



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

VÝZKUM VLIVU NOVÉ METODY PRO VYTVOŘENÍ KULOVÝCH PÁJKOVÝCH VÝVODŮ BGA POUZDER NA INTERMETALICKÉ VRSTVY

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF A NEW METHOD FOR BALL-ATTACH PROCESS ON BGA PACKAGES
ON INTERMETALLIC LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Adam Gregor

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Adam Gregor

ID: 203225

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum vlivu nové metody pro vytvoření kulových pájkových vývodů BGA pouzder na intermetalické vrstvy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rešerši na téma vytvoření, resp. znovuvytvoření kulových pájkových vývodů na BGA pouzdře pomocí kulových pájkových preforem a popište metody pro zjištění tloušťky a tvaru intermetalických vrstev. Optimalizujte nastavení regulačních konstant v regulátoru pájecí stanice a nastavte pájecí profil pro proces reballing BGA pouzder (pájecí slitina SAC305). Vytvořte vzorky BGA pouzder s kulovými pájkovými vývody za použití pájecího zařízení s přímo vyhřívanou šablonou, kde bude zajištěna různá vzdálenost šablony od pouzdra (alespoň 3 vzdálenosti). Zaměřte na zjištění vlivu této metody na tvorbu intermetalických vrstev (tloušťka, tvar) v kulových pájkových vývodech. Vše sepište a výsledky diskutujte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle zadání vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 7.8.2020

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkoumáním nové metody vytvoření pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA pomocí přímo vyhřívané šablony. Byly zde srovnány stávající postupy vytvoření vývodů a možné přínosy při použití této nové metody. Také byla navržena metodologie na vytvoření vzorků pomocí nové metody přetavení a její vliv na tvorbu a pevnost intermetalických vrstev pájkových kulových vývodů, vzhledem k nastavované výšce vyhřívané šablony, která byla navržena k přetavení BGA vývodů. Kromě navržení metodologie byly také provedeny stříhové zkoušky a metalografické výbrusy vzorků. Zkoumala se tloušťka intermetalické vrstvy a její drsnost. Bylo provedeno vyhodnocení výsledků, na jejichž základě byla optimalizována nová metoda pájení přetavení u pájkových kulových vývodů na BGA pouzdrech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pájkové kulové vývody, intermetalická vrstva, jakost, BGA pouzdro, teplotní profil

ABSTRACT

This work deals with exploring a new method of ball-attach process on BGA packages using a directly heated stencil. The existing procedures of making solder bumps were compared with possible benefits of using this new method. The methodology was established to create samples using a new reflow method and its effect on the formation and strength of intermetallic layers of solder bumps, due to the set height of the heated template, which was designed for reflow of BGA terminals. In addition to the design of the methodology, shear tests and metallographic sections of the samples were also performed. The thickness of the intermetallic layer and its roughness were examined. An evaluation of the results was performed on the basis of which a new method of reflow soldering of solder balls on BGA packages was optimized.

KEYWORDS

Solder bumps, intermetallic layer, quality, BGA package, temperature profile

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.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Adam Gregor*

VUT ID studenta: *203225*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2019/20*

Téma závěrečné práce: *Výzkum vlivu nové metody pro vytvoření kulových pájkových vývodů BGA pouzder na intermetalické vrstvy*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: *7. srpna 2020*

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce. Také děkuji firmě NeVo GmbH za poskytnutí pájecích materiálů (pájkové kuličky a tavidlo).

OBSAH

Úvod	1
1 BGA (Ball Grid array)	2
1.1 Povrchová úprava DPS	2
1.1.1 Imerzní cín	2
1.1.2 ENIG/ENEPIG.....	3
1.1.3 OSP	4
1.1.4 HASL.....	4
1.2 Metody vytvoření pájkových kulových vývodů	4
2 Teplotní Profil	7
2.1 Dělení teplotních profilů.....	7
2.2 Vliv teplotního profilu na pájení BGA	8
3 Intermetalické sloučeniny	9
3.1 Chemické složení, typy vrstev	9
3.2 Měření tloušťky a drsnosti	9
4 Metody testování jakosti pájených spojů u BGA pouzder	10
4.1 Elektrické zkoušky.....	10
4.2 Mechanické zkoušky.....	11
4.2.1 Stříhové zkoušky.....	11
4.2.2 Tahové zkoušky	11
4.3 Optická kontrola	11
5 Experimentální Část	12
5.1 Návrh experimentu	12
5.2 Návrh a úprava testovacích pouzder BGA	13
5.3 Zkušební měření výšky nad pouzdem BGA.....	15
5.4 Teplotní profil na funkčním vzorku pájecí stanice	15
5.5 Prototyp pájecí stanice	17
5.5.1 Provedení a parametry	18
5.5.2 Úpravy vyhřívané šablony	18

5.5.3	Nastavení teplotního profilu	21
5.6	Přetavení pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA.....	24
5.7	Testování stříhové síly	26
5.7.1	Optická inspekce.....	29
5.7.2	Výsledky a vyhodnocení.....	31
5.8	Metalografické výbrusy	33
5.8.1	Analýza intermetalických vrstev	36
5.8.2	Výsledky a vyhodnocení.....	37
6	Závěr	39
	Literatura	41
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
	Seznam obrázků	44
	Seznam grafů	45
	Seznam příloh	45

ÚVOD

Pájení pouzder BGA se stalo již běžnou součástí složitějších desek plošných spojů. Častější využití těchto pouzder přináší také větší potřebu volby vhodné pájecí metody a přesné nastavení teplotního profilu. Důvodem je komplikovanější dosažení požadované jakosti a spolehlivosti pájeného spoje. Při běžném životním cyklu pouzder typu BGA dochází k častějšímu vzniku defektů právě v pájených spojích kulového tvaru. S tím také souvisí zvýšený počet defektů a následných oprav. I když jsou tato pouzdra součástí elektrotechnického průmyslu již delší dobu, tak stále přináší ještě mnoho otázek z pohledu nastavení procesu montáže. Proces vytvoření pájkových kulových vývodů a jejich opravy je tedy třeba dále do jisté míry zdokonalovat. Použití nových metod se stávajícími ověřenými postupy by mohlo vést ke kvalitnějšímu a spolehlivějšímu procesu výroby i následných oprav.

Správné nastavení procesu pájení a požadovaných technologických kroků v souvislosti s používáním bezolovnatých pájecích slitin v současnosti vyžaduje přesnější nastavování teplotních parametrů během pájení. Teplotní zatížení součástek a jejich vývodů při bezolovnatém pájení roste, a to má za následek také rychlost růstu intermetalických vrstev. Přílišná tloušťka intermetalických vrstev snižuje mechanickou pevnost spoje a také elektrické parametry. Novou a perspektivní metodou vytvoření, resp. znovuvytvoření kulových pájkových vývodů je použití nerezové šablony přímo vyhřívané elektrickým proudem.

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo navrhnutí a provedení experimentu na vytvoření pájkových kulových vývodů pomocí nové metody, jež využívá přímo vyhřívanou šablonu. Sledovaným parametrem ve zvoleném experimentu je vliv vzdálenosti šablony od pouzdra na tvorbu intermetalické vrstvy. V této práci byly také změřeny teplotní rozdíly mezi pouzdem a šablonou a nastaven regulátor a základní teplotní profil u funkčního vzorku a prototypu pájecí stanice. Byly provedeny a vyhodnoceny stříhové síly a provedeno zkoumání intermetalických vrstev u pájkových kulových vývodů přetavovaných vzorků.

1 BGA (BALL GRID ARRAY)

Technologie Ball grid array (BGA) je druh povrchové montáže, která se skládá ze samotného pouzdra čipu a pájkových kulových vývodů, jež jsou připájeny ke spodní straně celého čipového pouzdra. BGA bylo zavedeno v důsledku trendu miniaturizace integrovaných obvodů, vyšší integraci, vyšší zástavbové hustotě a celkové lepší funkci.

Vysoká zástavbová hustota a integrace je zde uskutečněna z důvodu použití krátkých propojení pomocí kuliček, popř. válečků nebo pružinek. Při optimálním pájení BGA musí být použito dostatečné množství dodaného tepla, aby se každá kulička na pouzdře dostatečně přetavila a vzniklo kvalitní elektrické spojení. Pokud je v důsledku špatných výrobních pájecích podmínek nastaven špatný proces pájení, mohou vznikat závady, jako jsou dutiny, špatně zapájené kulové vývody, které je potřeba včas odhalit. Ideální metody a nastavení procesu jsou zde velmi důležité, protože následné další opravy jsou velmi náročné. [1]

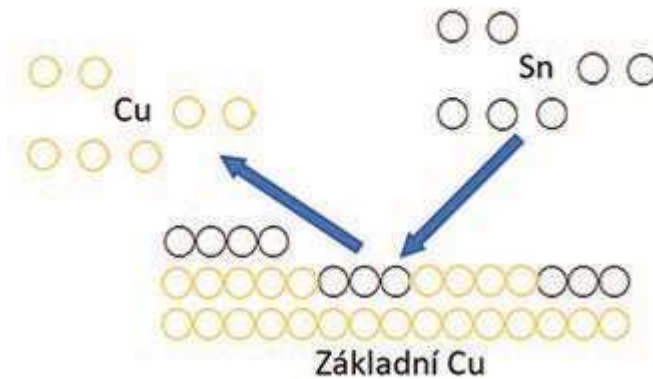
1.1 Povrchová úprava DPS

Spoje na DPS jsou tvořeny většinou jako měděné, mají vynikající vodivé vlastnosti, ale také jsou velmi náchylné na korozi. To má za následek problémy s pájitelností a kvalitou převážně u povrchové montáže. Nároky na samotnou pájitelnost se neustále zvyšují z důvodu vývoje designu, kde se zmenšují rozteče komponent a vzdálenosti mezi spoji, což má za následek horší spolehlivost celého procesu pájení. Dalším důvodem je přechod na bezolovnaté pájení a zvyšující se nároky na odolnost vůči teplotám, prodloužená životnost a potřeby na speciální aplikace. Patříčná ochrana proti působící korozi se provádí aplikováním krycí vrstvy na samotnou měď, která se provádí zpravidla na konci procesu výroby holé DPS. U aplikací jako jsou imerzní cín, imerzní stříbro nebo OSP, se povrchová úprava provádí až po elektrických testech z důvodu své křehkosti. Výsledná povrchová úprava tvoří spojení mezi DPS a použitým komponentem, proto je nutné důkladně zvážit požadavky již ve stádiu návrhu, správně se rozhodnout, jaký druh povrchové úpravy je pro danou aplikaci nejvhodnější. Důležitými faktory při samotném zvažování povrchové úpravy desky jsou doba skladovatelnosti, po kterou výrobce garantuje pájitelnost (definováno IPC standardem), použití olovnatého nebo bezolovnatého pájení. Další neméně důležitý faktor je i cena použité povrchové úpravy, která je někdy bohužel jedním z hlavních důvodů při rozhodování.

Mezi nejrozšířenější povrchové úpravy patří imerzní cín, ENIG/ENEPIG, OSP a HASL. Důležitým kritériem při volbě povrchové úpravy u pájení pouzder BGA je použití co nejdokonalější rovinnosti pájecích plošek, proto se nejběžněji využívá ENIG, OSP nebo imerzní cín. [2, 3, 4]

1.1.1 Imerzní cín

Imerzní pokovení mědi cínem znamená, že atomy mědi se nahradí atomy cínu, což znázorňuje obrázek 1. Plošky mají po pokovení cínem stříbrnou barvu.



Obrázek 1 Imerzní pokovení mědi cínem [2]

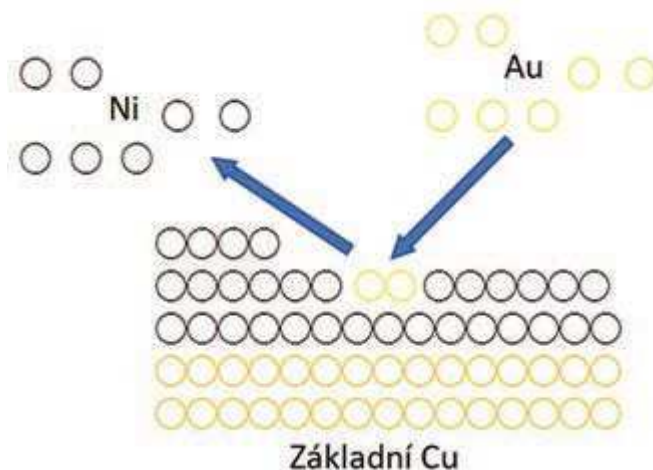
Pokovený cín tvoří s měděnými ploškami intermetalické vrstvy (Cu_3Sn a Cu_6Sn_5), což může vést k řadě problémů s následným pájením součástek na pokovené plošky. Platí zde pravidlo, že čím méně volného cínu zbyde, tím více se mohou objevit problémy s pájitelností. Měď postupně prorůstá do naneseného cínu. Dalšími faktory, kterými narůstá IMC, jsou teplota a vlhkost. Obecně platí zásada, že DPS by měla být osazena do 12 měsíců od pokovení. Čas je velmi důležitý, protože intermetalická vrstva neustále roste.

Imerzní cín je vhodný pro bezolovnaté pájení, má dobrou rovinnost povrchu pro pájení SMT součástek, použití u *Press-fit* a *Fine Pitch* aplikací a zaujme přijatelnou cenou.

Nevýhodou této metody je tvoření IMC a whiskerů, což jsou vlasové cínové výrostky, které mohou způsobit zkrat. Vícenásobné procesy přetavení se nedoporučují. Dalším úskalím je snadné poškození úpravy při manipulaci s DPS. [2, 4]

1.1.2 ENIG/ENEPIG

Zkratky ENIG a ENEPIG znamenají technologii pokovení zlatem. ENIG se díky růstu a implementacím RoHs regulím stává široce používanou povrchovou úpravou v průmyslu. U ENIG se jedná o povrchovou úpravu mědi chemickým niklem a imerzním zlatem. ENEPIG je povrchová úprava mědi chemickým niklem, chemickým palladiem a imerzním zlatem. DPS, která je pokovena touto metodou, má zářivě zlatou barvu. Tento proces nejprve probíhá čištěním a leptáním povrchu a následným nanášením niklu na daný povrch mědi. K tomuto účelu je využívána katalyzační lázeň, která snižuje aktivační energii mědi při nanášení niklu. Poté následuje imerzní nanášení zlata v tloušťce alespoň $0,05 \mu\text{m}$ (viz obrázek 2). Zlato zde chrání nikl před vznikem oxidace. Při nedostatečné ochraně niklu zlatem může dojít k defektu „*Black Pad*“, což je oxidace niklu. Tento defekt pak způsobuje problémy s pájitelností. Technologie ENEPIG je pak jen použitím imerzního palladia před nanášením imerzního zlata. Metoda je vhodná pro bezolovnaté pájení, má akceptovatelnou rovinnost pro SMT, je dobrá pro pokovené průchozí otvory a je také odolná proti korozi díky tloušťce vrstvy niklu, která také chrání proti tvoření IMC. ENIG a ENEPIG jsou metody nákladnější, složitější a mají vysoké nároky na údržbu. [2, 4]



Obrázek 2 Imerzní pokovení mědi zlatem [2]

1.1.3 OSP

OSP (*Organic surface protection*) se nanáší na plošky DPS v tloušťce 0,2 až 0,5 μm . Povrchová úprava, kterou poznáme většinou podle oranžového zbarvení, je jednou z nejlevnějších. Má rovněž dobrou smáčivost povrchu. Velká nevýhoda spočívá v tom, že na zpracování má uživatel maximálně okolo 6 měsíců a je doporučována dusíková atmosféra pro SMT pájení. Samotný proces úpravy je jednoduchý, má dobrou rovinnost pro SMT, je ekologický a šetrný k životnímu prostředí. Metoda není ideální pro průchozí otvory v DPS a také není vhodná pro *Wire Bonding* aplikace. [2, 4]

1.1.4 HASL

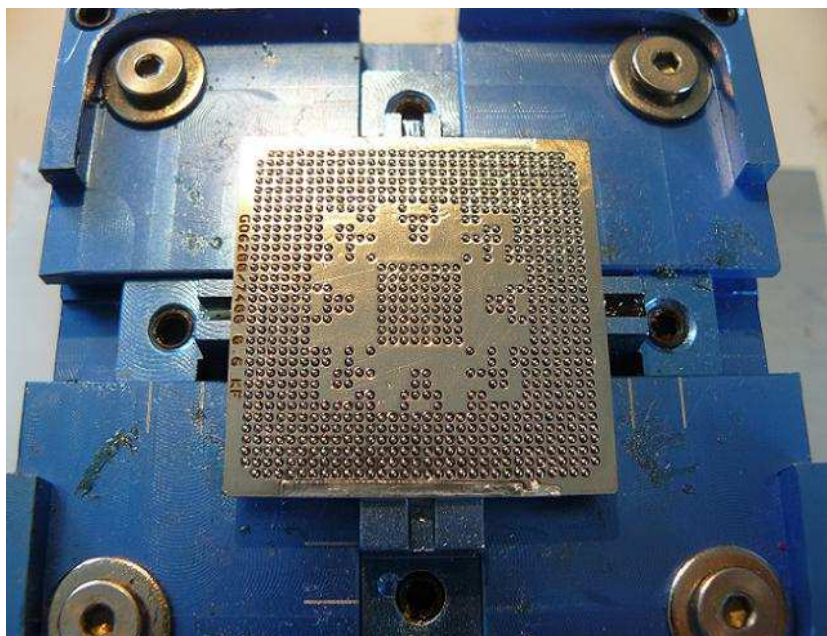
HASL je označení pro zkratku *Hot Air Solder Levelling*, což je povrchová úprava, která se velmi podobá imerznímu cínu, má také stříbrnou barvu na povrchu. Úprava se provádí ponořením do roztavené pájky, jejíž přebytky jsou po vytažení proudem horkého vzduchu odstraněny procesem tzv. „vzduchových nožů“. Metoda má nízké provozní náklady a vynikající trvanlivost. Velkým omezením je rovinnost povrchu, deska je také vystavena teplotnímu šoku při ponoření do lázně. Na druhou stranu se tímto odhalí případná delaminace ještě před připojením jakýchkoli drahých komponent k desce. *Wire Bonding* se u metody HASL nedoporučuje. [2, 4]

