



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

OPTIMALIZACE TEPLOTNÍCH PROFILŮ NA ZAŘÍZENÍ IR-400

OPTIMIZATION OF TEMPERATURE PROFILES ON EQUIPMENT IR-400

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LEON MIERŽWINSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEXANDR OTÁHAL

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Leon Mierżwinsky

ID: 134362

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace teplotních profilů na zařízení IR-400

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte inovaci chladicího modulu na zařízení IR-400 o možnost přesného nastavení rychlosti chlazení. Usměrněte proud vzduchu z ventilátoru, aby byla zajištěna jeho homogenita. Optimalizujte nastavené teplotní profily určené pro keramický substrát a vytvořte nové profily pro opravy BGA u grafických karet. Ověřte správné nastavení vytvořených a optimalizovaných pájecích profilů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 6.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

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 zaměřuje na inovaci chladičího modulu pro opravárenskou stanici Ersu IR-400. Chladičí modul byl vybaven možností nastavit rychlosti chlazení pro substrát FR4 a korundovou keramiku. V rámci práce byly optimalizovány teplotní profily pro opravy BGA pouzder u grafických karet při použití olovnaté i bezolovnaté pájky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chlazení, pájecí profil, BGA pouzdra, reballing

ABSTRACT

This thesis focuses to innovation of the cooling module for the repair station Ersu IR-400th Cooling module was designed with possibility to set the cooling rate for FR4 substrate and alumina ceramics. As part work has been optimized temperature profiles for BGA repair package for graphics cards when using leaded and lead-free solder.

KEYWORDS

Cooling, reflow profile, BGA package, reballing

MIERŽWINSKÝ, L. *Optimalizace teplotních profilů na zařízení IR-400* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Alexandr Otáhal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Optimalizace teplotních profilů na zařízení IR-400 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce ing. Alexandru Otáhalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Teplotní profily	2
1.1 Lineární teplotní profil	2
1.2 Sedlový teplotní profil	2
1.3 Měření teplotních profilů	3
1.4 Optimalizace teplotních profilů	4
1.5 Chlazení	5
2 Pouzdra BGA	7
3 Materiály pro substráty dps	9
3.1 FR4.....	9
3.2 AL2O3	10
3.3 Srovnání substrátů.....	10
4 Defekty vznikající při pájení	12
5 „Reballing“ BGA pouzder	16
6 Zařízení ir-400	19
7 Chladicí modul	22
7.1 Modul chlazení	23
7.2 Rychlost chlazení s využitím prototypu chladicího modulu.....	24
8 Optimalizace teplotních profilů pro reballing GPU	28
9 Reballing Grafické karty	32
10 Závěr	35
Literatura	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Sedlový teplotní profil.....	3
Obrázek 1.2: Růst vrstvy intermetalických sloučenin s rostoucím časem (převzato z [9]).	5
Obrázek 2.1: Vývodové pole BGA pouzdra.	7
Obrázek 3.1: Substrát FR4.	9
Obrázek 3.2: Substrát AL ₂ O ₃ (korundová keramika).	10
Obrázek 4.1: Head in pillow defekt (převzato z [1]).	14
Obrázek 4.2: BGA crack (převzato z 36[10]).	15
Obrázek 4.3: Deformovan pájkový spoj (převzato z [10]).	15
Obrázek 5.1: BGA pouzdro po očištění a částečném osazení pájkovými kuličkami (pájkové kuličky jsou v levé části).	17
Obrázek 6.1: Opravárenská stanice Ersa IR-400.	19
Obrázek 6.2: Demontované pouzdro přisáté na vakuové pipetě.	20
Obrázek 6.3: Čelní pohled na regulátor R500.	21
Obrázek 7.1: Mikroskopický záběry mikrovýbrusu s pozorovatelnou vrstvou intermetalických sloučenin (bez chlazení, olovnaté pájecí kuličky).	22
Obrázek 7.2: Mikroskopický záběr mikrovýbrusu s pozorovatelnou vrstvou intermetalických sloučenin (s chlazením, olovnaté pájecí kuličky).	22
Obrázek 7.3: Regulátor napětí s obvodem LM317 (převzato z [24]).	23
Obrázek 7.4: Původní chladicí modul.	24
Obrázek 7.5: Stanice IR-400 usazená na ocelových nohách (vlevo) a nový chladicí modul (vpravo).	24
Obrázek 7.6: Vzorek keramického substrátu využitý při měření a rozložení termočlánků.	25
Obrázek 7.7: Vzorek substrátu FR4 využitý při měření a rozložení termočlánků.	25
Obrázek 7.8: Oblast chlazení teplotního profilu olovnaté pájky S6M-XM35 na FR4 substrátu (úroveň 0)	26
Obrázek 8.1: Rozložení termočlánků při optimalizaci teplotních profilů (zespodu TC2 a TCD).	28
Obrázek 8.2: Optimalizovaný teplotní profil pro olovnatou pastu S6M-XM3S.	30
Obrázek 8.3: Optimalizovaný teplotní profil pro bezolovnatou pastu SAC3-XF3.	31
Obrázek 9.1: Demontované BGA pouzdro.	32

