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

OPTIMALIZACE FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH PROCES PÁJENÍ MODERNÍCH ELEKTRONICKÝCH POUZDER

OPTIMIZATION OF FACTORS AFFECTING THE PROCESS OF SOLDERING FOR MODERN ELECTRONIC PACKAGES

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Alexandr Otáhal

AUTHOR

ŠKOLITEL — doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2020

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na výzkum a vývoj nové metody pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na pouzdrech s pájkovými kulovými vývody (BGA, CSP, SOP apod), a to na základě zkoumání a optimalizace parametrů finálních vývodů. Výstupem jsou speciálně upravené šablony určené pro umístění pájkových kuliček před pájením přetavením. V práci byly zkoumány tři materiálově odlišné šablony, kromě běžně používané nerezové také další dvě nově navržené, u nichž byly využívány keramické materiály (96% Al2O3a AlN) s tlustovrstvým odporovým vytápěním. Ověřenými výhodami metody využívající šablony přímo vyhřívané elektrickým proudem je omezení tepelného zatížení BGA pouzder v prvním procesu pájení, a také vytvoření kvalitnějšího spoje mezi metalizací pouzdra a pájkovou kuličkou po finálním zapájení na desku plošných spojů. V průběhu výzkumu, vývoje a optimalizace metody byly provedeny testy vytvořených kulových vývodů z pohledu mechanické pevnosti a vnitřní struktury. V další části práce byl proveden výzkum pájkových kulových vývodů pájených pomocí infračervených zářičů, s cílem zjištění vlivu směru tepelného proudění při procesu pájení přetavením. Topná tělesa byla postupně umístěna ve třech polohách, tj. ohřev z dolní strany pouzdra, ohřev z horní strany a oba ohřevy současně. Po přípravě vzorků, provedení metalografických výbrusů a leptání, byla provedena analýza vnitřní struktury celé pájkové kuličky a intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška. Práce tak představuje nejen novou metodu pájení kulových pájkových vývodů, ale také nové poznatky k tvorbě jejich vnitřní struktury, což přispívá ke splnění stále náročnějších požadavků na dosažení požadované spolehlivosti a kvality.

KLÍČOVÁ SLOVA

BGA pouzdro, vytvoření kulových pájkových vývodů, obnovení kulových pájkových vývodů, přímo vyhřívaná šablona, pájení přetavením

ABSTRACT

The work deals with research and development of a new method for ball-attach process, resp. reballing process of solder bumps on package with solder ball terminals (BGA, CSP, SOP, etc.), based on research and optimization of the parameters of the final terminals. The output is specially modified templates designed for placement of solder balls before reflow soldering. Three materially different templates were investigated in the work, in addition to the commonly used stainless steel, two other newly designed templates, which used ceramic materials (96% Al2O3a AlN) with thick-layer resistance heating. Proven advantages of the method using templates directly heated by electric current are the reduction of the thermal load of BGA packages in the first soldering process, as well as the creation of a better connection between the metallization of the case and the solder ball after final soldering to the printed circuit board. During the research, development and optimization of the method, tests of the created solder bumps were performed from the point of view of mechanical strength and internal structure. In the next part of the work, a research of solder bumps soldered using infrared heaters was performed in order to determine the influence of the heat flow direction in the process of reflow soldering. The heaters were successively placed in three positions, i.e. heating from the bottom of the housing, heating from the top and both heaters simultaneously. After sample preparation, metallographic cuttings and etching, the analysis of the internal structure of the entire solder ball and the intermetallic layer at the interface of the solder and the solder pad was performed. The work represents not only a new method of soldering solder bumps, but also new knowledge to create their internal structure, which contributes to meeting the increasingly demanding requirements to achieve the required reliability and quality.

KEYWORDS

BGA package, ball-attach, reballing, direct heated stencil, reflow soldering

OTÁHAL, Alexandr. Optimalizace faktorů ovlivňujících spolehlivost pájení moderních elektronických pouzder. Brno, 2020. 112 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125750. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma Optimalizace faktorů ovlivňujících spolehlivost pájení moderních elektronických pouzder jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc při zpracování mé dizertační práce.
Dále chci poděkovat svým kolegům Ing. Jaroslavu Jankovskému, Ing. Michalu Řezníčkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Buršíkovi, Ph.D. za metodickou, odbornou pomoc při řešení vzniklých problémů.
V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat kolegům Ing. Jakubu Somerovi, Ing. Josefu Skácelovi, Ing. Ondřeji Chmelovi, Ph.D., Mgr. Zdence Fohlerové, Ph.D. a dalším jež mi také radami a psychickou podporou pomohli překovat některé útrapy s dizertací i mimo ni.
Mé největší poděkování patří mé mamce Janě a otci Josefovi, kteří mi pomáhali ve chvílích lepších i horších. Bez jejich podpory bych nebyl tam, kde jsem nyní a tato práce by nevznikla.
Děkuji také Centru senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX) za možnost pracovat na některých jejich zařízeních.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam symbolů, veličin a zkratek **viii**

Seznam obrázků **x**

Seznam tabulek **xiv**

Úvod **1**

1 Současný stav a vymezení oblasti dizertační práce **3**

1.1 Metody vytvoření kulového pájkového vývodu na pouzdrech typu BGA 3

1.1.1 Ohřívatelná a neohřívatelná šablona 3

1.1.2 Samolepící šablony 5

1.1.3 Laserové pájení 6

1.2 Vliv gradientu teploty na vnitřní strukturu kulového pájkového spoje 7

1.3 Krystalografická orientace kulového pájkového vývodu 13

1.4 Intermetalické vrstvy a mechanická pevnost ve střihu u kulových pájkových vývodů a spojů 16

2 Cíle dizertační práce **19**

3 Návrh a příprava vzorků **20**

4 Vývoj a výzkum inovativní metody pro osazení a zapájení kulových pájkových vývodů **23**

4.1 První vývojová etapa – šablona z korundové keramiky 23

4.2 Druhá vývojová etapa – šablona z nitridové keramiky 28

4.3 Třetí vývojová etapa – šablona z nerezové oceli 29

4.3.1 Ověření využitelnosti nerezové šablony 30

4.3.2 Návrh a konstrukce první verze pájecí stanice 31

4.3.3 Komercializace pájecí stanice se šablonou z nerezové oceli 34

4.4 Návrh a charakterizace přímo vyhřívané nerezové šablony 37

4.4.1 Návrh nerezové šablony 37

4.4.2 Rozdíl teplot mezi šablonou a BGA pouzdrem 38

4.4.3 Rozložení teploty na šabloně a jeho experimentální optimalizace 41

4.4.4 Životnost šablony 51
4.5 Charakterizace kulových pájkových vývodů vytvořených pomocí přímo vyhřívané šablony 54
4.5.1 Příprava testovacích vzorků 54
4.5.2 Testování a analýzy 55
4.5.3 Výsledky a diskuse 57
4.6 Porovnání elektrickým proudem přímo vyhřívané šablony se stávajícími metodami 59
4.7 Shrnutí dosažených výsledků 61
5 Vliv směru proudění tepla při pájení přetavením na vnitřní strukturu pájeného spoje u pájkových kulových vývodů 63
5.1 Příprava testovacích vzorků 64
5.2 Testování a analýzy 66
5.3 Výsledky a diskuse 66
5.4 Shrnutí a diskuze dosažených výsledků 74
6 Porovnání výsledků charakterizace kulových pájkových vývodů 77
Závěr 80
Literatura 82
Seznam publikací autora 90
Seznam produktů autora 94
Seznam patentů autora 95
Seznam příloh 98

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SMT	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
DIP14	Dual In-line Package 14
MCM	Multi Chip Module
SOP	System on Package
LGA	Land Grid Array
TQFP	Thin Quad Flat Pack
WLP	Wafer Level Package
CSP	Chip Scale Package
BGA	Ball Grid Array (pouzdro s polem kulových vývodů)
TFBGA	Thin Profile Fine Pitch Ball Grid Array
TSSOP	Thin Shrink Small Outline Package
FBGA	Fine-Pitch Ball Grid Array
DPS	deska plošných spojů
SEM	Scanning Electron Microscope (skenovací elektronový mikroskop)
BSE	Backscattered Electron (zpětně odražené elektrony)
EDS	Energy-dispersive X-ray Spectroscopy
EDX	Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (energiově dispersní rentgenová spektroskopie)
EBSD	Electron Backscatter Diffraction (difrakce zpětně odražených elektronů)
SAC305	Pájecí slitina složená z Sn 96,5 %, Ag 3 %, Cu 0,5 %
SAC359	Pájecí slitina složená z Sn 95,6 %, Ag 3,5 %, Cu 0,9 %
BiPb	Pájecí slitina složená z Bi, Pb
SnCd	Pájecí slitina složená z Sn Cd
AlCuNi	Pájecí slitina složená z Al, Cu, Ni
R_{rms}	Efektivní tloušťka intermetalické vrstvy
Z_i	Výška nerovnosti intermetalické vrstvy
MSL	Střední hodnota tloušťky vrstvy
A	Plocha intermetalické vrstvy

L	Délka intermetalické vrstvy
Q_η	Integrál tepla (*Heating Factor*)
T	Teplota
T_m	Teplota tání pájecí slitiny
λ	Vzdálenost mezi intermetalickými sloučeninami tvaru tyčí
k	Konstanta regresní rovnice přímky
G^{-n}	Teplotní gradient (-n – hodnota exponentu teplotního gradientu)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Šablony pro obnovení kulových pájkových vývodů 4

Obrázek 2: Šablona s kulovými pájkovými preformami EZReball [9] 5

Obrázek 3: Šablona s kulovými pájkovými preformami SolderQuik® [10] 5

Obrázek 4: Princip pájení laserem a schematické uspořádá osazovací hlavy [12] 6

Obrázek 5: Schematické znázornění atomových toků na rozhraní Cu/Sn/Cu [29] 9

Obrázek 6: Mikrostrukturální vývoj pájených spojů Cu / Sn / Cu po přeformátování při 250 ° C pro různé doby trvání: (a, c, e a g) studený konec a (b, d, f a h) teplý konec [29] 10

Obrázek 7: Typické optické snímky morfologie růstu pájecí slitiny SAC395 se směrovým tuhnutím při rozdílném teplotním gradientu (G = 2,48-6,34 K/mm) s konstantní rychlostí růstu (v = 7,20 μm/s): (a) podélný řez, (b) příčný řez (2,48 K/mm), (c) podélný řez, (d) příčný řez (4,25 K/mm), (e) podélný řez, (f) příčný řez (6,34 K/mm) [30] 12

Obrázek 8: Příklad čtyř typů morfologického uspořádání zrn cínu v kulovém pájkovém spoji [38] 14

Obrázek 9: Morfologická struktura Sn dendritů Beach Ball [41] 14

Obrázek 10: Motiv BGA – vrstva mědi s obrysem pouzdra (měřítko 3:1) 20

Obrázek 11: Motiv BGA – nepájivá maska s obrysem pouzdra (měřítko 3:1) 20

Obrázek 12: Testovací pouzdro BGA 21

Obrázek 13: Poloautomatický šablonový tisk Uniprint GO3V 21

Obrázek 14: Motiv pro výrobu síta pro tisk vodivé vrstvy (měřítko 1:1) 24

Obrázek 15: Motiv pro výrobu síta pro tisk odporové vrstvy (měřítko 1:1) 24

Obrázek 16: Dělení základního substrátu 96% Al2O3 s TLV motivem topného elementu 25

Obrázek 17: Vyřezávání otvorů v TLV topném elementu 25

Obrázek 18: Přímo vyhřívaná šablona z 96% Al_2O_3 26

Obrázek 19: Osazené kulové pájkové preformy v přímo vyhřívané šabloně z 96% Al_2O_3 26

Obrázek 20: Prasknutá přímo vyhřívaná šablona z 96% Al_2O_3 27

Obrázek 21: AlN šablona připravená na proces osazení a pájení (pohled z vrchu) 28

Obrázek 22: AlN šablona připravená na proces osazení a pájení (pohled z boku)..... 28
Obrázek 23: Šablona využitá pro první experiment s vyznačením umístění elektrod.... 31
Obrázek 24: 3D model funkčního vzorku pájecí stanice 32
Obrázek 25: Popis jednotlivých součástí funkčního vzorku pájecí stanice 33
Obrázek 26: Konečná podoba funkčního vzorku pájecí stanice 34
Obrázek 27: 3D model pájecí stanice 35
Obrázek 28: Prototyp pájecí stanice 36
Obrázek 29: Elektrodový systém prototypu pájecí stanice s vyznačenou polohou šablony (červený obdélník) 36
Obrázek 30: Nákres návrhu šablony a její členění na funkční části 38
Obrázek 31: Vzorek připravený pro měření teploty na pouzdře BGA a v pájkové kuličce při procesu pájení. 39
Obrázek 32: Uspořádání funkčního vzorku pájecí stanice pro měření teploty na pouzdře BGA při procesu pájení. 39
Obrázek 33: Program v LabVIEW pro řízení pájecího profilu a teplotní cyklování šablony z nerezového plechu 40
Obrázek 34: Rozdíly teplot na šabloně, pouzdře BGA a pájkové kuličce při procesu pájení [77] 41
Obrázek 35: Rovnoměrnost rozložení teploty na první verzi šablony..... 42
Obrázek 36: Podélný (horizontální) teplotní profil na první verzi šablony 42
Obrázek 37: Příčný (vertikální) teplotní profil na první verzi šablony..... 43
Obrázek 38: Rovnoměrnost rozložení teploty na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V 44
Obrázek 39: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V..... 44
Obrázek 40: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V 45
Obrázek 41: Rovnoměrnost rozložení teploty na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy 45
Obrázek 42: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy 46
Obrázek 43: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy 46

Obrázek 44: Rozložení teploty na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I – termovizní fotografie 47

Obrázek 45: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I 47

Obrázek 46: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I 48

Obrázek 47: Teplotní simulace ustáleného stavu na šabloně s rozměry (85x30) mm.... 48

Obrázek 48: Rozložení teploty na šabloně (65x30) mm – termovizní fotografie 49

Obrázek 49: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně (65x30) mm..... 49

Obrázek 50: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně (65x30) mm 50

Obrázek 51: Rozložení teploty na šabloně s obdélníkovými otvory – termovizní fotografie 50

Obrázek 52: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně s obdélníkovými otvory 51

Obrázek 53: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně s obdélníkovými otvory 51

Obrázek 54: Pájecí profil v 1. cyklu a 550. cyklu..... 52

Obrázek 55: Průběh el. napětí během 1. cyklu a 550, cyklu..... 53

Obrázek 56: Průběh el. proudu během 1. cyklu a 550. cyklu 53

Obrázek 57: Přímo vyhřívaná šablona před teplotním cyklováním 54

Obrázek 58: Přímo vyhřívaná šablona po 500 cyklech teplotního cyklování 54

Obrázek 59: Pájecí profil měřený na šabloně [77] 55

Obrázek 60: Vzorek s vyznačenými vývody testovanými na sílu ve střihu. 56

Obrázek 61: Kulový pájkový vývod vytvořený proudem přímo vyhřívanou šablonou – vícezrnná vnitřní struktura 58

Obrázek 62: Kulový pájkový vývod vytvořený proudem přímo vyhřívanou šablonou – prokládaná vnitřní struktura..... 58

Obrázek 63: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené proudem přímo vyhřívanou šablonou 58

Obrázek 64: Opravárenská pájecí stanice ERSA IR400..... 60

Obrázek 65: Pájecí stanice Martin Hot Reball 03 určená pro *reballing* pouzder BGA.. 60

Obrázek 66: Pájecí stanice se dvěma infračervenými zářiči – *Power Tower* [82] 63

Obrázek 67: Principiální znázornění polohy infračervených zářičů v průběhu pájení: A) ze spodní strany, (2) z horní strany a (3) z horní i spodní strany současně

[82] 64

Obrázek 68: BGA pouzdro připravené na proces pájení [83] 64

Obrázek 69: Teplotní profily pro pájení přetavením slitiny SAC305 pro všechny tři případy proudění tepla [83] 65

Obrázek 70: Střihové síly 500 μm pájkových kuliček SAC305 pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [83] 67

Obrázek 71: Část pájkové kuličky po provedení střihové zkoušky [83] 67

Obrázek 72: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené horním IR ohřevem – – vzorek a), vzorek b) [83] 68

Obrázek 73: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené oběma IR ohřevy – vzorek a), vzorek b) [83] 69

Obrázek 74: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené spodním IR ohřevem – – vzorek a), vzorek b) [83] 69

Obrázek 75: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené horním IR ohřevem [83] 70

Obrázek 76: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené spodní IR ohřevy [83] 70

Obrázek 77: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené oběma IR ohřevy [83] 70

Obrázek 78: Analyzovaná oblast metodou EDX/SEM (žlutá šipka) [83] 71

Obrázek 79: a) Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu a b) EDX analýza rozhraní mezi pájkou a pájecí ploškou [83] 72

Obrázek 80: Tloušťka intermetalických vrstev pro všechny tři případy polohy infračervených zářičů (horní ohřev, spodní ohřev a oba ohřevy) [82] 73

Obrázek 81: Drsnost intermetalických vrstev pro všechny tři případy polohy infračervených zářičů (horní ohřev, spodní ohřev a oba ohřevy) [82] 74

Obrázek 82: Střihové síly u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [83] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony 77

Obrázek 83: Drsnost intermetalických u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [82] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony 78

Obrázek 84: Drsnost intermetalických vrstev u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [82] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony 79

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Průměrný procentuální objem dutin a procentuální podíl vadných vadných kulových vývodů [25,28] 8

Tabulka 2: Poměr změny vícerznné struktury před a po teplotním cyklování [57] 16

Tabulka 3: Technické parametry pájecí stanice 37

Tabulka 4: Parametry teplotního profilu na šabloně 40

Tabulka 5: Parametry teplotního profilu pro teplotní cyklování šablony 52

Tabulka 6: Nastavené parametry teplotního profilu v prototypu pájecí stanice HSR-01 pro šablonu s tloušťkou 300 μm a její vzdáleností 250 μm od BGA pouzdra. 55

Tabulka 7: Použité parametry destruktivních střihových zkoušek 56

Tabulka 8: Energetická náročnost nové metody a porovnání se dvěma dalšími pájecími stanicemi 60

Tabulka 9: Parametry pájecího profilu pájecí stanice s infračervenými zářiči 66

ÚVOD

Vývoj v oblasti pouzdření a propojování polovodičových integrovaných obvodů jde neustále kupředu a výsledkem je vznik nových technologií a technologických postupů. Charakteristickým rysem je miniaturizace a heterogenní integrace elektronických obvodů a systémů. První pouzdro pro polovodičové čipy bylo do sériové výroby uvedeno na začátku sedmdesátých let minulého století. Jednalo se o keramické pouzdro se 14 vývody na obou stranách, Dual-In-Line Package (DIP14), kde rozteč vývodů byla 2,54 mm. Od té doby došlo v oblasti pouzdření elektronických systémů k výraznému nárůstu nových pouzder, u nichž se nejen snižovala rozteč vývodů, ale vznikaly i nové typy a provedení. Jedním z historických milníků bylo zavedení technologie povrchové montáže (Surface Mount Technology – SMT) v 80. létech minulého století, což s sebou přineslo díky rozvoji pájení přetavením (Reflow Soldering) další možnosti provedení elektronických pouzder. Tak se začaly postupně objevovat nové typy pouzder, jako jsou Quad Flat Package (QFP), Chip Scale Package (CSP), Multi Chip Module (MCM), System on Package (SOP), atd. Velmi populárními a rozšířenými se stala pouzdra s kulovými vývody (Ball Grid Array – BGA), a také tak zvaná bezvývodová pouzdra čtvercového tvaru. Sem patří především Quad Flat No-lead Package (QFN), a pouzdra s kontakty na spodní straně ve tvaru kruhových nebo čtvercových plošek, tzv. Land Grid Array (LGA), které lze v dnešní době považovat nejen za moderní ale i perspektivní [1,2]. U těchto pouzder je třeba řešit s ohledem na rostoucí výkon polovodičových čipů nejen signálové ale také teplotní chování, což úzce souvisí také s technologickými postupy jejich výroby.

Tato dizertační práce je zaměřena na často používaný typ pouzder BGA, přesněji na vytváření jejich vývodů z kulových pájkových preforem. První zmínka o vzniku a vývoji pouzder s kulovými vývody sahá do sedmdesátých let minulého století. Přesněji do let 1964–1965, kdy bylo patentováno pouzdro typu Flip Chip [3]. Pouzdra ball grid array (BGA) oficiálně vznikla až mezi lety 1990–1993 [4]. S nástupem miniaturizace a nižších hodnot přenášených signálů vývody pouzder se tento typ pouzdra stal nezastupitelným z pohledu počtu vývodů na plochu pouzdra se zachováním dostatečného odstupu signál šum. Také přestup tepla z pouzdra do okolí, např. u TFBGA, je lepší, než je tomu například u pouzder TSSOP nebo TQFP [5]. Jak již název BGA pouzdra napovídá, k jejich připojení do elektronické sestavy většinou slouží kulové pájkové vývody. Kulové pájkové vývody se navíc k elektrickému propojení a mechanickému upevnění komponent do obvodu nepoužívají pouze u BGA pouzder, avšak také u celé řady dalších typů, jako jsou CSP, a dnes prudce se vyvíjející WLP (Wafer Level Package). Základním krokem v procesu připojení do obvodu, resp. na desku plošných spojů (DPS), u všech těchto typů často bývá vytvoření kulového vývodu, a to jak při realizaci nových pouzder (*ball-attach process*), tak v procesu oprav (*reballing process*).

Jádro dizertační práce tvoří dva úzce provázané okruhy řešené v kapitolách 4 a 5. První část popisuje vývoj a optimalizaci nové metody pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na pouzdrech BGA. Zde vyvinutá a popsaná metoda využívá základního principu osazovacích šablon pro kulové pájkové preformy, avšak k vyhřívání šablony dochází na základě přímého ohřevu samotnou šablonou. Tato je tedy použita i jako zdroj tepla pro přetavení, což celý proces zjednodušuje.

Druhá část se zabývá výzkumem a charakterizací kulového pájeného spoje vytvořeného pomocí metody využívající pro přetavení infračervené zářiče. Zde byly osazeny kulové pájkové preformy do tavidla a následně přetaveny za přístupu tepla z horní strany, dále ze spodní strany a také z obou stran (horní i spodní). Výsledky z druhé části pak doplňují výsledky z první části a napomáhají k pochopení tvorby kulového pájeného spoje z pohledu prostupu tepla při procesu jeho vytvoření na pouzdrech BGA.

Praktickým výstupem výzkumu je i patent CZ 307441 (viz příloha 2) [6], který vznikl v průběhu řešení této dizertační práce, a užitný vzor PUV 2019-36422 (viz příloha 3) [7].

1 SOUČASNÝ STAV A VYMEZENÍ OBLASTI DIZERTAČNÍ PRÁCE

V této kapitole je shrnut současný stav poznání v oblasti vytváření kulových vývodů na pouzdrech typu BGA. Přesněji jsou zde popsány metody vytvoření, resp. obnovení těchto vývodů, vliv gradientu teploty při procesu jejich pájení na formování kulového pájkového vývodu, krystalografická orientace vnitřní struktury β-Sn dendritů a tvorba intermetalické vrstvy s návazností na mechanickou pevnost ve střihu.

1.1 Metody vytvoření kulového pájkového vývodu na pouzdrech typu BGA

Pro vytvoření kulových pájkových vývodů u BGA pouzder se používá několik metod. Jejich rozdělení záleží na zvoleném hlavním návrhovém parametru. Tímto parametrem může být například forma vstupního materiálu pro vytvoření vývodů, způsob nanášení, resp. sesazení tohoto materiálu nebo jeho konečné tvarování (výroba preforem).

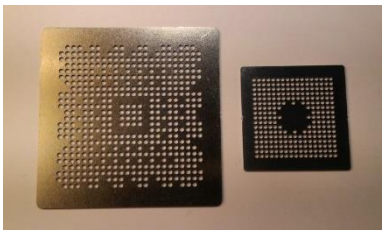
S ohledem na formu vstupního materiálu a zaměřením se na měkké pájecí slitiny je lze rozdělit na metody využívající kulové preformy (pájkové nebo s pevným jádrem), pájecí pasty, terče pro vakuové depozice, roztoky pro bezproudé nanášení a elektrody pro elektro-depozici [8].

Vzhledem k zaměření této práce je dále popsán současný stav metod, které jsou z pohledu formy vstupního materiálu totožné, tzn. využívají kulových pájkových preforem pro vytvoření kulových vývodů na pouzdře typu BGA. Zároveň byly vybrány technologie využívající kovové šablony pro osazení kulových pájkových preforem, jelikož z nich vychází inovativní metoda jejíž vývoj a charakterizace jsou v této práci popsány. Důvodem zahrnutí i laserového pájení byla podobnost některých procesních výhod s novou technologií vytvoření, resp. obnovení kulových pájkových vývodů oproti stávajícím metodám.

1.1.1 Ohřívatelná a neohřívatelná šablona

První a nejlevnější metodou pro vytváření kulových pájkových vývodů na BGA pouzdrech je využití sesazovacích šablon pro pájkové preformy. Základním materiálem je většinou plech z nerezové oceli, popř. jiného kovového materiálu. Šablony jsou vytvořeny v různých tloušťkách plechu a rozměrech v závislosti na průměru použitých kulových pájkových preforem. Rozložení otvorů v šabloně je stejné, jako je tomu u pájecích plošek osazovaného BGA pouzdra, s tím rozdílem, že je šířka otvorů větší. Důvodem je zajištění průchodu preforem až na pájecí plošky pouzdra.

Dva příklady provedení šablon pro sesazení pájkových kulových preforem jsou na obrázku 1. Jedná se o nerezové šablony určené pro různé typy topologií rozložení pájecích plošek u BGA pouzder.



Obrázek 1: Šablony pro obnovení kulových pájkových vývodů

Tyto šablony se rozlišují na dva základní typy, a to ohřívatelné (*Direct Heat Stencil)* a neohřívatelné (*Non-Direct Heat Stencil*). Vizuálně se odlišovat nemusí. Hlavním rozdílem mezi nimi je použitý materiál, kdy u ohřívatelných jsou to materiály pro pájku nesmáčitelné a odolné pájecím teplotám a u neohřívatelných šablon to mohou být i materiály pájecí slitinou smáčitelné a neodolávající pájecím teplotám. Neohřívatelné šablony nelze použít v pájecím procesu, protože jsou někdy pevně fixovány ve speciálním držáku a dochází k jejich průhybu během přetavení vlivem změny jejich rozměrů (teplotní délkové roztažnost).

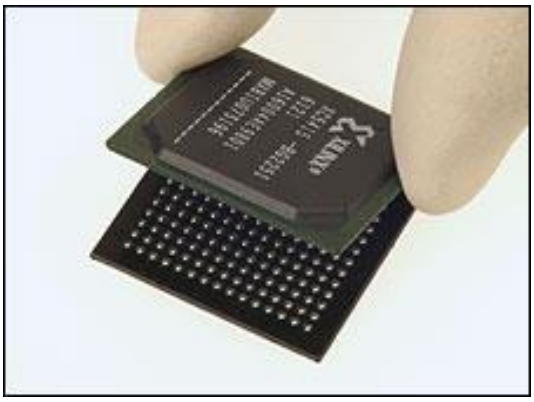
Proces vytvoření pájkových kulových vývodů metodou využívající ohřívatelné a neohřívatelné šablony je následující:

1. Návrh a vytvoření šablony na základě topologie pájecích plošek na BGA pouzdře (zahrnuje i volbu základního materiálu, dle ohřívatelné nebo neohřívatelné šablony).
2. Nanesení tavidla nebo pájecí pasty na pájecí plošky BGA pouzdra většinou pomocí šablony nebo dispenzního tisku. Tavidlo je možné nanést i na celou plochu pouzdra tak, aby jím byly pokryty všechny pájecí plošky.
3. Umístění šablony na pouzdro nebo do speciálního držáku, který pomáhá šablonu udržovat v požadované pozici.
4. Nanesení kulových pájkových preforem na šablonu tak, aby byl zaplněn každý otvor v šabloně právě jednou kulovou pájkovou preformou.
5. Proces přetavení zdrojem tepla (horká deska, horký vzduch, infračervené záření nebo pájení v parách):
    a. Šablona je během procesu na pouzdře BGA – ohřívatelná šablona.
    b. Šablona se před procesem přetavení z pouzdra odstraní – neohřívatelná šablona.
6. U ohřívatelné šablony následuje její odstranění z pouzdra a následuje čištění od tavidlových zbytků.

Výhoda této metody je její cena a po výrobě šablony i použití standardních zařízení pro nanesení tavidla nebo pájecí pasty a pájení. Nevýhod je hned několik. Každá šablona musí být většinou vyrobena pro každý typ (topologii) BGA pouzdra zvlášť. Při procesu pájení někdy dochází k ulpívání pájkových kulových preforem v otvorech šablony, čímž nedojde k jejich zapájení. Životnost ohřívatelné šablony je výrobci garantována v řádu desítek použití (více než 100 cyklů). Jedná se tedy metodu jednoduchou a finančně méně náročnou, což je ale vykoupeno menší spolehlivostí procesu.

1.1.2 Samolepící šablony

Další a o něco dražší metodou je šablona vytvořena z plastového nebo papírového materiálu ve tvaru a přibližné velikosti osazovaného pouzdra. Na jedné straně jsou šablony opatřeny samolepící vrstvou, aby je bylo možné jednoduše a rychle připevnit k pouzdru BGA. Otvory pro osazení kulových pájkových preforem jsou vytvořeny dle provedení a rozložení pájecích plošek stejně, jako tomu bylo u dvou předešlých popisovaných metod. Hlavní výhodou tohoto provedení je umístění kulových pájkových preforem uvnitř otvorů pro osazení již od výroby, tzn. jedná se o kompaktní systém. Příkladem tohoto typu šablon jsou EZReball™ (viz obrázek 2) a SolderQuik® (viz obrázek 3) [9,10].



Obrázek 2: Šablona s kulovými pájkovými preformami EZReball [9]

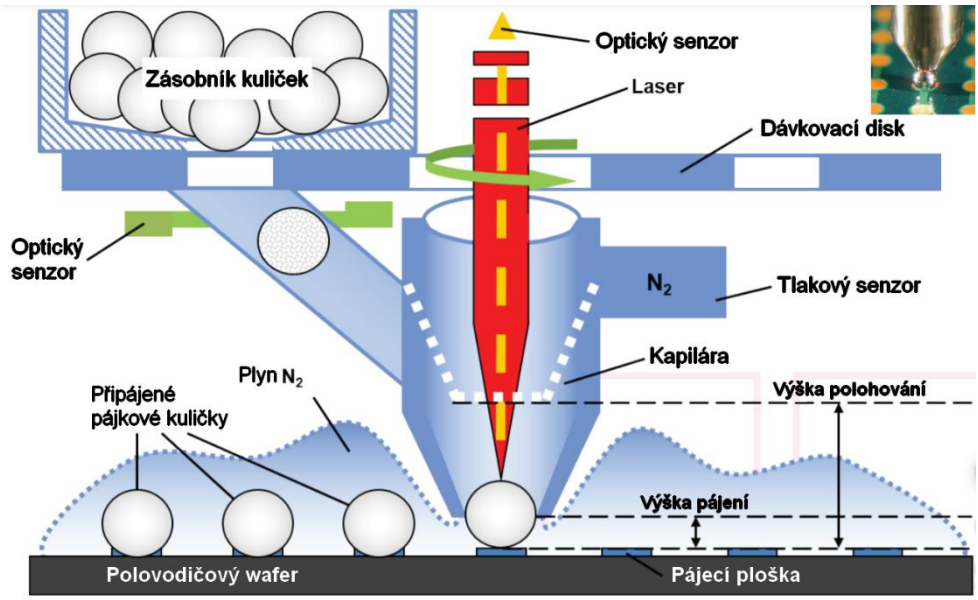
Obrázek 3: Šablona s kulovými pájkovými preformami SolderQuik® [10]

Hlavní výhodou využití samolepících šablon je ušetření procesního kroku sesazení individuálních kulových pájkových preforem. Papírové šablony mají však i svoji nevýhodu, což je ulpívání jejich utržených částí na pouzdře, tzn. zdlouhavější proces čištění. Řešením je použití šablony ze základního materiálu polyimid. Díky lepší mechanické pevnosti, elasticitě a vyšší teplotní odolnosti je proces osazení kulových pájkových preforem časově méně náročnější v kroku čištění po pájení přetavením. Nevýhodou je nutnost použití nové šablony pro každý typ BGA pouzdra a vyšší finanční náklady, než u předešlých šablon (ohřívatelná a neohřívatelná).

1.1.3 Laserové pájení

Historicky bylo laserové pájení patentováno v roce 1986 paní Suzanne Jenniches. Laserové pájení je proces využívající fokusovaného laserového svazku o vlnových délkách nejčastěji od 810 nm do 980 nm. Konkrétněji se jedná o techniku, kdy přesně zaměřený laserový paprsek zajišťuje řízený přenos tepelné energie do pájecí slitiny vedoucí k rychlému vytvoření elektrického spoje. Proces používá řízený laserový paprsek k přenosu tepelné energie na pájené místo. Tato energie je absorbována pájkou, kterou zahřívá, dokud nedosáhne teploty tání a následného vytvoření pájeného spoje [11].

Zařízení uzpůsobená pro laserové pájení vypadají podobně jako jiná laserová zařízení. Avšak jejich odlišností je především osazovací hlava, ve které je uchycena tryska, resp. kapilára přes níž prochází laserový svazek koncentrovaný na jednu pájkovou kuličku (viz obrázek 4). Součástí může být také tryska pro přívod ochranné atmosféry [12].



Obrázek 4: Princip pájení laserem a schematické uspořádá osazovací hlavy [12]

Základní výhody u laserového pájení jsou následující [13-23]:

- Bezkontaktní přenos tepla – odstranění možnosti mechanického poškození, např. pájecím hrotem.
- Menší tepelná zátěž pro pájené komponenty a DPS – výhodné pro velmi citlivé komponenty na teplo.
- Přesnější nastavení množství dodané tepelné energie – vliv na tvar a tloušťku intermetalické vrstvy na rozhraní pájka-pájecí ploška.
- Přesnější zaostření dodání tepelné energie – zaostření laserového svazku na velmi malou plochu, např. možnost snadnějšího pájení DPS s hustou zástavbou.

- Velmi rychlá tvorba spoje – jemná krystalická struktura díky velmi rychlému chlazení a snížení tvorby intermetalických sloučenin.
- Z pohledu průmyslové využitelnosti se jedná o technologii velmi flexibilní a jednodušeji přizpůsobitelnou s malými nároky na údržbu.

Výše popsané výhody předurčují tuto technologii pro použití u montáží s nároky na velmi vysokou jakost a spolehlivost.

Nevýhody laserového pájení z pohledu fyzikálních vlastností spočívají především v tom, že má každý pájený spoj tepelnou kapacitu a odrazivost laserového paprsku v dané vlnové délce, a proto je vyžadován přesně definovaný laserový impulz. Ohnutý nebo deformovaný pájený vývod, popř. jiné množství pájecí pasty mohou vést k nedostatečně vytvořenému pájenému spoji (studený spoj, neúplné přetavení, nedostatečné smočení atd.) [24].

1.2 Vliv gradientu teploty na vnitřní strukturu kulového pájkového spoje

Pájený spoj u elektronických komponent zajišťuje především mechanickou pevnost a elektrickou vodivost. Dalšími sledovanými parametry mohou být například elektrické parazitní vlivy, generace termoelektrického napětí vztažená na pájené povrchy, korozivzdornost vzhledem k použitým tavidlům a chemickým sloučeninám ad. Tyto vlastnosti lze ovlivnit vhodnou volbou základních materiálů společně kompatibilních. Během životního cyklu pájeného spoje dochází k různým typům namáhání, jako je termomechanické namáhání, vibrace, ohyb a působení síly ve střihu a v tahu. Všechny tyto vlivy působí na omezení jeho životnosti. Pájený spoj je heterogenní struktura a je jej tedy nutné uvažovat jako celek v návaznosti na požadované vlastnosti, jakost a spolehlivost. V těchto oblastech existuje mnoho proměnných, které vstupují do procesu. Velké množství těchto proměnných již bylo v procesu pájení prozkoumáno, ale u jiných nebyl jejich vliv zkoumán vůbec, nebo jen v omezené míře. Jedním z těchto vlivů zkoumaných jen v omezené míře se z části zabývá i tato práce. Jedná se tvorbu vnitřní struktury kulového pájkové vývodu, resp. spoje v návaznosti na směr působení tepla při procesu pájení.

Působení tepla při procesu pájení má vliv na tvorbu pájeného spoje a mění jeho strukturu v návaznosti na sledovanou část. Touto částí mohou být například jednotlivé intermetalické sloučeniny, dutiny v pájeném spoji a tvar, velikost, množství, rozložení a směr jednotlivých krystalů. První výzkum publikovaný v článku [25] se zabýval vlivem změny směru toku tepla během fáze chlazení v procesu pájení přetavení u pouzdra typu flip-chip. Bylo zjištěno, že dochází k ovlivňování objemu a počtu dutin v pájkové kuličce s vysokým obsahem olova (90Pb / 8Sn / 2Ag). Přesněji tento jev nastal při změně směru

toku tepla a směru chlazení v procesu přetavení. Celkem byly zkoumány čtyři případy [25]:

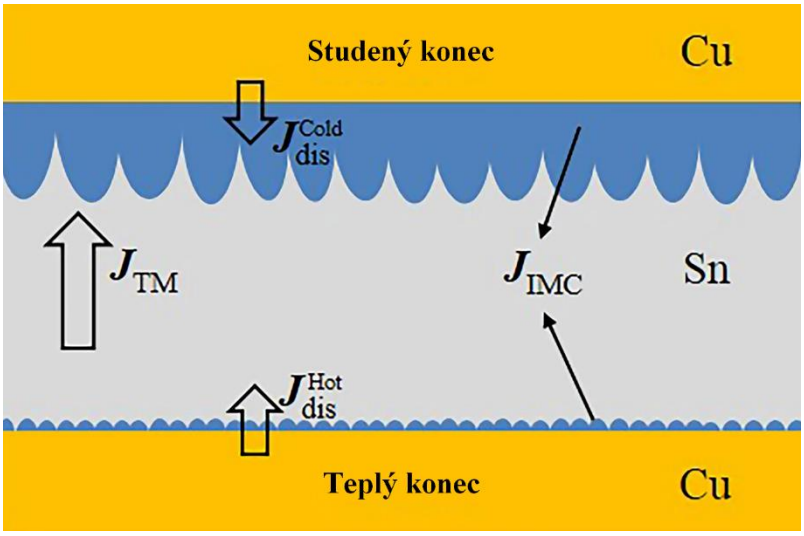
- Tok tepla z horní strany (strana pouzdra flip-chip) a chlazení ze spodní strany (strana DPS).
- Tok tepla z horní strany a chlazení také z horní strany.
- Tok tepla ze spodní strany a chlazení také ze spodní strany.
- Tok tepla ze spodní strany a chlazení z horní strany.

Výsledným zjištěním bylo, že docházelo ke snížení objemu dutin při použití horního ohřevu a chlazení ze spodní strany, kdy bylo 28 % defektních kulových pájkových vývodů s objemem 1,5 % (viz tabulka 1). Nejhorší případ se projevil při ohřevu z horní strany a chlazení ze spodní strany (80 % vadných nárazů, 4 % objemu dutin). V případě změny směru tuhnutí, resp. směru tavení zdola nahoru se zvýšilo procento vadných kulových pájkových vývodů ze 40 % na 51 %, což doprovázel nárůst objemu dutin ze 3,0 % na 3,7 %. Kromě celkového objemu dutin byla také zjišťována jejich poloha od středu kuličky (vnitřní region), přes prostřední region až po vnější region při rozdělení v horizontálním směru. Tyto výsledky byly podpořeny termokapilární teorií, a tedy, že vlivem Marangoniho proudění v roztavené pájce dochází během procesu přetavení ke změně pozice dutin [26,27].

Tabulka 1: Průměrný procentuální objem dutin a procentuální podíl vadných vadných kulových vývodů [25,28]

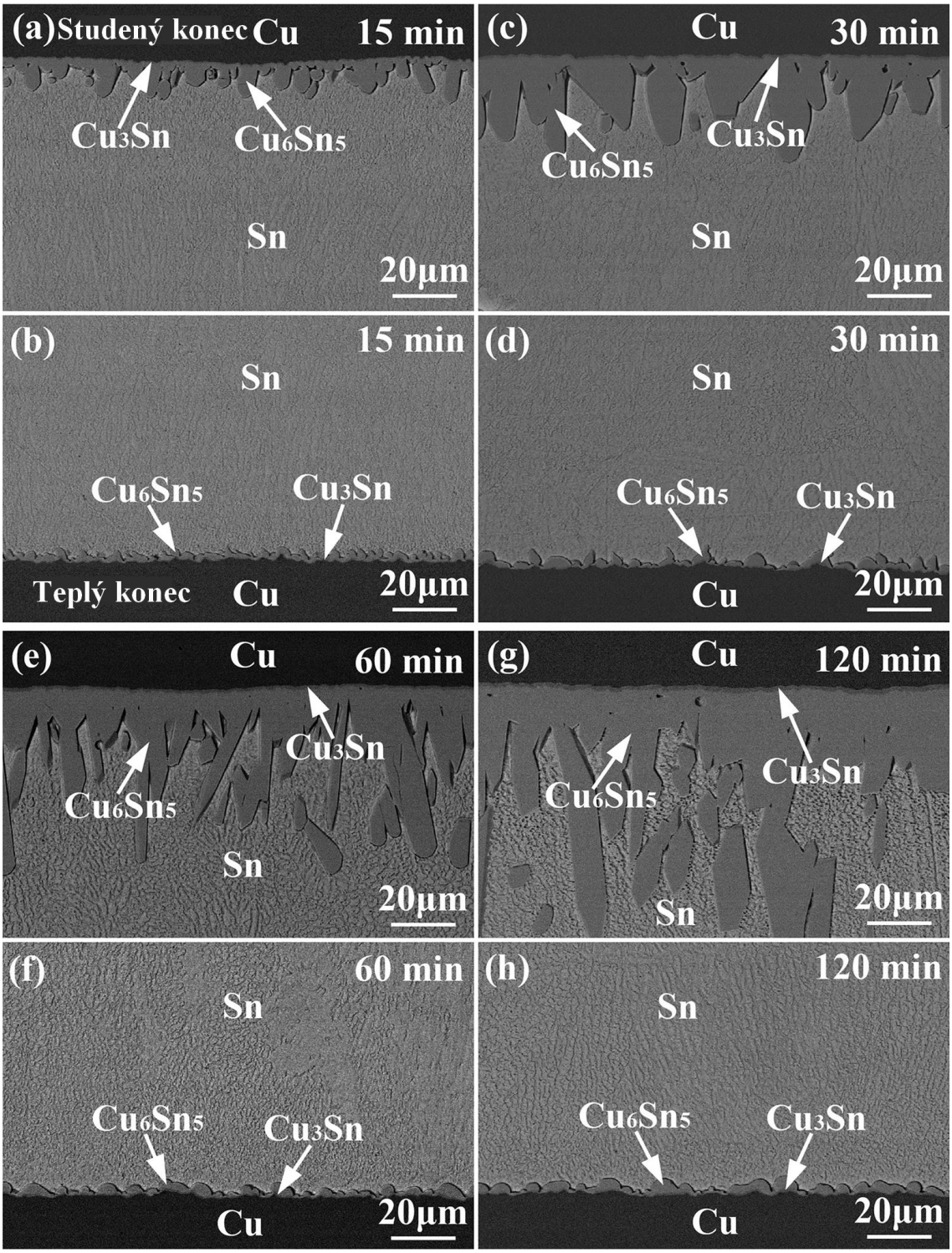
Teplotní profil		Vnitřní region	Prostřední region	Vnější region	Celkem	Počet vadných vývodů	Celkový počet vývodů
Ohřev zespodu	Chlazení zespodu	1,71 %	0,81 %	0,50 %	3,02 %	95 (39,58 %)	240
	Chlazení z vrchu	1,30 %	1,07 %	1,35 %	3,72 %	122 (50,83 %)	240
Ohřev z vrchu	Chlazení zespodu	0,31 %	1,23 %	2,51 %	4,04 %	193 (80,41 %)	240
	Chlazení z vrchu	0,92 %	0,38 %	0,24 %	1,54 %	68 (28,33 %)	240

Další výzkum se zabýval rychlostí růstu intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 na rozhraní tekuté a tuhé fáze při teplotním gradientu v pájeném spoji. Pájení probíhalo na horké desce s maximálními teplotami 250 °C a 280 °C a dobami na těchto teplotách 15, 30, 60 a 120 minut, kdy byla sledována tloušťka intermetalické vrstvy na rozhraní pájka (materiál Sn) a pájecí ploška (materiál Cu) ve složení Cu/Sn/Cu. Během fáze přetavení, přesněji ve fázi, kdy byla pájka tekutá, docházelo k hromadné termomigraci atomů mědi z horkého konce. Tím docházelo k vytvoření intermetalické vrstvy Cu_6Sn_5 s větší tloušťkou na studeném konci, a naopak k výraznému potlačení růstu vrstvy Cu_3Sn. Schematické znázornění atomových toků ve spoji Cu/Sn/Cu vlivem termomigrace je vyobrazeno na obrázku 5. Rozpouštění měděné pájecí plošky na studeném konci (J^{Cold}_{dis}) bylo v prvotním experimentu uvažováno společně s tokem atomů mědi (J_{IMC}). Po následném prodloužení doby na maximální teplotě při procesu pájení bylo zanedbáno rozpouštění mědi J^{Cold}_{dis}, které mělo napomáhat pro vytvoření intermetalické vrstvy o větší tloušťce. Neuplatnění se tohoto jevu, tedy rozpouštění mědi na studeném konci, bylo ověřeno díky kontrole metodou *in-situ*. Toto zjištění podpořilo uplatnění rozpuštěné mědi z teplého konce (J^{Hot}_{dis}) při tvorbě intermetalické vrstvy na studeném konci, což znázorňuje termomigrační tok J_{TM} [29].



Obrázek 5: Schematické znázornění atomových toků na rozhraní Cu/Sn/Cu [29]

Intermetalické vrstvy a jejich vývoj na rozhraní pájka (Sn) a pájecí ploška (Cu) při maximální teplotě pájení 250 °C po dobu 15, 30, 60 a 120 minut jsou ukázány na obrázku 6. Lze vidět výrazný rozdíl v tloušťkách intermetalických vrstev (Cu_6Sn_5 i Cu_3Sn) mezi studeným (a, c, e a g) a teplým koncem (b, d, f a h), kdy se při zvýšení doby setrvání na maximální teplotě pájení tento rozdíl zvětšuje (a,b – 15 min; c,d - 30 min; e,f – 60 min; g,h – 120 min) [29].



Obrázek 6: Mikrostrukturální vývoj pájených spojů Cu / Sn / Cu po přeformátování při 250 ° C pro různé doby trvání: (a, c, e a g) studený konec a (b, d, f a h) teplý konec [29]

Výsledným zjištěním v publikaci [29] bylo, že je možné řídit růst intermetalické vrstvy Cu_6Sn_5 na rozhraní pájka (Sn) a pájecí ploška (Cu) pomocí reakce, resp. termomigrace.