1.2 Metody vytvoření pájkových kulových vývodů

BGA obvody mají vývody ze spodní strany pouzdra. Se zmenšující roztečí vývodů se pájitelnost stává technologicky náročnější. Kuličkové vývody se prodávají standardně v několika definovaných rozměrech, z nichž nejmenší nabízí průměr 0,25 mm. Tyto kuličky jsou z pájecích slitin jak olovnatých, tak bezolvnatých. Pokud je zapotřebí BGA obvod vyměnit, během fáze odpájení pouzdra se kuličkové vývody znehodnotí. Poté se musí provést reballing BGA, tzv. překuličkování, které spočívá v odstranění zbytků pájky z pájecích plošek pouzdra BGA. Tuto pájku musíme dokonale odstranit, neboť sebemenší nerovnost může způsobit, že se kulička během následného procesu překuličkování posune v krajním případě až do mezery

mezi vývody. Existuje několik metod, jak zbylou pájku odstranit. První možností je použití odpájecího lanka, kdy plochým hrotem pájky čistíme dané plošky. Tato možnost je jednoduchá, avšak ne moc praktická. Druhou variantou je použití hrotu pájky, který je dostatečně široký, se kterým odstraňujeme přebytečnou pájku. Poslední možností je použití speciální odsávačky, která má kovový nebo teflonový hrot. Metoda je vysoce účinná, avšak za předpokladu, že je použito kvalitní odsávací zařízení. [5]

Existuje několik způsobů vytvoření pájkových kulových vývodů. Jedním z nich spočívá v nanesení adekvátního množství pájecího tavidla po celé dokonale čisté pájecí ploše. Poté následuje přiložení a sesouhlasení šablony, do které se nasypou pájkové kuličky, což je zobrazeno na obrázku 3. Přebytečné kuličky mohou padat do antistatické misky a mohou být použity při dalším procesu. Následuje přetavení kuliček pomocí teplého vzduchu nebo infračerveného záření. Po přetavení se šablona oddělí od pájeného pouzdra, které je připraveno k připojení na samotnou DPS. Existují také šablony, které nejsou součástí pájecího procesu, ale slouží jen na přesné umístění pájkových kuliček. [6]

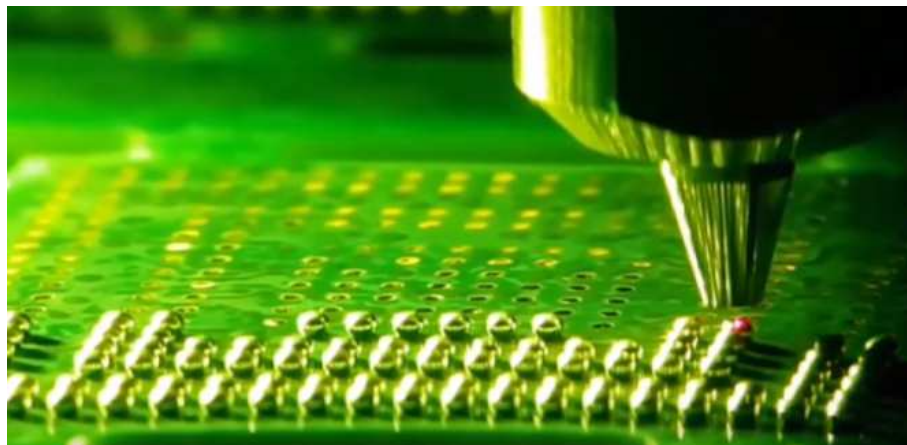


Obrázek 3 Pouzdro BGA osazené pomocí šablony [7]

Další metoda je pomocí tzv. preformy, kdy se používá speciální jednorázová šablona, která odpovídá vnějším rozměrům komponenty BGA. Preforma je konstruována včetně kuliček s jejich přesným rozložením. Po nanesení malého množství vodě rozpustného tavidla se komponenta přesně umístí do přípravku a je následně přetavena pomocí konvekčního tepla. Dále se musí odstranit laminát, mezi kterým byly umístěny jednotlivé kuličky a vyčistit komponentu pomocí deionizované vody. Tento způsob je účinný pro jednotky kusů, vždy však s novou preformou. Výhodou je, že mohou být použity různé tvary a velikosti jednotlivých preforem a odpadá nutnost složitého čištění tavidlových zbytků. [8]

Nanášení jednotlivých kuliček a následné pájení kuliček BGA pomocí laseru, a to infračervené vlnové délky, je dalším způsobem, jak zhotovit pájkové kulové

vývody (viz obrázek 4). Tento způsob je vysoce flexibilní, přesný, automatizovaný a také tepelně nezatěžuje celé pouzdro. [9]



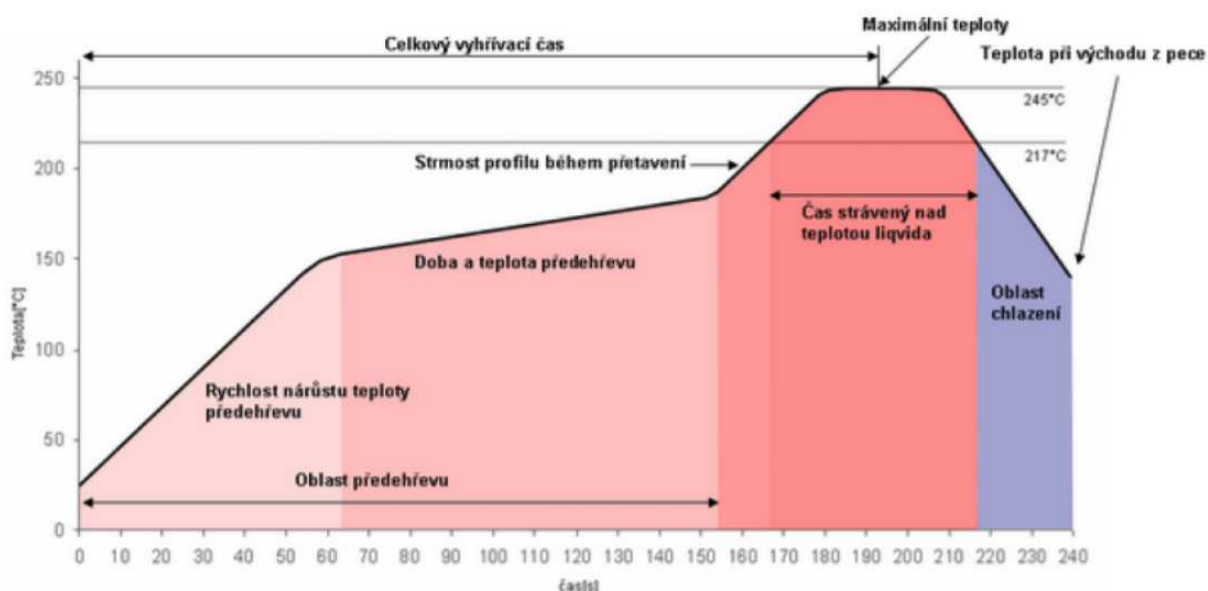
Obrázek 4 Reballing pomocí laseru [9]

2 TEPLOTNÍ PROFIL

Důraz a použití bezolovnatého pájení, které se týká dnes již většiny výrobků, všeobecně zvyšuje maximální teploty pájení, což vede k přesnějším nastavování a nárokům na samotné teplotní profily.

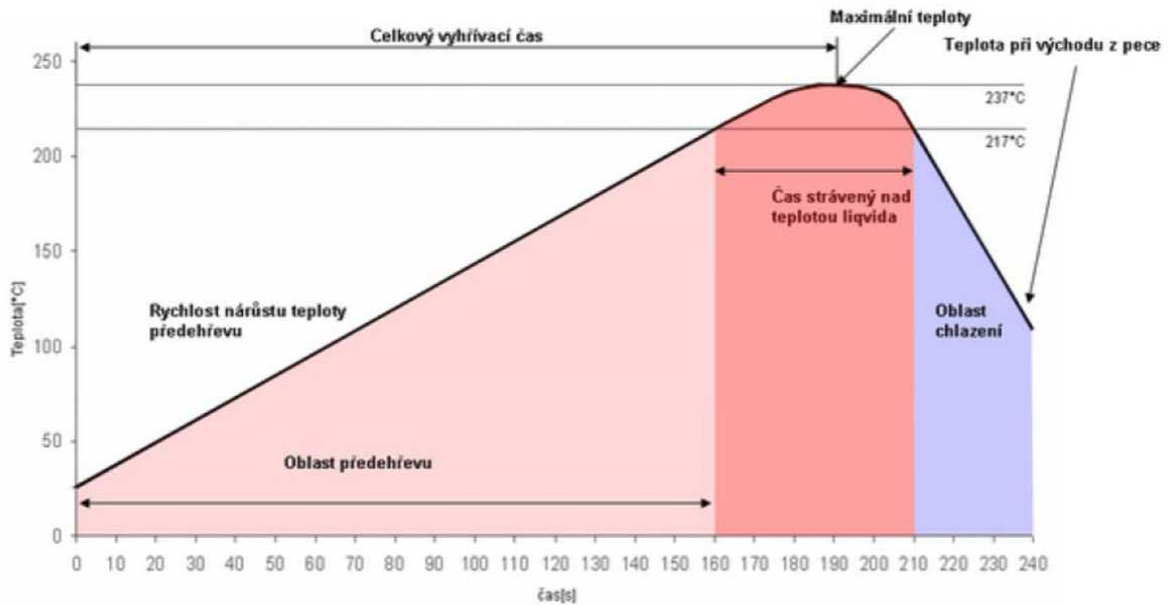
2.1 Dělení teplotních profilů

Rozlišují se dva základní typy: lineární profil RTS (*Ramp To Spike*) a sedlový profil RSS (*Ramp Soak Spike*). Tyto profily udávají závislosti teploty na čase při pájení, nastavují se jimi parametry přetavovacích pecí, lze s nimi zjišťovat teplotu stanovenou a skutečnou. Základní části, resp. zóny teplotních profilů jsou předehřívací, vyrovnávací, přetavovací a chladicí. Profil RSS a jeho zóny jsou uvedeny na obrázku 5. V první předehřívací zóně se nastavuje teplotní růst maximálně o 4-5 °C/s, aby docházelo k rovnoměrnému ohřevu součástek. To může být způsobeno použitým materiálem, velikostí a barvou komponent. Rovnoměrnost ohřevu součástek zajišťuje zóna vyrovnávací, kde se teploty sjednotí a začíná aktivace tavidla. Tato fáze se nenachází u lineárního teplotního profilu. V další fázi, a to přetavovací, hraje roli maximální teplota, která nesmí být vyšší než teplotní odolnost plastových dílů, čas nad teplotou tavení, který se pohybuje řádově v desítkách sekund a maximální rozdíl teplot, který je ideální volit co nejmenší. V poslední chladicí zóně dochází k ochlazení celé pájené DPS. Rychlost poklesu teploty by měla být přibližně 5 °C/s, čímž se předejde enormnímu nárůstu intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a tvorbě velkých krystalů uprostřed spoje.



Obrázek 5 Sedlový profil RSS [10]

Při použití teplotního profilu RTS, který je vykreslen na obrázku 6, se eliminuje vliv některých problémů s pájitelností a nedochází k takovému počtu závad jako u RSS profilu. U RTS profilu nosič tavidla zůstává déle v předehřívací zóně, díky čemuž dochází k lepšímu smáčení. Lineární profil také nezatěžuje tepelným šokem DPS a pájené součástky, je ekonomičtější, což je velmi žádoucí. [10]



Obrázek 6 Lineární profil RTS [10]

2.2 Vliv teplotního profilu na pájení BGA

BGA komponenty jsou oblíbenou součástí, díky své vysoké integraci a malých rozměrech na DPS, jsou také velmi problematické z hlediska spolehlivosti pájeného spoje. Vliv teplotního profilu je zde obrovský. V důsledku odlišného součinitele teplotní roztažnosti TCE dochází k tepelnému namáhání jednak při pájení přetavením, tak i po jeho skončení, což může vést až k mikrotrhlinám a delaminaci u jednotlivých materiálů. Pokud se použije příliš vysoká maximální teplota, může dojít až k prohnutí a následné deformaci komponenty, proto snížení tepelného namáhání má význam pro spolehlivost budoucího pájeného spoje. Ve většině případů dochází u BGA pouzder k maximálnímu tepelnému namáhání při přechodu ze zóny pájecí do chladicí. Je to způsobeno velkým teplotním rozdílem na desce plošných spojů, kdy jeden konec je stále v pájecí a druhý již ve chladicí zóně. [11, 12]

3 INTERMETALICKÉ SLOUČENINY

Reakcí materiálů nanesených na ploškách DPS i samotných plošek s použitou pájecí slitinou a vývody samotné součástky vznikají intermetalické sloučeniny, které jsou nezbytné pro tvorbu dobrého pájeného spoje. Volba povrchové úpravy zásadně ovlivní konečnou intermetalickou sloučeninu. Tloušťka intermetalické fáze, která však s časem narůstá, bývá v počátku růstu kolem desetiny mikrometru. Rychlost růstu je dán působící okolní teplotou. Při pájení nevzniká jen samotná vrstva, ale také útvary, které mají krystalický charakter. Vlastnosti intermetalických sloučenin jsou různé z důvodu používání odlišných pájecích slitin a podkladových materiálů nanesených na pájecích ploškách. Všeobecně lze říci, že mají vysokou křehkost, vyšší teploty tavení než použité pájky a jsou nesmáčivé. [13]

3.1 Chemické složení, typy vrstev

Při reakci pájky, která obsahuje cín s podkladem plošek z mědi, vzniká chemická sloučenina Cu_6Sn_5 , po čase se začne tvořit i Cu_3Sn . Obě sloučeniny se od sebe také barevně odlišují. Při reakci této pájky s niklem se tvoří sloučenina Ni_3Sn_4 a pokud do reakce vstupuje i měď obsažená v pájce, dochází ke vzniku komplikované sloučeniny Sn-Cu-Ni. Intermetalické vrstvy se vyznačují také matnou barvou na povrchu. [13]

3.2 Měření tloušťky a drsnosti

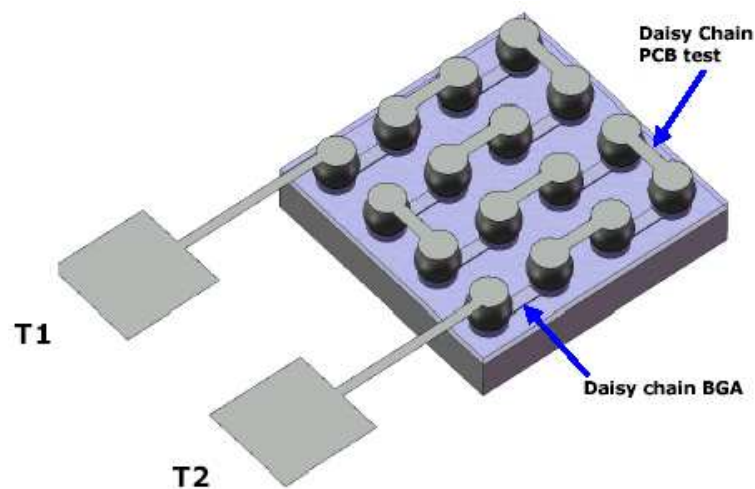
Zkoumání tloušťky a drsnosti intermetalické fáze se provádí pomocí metalografického výbrusu, dále jen mikrovýbrus. Část zkoumaného vzorku, kde se intermetalická fáze nachází, musí být nejprve rozřezána např. použitím lupénkové nebo elektrické pilky, popř. frézy. Dále se musí provést zabroušení vzorku brusným kotoučem o malé zrnitosti a následně se provede zalití zalévací hmotou metylmetakrylátové pryskyřice (Dentacryl) nebo pomocí jiné technické pryskyřice. Poté co pryskyřice dostatečně zatvrdne, musí být vzorek opět broušen a také leštěn. K finálnímu leštění je zapotřebí diamantová pasta. Pro zlepšení viditelnosti je vzorek podroben selektivnímu leptání, aby se zvýraznily jednotlivé mezifázové vrstvy mezi pájkou a pájecí ploškou. Příkladem roztoku pro selektivní leptání může být 94 % $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 4 % HNO_3 a 2 % HCl . Měření intermetalické vrstvy může být provedeno počítačovou analýzou obrazu, která vyhodnotí její tloušťku. Pomocí průměrné hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy, která se vypočítá podílem plochy povrchu a délkou intermetalické vrstvy se dále stanovuje jeho drsnost. [14, 15]

4 METODY TESTOVÁNÍ JAKOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ U BGA POUZDER

Z pohledu funkčního hlediska je nejdůležitější životnost pájeného spoje, resp. jeho dostatečná vodivost. Životnost ovlivňuje několik faktorů, mezi které patří stárnutí materiálu a vliv intermetalické fáze, mechanické a tepelné namáhání. Existuje několik základních testů a zkoušek (elektrické, mechanické, optické) pro zhodnocení jakosti pájených spojů.

