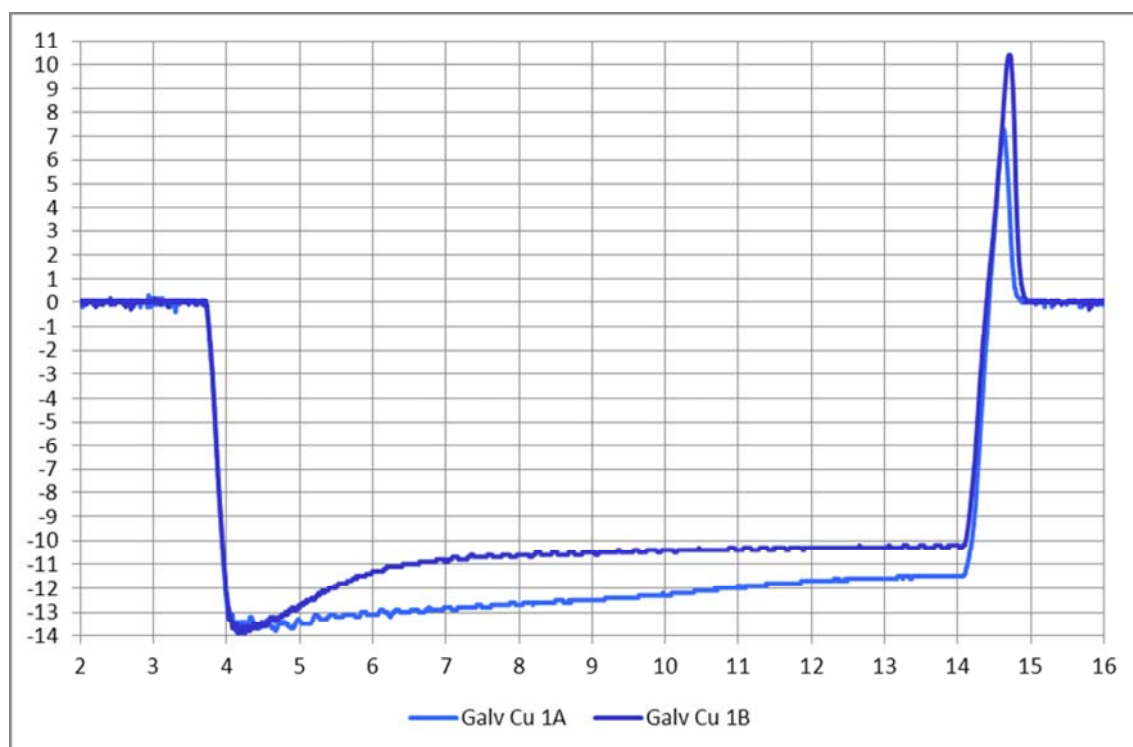
4.12.3 Výsledky testů

Souhrnný výsledek z experimentu je k dispozici na následujícím grafu (Obr. 4.67), kde je možné pozorovat vzájemné srovnání povrchů.

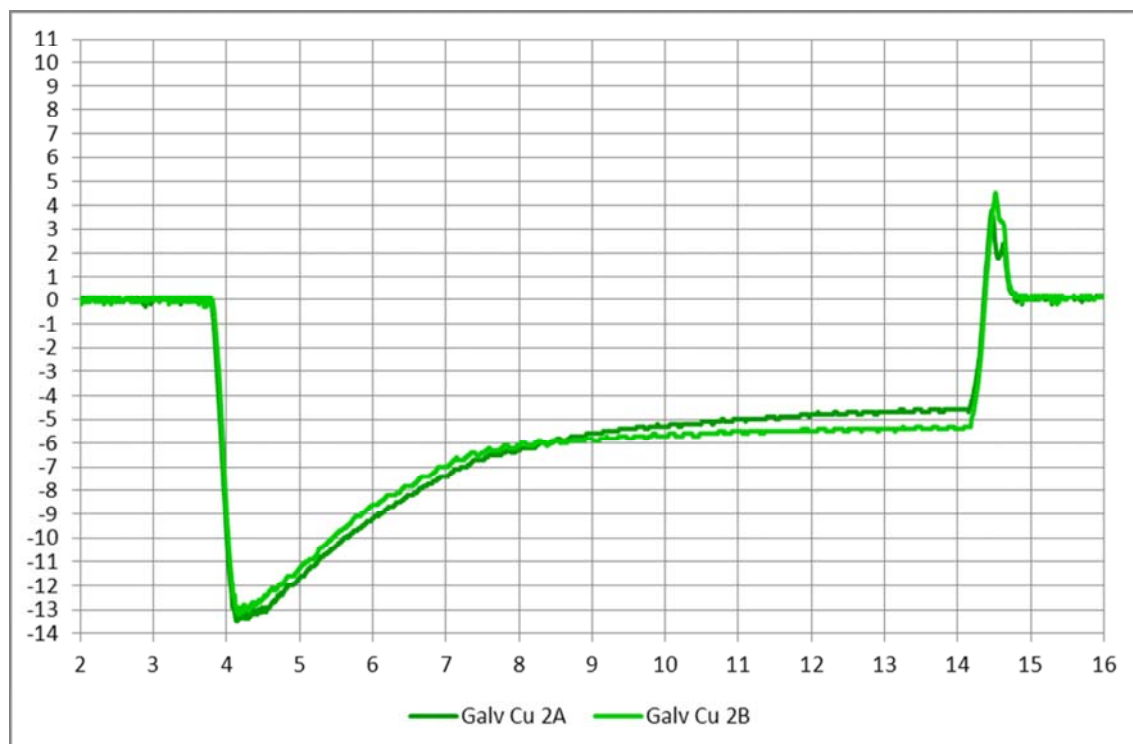
Násobná měření nejzajímavějších vzorků s napařenou měděnou vrstvou a galvanicky zesílenou měděnou vrstvou jsou vyobrazena obdobným odstínem barvy. Vzhledem k množství získaných křivek jsou pro přehlednost jednotlivé vzorky také zobrazeny odděleně na následující sestavě grafů (Obr. 4.68 až Obr. 4.73) na dalších stranách.



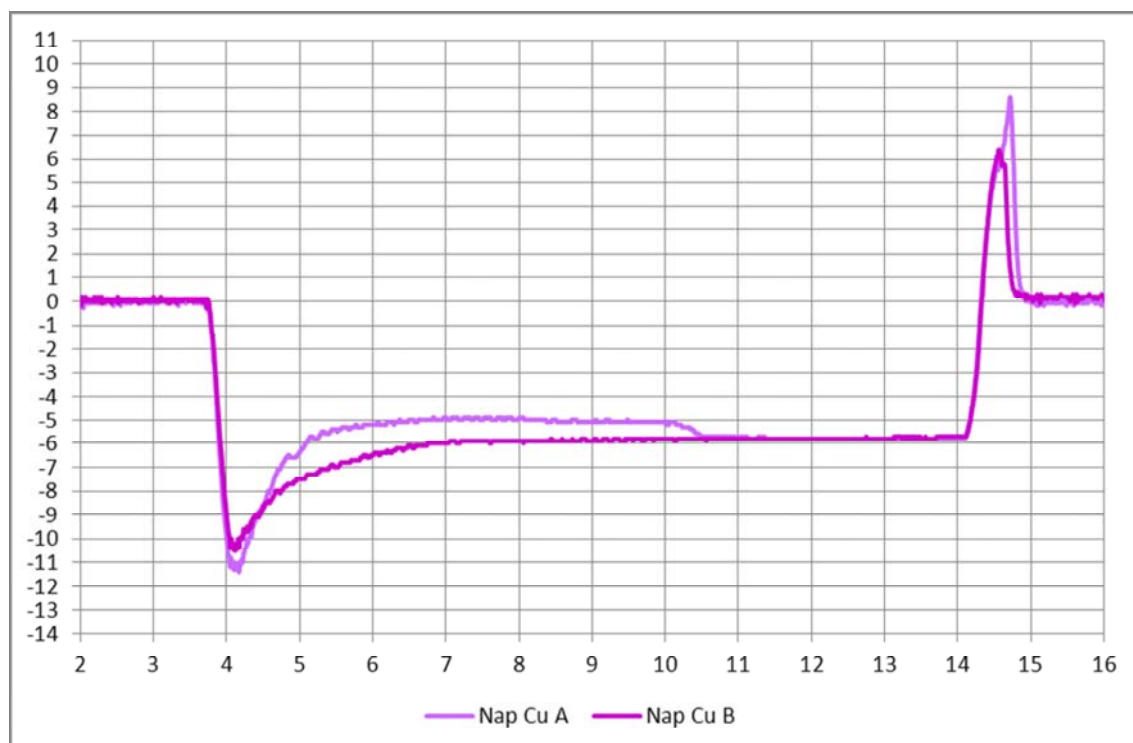
Obr. 4.67: Graf celkových výsledků testu smáčivosti