Vnitřní strukturu kulového pájkového vývodu je také možné měnit směrovostí chlazení, resp. pozicemi teplého a studeného konce pájeného spoje, o čemž pojednává práce [30]. Tento výzkum byl proveden na pájecí slitině SAC359, která byla roztavena a následně postupně ochlazována ve vertikální peci Bridgmanova typu pro směrové tuhnutí. Bridgmanovou metodou, spadající principiálně do zonální tavby, je možné vytvářet struktury s požadovaným směrem tuhnutí, a tím pádem i s požadovanou krystalografickou orientací. Experiment probíhal v několika fázích, kdy byla v první fázi vytvořena slitina SAC359 (čistota prvků byla u Sn 99,9%, Ag 99,9% a Cu 99,99%), která se po ztuhnutí následně vložila do pece pro zonální tavbu Bridgmanova typu. V peci byly postupně vytvořeny vzorky s různým gradientem teploty v podélném směru během zonální tavby. Teplotní gradienty byly v rozmezí 2,48-6,34 K/mm s konstantní rychlostí růstu (v = 7,20 μm/s). Konstantní rychlost růstu byla zajištěna krokovým motorem, který posouval vzorek směrem dolů. Po nárůstu 10-12 cm byl celý vzorek šokově ochlazen ve vodním rezervoáru (0°C), který se nacházel pod zónou vytápění, resp. zonální tavby. U takto vytvořených vzorků byly provedeny metalografické výbrusy s následným mokrým chemickým leptáním pro zviditelnění mikrostruktury. Výsledné fotografie mikrostruktury jsou ukázány na obrázku 7. Jsou zde viditelné změny v uspořádanosti mikrostruktury ve směru teplotního gradientu v podélném ((a), (c), (e)) i v příčném ((b), (d), (f)) řezu, kdy docházelo k výraznějšímu vlivu na orientaci krystalů po jeho zvýšení. Přesněji byly použity hodnoty teplotních gradientů 2,48 K/mm ((a), (b)), 4,25K/mm ((c), (d)) a 6,34 K/mm ((e), (f)). Výslednými zjištěními v této práci byly:

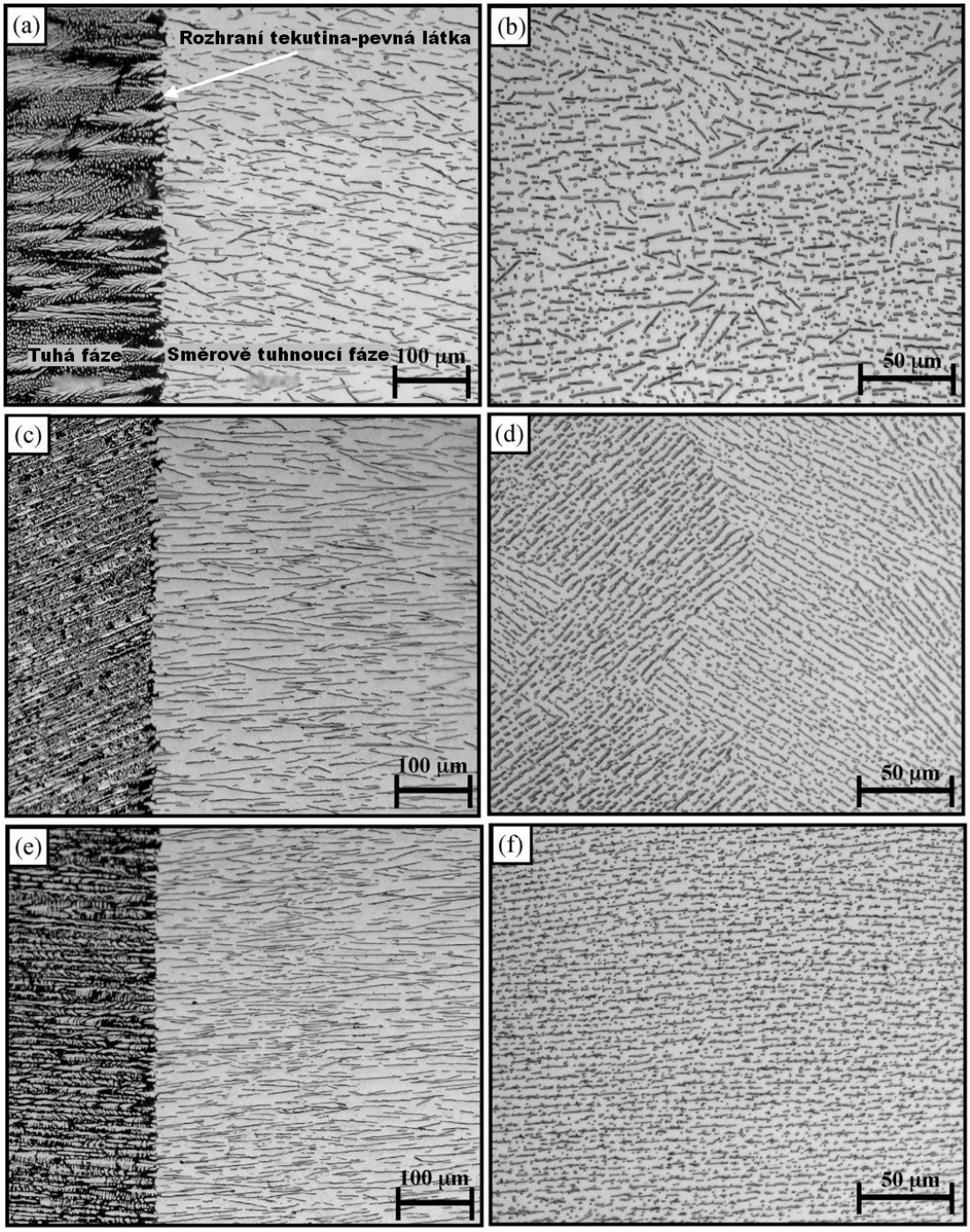
- Pájecí slitina podrobená rozdílným teplotním gradientům s kontaktní rychlostí růstu vykazovala jedno vláknovou a dvou lamelární strukturu.
- Vzdálenost mezi jednotlivými eutektickými sloučeninami ve tvaru tyčí nebo desek byla velmi závislá na velikosti teplotního gradientu.
- Vzdálenost mezi jednotlivými intermetalickými sloučeninami ve tvaru tyčí nebo desek klesala se stoupajícím teplotním gradientem a konstantní rychlostí růstu u použité eutektické slitiny Sn–3.5 hm.%Ag–0.9 hm.%Cu (SAC359). Tato vzdálenost λ měla vzhledem k teplotnímu gradientu G lineární charakter při zobrazení v logaritmickém měřítku. Experimentálně byl tedy odvozen vztah z regresní rovnice přímky:

  $$\lambda = k \cdot G^{-n}, \quad (1)$$

  kde k je konstanta a n je hodnota exponentu teplotního gradientu.
- Hodnota mikrotvrdosti u směrově tuhnuté SAC359 rostla se zvyšujícím se gradientem teploty a zároveň se snižující se hodnotou vzdálenosti mezi jednotlivými intermetalickými krystaly.

K podobným závěrům z pohledu využití teplotního gradientu pro vytváření

jednozrnných krystalů dospěli i autoři v publikacích [31], [32] a [33], kdy byla zonální tavba prováděna u pájecích slitin BiPb, SnCd a AlCuNi.



Obrázek 7: Typické optické snímky morfologie růstu pájecí slitiny SAC395 se směrovým tuhnutím při rozdílném teplotním gradientu (G = 2,48-6,34 K/mm) s konstantní rychlostí růstu (v = 7,20 µm/s): (a) podélný řez, (b) příčný řez (2,48 K/mm), (c) podélný řez, (d) příčný řez (4,25 K/mm), (e) podélný řez, (f) příčný řez (6,34 K/mm) [30]

Navzdory mnoha jiným proměnným, doposud nebyl sledován vliv směru toku tepla při pájení přetavením a sledování struktury pájeného spoje společně s parametry intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška. Jak je známo, tekutá pájka ztuhne v nerovnovážném stavu, což má za následek výrazný vliv na výsledný pájený spoj. Mechanismus tuhnutí roztavené pájky, kromě jiného velmi závisí na koncentračním a teplotním gradientu [30, 34-37]. To je důvod, proč je dále v této práci studována vnitřní struktura kulového pájkového vývodu, resp. spoje se zaměřením na tvorbu zrn, tloušťku a drsnost intermetalické vrstvy.

1.3 Krystalografická orientace kulového pájkového vývodu

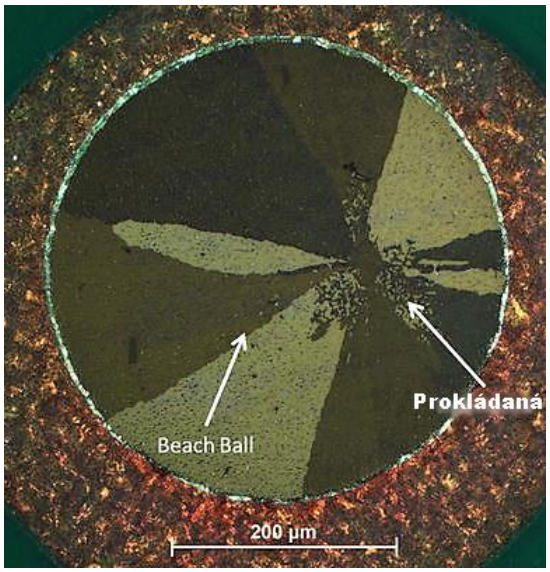
Vnitřní struktura pájeného kulového spoje má výrazný vliv na jeho jakost a spolehlivost. Velikost krystalů jednotlivých sloučenin a prvků předurčuje nejen dobu života kulového pájeného spoje, ale také jeho mechanickou pevnost. Proto je nutné přistupovat k problematice vytvoření kulového pájeného spoje důkladněji z pohledu všech parametrů nastavených v procesu pájení, jelikož tyto ovlivňují základní strukturu. Nastavení teplotního profilu je tedy klíčovou součástí formování výsledného rozmístění, velikosti a tvaru jednotlivých krystalů. Velikost je možné řídit nastavením doby nad teplotou tavení, maximální teplotou pájecího profilu, ale především rychlostí chlazení. Tato kapitola se bude dále zabývat nejnovějšími poznatky z oblasti vlivu krystalografické orientace na mechanické vlastnosti pájeného spoje a možnosti řízení formování krystalů.

Orientace krystalů v jednotlivých částech kulového pájkového vývodu rozhoduje především o jeho mechanické pevnosti a následné spolehlivosti v průběhu jeho životního cyklu. Základní rozdělení krystalografických orientací z makroskopického pohledu po provedení metalografických výbrusů je vidět na obrázku 8. Jedná se o jednozrnnou, vícezrnnou, částečně prokládanou a prokládanou morfologickou strukturu z makroskopického pohledu na krystalografickou orientaci cínových dendritů [38]. Částečně prokládanou morfologickou strukturou se pak rozumí zastoupení prokládané struktury menší něž 50 % a zároveň větší než 10 % v celém objemu vývodů, resp. spoje [39].

Obrázek 8: Příklad čtyř typů morfologického uspořádání zrn cínu v kulovém pájkovém spoji [38]

Nejvhodnějším makroskopickým morfologickým uspořádáním krystalů u slitin SAC je prokládaná a vícezrnná struktura, o čemž je dále pojednáváno v této části kapitoly.

U vícezrnné struktury se přesněji jedná o tzv. *Beach Ball* (přesněji *Kara's Beach Ball*, dle objevitele – Karas Mather) uspořádání cínových dendritů. Rozdíl mezi vícezrnnou strukturou a *Beach Ball* strukturou je v tom, že se u *Beach Ball* struktury jedná o uspořádanější morfologické rozložení Sn dendritů s indikací začátku nukleace poblíž středu kulového pájkového vývodu, čímž připomíná texturu plážového míče (viz obrázek 9) [40,41].



Obrázek 9: Morfologická struktura Sn dendritů Beach Ball [41]

Z pohledu porovnání odolnosti jednotlivých morfologií se zaměřením na základní zátěžové testy lze tyto struktury seřadit následovně. Prokládaná struktura měla sice relativně větší odolnost vůči termomechanickému namáhání, než tomu bylo u Beach Ball struktury, ale z pohledu mechanické pevnosti je na tom lépe právě toto pravidelnější vícezrnné morfologické uspořádání [42,43]. Nejhorší mechanické vlastnosti a odolnost vůči termomechanickému namáhání měla jednozrnná struktura v porovnání s vícezrnnou [44].

Jednozrnná struktura kulového pájeného spoje má i své výhody, dle zvoleného způsobu zátěže, resp. degradace, jako jsou elektromigrace, termomigrace nebo mechanické zatěžování. Hlavní příčinou závislosti krystalografické orientace β-Sn na typu poruchy je jeho čtverečná (tetragonální) krystalová mřížka. Díky tomu vykazuje β-Sn anizotropní vlastnosti. Jednozrnné morfologické uspořádání β-Sn dendritů s krystalografickou orientací v ose c ([001]), která je paralelní ke směru toku elektronů a teplotnímu gradientu, má nejhorší výsledky v odolnosti proti poškození termomigrací nebo elektromigrací v pevné fázi [45-53]. Avšak při působení síly ve střihu v úhlu ~20-60° je tato konkrétní krystalografická orientace s paralelním uspořádáním k pájecí plošce odolnější, než ostatní krystalografické orientace β-Sn dendritů (orientace a [100] a b [010]) [54].

Krystalografickou orientaci cínových dendritů vyskytující se v kulových pájených vývodech slitin SAC lze při dodržený určitých podmínek předvídat, ale také řídit. Jak již bylo zmíněno v předešlých odstavcích, každé morfologické uspořádání krystalů, resp. spojích má své výhody i nevýhody. Dle použití je tedy možné předcházet nebo upřednostňovat vytváření jednozrnného, vícezrnného, částečně prokládaného nebo prokládaného morfologického uspořádání. V předešlé kapitole 1.2 byla zmíněna metoda zonální tavby, kdy je možné vytvářet jednozrnné morfologické uspořádání krystalů cínu s využitím teplotního gradientu. Další možností řízení procesu vytváření jednozrnných struktur β-Sn dendritů v celém kulovém pájkovém spoji je využití vytvořených nukleačních center s požadovanou krystalografickou orientací a jejich implantace na pájecí plošku před procesem pájení. Tato možnost byla popsána v práci [55]. Metoda implantace nukleačních center není vhodná pouze pro vytváření jednozrnných struktur, ale také pro volbu konkrétní krystalografické orientace, jelikož každá krystalografická orientace má své výhody a nevýhody, podle typu působící zátěže na pájený spoj, jak bylo popsáno výše.

Publikace [56] popisuje podobné výsledky, jako byly zjištěny v [55]. Zde byla opět morfologická struktura u 500 µm pájkových kuliček z materiálu SAC305 ovlivněna vloženými nukleačními centry. Tato centra tvořily prvky Zn, Ti, Co, Ir, Pd, a Pt umisťované na povrch pájecí plošky v rozdílném množství v porovnání v materiálem pájky, čímž se měnila velikost krystalů a jejich množství (vícezrnná struktura). Také bylo ověřeno, jak již bylo zmíněno, že je možné dosáhnout i jednozrnné struktury.

Změna morfologie krystalografické struktury nastává i při stárnutí kulových pájkových spojů. Příkladem je práce [57], kde je popsán vliv izotermického stárnutí na poměr v zastoupení mezi jednozrnnou a vícezrnnou strukturou u vývodů pouzder BGA. V testu byly použity pájkové kuličky ze slitiny SAC105 a dalších dvou slitin SAC105 s příměsemi D1 a D2, které byly následně připájeny mezi BGA pouzdro a DPS a podrobeny stárnutí při teplotě 125 °C po dobu 250 hodin. Výsledkem teplotního stárnutí bylo procentuální zvýšení vícezrnné struktury (viz tabulka 2). Slitina SAC105 vykazovala 26,6 % vývodů s vícezrnnou strukturou před teplotním stárnutím a 34,4 % po teplotním stárnutí. Výsledným zjištěním tedy bylo, že se morfologie krystalografické struktury mění i během stárnutí kulového pájkového spoje. Další dvě práce toto zjištění doplňují o informaci, že se nejedná pouze o vliv teplotního stárnutí, ale také teplotního cyklování a procesu přetavení [58,59].

Tabulka 2: Poměr změny vícerznné struktury před a po teplotním cyklování [57]

Pájecí slitina	Před teplotním stárnutím	Po teplotním stárnutí
SAC105	26,60 %	34,40 %
SACD1	17,20 %	20,30 %
SACD2	25,00 %	40,60 %

1.4 Intermetalické vrstvy a mechanická pevnost ve střihu u kulových pájkových vývodů a spojů

Zaměření této kapitoly je na měření parametrů intermetalických vrstev na rozhraní pájka a pájecí ploška, jako je tloušťka a drsnost. Společně s dosavadním stavem této problematiky souvisí i mechanická pevnost, jelikož je ovlivněna jak intermetalickými vrstvami na rozhraní pájka a pájecí ploška, tak i uspořádáním a velikostí jednotlivých částí heterogenní struktury kulového pájkového vývodu, resp. spoje.

Intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška výrazně ovlivňují jakost a spolehlivost pájeného spoje z pohledu jeho mechanické pevnosti, ale také z pohledu elektrických vlastností. Základními intermetalickými sloučeninami vznikajícími při procesu pájení jsou Cu_6Sn_5 pro měděné pájecí plošky, $(Cu, Ni)_6Sn_5$ pro pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG a tenká vrstva sloučeniny Cu_3Sn [60]. Kovové prvky účastnící se vytváření intermetalických vrstev na rozhraní pájka a pájecí ploška jsou určeny materiály použité pájecí slitiny a pájecí plošky.

Výzkumem intermetalických vrstev je možné sledovat různé dílčí parametry v návaznosti na vlastnosti pájeného spoje. Těmito parametry jsou například tloušťka,

drsnost, tvar a mechanická pevnost. Jejich vliv na kvalitu a spolehlivost závisí na materiálech vstupujících do procesu pájení, podmínkách při procesu přetavení a také na vlivech okolních i vnitřních podmínkách v jejich životním cyklu.

Tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy v procesu vytvoření, resp. obnovení, kulového pájeného spoje musí být zajištěna co nejmenší, jelikož tloušťky vrstev z ternárních intermetalických sloučenin $(Cu, Ni)_6Sn_5$ a $(Ni, Cu)_3Sn$ se zvyšují s každým dalším procesem přetavení [61,62]. Samozřejmě musí být zároveň zajištěno vytvoření intermetalické vrstvy, aby byla zajištěna i dostatečná pevnost vývodu kvůli manipulaci před osazením pouzdra na DPS. První proces přetavení působící na pájený spoj je již během procesu upevňování, resp. pájení vývodů na BGA pouzdro, a druhý proces přetavení nastává při pájení BGA pouzdra na DPS. Nesprávně nastaveným pájecím profilem při procesu přetavení BGA pouzdra osazeného na DPS může být tedy snížena spolehlivost výsledného spoje v důsledku tloušťky intermetalických vrstev.

Hodnota tloušťky intermetalické vrstvy se pohybuje v řádu jednotek μm., jak bude popsáno dále v tomto odstavci. Například v dizertační práci [63] jsou uvedeny výsledky tloušťky intermetalické vrstvy přibližně 1,45 μm u pájkových kuliček SAC305 s průměrem 450 μm na povrchové úpravě ENIG. Pro stejný materiál pájkové kuličky (průměr 450 μm) a povrchovou úpravu autoři v publikaci [64] změřili tloušťku přibližně 1,6 μm po přidání tenké vrstvy palladia na ENIG a přibližně 2,4 μm po přidání tenké vrstvy palladia s fosforem. Vliv teploty při procesu vytvoření vrstvy ENIG (přesněji teplota vytváření Ni) zkoumali autoři v [65]. Výsledné tloušťky IMC pro kuličky SAC305 byly změřeny v hodnotách přibližně 1,4 μm pro 85 °C, 1,7 μm pro 80 °C a 1,9 μm pro 75 °C.

Vzhledem k tomu, že intermetalická vrstva na rozhraní pájka a pájecí ploška, kromě jiného, je jedním ze základních parametrů určujících mechanickou pevnost spoje, tak je třeba uvažovat i její testování. Testovací metody pro určení vlastností pájkových kulových vývodů z pohledu mechanické pevnosti jsou [66]:

- střihové,
- tahové,
- tahové za tepla,
- termomechanické,
- cyklické únavové,
- vibrační
- ohybem, což úzce souvisí i s vibracemi a únavovými testy.

Dále bude popis současného stavu zaměřen na střihové síly pro slitinu SAC305, aby bylo možné porovnat mechanickou pevnost kulových pájkových vývodů z pohledu tohoto parametru.

První publikací, která popisuje odolnost vývodů ve střihu je [67]. Výzkum se zabýval vlivem dusíkové ochranné atmosféry u pájkových kuliček s průměrem 760 µm. Výsledné střihové síly kulových pájkových vývodů se pohybovaly v rozmezí 1029,48-1053,03 gf (10,01-10,33 N). Další částí této práce bylo pájení pomocí par Galden®. Mechanická pevnost ve střihu u těchto vývodů dosahovala hodnoty 990 gf (9,709 N).Testovací rychlost byla použita 300 µm/s, výška nad substrátem 50 µm a přejetí nástroje po ukončení testu 50 µm.

Střihovou sílu u 450 µm pájkových kulových vývodů pájených na povrchovou úpravu ENIG s opakovaným procesem přetavení řešili autoři v publikaci [68]. Pevnost vývodů po prvním přetavení byla přibližně 1,05 N. Při opakování pájecím cyklem nabývaly střihové síly hodnot menších s každým dalším procesem přetavení, tedy pro třetí cyklus přibližně 0,9 N, pro pátý přibližně 0,8 N, pro sedmý přibližně 0,7 N a pro desátý přibližně 0,55 N. Rychlost testování autoři uvedli 1 m/s s výškou nástroje 50 µm.

Další publikace [69] popisuje výsledky z výzkumu střihových sil u pájkových kuliček velikosti 300 µm. Pro testovací rychlostí 0,01 m/s byla zjištěna síla přibližně 290 gf (2,844 N), pro 0,1 m/s přibližně 340 gf (3,334 N) a pro 1 m/s přibližně 355 gf (3,481 N).

Proces vytvoření, resp. obnovení, kulového pájeného spoje tedy ovlivňuje výsledné vlastnosti pájeného spoje BGA pouzdra. Toto je hlavním důvodem, proč je řešený výzkum významným pro zajištění lepší jakosti a pevnosti pájeného spoje u BGA pouzder.

Na základě výše popsaného rozboru současného stavu vědeckého poznání byly stanoveny cíle dizertační práce, které jsou uvedeny v následující kapitole.

2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

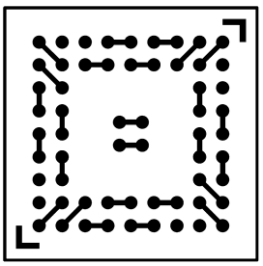
Jak již bylo v úvodu zmíněno, dizertační práce je rozdělena do dvou částí. První část je zaměřena na vývoj a výzkum nové inovativní metody pro osazení a zapájení kulových pájkových vývodů na pouzdro BGA, včetně jejich charakterizace a optimalizace. Druhá část je zaměřena na výzkum vlivu směru proudění tepla při procesu pájení přetavením infračerveným zářením a následným využitím získaných výsledků pro optimalizaci technologického procesu vytváření kulových pájkových vývodů pouzder typu BGA. Dále jsou definovány hlavní cíle, kterých mělo být v této práci dosaženo.

1. Vývoj a optimalizace inovativní metody určené pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na pouzdrech BGA s následnou charakterizací.
    - Vývoj základního principu přímého pájení pájkových kulových vývodů pomocí osazovací šablony (přímo elektrickým proudem vyhřívaná šablona).
    - Definování optimálního materiálu šablony.
    - Experimentální ověření a optimalizace parametrů metody.
    - Porovnání inovativní metody s některými podobnými stávajícími metodami vytvoření kulových pájkových vývodů.
    - Základní charakterizace vytvořených kulových pájkových vývodů z pohledu střihové síly (destruktivní test).
    - Analýza vnitřní struktury vytvořených kulových pájkových vývodů optickou inspekcí a měřením tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy.
2. Výzkum a charakterizace vytvořených kulových pájkových vývodů na BGA pouzdře pomocí infračervených zářičů se třemi různými směry toku tepla (horní ohřev, spodní ohřev a oba ohřevy zároveň) při procesu pájení.
    - Experimentální ověření vlastností destruktivní zkouškou střihové síly.
    - Analýza vnitřní struktury optickou inspekcí a měřením tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy.
3. Ověření využitelnosti metody procesu vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na pouzdrech s pájkovými kulovými vývody na základě srovnání výsledků charakterizace vzorků vytvořených přímo vyhřívanou šablonou s výsledky výzkumu směru ohřevu při procesu pájení přetavení.

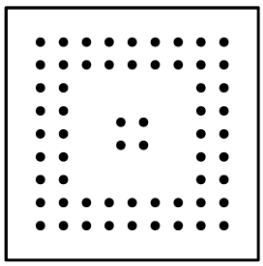
3 NÁVRH A PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro experimentální ověření nové metody pájení kulových pájkových vývodů a výzkum vlivu směru proudu tepla při procesu pájení přetavením infračerveným zářením bylo navrženo pouzdro BGA ze základního materiálu ISOLA – DE104 (FR4) s 18 μm plátované mědi, tzv. *Dummy BGA*. Tento motiv zahrnoval také topologii pro měření vodivého spojení, tzv. *Daisy Chain* (viz obrázek 10), při jakostních nebo spolehlivostních testech. *Daisy Chain* motiv bude využíván v další fázi výzkumu spolehlivosti, který nebyl řešen v rámci této práce.

Příprava vzorků probíhala v několika krocích. Motiv byl navržen s topologií BGA o rozměrech 11 x 11 x 1,5 mm. Pájecí plošky (400 μm) byly navrženy s definovanou nepájivou maskou (Solder Mask Defined – SMD, viz obrázek 11) pro pájkové kuličky s průměrem 500 μm, aby byl omezen vliv odtržení pájecí plošky při destruktivních testech mechanické síly. Rozteč pájecích plošek byla zvolena 1 mm, pro lepší optickou kontrolu kvality zapájení dvou řad vývodů. Při návrhu SMD masky a rozteče pájecích plošek bylo přihlédnuto k normě IPC-SM-782A [70]. Pouzdro BGA bylo vytvořeno s černou nepájivou maskou z důvodu barvy a větší drsnosti povrchu pro zvýšení přestupu tepla při uplatnění ohřevu infračerveným zářením použitým v druhé části této práce jako zdroj tepla při procesu pájení. Finální povrchová úprava byla zvolena ENIG, tedy bezproudé pokovení niklem s následným vytvořením konečné vrstvy imersního zlata. Výsledné testovací pouzdro je ukázáno na obrázku 12.



Obrázek 10: Motiv BGA – vrstva mědi s obrysem pouzdra (měřítko 3:1)

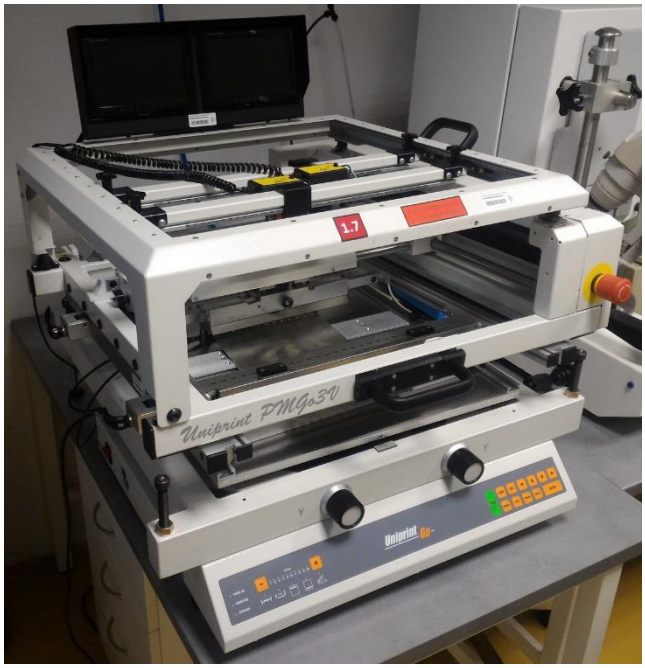


Obrázek 11: Motiv BGA – nepájivá maska s obrysem pouzdra (měřítko 3:1)

Obrázek 12: Testovací pouzdro BGA

Materiál kulových pájkových preforem byl zvolen SAC305 (NeVo, Shenmao Technology Inc.), díky jeho dostupnosti a velkému využití v elektrotechnickém průmyslu v těchto aplikacích. Vzhledem k volbě metody osazení preforem do tavidla, bylo použito bezoplachové tavidlo SMF-08 (NeVo, Shenmao Technology Inc.), které se dodává pro pájení BGA pouzder do obvodu.

Příprava vzorku probíhala tak, že bylo naneseno tavidlo SMF-08 na pájecí plošky BGA pouzdra. K tomuto účelu byla vytvořena šablona z mosazného plechu (Alpaka) tloušťky 125 µm za použití mokrého leptání (firma Hauler s.r.o.). Průměr otvorů pro nanesení tavidla byl 400 µm a jejich rozložení odpovídalo pozicím pájecích plošek na BGA pouzdře. Pro lepší opakovatelnost procesu byla šablona umístěna do tiskového poloautomatu Uniprint GO3V (viz obrázek 13), kterým byl po nastavení parametrů proveden tisk tavidla.



Obrázek 13: Poloautomatický šablonový tisk Uniprint GO3V

Metoda šablonového tisku byla zvolena nejen z důvodu opakovatelnosti procesu, ale především kvůli omezení množství nanášeného materiálu, aby nedocházelo k nadměrnému znečistění proudem přímo vyhřívané šablony. Při nanesení tavidla ve větším objemu (po celé ploše BGA pouzdra) docházelo k ulpívání pájkových kuliček v otvorech šablony a tím pádem nedošlo k jejich smočení s pájecí ploškou a tedy připájení. Problematické bylo také větší znečištění tavidlovými zbytky, především na spodní straně pouzdra.

Konečné osazení a přetavení pájkových kuliček bylo rozdílné v obou hlavních výzkumných částech, které jsou řešeny v této práci. Postup je tedy popsán v kapitolách Příprava testovacích vzorků u každé hlavní části řešené v této práci.

4 VÝVOJ A VÝZKUM INOVATIVNÍ METODY PRO OSAZENÍ A ZAPÁJENÍ KULOVÝCH PÁJKOVÝCH VÝVODŮ

Myšlenka vývoje nového procesu vytvoření, resp. obnovení (*reballing*), kulových pájkových vývodů na pouzdře BGA vznikla na základě potřeby snížení spotřeby elektrické energie a lépe kontrolovaného procesu pájení se snížením procesních kroků (přesun pouzdra do pájecího zařízení). Tato inovativní metoda využívá stávajících metod z pohledu základního návrhu osazovací šablony a také celého procesu osazení kulových pájkových preforem. Jediným rozdílem je přizpůsobení osazovací šablony i pro proces pájení přetavením. Šablona tedy slouží nejen k osazení kuliček, ale také k jejich přetavení a následné zapájení a pájecí plošky BGA pouzdra. Toho bylo docíleno připojením elektrického signálu na šablonu v hodnotách stovky milivoltů až jednotky voltů, což vzhledem k odporu dané šablony způsobí průchod jednotek až desítek ampérů. Při dodání dostatečného výkonu šablona ohřeje kulové pájkové preformy na teplotu potřebnou k přetavení, ale i vyšší, dle potřeby. Návrh této šablony, stanovení procesu pájení a charakterizace výsledných zapájených kulových pájkových vývodů je popsána v následujících kapitolách.

4.1 První vývojová etapa – šablona z korundové keramiky

V první vývojové etapě bylo přistoupeno k využití technologie tlusté vrstvy na keramickém substrátu 96% Al_2O_3 (korundová keramika). Hlavním důvodem volby tohoto materiálu byla jeho vyšší teplotní odolnost a předpoklad delší životnosti v této aplikaci. S použitou tlustou vrstvou vypalovanou při 850 °C by byla přímo vyhřívaná šablona použitelná přibližně do teploty 500 °C.

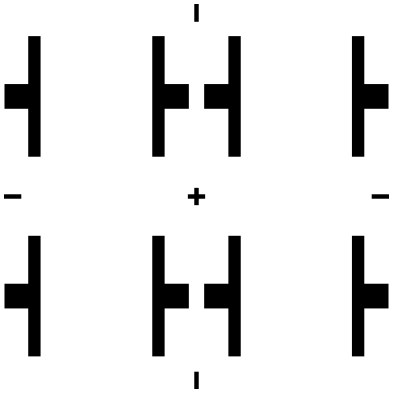
Samotný návrh přímo vyhřívané šablony zahrnoval několik základních dílčích částí, jimiž byly:

1. Návrh topné části – výpočet potřebného elektrického, resp. tepelného, výkonu a stanovení rozměrů topné části.
2. Volba tloušťky použitého nosiče (substrát z korundové keramiky) a rozměrů výsledné přímo vyhřívané šablony.
3. Určení průměru otvorů s šabloně pro osazení kulových pájkových preforem.

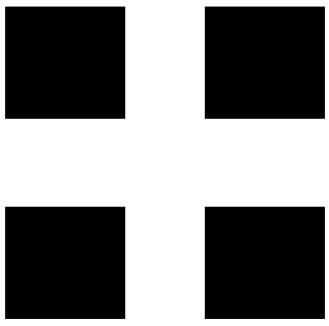
V dalším kroku bylo nutno zvolit materiály odporové a vodivé tlusté vrstvy. Odporová vrstva sloužila pro generaci tepla průchodem elektrického proudu a vodivá vrstva byla použita pro kontakty, přes které byl přiváděn elektrický proud do odporové,

resp. topné, vrstvy. Pro vodivou vrstvu byla vybrána stříbrná pasta ESL 9912-A, jejíž použití je vhodné na výrobu topných těles. U volby materiálu odporové vrstvy bylo třeba uvažovat především požadovaný tepelný výkon topného elementu. Při návrhu bylo také uvažováno přístrojové zařízení, konkrétněji laboratorní spínaný zdroj HCS-3600. Jeho maximální proudové zatížení bylo 60 A při napětí 15 V. Na základě maximálních parametrů tohoto zdroje byla zvolena pasta odporové vrstvy (výrobce Tesla Lanškroun) s funkční složkou oxid rutheničitý (RuO_2) a hodnotou 10 Ω/čtverec.

Rozměry a tloušťka substrátu z korundové keramiky byly voleny dle motivu použitého testovacího pouzdra BGA a velikosti kulových pájkových preforem. Tloušťku substrátu bylo možné volit 0,25 mm, 0,635 mm a 1 mm, díky standardně používaným nosičům pro hybridní integrované obvody. Tloušťka byla volena vzhledem k průměru použitých kulových pájkových preforem, tj. 500 µm. Základním principem návrhu šablony pro osazování kulových pájkových preforem na BGA pouzdro bylo zajistit, aby tloušťka šablony nebyla větší než průměr pájkové kuličky. V případě, že by byla tloušťka naopak příliš malá, mohlo by ve větší míře docházet k uvolňování pájkových kuliček z otvorů pro zajištění pozice při procesu jejich osazení. Nejedná se o psané pravidlo, uvedené v některé z norem, ale pragmatické poznatky z návrhu tohoto typu šablon. Rozložení a počet kruhových otvorů v šabloně určoval motiv pájecích plošek BGA pouzdra. V tomto případě byl počet otvorů 60 s roztečí 1 mm a uspořádáním dle obrázku 11. Průměr kruhových otvorů byl zvolen 600 µm, aby došlo k propadnutí kulových pájkových preforem o použitém průměru (500 µm), ale zároveň nedošlo k přílišnému omezení topné plochy (odporová tlustá vrstva) mezi otvory. Návrh byl vytvořen pro výrobu 4 kusů přímo vyhřívaných šablon, tzn. panel na základním substrátu z korundové keramiky velikosti (50,8 x 50,8) mm. Z rozměrů základního substrátu plyne velikost jedné přímo vyhřívané šablony, což je 25,4 mm. Motivy pro výrobu sít, resp. tisk vodivé a odporové vrstvy, jsou vidět na obrázku 14 (vodivá vrstva) a 15 (odporová vrstva).



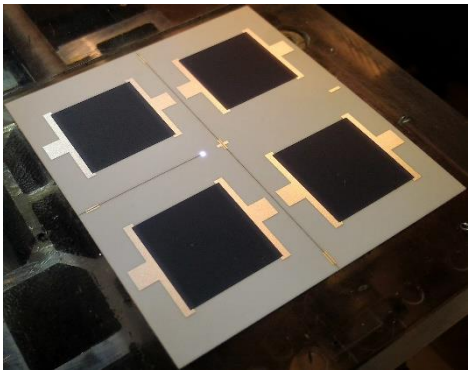
Obrázek 14: Motiv pro výrobu síta pro tisk vodivé vrstvy (měřítko 1:1)



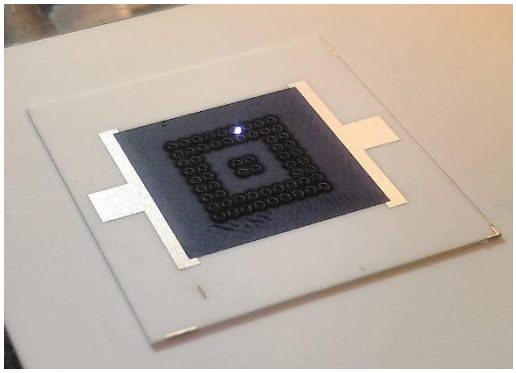
Obrázek 15: Motiv pro výrobu síta pro tisk odporové vrstvy (měřítko 1:1)

Výroba přímo vyhřívané šablony na substrátu z korundové keramiky zahrnovala několik základních operací, které jsou popsány níže i s použitými parametry.

1. Výroba sít pro tisk vodivé a odporové tlusté vrstvy – ovrstvení síta pozitivním fotocitlivým kapilárním filmem Capilex => osvit síta s kapilárním filmem přes filmovou předlohu s pozitivním motivem (čas osvitu = 45 s) => vyvolání motivu na sítě (odplavení neosvícené části kapilárního filmu) => vysušení vyvolaného motivu a síta. Obě síta byla vyrobena stejným způsobem, s tím rozdílem, že byl u každého síta použit odpovídající motiv (pro vodivou vrstvu a pro odporovou vrstvu).
2. Tisk vodivé tlusté vrstvy (použita stříbro-paládiová pasta ESL 9912-A).
3. Sušení natištěné vodivé vrstvy – 125 °C po dobu 10 minut v zařízení Memmert UF 75 PLUS.
4. Tisk odporové tlusté vrstvy (použita odporová pasta RuO_2 Tesla Lanškroun 10 Ω/čtverec).
5. Sušení natištěné odporové vrstvy – 125 °C po dobu 10 minut v zařízení Memmert UF 75 PLUS.
6. Výpal obou vrstev v průtažné peci BTU TFF51 – 850 °C po dobu 10 minut s trváním profilu 60 minut.
7. Dělení vytvořeného panelu čtyř kusů přímo vyhřívaných šablon (viz obrázek 16) a vyřezávání otvorů (viz obrázek 17) pomocí laseru AUREL ALS300. Tento laser využívá pro generování laserového svazku izotropní krystal Yttrium Aluminium Granát (ND:YAG).



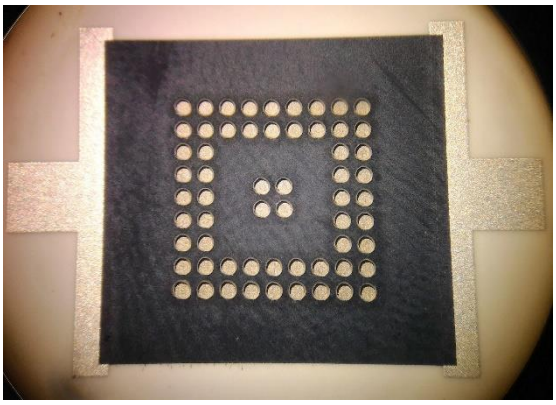
Obrázek 16: Dělení základního substrátu 96% Al2O3 s TLV motivem topného elementu



Obrázek 17: Vyřezávání otvorů v TLV topném elementu

Vytvořený topný element je vidět na obrázku 18. Hodnota elektrického odporu topného elementu byla 21 Ω. Důvodem rozdílu navržené hodnoty (10 Ω) od naměřené

byla změna motivu vyřezáním otvorů pro pájkové kulové vývody. Tato změna však neovlivnila průběh experimentu, jelikož bylo počítáno s rezervou pro použití laboratorního stabilizovaného zdroje (1-15 V, 60 A).



Obrázek 18: Přímo vyhřívaná šablona z 96% Al_2O_3

Po vytvoření přímo vyhřívané šablony bylo přistoupeno na první experimentální ověření možnosti přetavení a připájení kulových pájkových vývodů na testovací pouzdro BGA (viz obrázek 12). Testovací sestava se skládala z laboratorního spínaného zdroje HCS-3600, přívodních kabelů s opravenými elektrodovými svorkami pro lepší kontakt (zbroušené krokosvorky) a samotné přímo vyhřívané šablony. Na obrázku 19 je přímo vyhřívaná šablona položená na testovacím pouzdře BGA s již naneseným tavidlem přes šablonu a sesazenými pájkovými kuličkami. Poloha a počet kulových pájkových preforem byly zvoleny z důvodu prvotního testu, kdy bylo hlavním cílem zjistit, jestli je touto metodou možné pájecí slitinu (SAC305) přetavit.

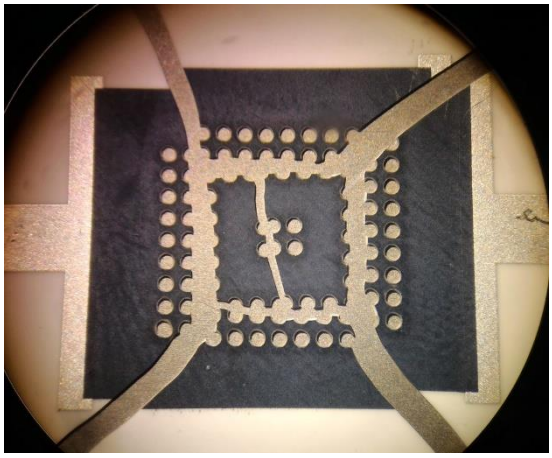
Obrázek 19: Osazené kulové pájkové preformy v přímo vyhřívané šabloně z 96% Al_2O_3

Po připojení elektrodových svorek a postupném zvyšování stejnosměrného napětí, resp. proudu, rychlostí přibližně 0,1 V/s, došlo k přetavení pájecí slitiny při napětí 22,6 V a proudu 0,35 A. Výkon systému přívodní vodiče/elektrody/šablona byl 7,98 W. Takto vysokou hodnotu výkonu způsobily tepelné ztráty na přechodových elektrických

odporech elektrod a také na nedostatečně dimenzovaných přívodních vodičích (průřez 2,5 mm^2). Tepelné ztráty tedy zapříčinily nemožnost zjištění reálného příkonu samotné přímo vyhřívané šablony. Nesprávné dimenzování systému nebylo jediným problémem při provedení prvního testu. Zásadním jevem, díky kterému byla zjištěna nevhodnost použití korundové keramiky, bylo prasknutí přímo vyhřívané šablony. I při volbě pomalého zvyšování elektrického výkonu došlo k náhlému rozpadu šablony na 6 kusů. K tomuto jevu došlo ihned po přetavení jednotlivých kulových pájkových preforem. Je známým faktem, že u korundové keramiky může docházet k praskání při teplotním šokovém zatížení nebo teplotních rozdílech na povrchu v kombinaci s poškozením její struktury.

Korundová keramika s čistotou 96 % nemá velkou šokovou teplotní odolnost v porovnání s například nitridovou nebo zirkonovou keramikou. Maximální hodnota šokové teplotní zatížitelnosti je u tohoto materiálu 200 °C, kdy u různých rozměrových a tvarových provedení může být tato teplota nižší [71,72].

Na obrázku 20 je ukázána šablona prasklá v určitých místech. Směry lomů nasvědčují přímý vliv umístění kulových pájkových preforem (viz obrázek 19) během přetavení. Lze se tedy domnívat, že podíl na prasknutí šablony měly skokové teplotní rozdíly v šabloně společně s porušením struktury korundového substrátu po řezání otvorů laserem. Tyto teplotní rozdíly mohly být způsobené latentním teplem, které se přetavením pájecí slitiny rychle sníží teplota jejího bezprostředního okolí, čímž zapříčiní teplotní šok. Avšak hodnoty spotřebovaného latentního tepla jsou v řádku jednotek stupňů, což nemohlo být samotnou příčinou prasknutí šablony [73].



Obrázek 20: Prasknutá přímo vyhřívaná šablona z 96% Al_2O_3

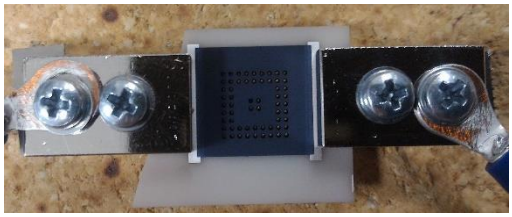
Díky výše popsanému zjištění o praskání 96% Al_2O_3 byl vyvozen závěr, že je nutné najít jiný materiál šablony, jelikož by byla optimalizace procesu pájení časově náročnější (volba jiného typu laseru, přesnější optimalizace pájecího profilu ad.). Výsledkem celé optimalizace by následně nemusela být spolehlivá přímo vyhřívaná šablona, jelikož by mohlo stále docházet k jejímu praskání.

4.2 Druhá vývojová etapa – šablona z nitridové keramiky

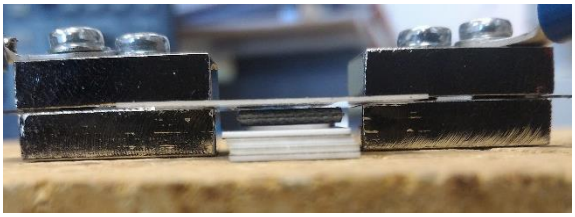
Vzhledem k horším vlastnostem korundové keramiky z pohledu tepelného šoku bylo zvoleno finančně nákladnější řešení, a to použití nitridové keramiky (AlN). Tento keramický materiál vykazuje excelentní výsledky z pohledu tepelných šoků. Předpokladem tedy bylo, že by u by u tohoto materiálů nemělo docházet k praskání při přetavení kulových pájkových vývodů, jako tomu bylo u 96% Al_2O_3 substrátu.

Návrh topné plochy a výkonu byl použit stejný, jako v předešlé kapitole pro korundový substrát. Motiv pro tisk vodivé a odporové vrstvy byl tedy stejný, viz obrázek 14 a 15. Základní AlN substrát byl použit tloušťky 0,38 mm s rozměry (22,5x35) mm. Důvodem změny rozměrů šablony bylo problematické zajištění malého množství kusů substrátů od dodavatelů s požadovanými rozměry, jako byly použity u 96% Al_2O_3 substrátu. Výroba proběhla s totožnými zařízeními, parametry a použitými materiály (TLV pasty ESL 9912-A a Tesla 10 Ω/čtverec), viz kapitola 3.2.

Sestava pro experimentální ověření použitelnosti AlN keramického substrátu v aplikaci přímo vyhřívané šablony byla pozměněna v elektrodové části. Jako elektrody byly použity mosazné kvádry s povrchovou úpravou galvanickým niklem. Jejich rozměr byl přizpůsoben šířce tlustovrstvých stříbrných elektrod. Pohled na sestavu s uchycenou AlN šablonou v elektrodovém systému i s testovacím BGA pouzdrem připraveným na proces osazení je uveden na obrázku 21 (pohled z vrchu) a 22 (pohled z boku). Šablona byla sevřena mezi dva kusy elektrod na každé straně pomocí šroubů.



Obrázek 21: AlN šablona připravená na proces osazení a pájení (pohled z vrchu)



Obrázek 22: AlN šablona připravená na proces osazení a pájení (pohled z boku)

Po přípravě testovacího pouzdra, tedy po tisku tavidla přes mosaznou šablonu, bylo přistoupeno k prvotnímu experimentu. Na laboratorním spínaném zdroji bylo nastaveno napětí 24 V a proud 0,84 A. Výkon dodaný do sestavy přívodní vodiče/elektrody/šablona byl 20,16 W. Hodnota odporu topného tělesa byla vyšší, než tomu bylo v případě Al_2O_3 šablony. Příčinou byla nesnadná optimalizace tisku tlustých vrstev, především odporové, na kusových počtech substrátů. Tloušťka odporové vrstvy byla menší, čímž vzrostl odpor topného elementu a bylo nutno dodat vyšší výkon. Tepelné ztráty ve vodivém materiálu s vyšší, resp. nižší, hodnotou odporu plyne

z Ohmova a Joulova zákona. Při použití rovnice pro generaci tepla Q (2), tedy Joulova zákona, lze na základě nepřímé úměrnosti mezi elektrickým proudem I a elektrickým odporem R dané Ohmovým zákonem říci, že při snížení, resp. zvýšení, elektrického odporu R se zvýší, resp. sníží, elektrický proud I, a to s druhou mocninou, viz rovnice (1).

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \qquad [\mathrm{J}, \mathrm{A}, \Omega, \mathrm{s}] \tag{1}$$

Z toho plyne potřeba dodání většího elektrického výkonu u AlN přímo vyhřívané šablony, tedy 20,16 W, než u šablony z 96% Al2O3 (7,98 W), pro dosažení požadované generace tepla, resp. teploty 320 °C.

Keramický substrát z AlN je díky výše uvedeným výsledkům vhodný pro výrobu přímo vyhřívaných šablon pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na BGA pouzder. Dvě hlavní nevýhody této šablony jsou drahý materiál a také komplikovanější a finančně i časově náročnější výroba. S ohledem na potřebu vytvoření osazovací šablony pro každý typ BGA pouzdra a topologii pájecích plošek je substrát AlN nekonkurenceschopný na dnešním trhu. Nyní používané šablony, které sice nejsou přímo ohřívatelné, alespoň ne před úpravou motivu, svojí cenou, levnější a zavedenou výrobou přímo vyhřívané šablony z AlN několikanásobně předčí. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k ověření možnosti využití standardně používaného materiálu pro výrobu šablon pro proces *reballing*, a to nerezového plechu.

4.3 Třetí vývojová etapa – šablona z nerezové oceli

Třetí vývojová etapa nové metody pro vytvoření nebo obnovení kulových pájkových vývodů na BGA pouzdře se věnovala ověření možnosti použití levnějšího a rozšířenějšího materiálu přímo vyhřívané šablony. Zvoleným materiálem byla chromniklová nerezová ocel s DIN označením 1.4301 (AISI 304, ČSN 17240) a složením X5CrNi18-10. Požadovaným parametrem tohoto materiálu byla nejen jeho dostupnost, ale i vyšší teplotní odolnost. Maximální pracovní teplota tohoto materiálu je 870 °C při přerušovaném a 925 °C při kontinuálním provozu [74]. Pro zachování dlouhodobé životnosti a použitelnosti v této aplikaci je třeba zajistit, aby maximální teplota nedosáhla nad hodnotu 350 °C. Při provozu v teplotním rozsahu 350 °C až 550 °C dochází ke křehnutí vlivem spinodálního rozkladu matrice na dvě fáze prostorově centrované kubické struktury, α a α ' [75]. Tato strukturální změna způsobuje křehnutí materiálu a jejím následkem dochází ke snížení mechanická pevnosti. Také může docházet ke snížení odolnosti proti korozi způsobené vodou při nepřetržitém provozu v rozsahu teplot 425-860 °C [76].