4.1 Elektrické zkoušky

Pro elektrické testování se používají speciální testovací patice, které kontrolují samotné pouzdro BGA bez pájkových kulových vývodů. Propojení patice s testovaným BGA pouzdem může být pomocí pružných kontaktů nebo nepohyblivých hrotů. Otestování probíhá pomocí počítačových programů, které zkontrolují danou součástku. Dalším typem elektrické zkoušky je metodou *Daisy Chain*, která spočívá v sériovém propojení vývodů a následným testováním vodivosti (viz obrázek 7). Používá se převážně při zavádění nových materiálů, postupů a procesů. [3]



Obrázek 7 Testování metodou Daisy Chain [16]

4.2 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky slouží k ověření spolehlivosti a pevnosti pájených spojů.

4.2.1 Střihové zkoušky

Pomocí zkoušky se zkoumá potřebná střihová síly např. pro střih BGA kuličky. Postup měření spočívá v ukotvení nástroje měřicího zařízení do určité výšky, kde je potřeba měřit střihovou sílu. Poté je nástroj posunován určitou rychlostí směrem k zapájenému kulovému vývodu. Nakonec zařízení zaznamená sílu potřebnou pro střih, která je pak hodnocena. [3]

4.2.2 Tahové zkoušky

Tahové zkoušky se provádějí podobně jako střihové. Vzorek je umístěn a přichycen do testovacího zařízení sloužícímu k těmto účelům. Poté je speciálním nástrojem uchopena kulička, která je sunuta směrem nahoru až dojde k jejímu odtržení. Zařízení tuto sílu potřebnou k jejímu odtržení změří a následně tato hodnota říká, jak pevný pájený spoj byl proveden. [3]

4.3 Optická kontrola

Kontrola se provádí pomocí rentgenových zařízení nebo speciálními optickými kontrolními systémy. U obou metod se jedná o nedestruktivní způsoby kontroly s ověřením různých typů defektů. Výhodou rentgenových systémů je rychlost, pozorování pod různými úhly, odhalení zkratů, dutin, špatného zapájení, kontrola velkých objektů. Lepší systémy mají i automatické vyhodnocení. Zařízení pro rentgenovou kontrolu jsou ovšem velmi nákladná. Speciální optické systémy mají nižší pořizovací náklady, ale mají omezenou schopnost zobrazení vnitřních vývodů a nedokáží proniknout do vnitřních struktur spoje. Další optickou metodou je provedením mikrovýbrusů, kdy se zkoumaný vzorek nařeže na jednotlivé části, obrousí a zalije do epoxidu nebo Dentacrylu. [10]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byla zkoumána nová metoda u funkčního vzorku a poté u prototypu unikátního pájecího zařízení, které slouží k osazení a přetavení kulových pájkových vývodů pomocí přímo vyhřívané šablony. Nově použité zařízení vyniká od ostatních metod pro vytvoření vývodů v tom, že méně tepelně namáhá při přetavení samotné pouzdro čipu a rovněž snižuje počet technologických kroků. Potenciální výhodou může být také menší tloušťka intermetalické fáze na základě provedení tohoto experimentu.

5.1 Návrh experimentu

Nejdůležitější etapou experimentu, o které pojednává *design of experiments (DOE)* je plánování experimentu. *DOE* rozeznává faktory, které se podílejí největší mírou na výsledcích, a posuzuje jejich významnost. *DOE* pomáhá také k nalezení optimálních podmínek prováděného experimentu vztahující se na sledovanou či výstupní proměnnou procesu. [17]

U daného experimentu se zkoumá hlavně výška umístění přetavovací šablony a její vliv na tvořící se intermetalickou vrstvu. Z hlediska plánování experimentu bylo zaměřeno jen na nastavení hlavních parametrů, které vstupují do procesu. Jedná se o nejkritičtější body a těmi jsou výška samotné šablony nad pouzdrem BGA, nastavení teplotního profilu a udržení stejných neměnných podmínek profilu při opakovaní pájení v souvislosti s následným vyhodnocením vzorků. Hlavní navrhované kroky experimentu jsou:

1. Přípravné kroky

- a) Příprava testovacích vzorků pouzder BGA a použitých materiálů potřebných k pájení přetavením.
- b) Zkušební nastavení a změření výšky vyhřívané šablony.
- c) Zkušební nastavení a měření teplotního profilu pájení.
- d) Zkoumání teploty uvnitř pájkového kulového vývodu, na pouzdře BGA a přímo vyhřívané šabloně během přetavovacího procesu.

2. Provedení experimentu

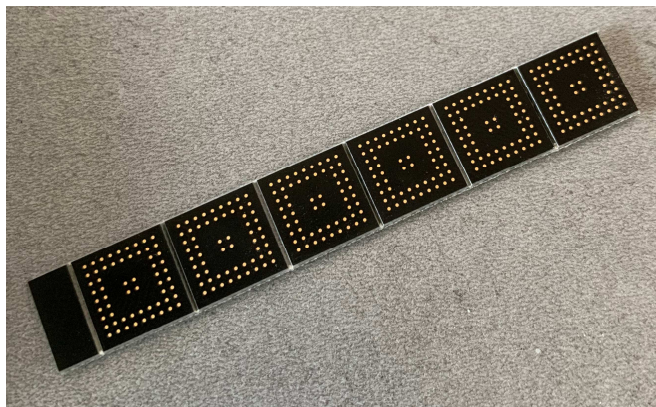
- a) Přetavení pájkových kulových vývodů na pouzdře BGA při výšce šablony 150, 250 a 350 μm a zachování neměnného teplotního profilu.
- b) Provedení stříhových zkoušek pájkových kulových vývodů.
- c) Provedení metalografických výbrusů a zkoumání jejich tloušťky a tvaru.

3. Analýza a zhodnocení výsledků

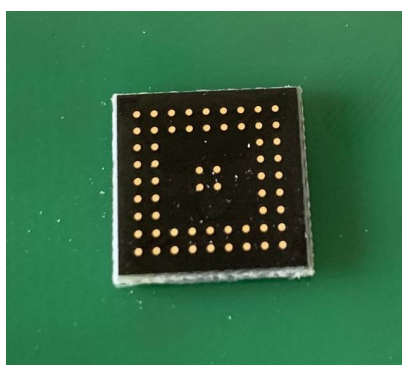
a) Statistické vyhodnocení vzorků a provedených zkoušek a případné srovnání se vzorky, které byly pájeny jinou technologií přetavení.

5.2 Návrh a úprava testovacích pouzder BGA

Pro experiment bylo vybráno standardní testovací pouzdro BGA s rozměry 11 x 11 x 1,5 mm laminátu FR4 s černou nepáživou maskou, které nahrazuje reálnou součástku a bylo dodáno v panelu (viz obrázek 8). Pájecí plošky byly navrhnuty s průměrem 400 μm , s ohledem na použité 500 μm pájkové kuličky. Povrchová úprava byla zvolena ENIG z důvodu vhodnosti pro bezolovnaté pájení a rovinnost povrchu, což je pro BGA pouzdra velmi důležité. Pájecí plošky jsou kruhových tvarů. Dělení panelu bylo provedeno řezáním pomocí ostrého nástroje. Nařezané testovací pouzdro je zobrazeno na obrázku 9.



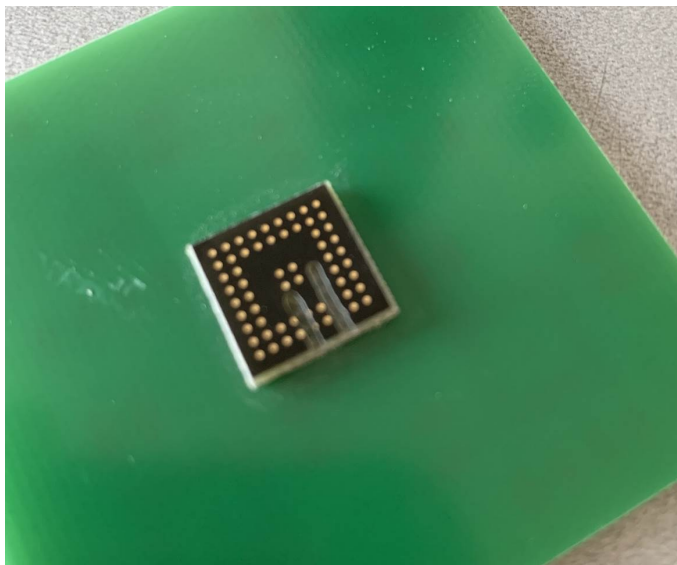
Obrázek 8 Panelový celek testovacích pouzder BGA



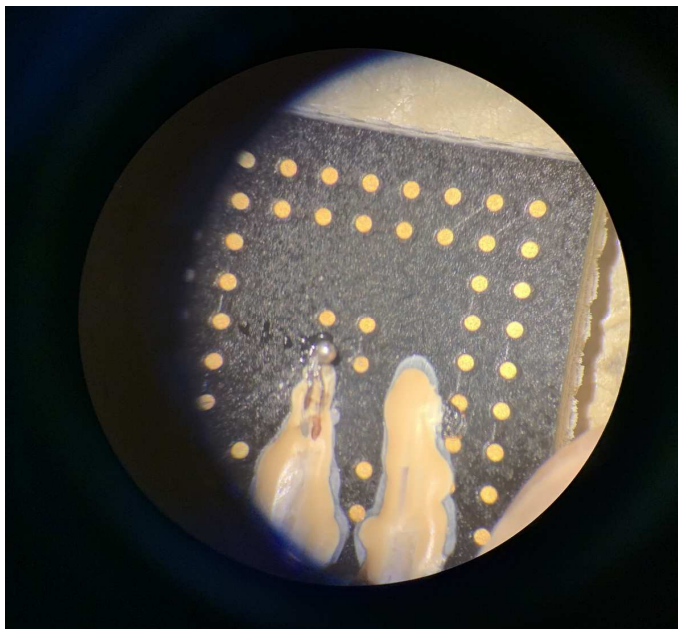
Obrázek 9 Testovací pouzdro BGA

Do pouzdra byly vyfrézovány dvě drážky z důvodu plánovaného umístění termočlánků. První sloužila pro uložení termočlánku na měření teploty pouzdra a druhá jako spojovací cesta ke středu pouzdra a následného sledování teploty uvnitř pájeného kulového vývodu. Termočlánky typu K byly vloženy do drážek pomocí pinzety a následně zalepeny dvousložkovým, tepelně vodivým lepidlem s označením

Polytec TC 430. Následně bylo na středovou pájecí plošku, u které byl uchycený termočlánek, nanášeno adekvátní množství tavidla ROL0 od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH) typu SMF-08. V dalším kroku byla umístěna pomocí pinzety pájková kulička BGA o průměru 500 μm tvořená slitinou SAC305 s označením PF 684 – S rovněž od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH) na střed pájecí plošky, na které bylo nanášeno tavidlo. Cílem postupu bylo umístění termočlátku do pájkového kulového vývodu pro následnou kontrolu teploty (viz obrázek 11).



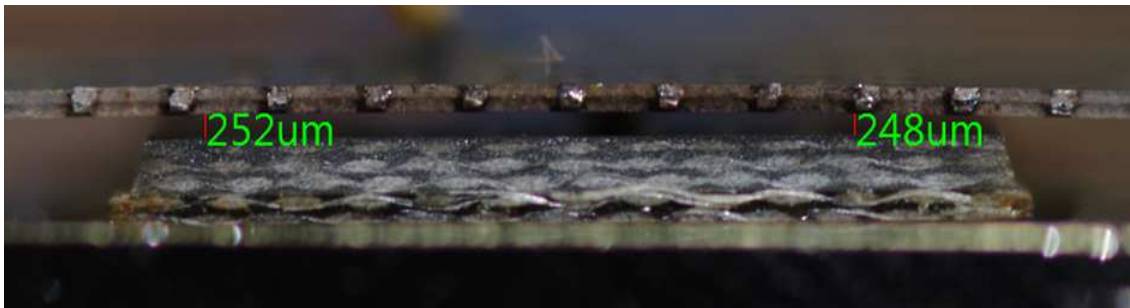
Obrázek 10 Vyfrézované drážky ve zkušební pouzdře BGA



Obrázek 11 Přilepení termočlávků na zkušební pouzdro BGA

5.3 Zkušební měření výšky nad pouzdrem BGA

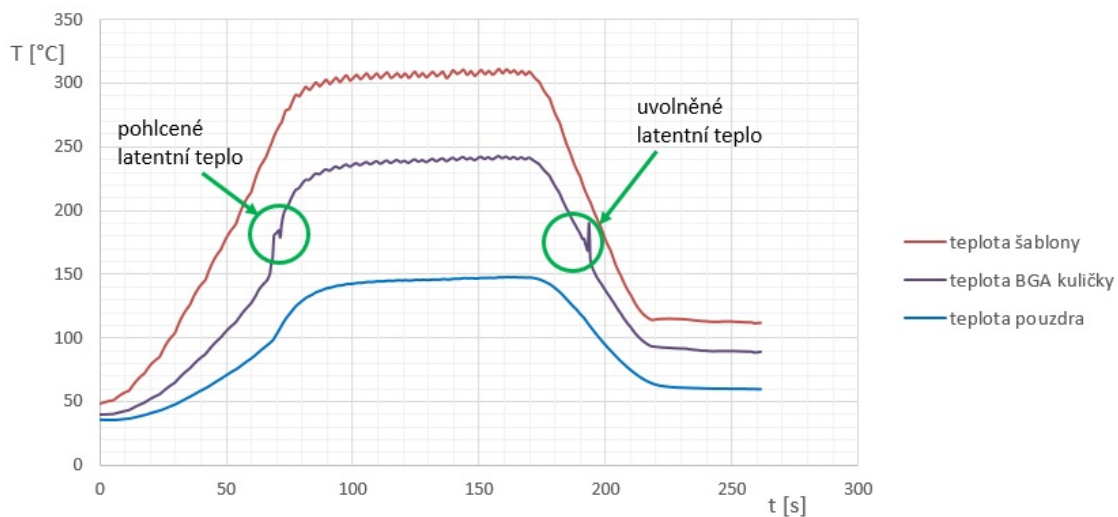
Nastavení výšky vyhřívané šablony nad pouzdrem BGA bylo provedeno postupným otáčením čtyř ladicích šroubů, kterými se reguluje výška u funkčního vzorku pájecího zařízení. Výška byla srovnávána s pomocným měřítkem, na kterém byla natištěna mikrometrická stupnice. Zároveň byla zaznamenávána každá změna pomocí fotoaparátu s následným vyhodnocením výšky ve srovnání s použitou stupnicí pomocí programu AmScope. Zkušební výška mezi pouzdrem a šablonou byla volena 250 μm (viz obrázek 12).