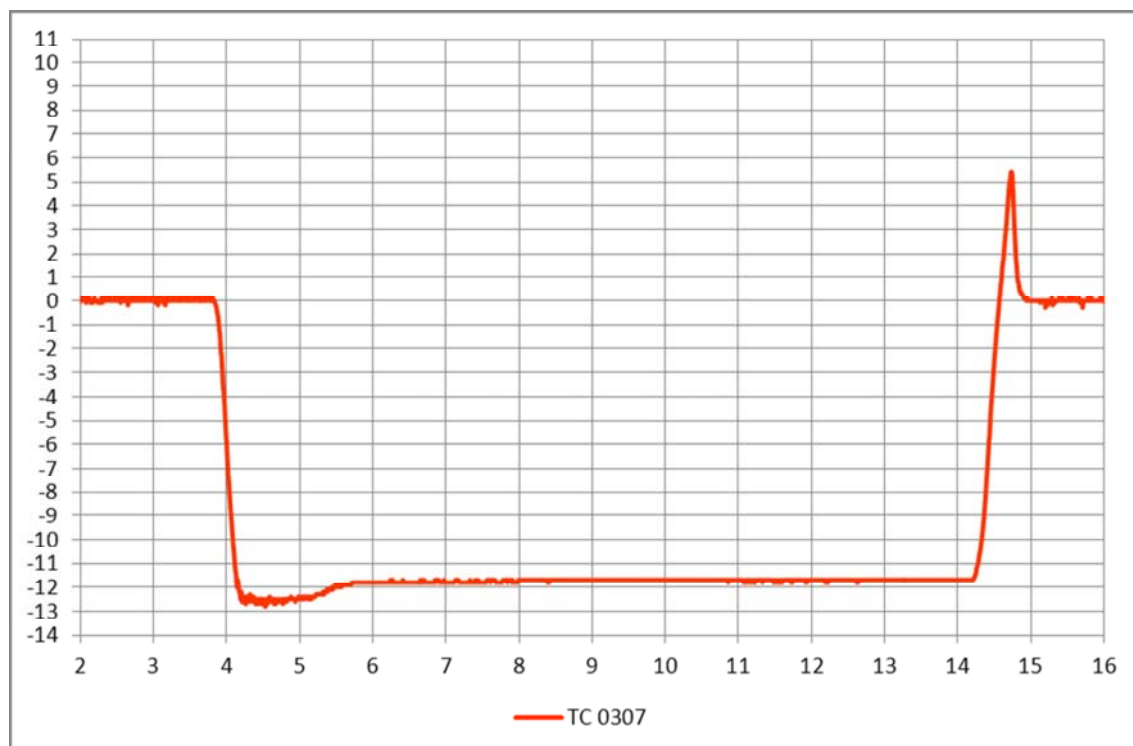
Obr. 4.68: Výsledek smáčivosti vzorku galvanicky zesílené mědi (1)



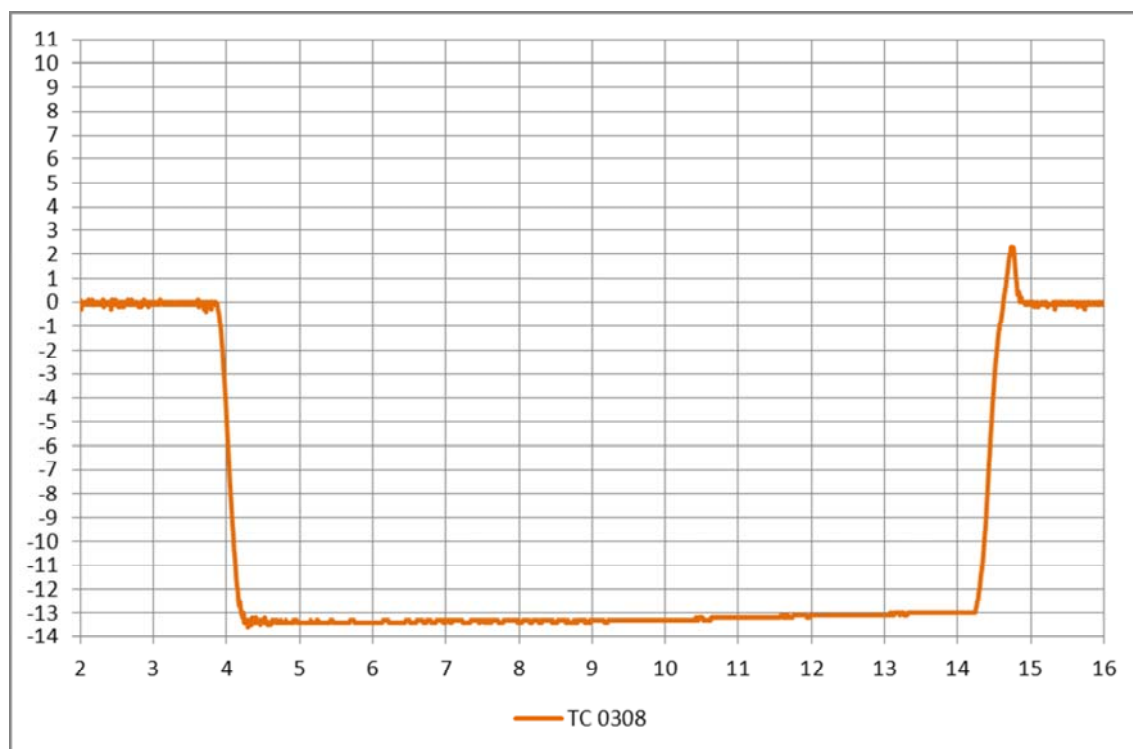
Obr. 4.69: Výsledek smáčivosti vzorku galvanicky zesílené mědi (2)