4.3.1 Ověření využitelnosti nerezové šablony

Na úvod této kapitoly je třeba zdůraznit, že všechny metody prvotního ověření využitelnosti nerezové šablony nebyly plně exaktně a opakovatelně provedeny. Avšak výsledky následných experimentů nebyly znehodnoceny, ale naopak poukázaly směr vývoje této nové metody. Motivací pro tuto kapitolu bylo i zachycení důležitých myšlenkových pochodů na začátku vývoje, před provedením exaktnějších experimentů s přesně definovanou metodologií.

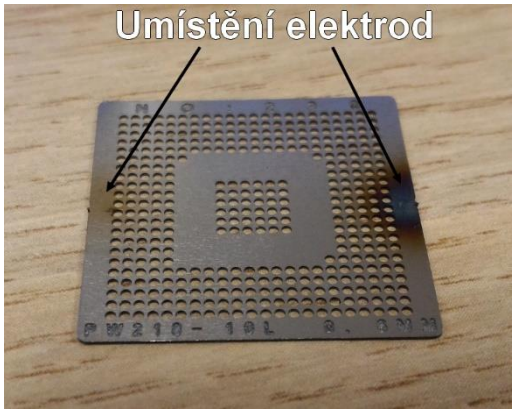
Zjištění možnosti využití nerezového materiálu pro vyhřívanou šablonu bylo provedeno prvotním experimentem ve zjednodušené podobě, jak již bylo popsáno v předešlé kapitole. Ověřovanými hypotézami byly:

- Je možné na šabloně z nerezové oceli dosáhnout pájecí teploty?
- Je možné přetavit kuličku z bezolovnaté pájecí slitiny uvnitř otvoru pro její osazení a sesazení s motivem na BGA pouzdře?
- Dojde k degradaci nebo zničení šablony z nerezové oceli při procesu pájení bezolovnaté pájkové kuličky kondukcí, tzn. na povrchu šablony, nebo nenucenou konvekcí a radiací, tzn. uvnitř otvoru v šabloně?

Výhodou topných těles s malým měrným vnitřním elektrickým odporem je průchod většího proudu po přiložení malého napětí. Tím je zajištěno efektivní využití elektrické energie na tepelné ztráty. Nevýhodou je nutnost použití dostatečně dimenzovaného zdroje elektrického proudu, jelikož se takový materiál chová podobně jako vodič a můžeme jej po přiložení elektrického napětí považovat za zkrat. Proto byl v experimentu zvolen laboratorní stabilizovaný proudový zdroj HC S-3600 s maximálním napětím 15 V a výstupním proudem 60 A. Jako přívodní kabely byly použity vodiče s průřezem 2,5 mm^2 zakončené banánky s krokosvorkami na jednom konci.

Výsledky z prvotního experimentu přinesly následující zjištění:

- Po přiložení malého napětí 0,8 V a procházejícím proudu přibližně 20 A došlo k přetavení pájkové kuličky. Teplota ve středu šablony byla změřena termočlánkem typu K a její hodnota byla 230 °C.
- Po osazení pájkové kuličky do otvoru šablony a přiložení většího napětí 1,8 V byl procházející proud 31 A. Při těchto hodnotách napětí a proudu došlo k přetavení pájkové kuličky uvnitř otvoru šablony, bez jejich vzájemného dotyku, tzn. bez přenosu tepla kondukcí, resp. vedením.
- K degradaci šablony došlo pouze v místech velkého přechodového odporu v místě dotyku elektrod (krokosvorek), tzn. vznik vyšší proudové hustoty, a tudíž vznik větších lokálních tepelných ztát. Povrch šablony v těchto místech výrazně oxidoval (viz obrázek 23).



Obrázek 23: Šablona využitá pro první experiment s vyznačením umístění elektrod

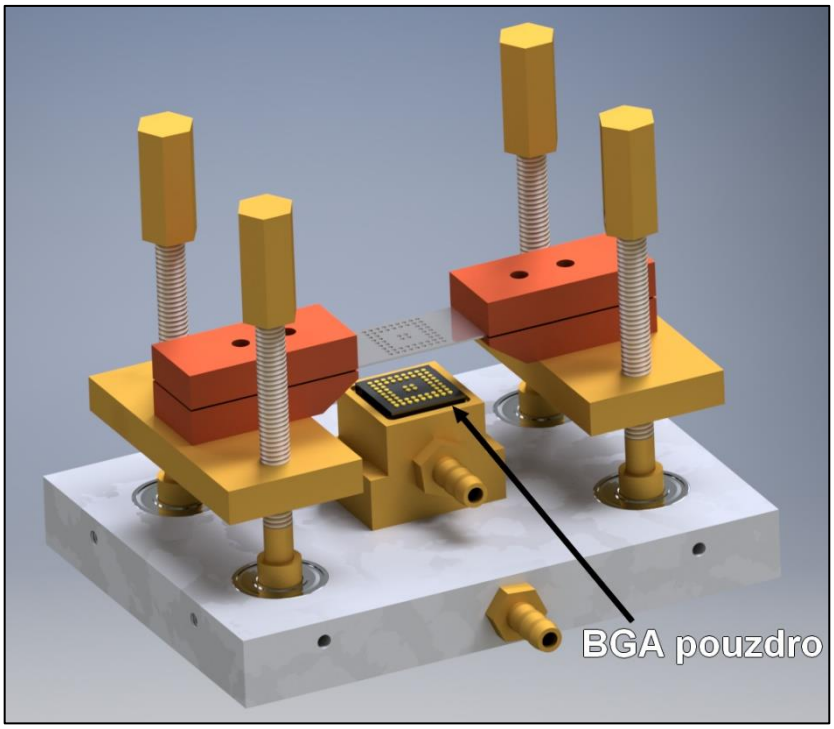
Tato zjištění následně vedla k nutnosti vytvoření návrhu a dimenzování konstrukce funkčního vzorku pájecí stanice pro přímo vyhřívanou šablonu, což je podrobně popsáno v následující kapitole.

4.3.2 Návrh a konstrukce první verze pájecí stanice

Ověřením možnosti využití nerezivé oceli, jako základního materiálu vyhřívané šablony, byla zjištěna nutnost vytvoření funkčního vzorku pájecí stanice. Důvodem se ukázal vliv většího ohřevu v místě umístění napájecích elektrod (vliv přechodového odporu), čímž docházelo k nadměrnému ohřevu šablony a její rychlejší degradaci. Dalšími výhodami vytvoření funkčního vzorku byly především opakovatelnost procesu, lepší nastavitelnost a ovladatelnost a také delší životnost.

Návrh probíhal ve dvou vývojových liniích, které spolu navzájem souvisí. V první řadě byl vytvořen 3D model se všemi vyráběnými díly. Druhou částí byla volba materiálů s ohledem na tepelnou i mechanickou odolnost celého systému.

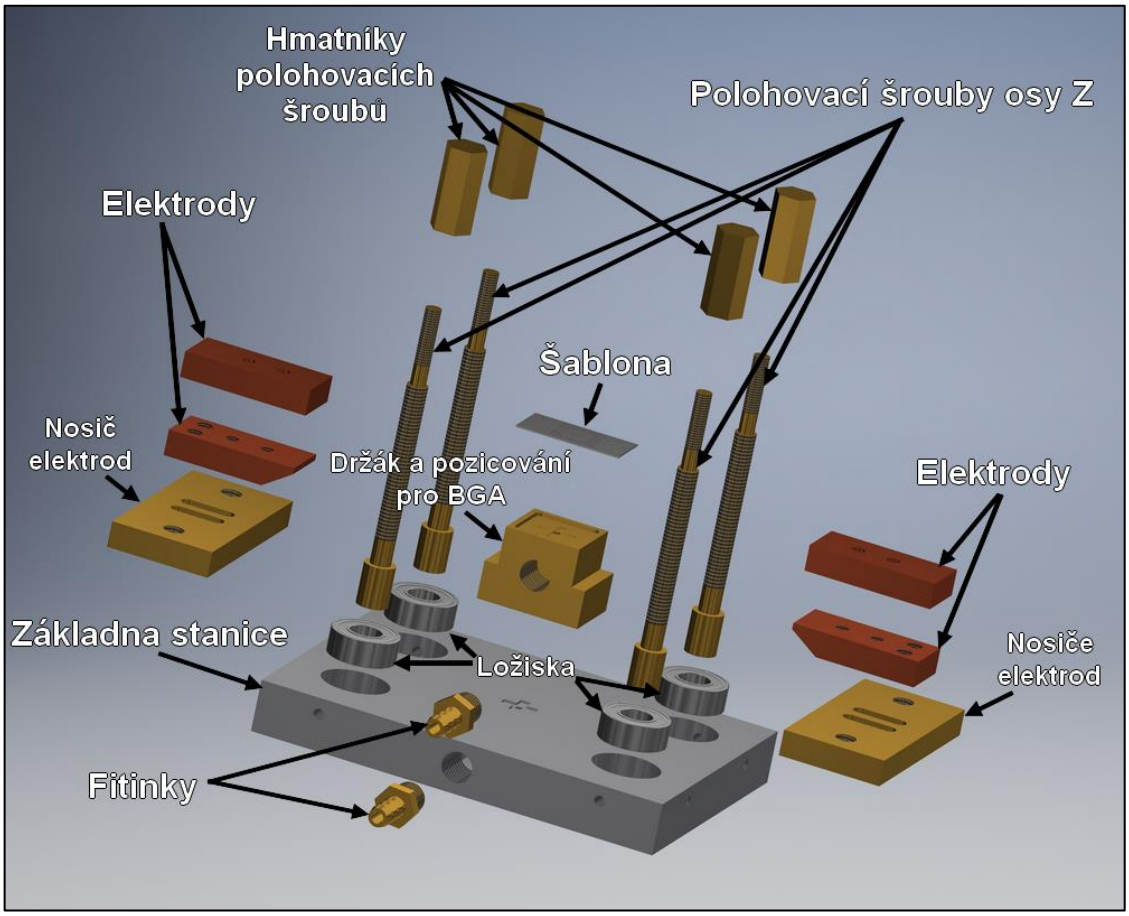
Na obrázku 24 je znázorněn návrh funkčního vzorku ve formě 3D modelu s BGA pouzdrem, bez spojovacích prvků (šrouby, podložky) a bez izolace mezi elektrodovým systémem a zbytkem stanice. Tento model nebyl vytvořen pouze jako vizualizace, ale především ke generování výkresové dokumentace pro výslednou výrobu jednotlivých dílů.



Obrázek 24: 3D model funkčního vzorku pájecí stanice

Obrázek 25 ukazuje rozložený tvar 3D modelu s popisem jednotlivých částí. Základna stanice byla navržena z hliníku s chemickým složením AlMg4,5Mn. Jednalo se o měkký materiál, který je vhodný pro obrábění. Jelikož nebylo nutno zajistit velkou mechanickou pevnost základny a bylo nutno tento díl obrábět frézováním, pak AlMg4,5Mn byl vhodnou volbou. Výhodou tohoto materiálu byla také nižší hmotnost oproti jiným materiálům (ocel, mosaz, ad.). Do základny byla zapuštěna kuličková ložiska 628-62Z pro mechanické uchycení a snadnější otáčení polohovacích šroubů. Pro fixaci ložisek byly použity stavěcí šrouby M2,5. Polohovací šrouby vystupující z ložiskového uchycení slouží k polohování nosičů elektrod, resp. elektrodového systému, v ose Z, tzn. zajišťují nastavení vzdálenosti šablony od BGA pouzdra. Na jejich horních koncích byly navrženy šroubovací šestihranné hmatníky s aretací stavěcími šrouby M2 pro snadnější otáčení bez potřeby nástroje. Otáčení bylo tedy zajištěno prsty operátora. Nastavování byl zajištěn vnějším závitem po téměř celé délce polohovacích šroubů tak, že na ně byl našroubován nosič elektrod s vnitřním závitem na jeho okrajích. Polohovací šrouby byly párové, tzn. jeden nosič elektrod byl polohován dvěma polohovacími šrouby. Nosič elektrod byl obroben se dvěma vnitřními drážkami, které měly funkci uchycení spodní části elektrod pomocí keramických šroubů M3 s možností nastavení polohy v jedné ose, čímž bylo docíleno přesnější uchycení šablony po připevnění horní části elektrod šrouby M3. Využití keramických šroubů bylo z důvodu elektrické izolace živé části funkčního vzorku od zbytku kovových částí. Pro elektrickou izolaci také sloužila polyimidová páska přilepená na nosiči elektrod. Uchycení BGA pouzdra, a zároveň polohování v osách

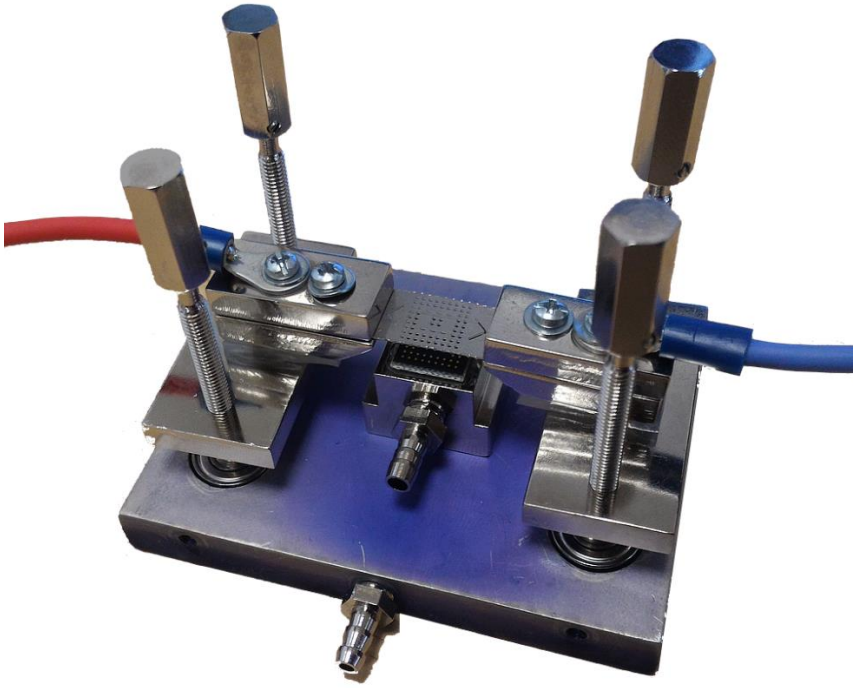
X a Y zajišťoval držák (Držák a pozicování pro BGA), který byl umístěn pod šablonou a zároveň mezi elektrodami. Do tohoto držáku byla umístěna fitinka pro přívod k hrubému vakuu využitému pro fixaci pouzdra v dané poloze. Fitinka pro přívod hrubého vakua byla připevněna i do základny stanice s hlavní funkcí fixace držáku a pozicování pro BGA.



Obrázek 25: Popis jednotlivých součástí funkčního vzorku pájecí stanice

Konečná podoba funkčního vzorku pájecí stanice je vidět na obrázku 26. Od 3D modelu se výsledná podoba lišila pouze dodatečnými upevňovacími prvky, izolací elektrod a přívodními kabely. Elektrody a přívodní kabely byly k sobě připevněny šrouby M3 s podložkami. Tato funkční část byla od nosičů elektrod, resp. zbytku stanice, oddělena silikonovou izolací, kde pro její uchycení a také elektrickou izolaci sloužily šrouby M3 z keramického materiálu oxid zirkoničitý. Jediné prvky, které na obrázku 26 chybí pro správnou funkčnost celé stanice jsou hadičky pro přívod vakua na základnu stanice a na držák pro pozicování BGA pouzdra. Přívodní vodiče elektrického proudu byly použity lanka s průřezem 4 mm^2, dle získaných informací z prvních experimentů. Všechny díly, kromě základny stanice a ložisek, byly opatřeny povrchovou úpravou galvanickým niklem, kvůli lepší mechanické odolnosti dílů, životnosti a jejich vzhledu.

Výsledné rozměry funkčního vzorku pájecí stanice byly (65 × 72 × 80) mm (délka × × šířka × výška). Velikost šablon navržených pro tuto stanici byla (20 x 10) mm.



Obrázek 26: Konečná podoba funkčního vzorku pájecí stanice

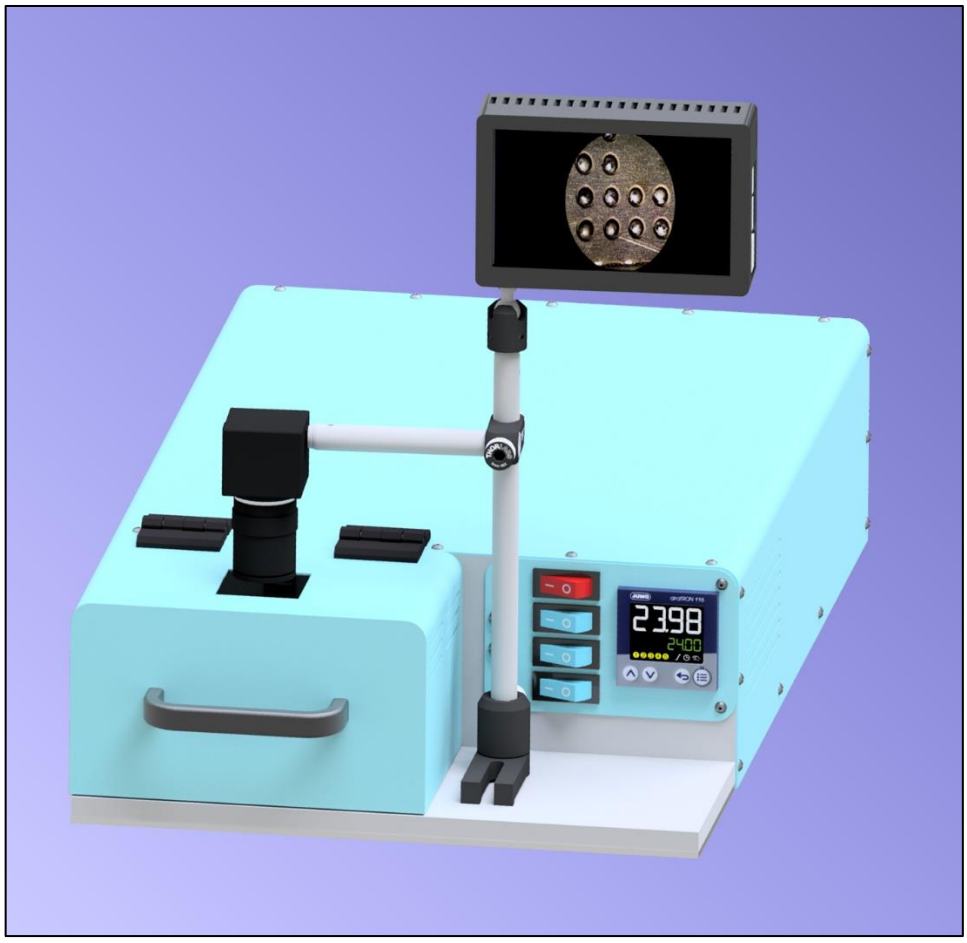
Funkční vzorek pájecí stanice byl dostačující, co se týče požadované opakovatelnosti pro exaktní ověření možností a spolehlivosti inovativní metody využívající nerezových přímo vyhřívaných šablon. Nevýhodou byla pouze složitější manipulace při nastavování parametrů, jako je poloha BGA pouzdra pod šablonou, výška šablony a její rovinnost. V rámci projektu VUT Šance (TAČR GAMA) byla podána přihláška pro získání financí na konstrukci komplexnějšího a uživatelsky přívětivějšího zařízení. Návrh projektu byl přijat a podpořen k realizaci, což je popsáno v následující kapitole.

4.3.3 Komercializace pájecí stanice se šablonou z nerezové oceli

Myšlenka přímo vyhřívané šablony pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na pouzdře BGA byla podpořena projektem VUT Šance (TAČR GAMA – – TG01010054) pod názvem „Přímo vyhřívaná šablona pro obnovení kulových pájkových vývodů u elektronických pouzder BGA. Záměrem projektu byla komercializace duševního vlastnictví, tedy uvedení dané metody do fáze prodeje licence a následné výroby zařízení v elektrotechnickém průmyslu. Výsledkem projektu byl prototyp regulovatelné pájecí stanice s optimalizovaným procesem vytvoření, resp. obnovení, kulových pájených vývodů na pouzdrech typu BGA. Název prototypu je Hot Stencil Reballing System 01 (HSR-01). V rámci projektu byl také přihlášen a uznán užitný vzor na Úřadu průmyslového vlastnictví pod názvem „Šablona

pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA (přihláška číslo PUV 2019-36422, dokument číslo 33222) [7]. Tento užitný vzor chrání podobu proudem přímo vyhřívané šablony s přídavnými otvory pro zajištění rovnoměrného rozložení teploty.

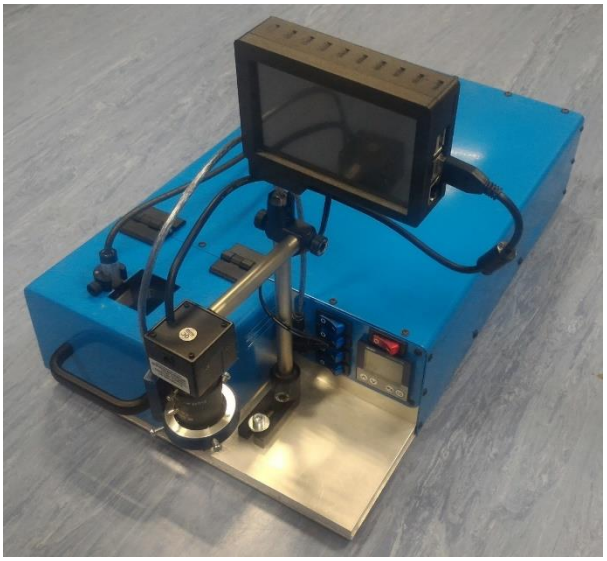
Na projektu pracovalo celkem pět osob. Hlavním řešitelem byl Ing. Michal Řezníček, Ph.D. Členové řešitelského týmu pak byli Ing. Alexandr Otáhal, Ing. Jaroslav Jankovský, Ing. Jakub Somer a Ing. Josef Skácel. Mojí rolí v projektu bylo vedení a kontrola všech prací a realizace některých částí pájecí stanice. Kromě návrhu 3D modelu celého zařízení (viz obrázek 27) jsem se prakticky podílel i na provedení, tedy návrhu a konstrukci, jednotlivých dílů. Vzhledem ke složitosti tématu je nutné brát prototyp jako výsledek práce všech členů řešitelského týmu. Díky tomu zde není popsáno know-how a průběh prací, ale pouze popis základních funkcí a částí zařízení.



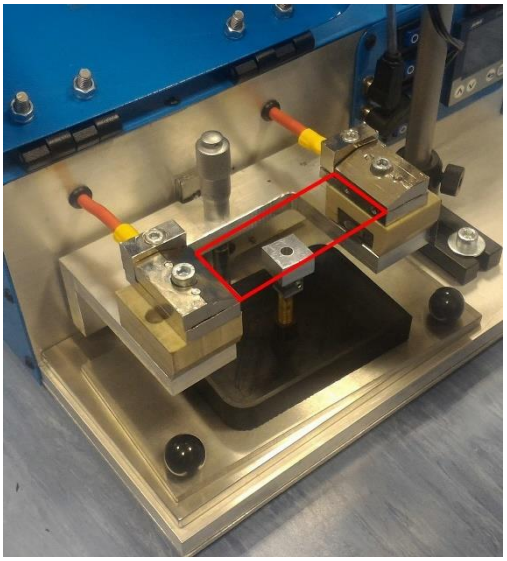
Obrázek 27: 3D model pájecí stanice

Výsledný prototyp pájecí stanice Hot Stencil Reballing System 01 (HSR-01) je ukázán na obrázku 28. Již zmíněný obrázek 26 ukazuje prvotní elektrodový a polohovací systém pro přímo vyhřívanou šablonu. Koncepce uložení a polohování napájecích elektrod byla od funkčního vzorku přepracována, což ukazuje obrázek 29.

Základní část celého systému řízení je napájecí a řídící část a regulační část. Napájecí a řídící část slouží k úpravě a řízení elektrických signálů, jak napájecích, tak měřených (IR senzor teploty). Regulační část tvoří regulátor JUMO diraTRON 116, který reguluje teplotní profil a zaznamenává měřené hodnoty aktuální teploty v čase. Pro měření teploty byla zvolena bezkontaktní metoda, a to pomocí infračerveného senzoru, který zajišťuje měření teploty na přímo vyhřívané šabloně s dostatečnou přesností a opakovatelností. Kromě základních jednotek jsou v elektronické části výkonové prvky spínací, vyhlazovací, měřící a ochranné. Uchycení BGA pouzdra je zajištěno vakuovou vývěvou, tak jako aretace systému pro polohování, resp. sesazování BGA pouzdra. Pro sesazení otvorů v šabloně s pájecími ploškami na osazovaném BGA pouzdře je na zařízení umístěna kamera s 5" displejem, která je propojena se systémem Raspberry Pi. Kamera je také vybavena kruhovým LED osvětlením pro zajištění dostatečného nasvícení. Podrobný popis všech důležitých částí prototypu pájecí stanice HSR-01 je v příloze číslo 1, která obsahuje návod k použití.



Obrázek 28: Prototyp pájecí stanice



Obrázek 29: Elektrodový systém prototypu pájecí stanice s vyznačenou polohou šablony (červený obdélník)

Technické parametry pájecí stanice jsou shrnuty v tabulce 3. Napájecí napětí je 230 $V_{stř}$ s maximálním proudovým odběrem 5 A. Výkon stanice je dostačující pro napájení všech periferií a ohřev různých provedení proudem přímo vyhřívané šablony (230 $V_{stř}$ / max. 5 A). Rozměry prototypu jsou (350 x 305 x 535) mm a váha 12 kg. Z pohledu bezpečnosti je na živých částech, u kterých by jen špatným pracovním postupem mohlo dojít k dotyku, napětí 2,2 $V_{stř}$. Maximální teplota na šabloně nesmí přesáhnout 350 °C z důvodu životnosti. USB konektor, umístěný na zadním panelu zařízení, slouží pro programování regulátoru JUMO diraTRON 116, přesněji nastavování regulačních konstant, linearizace IR senzoru a pájecích profilů.

Tabulka 3: Technické parametry pájecí stanice

Napájecí napětí / maximální odběr proudu	230 $V_{stř}$ / 5 A
Napětí na elektrodách	max. 2,2 $V_{stř}$
Proud elektrodami	max. 90 A (typicky 60 A)
Maximální teplota šablony	350 °C
Periferie	2 MPx USB kamera (ohnisková vzdálenost 2,8 – 12 mm); 5" displej + Raspberry Pi; regulátor JUMO diraTRON 116
Porty	USB na zadním panelu (programování regulátoru)
Rozměry	(350 x 305 x 535) mm
Váha	12 kg

Konečná podoba pájecí stanice je v této době připravena ke komercializaci a prodeji licence.

4.4 Návrh a charakterizace přímo vyhřívané nerezové šablony

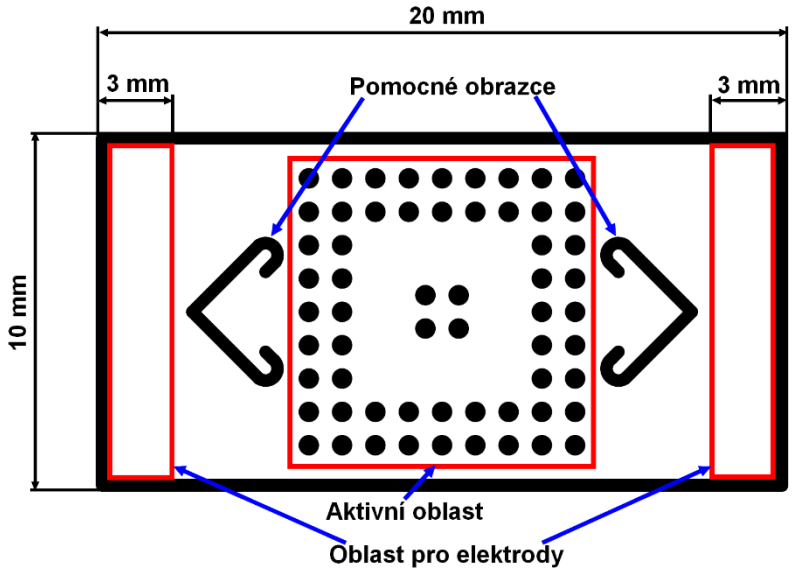
Proces pájení vyžaduje správné nastavení určitých parametrů pro správné a opakovatelné zapájení kulových pájkových vývodů. Jedním parametrem je rovnoměrné rozložení tepla na topném elementu, resp. na ohřívané součásti. Dalším důležitým parametrem je životnost šablon, jelikož jsou v celém procesu nejvíce výkonově i tepelně zatěžovány. V návaznosti na tyto potřeby byly provedeny experimenty a následné optimalizace, díky kterým bylo možné využívat tuto metodu pájení dlouhodobě, spolehlivě a opakovatelně.

4.4.1 Návrh nerezové šablony

Návrh první verze proudem přímo vyhřívané šablony z nerezového plechu byl proveden na základě požadavků a rozměrů funkčního vzorku pájecí stanice. Výsledný rozměr šablony byl zvolen (20x10) mm. Tloušťka šablon byla určena podle průměru použitých pájkových kuliček (ø 500 µm), a tedy 300 µm, jelikož proces pájení probíhá se šablonou umístěnou v určité vzdálenosti nad pouzdrem.

Na obrázku 30 je nákres nárysu topologie nerezové šablony a jeho rozdělení z pohledu funkce jednotlivých částí. Aktivní oblast (červený čtverec uprostřed)

je část šablony určená pro umístění pájkových kuliček do otvorů a pájení přetavením. Oblasti pro elektrody (červené obdélníky – 3x10 mm) slouží pro napájení šablony elektrických proudem, který zajišťuje její ohřev. Poslední část, pomocné obrazce, byla zakomponována do topologie po prvních experimentech, aby byl zajištěn rovnoměrnější ohřev v aktivní oblasti.



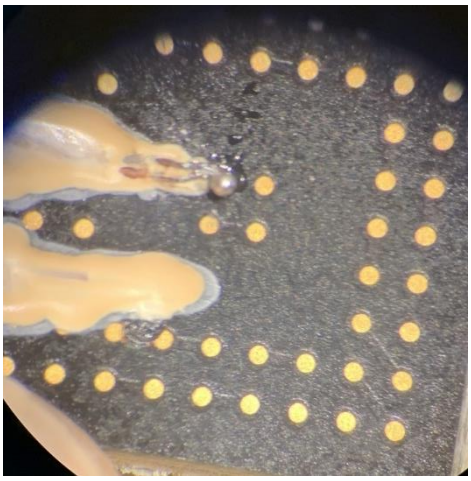
Obrázek 30: Nákres návrhu šablony a její členění na funkční části

4.4.2 Rozdíl teplot mezi šablonou a BGA pouzdrem

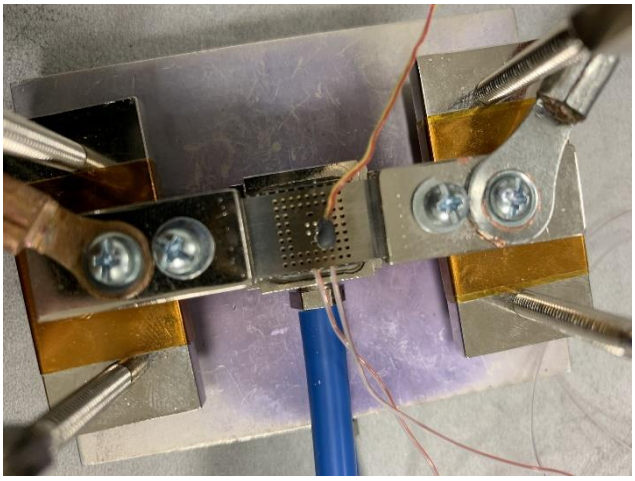
První testy během procesu pájení proudem vyhřívanou nerezovou šablonou probíhaly v přímém kontaktu šablony a BGA pouzdra. Tato varianta se ukázala, jako nevhodná, jelikož docházelo k přehřátí BGA pouzdra a jeho povrchovému poškození (delaminace, degradace vysokou teplotou). Řešením bylo umístění šablony v určité vzdálenosti nad BGA pouzdro. Díky této změně procesu nastaly dva potenciální problémy. Oba dva problémy souvisely s přestupem tepla na pájkové kuličky, a to převážně zářením a přirozenou konvekcí, jelikož ve většině případů neměly pájkové kuličky přímý kontakt se šablonou. Prvním problémem byla maximální teplota šablony, která je 350 °C pro zajištění její dlouhé životnosti. Druhý problém úzce souvisel s prvním, a tedy s ohřevem pájkových kuliček nad teplotu tavení pájecí slitiny. Hlavní neznámou v nově nastaveném procesu byla efektivita přenosu tepelného výkonu na pájkovou kuličku, jelikož se jednalo ve většině případů o přenos tepla zářením a přirozenou konvekcí. Proto byl navržen experiment pro měření teplot na šabloně, pouzdře BGA a pájkové kuličce.

Vzorek BGA pouzdra s přilepeními termočlánky pomocí lepidla s vyšší teplotní odolností (krátkodobá teplotní odolnost až 350 °C) Polytec TC 430 je ukázáno na obrázku 31. Samotné měřením probíhalo na funkčním vzorku pájecí stanice, kde byl na proudem

přímo vyhřívané šabloně také umístěn termočlánek (viz obrázek 32). Uspořádání funkčního vzorku s měřícími termočlánky typu K je na obrázku 32. Vzdálenost šablony od pouzdra byla v průběhu měření 250 µm, aby nedošlo k poškození pouzdra vysokou teplotou, ale zároveň bylo předehříváno při procesu pájení.

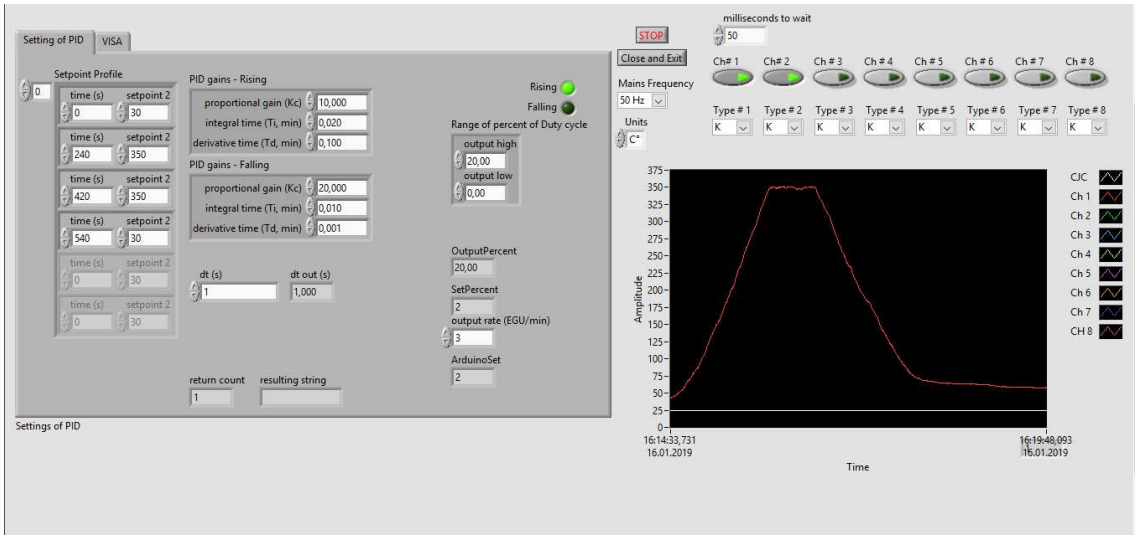


Obrázek 31: Vzorek připravený pro měření teploty na pouzdře BGA a v pájkové kuličce při procesu pájení.



Obrázek 32: Uspořádání funkčního vzorku pájecí stanice pro měření teploty na pouzdře BGA při procesu pájení.

Sběr dat při měření termočlánky typu K zajišťovalo záznamové zařízení Omega TC-08. Řízení teploty probíhalo pomocí programu vytvořeném v prostředí LabVIEW. Vzhled a ovládací prvky programu jsou ukázány na obrázku 33. Levá část okna (záložka *Setting of PID* s tmavě šedým pozadím) sloužila pro nastavení parametrů pájecího profilu, přesněji času a teploty. Také byly v této části použity PID konstanty pro nárůst teploty (*PID gains - Rising*) a pokles teploty, resp. chlazení (*PID gains - Falling*). V pravé části okna programu byly ve vrchní části umístěny tlačítka pro zapnutí konkrétního kanálu se zapojeným termočlánkem a pod každým z těchto tlačítek byla volba typu termočlánku (typ K). Spodní část obsahovala graf reálného průběhu teploty v čase, aby bylo možné sledovat průběh celého testování. Nastavení pájecího profilu bylo umístěno na levé straně okna programu, viz. Setpoint Profile, kde bylo možné vložit čas a teplotu.



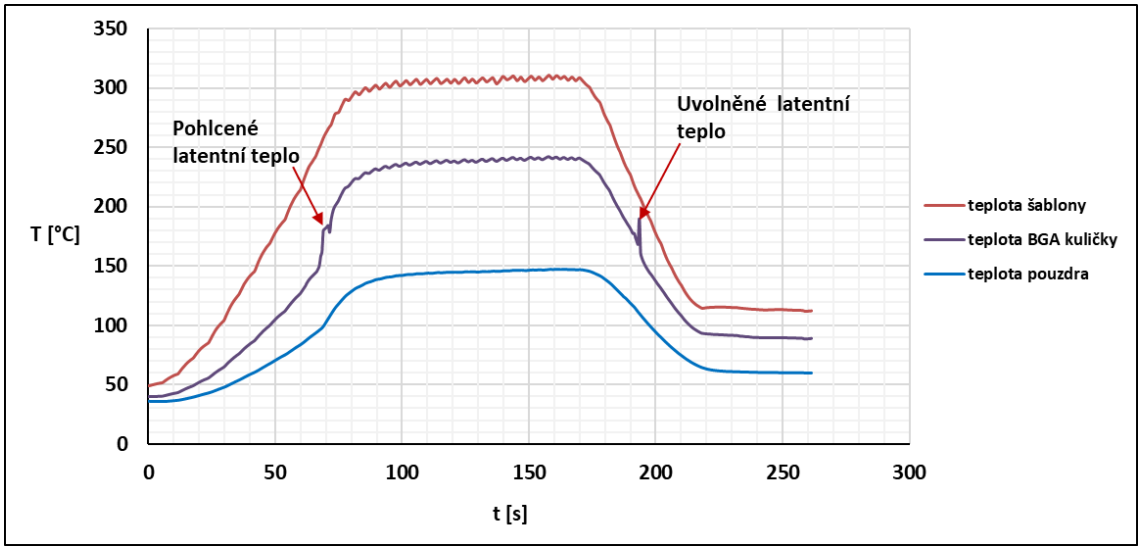
Obrázek 33: Program v LabVIEW pro řízení pájecího profilu a teplotní cyklování šablony z nerezového plechu

Zvolený teplotní profil byl regulován podle termočlánku umístěném na šabloně a byl nastaven s parametry v tabulce 4. Vzdálenost šablony od BGA pouzdra byla 250 µm.

Tabulka 4: Parametry teplotního profilu na šabloně

Parametr	**Hodnota**
Rychlost náběhu teploty	3 °C/s
Maximální teplota	310 °C
Rychlost chlazení	3 °C/s
Čas nad teplotou tavení	90 s

Výsledek měření teploty na šabloně, pouzdře BGA a pájkové kuličce na pájecí plošce uprostřed pouzdra jsou vidět na obrázku 34. Teplota na pouzdře BGA byla přibližně o 150 °C menší, než tomu bylo na šabloně. Toto zjištění ukázalo jednu z hlavních výhod této nové metody vytvoření, resp. obnovení kulových pájkových vývodů na pouzdře BGA. Samotné pouzdro nebylo zatěžováno vysokou teplotou, avšak teplota byla dostatečná pro aktivaci tavidla a předehřátí pájecích plošek. Teplota měřená na pájkové kuličce nebyla přesná z důvodu odvodu tepla do měřícího termočlánku. Nepřesnost lze pozorovat v průběhu teploty na obrázku 34 (teplota BGA kuličky), kde jsou vyznačeny body roztavení a tuhnutí pájkové kuličky, dle skokové změny teploty v návaznosti na pohlcené a uvolněné latentní teplo. Teplota tavení slitiny SAC305 je 220 °C, kdy z měření byla zjištěna hodnota přibližně 180 °C.



Obrázek 34: Rozdíly teplot na šabloně, pouzdře BGA a pájkové kuličce při procesu pájení [77]

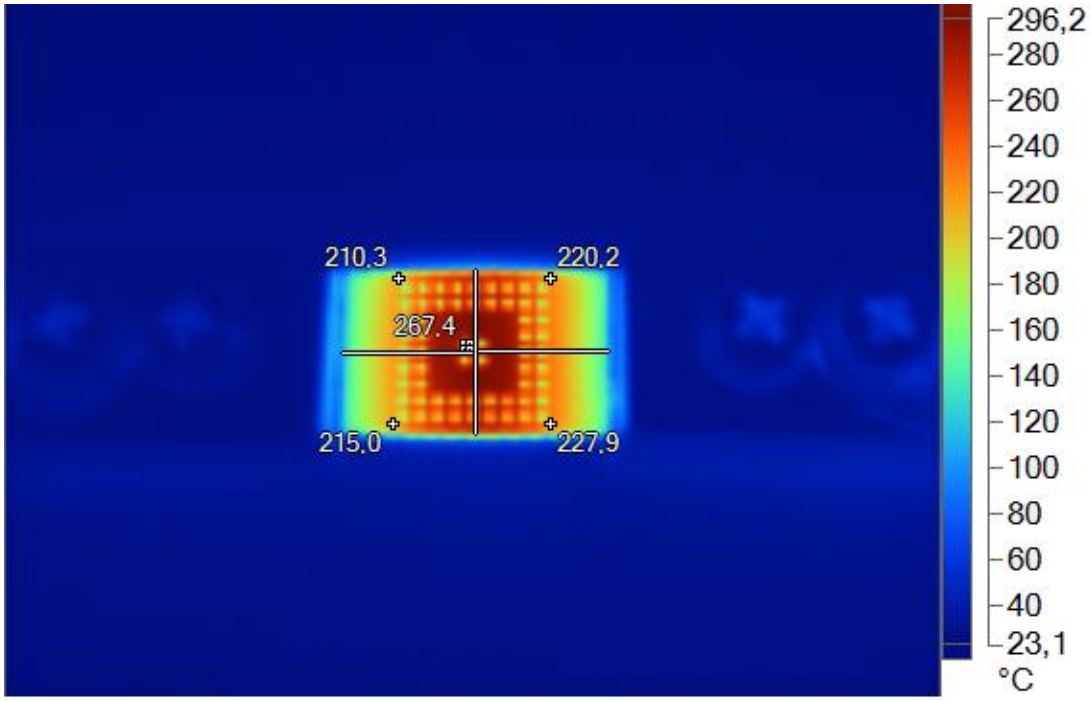
Doporučení pro budoucí výzkum z pohledu měření teploty v pájkové kuličce je volba bezkontaktního snímače (termokamera s makro objektivem, IR senzor), který by neovlivňoval výsledné hodnoty odebíráním tepla.

4.4.3 Rozložení teploty na šabloně a jeho experimentální optimalizace

Rozložení teploty by během pájení přetavení mělo být co nejlepší, tzn. v ideálním případě bez rozdílů teplot na celé ploše pájené součásti. V tomto případě jsou pájenou součástí pájkové kuličky a částečně předehřívané pouzdro BGA. Obecně je v praxi používán rozdíl teplot v procesu pájení přetavení menší než 10 °C v celé ploše pájené komponenty. Tento parametr byl důležitý pro zajištění přibližně stejné doby pájení u všech pájkových kuliček. Poměr přenosu tepla zářením a přirozenou konvekcí mezi šablonou a pájkovými kuličkami nebyl obsahem této práce, jak již bylo nastíněno v předešlé kapitole 4.4.2. Vzhledem k tomu bylo rozložení teploty s maximálním rozdílem teplot sledován na proudem přímo vyhřívané šabloně. K tomuto účelu byla použita metoda plošného měření pomocí termovizní kamera Fluke Ti32. Tato kamera nebyla vybavena makro objektiv, ale díky rozlišení detektoru 320x240 bodů byla dostačující pro kvalitativní měření rozložení teplot.

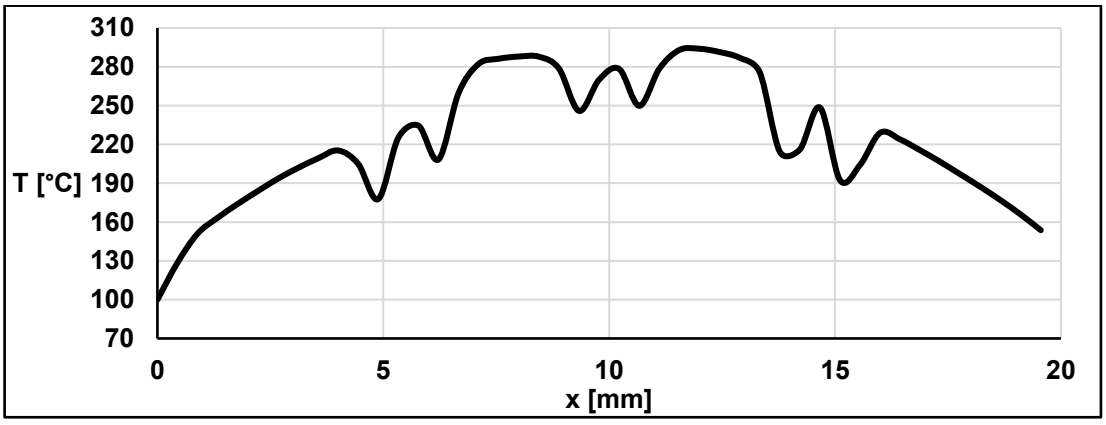
Před provedením měření byla šablona opatřena termovizní barvou od firmy LabIR s definovanou emisivitou v oblasti středních vln infračerveného záření a vysokou teplotní odolností (typ HERP-HT-MWIR-BK-11). Tím bylo dosaženo přesnějšího nastavení a určení hodnot. Měření bylo prováděno přibližně při 300 °C, kde měla termovizní barva emisivitu 0,92 při pozorovacím úhlu kamery 30 °.

Měření probíhalo se šablonou mechanicky uchycenou do vytvořených elektrod z mosazných kvádrů o velikosti (25x11x5) mm s povrchovou úpravou galvanickým niklem. Elektrody byly připojeny na proudový zdroj Manson HCS 3600, který sloužil pro nastavení elektrického proudu procházejícího šablonou. První verze šablony (verze 1) vykazovala výrazné rozdíly mezi rohy a středem aktivní oblasti (oblast s otvory pro pájkové kuličky). Rozdíl teplot byl 57,1 °C, viz obrázek 35. Důvodem byla velikost šablony a blízkost elektrod u aktivní oblasti. Přenos tepla do elektrod tedy způsobil velký rozdíl teplot.



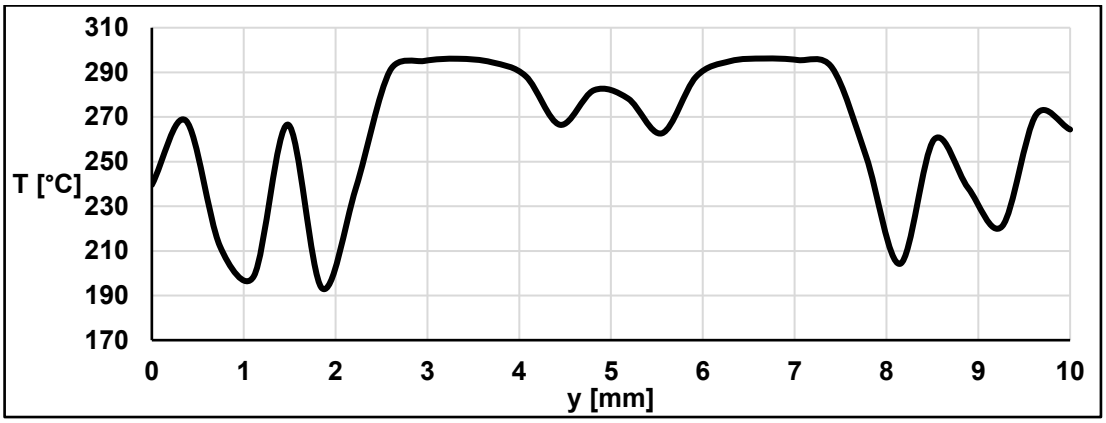
Obrázek 35: Rovnoměrnost rozložení teploty na první verzi šablony.

Obrázek 36 ukazuje podélný teplotní profil na první verzi šablony. Měřená oblast je vyznačena na obrázku 35 horizontální bílou čárou uprostřed šablony. Rozdíl teplot mezi okrajovými kuličkami a středovými byl přibližně 60 °C.