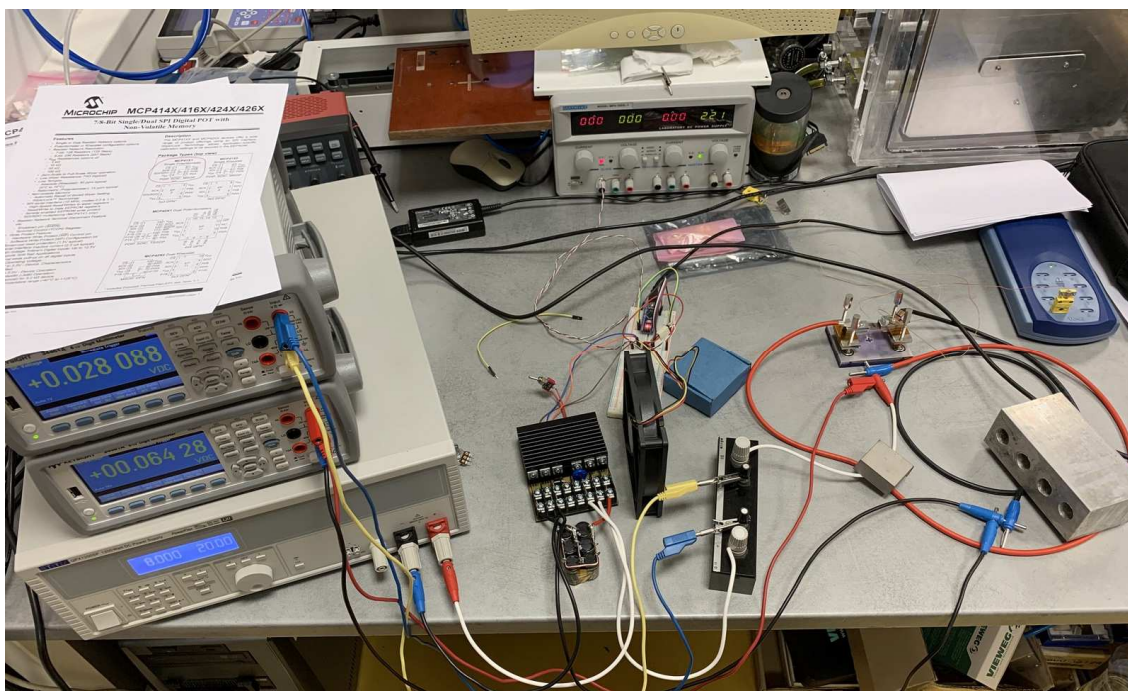
Obrázek 12 Měření výšky vyhřívané šablony nad pouzdrem BGA

5.4 Teplotní profil na funkčním vzorku pájecí stanice

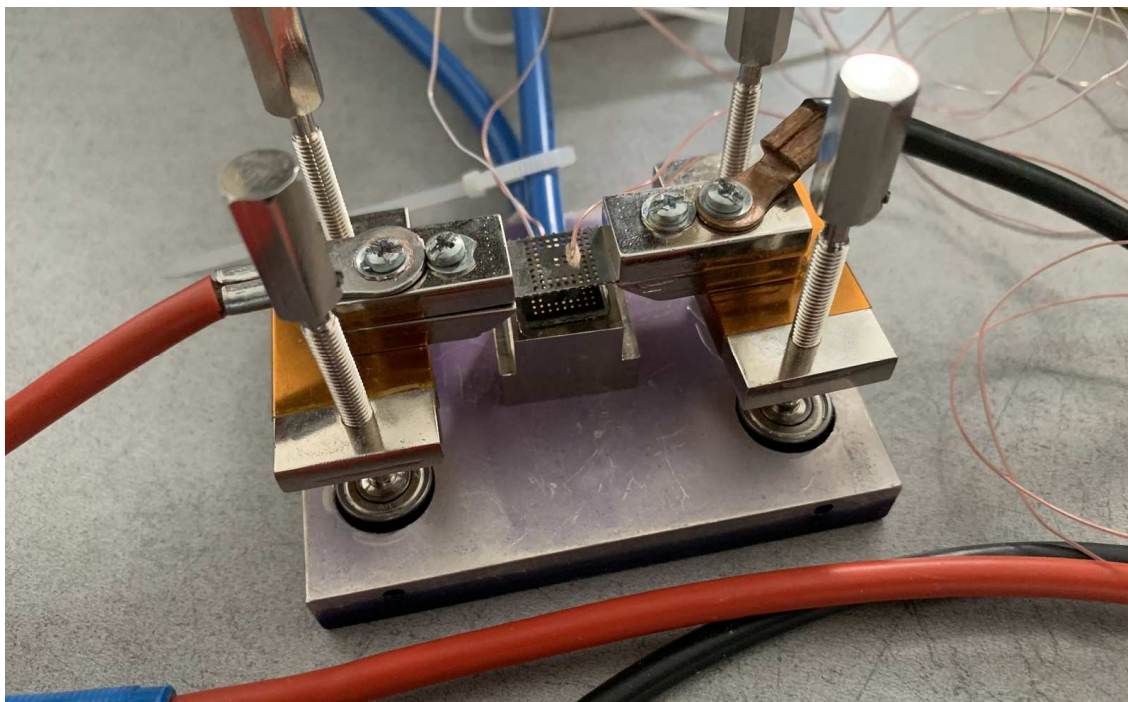
Ověřovací teplotní profil na funkčním vzorku pájecí stanice byl použit ke zjištění rozdílů teplot na přímo vyhřívané šabloně, pouzdře BGA a také pájkovém kulovém vývodu. Teploty byly změřeny pomocí termočlánků typu K, které byly napojeny do modulu sběru dat TC - 08 od výrobce Omega. Modul sběru dat je vzorkoval a posílal přes USB rozhraní do počítače. Pájecí profil byl nastaven pro ohřev šablony v programu vytvořeném v prostředí LabVIEW s parametry ohřevu 3 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, maximální teplotou 315 $^{\circ}\text{C}$ a chlazením 3 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Výsledný ověřovací teplotní profil je vyobrazen v grafu 1. Při nastavené maximální teplotě 315 $^{\circ}\text{C}$ na vyhřívané šabloně bylo zjištěno, že teplota na pouzdře BGA nepřekračuje 150 $^{\circ}\text{C}$, což je velmi žádoucí z hlediska teplotního namáhání při pájení přetavením. Umístěný termočlánek uvnitř BGA pájkového vývodu sice zaznamenal přetavení a přechody z pevného do kapalného stavu a opačně, což znázorňují v grafu výchylky s označením pohlcené a uvolněné latentní teplo, ale nezaznamenal maximální teplotu pájecí slitiny. Tento termočlánek odváděl část tepla, což mělo za následek, že výsledná teplota neodpovídala teplotě skutečné. Jelikož odvod tepla byl jen nepatrný, podařilo se uskutečnit přetavení pájecí slitiny a ověřit tak funkčnost pájecí stanice. Celkový pohled na funkční vzorek pájecí stanice je uveden na obrázku 13 a detailní pohledy na stanici a šablonu s umístěným termočlánkem pak na obrázcích 14 a 15.



Graf 1 Ověřovací teplotní profil pro zjištění rozdílů teplot



Obrázek 13 Celkový pohled na funkční vzorek pájecí stanice a měřicí přístroje



Obrázek 14 Detailní pohled na funkční vzorek pájecí stanice



Obrázek 15 Detailní pohled na vyhřívanou šablonu s upevněným termočlánkem typu K

5.5 Prototyp pájecí stanice

Prototyp pájecí stanice (viz obrázek 16) určený k vytváření pájkových kulových vývodů vznikl za účelem komercializace nové metody. V následujících kapitolách jsou popsány jeho parametry a postup nastavování regulačních konstant a pájecího profilu.



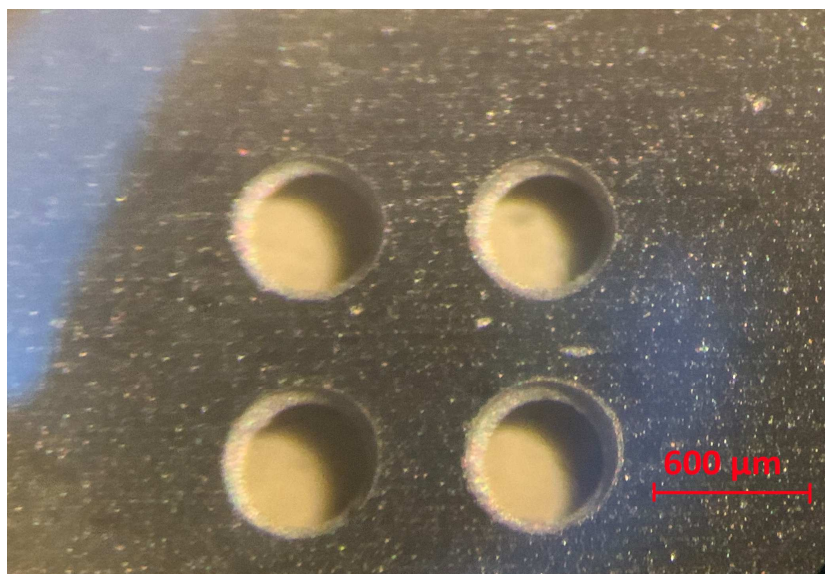
Obrázek 16 Celkový pohled na prototyp pájecí stanice

5.5.1 Provedení a parametry

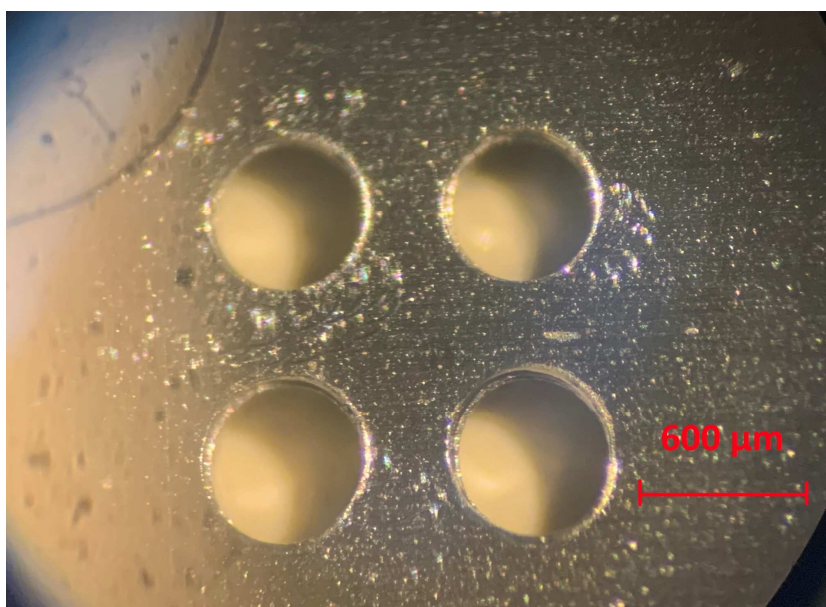
Prototyp pájecí stanice se skládá ze soustavy sloužící k osazování a pájení, ovládací části a řídicí elektroniky. Zařízení je rovněž doplněno zvětšovací kamerou zespoďu osvětlenou pomocí LED diod. Tato kamera slouží k přesnému ručnímu sesazení přetavovaného pouzdra BGA s vyhřívanou šablonou a pro kontrolu správnosti osazení všech kulových pájkových vývodů. Obraz se promítá na dotykový displej, který komunikuje s Raspberry Pi. Sesazovací systém využívá vakua k přichycení pouzdra BGA a také k sesazení pouzdra se šablonou. Výška pouzdra od šablony je nastavována pomocí mikrometrického šroubu. K napájení zdroje zařízení slouží síťové napětí 230 V se jmenovitým proudem 5 A. Do elektrodového systému, který je řízen kompaktním regulátorem JUMO diraTRON 116 pomocí PID regulace, a který slouží k uchycení a vyhřívání přetavovací šablony, je přiváděno až 2,2 V 90 A.

5.5.2 Úpravy vyhřívané šablony

Vyhřívaná šablona z materiálu nerezové ocele o tloušťce 300 μm byla zhotovena metodou leptání. Otvory pro pájkové kulové vývody byly voleny o průměru 600 μm . Leptáním se však nedocílilo požadovaného průměru (viz obrázek 17), proto byly nedoleptané otvory ještě vrtány ručně vrtačkou značky Dremel 4000 a vrtákem o průměru 600 μm (viz obrázek 18).

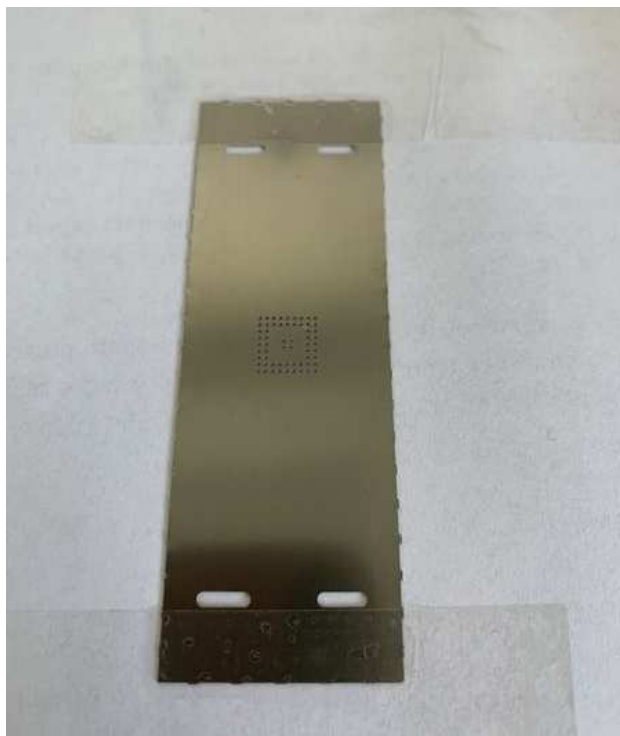


Obrázek 17 Nedoleptané otvory ve vyhřívané šabloně po leptání



Obrázek 18 Otvory po ručním vrtání ve vyhřívané šabloně

Dále byly šablony (viz obrázek 19) opatřeny speciálním termovizním nástřikem černé barvy (viz obrázek 20). Tato barva pomáhá zpřesnit výsledky měření teploty u použitého IR senzoru.



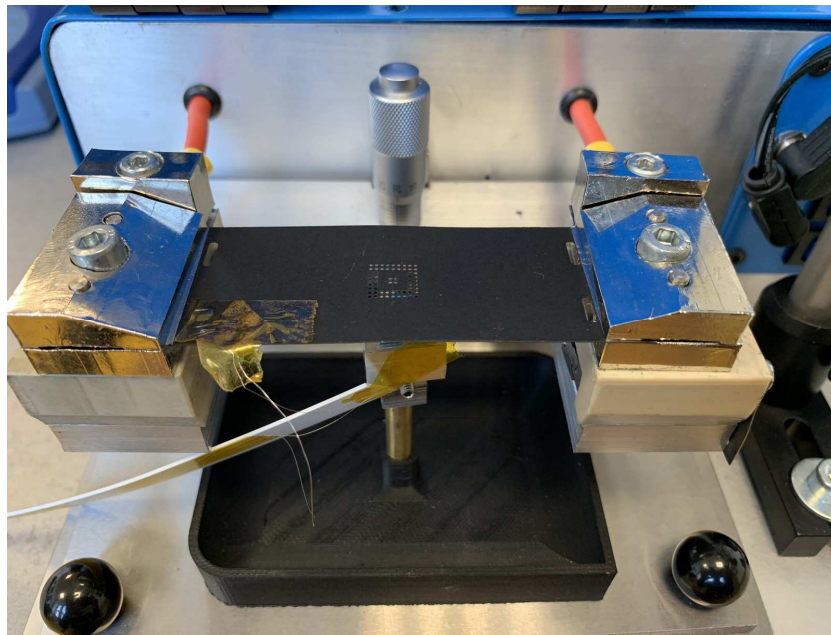
Obrázek 19 Nerezová šablona tloušťky 300 μm bez povrchové úpravy



Obrázek 20 Nerezová šablona tloušťky 300 μm s nanesenou černou termovizní barvou

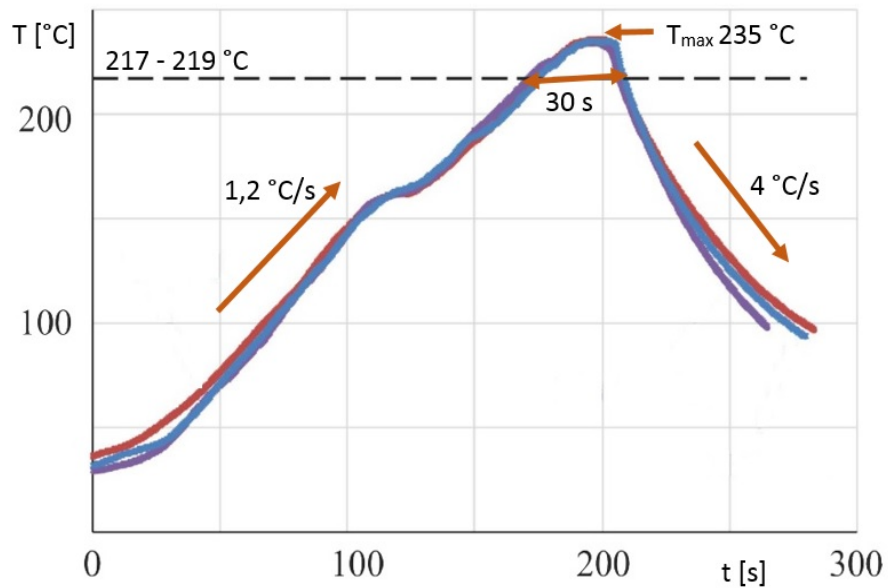
5.5.3 Nastavení teplotního profilu

Z poznatků u funkčního vzorku pájecího zařízení byl optimalizován pájecí teplotní profil u prototypu. Nastavovaný profil byl proveden pro nerezové šablony tloušťky 150 a 300 μm . Teplotní průběh na vyhřívané šabloně byl zaznamenáván pomocí termočlánku typu K, který byl připojen k termočládkovému systému Omega TC-08 sběru dat s rozhraním USB zařízení a byl umístěn na šablonu pomocí teplovodivé, oboustranně lepicí, elektricky nevodivé pásky, která byla překryta kaptonovou lepicí páskou (viz obrázek 21).



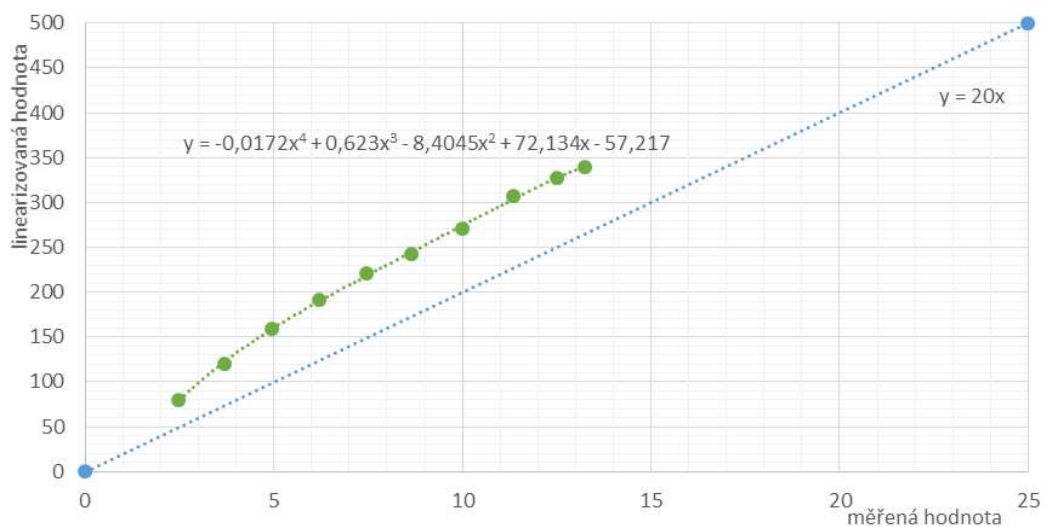
Obrázek 21 Vyhřívaná šablona prototypu s přilepeným termočládkem

Byl použit ověřený teplotní profil (viz obrázek 22), který je vhodný pro přetavení pájkových kulových vývodů u BGA pouzder, kde v oblasti předehřevu teplota narůstá o 1,2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, v zóně chlazení poté klesá o 4 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Maximální teplota přetavení byla volena na 235 $^{\circ}\text{C}$ a čas nad teplotou tavení pájky SAC305 30 sekund.