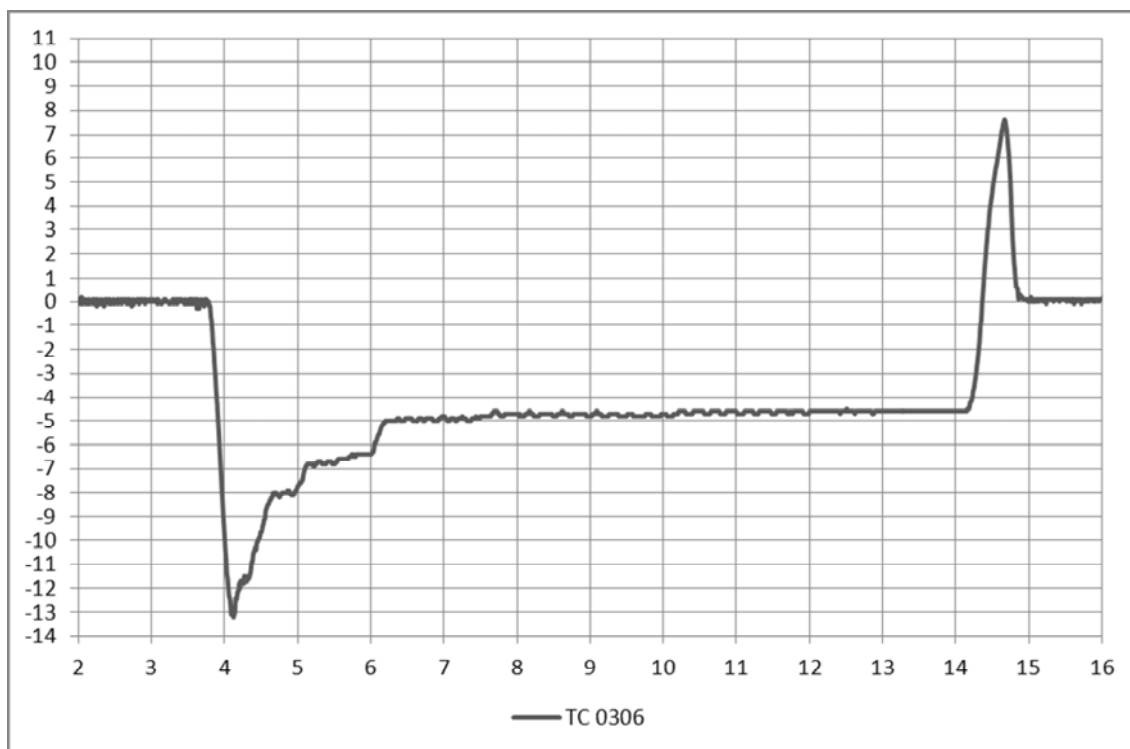
Obr. 4.70: Výsledek smáčivosti vzorku napařené mědi



Obr. 4.71: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0307



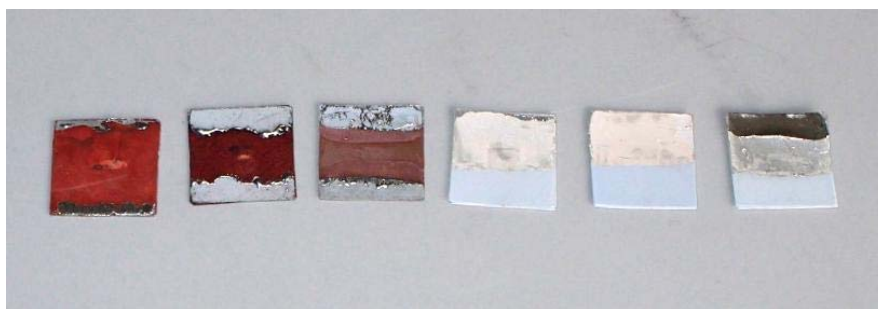
Obr. 4.72: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0308



Obr. 4.73: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0306

4.12.4 Shrnutí zjištěných poznatků

Z grafických závislostí smáčecích sil na čase lze vyvodit řadu zjištění, která je však také nutné zkombinovat se stavem vzorků po experimentu. Vzorky jsou zachyceny na obrázku 4.74.



Obr. 4.74: Vzorky po testu smáčení

Jako první byly zkoumány vzorky s napařenou a galvanicky zesílenou vrstvou mědi. Tyto závislosti jsou zachyceny na obrázcích 4.68 pro pomaleji zhotovenou vrstvu mědi a 4.69 pro rychleji zhotovenou. U prvního vzorku méně pórovitý povrch při setkání s pájkou poněkud déle odolával smočení. Při vyjímání vzorku se již ale na měděné ploše pájka dobře uchytila. Měděný povrch nebyl během testu nijak poškozen, vrstva se jen pokryla vrstvičkou cínu.

U druhého vzorku s pórovitějším povrchem je možno pozorovat rychlejší smočení pájkou, ale na konci testu se pájka vzorku snadno pustila. Při pohledu na vzorek po experimentu jsou souvislosti jasnější. Poréznější méně kompaktní vrstva mědi byla agresivní kapalnou pájkou během ponoření zkonsumována, což vysvětluje rychlé opadnutí sil při vyjmutí vzorku.

Třetí vzorek (Obr. 4.70) opatřený pouze napařenou mědí vykázal velmi dobrý výsledek poměrně rychlého smočení. I v tomto případě však velmi agresivní rozehrátá pájka absorbovala a od keramiky částečně oddělila měděný materiál a v jeho absorpci pokračovala i při vyjímání vzorku.

Následující dva vzorky past TC0307 (Obr. 4.71) a TC0308 (Obr. 4.72) zachycují experiment provedený se stříbrnými pastami, které jsou primárně určeny pro vnitřní vodivé vrstvy a prokovy v LTCC. Zde dle předpokladů došlo pouze k omezené reakci s roztavenou pájkou. Zejména vnitřní prokovovací pasta TC 0308 svým výsledkem potvrdila nezbytnou úpravu prokovů další vrstvou lépe pájitelné stříbrné pasty, má-li být na prokov navázán pájený spoj ve smyslu struktury z oddílu 4.11.

A konečně poslední vzorek (Obr. 4.73) s pastou TC0306, která je určena pro vytváření pájitelných plošek, je možné považovat za vzorek k porovnání s mědí. Po ponoru do roztavené pájky došlo relativně rychle ke smočení a pájka setrvala v kontaktu i při vyjmutí vzorku.

Zde je na místě použítou metodu uvést do souvislosti se situací při pájení v parách. Proces pájení v parách za použití kapaliny Galden 230 je výrazně delší než desetisekundový test smáčení. Rozdíl je jak v přehřevu, který u testu smáčivosti neexistuje, tak i v délce času, kdy roztavená pájka působí na pájecí plošky. Již z úvodních testů pájení jednotlivých struktur vyplynul nepříznivý vliv delšího působení kapalně pájky na stříbrnou pastu, což se později omezilo aplikací jak galvanicky zesílené, tak silné napařené vrstvy mědi. Dalším rozdílem jsou množství poměry roztavené pájky, její teploty i množství tavidla. Je nasnadě, že vanačka s pájkou rozehrátou na 245°C představuje s množstvím ponorem aplikovaného tavidla podstatně agresivnější prostředí než v 230°C parách Galdenu přetavená pájecí pasta, čímž lze vysvětlit i rychlou absorpci tenké a velmi porézní měděné vrstvy do roztavené pájky, zatímco při pájení 3D struktur na ploškách přečkala bez závažného rozrušení. Určitý rozdíl může také vnášet to, že u pájecích plošek je pod vrstvou mědi k dispozici i vrstvička stříbrné pasty, což pravděpodobně během přetavení pomáhá se stabilizací výsledných plošek.