Obrázek 36: Podélný (horizontální) teplotní profil na první verzi šablony

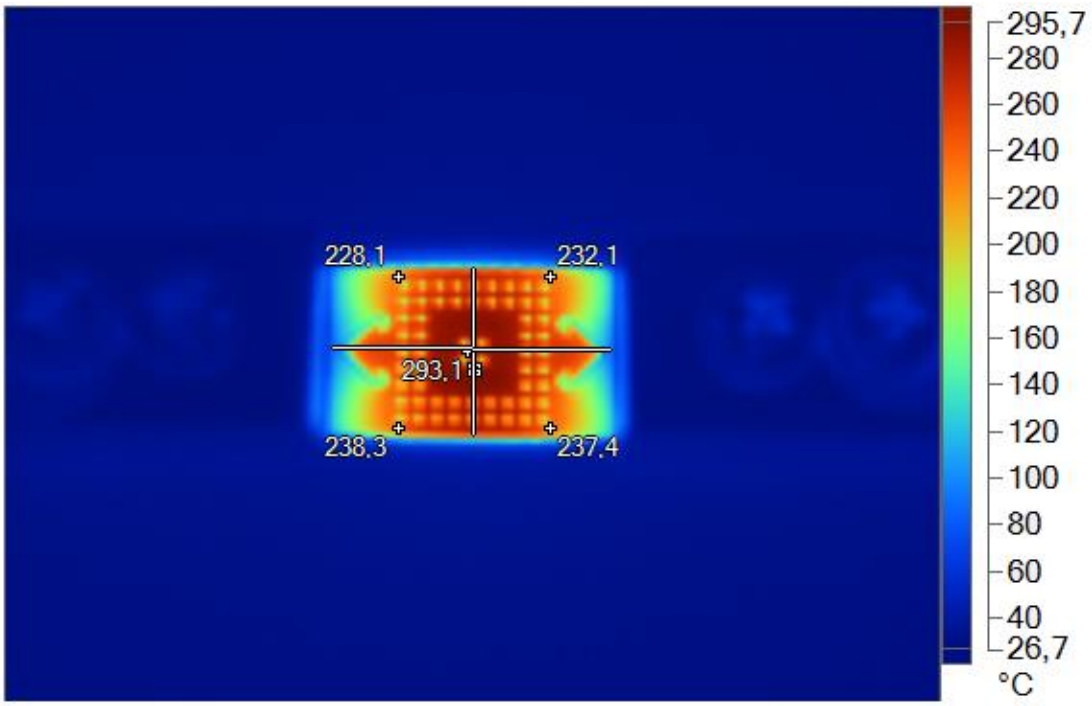
Příčný teplotní profil na obrázku 37 je vyznačen vertikální bílou čárou protínající středovou část šablony. Rozdíl teplot okrajových a středových otvorů pro pájkové kuličky byl přibližně 30 °C.



Obrázek 37: Příčný (vertikální) teplotní profil na první verzi šablony

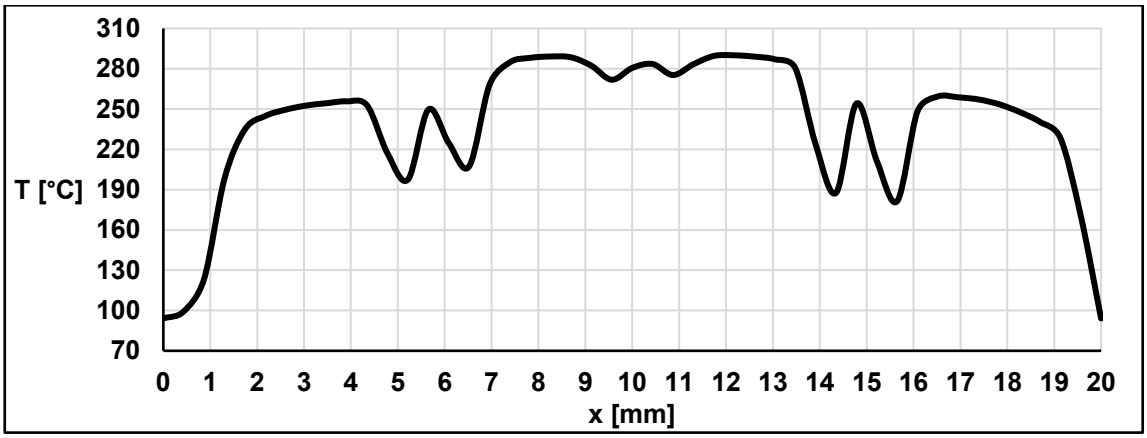
První verze šablony nevyhověla požadavku rozdílu teplot v aktivní oblasti 10 °C. Proto byly provedeny úpravy topologie otvorů v šabloně, a to tak, že bylo vyrobeno několik verzí s různými tvary a pozicemi přídavných obrazců, resp. otvorů, které nesloužily pro osazování a přímé pájení pájkových kuliček. Hlavním cílem těchto úprav mělo být zamezení úniku tepla z aktivní oblasti, tzn. vytvoření tepelných mostů, ale také částečně napomoci ohřevu zvýšenou proudovou hustotou v příčných zúženích mimo aktivní oblast, tzv. oblast pomocných obrazců.

Obrázek 38 ukazuje rovnoměrnost rozložení teploty na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V (verze 2). Rozdíl teplot měřených ve středu a v rozích aktivní oblasti byl 65 °C. První verze s přídavnými otvory zaobleného tvaru V zhoršily rozložení teplota. Příčinou bylo nejspíše větší chlazení díky umístění otvorů v blízkosti aktivní oblasti a nedostatečné zúžení průřezu v příčném směru, tedy ve směru průchodu elektrického proudu. Tím pádem nedocházelo k zahřívání oblasti pomocných obrazců.



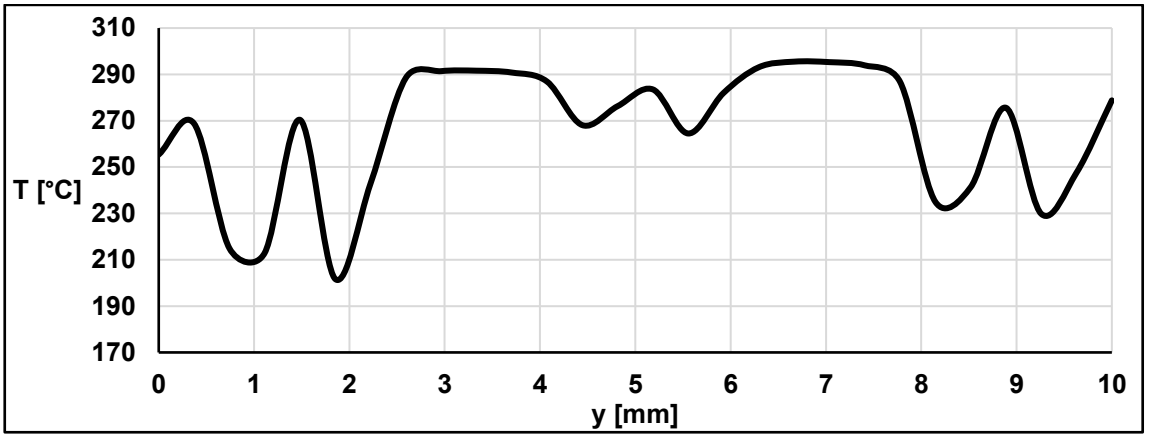
Obrázek 38: Rovnoměrnost rozložení teploty na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V

Podélný profil šablony verze 2 ukazuje lepší rozložení teplot v aktivní oblasti, než je tomu u šablony verze 1. Pomocné tvory tedy napomohly zrovnoměrnit rozložení teplot v podélném směru.



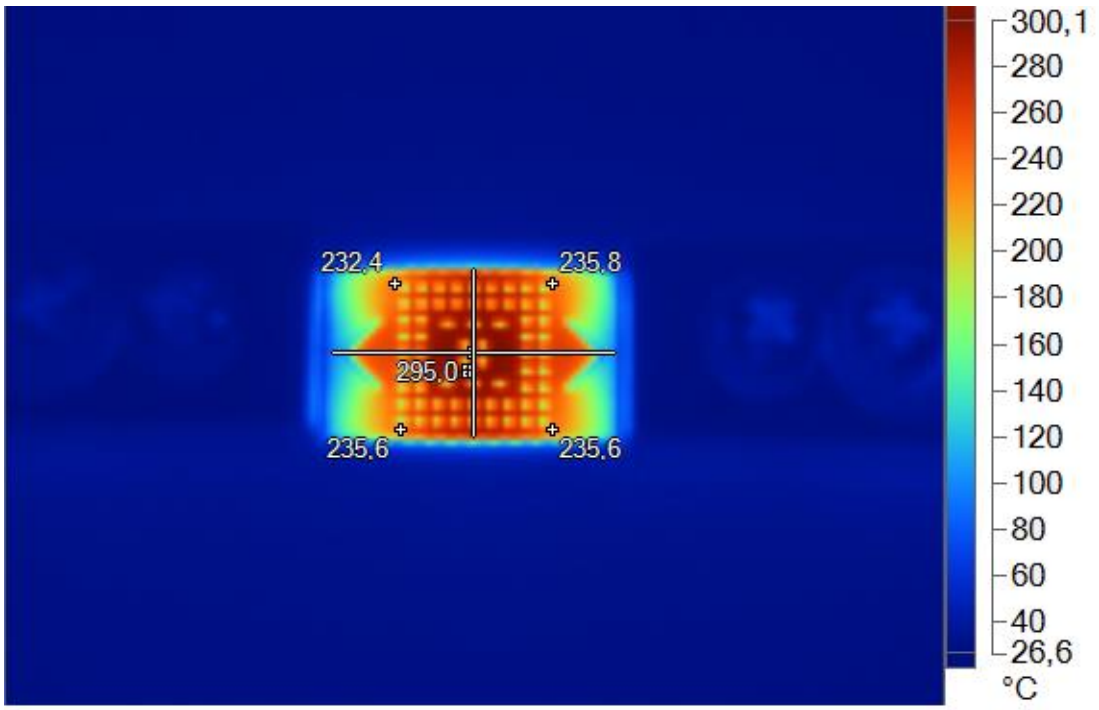
Obrázek 39: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V

Změnil se také příčný profil šablony verze 2 (viz obrázek 40) v porovnání s příčným profilem šablony verze 1 (viz obrázek 37). Mezi okrajovými a středovými otvory aktivní oblasti byl rozdíl teplot přibližně 20 °C, zatímco u verze 1 bylo změřeno přibližně 30 °C.



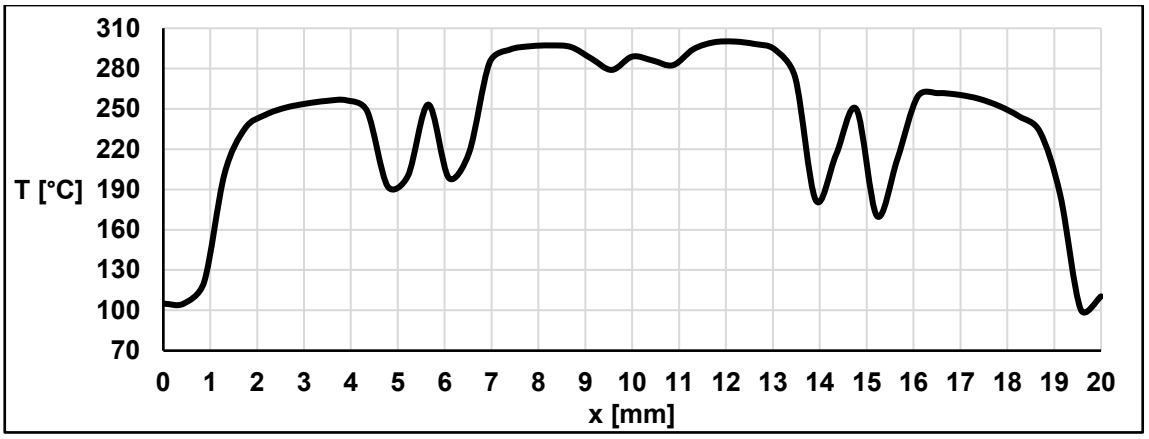
Obrázek 40: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V

Další varianta šablony s pomocnými obrazci byla v provedení otvorů tvaru V mimo aktivní oblast a třemi obdélníkovými otvory se zaoblenými konci (verze 3), jak je vidět na obrázku 41. Rozdíl teploty v aktivní oblasti byl 62, 6 °C. Pomocné obrazce tvaru uvnitř aktivní oblasti byly navrženy z důvodu zlepšení rozložení teplot v příčném směru. Jediný parametr, který musel být dodržen byla šířka těchto obdélníkových otvorů menší než 500 µm.



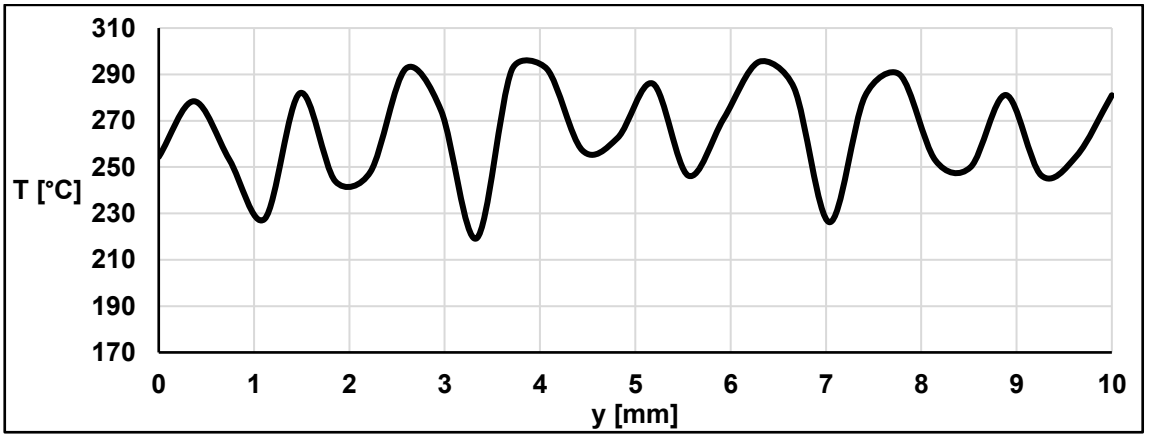
Obrázek 41: Rovnoměrnost rozložení teploty na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy

Z podélného profilu šablony verze 3 na obrázku 42 bylo zjištěno, že nedošlo k žádné změně rozdílu teplot v porovnání s podélným profilem šablony verze 2.



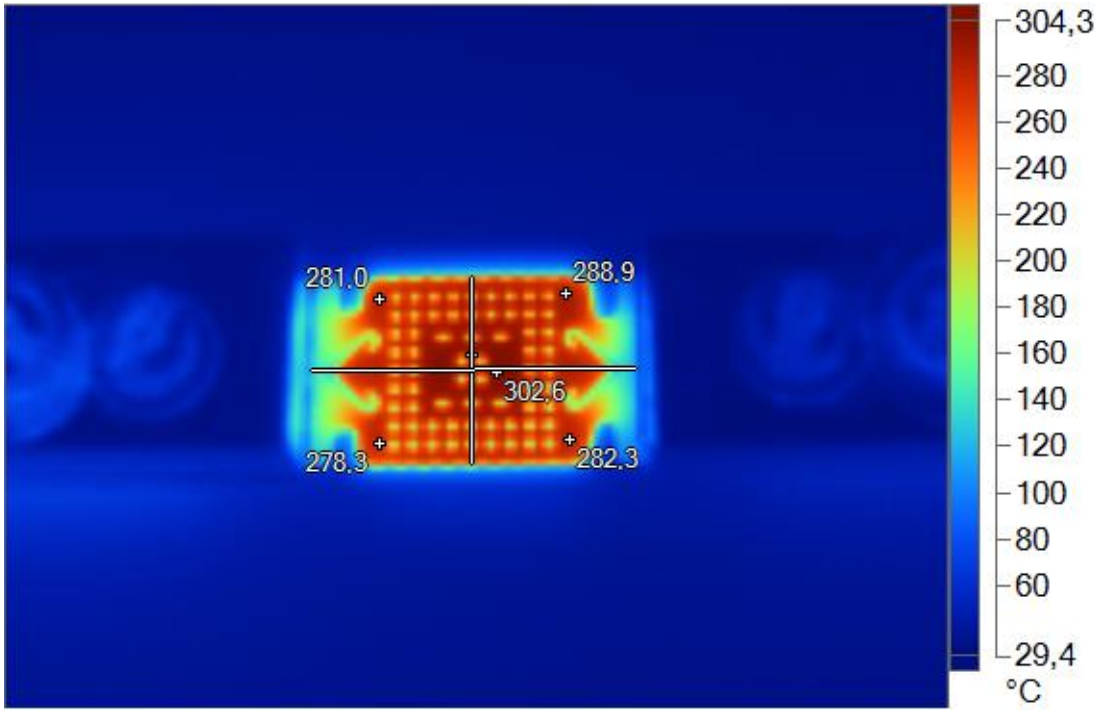
Obrázek 42: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy

Příčný profil šablony verze 3 však ukázal změnu v rozložení teploty v porovnání se šablonou verze 1 a verze 2. Rozdíl mezi středem a okrajem aktivní oblasti byl přibližně 14 °C. Obdélníkové otvory se zaoblenými konci tedy napomohly ke snížení rozdílu teplot v příčném směru.



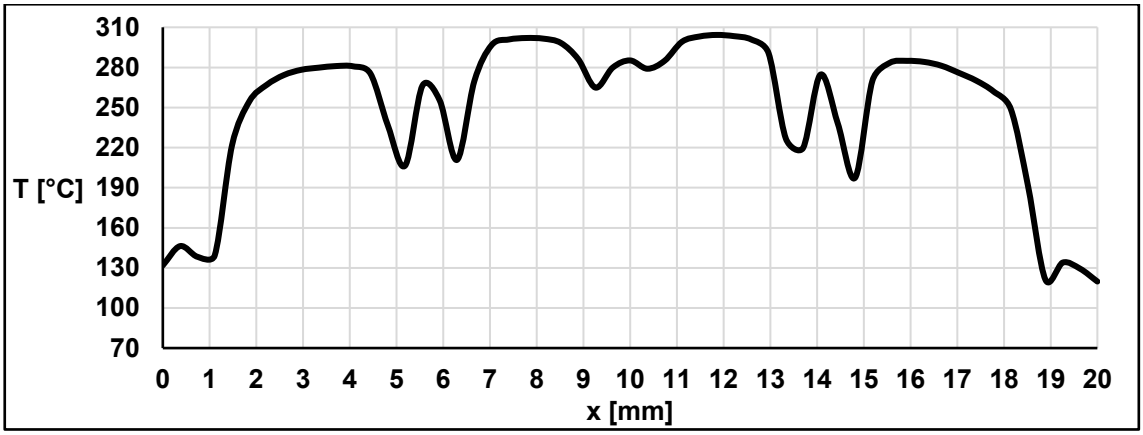
Obrázek 43: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně s výřezy tvaru V a vnitřními šesti výřezy tvaru obdélníku se zaoblenými rohy

Poslední šablona (verze 4) rozměru (20x10) mm vykazovala nejlepšího rozložení teplot. Topologii (výřezy ve tvaru V s okrajovými výřezy ve tvaru I) lze vidět na termovizní fotografii na obrázku 44. Rozdíl teplot mezi rohy a středem aktivní oblasti byl 24,3 °C. Tato hodnota neodpovídá požadovanému rozdílu teplot 10 °C, ale poukazuje na možnost dosažení tohoto parametru po optimalizaci rozložení přídavných otvorů dále od aktivní oblasti, resp. blíže k napájecím elektrodám.



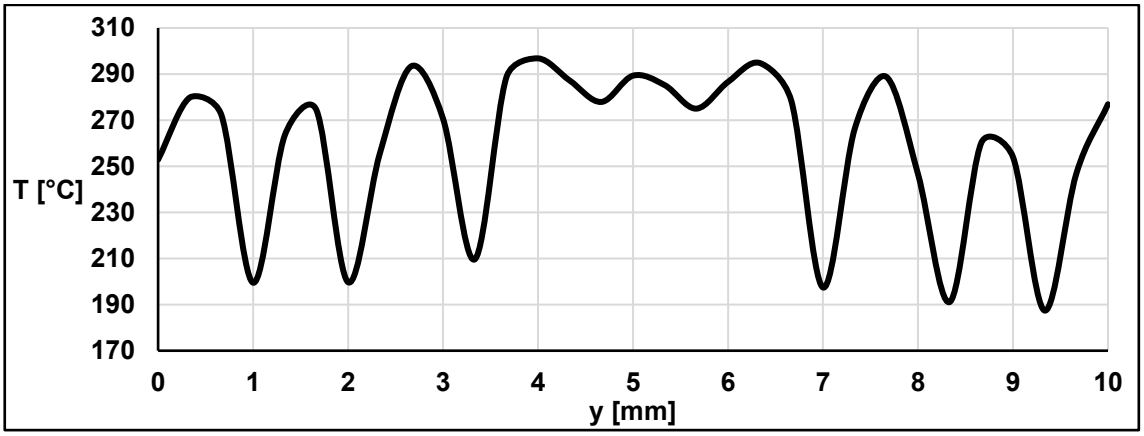
Obrázek 44: Rozložení teploty na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I – termovizní fotografie

Podélný profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I (viz obrázek 45) ukazuje také rozložení teploty v aktivní oblasti přibližně 25 °C.



Obrázek 45: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I

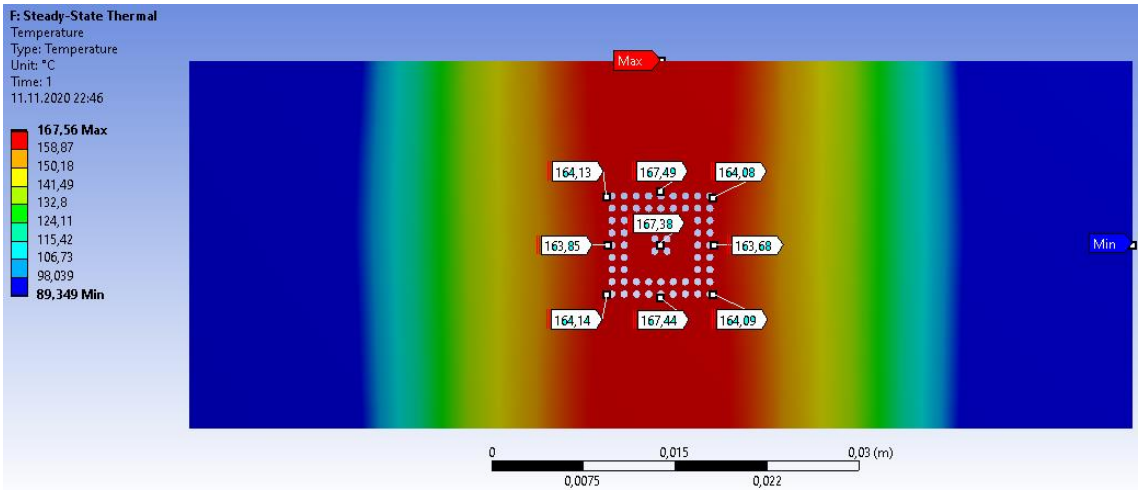
U příčného profilu (viz obrázek 46) byl výsledek přibližně stejný, jako tomu bylo u šablony verze 3 (viz obrázek 43). Rozdíl teplot byl přibližně 15 °C.



Obrázek 46: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně se zaoblenými výřezy tvaru V a okrajovými výřezy ve tvaru I

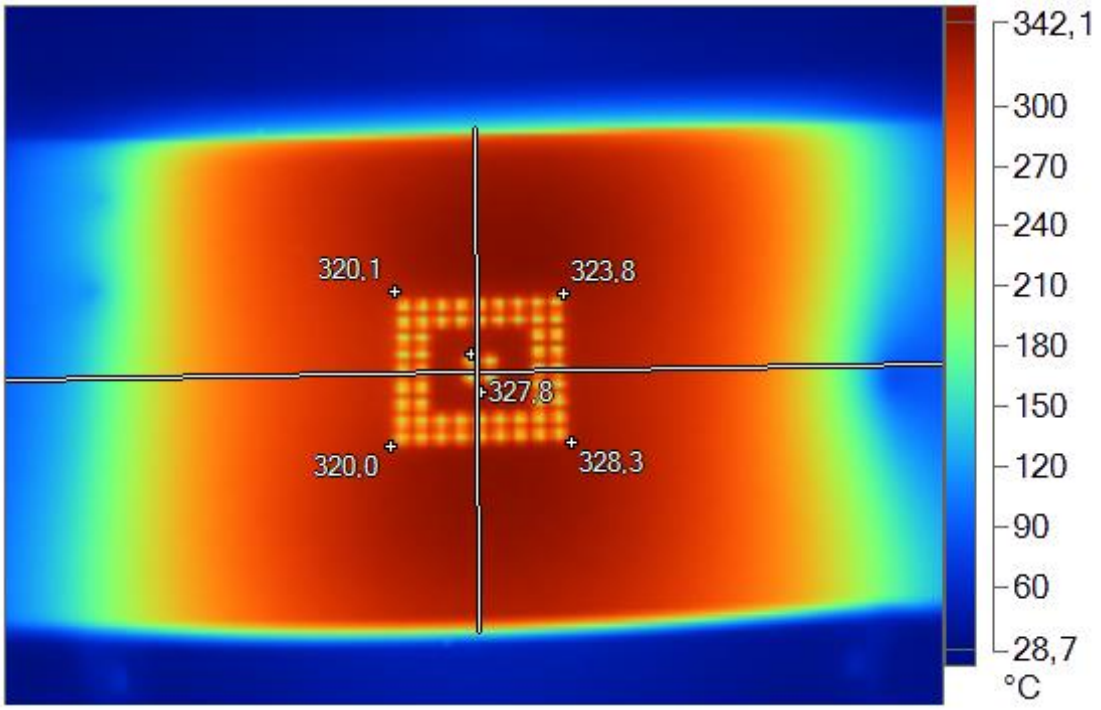
Měřením šablon o rozměru (20x10) mm bylo zjištěno, že by po větší optimalizaci tvaru, rozměru a polohy mohly být vhodné pro dosažení požadovaného rozdílu teplot v aktivní oblasti 10 °C, ale naopak nejsou vhodné z pohledu univerzálnosti pro jiné typy, resp. rozměry topologií rozložení pájecích plošek u pouzder BGA.

Nový návrh rozměrů šablony souvisel s vývojem prototypu pájecí stanice (kapitola 4.3.3), a také se zajištěním vetší univerzálnosti šablony. Velikost nového návrhu šablon byla v další fázi vývoje zvolena (65x30) mm a následně (85x30) mm s ohledem na změnu v konstrukci prototypu pájecí stanice. V rámci nového návrhu rozměrů šablony byl vytvořen simulační 3D model s elektrodami v programu Ansys Workbench, aby bylo možné navrhovat přídavné otvory bez nutnosti dalších experimentů. Na obrázku 47 je vidět simulace šablony o rozměrech (85x30) mm, kdy byl dosažen rozdíl teplot v aktivní oblasti pod 4 °C. Dále je v této kapitole řešena šablona o rozměrech (65x30) mm.



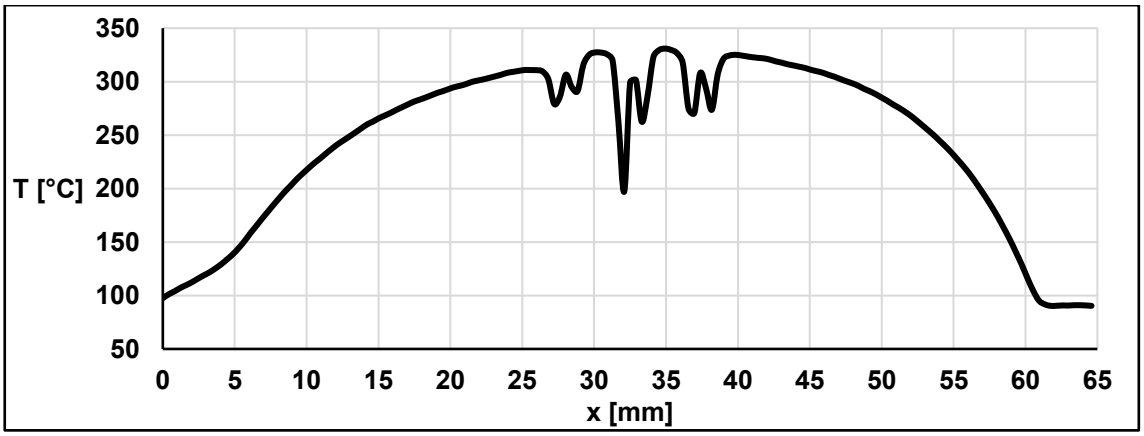
Obrázek 47: Teplotní simulace ustáleného stavu na šabloně s rozměry (85x30) mm

Výsledky měření termovizní kamerou na šabloně o rozměrech (65x30) mm a bez přídavných otvorů jsou vidět na obrázku 48. Toto provedení vykazovalo rozdíl teplot 8,3 °C mezi rohy a středem aktivní oblasti, čímž bylo dosaženo požadovaného maximálního rozdílu 10 °C pro zajištění lepší opakovatelnosti metody a výsledné jakosti a spolehlivosti kulových pájkových vývodů.



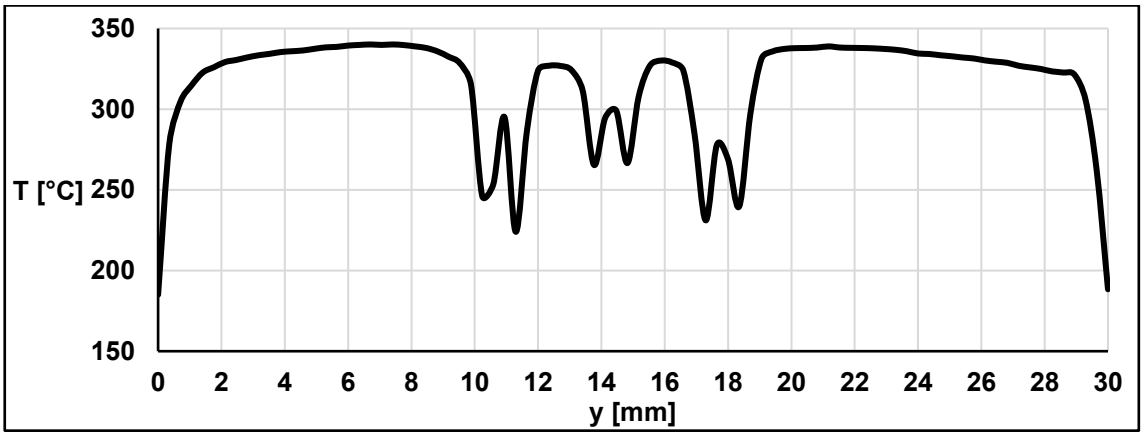
Obrázek 48: Rozložení teploty na šabloně (65x30) mm – termovizní fotografie

Podélný profil teplotní profil na šabloně (65x30) mm je znázorněn na obrázku 49. Lze vidět, že bez přídavných otvorů dochází k postupnému ochlazování od středu šablony směrem k elektrodám, avšak aktivní oblast dosahuje rozdílu teplot pod 10 °C.



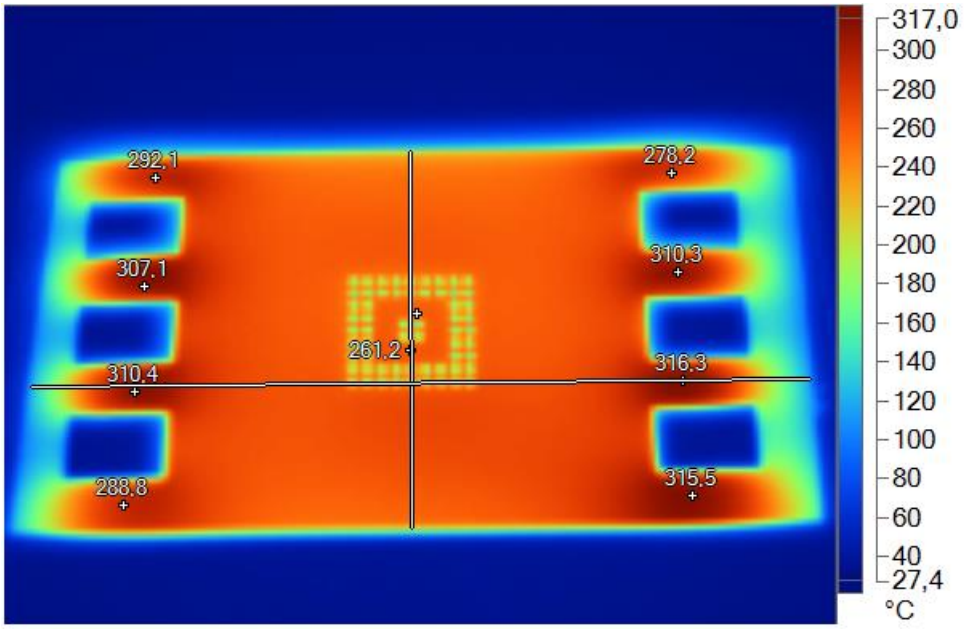
Obrázek 49: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně (65x30) mm

Rovnoměrné rozložení teplot v příčném směru ukazuje obrázek 50. Pokles teplot ve středové části je nejspíše způsoben ochlazováním před otvory aktivní oblasti, popř. nepřesností z důvodu horšího rozlišení termovizní kamery.



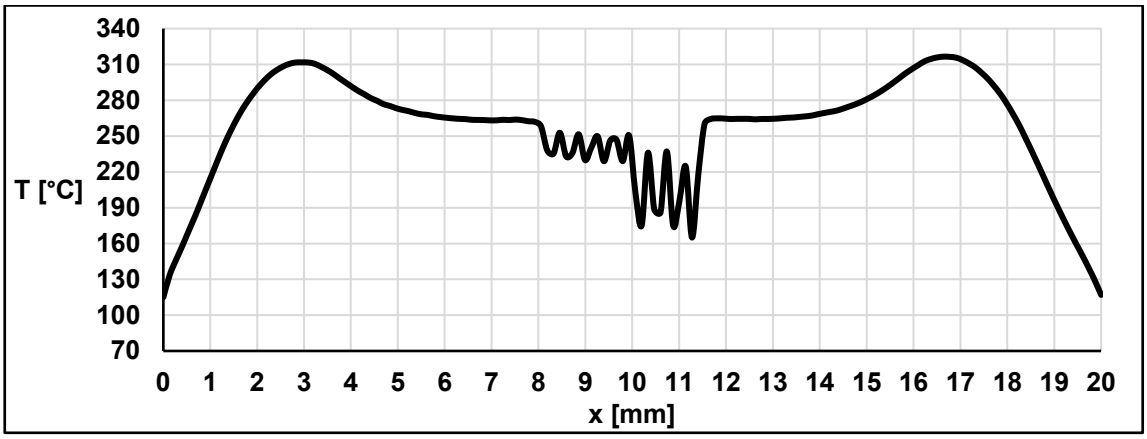
Obrázek 50: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně (65x30) mm

Poslední měření ze šablony s obdélníkovými otvory rozměru (65x30) mm poukazuje na jednu z možností vlivu špatně vytvořeného návrhu přídavných otvorů, viz obrázek 51. Vlivem nevhodného průřezu šablony v příčném směru v oblasti pomocných otvorů došlo k ohřevu této oblasti na teplotu až 315,5 °C, kdy byla teplota ve středu aktivní oblasti pouze 261,2 °C. Pro teplotu tavení použitých pájkových kuliček SAC305 (500 µm) při nastavení vzdálenosti šablony od BGA pouzdra 250 µm bychom museli dosáhnout teploty přibližně 310 °C, čímž by teplota u pomocných obrazců vzrostla nad 350 °C. Jak již bylo napsáno výše, tak nad touto teplotou již dochází k výrazné degradaci materiálu šablony (nerezová ocel AISI 304).



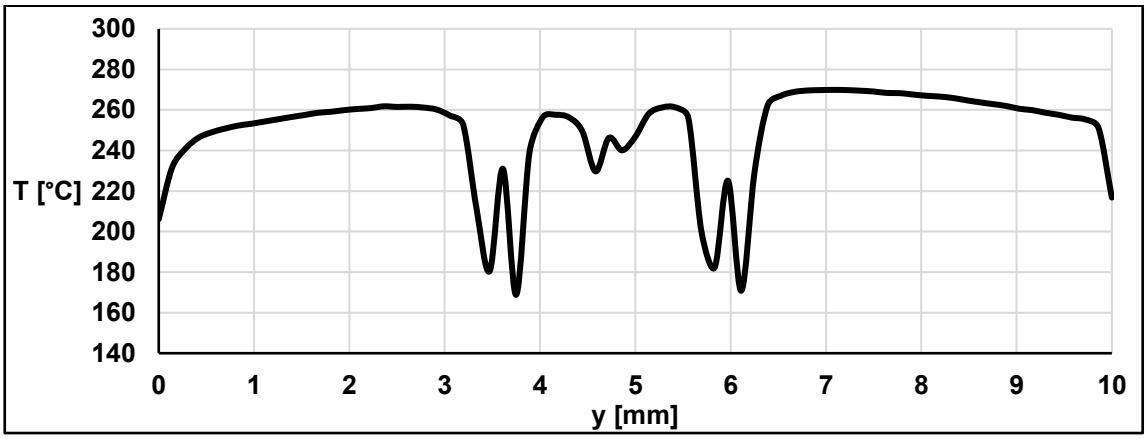
Obrázek 51: Rozložení teploty na šabloně s obdélníkovými otvory – termovizní fotografie

Podélná profil teplotní profil na šabloně s obdélníkovými otvory (viz obrázek 52) detailněji poukazuje na výraznější ohřev v oblasti pomocných otvorů oproti aktivní oblasti.



Obrázek 52: Podélný (horizontální) teplotní profil na šabloně s obdélníkovými otvory

Příčný teplotní profil bez výraznějšího rozdílu teplot, jako tomu bylo u šablony o rozměrech (85x30) mm, tzn. pod 10 °C (viz obrázek 53).



Obrázek 53: Příčný (vertikální) teplotní profil na šabloně s obdélníkovými otvory

4.4.4 Životnost šablony

Použití materiálu AISI 304 (1.4301) v aplikaci proudem přímo vyhřívané šablony s sebou může nést určitá úskalí, jako je například počet cyklů do poruchy nebo vznik defektů. V návaznosti na tyto předpoklady bylo rozhodnuto o provedení životnostních testů nerezové šablony. Hlavním cílem bylo ověřit vliv počtu pájecích cyklů na změnu elektrických parametrů a změnu vzhledu povrchu šablony (oxidace).

Před provedením testů bylo nutno navrhnout regulaci pro pájecí profil, který by bylo možné také opakovat v určitém počtu cyklů. K tomuto účelu byl zvolen regulovatelný proudový zdroj s možností externího ovládání výstupního signálu QPX1200SP

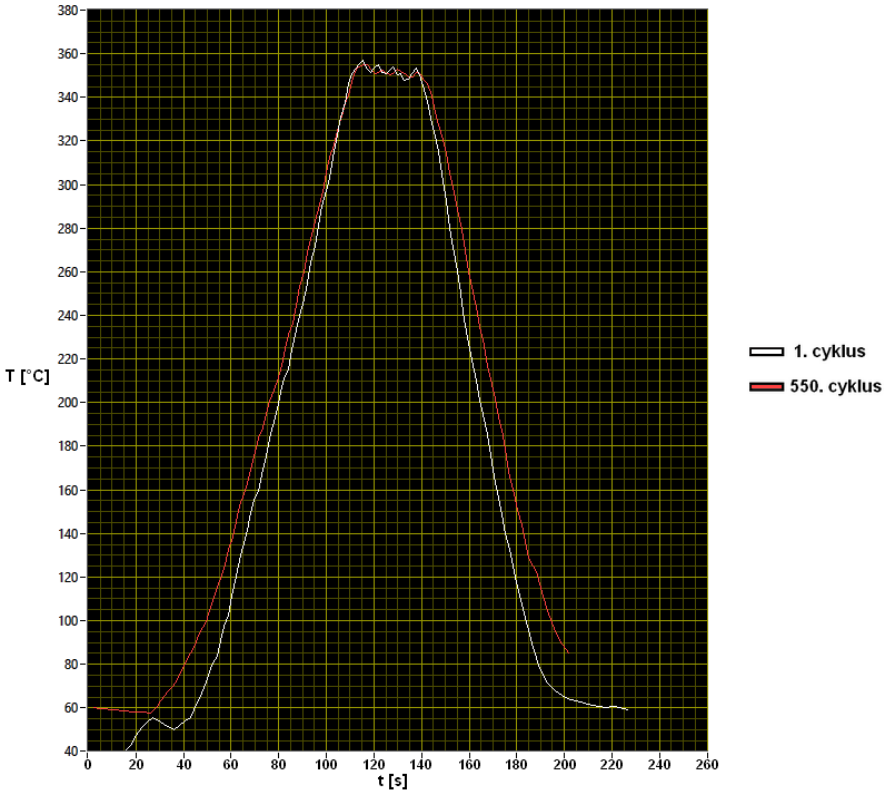
AIM-TTI, PWM regulátor a program LabVIEW pro řízení a zaznamenávání celého procesu testování (viz obrázek 33).

Během procesu teplotního cyklování byly nepřetržitě měřeny hodnoty teploty na šabloně, el. napětí a el. proud šablonou procházející. Jako regulovaná veličina byla teplota, díky které byl nastavován pájecí profil. Parametry teplotního profilu jsou v tabulce 5.

Tabulka 5: Parametry teplotního profilu pro teplotní cyklování šablony

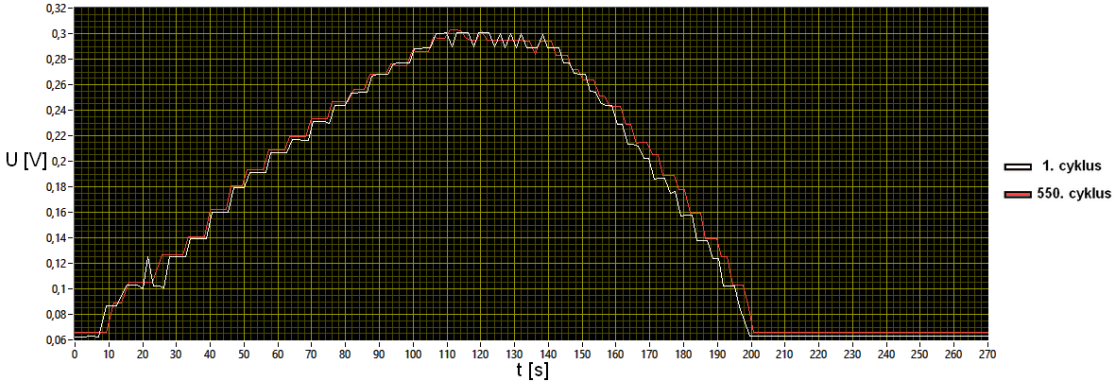
Parametr	**Hodnota**
Rychlost náběhu teploty	3 °C/s
Maximální teplota	350 °C
Rychlost chlazení	3 °C/s
Čas nad teplotou tavení	25 s

Získané závislosti na čase byly porovnány během všech cyklů, aby mohla být zjištěna postupná změna parametrů v celém procesu testování. Vzhledem k tomu, že nevznikaly téměř žádné odchylky během jednotlivých cyklů, tak byly srovnány 1. cyklus s posledním, tedy 550. cyklem. Výsledné grafy závislostí teploty na čase pro 1. a 550. cyklus jsou znázorněny na obrázku 54. Viditelné odchylky v náběhu teploty a chlazení byly nejspíše způsobeny okolními vlivy, jelikož se nevyskytovaly u všech měření.

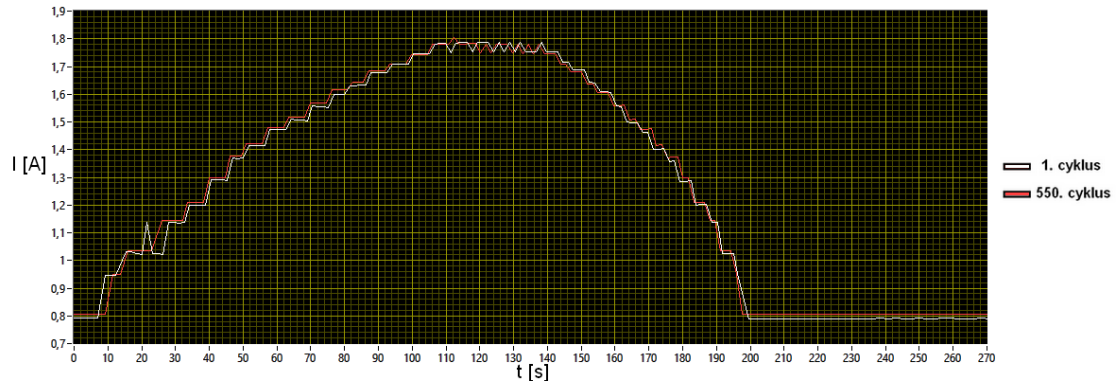


Obrázek 54: Pájecí profil v 1. cyklu a 550. cyklu

Průběh napětí a proudu jsou ukázány na obrázku 55 a obrázku 56. Změna porovnaných průběhu pro 1. a 550. cyklus byla způsobena stejnými vlivy, jako jsou popsány u závislosti teploty na čase (viz obrázek 54). Mohlo se také jednat o změnu vlastností nerezové šablony, což však vzhledem k potenciálním malým odchylkám, které nastávaly u všech průběhů jednotlivých cyklů nebylo možné přímo zjistit z měřených závislostí. Vzhledem k velkému množství získaných měření, resp. průběhů, nebyly všechny průběhy uvedeny v této práci z důvodu rozsahu, ale jsou k dispozici na vyžádání.



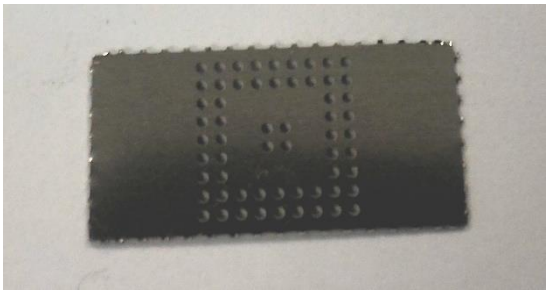
Obrázek 55: Průběh el. napětí během 1. cyklu a 550, cyklu



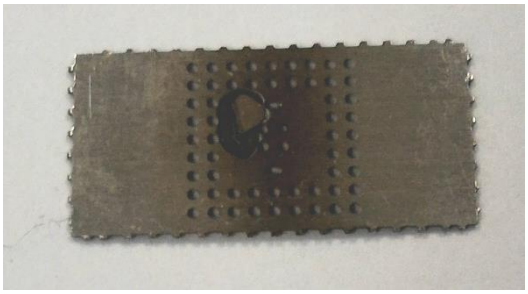
Obrázek 56: Průběh el. proudu během 1. cyklu a 550. cyklu

Všechny získané informace z průběhů proudu a napětí sloužily ke zjištění změny vlastností materiálu nerezové šablony z pohledu elektrických parametrů po teplotním cyklování. Během 550 pájecích cyklů tedy nenastala změna měřených parametrů.

Kromě elektrických parametrů byla provedena optická analýza povrchu nerezové šablony. Obrázek 57 ukazuje šablonu před teplotním cyklováním a obrázek 58 po teplotním cyklování. Na první pohled je vidět rozdíl ve změně barvy na povrchu teplotně cyklované šablony, který však neměl přímý vliv na její funkci.



Obrázek 57: Přímo vyhřívaná šablona před teplotním cyklováním



Obrázek 58: Přímo vyhřívaná šablona po 500 cyklech teplotního cyklování

Strukturálně neměla v šabloně nastat přímo sledovatelná změna po 550 cyklech, a tedy ani změna parametrů elektrických, popř. mechanických, jelikož byla provozována při maximální teplotě 350 °C. Zjištěné závěry z této kapitoly také potvrzují vědecké publikace [75] a [76].

4.5 Charakterizace kulových pájkových vývodů vytvořených pomocí přímo vyhřívané šablony

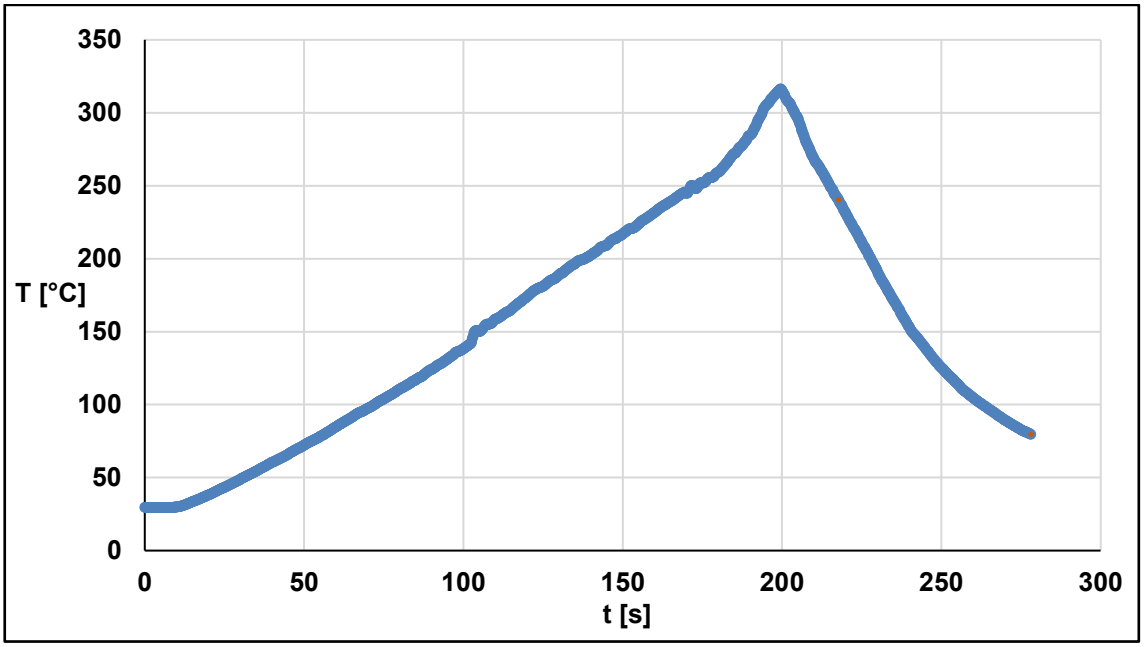
V této kapitole je popsána charakterizace kulových pájkových vývodů vytvořených pomocí prototypu pájecí stanice HSR-01 (viz obrázek 28).