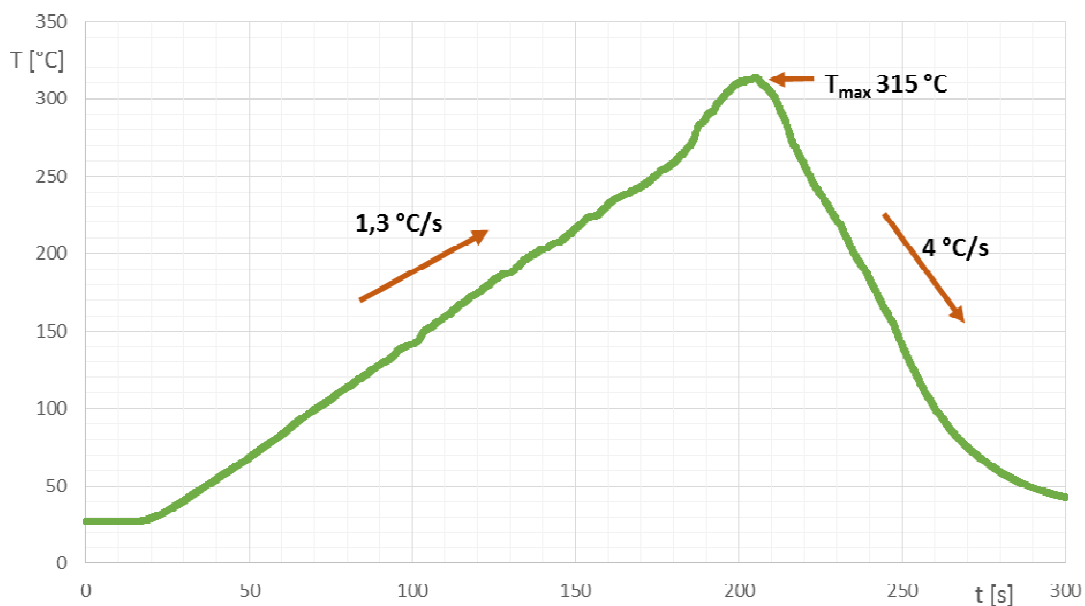
Obrázek 22 Nastavovaný teplotní profil [15]

Teplotní průběh vyhřívání šablony byl nastaven pomocí kompaktního regulátoru JUMO diraTron 116, který byl propojen na vstupu s IR senzorem měřícím teplotu šablony. Nastavování regulátoru bylo provedeno postupným zadáváním jednotlivých PID konstant s následným testováním teplotního profilu. Nejdůležitější částí bylo nastavení složky proporcionální, protože velmi ovlivnila koncový teplotní průběh. Pomocí integrační a derivační složky bylo nastaveno optimální prolnutí nastavené a měřené křivky. Rovněž byla provedena linearizace IR senzoru. Základní nastavení IR senzoru bylo upraveno pomocí naměřených rozdílů teplot mezi termočlánkem a IR senzorem. Výsledný polynom, který je zobrazen v grafu 2, odpovídá charakteristice odpovídajících teplot. Tento polynom čtvrtého řádu byl doplněn do programu regulátoru JUMO diraTron 116.

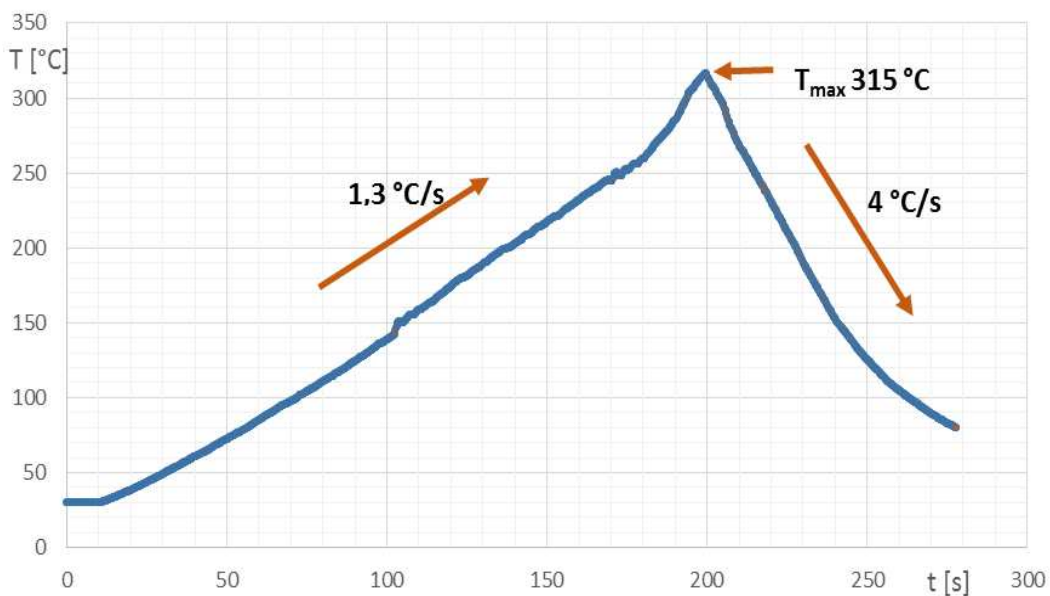


Graf 2 Závislost mezi měřenou a linearizovanou hodnotou IR senzoru

Následně byl výsledný měřený profil zaznamenáván a vyhodnocován. Koncové nastavení PID konstant bylo zcela odlišné pro šablonu tloušťky 150 a 300 μm . Průběh teplotního profilu na vyhřívané šabloně tloušťky 150 μm , na kterém bylo ověřeno správné nastavení regulačních konstant, je uveden v grafu 3, na vyhřívané šabloně tloušťky 300 μm , poté v grafu 4. U šablony tloušťky 150 μm bylo ponecháno 10 sekundové setrvání na maximální teplotě z důvodu lepšího prohřátí BGA kuliček užší šablonou při počátečním testování přetavování BGA kuliček. Z důvodu lepší odolnosti proti ohybu byla pro experiment použita šablona tloušťky 300 μm .



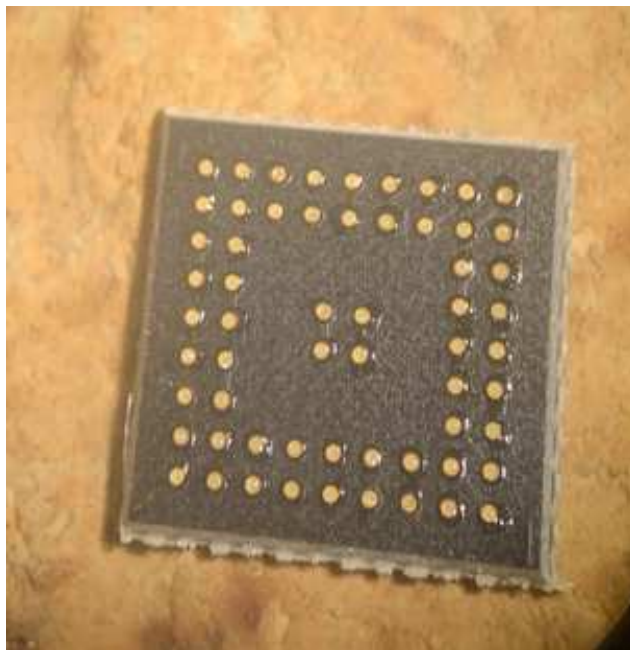
Graf 3 Teplotní profil vyhřívané šablony tloušťky 150 μm



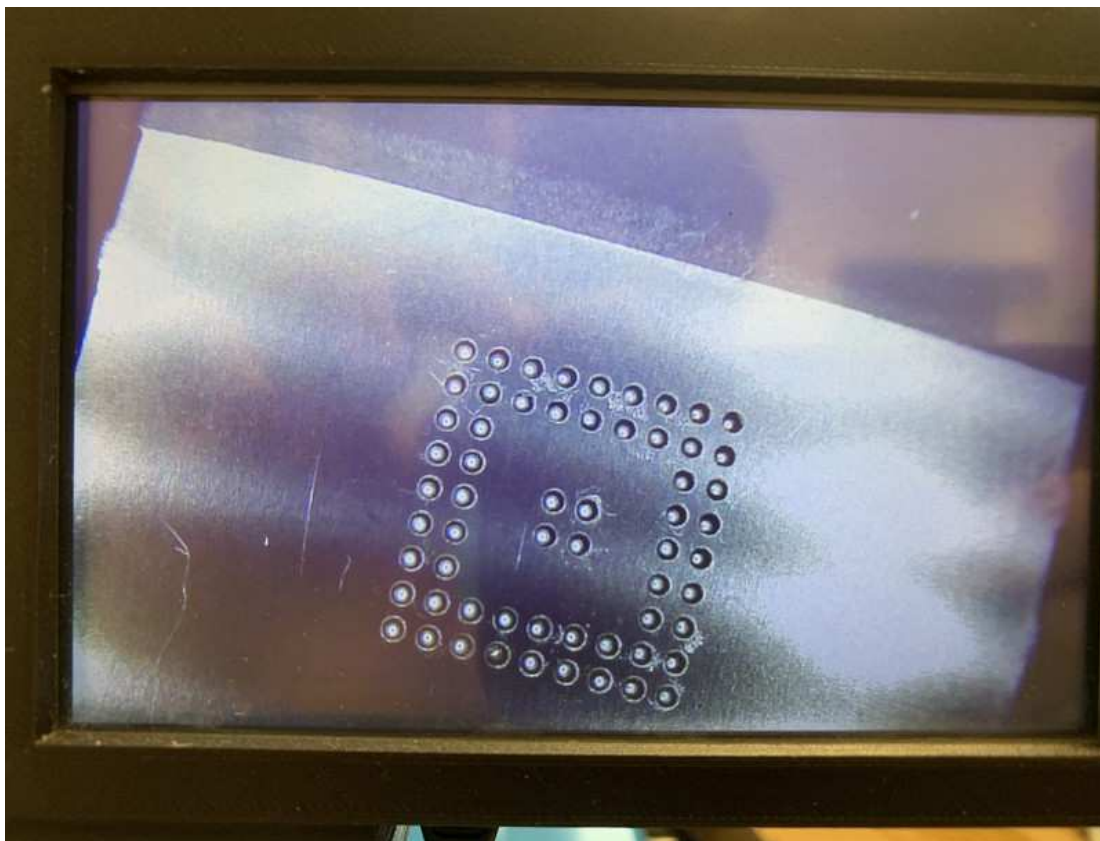
Graf 4 Teplotní profil vyhřívané šablony tloušťky 300 μm

5.6 Přetavení pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA

Nejprve bylo standardní testovací pouzdro BGA s rozměry (11 x 11 x 1,5) mm laminátu FR4 s černou nepájivou maskou a povrchovou úpravou ENIG vyčištěno pomocí izopropylalkoholu. Následně bylo provedeno ruční nanesení tavidla na jednotlivé pájecí plošky pomocí disperzeru pod mikroskopem (viz obrázek 23). Jednalo se o tavidlo ROL0 od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH) typu SMF-08. Pomocí mikrometrického šroubu na prototypu byla nastavena výška vyhřívané šablony od pouzdra BGA. Zkoumaly se tři výšky přetavení pájkových kulových vývodů a to 150, 250 a 350 μm . V dalším kroku bylo pouzdro umístěno na držák pouzdra prototypu pájecí stanice. Poté byl zapnut systém vakua, který způsobil lepší přichycení pouzdra. Následně došlo k sesazení BGA pouzdra a vyhřívané šablony na prototypu pájecího zařízení pomocí posuvného stolku, který je také fixován pomocí vakua. Obraz sesazování je promítán pomocí kamery na displej zařízení. Dále byly na pouzdro umístěny pomocí pinzety pájkové kuličky BGA o průměru 500 μm tvořené slitinou SAC305 s označením PF 684 – S rovněž od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH). Pohled na sesazení pájkových kuliček BGA z displeje prototypu pájecího zařízení, který je určen na tuto operaci, zachycuje obrázek 24.

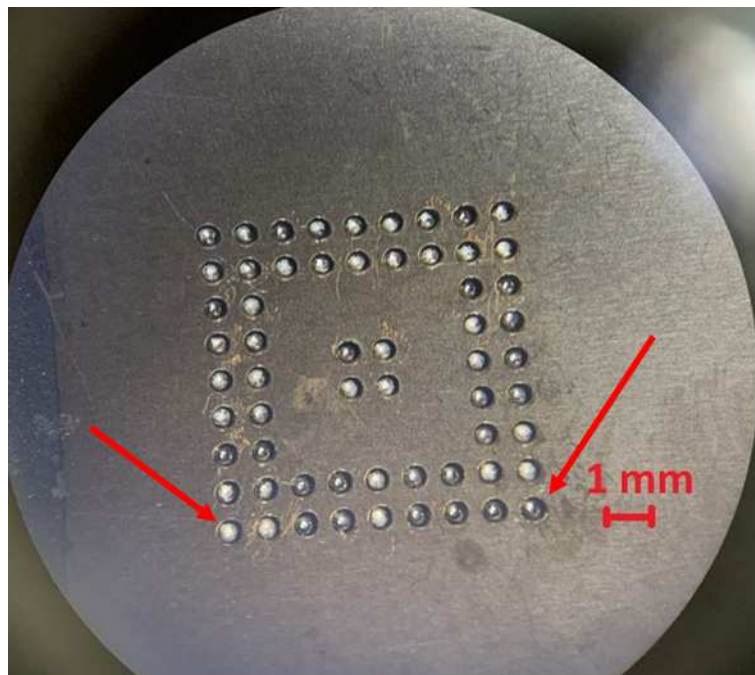


Obrázek 23 BGA pouzdro po natisknutí tavidla



Obrázek 24 Sesazení pájkových kuliček BGA zachycených na displeji

Po spuštění definovaného přetavovacího profilu dojde k přetavení pájkových kulových vývodů na pouzdře BGA. Již přetavené i roztavené BGA kuličky při procesu přetavování jsou vyobrazeny na obrázku 25. Znáznorněná BGA kulička vlevo dole je přetavená vpravo dole ještě není. Výsledný vzorek BGA pouzdra po přetavení při výšce šablony 250 μm je na obrázku 26.



Obrázek 25 Ztuhnutá a roztavená pájecí slitina BGA kuliček



Obrázek 26 BGA pouzdro s přetavenými pájkovými kuličkami

5.7 Testování stříhové síly

Stříhové testování síly pájkových kulových vývodů pouzder BGA bylo prováděno na zařízení DAGE PC2400. Toto zařízení je zobrazeno na obrázku 27.