Z hlediska prozkoumání různých variant povrchů by bylo možné provést celou řadu dalších testů. Zkombinovat různé varianty podkladové vrstvy i napařené vrstvy. Otestovat různé tloušťky vrstev a vzorků vyrobit pro každý experiment statisticky zpracovatelný počet. Takové testy však již svým zaměřením značně odbočují od 3D propojení a i vzhledem k jejich rozsáhlé časové a materiální náročnosti nebyly dále rozšířeny.

5 Závěr

Hlavním záměrem práce bylo rozšíření a ověření některých možných propojovacích postupů zejména u keramických substrátů a ve spojení s rozšířeným organickým substrátem úrovně FR-4. Jako nejzajímavější se k výzkumu jevily dosud jen málo prozkoumané ambiciózní nízkosmrštivé keramické LTCC substráty HeraLock HL2000 firmy Heraeus. Tato nová technologie spolu s kompatibilními vypalovacími pastami v sobě spojuje některé výhody keramických substrátů s možností tvorby vícevrstevných struktur. Důvodem volby těchto substrátů byla také jejich dostupnost na Ústavu mikroelektroniky a postupně rozvinutá základní sestava zařízení k práci s nimi sestávající s laseru pro přípravu substrátů, síťotisku, laminovacího lisu i vypalovací vsázkové pece. Na rozdíl od ostatních typů LTCC keramiky díky omezenému smrštění v planární úrovni se také design motivů a tvarování substrátů jevily jako proveditelné.

V součinnosti s celou řadou rozličných experimentů skupiny mikroelektronických technologií s tímto materiálem byla pozornost věnována hlavně metodám propojování substrátů. Úvodní experimenty s tímto neobvyklým materiálem měly za cíl otestovat realizovatelnost zamýšlených konstrukcí, nalézt zásadní problémy a pokusit se vyvinout postupy vedoucí ke zhotovení pozdějších komplikovanějších konstrukcí. Mnohdy to znamenalo nejen objevení nové slepé uličky, ale také potřebu obstarat další materiál, pomůcky i zařízení, nebo přístup k nim.

Velmi důležitým krokem pro tuto práci byla aplikace překryvné vrstvy LTCC s otvory přes motiv s pájecími ploškami, čímž vznikla struktura s d'olíky nazývaná u obdobných konstrukcí jako „dimpled“. Zmíněná struktura prokázala své výhody ve smyslu zlepšení odolnosti pájeného spoje na keramickém substrátu, což bylo během dalších experimentů hojně využito.

Další rozsáhlou částí práce je kapitola, jež se věnuje vytváření měděných struktur. Přestože aplikace mědi na keramický substrát sama o sobě není myšlenkou novou, aplikace měděné vrstvy na nízkosmrštivý LTCC substrát se specifickými vlastnostmi dosud testována a publikována nebyla. Po ověření základní technologie pro takový proces na snáze dostupné Al_2O_3 keramice byly provedeny četné pokusy také na LTCC substrátech.

Jedním ze směrů aplikace mědi byla snaha vytvořit z tohoto materiálu pružný element. Ukázalo se však, že technologické požadavky na výslednou vrstvu poněkud překračují dostupné technologické možnosti, a tak byla další pozornost věnována především aplikaci měděné vrstvy ve spojitosti s „dimpled“ strukturou, kde se podařilo dosáhnout úspěchů u zhotovených testovacích struktur.

Metoda aplikace mědi s pomocí napaření a zesílení otevřela také dveře možnosti využít jako vrstvy v pájených strukturách i pružné mylarové folie opatřené motivem. Poněkud stranou bylo zhotoveno i několik experimentálních substrátů na folii, nicméně se jedná o téma spíše pro samostatnou rozsáhlou práci, která by se věnovala rozdílnému chování jednotlivých fólií během pokovení, pájení, namáhání apod.

Obdobně dopadla zajímavá idea využití sestavy vrstev nepájivé masky ve spojitosti s napařenými a galvanicky zesilovanými vrstvami vedoucí k vytvoření velmi kompaktní vícevrstvé struktury na jednom nosném substrátu. Představit si lze nejen jednoduché propoje přemostňující dráhy vodivých cest, ale také vytvoření zvýšených měděných platforem pro osazení součástek, které by redukovaly mechanické namáhání během teplotních změn. Vzhledem k odbočení takových struktur do svébytné problematiky velkého rozsahu daleko od pájených vrstvených substrátů byla tato technologie ponechána k důkladnějšímu prozkoumání v jiných výzkumných pracích. Opět zde vyvstávají otázky chování jednotlivých materiálů nepájivých masek. Různá složení, tloušťky, metody nanášení i vytvrzování, vzájemná interakce s měděnými vrstvami, ale i elektrické parametry takových konstrukcí (průrazná napětí, elektromagnetická kompatibilita, rušení...).

Při vytváření keramických propojených substrátů se však také ukázalo mnoho nových komplikací, z nichž ne všechny bylo možné uspokojivě překonat. V laboratorně dostupných podmínkách je proces zpracování LTCC omezen hned na několika místech dosažitelnou přesností. Ať už při osvitu a vyvolání použitého fotorezistu, tak také při galvanickém procesu samotném, kdy je obtížné dosáhnout u všech vzorků po celé ploše konzistentní tloušťky i struktury zesílené vrstvy.

I samotná příprava surových keramických substrátů z LTCC se potýká s celou řadou dílčích těžkostí. Jsou to přesnost řezání s pomocí laseru, kdy paprsek opaluje substrát a nedokáže vytvořit čisté řezy přesně podle návrhu. Přesnost a opakovatelnost sítotisku tlustovrstvých vypalovacích past, kdy se projevují problémy sesouhlasení sítotisku jak pro více vrstev pasty, tak pro více substrátů. Používání malého objemu starší pasty také není z procesního hlediska ideální pro opakovatelné výsledky. A konečně sítotiskové zařízení samo, které je původně určeno pro tisk na Al_2O_3 substráty a je vybaveno vakuovým přísátím měkkých LTCC substrátů spíše provizorního charakteru.

Další výzvou je přesnost a opakovatelnost sesouhlasení substrátů při velmi kritickém laminačním procesu a také potíže s deformacemi, které jsou způsobeny použitím dostupného, ale zdaleka ne ideálního jednoosého hydraulického lisu.

Výpal struktur přinesl potřebu substráty podepřít rovnou, avšak nepřilnavou podložkou, která by umožnila nerušený přenos tepla a odpařování chemikálií, které se uvolňují ze substrátů samotných, ale také z natištěných past. V mnoha případech však nestačí ani dobrá podložka, neboť substráty složené z rozličně tvarovaných vrstev LTCC laminovaných dohromady mají tendenci se během výpalu kroutit. Tento jev lze omezit pouze sevřením substrátů mezi vhodné podložky, ovšem za cenu ještě větších omezení volného odpařování chemikálií i rovnoměrnosti ohřevu.

Celou kapitolu možných potíží dále představuje proces napařování, kdy rovnoměrná a přesně definovaná vrstva napařené mědi by vyžadovala velmi zdlouhavé napařování substrátů v omezeném počtu na otočném karuselu za neustálého sledování tloušťky napařené vrstvy. Dále také proces galvanického zesílení vrstvy, při kterém hraje roli celá řada faktorů počínaje kondicí mědicího roztoku, kvalitou elektrod, přesnou dávkou proudu, mícháním roztoku, oxidací, kontakty a detekcí tloušťky konče.

Stranou nelze ponechat ani simulace struktur, neboť některé ze vstupních parametrů LTCC materiálu a pájecí slitiny se podařilo získat až během experimentální činnosti vlastní i dalších kolegů ve skupině věnujících se testování pájených spojů např. u SMT součástek.