Obrázek 9.2: BGA pouzdro osazené pájkovými kuličkami před zapájením.	33
Obrázek 9.3: Optická kontrola zapájení testovacího BGA.	33
Obrázek 9.4: Pouzdro se znehodnocenými pájkovými vývody.....	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1: Srovnání vlastností FR4 a Al ₂ O ₃ (korundové keramiky) [12][13].....	11
Tabulka 7.1: Změřené rychlosti chlazení na substrátu FR4.....	27
Tabulka 7.2: Změřené rychlosti chladnutí na substrátu Al ₂ O ₃ (korundová keramika)...	27
Tabulka 8.1: Parametry teplotních profilů [19] [20].....	28
Tabulka 8.2: Rozložení termočlánků.....	28
Tabulka 8.3: Parametry nastavení regulátoru pro bezolovnatou pájku SAC3-XF3 (program v regulátoru – 6).....	29
Tabulka 8.4: Parametry nastavení regulátoru pro olovnatou pájku S6M-XM35 (program v regulátoru – 7).....	29

ÚVOD

Problematika týkající se BGA pouzder je v dnešní době stále více rozšířená. S rostoucím technickým pokrokem v integraci čipů a obvodů, se stále větším počtem vývodů, nacházejí BGA pouzdra uplatnění ve stále větším množství výrobků od kalkulaček až po řídicí počítače na palubách kosmických lodí. Tyto pouzdra sebou přinášejí řadu výhod i nevýhod. Rozhodně se jedná o elektronické odvětví, kde je neustále prostor vyvíjet nové technologie, či vylepšovat ty stávající. Opravárenská stanice již nepatří k nejmodernějším na trhu a práce na její inovaci jsou rozhodně přínosné.

Pájení a opravování elektronických zařízení je v této přetechnizované době rozhodně velmi žádané. Navíc jedná-li se o nejdůležitější komponenty osobních počítačů a mobilních telefonů. Však již zmiňovaných BGA pouzder najdeme v obyčejném počítači hned několik a každé z nich musí být v případě poruchy opraveno relativně komplikovaným a technicky náročným způsobem, kterým se bude tato práce zabývat.

1 TEPLOTNÍ PROFILY

Teplotní profil je v podstatě jediný nástroj, kterým lze sledovat a monitorovat průběhy teplot při pájení elektronických obvodů. Jde o grafické znázornění aktuální teploty na desce plošných spojů (dále jen DPS) v konkrétním čase. Správné nastavení teplotního profilu velikou měrou ovlivňuje kvalitu pájeného spoje. Teplotní profily jsou nejrůznějšími způsoby optimalizovány pro konkrétní typy pájecích past, substrátů DPS a v neposlední řadě pro různé typy pájecích pecí a stanic, na kterých je pájení realizováno. Rozlišujeme dva druhy teplotních profilů. První z nich je lineární teplotní profil (viz. kapitola 1.1), druhým typem je sedlový teplotní profil, který je na rozdíl od lineárního rozdělen do čtyř základních částí, kde každá část má svůj účel, za kterým je v teplotním profilu rozlišována. (viz. 1.2). [1]