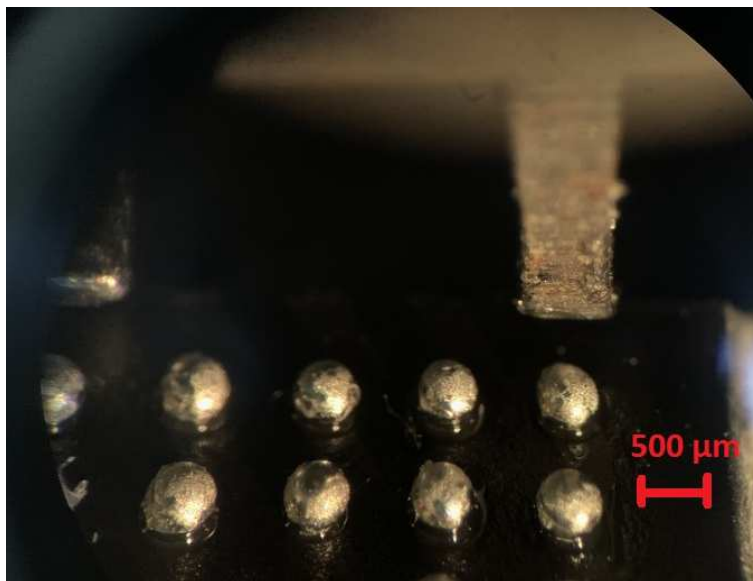


Obrázek 27 Zařízení DAGE PC2400

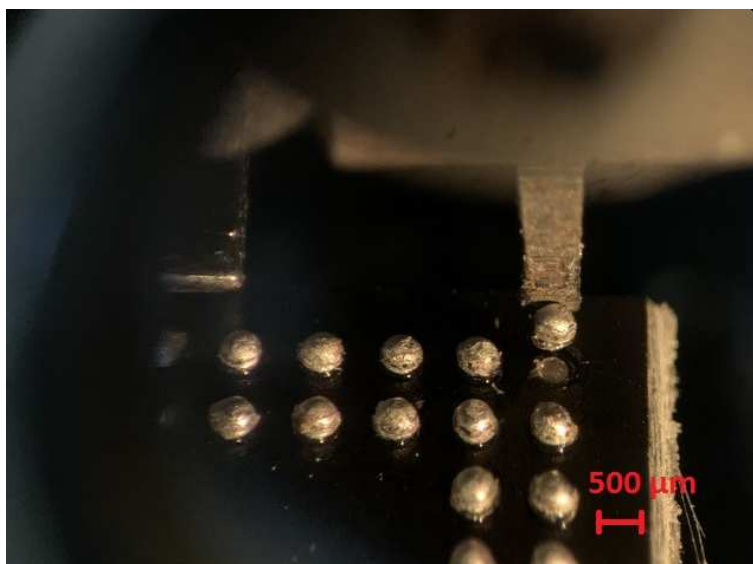
Na operaci testování stříhové síly byl použit speciální nástroj, jehož šířka byla $700\ \mu\text{m}$ (viz obrázek 28). Na tomto obrázku jsou také zachyceny ještě neodtržené pájecí kuličky. Odtržení vrchní pravé kuličky je poté znázorněno na obrázku 29. Nástroj se posouval rychlostí $300\ \mu\text{m/s}$. Nastavované parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Použité parametry při testování stříhové síly na zařízení DAGE PC2400

Parametr	Hodnota
Rychlost nástroje	$300\ \mu\text{m/s}$
Výška nástroje	$50\ \mu\text{m}$
Přesah po odtrhnutí	$300\ \mu\text{m}$

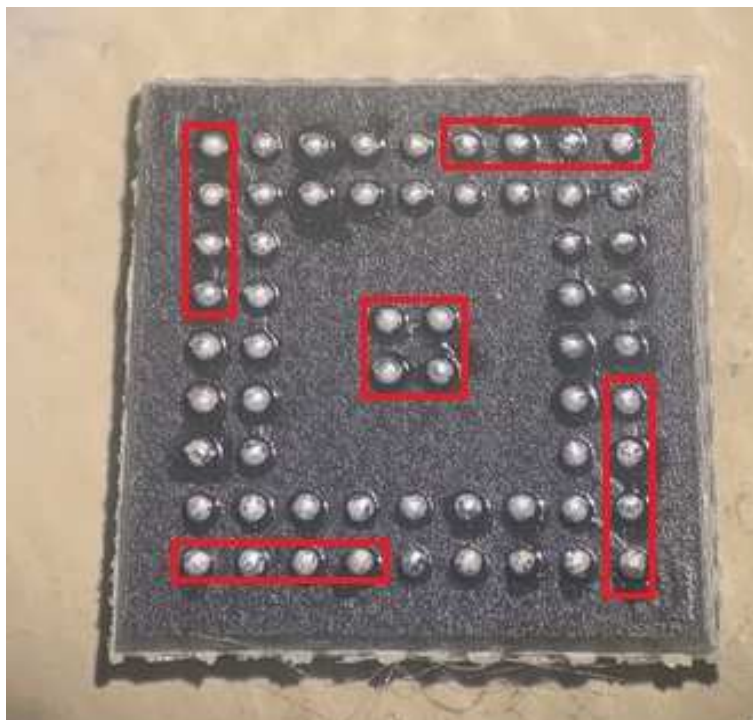


Obrázek 28 Detail trhacího nástroje a pájkových kuliček



Obrázek 29 Detail trhacího nástroje a testované BGA kuličky

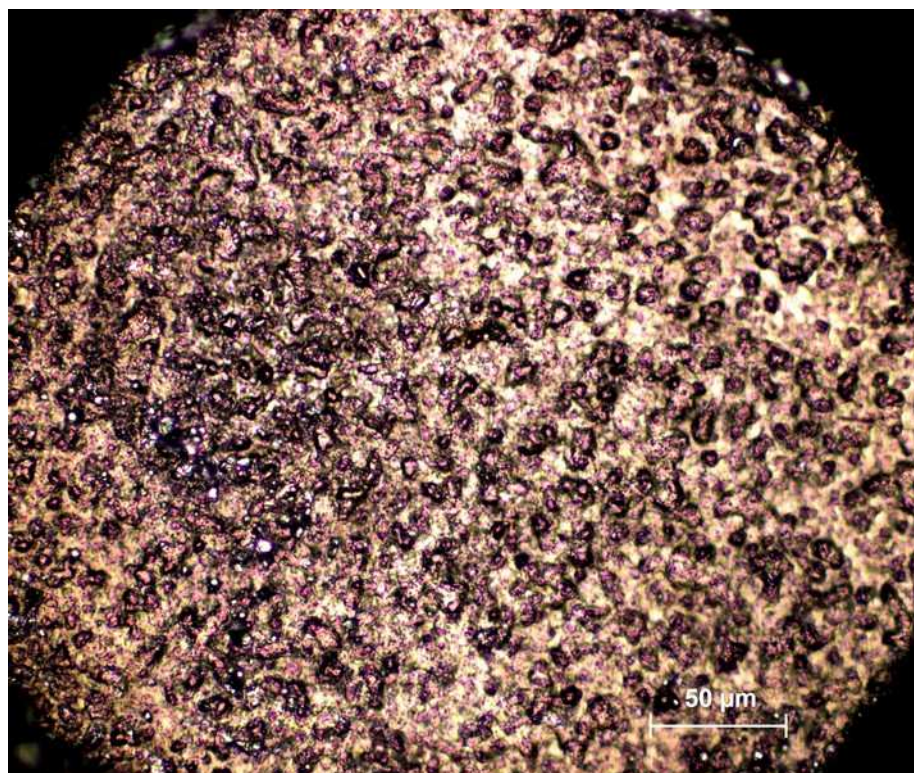
Celkem bylo testováno 20 kuliček na jednom pouzdře BGA. Pro každou výšku šablony 150, 250 a 350 μm se testovalo 11 pouzder. Vždy se jednalo o stejné 4 krajní kuličky ve všech rozích a 4 prostřední (viz obrázek 30).



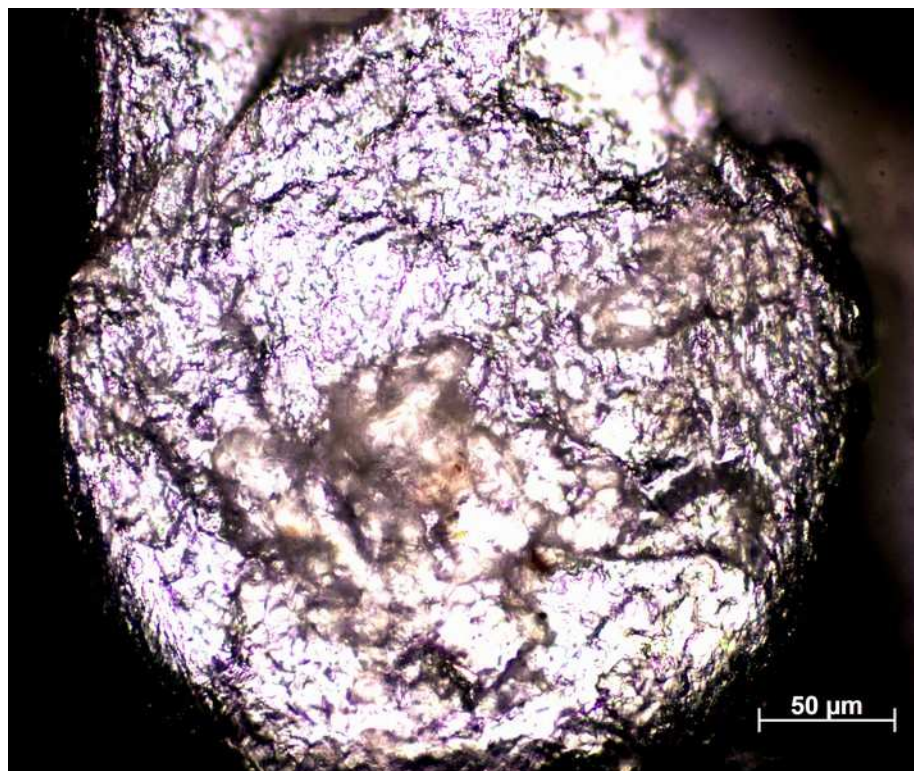
Obrázek 30 Označení trhaných kuliček na pouzdře BGA

5.7.1 Optická inspekce

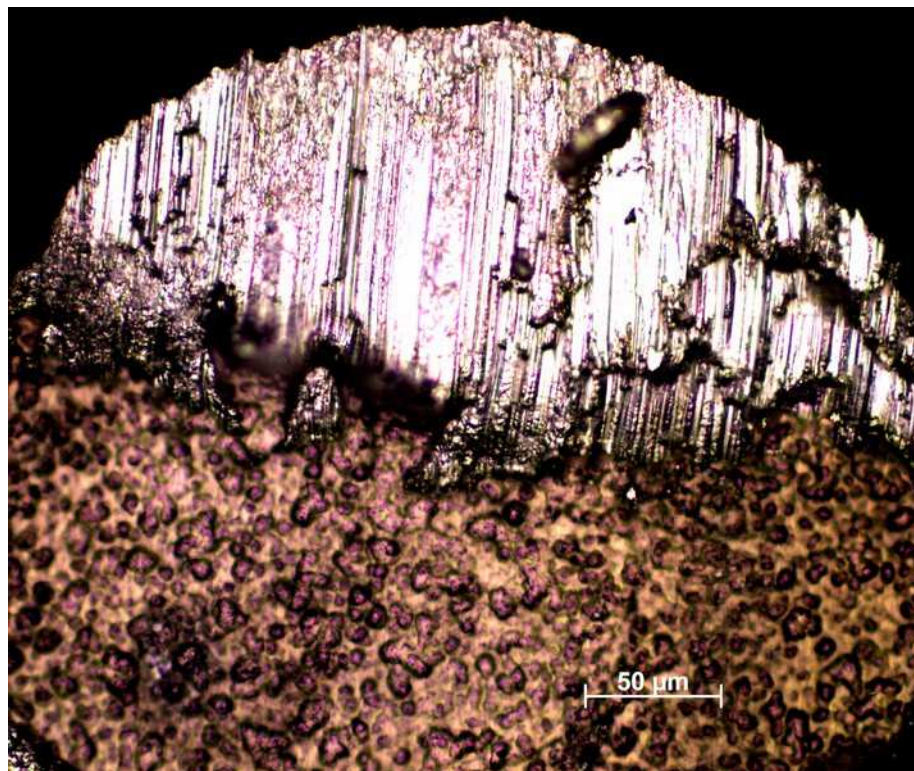
Zkoumány byly tři typy defektů po stříhovém testování síly pájkových kulových vývodů. Jednalo se o vadu, kdy se spoj odtrhl v intermetalické části (viz obrázek 31), poté šlo o vadu odtržení v pájce v oblasti pájecí slitiny (viz obrázek 32) a nakonec kombinace předchozích dvou vad tedy intermetalickém spoji a pájky (viz obrázek 33). Optická inspekce byla provedena pomocí mikroskopu u všech odtržených pájkových kulových vývodů.



Obrázek 31 Odtržení BGA kuličky v intermetalickém spoji pořízený mikroskopem se zvětšením 1000x



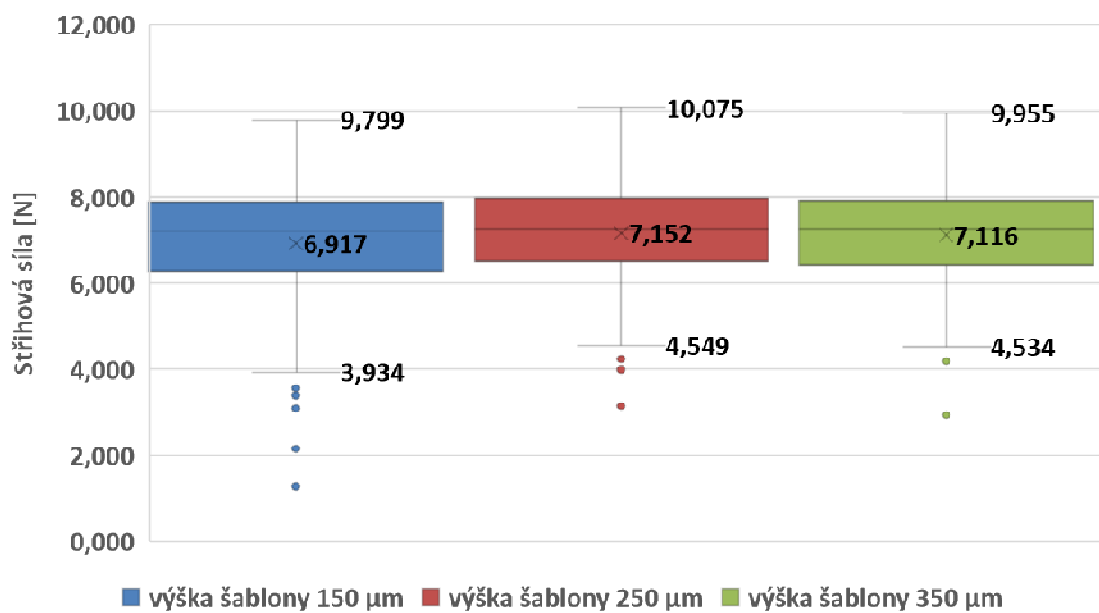
Obrázek 32 Odtržení BGA kuličky v pájce pořízený mikroskopem se zvětšením 500x



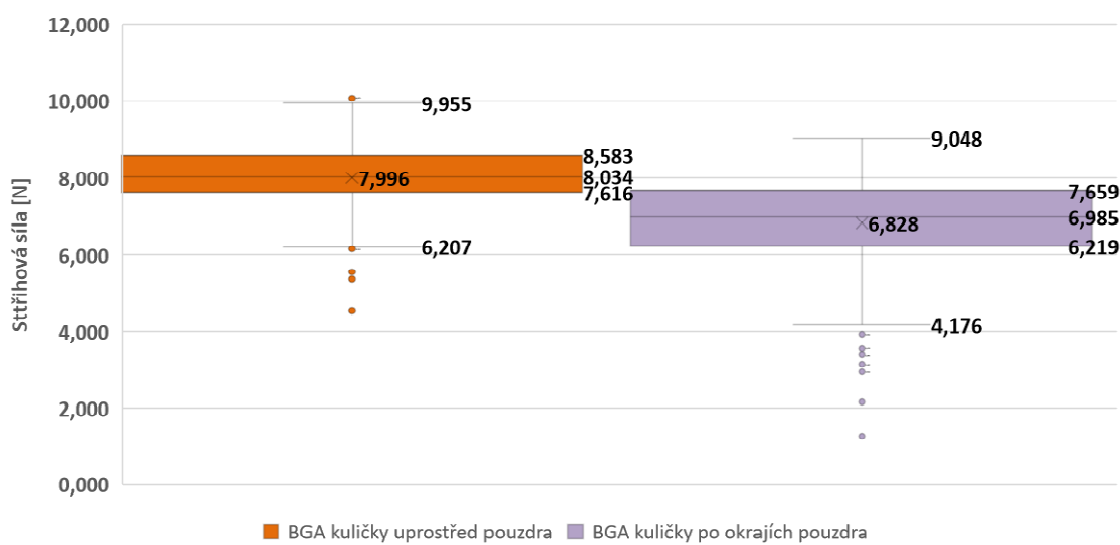
Obrázek 33 Kombinace odtržení BGA kuličky v intermetalickém spoji a v pájce pořízená mikroskopem se zvětšením 500x

5.7.2 Výsledky a vyhodnocení

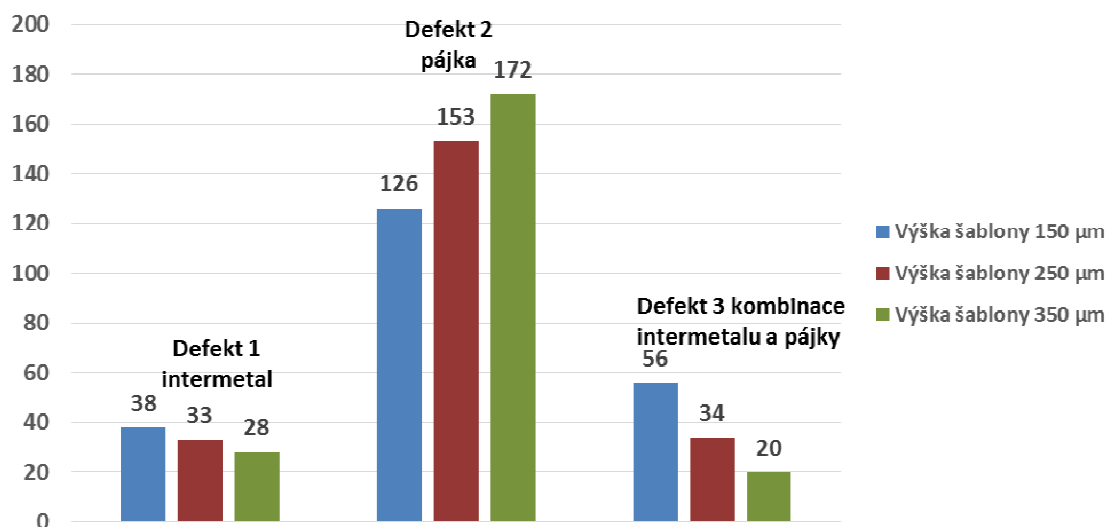
U každého typu vzorku bylo trháno 220 kuliček. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č.1. Statistické srovnání stříhové síly u daných výšek šablony je v grafu 5. Tento graf zachycuje rozptyl hodnot stříhových sil, průměrnou, maximální a minimální hodnotu. Z grafu lze vidět, že nejlepších výsledků stříhových sil bylo dosaženo při výšce šablony 250 μm. Dále byly provedeny standardní statistické t-testy se studentovým rozdělením. Průměrné hodnoty stříhových sil se od sebe příliš neliší, protože rozdíl mezi soubory hodnot (150 μm, 250 μm, 350 μm) je statisticky nevýznamný. Pro porovnání stříhových sil byly použity výsledky uvedené v publikaci [18], kde byl ohřev BGA pájkových kuliček (SAC305) prováděn infračerveným zářením a kde byla naměřena průměrná hodnota stříhové síly 8 N. Při pájení přímo vyhřívanou šablonou byla průměrná stříhová síla rovna 7 N. Síly jsou v rozsahu běžných standardních hodnot. Dále bylo zjištěno, že BGA kuličky uprostřed pouzdra měly stříhovou sílu přibližně o 1 N větší než ostatní pájecí kuličky po okrajích pouzdra (viz graf 6). To je dáno díky menšímu a pomalejšímu ochlazování středu BGA pouzdra při procesu pájení, a tudíž došlo k lepšímu prohřátí kuliček. Jedná se o kuličky, které mají označení č. 5, 6, 11 a 12 (viz příloha č.1). V grafu 7 jsou zobrazeny počty jednotlivých defektů u konkrétní výšky šablony. Nejvíce zastoupený defekt je stříh v pájecí slitině. Trend defektu odtržení v pájce je vzestupný se zvětšující se výškou přetavovací šablony. Defekt odtržení v intermetalickém spoji a kombinace odtržení v intermetalickém spoji a pájce klesají se vzrůstající výškou šablony.