4.5.1 Příprava testovacích vzorků

Základní příprava vzorků po proces nanesení tavidla na pájecí plošky je popsána v kapitole 3 Návrh a příprava vzorků. Osazení proces a přetavení je popsán v této kapitole.

Poslední částí přípravy vzorku bylo umístění pájkových kuliček do otvorů proudem přímo vyhřívané šablony, které se provádělo stejným způsobem, jako je tomu u stávajících metod využívajících šablony pro osazení kulových pájkových preforem. V prvním kroku bylo nutno umístit pod šablonu v určité vzdálenosti BGA pouzdro s natisknutým tavidlem na pájecích ploškách. Následně byly pájecí plošky sesazeny s otvory v šabloně. Kulové pájkové preformy se ve větším, než požadovaném množství (určeno počtem kulových otvorů v šabloně) nanesly na proudem přímo vyhřívanou šablonu a postupně se pohybem nástroje (pinzeta) umístily do kruhových otvorů k tomu účelu určených.

Konečným krokem byl proces pájení, kdy byl nastaven a spuštěn teplotní profil, který je ukázán na obrázku 59.



Obrázek 59: Pájecí profil měřený na šabloně [77]

Parametry pájecího profilu z obrázku 59 jsou sepsány v tabulce 6. Určení jednotlivých parametrů profilu bylo provedeno na několika experimentech zahrnujících měření teploty na šabloně i na pouzdře BGA při jejich vzdálenosti od sebe 250 µm.

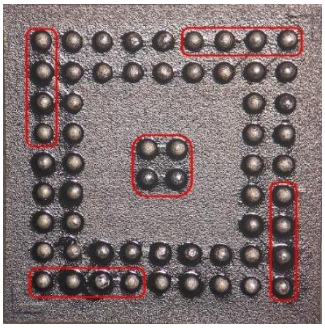
Tabulka 6: Nastavené parametry teplotního profilu v prototypu pájecí stanice HSR-01 pro šablonu s tloušťkou 300 µm a její vzdáleností 250 µm od BGA pouzdra.

Parametr	**Hodnota**
Rychlost náběhu teploty	1,3 °C/s
Maximální teplota	315 °C
Rychlost chlazení	4 °C/s

4.5.2 Testování a analýzy

Hlavními zkoumanými parametry u pájkových kulových vývodů byly střihová síla, tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy a základní krystalografická morfologie.

Destruktivní střihové testy byly provedeny podle normy JESD22-B117A [78]. Pro provedení mechanických zkoušek bylo použito zařízení DAGE PC2400 s příslušným plochým nástrojem o šířce 700 µm. Testované kulové pájkové vývody jsou znázorněny na obrázku 60 červenými ohraničeními.



Obrázek 60: Vzorek s vyznačenými vývody testovanými na sílu ve střihu.

Tabulka 7 shrnuje základní nastavené parametry pro zkoušku pevnosti ve střihu.

Tabulka 7: Použité parametry destruktivních střihových zkoušek

Parametr	**Hodnota**
Rychlost nástroje při testu	300 µm/s
Výška nástroje od substrátu	50 µm
Přejezd nástroje po testu	500 µm

Vzorky byly po zkoušce smykem zality do metylmetakrylátové pryskyřice (Dentacryl). Dále byl na těchto vzorcích proveden metalografický výbrus. Proces přípravy vzorků pomocí metalografických výbrusů byl proveden podle normy *IPC-TM-650,* 2.1.1 Microsectioning, Manual and Semi or Automatic Method [79]. Na závěr byla použita metoda mokrého leptání, aby došlo ke zvýraznění vnitřní struktury pájky a rozhraní pájka-pájecí ploška, v roztoku 94% ethanolu (C_2H_5OH), 4% kyseliny dusičné ($HN0_3$) a 2% kyseliny chlorovodíkové (HCl) po dobu 15 sekund.

Pro analýzu vnitřní struktury kulových pájkových vývodů byl použit optický mikroskop Zeiss Axio Imager.M2m a skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM – *Scanning Electron Microscope*) Tescan FE MIRA II LMU s detektorem zpětně odražených elektronů (BSE – *Backscattered Electron*). Je nutno poznamenat, že pro dostatečné zvýraznění morfologické struktury byla dostatečná příprava vzorků chemickým leptáním, tedy nebyl použit polarizační filtr, ale pouze mikroskopie ve světlém poli.

Pořízení snímky mikrostruktury kulových pájených vývodů byly pořízeny v oblastech potřebných pro konkrétní analýzu, tzn. celý vývod a oblasti přechodu mezi pájkou a pájecí ploškou. Na snímcích z oblasti přechodu pájka-pájecí ploška (intermetalická vrstva) byla následně provedena počítačová analýza fotografií pomocí programu ImageJ, pro zjištění tloušťky intermetalických vrstev a jejich drsnosti. Princip měření byl převzat z publikace [80] s tím rozdílem, že byla nerovnost intermetalické ve spodní části kompenzována měřením a úpravou ve výše zmíněném programu ImageJ.

Prvním krokem měření v programu ImageJ bylo určení střední hodnoty tloušťky vrstvy (Mean Surface Level – MSL), což je průměrná hodnota tloušťky IMC, s využitím plochy intermetalické vrstvy A a její délky L [80]:

$$MSL = \frac{A}{L} \tag{2}$$

Z hodnoty MSL byla vypočítána drsnost IMC s korekcí nerovnosti podložní vrstvy, kde podložní vrstvou byla vrstva niklu/fosforu (povrchová úprava ENIG). Korekce nerovnosti podložní vrstvy byla pro přesnější výsledek důležitá, jelikož je následující vzorec pro výpočet efektivní drsnosti povrchu použitelný pro členitost IMC s rovinnou podložní vrstvou. Hodnota efektivní drsnosti povrchu byla určena dle následujícího vztahu [80,81]:

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Z_i^2}\ , \tag{3}$$

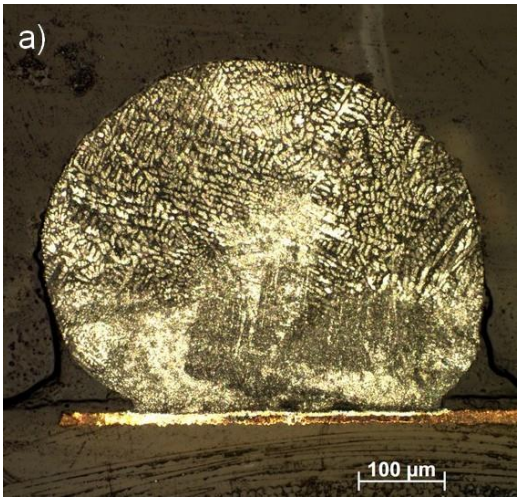
kde N je celkový počet měřených hodnot, i je pořadí měřené hodnoty a Z_i je výška nerovnosti intermetalické vrstvy měřená od hodnoty MSL.

Vztahy (3) a (4) byly zvoleny z důvodu vypovídající hodnoty právě efektivní drsnosti povrchu při popisu intermetalických vrstev.

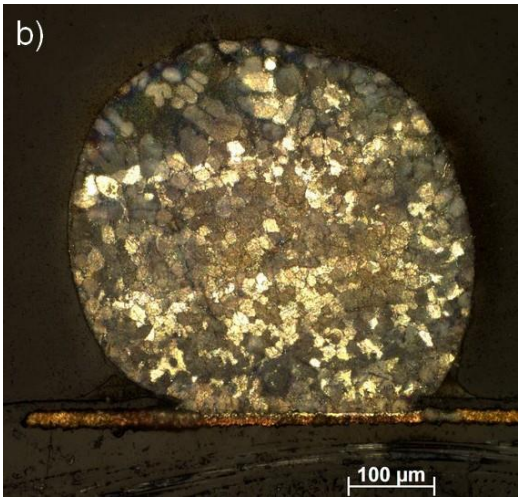
4.5.3 Výsledky a diskuse

Výsledek z destruktivního testování síly ve střihu u kulových pájkových vývodů vykazoval průměrnou hodnotu 7,016 N se směrodatnou odchylkou 1,094 N. Tato hodnota odpovídá pevnosti pro kulové pájkové vývody vytvořené standardně používanými metodami, viz kapitola 1.4. K odtržení testovaného vývodu docházelo v převážné většině případů na úrovni nepájivé masky, tzv. *ductile failure*.

V další části byla zjišťována morfologie vnitřní struktury kulového pájkového vývodu. Uspořádání krystalů u vzorků pájených přímo vyhřívanou šablonou bylo vícezrnné s menšími oblastmi prokládané struktury (Obrázek a)) a prokládané (Obrázek b)). Obrázek a) ukazuje uspořádání β-Sn dendritů ve formě plážového míče (*beach ball*), tzn. vícezrnné. Na obrázku b) lze vidět krystalizaci ve formě menších center, tzv. prokládaná morfologie. Dle informací získaných v kapitole 1.3 by měl být tento typ morfologických struktur spolehlivý, což také určuje způsob zátěže při provozu v konkrétní aplikaci.

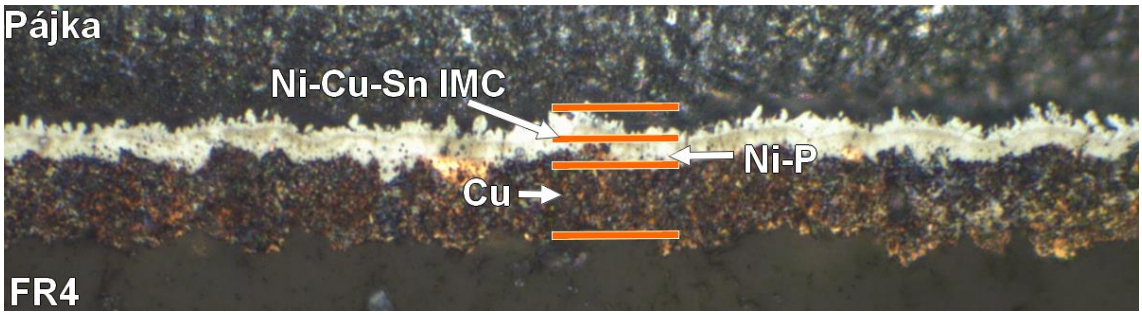


Obrázek 61: Kulový pájkový vývod vytvořený proudem přímo vyhřívanou šablonou – vícezrnná vnitřní struktura



Obrázek 62: Kulový pájkový vývod vytvořený proudem přímo vyhřívanou šablonou – prokládaná vnitřní struktura

Posledními měřenými parametry byly tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška. Intermetalická vrstva průměrně vykazovala tloušťku 1,675 µm se směrodatnou odchylkou 0,152 µm a drsnost 0,763 µm se směrodatnou odchylkou 0,190 µm. Mikroskopický snímek jednoho z měřených vzorků je ukázán na obrázku 63.



Obrázek 63: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené proudem přímo vyhřívanou šablonou

Výsledky z měření střihoví síly, tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy v porovnání s výsledky jiných vědeckých prací (viz kapitola 1.4) poukazují, že pomocí vyvinuté a optimalizované metody vytvoření, resp. obnovení kulových pájkových vývodů je možné provádět proces osazení pájkových kuliček a jejich následné přetavení v jakosti dostatečné pro další použití v elektrotechnickém průmyslu.

4.6 Porovnání elektrickým proudem přímo vyhřívané šablony se stávajícími metodami

S ohledem na zaměření této metody především na obnovení pájkových kulových vývodů, případně na jejich vytvoření v elektrotechnickém průmyslu bylo přistoupeno k jejímu porovnání s dostupnými daty a informacemi k podobným stávajícím metodám.

Základním rozdílem, ale také výhodou oproti levnějším metodám využívaným u oprav, resp. obnovení kulových pájkových vývodů BGA pouzder bylo snížení počtu procesních kroků. Tímto bylo dosaženo snížení počtu kroků minimálně o jeden, a to přesun BGA pouzdra s osazenými kuličkami do pájecí pece. Druhým ušetřeným úkonem by mohlo být také odstranění šablony před (neohřívatelná šablona) procesem pájení, nebo po procesu pájení (ohřívatelná šablona). V porovnání se samolepící šablonou je na tom tato metoda z pohledu času o něco málo hůře, jelikož je třeba pájkové kuličky osadit.

První prokázanou výhodou přímo vyhřívané šablony byla menší tepelná zátěž na pájené pouzdro BGA. Měření na obrázku 34 poukazuje na zjištění, že při teplotě šablony 315 °C a její výšce na pouzdrem BGA 250 μm dojde k ohřátí pájené komponenty pouze na teplotu menší než 150 °C. V praktickém smyslu je tato možnost využita nejen pro menší tepelné zatížení pájeného BGA pouzdra, ale zároveň slouží jako předehřev, resp. pro aktivaci tavidla. Díky tomu se tento nový princip pájení řadí na pomezí metod využívajících šablony (ohřívatelné, neohřívatelné i samolepící) a laser.

Další výhodou inovativní metody vyvinuté a optimalizované v této práci je možnost zajištění lepší predikce tloušťky intermetalické vrstvy v porovnání s ohřívatelnými a neohřívatelnými šablonami a přiblížení se k pájení laserem. Toto tvrzení podporuje bakalářská práce mého studenta Bc. Adama Gregora [77] a také další publikace [82].

Měření elektrické spotřeby může někdy být důležitým parametrem při výběru pájecí stanice. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k jeho měření na vyvinutém funkčním vzorku (viz obrázek 26) a prototypu HSR-01 (viz obrázek 28) s následným porovnáním se dvěma dalšími pájecími stanicemi. Jako zástupce univerzálního selektivního pájecího zařízení byla testována stanice ERSA IR 400 (viz obrázek 64), která využívá ke svému ohřevu dva infračervené zářiče. Mezi specializovanými pájecími stanicemi byla vybrána pec Martin Hot Reball 03 (viz obrázek 65) určená přímo pro proces obnovení pájkových kulových vývodů na BGA pouzdrech. Pájecí stanice ERSA IR 400, Martin Hot Reball 03, funkční vzorek a prototyp HSR-01 byly měřeny pomocí záznamového zařízení elektrické spotřeby Volcraft Energy Logger 3500.

Měření probíhalo vždy na síťové zástrčce dané pájecí stanice. Výsledky jsou umístěny v tabulce 8. Jak je vidět, tak stanice ERSA IR 400 a Martin Hot Reball 03 měly téměř stejnou spotřebu, tj. 642 VA a 636 VA, avšak funkční vzorek s přímo

vyhřívanou šablonou měl 81 VA. Prototyp pájecí stanice s přímo vyhřívanou šablonou (HSR-01) měl při procesu pájení 220 VA. Tím se potvrdila jedna z výhod této metody, a to je menší spotřeba elektrické energie v porovnání s výše uvedenými pájecími stanicemi.

Tabulka 8: Energetická náročnost nové metody a porovnání se dvěma dalšími pájecími stanicemi

Pájecí stanice	ERSA IR 400	Martin Hot Reball 03	Přímo vyhřívaná šablona (funkční vzorek)	Přímo vyhřívaná šablona (prototyp HSR-01)
Zdánlivý výkon (VA)	642	636	81	220

Obrázek 64: Opravárenská pájecí stanice ERSA IR400

Obrázek 65: Pájecí stanice Martin Hot Reball 03 určená pro *reballing* pouzder BGA

Jedinou hlavní nevýhodou jsou zatím rozměry a váha prototypu pájecí stanice, které však nejsou kritické v porovnání s ostatními zařízeními určenými na obnovení kulových pájkových vývodů.

4.7 Shrnutí dosažených výsledků

Hlavní část této práce měla za cíl výzkum a vývoj inovativní metody pro osazení a zapájení kulových pájkových vývodů.

Prvním krokem bylo ověření principu nové metody využívající elektrickým proudem přímo vyhřívanou šablonu vytvořenou z korundové keramiky (první etapa vývoje) a nitridové keramiky (druhá etapa vývoje) s tlustovrstvým topným elementem na jejich povrchu. Korundová keramika s čistotou 96 % praskala téměř při každém procesu pájení. Nitridová keramika nevyhověla hlavně kvůli své ceně. Keramické materiály tedy nevyhověly nejen z pohledu ceny procesu výroby a použití, ale také z pohledu praskání při procesu pájení u 96% korundové keramiky. Nicméně princip možnosti pájení pomocí elektrickým proudem přímo vyhřívané šablony sloužící také na osazení pájkových kuliček byl ověřen a byla potvrzena jeho použitelnost pro vytvoření, resp. obnovení kulových pájkových vývodů na BGA pouzdrech. Následovalo podání patentové přihlášky na Úřad průmyslového vlastnictví, který po necelém roce patent uznal pod číslem CZ 307441. Z toho plyne potvrzení, že je metoda proudem přímo vyhřívané šablony určené pro osazení a vytvoření, resp. obnovení kulových pájkových vývodů unikátní myšlenkou na celém světě.

V následném kroku bylo přistoupeno k výběru dostupnějšího a vhodnějšího materiálu šablony z pohledu ceny i opracovatelnosti, čímž byla nerezová ocel s označením AISI 304 (DIN 1.4301). Po prvním experimentu a potvrzení možnosti použití plechu z nerezové oceli byl vytvořen návrh (3D model, výkresová dokumentace) a konstrukce první verze pájecí stanice (funkční vzorek) využívající elektrickým proudem přímo vyhřívanou šablonu. Na tomto funkčním vzorku byla provedena základní charakterizace a částečná optimalizace metody řešené v této práci. Výsledky charakterizace a optimalizace na funkčním vzorku jsou bodově popsány níže. Byl/a tedy:

- navrhnuta topologie šablony se zaměřením na rozměry pájecí stanice (pro funkční vzorek i prototyp pájecí stanice),
- provedena úprava topologie šablony se zaměřením na dosažení co nejlepší rovnoměrnosti ohřevu (vyvinuty přídavné otvory a zjištění vlivu velikosti šablony),
- experimentálně zjištěn rozdíl teplot na šabloně a pouzdře BGA při procesu pájení (Maximálně 150 °C na BGA pouzdře při teplotě šablony 315 °C a její výšce 250 μm),
- a zjištěna životnost šablony z nerezové oceli pro použití při minimálně 550 pájecích cyklech.

V další části byl proveden výzkum a charakterizace kulových pájkových vývodů vytvořených pomocí elektrickým proudem přímo vyhřívané šablony. Hlavními parametry, u kterých byl ověřován vliv nového způsobu pájení, byly síla ve střihu,

tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška a morfologická krystalografie zrn cínu uvnitř kulového pájkového vývodu.

Síla ve střihu u kulových pájkových vývodů vytvořených inovativní metodou byla 7,016 N se směrodatnou odchylkou 1,094 N. Měření bylo provedeno na zařízení Dage PC2400.

Nejčastěji se vyskytující morfologická struktura u kulových pájkových vývodů vytvořených inovativní metodou byla vícezrnná a prokládaná.

Intermetalická vrstva na rozhraní pájka a pájecí ploška průměrně vykazovala tloušťku 1,675 μm se směrodatnou odchylkou 0,152 μm.

Poslední část zahrnovala porovnání elektrickým proudem přímo vyhřívané šablony se stávajícími metodami využívanými v průmyslu. Bodově jsou porovnání shrnuta zde:

- Snížení procesních kroků v porovnání s ohřívatelnou a neohřívatelnou šablonou. Časově náročnější, než proces využívající samolepících šablon a laserové pájení.
- Menší tepelná zátěž pro pájené BGA pouzdro.
- Možnost predikce tloušťky intermetalické vrstvy.
- Menší elektrická spotřeba s porovnávanými průmyslově využívanými stanicemi.

Touto částí byl splněn první cíl dizertační práce.

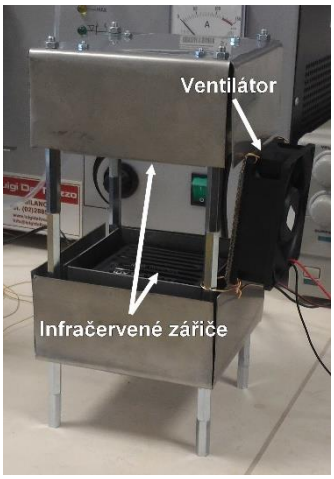
5 VLIV SMĚRU PROUDĚNÍ TEPLA PŘI PÁJENÍ PŘETAVENÍM NA VNITŘNÍ STRUKTURU PÁJENÉHO SPOJE U PÁJKOVÝCH KULOVÝCH VÝVODŮ

Jedním z dosud opomíjených parametrů při pájení přetavením je směr toku tepla. Jako základ pro ověření nové metody vytvoření kulových pájkových vývodů, byl navrhnut experiment, kdy byly použity dva infračervené zářiče pro pájení přetavením.

Hlavními posuzovanými parametry v této části byly:

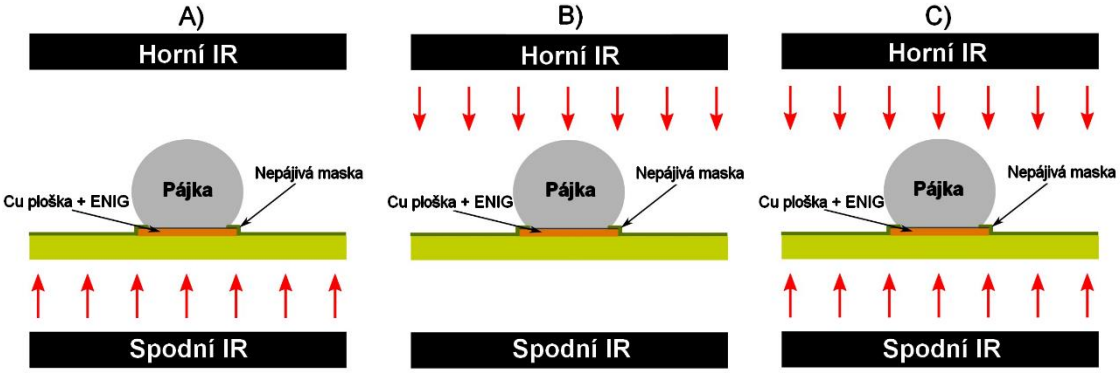
- zkouška ve střihu,
- optická analýza uspořádání krystalografické orientace v pájeném spoji,
- tvar a tloušťka intermetalických vrstev na rozhraní pájka a pájecí ploška.

Z pohledu metodologie, byla nejdůležitější částí experimentu pájecí stanice *Power Tower*, která je zachycena na obrázku 66. Návrh byl vytvořen s ohledem na sledované parametry, což znamená umístění dvou keramických infračervených zářičů o rozměrech 80 x 80 mm proti sobě. Pro zajištění opakovatelnosti a nastavení stejného pájecího profilu pro všechny experimenty, byla pájecí stanice osazena ventilátorem o rozměrech 80 x 80 mm. Zkoumané případové studie byly tři, kde první případ byl zaměřen na pájení pouze horním infračerveným zářičem (Horní IR), druhý případ na pájení spodním infračerveným zářičem (Spodní IR) a třetí případ byl proveden za použití obou infračervených zářičů (Oba IR), tzn. horním i spodním současně.



Obrázek 66: Pájecí stanice se dvěma infračervenými zářiči – *Power Tower* [82]

Názorně jsou všechny případy polohy infračervených zářičů a jejich tepelného působení znázorněny na obrázku 67. Červené šipky vždy ukazují, který ze zdrojů tepla je použit pro daný případ.

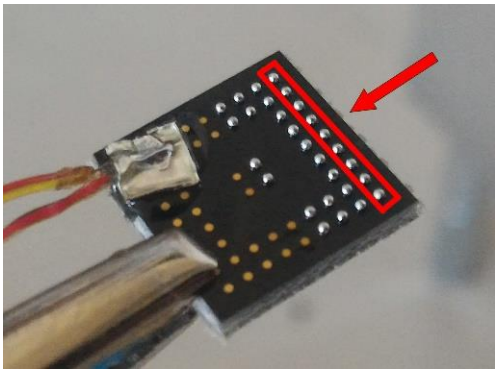


Obrázek 67: Principiální znázornění polohy infračervených zářičů v průběhu pájení: A) ze spodní strany, (2) z horní strany a (3) z horní i spodní strany současně [82]

Výzkum uvedený v této kapitole byl publikován v impaktovaném časopise *Journal of Electrical Engineering* (viz [82]) a na konferenci *EMPC 2017* (viz [83]).

5.1 Příprava testovacích vzorků

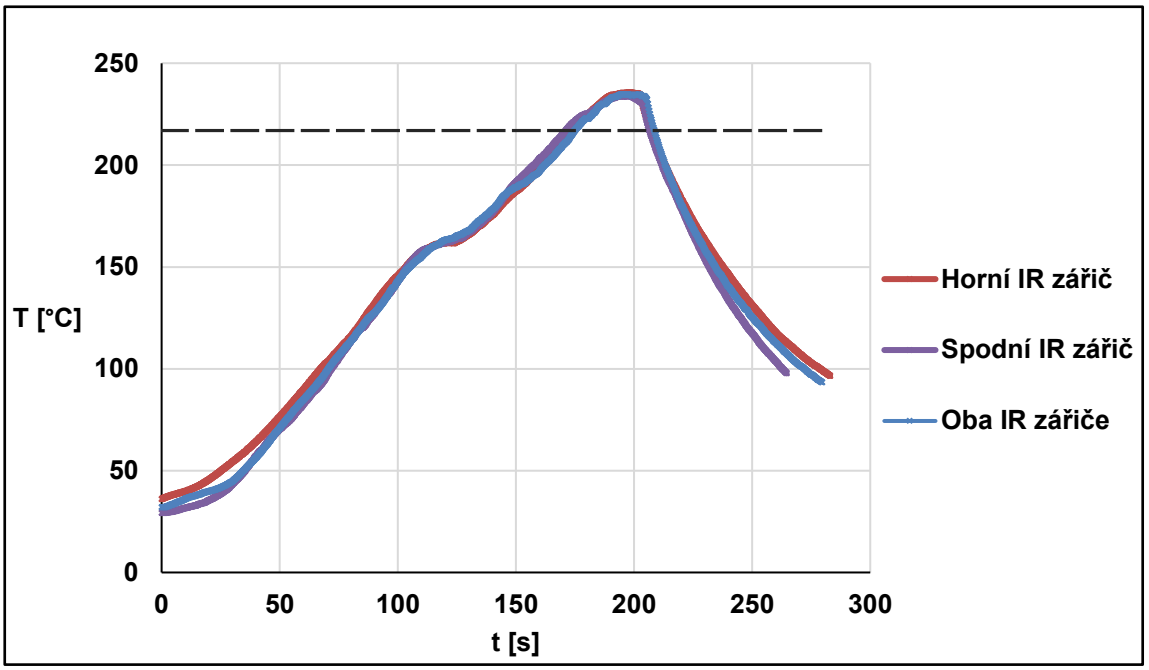
Dummy BGA pouzdro s pájkovými kuličkami je znázorněno na obrázku 68. Červená šipka ukazuje směr proudění vzduchu od chladícího ventilátoru a také směr testování střihové síly.



Obrázek 68: BGA pouzdro připravené na proces pájení [83]

Druhým krokem u vytváření testovacích vzorků byl proces pájení. Osazené pájkové kulové preformy na BGA pouzdře byly zapájeny pomocí stanice *Power Tower*. Pájecí profily byly optimalizovány podle doporučení výrobce pájkových kulových preforem a výrobce tavidla (NeVo, Shenmao Technology Inc.) se zaměřením na velikost BGA pouzdra. Hlavním kritériem bylo sjednocení základních parametrů pájecích profilů

pro všechny tři směry ohřevu, jak je znázorněno na obrázek 69. Tím byly dosaženy stejné podmínky z pohledu množství tepla dodaného při procesu pájení Teplota byla měřena termočlánkem typu K připevněným hliníkovou páskou a UV vytvrditelným lepidlem na horní straně BGA pouzdra (viz obrázek 68). Teplota během pájení byla řízena PID regulátorem R500 od firmy SMART.



Obrázek 69: Teplotní profily pro pájení přetavením slitiny SAC305 pro všechny tři případy proudění tepla [83]

Po nastavení základních parametrů pájecího profilu byl také vypočítán integrál tepla (Qη), tzv. *heating factor*, který určuje množství tepla dodaného v času nad teplotou tavení. Pomocí jeho hodnoty je možné určit dodanou tepelnou energii (aktivační energii), která přímo ovlivňuje tloušťku intermetalických vrstev [84]. Tento parametr byl zvolen pro možnost porovnání s předchozími a budoucími výzkumy v této oblasti. Faktor ohřevu byl vypočítán pomocí výrazu [85]:

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \,, \tag{4}$$

kde t_1 je čas začátku integrace, t_2 je čas konce integrace, T(t) je integrovaná teplota a T_m je teplota tání pájecí slitiny (SAC305).

Základní parametry teplotního profilu (viz obrázek 69), relevantní pro tvorbu a růst intermetalických sloučenin, jsou shrnuty v tabulce 9. Hodnota integrálu teploty navrženého pájecího profilu použitého pro tento výzkum činila 308 s·°C.

Tabulka 9: Parametry pájecího profilu pájecí stanice s infračervenými zářiči

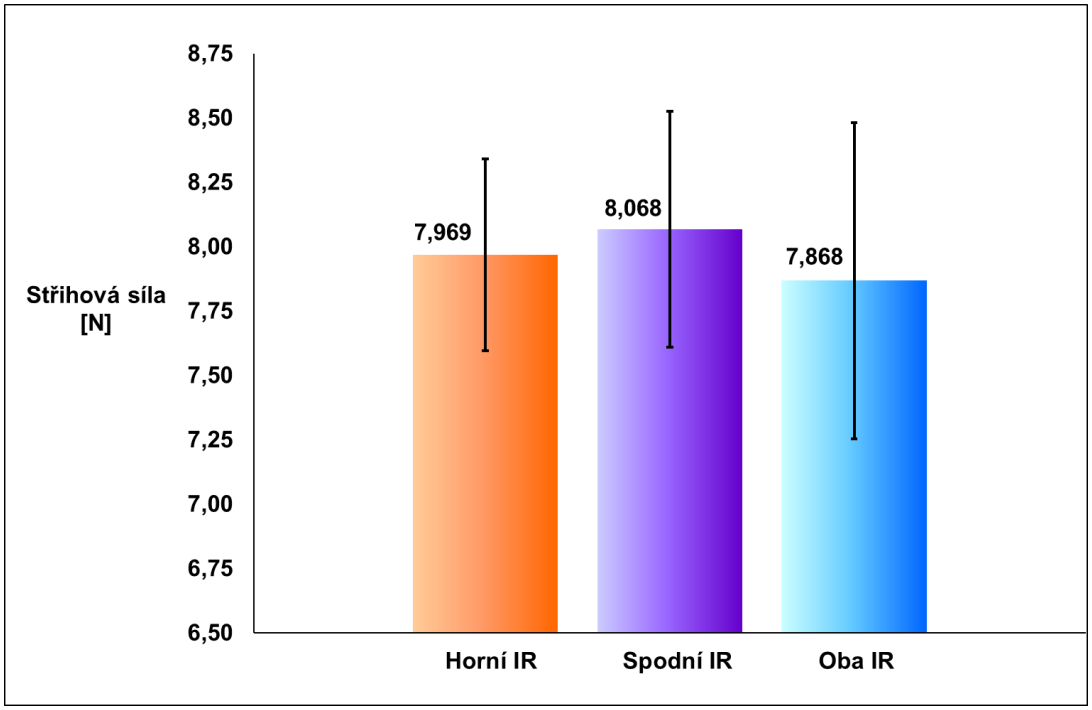
Parametr	**Hodnota**
Rychlost náběhu teploty	1,2 °C/s
Maximální teplota	235 °C
Rychlost chlazení	4 °C/s
Čas nad teplotou tavení	30 s
Integrál teploty	308 s·°C

5.2 Testování a analýzy

Příprava vzorků, destruktivní měření síly ve střihu a analýza intermetalické vrstvy byly provedeny ve stejném sledu a se stejným nastavením parametrů, jako je popsáno v kapitole 4.5.2 Testování a analýzy u charakterizace kulových pájkových vývodu a spojů vytvořených metodou využívající elektrickým proudem přímo vyhřívanou šablonu. Rozdíl byl pouze v pozici testovaných vývodů na sílu ve střihu, jež jsou znázorněny na obrázku 68 červenými obdélníky.

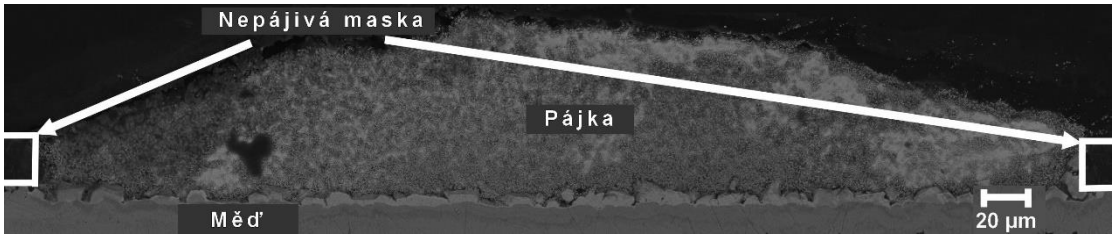
5.3 Výsledky a diskuse

Střihové síly kuliček SAC305 pájených infračervenými zářiči z různých směrů (horní, dolní a oběma směry zároveň) jsou zobrazeny na obrázku 70. Kuličky pájené pouze ze spodní strany vykazovaly největší odolnost ve střihu (8,068 N se směrodatnou odchylkou 0,458 N) při srovnání s pájkovými kuličkami pájenými z horní strany (7,969 se směrodatnou odchylkou 0,373 N) a oběma směry zároveň (7,868 N se směrodatnou odchylkou 0,613 N). Pájkové kuličky pájené z horní strany vykazovaly větší střihovou sílu než kuličky pájené z obou směrů. Nicméně, jak je zřejmé z obrázku 70, průměrné hodnoty pevnosti ve střihu pro všechny směry pájení se příliš nelišily a zároveň byly jejich hodnoty navzájem statisticky nevýznamné. Velkou směrodatnou odchylku mohla způsobit poloha pájkových kuliček na testovacím vzorku BGA. Umístění pájkových kuliček ovlivnilo růst intermetalických sloučenin na rozhraní pájka a pájecí ploška a vytvoření prokládané morfologické struktury v oblasti nad tímto rozhraním, což je vidět na výsledcích z obrázku 70 a dokazuje to i publikace [86].



Obrázek 70: Střihové síly 500 µm pájkových kuliček SAC305 pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [83]

Obrázek 71 z rastrovacího elektronového mikroskopu (BSE) ukazuje pájecí plošku se zbytkovou pájkou po zkoušce střihové síly. Všechny pájkové kuličky vykazovaly utržení v úrovni nepájivé masky, tzv. *ductile failure*.

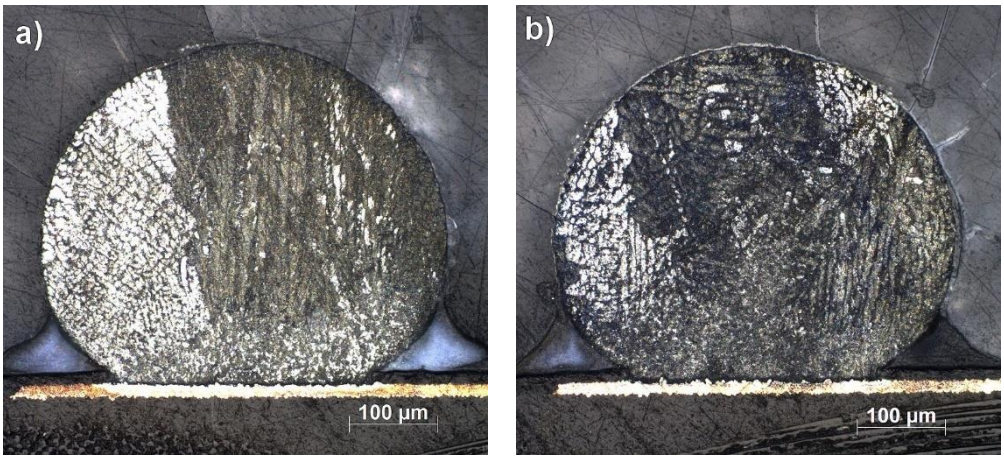


Obrázek 71: Část pájkové kuličky po provedení střihové zkoušky [83]

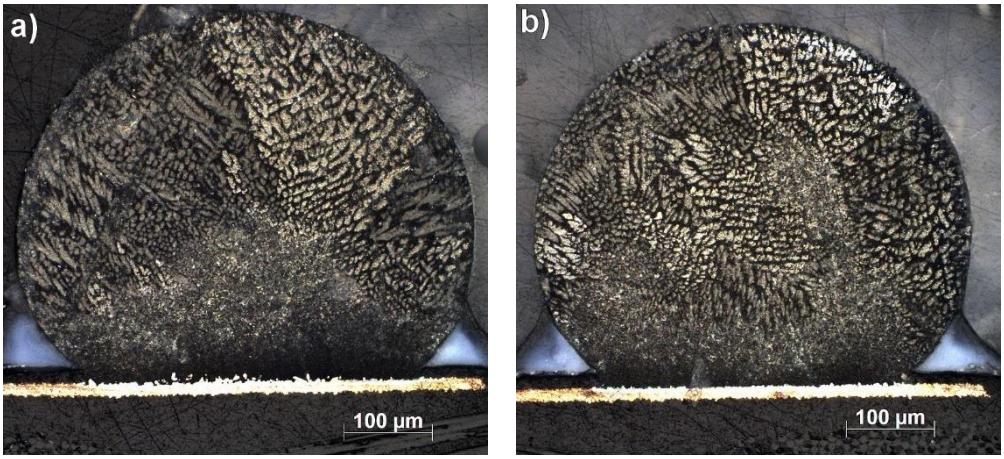
Následující analýza byla zaměřena na hodnocení vnitřní struktury pájkových kuliček. Struktura byla pozorována na vzorcích po provedení metalografického výbrusu.

Snímky z optického mikroskopu na obrázcích 72-a) a 72-b) zachycují vnitřní strukturu kulových pájkových vývodů vytvořených přetavením horním IR topným tělesem. Vícezrnná morfologická krystalografie cínových dendritů je vidět na obou fotografiích. Blíže je tato orientace popsána na obrázku 72-a), jež ukazuje jasnější oblast vlevo (přibližně 1/3 kulového pájkového vývodu), která se vytvořila s jinou krystalografickou orientací, než tmavší plocha ve středu (přibližně 1/3 kulového pájkového vývodu). Vícezrnná orientace cínových dendritů byla viditelná i na pravé straně vývodu, s jasnějšími a tmavšími oblastmi (přibližně 1/3 kulového pájkového

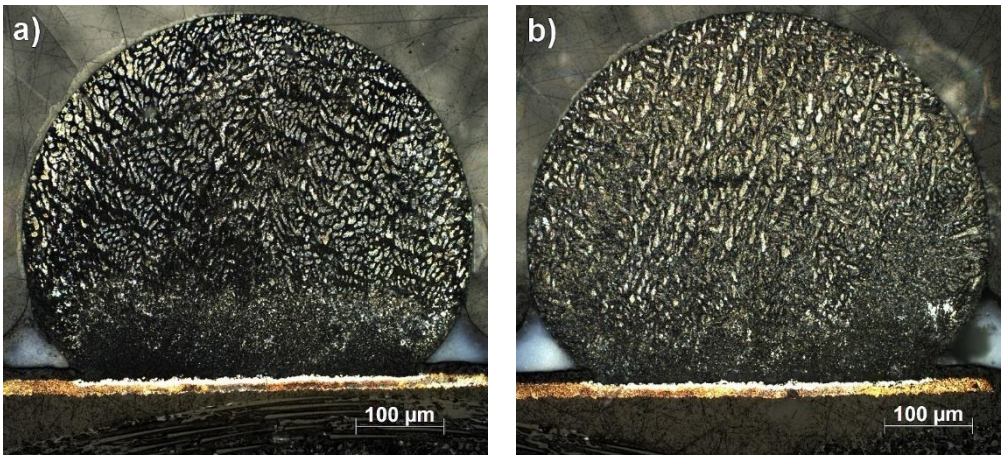
vývodu). Vzorek po procesu přetavení oběma IR topnými tělesy, tzn. horní i spodní ohřev, vykazoval podobnou strukturu, což je viditelné na obrázcích 73-a) a 73-b). Nicméně cínové dendrity byly pravidelněji orientovány v různých směrech inklinujících ke středu ve srovnání s dendrity na vzorcích přetavených horním IR ohřevem, kde byla orientace ze spodní části kulového vývodu směrem nahoru. Pájková kulička přetavená dolním IR ohřevem (obrázky 74-a) a 74-b)) vykazovala pravidelně uspořádanou orientaci dendritů β-Sn, tzn. jednozrnnou. U všech snímků je viditelná prokládaná struktura ve spodní části kulového pájkového vývodu nad místem intermetalických vrstev na rozhraní pájka a pájecí ploška. Tato struktura je složená z menších krystalů, resp. prokládané struktury β-Sn dendritů. Na základě výsledků nejvíce vzorků pájených horním IR zářičem (Horní IR) a oběma IR ohřevy (Oba IR) vykazovalo vícezrnnou a prokládanou morfologii. Vzorky pájené jen s dolním IR ohřevem vykazovaly převážně jednozrnnou strukturu, ale pak také méně zastoupenou vícezrnnou strukturu. Ztuhnutí, resp. orientace β-Sn dendritů, závisí na koncentraci a teplotních gradientech uvnitř pájkových kuliček [30,34-37]. Arfaei a kol. [44] zjistili, že u pájkové kuličky s jednou krystalografickou orientací dochází k horším výsledkům při termomechanickém namáhání, než je tomu u kuliček s více krystalografickými orientacemi. Nicméně z dříve získaných výsledků v jiných vědeckých pracích je patrné, že vzorky budou muset být podrobeny únavovým testům pro stanovení vlivu takto uspořádané struktury krystalů [44,87,88].



Obrázek 72: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené horním IR ohřevem – – vzorek a), vzorek b) [83]



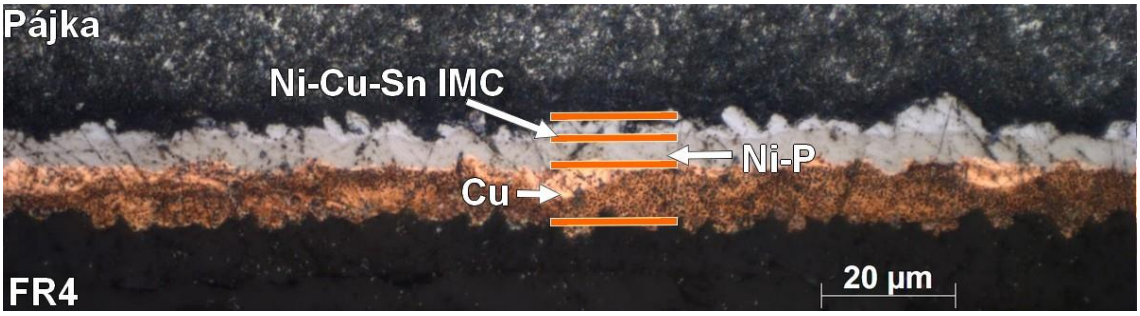
Obrázek 73: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené oběma IR ohřevy – vzorek a), vzorek b) [83]



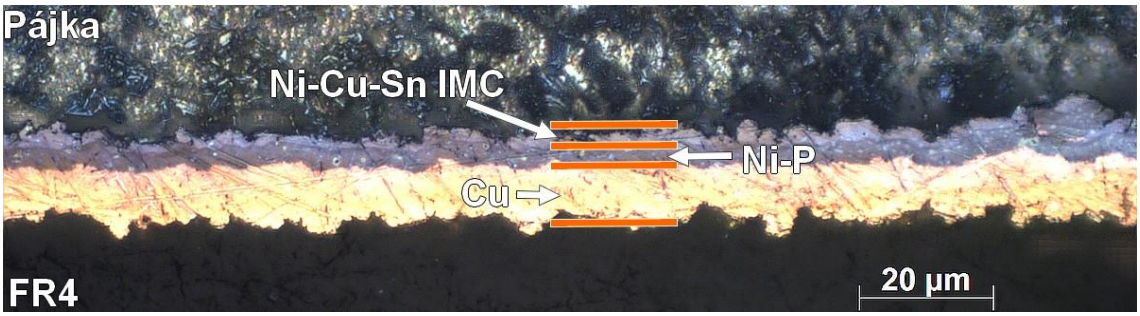
Obrázek 74: Metalografický výbrus pájkové kuličky pájené spodním IR ohřevem – – vzorek a), vzorek b) [83]

Na obrázcích 75, 76 a 77 jsou vyobrazeny snímky po provedení metalografických výbrusů a mokrého leptání. Intermetalická vrstva na obrázku 75 (Spodní IR) ukazuje nejmenší zrna ve srovnání s ostatními na obrázcích 76 (Horní IR) a 77 (Oba IR). Vzorky pájené horním a spodním topným tělesem (obr. 77) vykazovaly největší velikosti zrna intermetalické vrstvy. Režim zlomeniny pro zkoušku ve smyku byl tvárný. Proto odolnost kulových pájkových vývodů nebyla ovlivněna intermetalickou vrstvou (viz obrázek 71). Z jiných výzkumných prací je známo, že se během teplotního cyklování, resp. životního cyklu spoje, mohou vyskytnout trhliny vlivem křehnutí nebo mezifázové trhliny, které ovlivňují kvalitu a funkčnost spoje [86]. U zrychleného stárnutí tedy rozhoduje počet cyklů a samozřejmě nastavené parametry, jako je čas a teplota jednotlivých opakování [89]. Dalším významným spolehlivostním testem je izotermické stárnutí, které také z určitého pohledu určuje spolehlivost pájeného spoje [90]. Obecně platí, že intermetalické sloučeniny narůstají ve formacích s většími velikostmi výčnělků, resp.

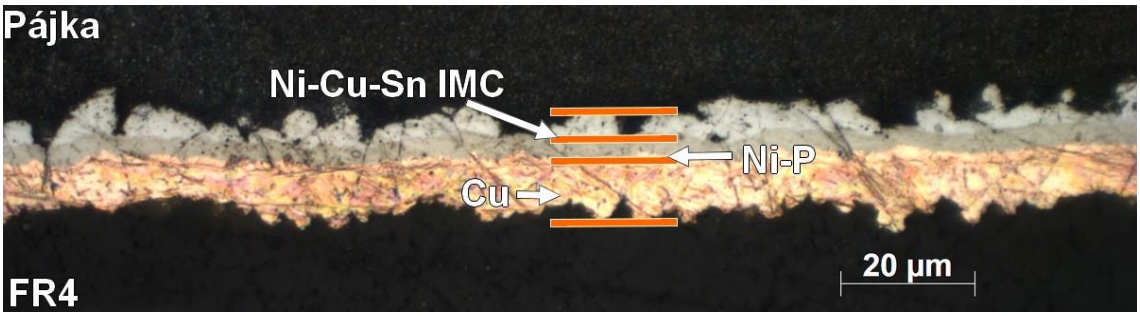
tlouštěk vrstev s vyšší teplotou a časem expozice [91]. Příliš silná intermetalická vrstva znamená mechanicky méně odolný pájený vývod, resp. spoj [92]. Výše zmíněné informace naznačují, že by mohlo izotermické stárnutí napomoci zjistit vliv intermetalické vrstvy na pevnost ve smyku pájky, Spolehlivostní testy však nebyly předmětem tohoto výzkumu.