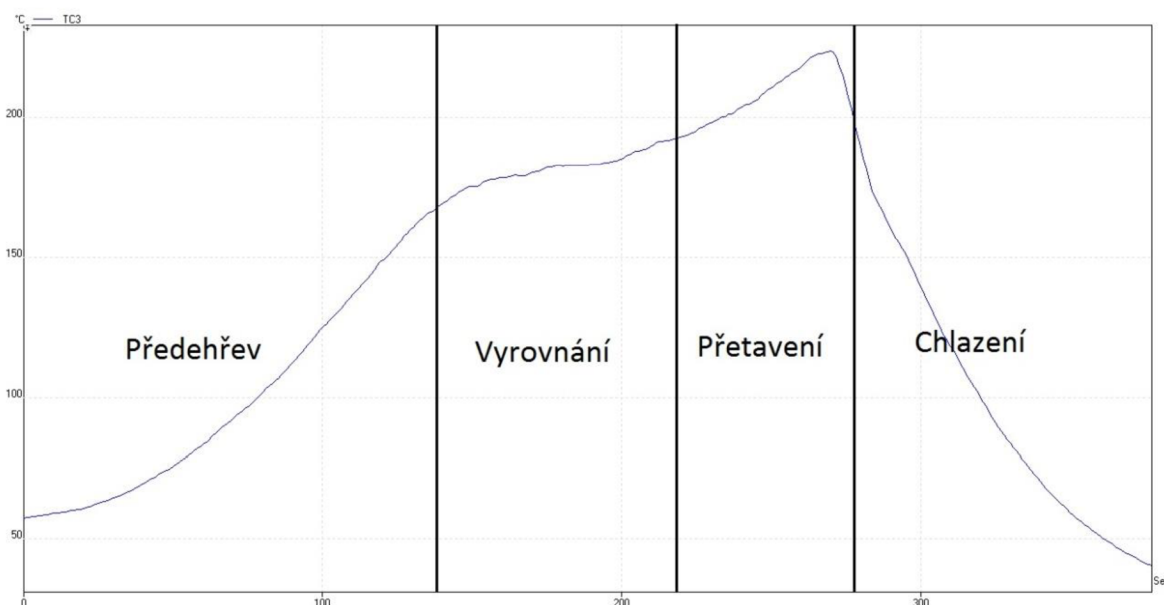
1.1 Lineární teplotní profil

V anglické literatuře je označován jako „Ramp to peak“ **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Jak již z tohoto názvu vyplývá, jedná se v podstatě o konstantní zvyšování teploty až po špičkovou hodnotu. Typicky se jedná o rychlost náběhu teploty v rozmezí 0,6-1,8°C/s. Tento teplotní profil se využívá například při demontáži pouzder, kdy je hlavním cílem pouze oddělení pouzdra od DPS. Zásadním parametrem tohoto teplotního profilu je špičková teplota. Tento druh teplotního profilu se odlišuje zejména tím, že postrádá takzvanou zónu předeřevu, ve které dochází k aktivaci tavidla a vyrovnání teplotních rozdílů vznikajících na DPS. Tím dochází ke zkrácení celkové doby trvání teplotního profilu a jeho značnému zjednodušení. Lineární teplotní profil má řadu výhod oproti sedlovému teplotnímu profilu. Obecně má tento profil lesklejší a světlejší spoje, a protože zde není vyrovnávací část, zůstane trocha tavidla v pastě až do špičkové teploty, kdy napomůže lepší smáčivosti. Využívá se také v kombinaci s vodo rozpustnými pájkami. Navíc je tento profil jednodušší na optimalizaci a na přizpůsobení průmyslových pecí právě tomuto profilu. Při použití lineárního teplotního profilu mohou nastat defekty, stejné jako při sedlovém profilu. Například to může být tombstoning, voiding, špatné smáčnění, vznik pájkových kuliček a další. Tento druh teplotního profilu však nemá pro tuto práci větší význam, nebude tedy více popisován. [1]