Kromě zaměření na pájkové spoje se práce věnovala také zajímavé technologii využívající speciální pájecí kuličky s pevným jádrem. Tyto kuličky představují minimálně rozšířenou propojovací technologii, která nabízí celou řadu výhod hlavně ve smyslu definování rovnoměrné mezery mezi spojovanými substráty, kde i drobné odchylky mohou způsobit rozsáhlé problémy se zkratovými můstky. Prozkoumány byly postupně kuličky s plastovým pokoveným i měděným jádrem. Zapájené spoje se ukázaly být funkční alternativou pro klasický postup s kuličkami z pájecí slitiny.

Kombinací dosud zmíněných technologií pak byla závěrečná realizace vícestupňových propojení s pomocí prokovů v LTCC substrátech. Zapájené struktury jednak potvrdily možnost zhotovit vícevrstvé pouzdro pro spojení několika technologií do jednoho celku, ale opět upozornily na celou řadu dílčích procesních problémů, které v experimentálních podmínkách laboratoře nepříznivě ovlivňují opakovatelnost a přesnost zhotovených struktur.

Nemalou komplikací je také časově omezená návaznost jednotlivých procesů. Po vyříznutí a natištění vzorků je nutno co nejrychleji přistoupit k napaření vrstvy mědi, aby nedošlo k rozsáhlé oxidaci stříbrné vypálené vrstvy. Ihned po napaření je nutno provést galvanický proces zesílení, neboť napařená měď je ještě daleko citlivější na tvorbu oxidů. Po napaření je nutno co nejdříve vzorky osadit a zapájet. Uvědomíme-li si rozmístění zařízení, závislost některých procesů na asistenci kolegů a také minimální časové okno, než je sada vytvářených vzorků znehodnocena, zjistíme, že vše musí být u každé sady vzorků provedeno v rychlém sledu operací, který může být velmi snadno rozbourán odstávkou některého ze zařízení, nebo obsazením některé z laboratoří výukou. Některá z takových překážek ve výsledku snadno vyrobí ztrátu vzorků, jejichž výroba zabrala mnoho desítek hodin. Čím později v procesu takové přerušení nastane, tím více je nenávratně ztraceno.

Během práce na experimentech byl mj. postupně přestěhován celý ústav do nových prostor, což přineslo téměř roční odstávku laseru a napařovacího zařízení, během kterých bylo možné provádět jen doplňkové experimenty a věnovat se zprovoznění zařízení mezi výukou. Následovaly odstávky sítotisku, vypalovací pece i zařízení pro pájení v parách. Ušetřena nebyla ani stanice Fritsch Mikroplacer s optickým hranolem nutným k sesouhlasení osazovaných substrátů. Poslední zmíněné zařízení odstavené na několik týdnů znamená znehodnocení téměř hotových vzorků, neboť se na měděných ploškách i přes umístění v sušícím boxu utvoří vrstva oxidů, která značně naruší pájitelnost povrchu a tím i výsledky experimentu.

I přes zmíněné komplikace se podařilo realizovat celou řadu ověřovacích vzorků, které jsou postupně v jednotlivých kapitolách práce popsány.

Nebyl by to však italský laser, aby se spokojil s komplikací během stěhování, a tak výpadky důležitých komponent (lampy, kavita, sestava vypálených zrcátek apod.) způsobil mnoho dalších několikátýdenních až několikaměsíčních přestávek až po finální úplné zhroucení ovládacího systému na počátku r. 2016 trvající i nyní v době odevzdání práce. Odstavené zařízení tímto nepříjemně zablokovalo vytvoření závěrečné ověřovací série vzorků statisticky vyhodnotitelného počtu vícevrstevných 3D sestav, které měly být podrobeny zátěži v teplotní cyklovací komoře, neboť zhotovení velkého množství opakovatelných otvorů v keramice pro „dimpled“ struktury není možné provést jiným dostupným zařízením. Jen v případě kombinace z experimentu z kapitoly 4.11 se jedná o 256 větších a 64 menších otvorů pro jednu sestavu. Pro zamýšlený statisticky zkoumatelný vzorek a připočítané náhradní substráty pro pokrytí všech chyb v následných procesech se dostáváme k mnoha tisícům otvorů s požadavkem na přesné souřadnice, průměr i tvar...

Jak je z práce patrné, otevřela dveře mnoha novým postupům, které je možné dále rozvíjet ať už experimentální formou studentských prací, ale i při případných průmyslových aplikacích. Zde je vhodné aspoň okrajově zmínit například zájem britské pobočky firmy Selex ES o zmíněné metody 3D propojů LTCC substrátů. Bohužel pro odmítavý postoji firmy ke zveřejnění podrobností v závislosti na utajený vojenský vývoj v oblasti radarových technologií nebylo do druhé kapitoly práce možné zahrnout ani dílčí výsledky testů, které s LTCC provádějí. Z komunikace během roku 2015 si ale lze dovodit, že i dílčí výsledky práce publikované otevřeně, a tedy bez možnosti dalšího patentování, na studentských konferencích ISSE mohly směřovat například vývoj technologie budoucí avioniky pro letouny Eurofighter, nebo námořní radary.

Práce také přinesla poznatky týkající se kombinace zkoumaných technologií a dostupných zařízení. Na ústavu byly postupně vytvářeny lepší podmínky pro základní práci se substráty LTCC, ovšem z hlediska vytváření přesných složitějších struktur je dostupné laboratorní pracoviště spíše na počátku dlouhé a velmi nákladné cesty. Zejména proces laminace je pro tvorbu složitějších struktur velmi zásadní a zasloužil by si zajištění pokročilejšího laminačního lisu. Obdobně dostavovací laser bez možnosti rovinné fixace surových substrátů a se spíše provizorně doplněným ovládacím softwarem s možností práce s Gerber daty, je nedostatečný pro vytváření jemných detailů v LTCC a i jeho nízká provozní spolehlivost přímo nabádá k pořízení modernějšího a přesnějšího zařízení, které by bylo nativně schopno zpracovat CAD data. Pro správný soutisk vrstev již existují stanice vybavené částečně automatizovaným optickým sesouhlasením, případně zajímavou variantou je jistě souřadnicový jet dispenzer. Zhotovení měděných vrstev prakticky vyžaduje kompetentní pokovovací linku laboratorního typu s kvalitními roztoky. Opakovatelnosti pájení by jistě prospělo zařízení pro pájení v parách schopné regulovat teplotu nejen topným tělesem, ale také dynamickou změnou polohy roštu se vzorky.

A takto by šlo pokračovat stále dál k lepším a lepším zařízením i postupům...

Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, I., Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno, 2006, ISBN80-214-3292-6.
- [2] TUMMALA, R., Introduction to System-On-Package, McGraw-Hill, 2007, ISBN 0071459065
- [3] TUMMALA, R., Fundaments of Microsystems Packaging, McGraw-Hill, 2001, ISBN 0071371699
- [4] KOSINA, P. Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012. 88 stran, 6 příloh. Vedoucí práce J. Šandera
- [5] HERAEUS. Design Guidelines for LTCC: HeraLock HL200 Materials System. 2005. Dostupné z: <http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf>
- [6] HeraLock Tape HL2000. Heraeus [online]. 2011 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: http://heraeus-circuitscomponents.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/HL2000.pdf
- [7] LAUTZENHISER, F., AMAYA, E., HeraLock™ 2000 Self-constrained LTCC Tape, p. 43-49, Proceedings of the 2002 International Conference on Advanced Packaging and Systems (ICAPS), Reno, Nevada, March 12-13, 2002
- [8] Senju Metal Industry Co., Technical Bulletin, Sparkle Ball for BGA, CSP, Flip Chip Application, 1997
- [9] Sekisui Chemical Co., Plastic Core Solder Balls overview, Dostupné z: http://www.sekisui.com.hk/eng/product/fcd_a05.htm
- [10] LAUTZENHISER, F., AMAYA, E., BARNWELL, P., WOOD, J., Microwave module design with HeraLock™ HL2000 LTCC, Proceedings of IMAPS 2002, Denver, USA, ISBN 0-930815-66-1
- [11] PINEL, S., CHARKRABORTY, S., MANDAL, S., LIANG, H., LIM, K., ROELLING, M., KUNZE, R., TUMMALA, R., TENTZERIS, M., LASKAR, J., 3D integrated LTCC module using μBGA technology for compact C-band RF front-end-module, Proceedings of IEEE International Microwave Symposium, 2002, s. 1553-1556, ISBN 0-7803-7239-5
- [12] SCHWANKE, D., HAAS, T., ZEILMANN, C., HALSER, K., KLEIN, M., Reliability Investigation of BGA-Interconnections between RF-LTCC-Modules and PCBs, In: Proceedings of 14th European Microelectronics and Packaging Conference, Fridrichshafen, Germany, p 213-218
- [13] KANGASVIERI, T., Surface-mountable LTCC-SIP module approach for reliable RF and millimetre-wave packaging, University of Oulu, Tampere, Finland, 2008, ISBN 978-951-42-8921-7

- [14] NOUSIAINEN, O., Characterization of second-level lead-free BGA interconnections in thermomechanically loaded LTCC/PWB assemblies, University of Oulu, Tampere, Finland, 2010, ISBN 978-951-42-6353-8
- [15] ENGELMAIER, W., Solder joint reliability: acceleration transforms and acceleration factors. Global SMT and Packaging. 2009. vol. 9. no. 8. ISSN 1474-0893
- [16] ENGELMAIER, W., Solder joint reliability prediction for chip components, MELFs, TSOPs, SOTs, etc. Global SMT and Packaging. 2009. vol. 9. no. 6. ISSN 1474-0893
- [17] MATTOX, D., M., Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, S.E., Elsevier Inc, 2010, ISBN 978-0-8155-2037-5
- [18] ŠKEŘÍK, J., Receptář pro elektrotechniku, SNTL, 1974, ISBN 0453788
- [19] KLÍMA, M. Nekonvenční aplikace keramiky s nízkou teplotou výpalu. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2015. 92 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Vlastní publikační aktivity

- [20] ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Temperature Cycling with Peltier Elements of Boards with SMD Components and Failure Evaluation. SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, 2014, roč. 26, č. 2, s. 53-61. ISSN: 0954- 0911.
- [21] ADÁMEK, M.; ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Testování vlastností montáže součástek pro povrchovou montáž na desce č.v. 750555011 „Jednotka řízení snímače“, Závěrečná zpráva k úkolu řešeném v rámci smlouvy o dílo pro SMTplus.CZ s.r.o., HS 18257009, na základě objednávky č. 225/2013/UVY/ 570 od společnosti AŽD Praha. VUT Brno: 2014. s. 1-35.
- [22] ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Výsledky teplotního cyklování vzorků a diagnostika poruch I. Brno: 2013. s. 1-11.
- [23] PSOTA, B.; KLÍMA, M.; NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Usage of LTCC Technology in Electronic Packaging. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 206-209. ISSN: 2161- 2528.
- [24] NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; STARÝ, J.; KOSINA, P.; PSOTA, B. Properties of 3D LTCC Structure Interconnections. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>, 2012, roč. 2012, č. VI., s. 1-5. ISSN: 1802-4564.
- [25] NICÁK, M.; PSOTA, B.; KOSINA, P.; STARÝ, J.; ŠANDERA, J. Properties of 3D LTCC Structure interconnections. In Electronics Devices and Systems 2012. 1. Tábor 43a, 612 00 Brno: Ing. Vladislav Novotný - Litera, 2012. s. 245-251. ISBN: 978-80-214-4539- 0.
- [26] NICÁK, M.; PSOTA, B.; STARÝ, J.; ŠANDERA, J.; KOSINA, P. Zero Shrink LTCC 3D Structure Interconnections. In 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27- 29, A-1040 Wien - Austria: IEEE Xplore digital library, 2012. s. 128-132. ISBN: 978-1-4673-2241- 6. ISSN: 2161- 2528.
- [27] NICÁK, M.; ŠANDERA, J. 3D LTCC and Flexible Structure Interconnections Based on Galvanized Layers. In Proceedings of 18th European microelectronics packaging conference EMPC 2011. Brighton, UK: IMAPS- Europe, 2011. s. 358-361. ISBN: 978-0-9568086-0- 8.
- [28] NICÁK, M.; KOSINA, P.; ŠANDERA, J. 3D Propojovací struktury realizované pomocí galvanických vrstev na keramických substrátech. In MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. 1. Brno: Novpress, 2011. s. 25-30. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

- [29] ADÁMEK, M.; NICÁK, M. Některé aspekty postavení pájení BGA pouzder a speciálních komponent ve výukovém procesu. In IMAPS - Mikroelektronika současnosti. Odborný seminář organizovaný International Microelectronics and Packaging Society. Sborník příspěvků. Brno: NOVAPRESS s.r.o., Brno, 2011. s. 44-48. ISBN: 978-80-214-4404- 1.
- [30] ŠVECOVÁ, O.; NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; KOSINA, P. Recent advance in solder ball interconnections reliability examination. In ISSE 2011 - Proceedings. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. 1. Košice, SK: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 253-257. ISBN: 978-1-4577-2111- 3. ISSN: 2161- 2528.
- [31] NICÁK, M.; ŠANDERA, J. On the Application of 3D LTCC and Flexible Structures Based on Galvanized Layers. In ISSE 2011 - Proceedings. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. 1. Košice, SK: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 109-111. ISBN: 978-1-4577-2111- 3. ISSN: 2161- 2528.
- [32] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; ŠANDERA, J.; PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead- Free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structure. In Key Engineering Materials Vol. 465 (2011). Key Engineering Materials (print). Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2011. s. 491-494. ISBN: 978-3-03785-006- 0. ISSN: 1013- 9826.
- [33] NICÁK, M. Development of Lead-free Soldered 3D structures. In STUDENT EEICT 2010. 1. Brno: NOVAPRESS, 2010. s. 231-235. ISBN: 978-80-214-4079- 1.
- [34] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; PULEC, J.; ŠANDERA, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead- free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structures. 6th International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture - MSMF6 - Abstract booklet. 1. Brno: VUT Brno, FSI & Repropress, Srbská 53, Brno, 2010. s. 184-184. ISBN: 978-80-214-4112- 5.
- [35] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Použití pájecích kuliček v 3D pouzdření. In Mikrosyn. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. 1. Brno: Novpress, 2010. s. 11-19. ISBN: 978-80-214-4229- 0.
- [36] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Contribution to Lead-free soldered 3D Structures. In Second Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum "Education Quality - 2010" : Proceedings. Izhevsk, Russia: Publishing House of ISTU, 2010. s. 378-382. ISBN: 978-5-7526-0442- 3.