Graf 5 Statistické srovnání stříhové síly u jednotlivých výšek šablony



Graf 6 Statistické srovnání stříhových sil BGA kuliček uprostřed a po okrajích pouzdra BGA



Graf 7 Znázornění defektů po odtržení BGA kuliček u jednotlivých výšek šablony

5.8 Metalografické výbrusy

Zapájené a připravené vzorky BGA pouzder v misce, které byly upevněny pomocí kaptonové pásky (viz obrázek 34), byly zality akrylátovou hmotou Dentacryl. Vytvrzený vzorek BGA pouzdra v Dentacrylu je zachycen na obrázku 35. Tento vzorek byl následně rozřezán na polovinu pomocí ruční pilky.

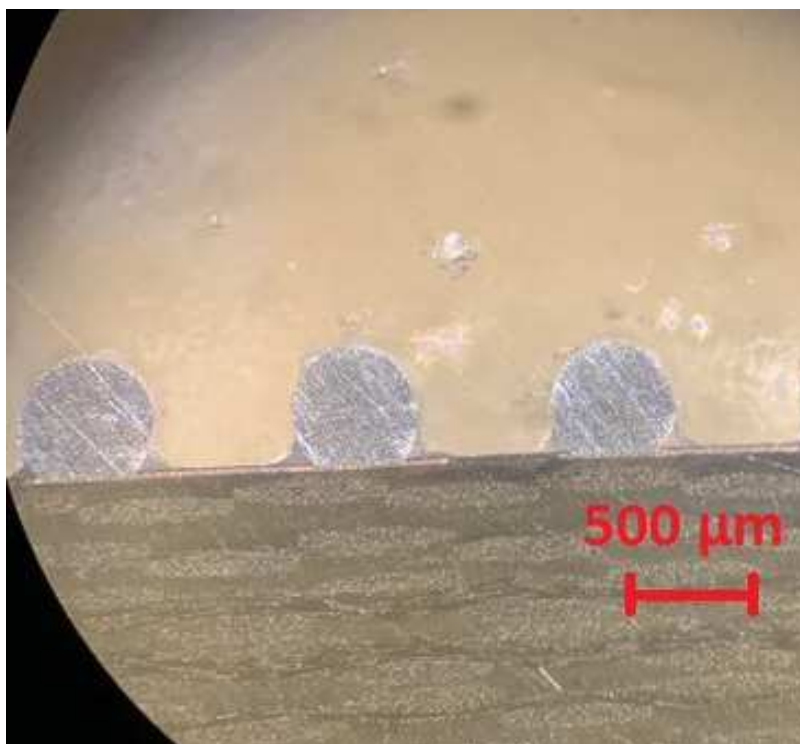


Obrázek 34 Vzorky zapájených BGA pouzder připravené k zalití dentacrylem



Obrázek 35 Vytvrzený vzorek BGA pouzdra zalitý v dentacrylu

Poté byl ručně broušen postupně na brusných papírech zrnitosti 600 a 1200. V dalším kroku byly vzorky leštěny pomocí roztoku oxidu hlinitého s velikostí částic do 5 μm . Během broušení byly vzorky průběžně sledovány pod mikroskopem k dosažení co nejmenších vrypů během broušení a k zachování co nejlepší rovinnosti broušeného povrchu. Metalografický výbrus po leštění vzorku je vyobrazen na obrázku 36. Dále vzorky prošly procesem selektivního mokrého leptání pro lepší zobrazení reliéfu intermetalické vrstvy v roztoku 94% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 4% HNO_3 a 2% HCl . Proces probíhal při pokojové teplotě. Konečný vzorek po procesu leptání je na obrázku 37.



Obrázek 36 Mikrovýbrus BGA kuliček po leštění vzorku



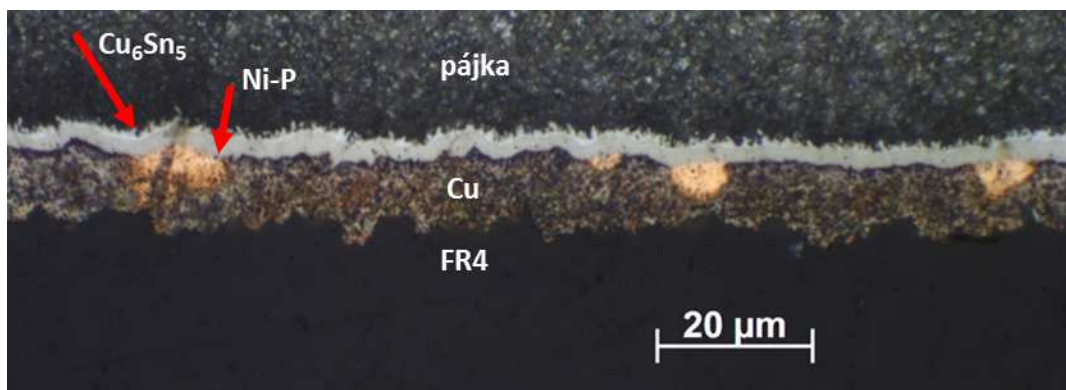
Obrázek 37 BGA kulička po procesu leptání pořízená mikroskopem se zvětšením 200x

5.8.1 Analýza intermetalických vrstev

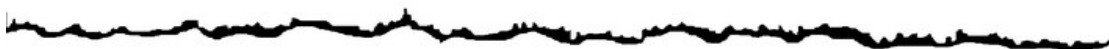
Po zpracování mikrovýbrusů byla provedena analýza vzorků v oblasti rozhraní mezi pájkovou kuličkou BGA a pájecí ploškou. Sledovaná byla oblast intermetalického rozhraní zejména intermetalická vrstva s chemickým složením Cu_6Sn_5 . Oblast celkového rozhraní s vyznačenou sledovanou vrstvou je zobrazena na obrázku 38. Dále byla uskutečněna počítačová analýza tohoto rozhraní pomocí programu ImageJ, aby byla stanovena tloušťka intermetalické vrstvy a její drsnosti. Nejprve byla provedena kalibrace měřítka v programu ImageJ pomocí již stanovené vzdálenosti měrky na snímku pořízené mikroskopem. Dále byla zkoumaná intermetalická vrstva ořezána a zbarvena do černa (viz obrázek 39) a byla změřena její celková délka a plocha. Z tohoto zjištění byla stanovena střední tloušťka intermetalické vrstvy (MSL) pomocí rovnice [15]:

$$MSL = \frac{A}{L}, \quad (1)$$

kde MSL je hodnota odpovídající průměrné tloušťce intermetalické vrstvy, A je plocha intermetalické vrstvy a L je její délka.



Obrázek 38 Oblast intermetalického rozhraní vzorku pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x



Obrázek 39 Ukázka ořezané části intermetalické vrstvy vzorku pomocí programu ImageJ

Poté byla ořezaná část intermetalické vrstvy narovnána a ořezána zespodu o průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy u příslušného vzorku (viz obrázek 40). Takto upravená vrstva byla připravena pro měření drsnosti povrchu intermetalické vrstvy. Z každé takto upravené vrstvy byly změřeny všechny výšky intermetalických

vyčnívajících nerovností, které byly vloženy do následující rovnice [15]:

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2}, \quad (2)$$

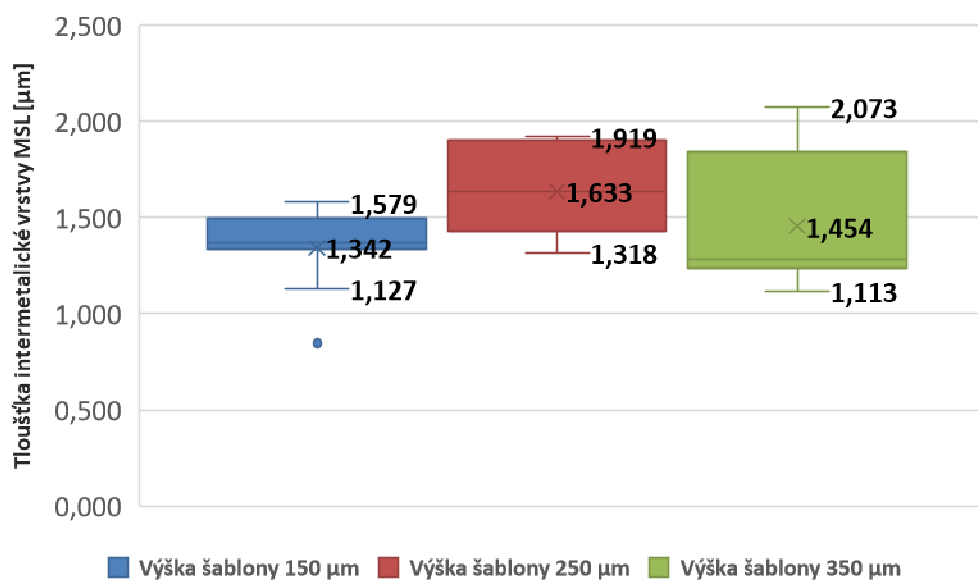
kde R_{rms} je efektivní drsnost povrchu intermetalické sloučeniny, N je celkový počet měřených hodnot, i je pořadí měřené hodnoty a Z je tloušťka intermetalické nerovnosti měřená od MSL .



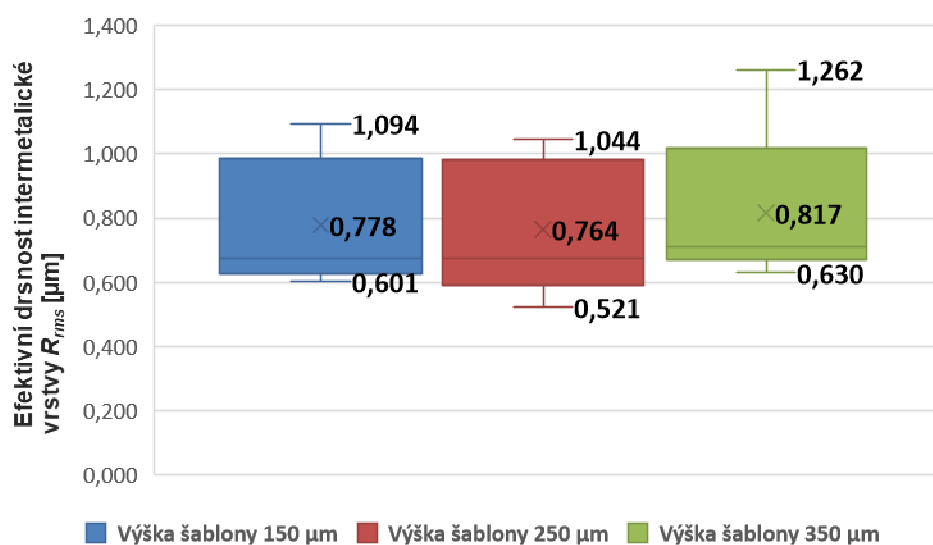
Obrázek 40 Ukázka ořezané a narovnané části intermetalické vrstvy vzorku

5.8.2 Výsledky a vyhodnocení

Celkem bylo vyhodnoceno 11 vzorků u každé výšky šablony. V grafu 8 jsou zobrazena výsledná data průměrné tloušťky intermetalických vrstev. Graf zachycuje průměrnou, maximální, minimální tloušťku intermetalické vrstvy a také celkový rozptyl. Dále byly provedeny standardní statistické t-testy se studentovým rozdělením. Průměrná tloušťka intermetalické vrstvy je přibližně stejná u každé z jednotlivých výšek šablony, protože rozdíly hodnot při daných výškách šablony nejsou statisticky významné. Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy v závislosti na výšce vyhřívané šablony je v grafu 9. Tento graf zachycuje rozptyl hodnot drsností, průměrnou, maximální a minimální hodnotu. Z grafu lze vidět, že nejmenší drsnosti bylo dosaženo při výšce šablony 250 μm . Průměrné hodnoty drsností se však od sebe příliš neliší, protože rozdíly drsností při daných výškách šablony nejsou statisticky významné. Pro porovnání tloušťky intermetalické vrstvy a drsnosti byly použity výsledky uvedené v publikaci [15], kde byl ohřev BGA pájkových kuliček (SAC305) prováděn infračerveným zářením a kde byla naměřena průměrná hodnota intermetalické vrstvy 2,3 μm a efektivní drsnost povrchu intermetalické vrstvy 1,5 μm . Při porovnání se vzorky, které byly přetaveny přímo vyhřívanou šablonou, byly hodnoty tloušťky 1,5 μm a drsnosti 0,8 μm .



Graf 8 Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy v závislosti na výšce vyhřívané šablony



Graf 9 Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy v závislosti na výšce vyhřívané šablony

6 ZÁVĚR

V teoretické části této práce bylo popsáno několik základních metod vytváření pájkových kulových vývodů na BGA pouzdrech využívajících pájkových kulových preforem a byly uvedeny výhody a nevýhody při jejich použití. Popsán byl i tzv. *reballing* (překuličkování), který se provádí u oprav BGA pouzder. Bylo provedeno rozčlenění používajících se teplotních profilů a jejich parametrů, které mají vliv na vlastnosti pájených spojů u pouzder BGA. Dále byly popsány základní intermetalické sloučeniny a metoda měření tloušťky a drsnosti intermetalických vrstev. Také byly shrnuty testovací metody pro zjišťování jakosti pájených kulových vývodů.

Hlavním cílem experimentální části této bakalářské práce bylo navrhnutí a provedení experimentu pro vytvoření vzorků při použití nové metody přetavení pájkových kulových vývodů pomocí přímo vyhřívané šablony v různých výškách a jejich vliv na tvorbu intermetalických vrstev.

Nejprve bylo na funkčním vzorku provedeno praktické měření teplotních rozdílů mezi pouzdrem a šablonou. Při výšce šablony 250 μm byly zjištěny rozdílné teploty na šabloně, pájkové kuličce (500 μm) a pouzdře BGA. Při nastavení maximální teploty šablony 315 $^{\circ}\text{C}$ bylo zjištěno, že se pájkové kulové vývody přetavily a zároveň teplota pouzdra nepřekročila hranici 150 $^{\circ}\text{C}$, což je velmi žádoucí z hlediska tepelného namáhání součástky.

Na prototypu pájecí stanice byly nastaveny parametry PID regulace (proporcionální, integrační, derivační, časová a hysterezní konstanta). Nastavení těchto konstant bylo nedílnou součástí optimalizace zařízení, po němž následovalo ověření pomocí zvoleného pájecího profilu.

Dále byl uskutečněn experiment s využitím prototypu pájecí stanice. Optimalizovaný teplotní profil, který sloužil k ověření zjištěných regulačních konstant, zůstal pro daný experiment zachován. Sledovaným parametrem experimentu byla poloha vyhřívané šablony nad pouzdrem BGA. Zkušební výšky byly voleny 150, 250 a 350 μm . Poté byly provedeny testy kvality pájených spojů zahrnující stříhové zkoušky a optickou inspekci. Dále byly provedeny metalografické výbrusy a optická inspekce vnitřní struktury pájkových kulových vývodů se zaměřením na intermetalické vrstvy na rozhraní pájka – pájecí ploška.