1.2 Sedlový teplotní profil

Sedlový teplotní profil je pro pájení mnohem častěji používaný a vyznačuje oproti lineárnímu profilu členitostí a větším množstvím sledovaných parametrů, které jsou odvozeny právě od členitosti sedlového teplotního profilu. Podívejme se nyní na základní části tohoto profilu. Každý sedlový teplotní profil se skládá z předeřivací, vyrovnávací, přetavovací a chladicí části. Předeřivací fáze spočívá v zahřátí desky na teplotu, která je požadována v části vyrovnávací. Rychlost růstu teploty se zde klasicky pohybuje v rozmezí 0,5 – 2°C/s a liší se podle druhu použité pájecí pasty. Vyrovnávací fáze má za úkol hlavně aktivovat tavidlo a vyrovnat teplotní rozdíly vzniklé mezi

jednotlivými součástkami a DPS, které vznikají důsledkem rozdílných teplotních vodivostí a rozdílné schopnosti absorbovat teplo u jednotlivých součástek. Aktivované tavidlo má jako primární úkol odstranit chemické nečistoty a oxidy z pájecích plošek a v následující fázi napomoci lepšímu smáčení pájky. Během vyrovnávací fáze se teplota pohybuje okolo 165°C u olovnaté a 175°C u bezolovnaté pájky, v podstatě zůstává během celé fáze stejná, nebo se mění minimálně. V předposlední části teplotního profilu dojde k samotnému přetavení pájky, která nevzlíná na pájecí plošky, čímž dojde ke vzniku pájeného a elektrického spoje. Špičková teplota se pohybuje zhruba 35°C nad teplotou tavení pájky, která je u olovnaté pájky 183°C a u bezolovnaté 217°C. Typická doba trvání této části je 60 – 90 sekund. Poté co se všechna pájka roztaví, vytvoří spoj a nastává další, již poslední část zvaná chlazení. Jak již název napovídá, jedná se o část, kde dochází k chlazení DPS a samotného pájeného spoje na normální teplotu, kterou představuje teplota zhruba 40-50°C. Rychlost chlazení má typicky velikost do 6°C/s. Tato rychlost chlazení je považována za mezní hodnotu a neměla by být překročena, jestliže se tak stane, mohlo by dojít k mechanickému poškození DPS, pájených spojů či osazených součástek. Tyto defekty vznikají vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti. Rychlost chlazení rovněž nesmí být příliš pomalá, jestliže se tak stane, dochází v místě styku pájky a pájecí plošky ke vzniku příliš velké vrstvy intermetalických sloučenin (viz kapitola 1.5) , čímž se snižuje kvalita a spolehlivost pájeného spoje. [1][3]



Obrázek 1.1: Sedlový teplotní profil.

1.3 Měření teplotních profilů

Cílem měření může být získání teplotního profilu jak podélného, jehož vypovídací hodnotou je aktuální teplota pájení, tak i profilu příčného, kterým se měří homogenita ohřevu DPS. Teplotní profily se měří pomocí termočlánků, které jsou zafixovány na testovací DPS. Termočlánek se skládá ze dvou kovů, které jsou spojeny do série. Při zahřívání termočlánku se na něm objevuje elektrické napětí, jestliže toto napětí

porovnáváme s referenčním napětím, zjistíme teplotu v místě spojení obou kovů. Teplotní rozsah měřitelný termočlánky je různý a záleží na použitých kovech, ze kterých se termočlánky skládají. Například termočlánky Typu K, které jsou použity v praktické části této práce, mohou měřit teploty až do 1260°C a jsou vyrobeny z chromelu a alumelu (Cr-Al). Toto rozpětí teplot je však teoretické, termočlánky teploty sice mohou změřit, avšak musí k tomu být přizpůsobena jejich izolace. Fixace termočlánků na DPS je v této práci realizována pomocí speciální, teplu odolné, kaptonové pásky, která je teoreticky schopná plnit funkci při teplotách až do 400°C.[4]
[4]