- [37] SZENDIUCH, I.; NICÁK, M. On the Application of Solder Balls for 3D Packaging. PLUS, 2010, roč. 2010, č. 8, s. 1855-1860. ISSN: 1436- 7505.
- [38] NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; SZENDIUCH, I. Contribution to realization of 3D structures. In 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2010. Warsaw, Poland: IEEE Xplore digital library, 2010. s. 156-159. ISBN: 978-1-4244-7849- 1.
- [39] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Contribution to realization of 3D structures. Abstract proceedings. Polymer Electronics and Nanotechnologies: towards System Integration. Warsaw, Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010. s. 110-111. ISBN: 978-83-7207-870- 4.
- [40] ADÁMEK, M.; PRÁŠEK, J.; NICÁK, M. The students' workplace for special components soldering and inspection. In EDS'09 IMAPS CS International Conference Proceedings. Brno: NOV PRESS s.r.o., 2009. s. 392-396. ISBN: 978-80-214-3933- 7.
- [41] ADÁMEK, M.; PRÁŠEK, J.; NICÁK, M. New trends of BGA Soldering in education. Electronics, 2009, roč. 3, č. 2, s. 26-28. ISSN: 1313- 1842.
- [42] NICÁK, M. Optimalization of Lead-free Soldering Process. In Proceedings of the 13th Conference Student EEICT 2007. Volume 1. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Ondráčková 105, Brno, 2007. s. 135-137. ISBN: 978-80-214-3407- 3.

Vedené bakalářské práce

- [43] SOMER, J.; Parametry spojů BGA na keramických Al₂O₃ substrátech, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2011
- [44] BOBEK, J.; Návrh a zhotovení zařízení pro osazování pájecích kuliček, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2013
- [45] BRÁNECKÝ, M.; Návrh a realizace úprav zařízení pro metalografické výbrusy, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2013

Vlastní tvůrčí aktivity

- [F1] NICÁK, M.; KLÍMA, M.: OSVIT_ NK; Zařízení k UV osvitu sít určených pro sítotisk tlustovrstvých hybridních integrovaných obvodů. Technická 10, Lab. 0. 67. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-osvitka.pdf>. (funkční vzorek)
- [F2] NICÁK, M.; BRÁNECKÝ, M.: Metasinex Lux; Automatizace zařízení pro metalografické výbrusy. Technická 10, Lab 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-metasinex.pdf>. (funkční vzorek)
- [F3] NICÁK, M.; BOBEK, J.: Ball Placer; Zařízení pro hromadné osazení pájecích kuliček BGA. Technická 10, Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-rameno.pdf>. (funkční vzorek)
- [F4] KOSINA, P.; NICÁK, M.: sablona 82x82; Šablony pro laminaci LTCC. Technická 10, Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/kosina-fv-sablony.pdf>. (funkční vzorek)
- [F5] KLÍMA, M.; NICÁK, M.: M1/2012; Horizontální válcová míchačka tlustovrstvých past. VUT, FEKT, UMEL, Technická 3058/10, 616 00 Brno. Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/klima-fv-michacka.pdf>. (funkční vzorek)

Účast na projektech

- [P1] Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice, zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2016
- [P2] Pracoviště pro testování pevnosti pájených spojů - 2738 - G1, zahájení: 01.03.2011, ukončení: 31.12.2011 (*hlavní řešitel*)
- [P3] Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů, zahájení: 01.01.2011, ukončení: 31.12.2014
- [P4] Integrované 3D vícevrstvé struktury a pouzdra s vnořenými (embedded) součástkami, zahájení: 01.01.2010, ukončení: 31.12.2010
- [P5] FR-TII/072, Aplikace moderních montážních technologií a materiálů v elektrotechnickém průmyslu, zahájení: 04.03.2009, ukončení: 31.12.2011

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
3D	Three dimensional, trojrozměrný
BGA	Ball Grid Array, typ kontaktů pouzdra s kuličkovými vývody
CGA	Column Grid Array, patice pro pouzdro vybavená sloupkovými kontakty
CNC	Computer Numeric Control, počítačem ovládané zařízení
CSP	Chip Scale Package, pouzdro velikosti samotného čipu
DPS	Deska plošných spojů (angl. PCB)
FEM	Finite Element Method, metoda konečných prvků
FR-4	Flame Retardant, typ organického substrátu na bázi skelných vláken a pryskyřice
FRVŠ	Fond Rozvoje Vysokých Škol
HAL	Hot Air Levelling, povrchová ochrana plošných spojů pomocí cínového povlakování za horka
HL2000	HeraLock™ technologie LTCC substrátů vyvíjená od r. 2000
HTCC	Hi Temperature Cofired Ceramics, vysokoteplotně vypalovaná keramika
LED	Light Emitting Diode, světlo vyzařující dioda
LGA	Land Grid Array, patice pro pouzdro s pružnými kontakty
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramics, nízkoteplotně vypalovaná keramika
MCM	Multi Chip Module, více propojených čipů na nosném substrátu
MEMS	Micro Electro Mechanic Systém, mikroelektromechanický systém
Nd-YAG	Neodymium doped Yttrium Aluminium Garnet, technologie pevnolátkového laseru
PCSB	Plastic Core Solder Ball, pájecí kulička s plastovým jádrem
PGA	Pin Grid Array, patice pro pouzdro vybavená kontaktními piny
PVD	Physical Vapor Deposition, vakuové napařování
SEM	Scanning Electron Microscope, skenovací elektronový mikroskop
SiP	Systém in Package, trojrozměrná varianta MCM
SoC	System on Chip, funkční systém sestavený na úrovni čipu
SOP	System on Package, totéž co SiP
WLP	Wafer Level Packaging, pouzdření na úrovni křemíkové vrstvy

Symbol	Význam	Jednotka
N_f	Celkový počet cyklů do poruchy	-
ε_f	Koeficient únavové tažnosti	-
ΔD	Cyklické únavové poškození	-
m	Exponent tvárnosti	-
F	Technický faktor	-
DNP	Vzdálenost od nulového bodu desky	mm
ΔCTE	Rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti	-
ΔT	rozdíl teplot ($T-T_0$)	K
h	Výška pájeného spoje	mm
T_{SJ}	Průměrná cyklická teplota pájeného spoje	K
t_D	polovina doby trvání prodlevy za jeden cyklus	min
t_0, c_0, c_1, c_2	koeficienty pájecí slitiny	-
CTE	Koeficient teplotní roztažnosti	ppm/°C ⁻¹