Obrázek 75: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené horním IR ohřevem [83]

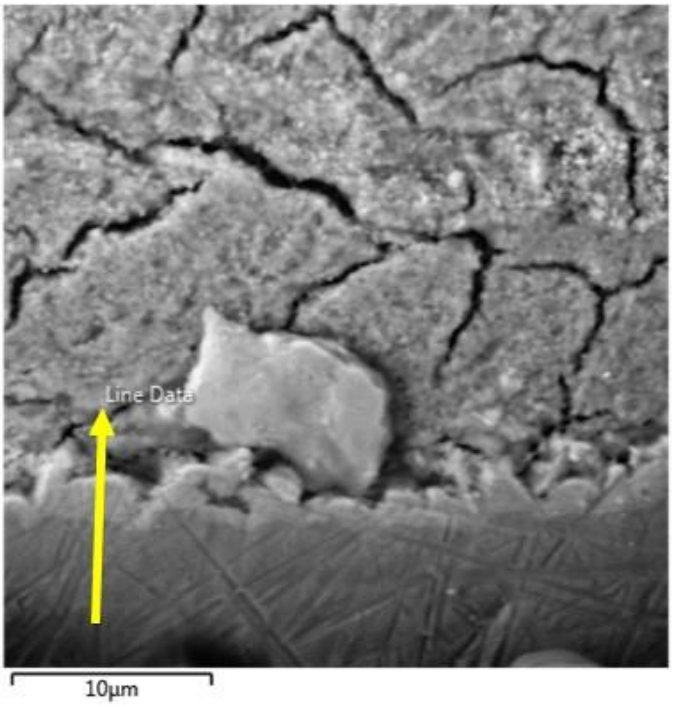


Obrázek 76: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené spodní IR ohřevy [83]



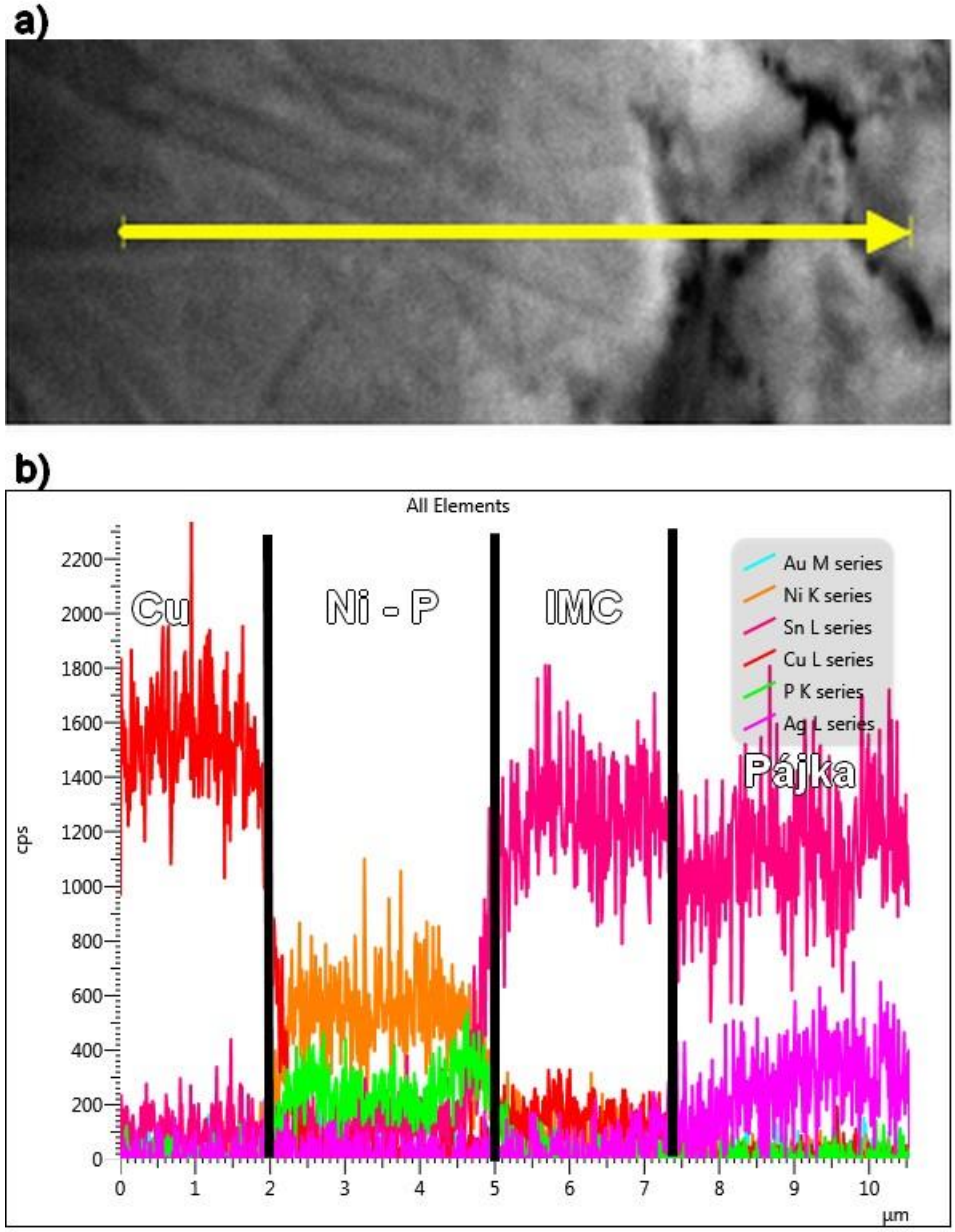
Obrázek 77: Intermetalická vrstva pájkové kuličky pájené oběma IR ohřevy [83]

Pro ověření prvkového složení intermetalických vrstev byla provedena analýza pomocí metody energiově dispersní spektroskopie (EDS, resp. EDX) integrované v elektronovém mikroskopu Tescan MIRA II. Analyzovaná oblast je ukázána na obrázku 78 žlutou šipkou. Analyzovány tedy byla celá pájecí ploška (měď) s povrchovou úpravou ENIG, intermetalická vrstva a část pájky nad intermetalickou vrstvou.



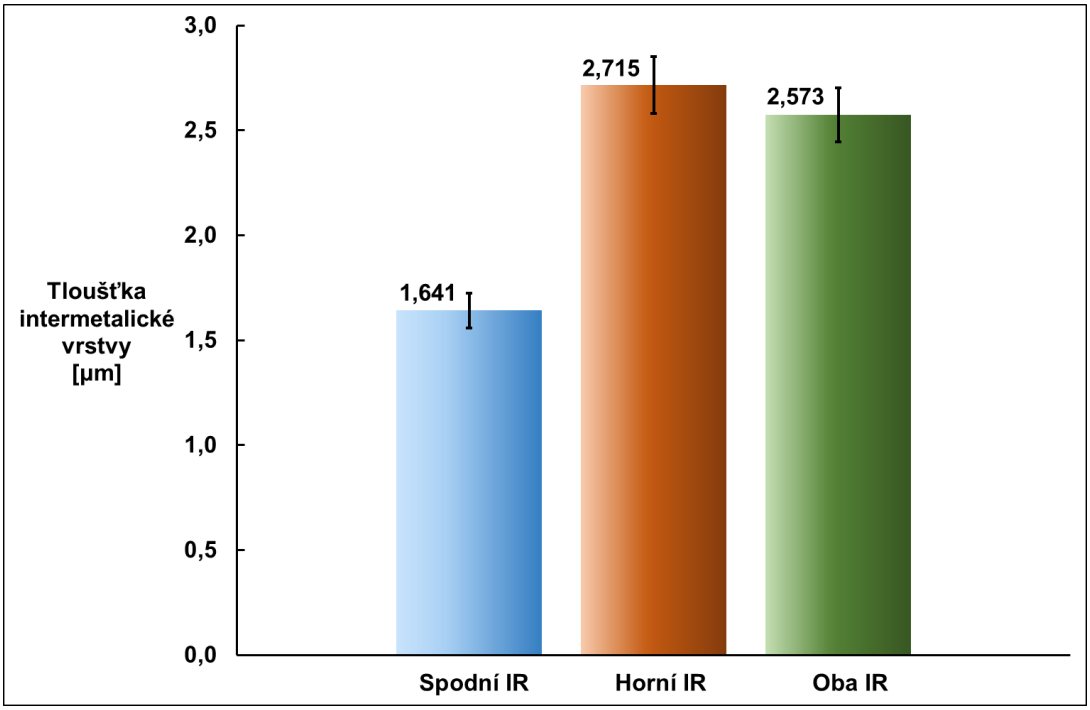
Obrázek 78: Analyzovaná oblast metodou EDX/SEM (žlutá šipka) [83]

Výsledky z EDX analýzy jsou graficky znázorněny na obrázku 79. Žlutá šipka z obrázku 78 je totožná se šipkou na SEM snímku 79-A) a ukazuje směr analýzy v ose x, tzn. 0 = začátek šipky a 10.5 = konec šipky. Graf na obrázku 79-B) popisuje předpokládané rozložení a zastoupení prvků mědi, niklu a cínu v intermetalické vrstvě na rozhraní mezi pájkou a pájecí ploškou. V grafu jsou také znázorněny jednotlivé přechody analyzovaných vrstev (pájecí ploška – Cu, povrchová úprava ENIG – Ni-P, intermetalická vrstva – IMC a pájka – Pájka). Výsledky tedy ověřují předpoklad složení konečné povrchové úpravy ENIG a také intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška.



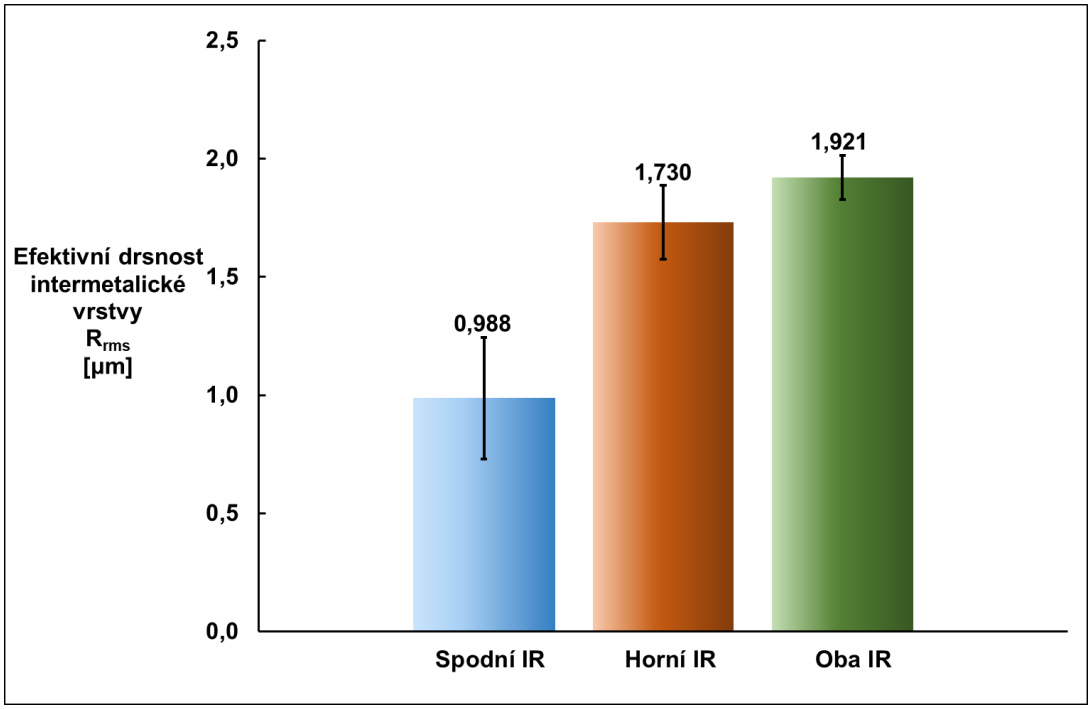
Obrázek 79: a) Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu a b) EDX analýza rozhraní mezi pájkou a pájecí ploškou [83]

Další částí tohoto výzkumu bylo zjištění střední hodnoty tloušťky (*mean surface level*) a efektivní hodnoty drsnosti intermetalické vrstvy. Obrázek 80 vyjadřuje grafickou závislost tloušťky intermetalické vrstvy pro všechny tři případy polohy infračervených zářičů. Výsledky ukazují nejmenší tloušťku u vzorků pájeného spodním infračerveným zářičem, tedy 1,641 µm se směrodatnou odchylkou 0,223 µm. Vzorky zapájené oběma zářiči simultánně vykazovaly tloušťku intermetalické vrstvy blíže ke vzorkům vytvořeným horním zářičem, a tedy 2,573 µm se směrodatnou odchylkou 0,285 µm. Největší tloušťka (2,715 µm se směrodatnou odchylkou 0,445 µm) byla změřena u vzorků pájených pouze horním zářičem.



Obrázek 80: Tloušťka intermetalických vrstev pro všechny tři případy polohy infračervených zářičů (horní ohřev, spodní ohřev a oba ohřevy) [82]

Drsnost intermetalických vrstev je znázorněna na obrázku 81. Nejmenší hodnoty drsnosti (0.988 µm se směrodatnou odchylkou 0,258 µm) dosahovaly vzorky pro spodní ohřev, což potvrzuje předpoklad z optické kontroly snímků 75, 76 a 77. Také u vzorků pro horní ohřev a vzorků pro oba simultánně probíhající ohřevy byly potvrzeny předpoklady z optické kontroly. Vzorky pro horní ohřev vykazovaly drsnost 1,730 µm se směrodatnou odchylkou 0,157 µm a vzorky pro oba ohřevy 1,921 µm se směrodatnou odchylkou 0,093 µm.



Obrázek 81: Drsnost intermetalických vrstev pro všechny tři případy polohy infračervených zářičů (horní ohřev, spodní ohřev a oba ohřevy) [82]

5.4 Shrnutí a diskuze dosažených výsledků

Hlavními parametry, u kterých byl zjišťován vliv směru toku tepla při procesu pájení pomocí IR zářičů, byly síla ve střihu, tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška a morfologická krystalografie zrn cínu uvnitř kulového pájkového vývodu.

Výsledky zkoušek síly ve střihu ukázaly vliv směru šíření tepla na kulový pájkový vývod. Prvním důležitým zjištěním bylo, že všechny testované pájkové kuličky vykazovaly odtržení v oblasti pájky nad intermetalickou vrstvou (tzv. *ductile failure*). To znamená, že intermetalické sloučeniny na rozhraní pájecí ploška a pájka neměly vliv na pevnost ve smyku. Druhé zjištění bylo, že hodnoty pevnosti ve smyku se příliš nelišily a nebyly statisticky významné, ale i tak by mohly výsledky naznačovat vznikající trendy. Získané výsledky z destruktivních zkoušek na střihovou sílu mohou vykazovat větší, resp. statisticky významné rozdíly po provedení izotermického stárnutím vzorků, což bude otázkou budoucího výzkumu.

Orientace zrn u vzorků přetavených spodním IR zářičem ukázala uspořádanější orientaci β-Sn dendritů ve srovnání se vzorky pájenými horním a oběma IR zářiči.

Intermetalická vrstva na rozhraní pájka a pájecí ploška vykazovala různé drsnosti a různé velikosti zrna v návaznosti na směr proudění tepla při procesu pájení.

Oba IR vzorky byly charakterizovány největší drsností a velikostí zrna. Spodní vzorky IR vykazovaly nejmenší drsnost a velikost zrna.

Výsledky analýzy rozhraní pájka-měděná ploška vykazovaly rozdílné parametry z pohledu tloušťky intermetalické vrstvy a její drsnosti. Základním vstupním parametrem, který mohl ovlivnit výsledky testu, byl pájecí profil. Pájecí profily pro všechny tři případy polohy infračervených zdrojů tepla jsou vidět na obrázku 2. Pro exaktní podložení správného nastavení teplotních profilů byl použit výpočet topného faktoru (*heating factor*), který napomáhá při optimalizaci pájecího profilu z pohledu řízení spolehlivosti, resp. opakovatelnosti, procesu pájení a kvality výsledného pájeného spoje [62, 93-95].

Rozdílná tloušťka intermetalické vrstvy mohla být částečně způsobena polohou zpětnovazebního termočlánku pro řízení teplotního profilu. Termočlánek byl připojen na horní část vzorku. Parametry pájecích profilů pro všechny tři případy jsou stejné, ale intenzita tepelného toku mohla být ovlivněna polohou infračervených ohřívačů a polohou zpětnovazebního termočlánku. Pájecí kuličky byly ohřívány přímo pomocí horního infračerveného topného tělesa (v případě oba IR i horní IR). Zatímco při použití spodního infračerveného topného tělesa byly pájkové kuličky ohřívány pouze pomocí vzorky BGA pouzdra. Tím mohl být zapříčiněn rozdíl v dodané tepelné energii, resp. aktivační energii, která rozhoduje o vytvoření a tloušťce intermetalické vrstvy.

Dalším faktorem, který mohl ovlivnit tloušťku, a především drsnost intermetalické vrstvy, byl pohyb tekuté pájky v důsledku tepelného gradientu. Pohyb uvnitř rozpuštěné pájky (Marangoniho efekt, přirozená konvekce apod.) přispívá do jisté míry k růstu intermetalických krystalů a jejich rozložení [96-98]. V publikaci [83] byl určen vliv směru proudění tepla na krystalografickou orientaci pájkových kuliček z materiálu SAC305, a to konkrétně na vytvoření více center s různými krystalografickými orientacemi v objemu pájky po dodání tepla v procesu pájení z horní strany a obou stran současně (horní a spodní ohřev). Výzkum [99] popisuje fenomén, kdy aplikace stejnosměrného elektrického proudu na kapku cínové pájky umístěné na měděném povrchu ovlivňuje smáčivost a tvorbu intermetalické vrstvy. Tento jev byl způsoben kombinací Marangoniho efektu a elektromigračními jevy. Poměr mezi účinkem Marangoniho efektu a přirozenou konvekcí na intermetalickou fázovou reakci však není znám. V této oblasti je zapotřebí dalšího výzkumu. Největší podíl na vývoji růstu intermetalické vrstvy měl nejspíše fyzikální jev termomigrace, jež byl potvrzen prací publikovanou v roce 2015 [29]. Vlivem teplotního gradientu docházelo k termomigraci atomů mědi ke studenějšímu konci, čímž se vytvořila ochuzená oblast o měď na teplém konci a tím pádem došlo k vytvoření intermetalické vrstvy s větší tloušťkou na studeném konci. Podobnost s výzkumem vlivu směru proudění tepla při procesu pájení kulových pájkových vývodů je v rozdílném gradientu teplot v pájkové kuličce po přetavení. Spodní IR ohřev tedy zajistil rozložení teploty tak, že oblasti rozhraní pájka a pájecí ploška byl teplý konec a horní část byl pomyslný studený konec.

Tomuto zjištění odpovídají i výsledky, které potvrdily u vzorků pájených spodním IR ohřevem výrazný rozdíl v tloušťce intermetalické vrstvy v porovnání se vzorky pájenými horním IR ohřevem a oběma IR ohřevy.

Tloušťku intermetalických vrstev je ve fázi pájení kulových vývodů (*ball-attach*), resp. *reballing*, nutno zajistit co nejmenší, jelikož se s každým dalším procesem přetavení zvětšuje. Po montáži pouzdra BGA na DPS může dojít, z pohledu životního cyklu pájeného spoje, ke snížení spolehlivosti výsledného spoje vlivem tloušťky intermetalických vrstev a tím pádem ohrozit jeho funkčnost.

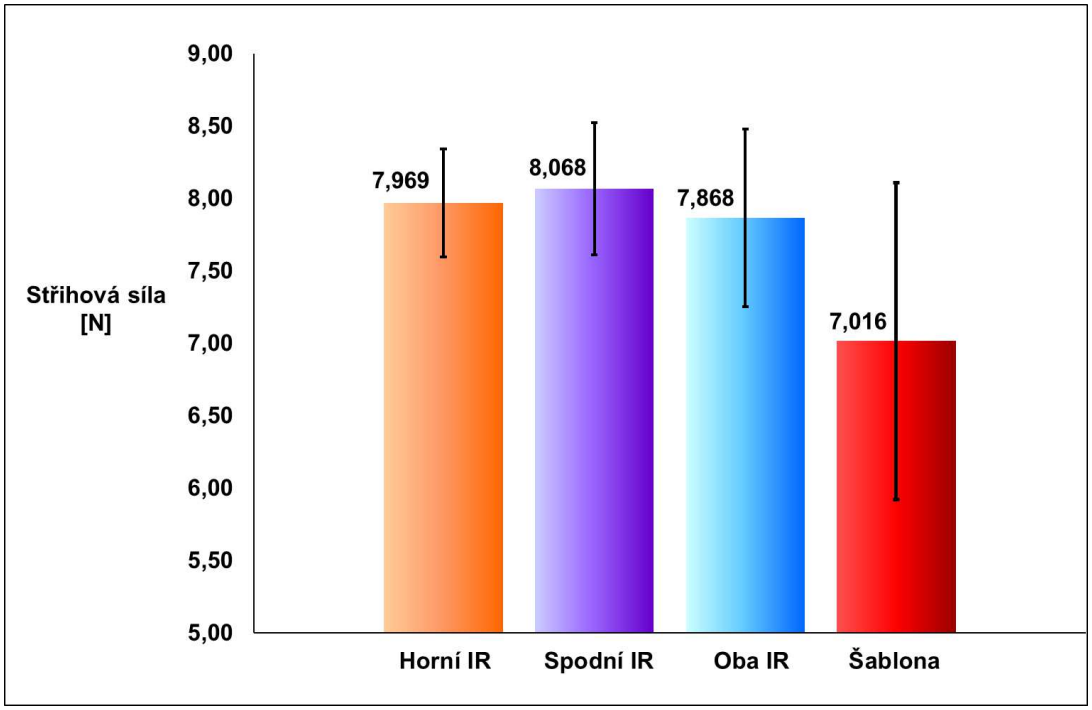
Výsledky měření tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy odpovídaly předpokladům, jež jsou shrnuty v kapitole 1.4. Drsnost je přímo spojena s tloušťkou intermetalické vrstvy, jak je popsáno v publikaci [100], což odpovídá i neměřeným hodnotám v této práci.

Výsledky tohoto výzkumu doplňují již existující experimenty popsané v literatuře (viz kapitola 1).

6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ CHARAKTERIZACE KULOVÝCH PÁJKOVÝCH VÝVODŮ

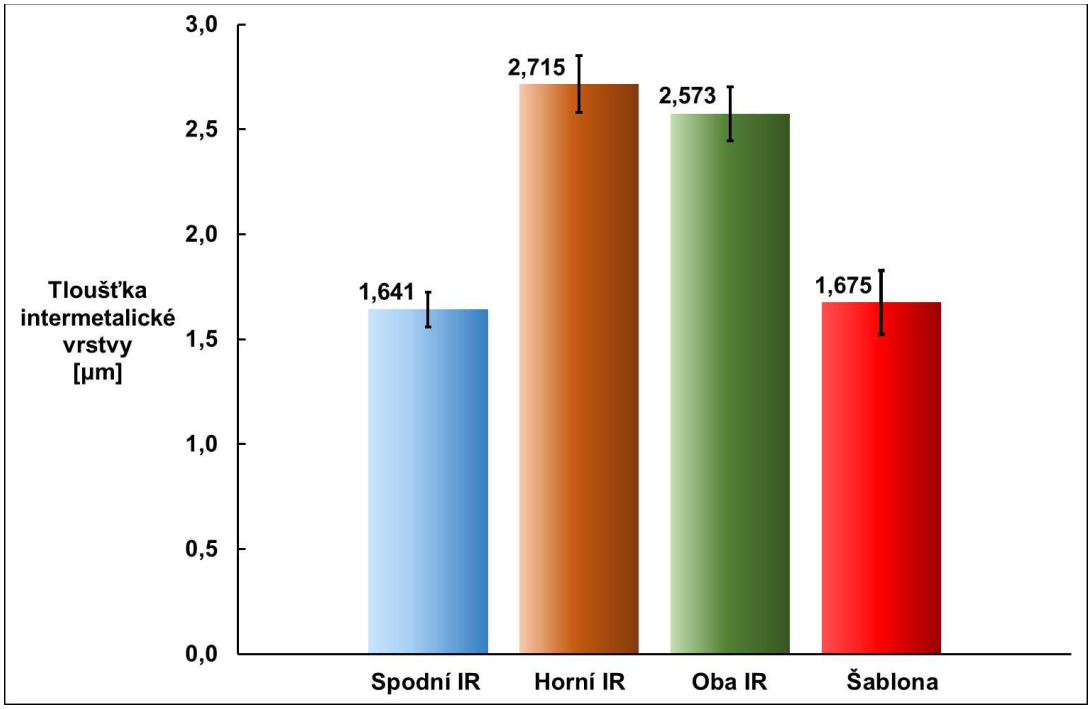
Tato kapitola se zabývá porovnáním výsledků z měření střihové síly a tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy z obou hlavním vědeckých částí této dizertační práce, tedy části charakterizace vývodů vytvořených inovativní metodou proudem přímo vyhřívanou šablonou (výsledky dále pojmenovány Šablona) a částí výzkumu vlivu proudění tepla z různých směrů ohřevu při procesu pájení na kulové pájkové vývody (výsledky dále pojmenovány Horní IR, Spodní IR a Oba IR).

Obrázek 82 ukazuje souhrnné výsledky z destruktivního měření střihové síly pro obě oblasti výzkumu. Z naměřených hodnot lze určit, že byla průměrná hodnota střihové síly menší u vývodů pájených inovativní metodou, než tomu bylo v případě vzorků vytvořených při působení IR zářičů z různých směrů při procesu pájení. Avšak pro tuto průměrnou hodnotu byla směrodatná odchylka větší. Tento výsledek mohl být způsoben měřením vývodů pájených horním, spodním a oběma IR ohřevy jen na okraji BGA pouzdra. Toto zjištění podporuje i publikace [86]. Další vliv mohl plynout z nemožnosti přímého porovnání použitých pájecích profilů. Na závěr je třeba zopakovat, že všechny hodnoty střihových sil v grafu na obrázku 82 jsou v mezích pro kvalitně vytvořený kulový pájkový vývod.



Obrázek 82: Střihové síly u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [83] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony

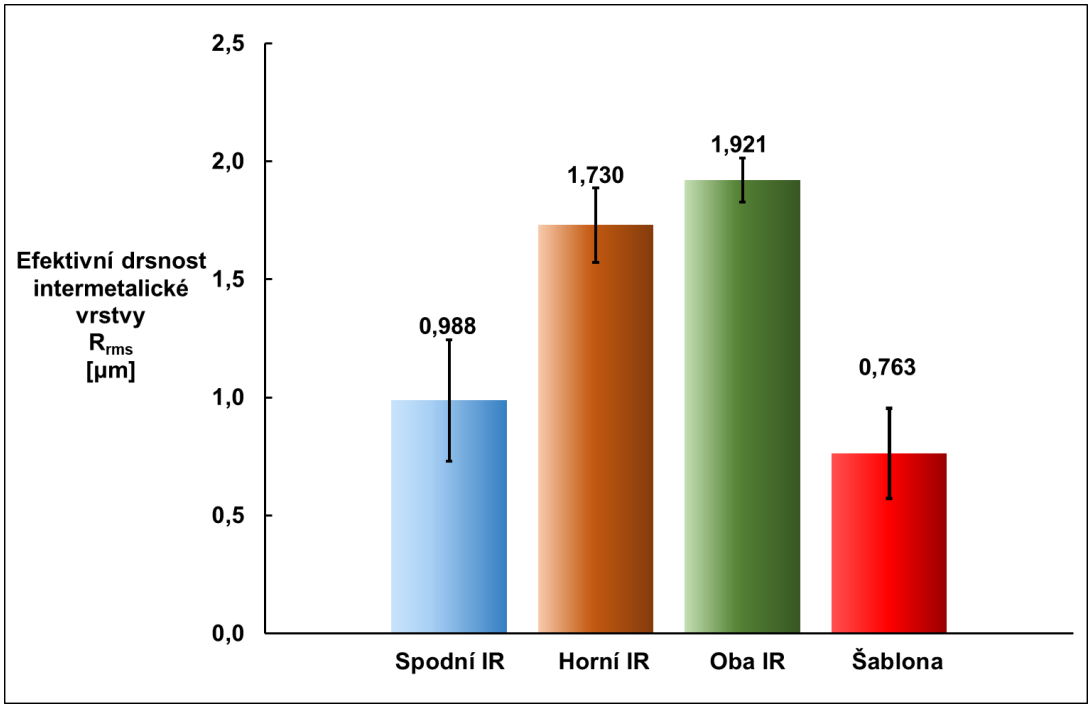
Výsledky z měření tloušťky intermetalické vrstvy pro obě výzkumné části této práce jsou na obrázku 83. Kulové pájkové vývody vytvořené inovativní metodou měli téměř totožnou tloušťku intermetalické vrstvy (1,675 ± 0,152 µm), jako vývody pájené spodním IR ohřevem (1,675 ± 0,223 µm). Tak jako v předešlém případě, u výsledků pevnosti ve střihu, není možné porovnat pájecí profily použité v těchto výzkumných částech. Z toho plyne, že není možné rozhodnout, jestli je inovativní metoda lepší z pohledu predikce tloušťky intermetalické vrstvy. Avšak na základě výsledků uvedeným v jiných výzkumných pracích (viz kapitola 1.4) je možné vyvodit, že dosažená hodnota tloušťky intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška je dostatečná pro zajištění mechanické pevnosti a zároveň menší tloušťky z pohledu životnosti výsledného spoje. Z toho plyne možnost využití metody bez nutnosti další optimalizace, pokud není brán v potaz pájecí profil, jež tento měřený parametr výrazným způsobem ovlivňuje.



Obrázek 83: Drsnost intermetalických u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [82] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony

Porovnání hodnot drsnosti intermetalické vrstvy u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) a metodou proudem přímo vyhřívané šablony shrnuje obrázek 84. Nejmenší drsnost intermetalické vrstvy vykazovaly vzorky pájené inovativní metodou proudem přímo vyhřívané šablony s hodnotou 0,763 ± 0,190 µm, kde byla tato hodnota z pohledu statistické významnosti stejná (ověřena statistická nevýznamnost), jako u vzorků pájených spodním IR ohřevem (0,988 ± 0,258 µm). Jejich průměrná hodnota se sice lišila, ale po provedení testu statistické významnosti byl vyvozen závěr, že nejsou jejich rozdíly statisticky významné.

Znovu je potvrzen předpoklad zmiňovaný v kapitole 1.4, že drsnost intermetalické vrstvy souvisí s její tloušťkou.



Obrázek 84: Drsnost intermetalických vrstev u vzorků pájených z různých směrů infračerveného zářiče (Horní IR, Spodní IR a Oba IR) [82] a metodou proudem přímo vyhřívané šablony

Z výsledků porovnání obou částí výzkumných částí této práce tedy vyplývá, že je vyvinutá inovativní metoda určená pro pájení kulových pájkových vývodů vhodná pro průmyslové využití, alespoň z pohledu jakosti.

ZÁVĚR

Splnění hlavních cílů této dizertační práce je dokumentováno vývojem a optimalizací inovativní metody pro vytvoření, resp. obnovení, kulových pájkových vývodů na BGA pouzdrech. Dosažené výsledky jsou podloženy charakterizací základních vlastností zaměřenou na sledování z mechanické pevnosti pájeného spoje (smyková síla) a jeho vnitřní mikrostruktury (morfologické uspořádání krystalů, tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška).

V průběhu práce byl experimentálně vybrán materiál přímo vyhřívané šablony (plech z nerezové oceli AISI 304) a následně byl proveden návrh topologie šablony s optimalizací rozložení teploty v aktivní oblasti. Následně byl navrhnut a vyroben funkční vzorek pájecí stanice s elektrickým proudem přímo vyhřívanou šablonou pro zajištění opakovatelnosti při výzkumu metody. Díky získání projektu TAČR GAMA na komercializaci patentované myšlenky byl také vytvořen prototyp pájecí stanice se všemi potřebnými funkcemi pro zajištění celého procesu osazení a přetavení pájkových kuliček. Kromě toho byla provedena analýza měření teploty šablony a pouzdra BGA při procesu pájení s cílem zjištění menšího tepelného zatížení v porovnání s jinými metodami, a také byla ověřena životnost šablony pomocí teplotního cyklování s výsledným stanovením možnosti jejího použití při více jak 550 pájecích cyklech. V závěru 4. kapitoly byla na základě experimentálního výzkumu popsána charakterizace metody z pohledu střihové síly, morfologického uspořádání krystalů a tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy na rozhraní pájka a pájecí ploška. Na závěr bylo provedeno porovnání nové inovativní metody se stávajícími podobnými metodami využívanými v průmyslu společně s analýzou a vyhodnocením výhod a nevýhod. Výsledky jsou shrnuty v kapitole 4.7. První cíl dizertace byl tedy splněn.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, praktickým výstupem výzkumu řešeného v této práci je patent CZ 307441 [6] a užitný vzor PUV 2019-36422 [7].

V částečné návaznosti na charakterizaci nové metody pro obnovení kulových pájkových vývodů byl proveden výzkum vlivu směru toku tepla při procesu pájení přetavením infračervenými zářiči. Byl zjištěn výrazný vliv na morfologii krystalů uvnitř kulového pájkového vývodu, tloušťku a drsnost intermetalické vrstvy s ohledem na směr toku tepla při procesu pájecí infračervenými zářiči. Avšak přímý vliv na střihovou sílu vývodů nebyl prokázán, jelikož výsledky byly statisticky nevýznamné, resp. z pohledu statistiky mezi výslednými hodnotami nebyl patrný výrazný rozdíl. Tato část práce tedy splnila druhý cíl dizertace.

Na závěr byly výsledky charakterizací kulových pájkových vývodů přetavených inovativní metodou a IR zářiči umístěných z horní strany, spodní strany a obou stran analyzovány a porovnány z pohledu střihové síly a parametrů intermetalické vrstvy na

rozhraní pájka a pájecí ploška (tloušťka, drsnost). Výsledky jsou shrnuty v kapitole 5.4. Poslední, třetí část dizertační práce, byla splněna.

Na závěr lze konstatovat, že tato práce konkrétně přispěla k detailnějšímu pochopení formování spoje a jeho výsledných vlastností, což umožňuje lepší predikci a nastavení procesu pájení. Tím se výrazně zvyšuje kvalita vytvářených kulových pájkových spojů.

Doporučení pro budoucí výzkum, vývoj a optimalizaci ve výše zmíněných oblastech jsou následující:

- Optimalizace návrhových pravidel pro zajištění topologie přímo vyhřívané šablony s rovnoměrnějším rozložením teplot v aktivní oblasti bez rozdílu velikosti pouzdra BGA.
- Predikce teploty na BGA pouzdře bez nutnosti jeho měření během procesu pájení, tzn. určení z teploty přímo vyhřívané šablony.
- Definice přestupu tepla mezi šablonou, pájkovou kuličkou a pouzdrem BGA (přestup tepla v rozměrech řádu desítek a stovek μm).
- Stanovit pro krystalografickou morfologii celého objemu pájky přesný poměr, např. procentuální podíl, mezi jednotlivými typy struktur (jednozrnná, vícezrnná, částečně prokládaná, prokládaná).
- Vyhodnotit krystalografické orientace jednozrnné struktury a jednotlivých oblastí u vícezrnné struktury, např. technikou difrakce zpětně odražených elektronů (*Electron Backscatter Diffraction* – EBSD).
- Realizovat testy spolehlivosti, jako jsou například teplotní cyklování nebo izotermické stárnutí kulových pájkových vývodů, případně spojů a výsledky využít pro další optimalizaci v souladu s vývojem v oblasti vytváření kulových vývodů, včetně jejich miniaturizace.

Výstupy přímo související s dizertační prací byly následující:

- OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer. Journal of Electrical Engineering, 2018, vol. 69, č. 4, s. 305-310. ISSN: 1339-309X.
- OTÁHAL, A.; SOMER, J.; SZENDIUCH, I. Influence of heating direction on BGA solder balls structure. In Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, 2017 21st European. 2018. s. 1-4. ISBN: 978-0-9568086-4-6.
- OTÁHAL, A.; ŘEZNÍČEK, M.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; SKÁCEL, J.; Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno, Veveří, Česká republika: Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA. 33222, užitný vzor. (2019)
- OTÁHAL, A.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří, CZ: Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu. 307441, patent. (2018)

LITERATURA

[1] ANYSILICON. Semiconductor Packaging History and Trends [online]. ©2011-2017 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: http://anysilicon.com/semiconductor-packaging-history-trends/

[2] GALLIEO, K. Milestones in Packaging [online]. 2006 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: http://www.et-trends.com/files/Milestones_in_Packaging.pdf

[3] TOTTA, P.; SOPHER, R. SLT Device Metallurgyandits Monolithic Extension, IBM J. of Research and Development, 1969, roč. 13, č. 3, s. 226; US Patent 3,429,040

[4] MOTOROLA SOLUTIONS INC. Ultra high density pad array chip carrier. Vynálezci: Bruce J. Freyman, Dale Dorinski, John Shurboff. US Patent 4,700,276. 13. 10. 1987.

[5] PLANKENSTEINER, M.; CLOWES, A. *Optimization of hardware resources in handheld devices leads to effective power management " Part 2* [online]. 2004 [cit. 2019-09-08] Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1230737

[6] OTÁHAL, A.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří, CZ: Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu. 307441, patent. (2018)

[7] OTÁHAL, A.; ŘEZNÍČEK, M.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; SKÁCEL, J.; Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno, Veveří, Česká republika: Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA. 33222, užitný vzor. (2019)

[8] KENNY, S.; ROELFS, B.; MATEJAT, K.; MAGAYA, T.; MASSEY, R. Electrolytic solder deposit for next generation flip chip solder bumping. 2010 International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology (IMPACT) conference, 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference, Taipei, 2010, s. 1-4. DOI: 10.1109/IMPACT.2010.5699485

[9] BEST. EZReball Reballing Preforms [online]. c2019 [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: https://www.solder.net/products/ezreball

[10] WINSLOW AUTOMATION. SolderQuik® BGA Preforms [online]. c1986-2020 [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: http://www.winslowautomation.com/bga.asp

[11] EZEONU STELLA OGOCHUKWU (June 10th 2013). Laser Soldering, Materials Science - Advanced Topics, Yitzhak Mastai, IntechOpen, DOI: 10.5772/51527. Dostupné z: https://www.intechopen.com/books/materials-science-advanced-topics/laser-soldering

[12] PacTech - Packaging Technologies GmbH. *SB² Laser Solder Jetting Systems* [online]. 2015 [cit. 2020-11-09].

[13] BECKETT, P. M.; FLEMING, A. R.; FOSTER, R. J.; GILBERT, J. M.; WHITEHEAD, D. G. The Application of Semiconductor Diode Lasers to the Soldering of Electronic Components. Optical and Quantum Electronics. 1995. Dostupné z: www.springerlink.com/index/r140g33338565063.pdf. 2013 Feb 24, 27, 1303-1311.

[14] LEA, C. Laser Soldering of Surface Mounted Assemblies. Microelectronics Int. 1987, roč. 4, č. 1, s. 36-42. Dostupné z: www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1666621

[15] BECKETT, P. M.; FLEMING, A. R.; GILBERT, J.M.; WHITEHEAD D.G. Practical Application of Laser Soldering in Electronics Assembly. Proceedings of IEEE Int. Symposium on Ind. Electronics. ISIE'97. 1997, č. 1, s. 59-64. Dostupné z: ieeexplore.ieee.org/iel4/5230/14218/00651791.pdf

[16] ION, J. Laser Processing of Engineering Materials; Principles, Procedures and Industrial Applications. 2005, s. 335.

[17] OTT, B.; ZUEGER, B. J.; KOESTLI, K.; ERNI, D.; SCHAFFNER, T.; BANIC, A.; WEBER H. P.; FRENZ, M. Dye-Enhanced Laser Soldering of Cartilage and Blood Vessels. LaserPhysics. 2002, roč. 12 č. 4, s. 635-640. Dostupné z: www.maik.ru/full/lasphys/02/4/lasphys4_02pdf

[18] KHOSROSHAHI, M. E.; NOURBAKHSH, M. S.; SAREMI, S.; TABATABAEE, F. Characterization of Skin Tissue Soldering using Diode Laser and Indocyanine green: In Vitro Studies. Lasers in Med. Sci. 2010, roč. 25, č. 2, s. 207-212. Dostupné z: link.springer.com/article/10.1007%2Fs10103-009-0679-y

[19] KIRSCH, A. J.; DUCKETT, J. W.; SNYDER, H. M.; CANNING, D. A.; HARSHAW, D. W.; HOWARD, P.; MACARAK E.J.; ZDERIC S.A. Skin Flap Closure by Dermal Laser Soldering: A Wound Healing Model Sutureless Hypospadies Repair. Pedia. Urology (Elsevier). 1999, roč. 50, č. 2, s. 263-272. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090429597002781

[20] WADIA, Y.; XIE, H.; KAJITANI, M. Liver Repair and Hemorrhage Control by using Laser Soldering of Liquid Albumin in a porcine Model, Lasers Surg. Med. 2000, roč. 27, č. 4, s. 319-328. Dostupné z: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11074508

[21] XIONG, Z.; ZOU, X.; WANG, Y.; DING, H. Development and Error Compensation of Laser Soldering System. Assembly Automation. 2010. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.1108/01445151011061109. 2013 Feb 13, 30

[22] RENIL S.; HOPPERT B. Pyrometer Optimized Laser-based Selective Soldering Process; A Proven Process in an Industrial Manufacturing Environment. 2011. Dostupné z: http://dilas.com/assets/media/mediacoverage/DILAS_LTJ_2011_Mar_Pyrometer_optimized_laser-based_selective_soldering_process_MATERIALS_PROCESSING.pdf

[23] CERDA, E. Laser Soldering Applications for RF Shield Rework. Emerging technologies conference Proceedings. 2000. Dostupné z: http://www.pcb-prototype.net/article/Laser_Soldering.html

[24] STRAUSS, R. SMT Soldering Handbook Newnes. 1998, s. 221.

[25] WANG D.; PANTON R. L. Effect of Reversing Heat Flux Direction During Reflow on Void Formation in High-Lead Solder Bumps. ASME. J. Electron. Packag. 2005, roč. 127, č. 4, s. 440-445. DOI: 10.1115/1.2070047.

[26] GOENKA, L.; ACHARI, A. Void Formation in Flip Chip Solder Bumps—Part II,

Proceedings of the 19th IEEE/CPMT Symposium, Austin, TX. 1996, s. 430-437.

[27] PANTON, R. L.; LEE, J. W.; GOENKA, L.; ACHARI, A. Simulation of Void Growth in Molten Solder Bumps, ASME J. Electron. Packag. 2003, roč. 1253, s. 329-334.

[28] WANG, D.; AND PANTON, R. L. Experimental Study of Void Formation in High-Lead Solder Joints of Flip-Chip Assemblies, ASME J. Electron. Packag. 2005, roč. 1272, č. 2, s. 120-126.

[29] ZHAO, N.; ZHONG, Y.; HUANG, M. ET AL. Growth kinetics of Cu6Sn5 intermetallic compound at liquid-solid interfaces in Cu/Sn/Cu interconnects under temperature gradient. Sci Rep 5. 2015, roč. 13491. DOI: 10.1038/srep13491

[30] BOYUK, U.; MARASLI, N. Dependency of eutectic spacings and microhardness on the temperature gradient for directionally solidified Sn-Ag-Cu lead-free solder. MATERIALS CHEMISTRY AND PHYSICS. 2010, roč. 119, č. 3, s. 442-448. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.09.022

[31] KOÇAK, Y.; ENGIN, S.; BÜYÜK, U.; MARAŞLI, N. The influence of the growth rate on the eutectic spacings, undercoolings and microhardness of directional solidified bismuth–lead eutectic alloy. Current Applied Physics. 2013, roč. 13, s. 587-593. DOI: 10.1016/j.cap.2012.10.005.

[32] ÇADIRLI, E.; KAYA, H.; GÜNDÜZ, M. Influence of growth rate on microstructure and microindentation hardness of directionally solidified tin-cadmium eutectic alloy. Surface Review and Letters (SRL). 2009, roč. 16, s. 191-201. DOI: 10.1142/S0218625X09012494.

[33] BAYRAM, Ü.; MARAŞLI, N. Influence of Growth Rate on Eutectic Spacing, Microhardness, and Ultimate Tensile Strength in the Directionally Solidified Al-Cu-Ni Eutectic Alloy. Metallurgical and Materials Transactions B. 2018, roč. 49, s 3293-3305. DOI: 10.1007/s11663-018-1404-7.

[34] HUANG, Y. S.; HSIAO, H. Y.; CHEN, C.; TU, K. N. The effect of a concentration gradient on interfacial reactions in microburaps of Ni/SnAg/Cu during liquid-state soldering, Scripta Materialia. 2012, roč. 66, č. 10, s. 741-744.

[35] LIU, T.; HUANG, Y.; CHEN, C. Concentration Gradient of Ni in Reduced SnAg Thickness in Ni/SnAg/Cu Microbumps during Solid-State Aging, Ecs Solid State Letters V. 2012, roč. 2, č. 2, s. 15-18. DOI:10.1149/2.009302SSL

[36] PARK, M. S.; ARROYAVE, R. Early stages of intermetallic compound formation and growth during lead-free soldering, ACTA materialia. 2010, roč. 58, č. 14, s. 4900-4910.

[37] CHUNG, C. KEY; CHEN, Y.; YANG, T.; KAO, C. Reactions of Sn-4.0Ag-0.5Cu on Cu and Electroless Ni Substrate in Premelting Soldering Process, Journal of Electronic Materials. 2013, roč.42, č. 6, s. 1254-1259. DOI: 10.1007/s11664-013-2582-3

[38] COYLE, R.; PARKER, R.; ARFAEI, B.; MUTUKU, F.; SWEATMAN, K.; HOWELL, K.; LONGGOOD, S.; BENEDETTO, E. The effect of nickel microalloying on thermal fatigue reliability and microstructure of SAC105 and SAC205 solders. Proceedings - Electronic

Components and Technology Conference. 2014, s. 425-440. DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897320.

[39] ARFAEI, B.; MUTUKU, F.; COYLE, R.; COTTS, E.; WILCOX, J. Failure mechanism and microstructural evolution of Pb-free solder alloys in thermal cycling tests: Effect of solder composition and Sn grain morphology. Proceedings - Electronic Components and Technology Conference. 2015, s. 118-126. DOI: 10.1109/ECTC.2015.7159580.

[40] ARFAEI, B.; KIM, N.; COTTS, E. Dependence of Sn Grain Morphology of Sn-Ag-Cu Solder on Solidification Temperature. Journal of Elec Materi. 2012, roč. 41, s. 362–374. DOI: 10.1007/s11664-011-1756-0

[41] PARKS, G.; FAUCETT, A.; FOX, C.; SMITH, J.; COTTS, E. The Nucleation of Sn in Undercooled Melts: The Effect of Metal Impurities. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2014, roč. 66, s. 2311-2319. DOI: 10.1007/s11837-014-1161-2.

[42] ARFAEI, B. ET AL. Effect of Sn Grain Morphology on Failure Mechanism and Reliability of Lead-Free Solder Joints in Thermal Cycling Tests, SMTA Int. 2013, s. 539–550.

[43] LIBOT, J. B.; ALEXIS, J.; DALVERNY, O.; ARNAUD, L.; MILESI, P.; DULONDEL, F. Microstructural evolutions of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joints during thermal cycling. Microelectronics Reliability. 2018, roč. 83, s. 64-76. DOI: 10.1016/j.microrel.2018.02.009.

[44] ARFAEI, B. ET AL. The effect of Sn grain number and orientation on the shear fatigue life of SnAgCu solder joints. 2008 58th Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, FL. 2008, s. 459-465. DOI: 10.1109/ECTC.2008.4550012.

[45] LU, M.; SHIH, D. Y.; LAURO, P.; GOLDSMITH, C.; HENDERSON, D. Effect of Sn grain orientation on electromigration degradation mechanism in high Sn-based Pb-free solders. Appl. Phys. Lett. 2008, roč. 92, s. 211909. DOI: 10.1063/1.2936996

[46] YANG, T. L.; YU, J. J.; LI, C. C.; LIN, Y. F.; KAO, C. R. Dominant effects of Sn orientation on serrated cathode dissolution and resulting failure in actual solder joints under electromigration. J. Alloys Compd. 2015, roč. 627, s. 281-286. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.11.222.

[47] KINNEY, C.; LINARES, X.; LEE, K. O.; MORRIS, J. W. The effect of Sn orientation on intermetallic compound growth in idealized Sn-Cu-Ag interconnects. J. Electron. Mater. 2013, roč. 42, s. 607-615. DOI: 10.1007/s11664-012-2306-0

[48] HUANG, T. C.; YANG, T. L.; KE, J. H.; HSUEH, C. H.; KAO, C. R. Effects of Sn grain orientation on substrate dissolution and intermetallic precipitation in solder joints under electron current stressing. Scripta Mater. 2014, roč. 80, s. 37-40. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.02.010

[49] Ho, C. E.; Yang, C. H.; Hsu, L. H. Electromigration in thin-film solder joints. Surf. Coat. Technol. 2014, roč. 259, č. B, s. 257-261. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.060

[50] LINARES, X.; KINNEY, C.; LEE, K. O.; MORRIS, J. W. The influence of Sn orientation on intermetallic compound evolution in idealized Sn-Ag-Cu 305 interconnects: an Electron

Backscatter Diffraction Study of electromigration. J. Electron. Mater. 2014, roč. 43, s. 43-51. DOI: 10.1007/s11664-013-2789-3

[51] CHEN, J. Q.; GUO, J. D.; LIU, K. L.; SHANG, J. K. Dependence of electromigration damage on Sn grain orientation in Sn–Ag–Cu solder joints. J. Appl. Phys. 2013, roč. 114, s. 153509. DOI: 10.1063/1.4825323

[52] LEE, K.; KIM, K. S.; TSUKADA, Y.; SUGANUMA, K. Effects of the crystallographic orientation of Sn on the electromigration of Cu/Sn–Ag–Cu/Cu ball joints. J. Mater. Res. 2011, roč. 26, s. 467-474. DOI: 10.1557/jmr.2010.86

[53] OUYANG, F. Y.; HSU, W. N.; YI-SHAN, Y. in 2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC). IEEE. 2015 s. 486-490.

[54] ARFAEI, B.; XING, Y.; WOODS, J.; WOLCOTT, J.; TUMNE, P.; BORGESEN, P.; COTTS, E. The effect of Sn grain number and orientation on the shear fatigue life of SnAgCu solder joints. 58th Electronic Components and Technology Conference. 2008, s. 459-465. ISSN: 0569-5503

[55] MA, Z.L.; BELYAKOV, S.A.; SWEATMAN, K.; ET AL. Harnessing heterogeneous nucleation to control tin orientations in electronic interconnections. Nat Commun 8. 2017, roč. 1916. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01727-6

[56] SHANG H.; MA, Z. L.; BELYAKOV, S. A.; GOURLAY, C. M. Grain refinement of electronic solders: The potential of combining solute with nucleant particles, Journal of Alloys and Compounds. 2007, roč 715, s. 471-485. ISSN 0925-8388. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.268.