1.4 Optimalizace teplotních profilů

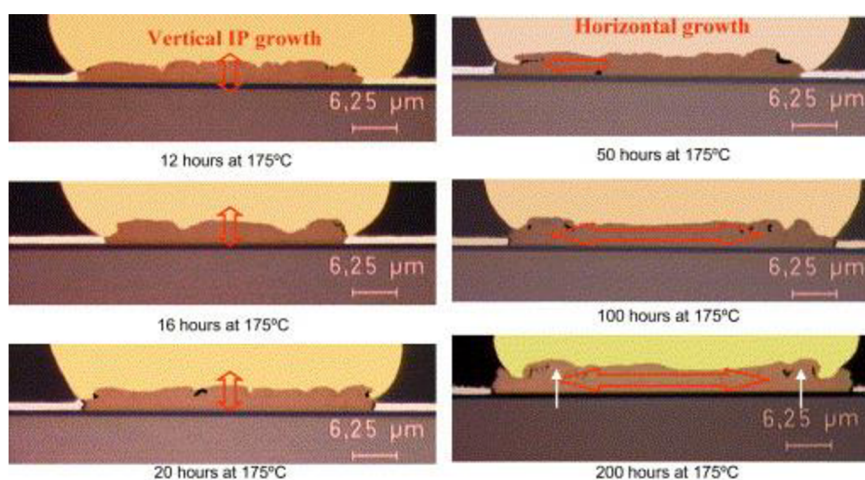
V technické praxi se vyskytuje obrovské množství jak desek plošných spojů, tak i pájecích zařízení, či samotných pájecích past. Pro každé zařízení i každý jiný tvar DPS by měl být optimalizován teplotní profil. Optimalizací teplotního profilu je myšlena úprava parametrů pájecího zařízení, tak aby teplotní profil co nejvíce odpovídal minimálnímu teplotnímu profilu, který udává výrobce konkrétních pájecích past. Čímž je docíleno kvalitního procesu montáže a minimalizace výskytu počtu defektů. Aby bylo možné teplotní profil optimalizovat, je nutné, aby byl ohřev pájené oblasti DPS homogenní, tedy aby teplo dodávané pájené oblasti DPS bylo ve všech bodech stejně velké. Tento fakt je u ohřevu pomocí infračervených zářičů poněkud zavádějící. Součástky mají totiž kvůli různým barvám a materiálům různě velké absorpční schopnosti infračerveného záření, čímž se nerovnoměrně zahřívají. Je nezbytné tedy uvažovat homogenitu tepla vyzářeného, nikoliv absorbovaného. Jestliže je homogenita ohřevu dostatečná, je možné dále optimalizovat profil. K vytvoření nového, či optimalizaci již vytvořeného teplotního profilu je potřeba znát ideální teplotní profil udávaný výrobcem pro konkrétní pájecí pasty. Pro optimalizování je nezbytné použití profiloměru a termočlánků, které se k profiloměru připojují. Díky těmto komponentám lze teplotní profil zaznamenat, vyhodnotit a následně provést nezbytné korektury vedoucí k dosažení ideálního teplotního profilu. [3]

Profiloměr je elektronické zařízení, které vyhodnocuje teplotu měřenou termočlánky. Z těchto naměřených údajů lze pomocí softwaru dodávaného s profiloměrem sestavit samotné teplotní profily. Pro získání co nejpřesnější hodnoty teploty je nutné připevnit termočlánky co nejpečlivěji k DPS. Termočlánků se zpravidla umísťuje více například na vrchní (top) stranu a spodní (bottom) stranu DPS, dále je vhodné sledovat teplotu důležitých součástek. Například při optimalizaci teplotního profilu pro montáž či demontáž pouzdra je vhodné sledovat i teplotu pod pouzdrům (v oblasti vývodů), což lze provést například provrtáním substrátu a vložením termočlánku do oblasti vývodů skrz substrát. Tato metoda je však destruktivní a může být v některých případech komplikována substrátem DPS. Při použití křehkých materiálů, jako je například korundová keramika, je vrtání značně komplikované a technicky náročné. Následně se vyhodnotí profil, zda byly dodrženy hodnoty rychlosti chladnutí teploty, teplota přetavení konkrétní pájecí pasty a časy trvání jednotlivých částí teplotního profilu. Jestliže se hodnoty parametrů pohybují mimo stanovený rozsah, je nutné upravit teplotní profil, například zvýšením teploty v určité fázi profilu či prodloužením doby trvání konkrétní fáze. Kontrola kvality pájeného spoje je prováděna opticky, elektricky, rentgenovým zářením, či mikrovýbrusem. [6]