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Teplotní vypalovací profil LTCC substrátu Heraeus HL2000 podle [5]	17
Obr. 2.2: Detail sítotisku Aurel zobrazující síto s motivem krátce po tisku.....	18
Obr. 2.3: Porézní kámen s vakuovým odsáváním fixující list LTCC keramiky.....	18
Obr. 2.4: Schéma Sekisui SOL podle [9].....	20
Obr. 2.5: Koncept 3D LTCC modulu podle [11].....	21
Obr. 2.6: Zapájená kulička Sekisui SOL s pevným jádrem po teplotním cyklování [12]	22
Obr. 2.7: Schéma BGA spoje, měřítko je v milimetrech [13]	23
Obr. 4.1: Teplotní pájecí profil pece pro pájení v parách.....	26
Obr. 4.2: LTCC substrát s motivem tvořeným zlatou pastou po přetavení	27
Obr. 4.3: LTCC substrát s laserem řezaným, laminovaným a vypáleným otvorem v krycí vrstvě	28
Obr. 4.4: LTCC substrát s BGA 225 motivem s „dimpled“ strukturou krátce po výpalu	28
Obr. 4.5: 3D schéma „dimpled“ LTCC struktury při použití dvou nosných a jedné krycí vrstvy.....	29
Obr. 4.6: Nástroj pro reballing s maticí pro BGA 225	29
Obr. 4.7: Výsledné LTCC „pouzdro“ s maticí vývodů ve formě BGA225	30
Obr. 4.8: Schéma spojení struktury ve stavu po přetavení	30
Obr. 4.9: Výstup základní simulace namáhání struktury BGA 225	32
Obr. 4.10: Mikrovýbrus zapájené „dimpled“ struktury BGA 225.....	33
Obr. 4.11: Mikrovýbrus zapájené „dimpled“ struktury BGA 225.....	33
Obr. 4.12: Schéma testovacího motivu - spodní a horní díl	34
Obr. 4.13: Detail otvoru v LTCC HL2000 zhotovený pomocí laseru Aurel ALS 300 ..	35
Obr. 4.14: LTCC substráty po laminaci.....	36
Obr. 4.15: LTCC substráty po laminaci.....	36
Obr. 4.16: LTCC 3D „dimpled“ struktura po zapájení – detail pájeného spoje.....	37
Obr. 4.17: LTCC 3D „dimpled“ struktura po zapájení – detail výbrusu pájeného spoje	37
Obr. 4.18: Keramické substráty napařené vrstvou Cu	38
Obr. 4.19: Keramický substrát s napařené vrstvou Cu a vyvolaným fotorezistem	39
Obr. 4.20: Přípravek pro galvanické zesilování napařené vrstvy a detail LTCC substrátu	40
Obr. 4.21: Pracoviště pro galvanické pokovení s měděnými elektrodami a komerční lázní.....	40

Obr. 4.22: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv (mikroskopický detail).....	41
Obr. 4.23: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv (mikroskopický detail).....	41
Obr. 4.24: Vrstva napařené mědi a vystupující galvanicky zesílený motiv během mikroleptu	42
Obr. 4.25: Výsledná podoba galvanicky zesíleného motivu (mikroskopický detail).....	42
Obr. 4.26: Výsledná podoba galvanicky zesíleného testovacího motivu po kartáčování	42
Obr. 4.27: Detail částečně odtržené pružné měděné plošky	43
Obr. 4.28: Testovací sestava částečně uvolněných měděných plošek po odstranění fotorezistivních vrstev.....	44
Obr. 4.29: Detail provedení kruhové nepájivé masky	45
Obr. 4.30: Testovací motiv BGA 64 s kruhovou nepájivou maskou a natištěnou pájecí pastou	45
Obr. 4.31: Sestava substrátů a kuliček před přetavením.....	46
Obr. 4.32: Sestava substrátů po přetavení	46
Obr. 4.33: Mikrovýbrus zapájené sestavy LTCC substrátů s měděnými vrstvami	47
Obr. 4.34: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami	48
Obr. 4.35: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami	49
Obr. 4.36: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami	49
Obr. 4.37: „Dimpled“ LTCC substrát krátce po napaření měděné vrstvy	50
Obr. 4.38: Substráty na podložce opatřené fotorezistem	51
Obr. 4.39: Substrát s vyvolaným fotorezistem odhalujícím budoucí vnořené pájecí plošky a pomocnou plochu pro elektrodu	51
Obr. 4.40: Substrát se zesílenými ploškami po odstranění fotorezistu a mikroleptu	52
Obr. 4.41: Detail výsledných plošek.....	53
Obr. 4.42: Zapájená sestava LTCC substrátů	53
Obr. 4.43: Detail mikrovýbrusu pájeného spoje	54
Obr. 4.44: Mikrovýbrus pájeného spoje ukazující návaznost propojených plošek	54
Obr. 4.45: LTCC substráty v napařovací aparatuře	56
Obr. 4.46: LTCC substrát s napařenou velmi silnou vrstvou mědi	56
Obr. 4.47: LTCC substráty s ploškami pokrytými pájecí pastou	57
Obr. 4.48: Mikrovýbrus pájeného propoje mezi LTCC substráty se silnou vrstvou napařené Cu	57
Obr. 4.49: Detail nástroje pro test pevnosti stříhem	59

Obr. 4.50: Grafické zobrazení hodnot tabulky 4.1.	60
Obr. 4.51: Spojení FR-4 + LTCC	63
Obr. 4.52: Pohled zařízením Ersascope na spojení FR-4 + LTCC	63
Obr. 4.53: Rentgenová analýza spojení FR-4 + LTCC	64
Obr. 4.54: Detail výbrusu pájeného spoje mezi FR-4 + LTCC se SOL pájecí kuličkou	65
Obr. 4.55: Detail výbrusu pájeného spoje mezi „dimpled“ LTCC se SOL pájecími kuličkami.....	65
Obr. 4.56: Detail pájeného spoje mezi „dimpled“ LTCC s pájecími kuličkami s Cu jádrem	66
Obr. 4.57: Rentgenový pohled na spojení LTCC substrátů pájecími kuličkami s Cu jádrem	67
Obr. 4.58: Detail výbrusu pájeného spoje LTCC substrátů s pájecími kuličkami s Cu jádrem	67
Obr. 4.59: Příprava otvorů v laserem předřezaném LTCC substrátu	68
Obr. 4.60: Tisk pasty do otvorů v LTCC substrátu	69
Obr. 4.61: Potištěné otvory v LTCC substrátu	69
Obr. 4.62: 3D LTCC pájená vertikální struktura při pohledu ze strany (detail).....	70
Obr. 4.63: 3D LTCC pájená vertikální struktura – rentgenové zobrazení.....	71
Obr. 4.64: 3D LTCC pájená vertikální struktura – mikrovýbrus	71
Obr. 4.65: Meniskograf pro testování smáčivosti povrchu vzorků	74
Obr. 4.66: Vzorek LTCC s galvanicky zesílenou mědí v úchytu raménka	75
Obr. 4.67: Graf celkových výsledků testu smáčivosti	76
Obr. 4.68: Výsledek smáčivosti vzorku galvanicky zesílené mědi (1).....	76
Obr. 4.69: Výsledek smáčivosti vzorku galvanicky zesílené mědi (2).....	77
Obr. 4.70: Výsledek smáčivosti vzorku napařené mědi	77
Obr. 4.71: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0307.....	78
Obr. 4.72: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0308.....	78
Obr. 4.73: Výsledek smáčivosti vzorku s pastou TC0306.....	79
Obr. 4.74: Vzorky po testu smáčení	79

Curriculum Vitae

Jméno: Michal Nicák
Narozen: 07. 08. 1982 v Brně
Kontakt: Michal.Nicak@seznam.cz, xnicak00@stud.feec.vutbr.cz

Vzdělání

2009 – 2016 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie
2007 – 2009 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Magisterské studium, obor Mikroelektronika
2002 – 2007 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Bakalářské studium, obor Mikroelektronika a technologie
1994 – 2002 **Klasické Gymnasium Brno, Plovdivská 8**
Humanitní studium se zaměřením na klasické jazyky

Praxe

08/2014 – **Honeywell s.r.o, HTS, ACS, HW Center of Excellence**
R&D Process Engineer
09/2009 – 07/2014 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Výuka BESO, BMEP, BMTS, MMTE; vedení bakalářských prací; kursy pájení BGA; výzkumná a vývojová činnost v laboratořích ústavu zaměřená zejména na pájené spoje, BGA, teplotní cyklování, napařování tenké vrstvy, depozici tlusté vrstvy, metalografické výbrusy, testování pevnosti pájených spojů a optickou inspekci
09/2006 – 04/2010 **Jonckers Translation& Engineering s.r.o**
SW Tester lokalizovaného software (Adobe, Canon, Cisco, Microsoft...)