[57] YU, CHI-KO; CHANG, GRAVER; SHAO, TINA; CHEN, CHERIE; LEE, JEFFREY. Investigation of Recrystallization in BGA Package to Evaluate the Low Ag Solder With Different Dopants After Board Level Test. 2010. DOI: 10.1109/ICEPT.2010.5582723.

[58] Lee, T. K.; Zhou, B.; Blair, L.; Liu, K. C.; Bieler, T. Grain orientation and microstructure evolution in SnAgCu solder joints as a function of position in ball grid array package in IMAPS. 2009, s. 142-149.

[59] DING, M.; PORRAS, A. Aging effects on dynamic bend test performance of Pb-free solder joints on NiAu finish, SMTA Journal. 2006, roč. 19, č. 4, s. 11-17.

[60] QU, M.; CAO, T.; CUI, Y.; LIU, F.; JIAO, Z.; LIU, Y. Effect of reflow cycles on interfacial morphology of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu soldered joints during solid-state aging. Atlantis Press. 2018. ISSN 2352-5401. DOI: https://doi.org/10.2991/icmse-18.2018.47

[61] WIRTH, V.; RENDL, K.; STEINER, F. Effect of multiple reflow cycles on intermetallic compound creation, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Hungary (Eger). 2015, s. 226-230.

[62] BUŠEK, D.; DUŠEK, K.; RENZA, O. Study of temperature profile influence on intermetallic growth, 40th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bulgaria (Sofia). 2017, s. 1-4.

[63] KIM KYOUNG-HO. Mechanical Properties and Reliability of Lead-Fee Solder Joints with Various Surface Finishes. Tohoku, 2017. 224 s. Dostupné také z: http://hdl.handle.net/10097/00121581. Dizertační práce. Tohoku University.

[64] KIM, J., BACK, JH., JUNG, SB. ET AL. Interfacial reactions and mechanical properties of Sn–3.0Ag–0.5Cu solder with pure Pd or Pd(P) layers containing thin-Au/Pd/Ni(P) surface-finished PCBs during aging. J Mater Sci: Mater Electron. 2020, roč. 31, s. 4027–4039. DOI: 10.1007/s10854-020-02950-6

[65] SEO, W.; KIM, KH.; KIM, YH; ET AL. Effect of Ni-P Plating Temperature on Growth of Interfacial Intermetallic Compound in Electroless Nickel Immersion Gold/Sn-Ag-Cu Solder Joints. Journal of Elec Materi. 2018, roč. 47, s. 110-116. DOI: 10.1007/s11664-017-5821-1

[66] Nordson Dage. Test Types [online]. ©2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.nordson.com/en/divisions/dage/test-types-2020

[67] OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Study of Atmosphere Influence on BGA Solder Balls Process. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 121-126. ISSN: 2161- 2528.

[68] BUI, Q. V.; JUNG, S. B. Evaluation of mechanical properties of low-Ag ball grid array solder joints using a high-speed ball shear test. Journal of Alloys and Compounds. 2014, roč. 589, s. 590-595. ISSN 0925-8388. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.11.199.

[69] Bang, J.; Yu, D.-Y.; Yang, M.; Ko, Y.-H.; Yoon, J.-W.; Nishikawa, H.; Lee, C.-W. Improvement in Thermomechanical Reliability of Low Cost Sn-Based BGA Interconnects by Cr Addition. Metals. 2018, roč. 8, č. 8. DOI: 10.3390/met8080586

[70] IPC-SM-782A. *Surface Mount Design and Land Pattern Standard*. IPC, 228 s. ISBN 1-580981-21-6

[71] HEINDRICH, J. G.; ALDINGER, F. Ceramic Materials and Components for Engines. Wiley. 2001, s. 668. ISBN: 9783527304165

[72] MORRELL, R. Handbook of Properties of Technical & Engineering Ceramics. Part 2. London: Her Majesty's Stationery Office. 1987 s. 255.

[73] DUŠEK, K.; RUDAJEVOVÁ, A.; PLAČEK, M. Influence of latent heat released from solder joints on the reflow temperature profile. J Mater Sci: Mater Electron. 2016, roč. 27, s. 543-549. DOI: 10.1007/s10854-015-3787-4

[74] Euto Inox. Materials and Applications Series. 2012, roč. 18. ISBN 978-2-87997-64-6 Dostupné z: https://www.bssa.org.uk/cms/File/StainlessSteels_at_HighTemperatures_EN.pdf

[75] SALUJA, R.; MOEED, K. Emphasis of Embrittlement Characteristics in 304L and 316L Austenitic Stainless Steel. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2014, roč. 11, s. 04-10. DOI: 10.9790/1684-11650410.

[76] Marlin Steel. What is the Temperature Range for 304 Stainless Steel vs. 316 vs. 330? [online]. ©2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.marlinwire.com/blog/what-is-

the-temperature-range-for-304-stainless-steel-vs-316-vs-330

[77] GREGOR, A. Výzkum vlivu nové metody pro vytvoření kulových pájkových vývodů BGA pouzder na intermetalické vrstvy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 45 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal.

[78] JESD22-B117A. *Solder Ball Shear*. JEDEC, 2006.

[79] IPC TM 650, 2.1.1. *Microsectioning, Manual and Semi or Automatic Method*. IPC.

[80] AN, T.; QIN, F. Relationship between the intermetallic compounds growth and the microcracking behavior of lead-free solder joints, *Journal of Electronic Packaging*. 2015 roč. 138, č. 1.

[81] D.Q. YU, L. WANG, The growth and roughness evolution of intermetallic compounds of Sn–Ag–Cu/Cu interface during soldering reaction, Journal of Alloys and Compounds. 2008, roč. 458, č. 1-2, s. 542-547. ISSN: 0925-8388. DOI: 10.1016/j.jallcom.2007.04.047.

[82] OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer. Journal of Electrical Engineering, 2018, roč. 69, č. 4, s. 305-310. ISSN: 1339-309X.

[83] OTÁHAL, A.; SOMER, J.; SZENDIUCH, I. Influence of heating direction on BGA solder balls structure. In Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, 2017 21st European. 2018. s. 1-4. ISBN: 978-0-9568086-4-6.

[84] SERVIN, J. Method to measure intermetallic layer thickness and its application to develop a new equation to predict its growth. IPC APEX EXPO Conference and Exhibition 2013, APEX EXPO 2013. roč. 2. s. 724-748.

[85] TAO, B.; WU, Y.; DING, H.; XIONG, Y. L. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor Q η, Microelectronics Reliability. 2006, roč. 46, s. 864-872. DOI: 10.1016/j.microrel.2005.04.013

[86] XU, L.; PANG, J.; CHE, F. X. Intermetallic Growth and Failure Study for Sn-Ag-Cu/ENIG PBGA Solder Joints Subject to Thermal Cycling, Proceedings Electronic Components and Technology, 2005. ECTC '05., Lake Buena Vista, FL. 2005, s. 682-686. DOI: 10.1109/ECTC.2005.1441342

[87] BIELER, T. R.; JIANG, H.; LEHMAN, L. P.; KIRKPATRICK, T.; COTTS, E. J.; NANDAGOPAL, B. Influence of Sn Grain Size and Orientation on the Thermomechanical Response and Reliability of Pb-free Solder Joints. in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2005, roč. 31, č. 2, s. 370-381. DOI: 10.1109/TCAPT.2008.916835

[88] ARFAEI, B.; TASHTOUSH, T.; KIM, N.; WENTLENT, L.; COTTS, E.; BORGESEN, P. Dependence of SnAgCu solder joint properties on solder microstructure. 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference *(ECTC)*, Lake Buena Vista, FL. 2011, s. 125-132. DOI: 10.1109/ECTC.2011.5898502

[89] IDRIS, S.; OURDJINI, A.; WAH, N.; HOW, H. C.; CHIN, Y. T. Interfacial reactions of SAC305 and SAC405 solders on electroless Ni(P)/immersion Au and electroless

Ni(B)/immersion Au finishes. 2010 34th IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium (IEMT), Melaka. 2010, s. 1-6. DOI: 10.1109/IEMT.2010.5746712

[90] LIU, M. L.; HALIMAN, H.; AHMAD, A. M. Interfacial reaction of a sn-3.0Ag-0.5Cu thin film during solder reflow. Soldering & Surface Mount Technology. 2013, roč. 25, č. 1, s. 15-23. DOI: 10.1108/09540911311294560

[91] GHOSH, RITUPARNA; KANJILAL, ANWESHA; KUMAR, PRAVEEN. Effect of type of thermo-mechanical excursion on growth of interfacial intermetallic compounds in Cu/Sn-Ag-Cu solder joints. Microelectronics Reliability. 2017, roč. 74, s. 44-51. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.05.011.

[92] HU, X.; XU, T.; KEER, L.; LI, Y.; JIANG, X. Microstructure evolution and shear fracture behavior of aged Sn3Ag0.5Cu/Cu solder joints, Materials Science and Engineering: A. 2016, roč. 673, s. 167-177. ISSN: 0921-5093. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.071.

[93] GAO, J. G.; WU, Y. P.; DING, H. Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor, Soldering & Surface Mount Technology. 2007, roč. 19, č. 1, s.28-33, 2007. DOI: 10.1108/09540910710748131

[94] VESELÝ, P.; HORYNOVÁ, E.; STARÝ, J.; BUŠEK, B.; DUŠEK, K.; ZAHRADNÍK, V.; PLAČEK, M.; MACH, P.; KUČÍREK, M.; JEŽEK, V.; DOSEDLA, M. Solder joint quality evaluation based on heating factor, Circuit World. 2018 roč. 44, č. 1, s. 37-44.

[95] KRAMMER, O.; NAGY, M. Reliability comparison of Infrared and Vapour Phase soldering, 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). 2012, s. 49-52. DOI: 10.1109/SIITME.2012.6384344

[96] SOHN, Y. C.; YU, J.; KANG, S. K.; SHIH, D. Y.; LEE, T. Y. Spalling of intermetallic compounds during the reaction between solders and electroless Ni-P metallization, Journal of Materials Research. 2004, roč. 19, s. 2428-2436. DOI: 10.1557/JMR.2004.0297

[97] OKANO, Y.; AUDET, N.; DOST, S.; KUNIKATA, S. Effect of liquid shape on flow velocity induced by Marangoni convection in a floating half-zone system, Journal of Crystal Growth. 1999, roč. 204, č. 1–2, s. 243-246. DOI: 10.1016/S0022-0248(99)00138-4

[98] HURTONY, T.; GORDON, P.; BALOGH, B. Formation and Distribution of Sn-Cu IMC in Lead-Free Soldering Process Induced by Laser Heating, MICRO AND NANOSYSTEMS. 2010, roč. 2, č. 3, s. 178-184. DOI: 10.2174/1876402911002030178

[99] YAN GU; PING SHEN; NAN-NAN YANG; KANG-ZHAN CAO. Effects of direct current on the wetting behavior and interfacial morphology between molten Sn and Cu substrate, Journal of Alloys and Compounds, roč. 586, s. 80-86, 2014.

[100] ZURUZI, A. S.; LAHIRI, S. K.; BURMAN, P.; SIOW, K. S. Correlation between intermetallic thickness and roughness during solder reflow, Journal of Electronic Materials. 2001, roč. 30, s. 997-1000. DOI: 10.1007/BF02657724

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

2020

(1) FOHLEROVÁ, Z.; ZHU, H.; HUBÁLEK, J.; NI, S.; PODEŠVA, P.; OTÁHAL, A.; NEUŽIL, P.; YOBAS, L. Rapid Characterization of Biomolecules' Thermal Stability in Segmented Flow-Through Optofluidic Microsystem. Scientific Reports, 2020, vol. 10, č. 1, s. 1-7. ISSN: 2045-2322.

(2) OTÁHAL, A.; SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I. Investigation of Metallographic Etchants Selectivity for Tin Solder Alloys. In 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-7281-6773-2. ISSN: 2161-2536.

(3) OTÁHAL, A.; SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I.; JANKOVSKÝ, J. Current Load of Thick-film Pastes for Power Applications. In 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-7281-6773-2. ISSN: 2161-2536.

2019

(4) OTÁHAL, A.; SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I. New Possible Way for Brazing of Thick Film Cermet Conductors. In 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2019. s. 1-5. ISSN: 2161-2528.

(5) OTÁHAL, A.; SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I. Influence of Electric Current at Solidification of Solder. In 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2019. s. 1-5. ISSN: 2161-2528.

2018

(6) OTÁHAL, A.; SOMER, J.; SZENDIUCH, I. Influence of heating direction on BGA solder balls structure. In Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, 2017 21st European. 2018. s. 1-4. ISBN: 978-0-9568086-4-6.

(7) SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A. Creation of Cavities in High-temperature Ceramics. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Zlatibor, Serbia: IEEE Computer Society, 2018. s. 249-254. ISSN: 2161-2536.

(8) SKÁCEL, J.; SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A.; HEJÁTKOVÁ, E. X-ray Inspection of Ceramic Structures. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Zlatibor, Serbia: IEEE Computer Society, 2018. s. 254-257. ISSN: 2161-2536.

(9) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Influence of heat flow direction on solder ball interfacial

layer. Journal of Electrical Engineering, 2018, vol. 69, č. 4, s. 305-310. ISSN: 1339-309X.

2016

(10) SKÁCEL, J.; OTÁHAL, A.; ŘIHÁK, P.; SZENDIUCH, I. The Quality of BGA Solder Joint with Underfill. In Sborník IMAPS flash Conference 2016. ElectroScope - http://www.electroscope.zcu. cz. 2016. s. 19-22. ISBN: 978-80-214-5419- 4. ISSN: 1802-4564.

(11) SKÁCEL, J.; OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Sensitive Analysis of IR Heat Emitter for Soldering. In Proceedings of the 22nd Conference STUDENT EEICT 2016. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. s. 655-659. ISBN: 978-80-214-5350- 0.

(12) ŘEZNÍČEK, M.; OTÁHAL, A.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J. System for maintaining the dispense capillary at a constant height above the surface. In 39th International Spring Seminar on Electronics Technology Printed Electronics and Smart Textiles. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Pilsen, Czech Republic: University of West Bohemia in Pilsen, 2016. s. 430-432. ISBN: 978-1-5090-1389- 0. ISSN: 2161-2536.

(13) OTÁHAL, A.; ŠIMEK, V.; CRHA, A.; RŮŽIČKA, R.; SZENDIUCH, I. Innovative Methods for Through Holes Plating. In 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Pilsen, Czech Republic: University of West Bohemia, 2016. s. 48-52. ISBN: 978-1-5090-1389- 0. ISSN: 2161-2536.

(14) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I.; ŠIMEK, V.; CRHA, A.; RŮŽIČKA, R. Inovace procesu pokovení průchozích otvorů v DPS. DPS Elektronika od A do Z, 2016, č. 1/ 2016, s. 2-3. ISSN: 1805-5044.

(15) SKÁCEL, J.; OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Designing of infrared heater with homogenous heat transfer. In Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 39th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2016. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. Volume 2016-September. Pilsen, Czech Republic: IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2016. s. 62-65. ISBN: 978-1-5090-1389- 0. ISSN: 2161-2536.

(16) OTÁHAL, A.; CRHA, A.; ŠIMEK, V.; RŮŽIČKA, R.; SZENDIUCH, I. ENHANCED METHOD OF THROUGH- HOLE COPPER PLATING. In Proceedings of the 22nd Conference STUDENT EEICT 2016. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. s. 610-614. ISBN: 978-80-214-5350- 0.

(17) OTÁHAL, A.; ŠIMEK, V.; CRHA, A.; RŮŽIČKA, R.; SZENDIUCH, I. Innovative Methods in Activation Process of Through-hole Plating. Periodica Polytechnica-Electrical Engineering, 2016, vol. 60, č. 4, s. 217-222. ISSN: 0324-6000.

2015

(18) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I.; ŠIMEK, V.; CRHA, A.; RŮŽIČKA, R. Optimization of

Through- hole Plating Method for Prototyping. In Abstracts Proceedings, International flash conference IMAPS - Czech and Slovak chapter. ElectroScope - http://www.electroscope.zcu. cz. 2015. s. 54-56. ISBN: 978-80-214-5270- 1. ISSN: 1802-4564.

(19) SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A.; PSOTA, B. Optimalizace modelu vícevrstvé DPS při mechanickém testování. DPS Elektronika od A do Z, 2015, roč. 1, č. 6, s. 4-5. ISSN: 1805- 5044.

(20) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I.; ŠEFARA, P. MECHANICAL BEHAVIOR OF SMD SOLDER JOINT SOLDERED UNDER NITROGEN ATMOSPHERE. Abstracts Proceedings, International flash conference IMAPS - Czech and Slovak chapter. 2015. s. 45-46. ISBN: 978-80-214-5270- 1.

(21) SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A.; PSOTA, B. Mechanické testování elektronických sestav. In Mechanické testování elektronických sestav. 1. Brno: Novpress Brno, 2015. s. 1-26. ISBN: 978-80-214-5271- 8.

(22) SZENDIUCH, I.; SOMER, J.; VALA, R.; ADÁMEK, M.; BURŠÍK, M.; HEJÁTKOVÁ, E.; OTÁHAL, A.; PSOTA, B.; ŘEZNÍČEK, M.; ŘIHÁK, P.; SKÁCEL, J. Moderní mikroelektronické technologie - základ elektronického hardware. 1. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2015. 188 s. ISBN: 978-80-214-5293- 0.

(23) PSOTA, B.; SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A. Influence of the PCB Attachment on the Mechanical Properties in Modal Analysis. In Proceedings on 20th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition. 2015. s. 1-4. ISBN: 978-0-9568086-1-5.

(24) OTÁHAL, A.; PSOTA, B.; SZENDIUCH, I. The Vibration Testing as Tool for Optimizing of Two PCB Connection. In Novel Trends in Electronics Manufacturing - Book of Abtracts 38th International Spring Seminar on Electronics Technology. 2015. s. 339-342. ISBN: 978-963-313-177-0.

(25) SZENDIUCH, I.; HEJÁTKOVÁ, E.; OTÁHAL, A.; PSOTA, B. Some Insights to Quality Improvement in Engineering Education System. International Conference on Engineering Education - New Technologies and Innovation for Global Business. 1. Zagreb: MATE Ltd., Zagreb, 2015. s. 25-31. ISBN: 978-953-246-232- 6.

(26) PSOTA, B.; OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Influence of the cavities on the PCB mechanical properties. CIRCUIT WORLD, 2015, vol. 41, no. 2, s. 1-6. ISSN: 0305-6120.

(27) PSOTA, B.; OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Optimalizace návrhu DPS při testování vibracemi. 2015. s. 1-31.

2014

(28) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I.; PSOTA, B. Mechanical testing of PCB using computer simulations. In 37th Int. Spring Seminar on Electronics Technology. Dresden: IEEE, 2014. s. 290-293. ISBN: 978-1-4799-4455-2.

(29) PSOTA, B.; OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. INFLUENCE OF THE CAVITIES ON THE PCB MECHANICAL PROPERTIES. In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2014. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. s. 1-7. ISBN: 978-80-214-4985- 5.

(30) SZENDIUCH, I.; OTÁHAL, A.; PSOTA, B.; KLAPKA, M. Vibration Testing as a Tool to Optimize the Configuration of the PCBs. In IMAPS Proceedings. 1. San Diego, USA: IMAPS, 2014. s. 50-54. ISBN: 978-0-9909028-0- 5.

(31) SZENDIUCH, I.; HEJÁTKOVÁ, E.; PSOTA, B.; OTÁHAL, A. EU Research programs - the Way to the Quality Increase of PhD Study. In ICEE/ ICIT 2014. 1. Riga: iNNER, 2014. s. 26-31. ISBN: 9781479931927.

(32) OTÁHAL, A.; ADÁMEK, M.; SZENDIUCH, I. Impact of solder paste drying on the solderability. In 37th Int. Spring Seminar on Electronics Technology. Dresden: IEEE, 2014. s. 198-201. ISBN: 978-1-4799-4455-2.

(33) SZENDIUCH, I.; PSOTA, B.; OTÁHAL, A. Nové směry v konstrukci plošných spojů a mechanické testování. DPS Elektronika od A do Z, 2014, roč. 5., č. 1, s. 12-15. ISSN: 1805-5044.

2013

(34) OTÁHAL, A.; SZENDIUCH, I. Study of Atmosphere Influence on BGA Solder Balls Process. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 121-126. ISSN: 2161- 2528.

(35) SZENDIUCH, I.; PSOTA, B.; OTÁHAL, A.; HEJÁTKOVÁ, E. Board on Board New PCB Configuration Moving in 3D Packaging. In THE INTERNATIONAL CONFERENCE - EDS, Brno 26 - 27 June 2013. Vysoké učení technické v Brně: Novapress sro, 2013. s. 224-227. ISBN: 978-80-214-4754- 7.

(36) SZENDIUCH, I.; KLAPKA, M.; PSOTA, B.; OTÁHAL, A. Importance of Vibration Testing for New Technological Solutions. In Proceedings EMPC 2013. 1. Grenoble: IMAPS France, 2013. s. 144-148. ISBN: 978-2-9527467-1- 7.

(37) SZENDIUCH, I.; PSOTA, B.; OTÁHAL, A. Metodiky mechanického testování elektronických sestav. 2013.

(38) OTÁHAL, A.; ADÁMEK, M.; JANSA, V.; SZENDIUCH, I. Investigation of the Mechanical Properties of Lead- Free Solder Materials. Key Engineering Materials (web), 2013, roč. 2013, č. 592- 593, s. 453-456. ISSN: 1662- 9795.

SEZNAM PRODUKTŮ AUTORA

OTÁHAL, A.; VALA, R.: Exsikátor; Pájecí stanice pro pájení za sníženého tlaku a s ochrannou atmosférou. Ústav mikroelektroniky, FEKT VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno. URL: http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/. (funkční vzorek)

OTÁHAL, A.; VALÍČEK, J.: Měřič síly v tahu; Měřič síly v tahu. Ústav mikroelektroniky, FEKT VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno. URL: http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/. (funkční vzorek)

SOMER, J.; ŠTEKOVIČ, M.; BURŠÍK, M.; OTÁHAL, A.: Stolek pro tisk TLV na LTCC; Stolek pro sítotisk na flexibilní substráty. Technická 10 N0.64. URL: http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/somer-fv-stolek-pro-sitotisk-na-flexibilni-substraty.pdf. (funkční vzorek)

OTÁHAL, A.; BŽONĚK, T.: Nástroje pro underfill; Sada nástrojů pro odstraňování underfillu. FEKT UMEL Technická 10 místnost N0.63. URL: http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/. (funkční vzorek)

ŘEZNÍČEK, M.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J.; OTÁHAL, A.: UZ hlavice; Nové uspořádání dispenzní hlavice pro tisk s vysokým rozlišením. laboratoř 0.63 Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav mikroelektroniky Technická 3058/10 616 00 Brno Česká republika. (funkční vzorek)

ŘEZNÍČEK, M.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J.; OTÁHAL, A.: Generátor UZ; Generátor signálu pro budič ultrazvukových kmitů. laboratoř 0.63 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav mikroelektroniky Technická 3058/10 616 00 Brno Česká republika. (funkční vzorek)

ŘEZNÍČEK, M.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J.; OTÁHAL, A.: Korektor výšky; Systém pro udržování konstantního odstupu od povrchu substrátu. laboratoř 0.63 Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav mikroelektroniky Technická 3058/10 616 00 Brno Česká republika. (funkční vzorek)

OTÁHAL, A.; ŘEZNÍČEK, M.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; SKÁCEL, J.: Smart Reball; Systém s integrovanými elektrodami pro sesazení pouzdra a přímo vyhřívané šablony. T10/N 0.63. (prototyp)

SEZNAM PATENTŮ AUTORA

OTÁHAL, A.; ŘEZNÍČEK, M.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; SKÁCEL, J.; Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno, Veveří, Česká republika: Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA. 33222, užitný vzor. (2019)

OTÁHAL, A.; JANKOVSKÝ, J.; SOMER, J.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří, CZ: Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu. 307441, patent. (2018)

Curriculum Vitae

Osobní údaje:

Jméno a příjmení:	Alexandr Otáhal
Datum narození, místo:	8. října 1986, Brno
Národnost:	Česká
Email:	alexandr.otahal@vutbr.cz , otahal.a@gmail.com
Telefon:	+420 775 852 176

Vzdělání:

2012 – současnost	Doktorské studium, VUT v Brně
2010 – 2012	Magisterské studium, VUT v Brně (titul Ing.)
2007 – 2010	Bakalářské studium, VUT v Brně (titul Bc.)
2002 – 2006	Středoškolské vzdělání, SPŠ Edvarda Beneše Břeclav

Praxe

2017 – dosud	Vědecko-výzkumná činnost. Vedení pracovní a výukové skupiny mikroelektronických technologií a pouzdření. Výuka. Příprava projektů. Realizace zakázek pro průmyslový sektor. Odpovědnost za chod laboratorních cvičení v předmětech (BMTS, MMTE, BMEP, BMP2). Výzkum v oblasti pájených spojů, technologie desek plošných spojů, tlusté vrstvy, konstrukce specializovaných pájecích zařízení aj.
2018 – 2019	Odborné a organizační vedení projektu TAČR GAMA (TG01010054-13) Přímo vyhřívaná šablona pro znovuvytvoření kulových pájkových vývodů u elektronických pouzder BGA.
2015 – 2017	Testování a optimalizace nového zařízení pro dispenzní tisk s velmi vysokým rozlišením (VUT Šance, TAČR GAMA). Odpovědnost za optimalizaci procesu tisku a výsledky testů.
2015 – 2016	Mikroelektronika a nanotechnologie. Specifikace přípojných míst (elektřina, chladící okruh, plyny, ad.). Spolupráce při instalaci zařízení. Návrh databáze přístrojů. Odpovědnost za

	centrální zdroje pro zařízení a přístupový systém budovy (voda, chladící voda, dusík, elektrické rozvody).
2015 – 2015	Hlavní řešitel interního projektu Inovace výrobní linky pro tvorbu vícevrstvých desek plošných spojů, kde byly využity přídavné procesní kroky pro zlepšení aktivace otvorů v DPS před galvanickým pokovením mědí.
2013 – 2015	Výzkum spolehlivosti proti mechanickým vibracím u nově vyvíjených desek plošných spojů v projektu Board on Board a Board on Board II (LF13007, LF15007). Odpovědnost za výsledky únavových zkoušek (mechanické vibrace) Board on Board technologie.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 *– Technická dokumentace a návod k použití k prototypu zařízení Hot Stencil Reballing System 01 (HSR-01)*

Příloha č. 2 *– Patent: Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu [6]*

Příloha č. 3 *– Užitný vzor: Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA [7]*

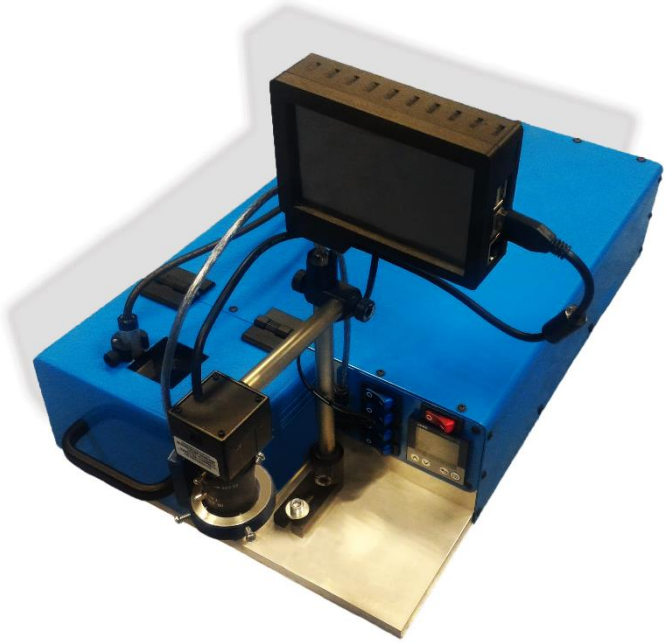
Příloha č. 1

T A
Č R
Technologická agentura České republiky

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Hot Stencil Reballing System 01 (HSR-01)

Technická dokumentace a návod k použití



Verze:	1.02
Datum revize:	13. 2. 2020
Revizi provedl:	Alexandr Otáhal

Výrobce prototypu: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky
Technická 3058/10
616 00 Brno
Česká republika

Obsah

1. Úvod 4
2. Bezpečnostní předpisy 5
3. Technické parametry zařízení 5
4. HSR-01 – Přehled přístroje 6
   4.1. Pohled zepředu 6
   4.2. Pohled zezadu 6
   4.3. Ovládací panel 7
   4.4. Elektrodový a polohovací systém 7
5. Používání pájecí stanice 8
   5.1. Montáž a demontáž šablony 8
   5.2. Umístění pájkových kuliček na BGA pouzdro 8
   5.3. Zapnutí procesu pájení 9
   5.4. Přerušení procesu pájení 9
   5.5. Nastavení regulátoru Jumo diraTRON 116 10
6. Údržba 10
7. Přílohy 10

1. Úvod

Tento návod obsahuje důležité informace pro zprovoznění, obsluhu, bezpečné používání a údržbu tohoto prototypu zařízení.

Pájecí stanice HSR-01 je inovativní zařízení využívající základního principu levnějších metod pro *reballing*, resp. obnovení elektronických pouzder BGA s tím rozdílem, že šablona pro osazení pájkových kuliček slouží i k jejich přetavení. Parametry výsledného pájeného spoje se z pohledu spolehlivosti a teplotní zátěže komponenty blíží k výsledkům dražších metod, jako je například laserové pájení. Díky této patentované metodě, kterou využívá HSR-01, se prakticky snižují pořizovací náklady a provoz zařízení s dosažením kvalitnějších a spolehlivějších vývodů u BGA pouzder. HSR-01 se vyznačuje kompaktností a jednoduchým ovládáním. Využití tato stanice nachází nejen v opravárenském odvětví spotřební i jiné elektroniky, ale také v oblasti testování a vývoje.

2. Bezpečnostní předpisy

- Nedodržením pokynů a předpisů v tomto návodu nenese výrobce žádnou zodpovědnost za poškození nebo újmu u věcí, osob a zvířat.
- Zařízení nesmí být rozebíráno, přestavováno ani jinak nepovoleně modifikováno.
- Do zařízení se nesmí umisťovat jiné šablony, než dodávané výrobcem HSR-01.
- Nepoužívejte jednotky k jinému účelu než k pájení nebo opravám pájených spojů. Nesprávné použití může způsobit požár.
- Napájecí kabel musí být zapojen do schválených zásuvek. Před použitím se ujistěte, že je správně uzemněn. Při odpojování držte zástrčku, ne kabel.
- Nedotýkejte částí pod napětím.
- Pokud se zařízení nepoužívá, pak jej vypněte.
- Šablona, elektrody a kryt elektrod mohou být stále horké, i když je stanice je vypnuta. Manipulujte s nimi opatrně.
- Nenechávejte spotřebič bez dozoru, když je zapnutý.
- Nezakrývejte ventilační mřížky. Teplo může způsobit vznícení hořlavých produktů.
- Dávejte pozor na výpary vzniklé při pájení.
- Udržujte své pracoviště čisté a uklizené. Používejte vhodné ochranné brýle a rukavice pro zajištění bezpečné práce a vyhnutí se osobní újmě.
- Obsluhu a údržbu zařízení nesmějí provádět děti a neproškolené osoby.

3. Technické parametry zařízení

V tabulce 1 jsou uvedeny technické parametry zařízení.

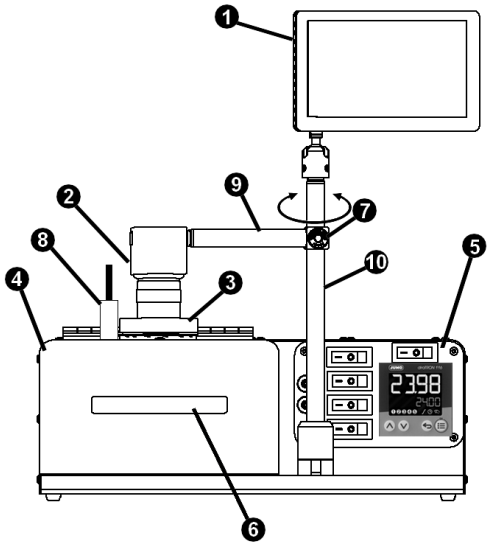
Tabulka 1: Technické parametry zařízení

Napájecí napětí:	230 VAC / 50 Hz / 5 A
Pojistka:	6,3 A, 250 VAC, tavná, kulatá (5 x 20) mm
Napětí na elektrodách:	2,2 V
Proud elektrodami:	max. 100 A (typ. 80 A)
Maximální teplota šablony:	350 °C
Periferie:	2 MPx USB kamera s objektivem (Ohnisková vzdálenost 2,8 – 12 mm); 5" LCD displej; regulátor JUMO diraTRON 116
Porty:	USB na zadním panelu (programování regulátoru)
Rozměry:	350 x 305 x 535 mm
Váha:	12 kg

4. HSR-01 – Přehled přístroje

4.1. Pohled zepředu

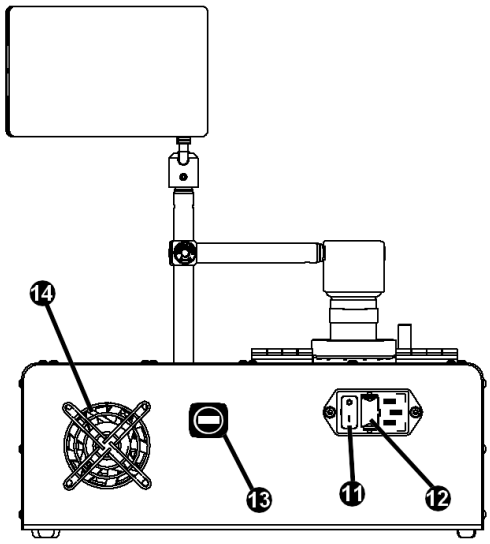
1. LCD displej s Raspberry Pi 3
2. Digitální kamera s objektivem
3. LED osvětlení
4. Kryt elektrodového systému
5. Ovládací panel
6. Držák krytu elektrodového systému
7. Aretační šroub polohování digitální kamery
8. IR senzor teploty
9. Rameno digitální kamery
10. Stojan LCD displeje a kamery



Obrázek 1: HSR-01 - pohled zepředu

4.2. Pohled zezadu

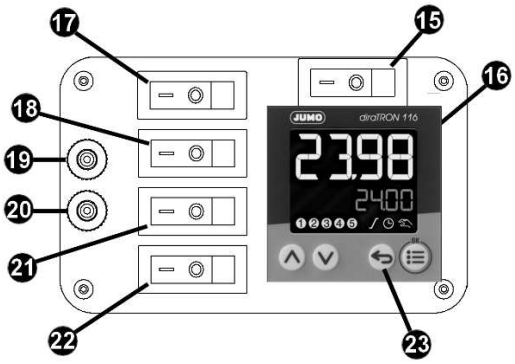
11. Hlavní vypínač napájení
12. Zásuvka s pojistkou
13. USB zástrčka regulátoru
14. Hlavní chladící ventilátor



Obrázek 2: HSR-01 - pohled zezadu

4.3. Ovládací panel

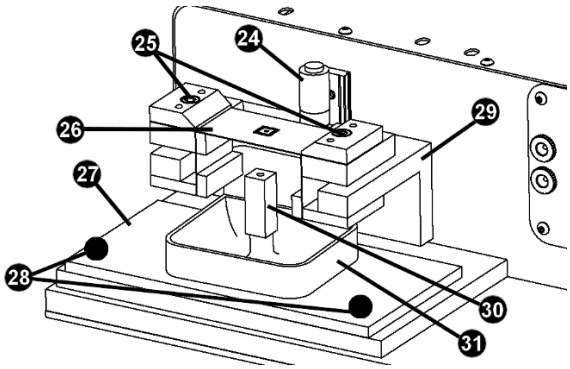
15. Vypínač napájení
16. Regulátor
17. Vypínač vakua pro pouzdro
18. Vypínač vakua pro polohovací systém
19. Napájení LED osvětlení (12 V)
20. Napájení digitální kamery a LCD displeje (5 V)
21. Vypínač digitální kamery a LCD displeje
22. Vypínač LED osvětlení
23. Zapnout/vypnout pájecí proces



Obrázek 3: HSR-01 – ovládací panel

4.4. Elektrodový a polohovací systém

24. Mikrometrický šroub
25. Aretační šrouby šablony
26. Šablona
27. Polohovací deska
28. Úchytky polohovací desky
29. Držák elektrodového systému
30. Držák BGA pouzdra
31. Rezervoár pájkových kuliček



Obrázek 4: HSR-01 – elektrodový systém

5. Používání pájecí stanice

5.1. Montáž a demontáž šablony

Před každým započetím tohoto procesu musí být šablona, elektrodový systém a kryt elektrodového systému ochlazeny po předchozím procesu pájení. Proces chlazení trvá minimálně 10 minut, popř. musí být změřena teplota na šabloně maximálně 30 °C!

1) Vypněte pájecí stanici pomocí vypínače napájení (Obrázek 3-**15.**), pokud tomu tak již není.
2) Zvedněte kryt elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**) směrem nahoru za držák (Obrázek 1-**6.**), pokud tomu tak již není.
3) Povolte aretační šrouby šablony (Obrázek 4-**25.**) pomocí imbusového klíče (4 mm).
4) Odstraňte šablonu nebo vložte novou mezi elektrody elektrodového systému.
5) Utáhněte jeden aretační šroub šablony (Obrázek 4-**25.**).
6) Elektrody prsty přitlačte směrem k sobě a v této poloze utáhněte i druhý aretační šroub šablony (Obrázek 4-**25.**).
7) Nyní je šablona nachystána pro proces osazení pájkových kuliček a pájení přetavením.

5.2. Umístění pájkových kuliček na BGA pouzdro

Před započetím tohoto procesu musí být šablona uchycena v elektrodovém systému!

Před každým započetím tohoto procesu musí být šablona, elektrodový systém a kryt elektrodového systému ochlazeny po předchozím procesu pájení. Proces chlazení trvá minimálně 10 minut, popř. musí být změřena teplota na šabloně maximálně 30 °C!

1) Zvedněte kryt elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**) směrem nahoru za držák (Obrázek 1-**6.**), pokud tomu tak již není.
2) Umístěte BGA pouzdro s naneseným tavidlem nebo pájecí pastou na horní stranu držáku (Obrázek 4-**30.**) tak, aby byl střed pouzdra ve středu držáku a pájecí plošky BGA pouzdra směřovaly nahoru a zapněte vypínač vakua pro pouzdro (Obrázek 3-**17.**) do polohy I (zapnuto).
3) Pomocí úchytek polohovací desky (Obrázek 4-**28.**) posuňte BGA pouzdro přibližně do středu šablony (Obrázek 4-**26.**).
4) Nastavte elektrodový systém se šablonou do pracovní polohy pomocí mikrometrického šroubu (Obrázek 4-**24.**). Mikrometrický šroub nastavuje vzdálenost šablony od BGA pouzdra. Vzdálenost šablony od BGA pouzdra nastavíte otáčením mikrometrického šroubu proti směru hodinových ručiček do doby, než se šablona dotkne pouzdra BGA. Poté nastavíte vzdálenost šablony od BGA pouzdra otáčením mikrometrického šroubu ve směru hodinových ručiček. Při otáčení mikrometrického šroubu na něm zároveň odečítáte vzdálenost v mikrometrech. Vzdálenost šablony od BGA pouzdra by měla být stejná, jako polovina průměru použitých pájkových kuliček.
5) Zapněte digitální kameru a LCD displej pomocí vypínače (Obrázek 3-**21.**).
6) Zapněte LED osvětlení pomocí vypínače (Obrázek 3-**22.**).
7) Posuňte rameno s digitální kamerou (Obrázek 1-**9.**) ve směru hodinových ručiček do pracovní polohy, tzn. nad střed šablony (Obrázek 4-**26.**).

8) Nyní ručně sesaďte pájecí plošky na BGA pouzdře s otvory ve středu šablony pomocí polohovacího systému (Obrázek 4-**27.** **a** Obrázek 4-**28.**) tak, aby byly na LCD displeji (Obrázek 1-**1.**) vidět všechny pájecí plošky ve střed otvorů šablony (Obrázek 4-**26.**).
9) Přepněte vypínač polohovacího systému (Obrázek 3-**18.**) do polohy zapnuto (I).
10) Posuňte rameno s digitální kamerou (Obrázek 1-**9.**) do nepracovní polohy, tzn. posun přibližně o 90° proti směru hodinových ručiček, pokud tomu tak již není.
11) Do středu šablony (Obrázek 4-**26.**) nasypte dostatečný počet pájkových kuliček, aby byla v každém otvoru šablony jedna kulička. Kuličky neumístěné v otvorech šablony mechanicky posuňte přes okraj šablony tak, aby spadly do rezervoáru (Obrázek 4-**31.**) pod držákem BGA pouzdra (Obrázek 4-**30.**).
12) Nyní můžete přejít na část **5.3. Zapnutí procesu pájení**.

5.3. Spuštění procesu pájení

1) Posuňte rameno s digitální kamerou (Obrázek 1-**9.**) do nepracovní polohy, tzn. posun přibližně o 90° proti směru hodinových ručiček, pokud tomu tak již není.
2) Zavřete kryt elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**) směrem dolů za držák (Obrázek 1-**6.**), pokud tomu tak již není.
3) Proces pájení zapněte dlouhým stiskem tlačítka zapnout/vypnout pájecí proces (Obrázek 3-**23.**) na regulátoru (Obrázek 3-**16.**).
4) Proces pájení se ukončí automaticky po dokončení pájecího cyklu nastaveného v regulátoru (Obrázek 3-**16.**).

5.4. Ukončení procesu pájení

1) Proces pájení se ukončí automaticky po dokončení pájecího cyklu nastaveného v regulátoru (Obrázek 3-**16.**), nebo jej můžete ukončit dvojitým rychlým stiskem tlačítka zapnout/vypnout pájecí proces (Obrázek 3-**23.**) na regulátoru (Obrázek 3-**16.**) nebo zvednutím krytu elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**).
2) Otevřete kryt elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**) směrem nahoru za držák (Obrázek 1-**6.**), pokud tomu tak již není.
3) Přepněte vypínač polohovacího systému (Obrázek 3-**18.**) a vypínač vakua pro pouzdro (Obrázek 3-**17.**) do polohy vypnuto (O).
4) Nyní můžete BGA pouzdro s připájenými kulovými vývody odstranit z horní strany držáku (Obrázek 4-**30.**).

5.5. Přerušení procesu pájení

Proces pájení přerušíte dvojitým rychlým stiskem tlačítka zapnout/vypnout pájecí proces (Obrázek 3-**23.**) na regulátoru (Obrázek 3-**16.**) nebo zvednutím krytu elektrodového systému (Obrázek 1-**4.**).

5.6. Nastavení regulátoru Jumo diraTRON 116

Pro nastavení regulátoru a vytvoření nového programu, popř. změnu stávajícího, se řiďte manuálem k regulátoru Jumo diraTRON 116.

6. Údržba

Po 1000 pracovních hodinách pájecí stanice nebo 1 kalendářním roku od poslední servisní kontroly je třeba další servisní kontrola, kterou provádí výrobce. V rámci záruční doby tuto kontrolu zajišťuje výrobce na své náklady. Po uplynutí záruční doby si hradí servisní kontrolu vlastník zařízení.

Údržba šablony vyžaduje čištění od tavidlových zbytků, příp. pájecí slitiny, v případě jejího znečištění. Šablonu je možné čistit v ultrazvukové myčce s čistícím prostředkem, který doporučuje výrobce tavidla, nebo pouze oplachem tímto čistícím prostředkem. Záleží na míře znečištění šablony nebo potřebné rychlosti procesu čištění z pohledu časové úspory.
Pokud dojde k mechanickému poškození šablony, nebo vykazuje defekty, pak je nutno šablonu vyměnit za novou!

Šablona od výrobce pájecího zařízení má životnost 500+ pájecích cyklů!

7. Přílohy

Příloha č. 1_Regulátor Jumo diraTRON 116_manuál

Příloha č. 2

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

307 441

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

H01L 21/48	(2006.01)
H01L 21/60	(2006.01)
B23K 11/00	(2006.01)
B23K 13/00	(2006.01)

(19) ČESKÁ REPUBLIKA

ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2017-487**

(22) Přihlášeno: **25.08.2017**

(40) Zveřejněno: **22.08.2018**
(Věstník č. 34/2018)

(47) Uděleno: **11.07.2018**

(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **22.08.2018**
(Věstník č. 34/2018)

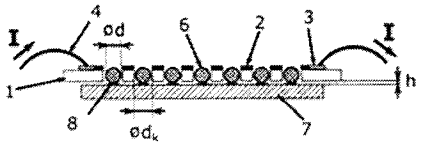
(56) Relevantní dokumenty:

US 5431332 A; US 2009176321 A; US 6276599 B1; KR 20050011454 A; KR 20050063858 A; JP 2009212388 A.

(73) Majitel patentu:
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří, CZ

(72) Původce:
Ing. Alexandr Otáhal, Břeclav, Charvátská Nová Ves, CZ
Ing. Jaroslav Jankovský, Brno, CZ
Ing. Jakub Somer, Havlíčkův Brod, CZ

(74) Zástupce:
PatentCentrum Sedlák & Partners s.r.o., Husova tř. 1847/5, 370 01 České Budějovice, České Budějovice 3



(54) Název vynálezu:

Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu

(57) Anotace:
Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů (10) na pouzdře (7) elektronické součástky, při kterém se používá šablona (1) s kruhovými otvory (5) pro uložení pájkových kulových preforem (6) na pájecí plošky (8) pouzdra. Podle vynálezu se tato šablona umístí do výšky $0 \leq h \leq 9/10$ d, kde (d) je průměr pájkové kulové preformy (6), a pájení se provádí přímým ohřevem samotného tělesa šablony (1), od které se ohřívají preformy (6). Prostředek pro ohřev šablony (1) je tvořen např. topným elementem (2) nebo reaktivní vrstvou (12) na povrchu nebo uvnitř šablony (1).

CZ 307441 B6

Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky pomocí šablony a šablona k provádění tohoto způsobu

Oblast techniky

Vynález se týká montáže pouzder elektronických součástek na povrch desky plošného spoje tzv. pájením přetavením, konkrétně se týká vytvoření pájkových kulových vývodů na těchto pouzdrech.

Dosavadní stav techniky

Elektronické součástky se na povrch desek plošných spojů osazují tzv. povrchovou montáží, označenou zkratkou SMT (z angl. surface mount technology), kde se elektronické součástky pájením osazují přímo na povrch nebo na povrchy plošného spoje, který je zpravidla vícevrstvý. Tyto elektronické součástky se označují zkratkou SMD (z angl. surface mount device). SMD součástky jsou dodávány v různých velikostech v pouzdrech, jejichž tvar a velikost se liší podle druhu SMD součástek.

Tzv. BGA pouzdro (z angl. ball grid array) je typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž SMT. Vyznačuje se tím, že spodní strana obvodu je pokryta kontakty do tvaru pravoúhlé mřížky. Tato mřížka nemusí být zcela pravidelná, některé části mohou být vynechány. Na jednotlivé kontakty resp. jejich pájecí plošky se napájí kuličky, což jsou pájkové preformy kulového tvaru, které tvoří pájkové kulové vývody BGA pouzdra a po zapájení tvoří vodič mezi plošným spojem a BGA pouzdrem. Výhoda tohoto typu pouzdra spočívá v úspoře místa. Veškeré spoje jsou pod pouzdrem.

K tzv. pájení přetavením, které je označováno také jako reflow technologie, se používají různé postupy. Nejčastějším způsobem je ohřev infrazářením nebo konvekcí v průběžném pájecím zařízení. Desky plošných spojů, označované zkratkou PCB (z angl. printed circuit board) prochází na lineárním dopravníku přetavovací pecí, kde procházejí několika teplotními zónami. Ohřev je také možné provést pomocí speciální pájecí formy, která má tvarované výstupky dosedající na kontakty součástek a je odporově vyhřívaná. Ohřev se také provádí horkovzdušně, tzn. rozvodem ohřátého vzduchu systémem trysek přímo na místo pájení. Známé je také kondenzační pájeni, pájení laserem a jiné způsoby.

Pro pouzdra integrovaných obvodů, např. pro BGA pouzdra, se používá několik známých postupů vytváření pájkových kulových vývodů. Jedním ze známých způsobů je použití šablony s kruhovými otvory, popsané např. ve zveřejněné přihlášce vynálezu US 2005/0189401 A1. Šablona má kruhové resp. válcové otvory pro osazení pájkových kulových preforem na požadované pozice a v požadovaném rastru odpovídajícím typu pouzdra a počtu a poloze kontaktů resp. pájecích plošek na pouzdře. Průměr otvorů je větší než průměr pájkových preforem, takže kulička šablonou projde až na pájecí plošku. Šablony slouží jak pro přesné osazení kulových preforem před pájením, tak i pro fixaci preforem a zabránění zkratu a posunutí preforem během vlastního procesu pájení.

Proces vytvoření pájkových kulových vývodů probíhá v několika krocích. V prvním kroku se umístí šablona s kruhovými otvory do fixačního přípravku s ohraničujícím rámem. Tento rám slouží pro zabránění pájkovým kulovým preformám dostat se do polohy mimo šablonu. Pod šablonu se umístí pouzdro BGA bez kulových vývodů tak, aby poloha pájecích plošek na pouzdře odpovídala umístění kruhových otvorů v šabloně. Druhým krokem je nasypání pájkových kulových preforem do prostoru rámu. Pomocí nástroje nebo periodickým pohybem rámu dojde k umístění pájkových kulových preforem do všech otvorů šablony tak, že je každý otvor zaplněn právě jednou pájkovou kulovou preformou. Následně projde pouzdro se šablonou

osazenou pájkovými kulovými preformami pájecím procesem, při kterém se nepřímo ohřívá celá sestava. Nepřímý ohřev šablony včetně BGA pouzdra je zpravidla horkovzdušný, ale může být realizován i jinou známou formou pájení přetavením. Po zapájení pájkových kulových preforem se šablona opatrně odstraní. Výsledkem celého procesu je vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře BGA.