Při optimalizaci teplotních profilů je sledovanou proměnou technologické okno. Jde o grafické znázornění teplot průběhu teplotního profilu, které je vertikálně orientované a popisuje jednotlivé části profilu jako je například pracovní část, tedy oblast teplot kdy dochází k aktivaci tavidla, část určená k přetavení pájky a část, kde již dochází k destrukci pájené součástky. V podstatě se jedná o rozmezí teplot, které jsou dosahovány v jednotlivých úsecích profilu. Šířkou technologického okna je myšlen rozptyl hodnot od začátku aktivace tavidla po maximální dovolenou teplotu, která nebude mít za následek destrukci součástek. Při srovnání šířky technologického okna olovnaté a bezolovnaté pájky lze vidět značně menší technologické okno v případě bezolovnaté pájky. Tento fakt je dán hlavně vyšší teplotou tavení bezolovnaté pájky, s čímž souvisí maximální dovolená teplota profilu, která je zhruba o 30 vyšší. Při následné optimalizaci je obtížnější splnit požadavky na minimální doporučený teplotní profil v případě menšího technologického okna. [7] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

1.5 Chlazení

Pro tuto práci bude stěžejní částí teplotních profilů právě chlazení. Právě chlazení má na kvalitu pájeného spoje nepopíratelný vliv. Díky němu je možné například zkrátit časovou prodlevu nad teplotou tavení pájky, čímž dojde ke zmenšení namáhání pájené součástky. Dalším zásadním důvodem proč je nutné kontrolovat rychlost chlazení je vznik vrstviček intermetalických sloučenin na rozhraní pájky a pájecí plošky. Rychlost růstu těchto vrstev je velice výrazně závislá na teplotě, případně na době působení zvýšené teploty (viz. Obrázek 1.2: Růst vrstvy intermetalických sloučenin s rostoucím časem (převzato z [9]). Z tohoto důvodu je žádoucí minimalizovat špičkovou teplotu pájeného spoje a zajistit co nejrychlejší zchlazení zpět na normální teplotu. Tyto vrstvy mohou pájený spoj oslabit jak mechanicky, tak i elektricky. Rychlost chlazení však nesmí být příliš velká. Pokud by rychlost chladnutí překročila zhruba 6°C/s mohly by se začít vyskytovat mikroprasklinky jak na pájených spojích, tak i na pouzdech či DPS samotné. Poškodit by se mohli také prokovy a mikropropoje. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že růst intermetalických vrstev nikdy nezastavíme úplně, můžeme však minimalizovat následky tohoto jevu. [7]

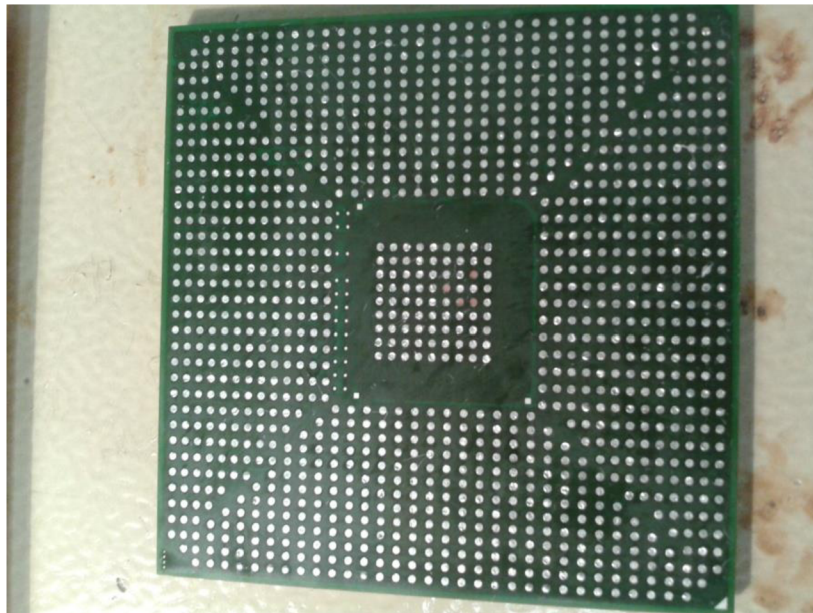


Obrázek 1.2: Růst vrstvy intermetalických sloučenin s rostoucím časem (převzato z [9]).