Prvním měřeným parametrem určujícím jakost kulových pájkových vývodů a případný vliv tloušťky a drsnosti intermetalické vrstvy byla síla ve stříhu. Odolnost ve stříhu byla rovna 6,917 N pro výšku šablony 150 μm , 7,152 N pro výšku 250 μm a 7,116 N pro výšku šablony 350 μm . Průměrné hodnoty pro všechny tři vzdálenosti nejsou statisticky významné a lze je považovat za rovnocenné. Naměřené hodnoty stříhových sil odpovídaly naměřeným výsledkům ve vědeckých publikacích [18], kde byla pro přetavení BGA kuliček použita metoda infračerveného záření.

Další výsledky z měření tloušťky a efektivní drsnosti intermetalické vrstvy po přetavení pomocí proudem přímo vyhřívané šablony ve výšce 150 μm , 250 μm a 350 μm ukázaly, že rozdíly v hodnotách (tloušťka, efektivní drsnost) mezi jednotlivými vzdálenostmi šablony od BGA pouzdra nejsou statisticky významné. Průměrné hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy byly 1,342 μm pro výšku šablony 150 μm , 1,633 μm pro výšku 250 μm a 1,454 μm pro výšku šablony 350 μm . Naměřené

hodnoty stříhových sil také odpovídaly naměřeným výsledkům uvedených ve vědeckých publikacích [15], kde byla pro přetavení BGA kuliček použita metoda infračerveného záření.

Výsledky této práce posloužily k charakterizaci nové pájecí metody pro vytvoření, resp. znovuvytvoření kulových pájkových vývodů na BGA pouzdrech a optimalizaci prototypu zařízení k tomuto účelu určenému.

LITERATURA

- [1] TESCAN. *Ball Grid Array* [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/applications/semiconductors/ball-grid-array>
- [2] BELUCZ, J. Povrchové úpravy desek plošných spojů. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2019(2) [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>
- [3] OTÁHAL, A. *Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [4] Epec Engineered Technologies. *PRINTED CIRCUIT BOARD SURFACE FINISHES: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES* [online]. 2008 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/articles/pcb-surface-finish-advantages-and-disadvantages.html>
- [5] SMT Technologie. *Reballing - překuličkování BGA* [online]. 2014 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.smt-technologie.cz/smt-technologie/reballing-prekulickovani-bga/>
- [6] Chiptronics. *Reballing with direct heat stencils* [online]. 2012 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <http://chiptroniks.com/2012/05/reballing-with-direct-heat-stencils/>
- [7] Ntbook. *Reball BGA v obrazech* [online]. 2011 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://shop.ntbook.cz/content/8-reball-bga-v-obrazech-2-3>
- [8] DILLMAN, Ross. BGA Reballing. *Aci Technologies* [online]. 2018 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.aciusa.org/assets/pdf/techtips/techtip10-2018.pdf>
- [9] Retronix. *Laser Reball Service* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://www.retronix.com/laser-bga-reballing/>
- [10] ADÁMEK, M., VAŠKO, C. a DRLÍK, M. *Pájení v elektrotechnické výrobě, Kontrola jakosti spojů* [online]. [cit. 2019/11/24]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf
- [11] DUŠEK, K., VESELÝ, P., ŠIMEK, M. a RUDAJEVOVÁ, A. *Experimental study of the influence of the temperature profile on the BGA soldering*. In: *IEEE* [online]. 2016 [cit. 2019-11-24]. ISSN 2161-2064. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7563190>
- [12] GONG, Y., LI, Q. a YANG, D.G. *The Optimization of Reflow Soldering Temperature Profile Based on Simulation*. In: *IEEE* [online]. 2007 [cit. 2019-11-24]. ISBN 1-4244-0619-6.
- [13] PODZEMSKÝ, J. *Struktura spojů pájených pájkami bez olova a její vliv na vnější vzhled spoje* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>
- [14] DPS Elektronika od A do Z. *Metalografický výbrus DPS: inspekční a vývojová metoda* [online]. 2011 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6203/metalograficky-vybrus-dps-inspekni-a-vyvojova-metoda>
- [15] OTÁHAL, A. a SZENDIUCH, I. *Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer* [online]. 2018 [cit. 2019-12-06]. ISSN 1339-309X.
- [16] Topline. *Understanding Benefits of Daisy Chain* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.topline.tv/DaisyChain.html>
- [17] MISÁK, P. *Navrhování experimentů* [online]. 2016 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/BI053/DOE.pdf>

- [18] OTÁHAL, A., SOMER, J. a SZENDIUCH, I. *Influence of Heating Direction on BGA Solder Balls Structure* [online]. 2017 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8346878>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

T	teplota
t	čas
L	délka
R	drsnost povrchu
F	síla
BGA	provedení pouzdra s kuličkovými kontakty (<i>Ball Grid Array</i>)
DPS	deska plošných spojů
IPC	nezávislá obchodní a normalizační organizace zaměřená na výrobu a vývoj elektroniky (<i>Association Connecting Electronics Industries</i>)
ENIG	povrchová úprava mědi: chemický nikl a imerzní zlato (<i>Electroless Nickel Immersion Gold</i>)
ENEPIG	povrchová úprava mědi chemický nikl, chemické palladium a imerzní zlato (<i>Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold</i>)
SMT	povrchová montáž (<i>Surface Mount Technology</i>)
OSP	povrchová úprava mědi organickými inhibitory mědi (<i>Organic Solderability Preservative</i>)
HASL	povrchová úprava pomocí cínu (<i>Hot Air Solder Leveling</i>)
IMC	intermetalická sloučenina (<i>Intermetallic compound</i>)
RoHs	omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (<i>Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment</i>)
RTS	lineární teplotní profil (<i>Ramp To Spike</i>)
RSS	sedlový teplotní profil (<i>Ramp Soak Spike</i>)
TCE	koeficient tepelné roztažnosti (<i>Temperature Coefficient of Expansion</i>)
PCB	deska plošných spojů (<i>Printed Circuit Board</i>)
DOE	plánování experimentu (<i>Design of experiments</i>)
LED	elektroluminiscenční dioda (<i>Light-Emitting Diode</i>)
FR4	tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí (<i>Flame Retardant</i>)
USB	univerzální sériová sběrnice (<i>Universal Serial Bus</i>)
PID	proporcionální, integrační a derivační část
IR	infračervené záření (<i>InfraRed</i>)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Imerzní pokovení mědi cínem [2]	3
Obrázek 2 Imerzní pokovení mědi zlatem [2]	4
Obrázek 3 Pouzdro BGA osazené pomocí šablony [7]	5
Obrázek 4 Reballing pomocí laseru [9]	6
Obrázek 5 Sedlový profil RSS [10]	7
Obrázek 6 Lineární profil RTS [10]	8
Obrázek 7 Testování metodou Daisy Chain [16].....	10
Obrázek 8 Panelový celek testovacích pouzder BGA	13
Obrázek 9 Testovací pouzdro BGA.....	13
Obrázek 10 Vyfrézované drážky ve zkušební pouzdře BGA	14
Obrázek 11 Přilepení termočlánků na zkušební pouzdro BGA	14
Obrázek 12 Měření výšky vyhřívané šablony nad pouzdem BGA	15
Obrázek 13 Celkový pohled na funkční vzorek pájecí stanice a měřicí přístroje.....	16
Obrázek 14 Detailní pohled na funkční vzorek pájecí stanice.....	17
Obrázek 15 Detailní pohled na vyhřívanou šablonu s upevněným termočlánkem typu K	17
Obrázek 16 Celkový pohled na prototyp pájecí stanice	18
Obrázek 17 Nedoleptané otvory ve vyhřívané šabloně po leptání	19
Obrázek 18 Otvory po ručním vrtání ve vyhřívané šabloně.....	19
Obrázek 19 Nerezová šablona tloušťky 300 μm bez povrchové úpravy	20
Obrázek 20 Nerezová šablona tloušťky 300 μm s nanesenou černou termovizní barvou	20
Obrázek 21 Vyhřívaná šablona prototypu s přilepeným termočlánkem.....	21
Obrázek 22 Nastavovaný teplotní profil [15]	22
Obrázek 23 BGA pouzdro po natisknutí tavidla.....	24
Obrázek 24 Sesazení pájkových kuliček BGA zachycených na displeji.....	25
Obrázek 25 Ztuhnutá a roztavená pájecí slitina BGA kuliček.....	26
Obrázek 26 BGA pouzdro s přetavenými pájkovými kuličkami.....	26
Obrázek 27 Zařízení DAGE PC2400.....	27
Obrázek 28 Detail trhačích nástroje a pájkových kuliček	28
Obrázek 29 Detail trhačích nástroje a testované BGA kuličky	28
Obrázek 30 Označení trhaných kuliček na pouzdře BGA	29

Obrázek 31 Odtržení BGA kuličky v intermetalickém spoji pořízený mikroskopem se zvětšením 1000x	30
Obrázek 32 Odtržení BGA kuličky v pájce pořízený mikroskopem se zvětšením 500x 30	
Obrázek 33 Kombinace odtržení BGA kuličky v intermetalickém spoji a v pájce pořízená mikroskopem se zvětšením 500x	31
Obrázek 34 Vzorky zapájených BGA pouzder připravené k zalití dentacrylem.....	33
Obrázek 35 Vytvrzený vzorek BGA pouzdra zalitý v dentacrylu	34
Obrázek 36 Mikrovýbrus BGA kuliček po leštění vzorku	35
Obrázek 37 BGA kulička po procesu leptání pořízená mikroskopem se zvětšením 200x	35
Obrázek 38 Oblast intermetalického rozhraní vzorku pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x	36
Obrázek 39 Ukázka ořezané části intermetalické vrstvy vzorku pomocí programu ImageJ	36
Obrázek 40 Ukázka ořezané a narovnané části intermetalické vrstvy vzorku	37

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Ověřovací teplotní profil pro zjištění rozdílů teplot	16
Graf 2 Závislost mezi měřenou a linearizovanou hodnotou IR senzoru.....	22
Graf 3 Teplotní profil vyhřívání šablony tloušťky 150 μm	23
Graf 4 Teplotní profil vyhřívání šablony tloušťky 300 μm	23
Graf 5 Statistické srovnání stříhové síly u jednotlivých výšek šablony	32
Graf 6 Statistické srovnání stříhových sil BGA kuliček uprostřed a po okrajích pouzdra BGA	32
Graf 7 Znázornění defektů po odtržení BGA kuliček u jednotlivých výšek šablony.....	33
Graf 8 Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy v závislosti na výšce vyhřívání šablony	38
Graf 9 Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy v závislosti na výšce vyhřívání šablony	38

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – naměřené hodnoty pevnosti ve stříhu pro pájkové kuličky (SAC305) pájené při různých výškách přímo vyhřívání šablony

PŘÍLOHA Č.1

Stříhové síly v [N] pro výšku šablony 150 µm

Kulička č.	Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Stříhová síla [N]	5,440	2,152	6,020	1,276	6,199	4,576	5,261	5,199	4,993	5,674	3,506
2		7,386	6,942	6,907	7,281	6,923	5,810	6,242	7,343	6,783	6,398	5,635
3		8,059	8,176	7,927	7,094	6,588	5,110	6,713	8,433	7,697	5,674	5,487
4		8,234	7,904	7,783	6,896	7,265	6,036	7,915	7,939	8,036	6,919	6,989
5		9,414	8,059	8,234	7,896	7,958	7,841	8,285	7,822	8,768	8,616	7,429
6		9,176	7,962	7,752	8,861	7,873	8,441	9,799	8,234	8,713	7,919	8,184
7		5,172	4,179	6,534	3,934	4,569	6,176	6,495	6,312	3,086	6,935	7,581
8		6,503	6,040	6,623	6,935	6,254	6,304	7,616	5,526	5,849	7,705	8,133
9		6,900	6,884	7,659	7,013	6,900	8,705	7,094	7,322	6,876	5,631	7,211
10		8,032	7,339	6,841	6,289	6,748	7,020	6,791	4,907	4,311	7,834	8,141
11		7,635	8,036	8,028	7,911	7,448	7,958	8,036	7,542	8,137	8,752	8,705
12		8,087	8,340	7,297	7,437	5,577	7,725	6,207	8,557	7,950	8,013	8,850
13		4,370	6,584	5,530	4,681	6,861	4,763	4,039	3,553	5,394	6,468	7,585
14		7,102	7,771	6,814	6,841	8,052	7,036	6,810	6,394	7,332	7,328	5,176
15		7,301	4,347	7,413	8,207	7,495	8,390	5,211	6,845	7,110	7,398	6,534
16		5,639	7,705	7,767	6,950	8,305	7,764	7,830	7,215	6,588	7,904	7,460
17		6,059	5,452	5,970	6,588	3,390	7,561	5,067	6,915	6,289	4,713	5,413
18		7,896	7,145	7,557	6,561	7,316	7,884	8,126	5,654	7,511	5,775	6,320
19		7,585	7,308	7,444	8,196	5,868	7,888	8,164	6,690	7,269	6,705	7,694
20		7,452	7,585	7,339	8,020	6,939	7,476	7,822	7,036	7,709	5,950	7,367

Stříhové síly v [N] pro výšku šablony 250 µm

Kulička č.	Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Stříhová síla [N]	5,215	6,853	4,024	6,503	5,016	6,211	5,814	4,549	5,872	5,713	5,794
2		6,966	6,779	6,627	7,125	7,036	7,332	7,094	7,079	7,931	6,635	7,588
3		7,211	6,300	4,790	8,386	7,557	6,690	7,281	5,989	7,417	8,227	8,332
4		8,624	7,588	6,549	7,153	8,149	7,530	7,853	6,149	8,126	8,604	7,040
5		8,227	8,363	8,203	7,760	8,612	7,950	8,647	7,834	6,619	8,526	8,690
6		8,355	8,538	8,573	8,153	7,199	6,791	7,978	7,643	6,907	7,402	7,845
7		6,328	4,713	6,666	4,892	6,230	7,016	5,686	7,896	6,191	4,736	4,899
8		7,639	5,876	8,215	6,655	7,444	6,763	6,958	7,032	5,915	7,293	7,452
9		6,117	6,472	8,989	3,140	7,137	7,188	7,402	7,312	6,779	8,023	7,001
10		7,919	6,997	7,133	6,907	8,534	8,098	8,176	8,114	9,048	6,981	8,410
11		8,406	7,904	8,227	7,627	7,211	7,849	7,258	8,631	6,156	8,340	7,168
12		8,153	8,468	7,858	10,075	7,838	8,635	9,165	8,196	7,841	9,196	8,962
13		6,024	7,308	5,545	6,491	5,775	6,744	6,413	5,596	5,798	5,919	6,748
14		7,359	7,491	6,728	7,709	6,674	7,511	6,063	6,156	7,308	5,763	8,519
15		6,923	8,355	7,958	7,211	7,853	7,943	7,063	7,402	8,254	8,398	6,993
16		8,616	7,896	8,281	7,721	5,759	7,429	5,296	7,950	7,284	7,359	8,569
17		6,472	5,296	3,989	7,106	6,666	6,032	6,440	6,437	4,907	4,230	5,219
18		6,763	6,806	6,098	8,075	7,888	7,954	7,238	5,577	8,122	6,830	8,452
19		6,767	6,546	7,834	7,701	8,390	7,861	6,051	4,619	5,830	7,409	7,149
20		6,339	8,168	8,059	7,581	7,876	8,129	7,522	7,561	7,892	6,639	7,005

Stříhové síly v [N] pro výšku šablony 350 µm

Kulička č.	Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Stříhová síla [N]	4,818	6,347	6,942	6,779	7,351	6,184	5,903	4,989	5,577	6,713	6,678
2		5,180	6,448	7,643	7,993	7,729	8,624	8,464	7,262	7,059	7,468	6,892
3		7,592	8,020	7,950	7,651	8,779	8,484	8,476	8,168	8,336	8,592	7,888
4		7,822	7,810	7,371	8,343	7,814	8,196	6,591	8,367	6,787	8,320	7,207
5		8,546	9,079	8,923	8,390	7,269	5,359	7,001	8,032	7,425	8,612	9,526
6		8,001	9,231	9,927	7,771	6,849	6,616	7,441	7,760	8,783	7,581	9,464
7		6,215	7,398	7,363	7,125	6,437	7,810	5,845	6,429	6,779	6,265	5,250
8		7,339	7,561	6,518	7,756	6,433	7,565	6,491	6,880	7,974	7,546	5,133
9		7,760	8,978	7,480	7,277	7,950	7,312	5,351	7,472	7,950	7,546	6,596
10		8,421	7,546	7,429	6,806	7,557	7,635	6,619	8,589	8,009	7,834	6,915
11		8,884	4,650	8,009	9,153	7,001	8,701	8,087	9,717	8,188	7,717	8,464
12		8,554	4,534	8,519	7,433	6,837	7,300	6,402	5,631	5,553	9,955	9,114
13		5,394	6,888	5,495	3,012	6,184	2,942	5,285	7,005	6,557	7,911	5,230
14		7,600	7,627	6,958	6,857	6,954	6,682	6,265	6,962	4,176	6,981	6,433
15		7,900	8,394	8,690	7,865	6,822	6,402	5,748	7,892	5,752	4,911	7,289
16		6,713	8,203	6,767	5,503	7,312	7,176	7,265	6,316	5,331	6,398	7,005
17		6,608	5,845	6,386	7,110	5,448	5,577	5,693	7,713	6,429	5,110	5,604
18		7,970	6,721	7,051	6,962	5,452	5,592	5,238	6,514	4,907	5,289	7,044
19		6,935	7,982	6,437	7,659	5,215	7,028	7,262	7,993	7,888	7,470	7,005
20		7,188	8,110	6,670	6,927	6,569	7,904	6,106	7,783	7,429	6,370	7,441