Nevýhoda tohoto známého způsobu a zařízení spočívá v tom, že proces je energeticky náročný a v tom, že tepelné zátěži je vystaveno i vlastní pouzdro BGA, což je nežádoucí.

Zveřejněná přihláška vynálezu KR 20050011454 A navrhuje pro osazení vývodů namísto šablony nanesení pájkových preforem pomocí tiskové technologie, přičemž neřeší problém přesného osazení pouzder. Ohřev je nepřímý, tzn., ohřívá se celá sestava, stejně jako u výše popsaného stavu techniky.

Zveřejněná přihláška vynálezu KR 20050063858 používá k osazení kulových vývodů BGA pouzder výše popsanou šablonu, která je opatřena polohovacím zařízením pro nastavení její polohy v horizontálním a vertikálním směru, a magnety pro fixaci nastavené polohy. Ohřev celé sestavy je nepřímý.

Úkolem vynálezu je odstranit výše uvedené nedostatky řešení známých ze stavu techniky, a vytvořit způsob a zařízení pro vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdrech elektronických součástek, jehož předností by byla malá spotřeba energie a snížená tepelná zátěž vlastního pouzdra, resp. elektronické součástky spojené s pouzdrem.

Podstata vynálezu

Tento úkol je vyřešen novým způsobem vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky a šablonou k provádění tohoto způsobu, podle předloženého vynálezu.

Při vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky se postupuje tak, že se nejprve nad pouzdro umístí šablona s kruhovými otvory tak, aby polohy otvorů odpovídaly polohám pájecích plošek na pouzdře. Následně se do otvorů vpraví pájkové kulové preformy, a nakonec se ohřevem a připájením pájkových kulových preforem na pájecí plošky vytvoří pájkové kulové vývody pouzdra. Podstata způsobu podle vynálezu spočívá v tom, že šablona se umístí do výšky $0 \leq h \leq 9/10\ d$ nad pájecími ploškami pouzdra, kde d je průměr pájkové kulové preformy. Ohřev a pájení pájkových kulových preforem se následně provádí přímým ohřevem samotného tělesa šablony nad teplotu tavení pájky v rozmezí od 30 do 3000 °C, přičemž dochází k roztavení pájkových kulových preforem se sníženým tepelným ovlivněním elektronické součástky v pouzdře. Tepelné zatížení pouzdra je oproti dosavadním způsobům ohřevu nižší i v případě, že šablona je položena přímo na pouzdře. V důsledku toho, že se ohřívá jen vlastní těleso šablony, je také dosaženo celkově nižší spotřeby energie při pájení. Ohřev šablony může být prováděn několika výhodnými způsoby.

První výhodný způsob ohřevu spočívá v tom, že ohřev šablony se provádí pomocí alespoň jednoho topného elementu uspořádaného uvnitř šablony nebo na jejím povrchu. Topným elementem může být např. tlustovrstvá elektricky vodivá pasta nebo jiný vhodný topný prostředek.

Druhý výhodný způsob ohřevu spočívá v tom, že šablona je z elektricky vodivého materiálu, s výhodou z nerezové oceli, a nahřátí šablony se provádí průchodem elektrického proudu materiálem šablony. Těleso šablony tak samo funguje jako odporový topný element.

Další výhodný způsob ohřevu spočívá v tom, že na povrchu nebo uvnitř šablony je reaktivní vrstva, vyvolávající katalytickou exotermickou reakci ve styku s topným plynem, a reaktivní vrstva je tímto topným plynem ofukována.

Další výhodný způsob ohřevu je takový, že šablona je z elektricky vodivého materiálu, s výhodou z nerezové oceli, a nahřátí šablony se provádí elektrickou indukcí, kdy kolem šablony je umístěna indukční cívka napájená střídavým proudem o vysoké frekvenci.

Pro správné umístění pájkových kulových preforem je výhodné, že šablona je umístěna ve výšce $h \leq 1/3$ d nad pájecími ploškami pouzdra, kde je vzdálenost šablony optimální pro vedení preforem a přenos tepla.

Předmětem vynálezu je také šablona pro vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdře elektronické součástky, která je opatřena prostředkem pro ohřev tělesa šablony nad teplotu tavení pájky pájkových kulových preforem, přičemž tento prostředek je tvořen alespoň jedním topným elementem uspořádaným uvnitř šablony nebo na jejím povrchu, nebo je tento prostředek tvořen elektricky vodivým materiálem šablony a zdrojem elektrického proudu připojeným k tělesu šablony, nebo je tento prostředek tvořen reaktivní vrstvou uspořádanou uvnitř šablony nebo na jejím povrchu pro katalytickou exotermickou reakci ve styku s topným plynem, nebo je tento prostředek tvořen elektricky vodivým materiálem šablony a indukční cívkou uspořádanou vně šablony.

V jednom výhodném provedení šablony je na jejím horním povrchu odnímatelně připevněna nebo položena krycí deska tak, aby zakrývala shora kruhové otvory pro pájkové kulové preformy v šabloně, přičemž krycí deska je vytvořena ze stejného materiálu jako šablona nebo z materiálu odolávajícímu teplotám nad teplotou tavení pájky v rozmezí od 30 do 3000 °C. Krycí deska brání odvodu tepla nad šablonou a zadržuje teplo v oblasti šablony s pájkovými kulovými preformami. Zároveň omezuje přístup vzduchu resp. kyslíku.

V jiném výhodném provedení šablony je krycí deska opatřena soustavou odvětrávacích otvorů, jejichž poloha odpovídá polohám kruhových otvorů v šabloně. Odvětrávací otvory slouží k odvodu odpařeného tavidla při procesu pájení. Odvětrávací otvory jsou s výhodou kruhového tvaru a jejich průměr je menší než průměr kruhových otvorů šablony.

Předmětem vynálezu je rovněž sestava pouzdra elektronické součástky určeného pro osazení pájkovými kulovými vývody a šablony pro vytvoření pájkových kulových vývodů, jejíž podstata spočívá v tom, že šablona je nad pouzdrem umístěna ve výšce $0 \leq h \leq 9/10$ d, kde (d) je průměr pájkových kulových preforem.

Výhody způsobu a zařízení podle vynálezu spočívají zejména v tom, že při pájení se neohřívá celá sestava pouzdra a šablony, takže se snižuje energetická náročnost celého procesu, a také v tom, že při ohřevu samotného tělesa šablony dochází k menšímu tepelnému zatížení pouzdra resp. elektronické součástky v pouzdře, než je tomu u známých způsobů pájení pájkových kulových preforem. Další výhoda spočívá v tom, že pro pájecí proces není potřeba pořizovat drahé zařízení pro kontinuální nepřímý ohřev.

Objasnění výkresů

Vynález bude blíže objasněn pomocí výkresů, na nichž znázorňují

obr. 1 nárys šablony s topným elementem na povrchu šablony,
obr. 2 řez sestavou pouzdra a šablony s topným elementem podle obr. 1,
obr. 3 řez sestavou pouzdra a šablony s krycí deskou a s topným elementem podle obr. 1,
obr. 4 nárys krycí desky s odvětrávacími otvory,

obr. 5 řez sestavou pouzdra, šablony a krycí desky s odvětrávacími otvory,
obr. 6 nárys šablony s prostředkem pro ohřev tělesa šablony, tvořeným reaktivní vrstvou,
obr. 7 řez sestavou pouzdra a šablony s reaktivní vrstvou, se znázorněním přívodu topného plynu,
obr. 8 nárys šablony s topným elementem uspořádaným uvnitř šablony,
obr. 9 řez šablonou podle obr. 8,
obr. 10 řez hotovými pájkovými kulovými vývody na pájecích ploškách pouzdra,
obr. 11 nárys šablony s indukční cívkou,
obr. 12 řez šablonou podle obr. 11.

Příklady uskutečnění vynálezu

Rozumí se, že dále popsané a zobrazené konkrétní případy uskutečnění vynálezu jsou představovány pro ilustraci, nikoliv jako omezení vynálezu na uvedené příklady. Odborníci znalí stavu techniky najdou nebo budou schopni zajistit za použití rutinního experimentování větší či menší počet ekvivalentů ke specifickým uskutečněním vynálezu, která jsou zde popsána. I tyto ekvivalenty budou zahrnuty v rozsahu následujících patentových nároků.

Na obr. 1 a obr. 2 je znázorněna základní sestava pouzdra 7 elektronické součástky, konkrétně BGA pouzdra, které je opatřeno pájecími ploškami 8. Nad pouzdrem 7 je pomocí nezobrazeného polohovacího systému uspořádána šablona 1 z keramického materiálu, která je umístěna ve výšce h nad pouzdrem 7. Šablona 1 je opatřena kruhovými otvory 5 s průměrem d_k, jejichž poloha a rozmístění odpovídá polohám a rozmístění pájecích plošek 8. V kruhových otvorech 5 jsou osazeny pájkové kulové preformy 6 s průměrem d dosedající na pájecí plošky 8, ke kterým se připájí, jakmile se šablona 1 ohřeje nad teplotu tavení pájky, přičemž k přenosu tepla ze šablony 1 na pájkové kulové preformy 6 dochází radiací, nenucenou konvencí a v místě dotyku i kondukcí ze stěn kruhových otvorů 5, ve kterých jsou pájkové kulové preformy 6 osazeny.

Šablona je v příkladu provedení zobrazeném na obr. 1 a obr. 2 opatřena prostředkem pro ohřev tvořeným topným elementem 2 uspořádaným na povrchu šablony 1. Topný element 2 je tvořen odporovou tlustovrstvou vrstvou, která vykazuje elektrický odpor a je připojena pomocí kontaktů 3 a přívodních vodičů 4 k nezobrazenému zdroji elektrického proudu (I). Odporová vrstva má složení RuO_2 + skelná frita, nebo jiné odborníkovi známé a vhodné složení. Topný element 2 může být tvořen i elektricky vodivou tlustovrstvou pastou, která se běžně používá jako materiál pro vodivé kontakty, např. z materiálu Ag + skelná frita, Au + skelná frita, AgPd + skelná frita, a jiné. Je potřeba počítat s tím, že vodivá pasta má menší elektrický odpor než odporová vrstva, a podle toho dimenzovat geometrii topného elementu 2 i výkon zdroje. Kromě past mohou být jako topné elementy 2 využity i elektricky vodivé vrstvy nanášené vakuovanými technologiemi jako napařování a naprašování. Šablona 1 může být vyrobena z materiálu SiC nebo z jiného vhodného materiálu.

V konkrétním příkladu provedení pro průměr pájkových kulových preforem 6 d = 0,25 mm je šablona 1 umístěna ve výšce h = 0,08 až 0,09 mm.

Horní hranice pro umístění šablony 1 je h = 9/10 d, ale optimálně je šablona 1 umístěna ve výšce $h \leq 1/3$ d nad pouzdrem 7, tj. ve výšce 0,083 mm, protože v této výšce dochází k optimálnímu poměru přesnosti umístění preformy 6 a přenosu tepla při pájení.

Stejné výškové poměry pak platí i u dalších níže popsaných příkladů uskutečnění vynálezu.

Na obr. 3 je znázorněn příklad provedení s topným elementem 2 na povrchu šablony 1, stejně jako na obr. 1 a obr. 2, ale na povrchu topného elementu 2 je navíc položena krycí deska 9, vytvořená také z keramického materiálu, která zakrývá kruhové otvory 5 s pájkovými kulovými

preformami 6 a brání úniku tepla při procesu pájení, případně vyskočení pájkových kulových preforem 6 při ohřevu.

Na obr. 4 a obr. 5 je znázorněna krycí deska 9 s odvětrávacími otvory 11, které jsou při uložení krycí desky 9 na šablonu 1 rozmístěny nad kruhovými otvory 5 s preformami 6. Kruhové otvory 5 mají průměr d_k = 0,03 mm, ale v zásadě mohou mít různé průměry. Výhodné je, když platí $d_0 < d_k$, protože pak odvětrávací otvory 11 dobře plní svou funkci při odvodu odpařeného tavidla, ale zároveň brání nadměrnému úniku tepla z pájecího prostoru.

Na obr. 6 a obr. 7 je znázorněn jiný příklad provedení prostředku pro ohřev šablony 1, a to pomocí reaktivní vrstvy 12 vykazující katalytickou exotermickou reakci při styku s topným plynem 13. Reaktivní vrstva 12 je nanesena na povrchu šablony 1 a z přívodu 14 je veden topný plyn 13 směrem na povrch šablony 1, kde v důsledku probíhající exotermické reakce vzniká teplo, šablona 1 se ohřívá a probíhá proces pájení. Jako reaktivní vrstvu 12 lze využít např. platinovou vrstvu, jako topný plyn 13 např. metan.

Na obr. 8 a obr. 9 je znázorněn příklad prostředku pro ohřev šablony 1 s topným elementem 2 uspořádaným uvnitř tělesa šablony 1. Šablona 1 je z keramického korundového materiálu a je vytvořena jako třívrstvý sendvič, kde topný element 2 tvoří prostřední vrstvu. Šablona 1 je opatřena kontakty 3 pro přívod elektrického proudu I. Šablona 1 může být také z nerezového materiálu. Topný element 2 může být tvořen např. odporovou tlustovrstvou vrstvou nebo elektricky vodivou vrstvou jako na obr. 1 a obr. 2, reaktivní vrstvou 12 jako na obr. 6 a obr. 7, nebo jakýmkoli vhodným topným tělesem, které lze integrovat do tělesa šablony 1.

V jiném znázorněném příkladu provedení je šablona 1 vyrobena z elektricky vodivého materiálu, např. z nerezové oceli. K šabloně 1 jsou připojeny kontakty 3 a přívody 4 od zdroje elektrického proudu I. Průchodem elektrického proudu I se ohřívá vlastní těleso šablony 1 na teplotu potřebnou k pájení pájkových kulových preforem 6. Toto řešení je vhodné hlavně jako zjednodušené provedení šablony 1 z pohledu ceny a procesních kroků při výrobě. Také je toto řešení výhodné z pohledu zavedené výroby šablon z nerezového materiálu pro vytváření pájkových kulových vývodů 10 na elektronických pouzdrech 7 z pájkových kulových preforem.

Na obr. 11 a obr. 12 je znázorněn ještě další příklad provedení prostředku pro ohřev šablony 1, kde šablona 1 je také z elektricky vodivého materiálu, např. z nerezové oceli. Kolem šablony 1 je vedeno vinutí indukční cívky 15, která je pomocí přívodů 16 připojena k nezobrazenému zdroji střídavého elektrického proudu I. Šablona 1 se ohřívá elektrickou indukcí.

Šablona 1 a krycí deska 9 může být vyrobena rovněž z keramických materiálů nebo z nerezové oceli, případně z jiného pro pájku nesmáčivého materiálu nebo smáčivého materiálu, který je opatřen povrchovou úpravou z materiálu nesmáčivého pro pájku, např. teflonu, povrchového oxidu vznikajícího na povrchu oceli, apod.

Při vytvoření pájkových kulových vývodů 10, které jsou znázorněny na obr. 10, se postupuje tak, že se nejprve nad pouzdro 7 elektronické součástky umístí šablona 1 do předem zvolené polohy a výšky h pomocí nezobrazeného polohovacího systému, aby byla splněna podmínka $0 \leq h \leq 9/10$ d. Následně se do kruhových otvorů 5 v šabloně 1 vpraví běžným postupem pájkové kulové preformy 6, a případně se na šablonu 1 umístí krycí deska 9 plná nebo opatřená odvětrávacími otvory 11. Ohřev a pájení pájkových kulových preforem 6 na pájecí plošky 8 se provádí přímým ohřevem samotného tělesa šablony 1 nad teplotu tavení pájky v rozmezí od 30 do 3000 °C, podle druhu použité pájky. Připájením pájkových kulových preforem 6 na pájecí plošky 8 dojde k vytvoření pájkových kulových vývodů 10 na pouzdře 7 elektronické součástky.

Přímý ohřev šablony 1 se provádí některým z výše popsaných prostředků pro ohřev. Následně se opatrně sejme šablona 1, případně šablona 1 s krycí deskou 9 z pouzdra 7.

Průmyslová využitelnost

Způsob a šablonu podle vynálezu lze využít v oblasti přípravy pouzder elektronických součástek pro montáž na povrch desky plošného spoje tzv. pájením přetavením, konkrétně pro vytvoření a umístění pájkových kulových vývodů na těchto pouzdrech do správných míst.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů (10) na pouzdře (7) elektronické součástky, při kterém se nad pouzdro (7) umístí šablona (1) s kruhovými otvory (5) tak, aby polohy otvorů (5) odpovídaly polohám pájecích plošek (8) na pouzdře (7), následně se do otvorů (5) vpraví pájkové kulové preformy (6), a nakonec se ohřevem a připájením pájkových kulových preforem (6) na pájecí plošky (8) vytvoří pájkové kulové vývody (10) pouzdra (7), **vyznačující se tím**, že šablona (1) se umístí do výšky (h) nad pájecími ploškami (8) pouzdra (7), přičemž platí $0 \leq h \leq 9/10$ d, kde (d) je průměr pájkové kulové preformy (6), a ohřev a pájení pájkových kulových preforem (6) se provádí přímým ohřevem samotného tělesa šablony (1) nad teplotu tavení pájky v rozmezí od 30 do 3000 °C, při kterém dochází k roztavení pájkových kulových preforem (6) za sníženého tepelného ovlivnění elektronické součástky v pouzdře (7).

2. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že ohřev šablony (1) se provádí pomocí alespoň jednoho topného elementu (2) uspořádaného uvnitř šablony (1) nebo na jejím povrchu.

3. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že šablona (1) je z elektricky vodivého materiálu, s výhodou z nerezové oceli, a ohřev šablony (1) se provádí průchodem elektrického proudu materiálem šablony (1).

4. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že ohřev šablony (1) se provádí tak, že na povrchu nebo uvnitř šablony (1) je reaktivní vrstva (12), vykazující katalytickou exotermickou reakci ve styku s topným plynem (13), a reaktivní vrstva (12) je tímto topným plynem (13) ofukována.

5. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že šablona (1) je z elektricky vodivého materiálu, s výhodou z nerezové oceli, a ohřev šablony (1) se provádí elektrickou indukcí, kdy kolem šablony (1) je umístěna indukční cívka (15) napájená střídavým proudem o vysoké frekvenci.

6. Způsob vytvoření pájkových kulových vývodů podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že šablona (1) je umístěna ve výšce $0 \leq h \leq 1/3$ d nad pájecími ploškami (8) pouzdra (7).

7. Šablona (1) pro vytvoření pájkových kulových vývodů (10) na pouzdře (7) elektronické součástky způsobem podle některého z nároků 1 až 6, opatřená soustavou kruhových otvorů (5) pro umístění pájkových kulových preforem (6) do poloh odpovídajících polohám pájkových plošek (8) na pouzdře (7), **vyznačující se tím**, že je opatřena prostředkem pro ohřev tělesa šablony (1) nad teplotu tavení pájky pájkových kulových preforem (6), přičemž tento prostředek je tvořen alespoň jedním topným elementem (2) uspořádaným uvnitř šablony (1) nebo na jejím povrchu, nebo je tento prostředek tvořen elektricky vodivým materiálem šablony (1) a zdrojem elektrického proudu (I) připojeným k tělesu šablony (1), nebo je tento prostředek tvořen reaktivní vrstvou (12) uspořádanou uvnitř šablony (1) nebo na jejím povrchu pro katalytickou

exotermickou reakci ve styku s topným plynem (13), nebo je tento prostředek tvořen elektricky vodivým materiálem šablony (1) a indukční cívkou (15) uspořádanou vně šablony (1).

8. Šablona (1) podle nároku 7, **vyznačující se tím**, že na jejím horním povrchu je odnímatelně připevněna nebo položena krycí deska (9) tak, aby zakrývala shora kruhové otvory (5) pro pájkové kulové preformy (6) v šabloně (1), přičemž krycí deska (9) je vytvořena ze stejného materiálu jako šablona (1) nebo z materiálu odolávajícímu teplotám nad teplotou tavení pájky v rozmezí od 30 do 3000 °C.

9. Šablona (1) podle nároku 7, **vyznačující se tím**, že na jejím horním povrchu je odnímatelně připevněna nebo položena krycí deska (9), opatřená soustavou odvětrávacích otvorů (11), jejichž poloha odpovídá polohám kruhových otvorů (5) v šabloně (1).

10. Šablona (1) podle nároku 9, **vyznačující se tím**, že odvětrávací otvory (11) jsou kruhového tvaru a jejich průměr (d_0) je menší než průměr (d_k) kruhových otvorů (5) šablony (1).

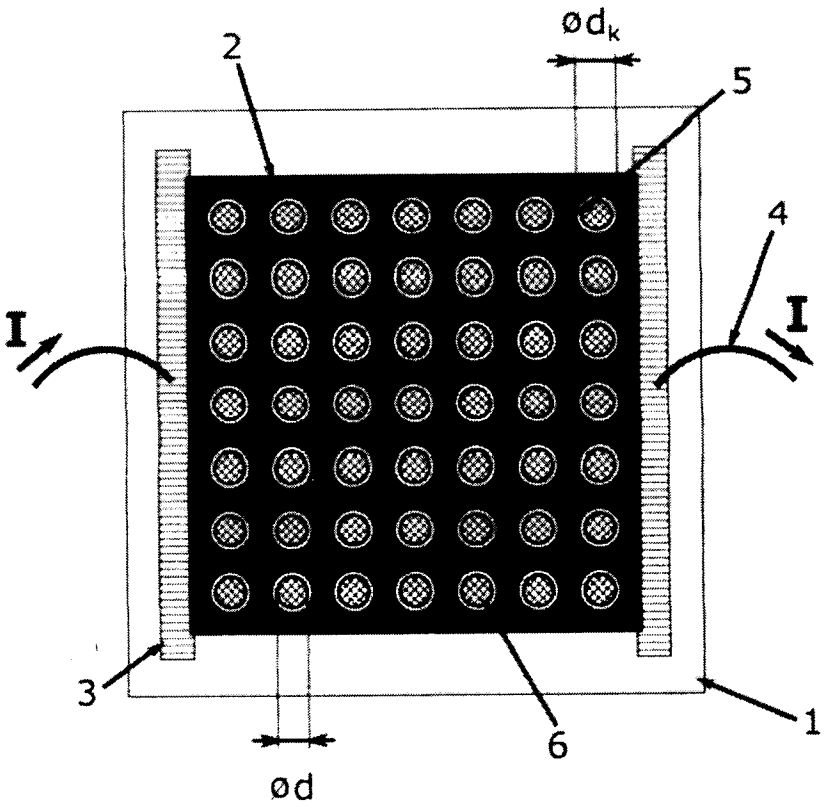
11. Sestava pouzdra (7) elektronické součástky určeného pro osazení pájkovými kulovými vývody (10) a šablony (1) podle některého z nároků 7 až 10, kde šablona (1) je opatřena kruhovými otvory (5) pro pájkové kulové preformy (6), polohovacím systémem pro umístění šablony (1) nad pouzdrem (7) v takové poloze, kde polohy kruhových otvorů (5) odpovídají polohám pájecích plošek (8) na pouzdře (7), **vyznačující se tím**, že šablona (1) je nad pouzdrem (7) umístěna ve výšce $0 \leq h \leq 9/10\ d$, kde (d) je průměr pájkových kulových preforem (6).

5 výkresů

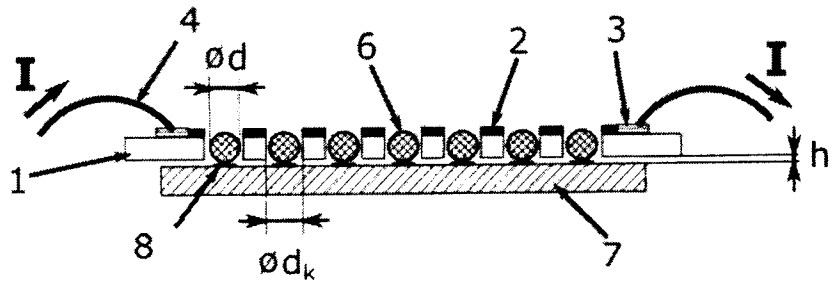
Seznam vztahových značek

1 šablona
2 topný element
3 kontakty topného elementu
4 přívodní vodiče topného elementu
5 otvory v šabloně
6 pájková kulová preforma
7 pouzdro elektronické součástky
8 pájecí ploška
9 krycí deska
10 pájkový kulový vývod
11 odvětrávací otvor
12 exotermní vrstva
13 topný plyn
14 přívod topného plynu
15 indukční cívka
16 přívod střídavého proudu

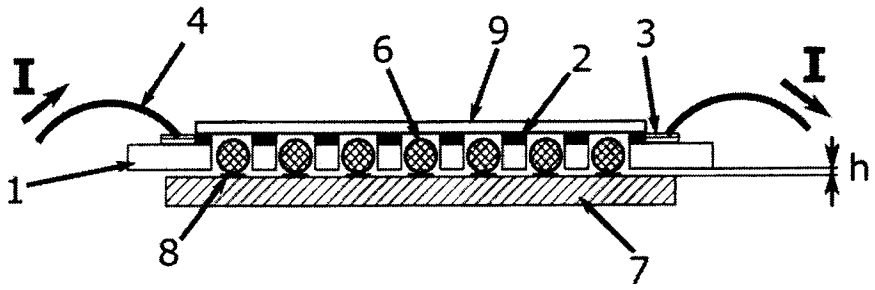
I elektrický proud
d průměr pájkové kulové preformy
d_0 průměr odvětrávacích otvorů v krycí desce
d_k průměr kruhových otvorů v šabloně



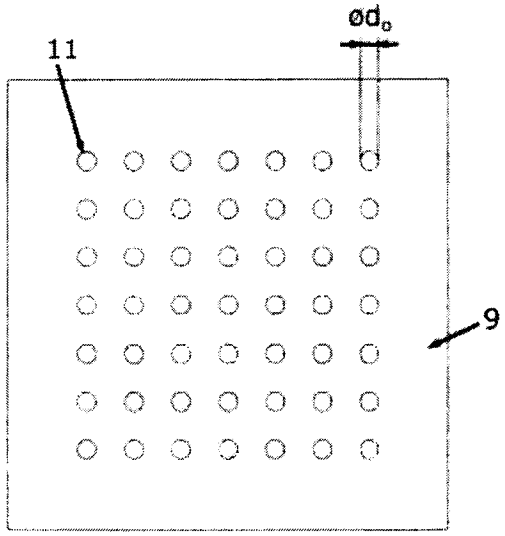
Obr. 1



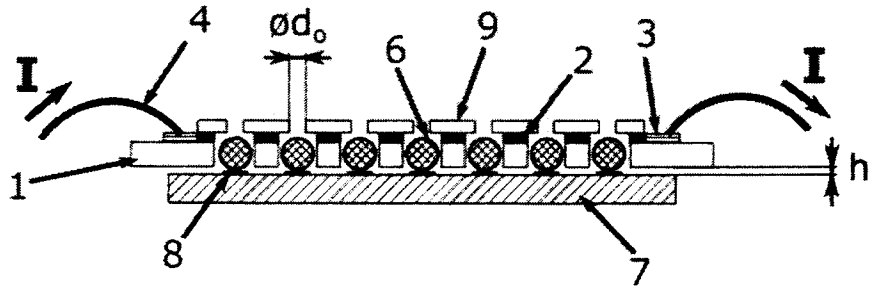
Obr. 2



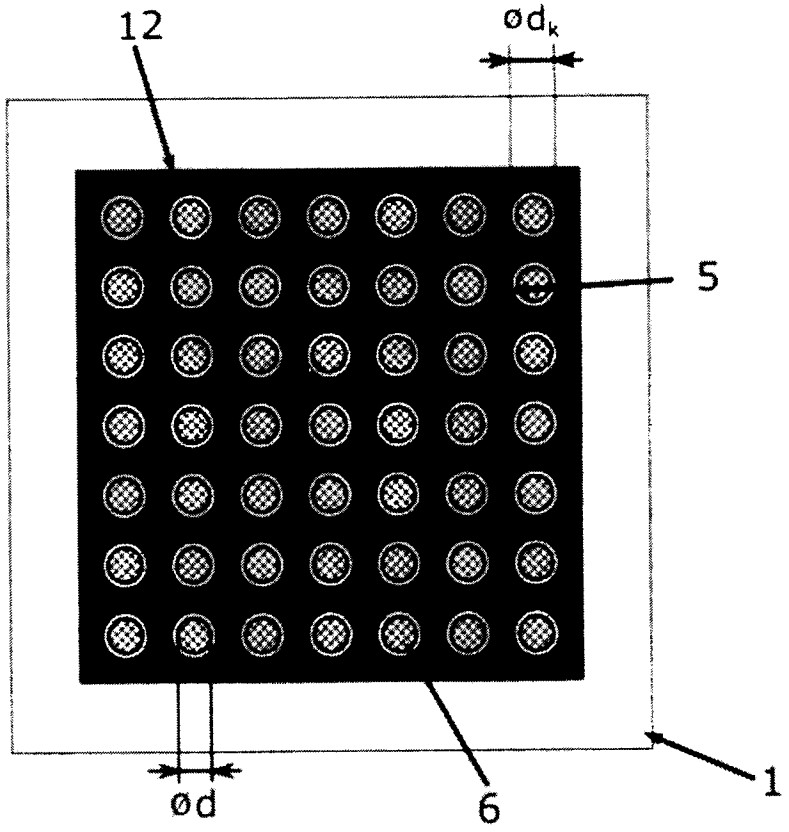
Obr. 3



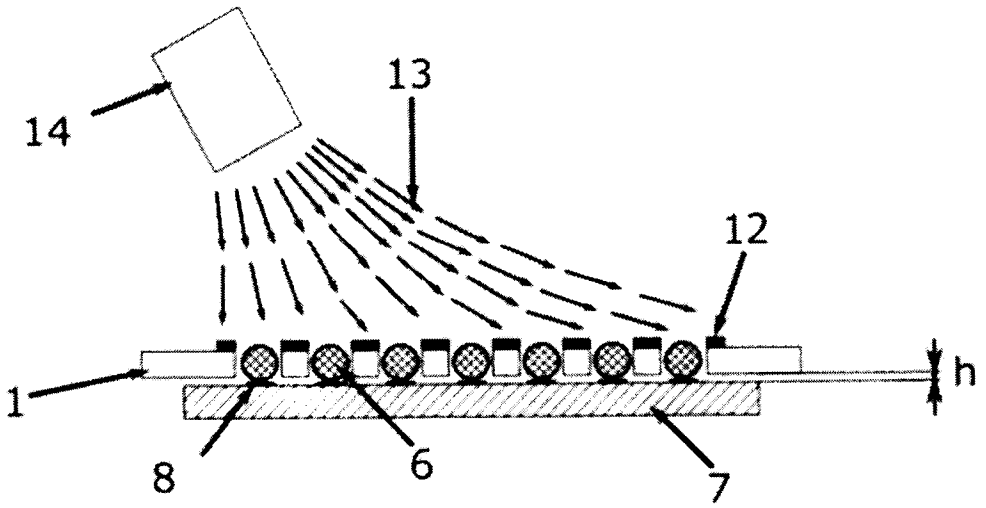
Obr. 4



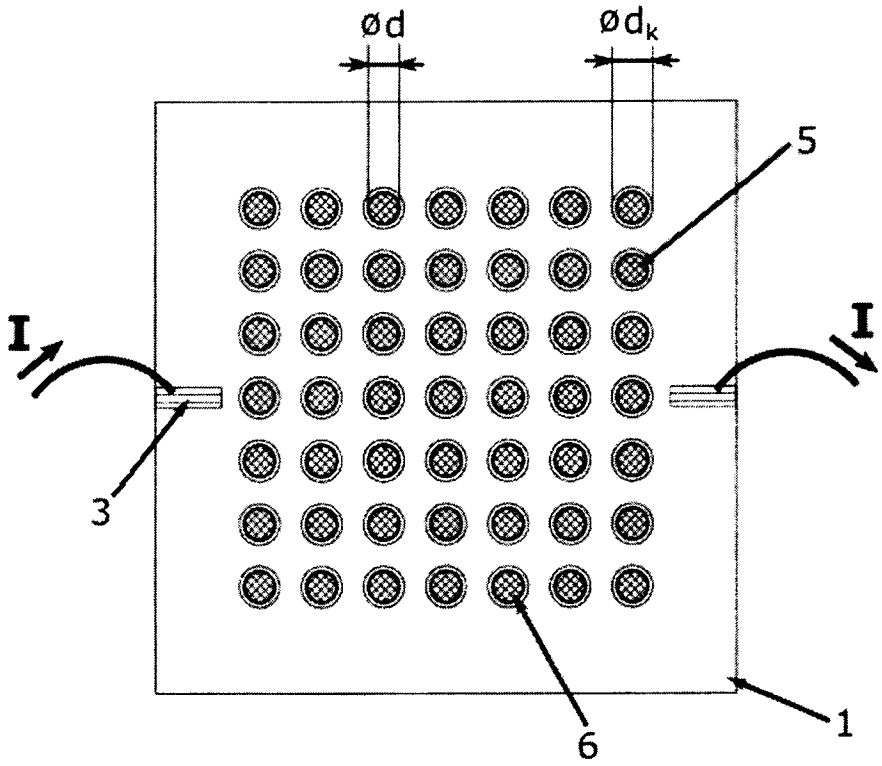
Obr. 5



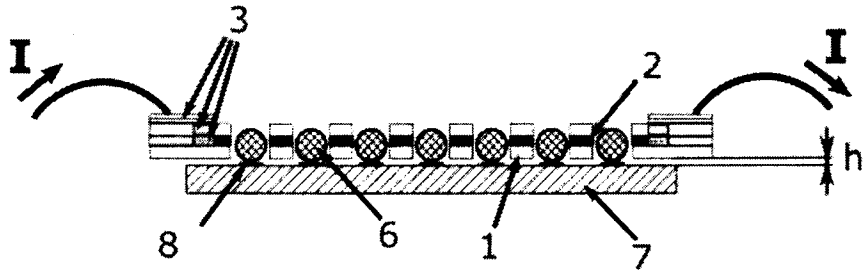
Obr. 6



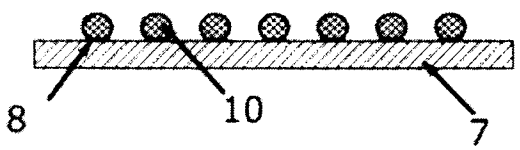
Obr. 7



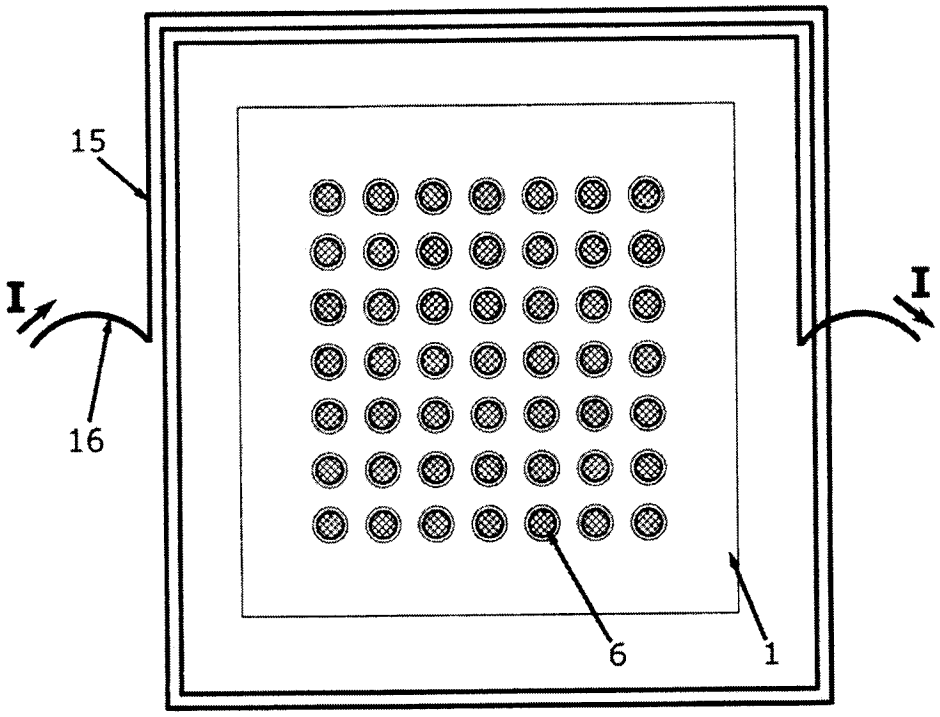
Obr. 8



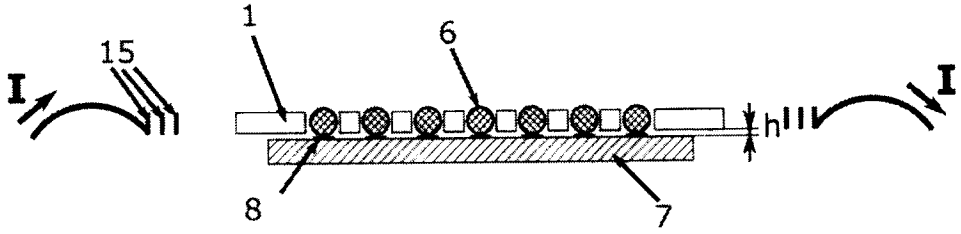
Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11



Obr. 12

Konec dokumentu

Příloha č. 3

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

33 222

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

H01L 23/498 (2006.01)

(19) ČESKÁ REPUBLIKA

ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2019-36422**

(22) Přihlášeno: **19.07.2019**

(47) Zapsáno: **17.09.2019**

(73) Majitel:
Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří, CZ

(72) Původce:
Ing. Alexandr Otáhal, Břeclav, Charvátská Nová Ves, CZ
Ing. Jaroslav Jankovský, Brno, Řečkovice, CZ
Ing. Michal Řezníček, Ph.D., Nedachlebice, CZ
Ing. Josef Skácel, Litovel, CZ
Ing. Jakub Somer, Havlíčkův Brod, CZ

(74) Zástupce:
Ing. Dobroslav Musil, patentová kancelář, Ing. Dobroslav Musil, Zábrdovická 801/11, 615 00 Brno, Zábrdovice

(54) Název užitného vzoru:
Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA

CZ 33222 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitného vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA

Oblast techniky

Technické řešení se týká šablony pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA vytvořené z elektricky vodivého materiálu, k jejímž dvěma protilehlým okrajům je připojitelný zdroj elektrického proudu, přičemž šablona je ve střední části mezi okraji opatřena soustavou kruhových otvorů pro umístění pájkových kulových preforem vytvářejících aktivní část šablony.

Dosavadní stav techniky

Tzv. BGA pouzdro (z angl. ball grid array) je typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž SMT. Vyznačuje se tím, že spodní strana obvodu je pokryta kontakty do tvaru pravoúhlé mřížky. Tato mřížka nemusí být zcela pravidelná, některé části mohou být vynechány. Na jednotlivé kontakty resp. jejich pájecí plošky se napájí kuličky, což jsou pájkové preformy kulového tvaru, které tvoří pájkové kulové vývody BGA pouzdra a po zapájení tvoří vodič mezi plošným spojem a BGA pouzdrem. Výhoda tohoto typu pouzdra spočívá v úspoře místa. Veškeré spoje jsou pod pouzdrem.

Pro pouzdra BGA integrovaných obvodů se používá několik známých postupů vytváření pájkových kulových vývodů. Jedním ze známých způsobů je použití šablony s kruhovými otvory, popsané např. v CZ307441. Šablona je ve své střední části opatřena kruhovými, resp. válcovými otvory pro osazení pájkových kulových preforem na požadované pozice a v požadovaném rastru odpovídajícím typu pouzdra a počtu a poloze kontaktů, tedy pájecích plošek na pouzdru. Kruhové otvory vytvářejí aktivní část šablony.

Šablona se umístí nad pouzdro tak, aby polohy otvorů odpovídaly polohám pájecích plošek na pouzdru. Následně se do otvorů vpraví pájkové kulové preformy a nakonec se ohřevem šablony nad teplotu tavení pájky roztaví pájkové kulové preformy a připájí se na příslušné pájecí plošky pouzdra BGA, na nichž vytvoří pájkové kulové vývody.

Jednou z popsaných možností ohřevu šablony je ohřev průchodem elektrického proudu materiálem šablony, který je elektricky vodivý.

Nevýhodou tohoto řešení je skutečnost, že aktivní část šablony se průchodem elektrického proudu ohřívá nerovnoměrně, přičemž pro bezchybnou práci šablony je potřeba, aby v místě aktivní části byla na celé ploše aktivní části teplota rovnoměrná, tedy v rozmezí +-5 °C.

Cílem technického řešení je dosáhnout usměrnění/zrovnoměrnění toku elektrického proudu šablonou v místě její aktivní části a tím odstranění výše uvedené nevýhody.

Podstata technického řešení

Cíle předkládaného technického řešení je dosaženo šablonou pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA vytvořenou z elektricky vodivého materiálu, jejíž podstata spočívá v tom, že na protilehlých okrajích šablony pro připojení zdroje elektrického proudu jsou vytvořeny připojovací elektrody po celé délce okrajů. Přívodem elektrického proudu v celé šířce šablony, jejíž tvar je obdélníkový, se dosáhne rovnoměrnějšího toku elektrického proudu šablonou ve srovnání s bodovým připojením.

Dalšího zrovnoměrnění toku elektrického proudu šablonou a zejména zrovnoměrnění ohřevu aktivní části šablony se dosáhne tím, že mezi každou připojovací elektrodou na okraji šablony

a aktivní oblastí je vytvořen alespoň jeden otvor nebo soustava otvorů, přičemž otvor/otvory mohou mít jednoduchý geometrický tvar nebo kombinovaný složitý tvar, například tvar čtverce, kruhu, obdélníka, tvar písmene „v“ nebo písmena „w“.

Objasnění výkresů

Příkladná provedení šablon podle předkládaného technického řešení jsou znázorněna na přiloženém výkrese na Obr. 1.

Příklady uskutečnění technického řešení

Šablona 1 je vyrobena z elektricky vodivého materiálu a v příkladném znázorněném provedení má tvar obdélníka. Ve střední části je v šabloně vytvořeno množství kruhových/válcových otvorů 3, které tvoří aktivní část 2 šablony a slouží pro umístění pájkových kulových preforem. Vzhledem k malé tloušťce šablony 1 bude dále v textu užíváno označení kruhové otvory 3. Na užších protilehlých okrajích obdélníkové šablony 1 jsou vytvořeny připojovací elektrody 5, které jsou ve výhodném znázorněném provedení vytvořeny po celé délce těchto okrajů a slouží pro připojení známého neznázorněného zdroje elektrického proudu. Elektrický proud může být stejnosměrný nebo střídavý. Přívodem elektrického proudu v celé šířce šablony 1, jejíž tvar je obdélníkový, se dosáhne rovnoměrnějšího toku elektrického proudu šablonou 1 ve srovnání s bodovým připojením.

Maximálního zrovnoměrnění toku elektrického proudu šablonou 1, a v důsledku toho i zrovnoměrnění ohřevu aktivní části 2 šablony 1 se dosáhne vytvořením přídavných otvorů 4 v ploše šablony mezi jejími okraji s připojovacími elektrodami 5 a aktivní částí 2, v níž jsou vytvořeny kruhové otvory 3 pro umístění pájkových kulových preforem. V provedení podle Obr. 1 jsou na každé straně vytvořeny tři obdélníkové přídavné otvory 4 uspořádané ve sloupcích nad sebou. U provedení podle Obr. 2 jsou na každé straně vytvořeny dva kruhové přídavné otvory 4 a mezi nimi přídavný otvor 4 ve tvaru ležatého písmene „v“, resp. šipky.

Tvary přídavných otvorů 4 mohou být různé, stejně jako jejich počet. Ve znázorněném provedení jsou přídavné otvory 4 na obou stranách uspořádány symetricky vzhledem k aktivní části 2 šablony 1. Pro dosažení rovnoměrného rozložení teploty v aktivní části 2 šablony 1 mohou být přídavné otvory 4 rozloženy i nesymetricky. Tvary přídavných otvorů 4 mohou být geometricky jednoduché nebo složité a mohou být mezi sebou kombinovány.

Průmyslová využitelnost

Šablonu podle předkládaného technického řešení lze využít v oblasti přípravy pouzder elektronických součástek, konkrétně pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Šablona pro vytváření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA vytvořená z elektricky vodivého materiálu, k jejímž dvěma protilehlým okrajům je připojitelný zdroj elektrického proudu, přičemž šablona (1) je ve střední části mezi okraji opatřena soustavou kruhových otvorů (3) pro umístění pájkových kulových preforem vytvářejících aktivní část (2) šablony (1), **vyznačující se tím**, že na protilehlých okrajích pro připojení zdroje elektrického proudu jsou vytvořeny připojovací elektrody (5).

2. Šablona podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že připojovací elektrody (5) jsou vytvořeny po celé délce okrajů šablony (1).

3. Šablona podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že mezi příslušnou připojovací elektrodou (5) na okraji šablony (1) a aktivní oblastí (2) s kruhovými otvory (3) pro umístění pájkových kulových preforem je vytvořen alespoň jeden přídavný otvor (4).

4. Šablona podle nároku 3, **vyznačující se tím**, že přídavný otvor/otvory (4) mají jednoduchý geometrický tvar.

5. Šablona podle nároku 4, **vyznačující se tím**, že přídavný otvor/otvory (4) mají tvar čtverce, kruhu nebo obdélníka.

6. Šablona podle libovolného z nároků 3 až 5, **vyznačující se tím**, že přídavný otvor/otvory (4) mají kombinovaný tvar.

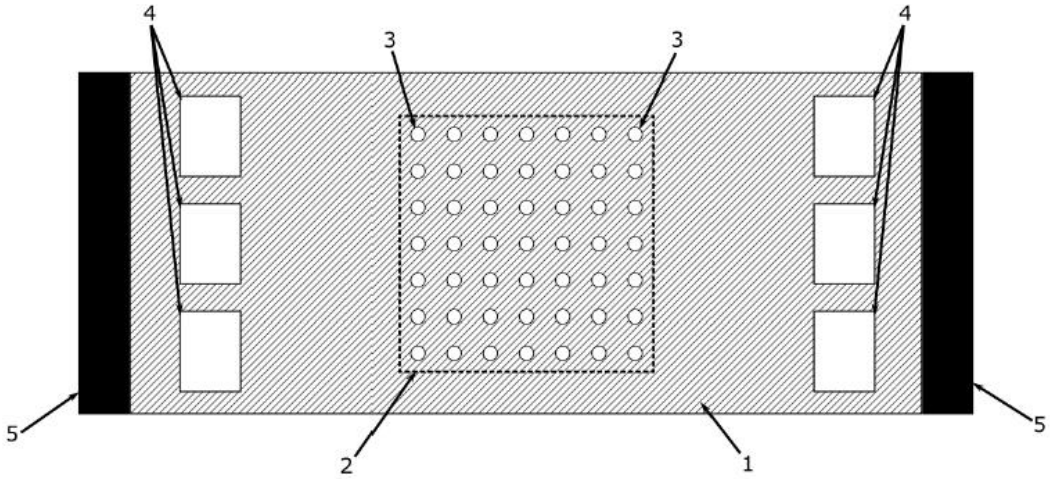
7. Šablona podle nároku 6, **vyznačující se tím**, že přídavný otvor/otvory mají tvar polygonu, tvar písmene „v“ nebo písmena „w“.

8. Šablona podle libovolného z nároků 3 až 7, **vyznačující se tím**, že přídavné otvory (4) jsou na obou stranách uspořádány symetricky vzhledem k aktivní části (2) šablony (1).

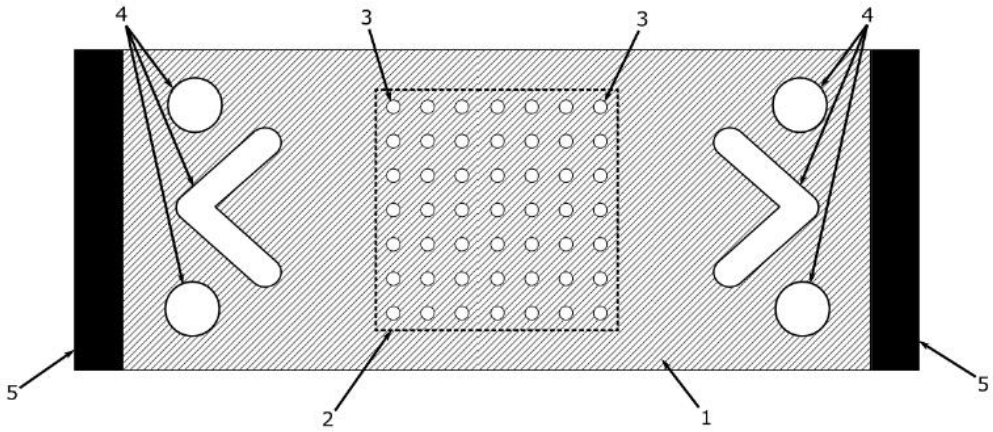
1 výkres

Seznam vztahových značek:

1 šablona
2 aktivní část šablony
3 otvory aktivní části šablony
4 přídavné otvory
5 připojovací elektrody.



Obr. 1



Obr. 2