Tím že použijeme aktivní chlazení, lze minimalizovat i nebezpečí vzniku takzvaného „popkornového“ defektu čipů a pouzder, ke kterému dochází vlivem absorpce vlhkosti do materiálu pouzdra. Tato vlhkost se po přetavení obvodu začne vypařovat a dojde k „vypoulení“ části pouzdra. V případě že tento defekt zasáhne například místo, kudy vede kontaktní mikrodrátek, dojde k omezení funkčnosti celého integrovaného obvodu. [7]

2 POUZDRA BGA

Vnitřní struktury BGA (Ball Grid Array) pouzder jsou značně náchylné k mechanickému a chemickému poškození. Poškozeny mohou být jak samotné, čipy tak i propojovací mikrodrážky, kterými mohou být kontaktovány pájecí plošky. Tomuto poškození lze zabránit zapouzdřením celé struktury do pouzder. Pouzdra BGA jsou v dnešní době velice používaná a existuje celá řada provedení pouzder, liší se však hlavně druhem nosného substrátu. Základním principem BGA pouzder je jejich vývodové pole na spodní straně. V podstatě je celá spodní strana určena vývodům, které jsou realizovány pájkovými kuličkami. Výsledkem umístění obvodů na spodní stranu je velké množství vývodů při zachování příznivých rozměrů v porovnání s pouzdry, které mají vývody po stranách. V porovnání s těmito vývody mají pouzdra BGA při stejném počtu vývodů větší rozteče mezi vývody.



Obrázek 2.1: Vývodové pole BGA pouzdra.

Při pájení lze pozorovat takzvaný efekt samovystředění, který je u tak precizních součástek, jako jsou BGA velice užitečný. Jeho podstata spočívá v tom, že roztavená pájka má určité povrchové napětí, kterým je součástka vystředěna přesně na pájecí plošky. Z toho plyne, že nevelké odchylky vzniklé při usazování součástky do prstovitého tavidla jsou tímto efektem potlačitelné.

Pouzdra BGA se používají převážně pro realizaci výkonných obvodů s mnoha vývody, jako jsou například grafické procesory či mikroprocesory. Vývodové plošky, na kterých je realizován pájený spoj, mají 0,8 násobný rozměr vůči průměru použité kuličky. Po přetavení a zapájení pouzdra se v některých případech přistupuje k vyplnění prostoru pod pouzdem a mezi kuličkami speciálním materiálem (tzv. uderfill), který má za úkol mechanicky a chemicky chránit pájený spoj, zlepšit tepelnou vodivost mezi pouzdem a DPS dále pak zmírňuje dopady rozdílných teplotních roztažností. Kvůli

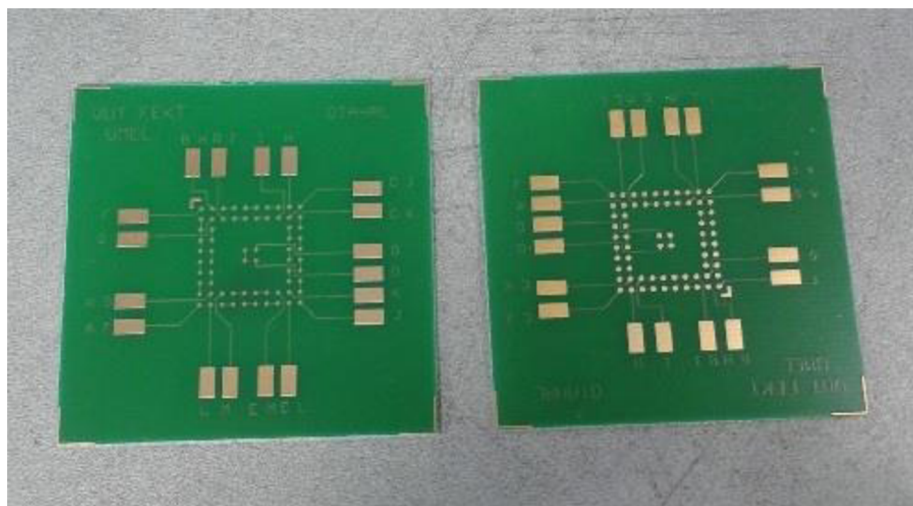
vývodům umístěným na spodní straně, je pouzdra BGA možné pájet pouze bezkontaktními metodami. Tento fakt částečně platí i u QFN pouzder, avšak pokud u nich plošky přesahují na boční hranu a není nutné pájet středovou elektrodu, je možné sáhnout i po kontaktních metodách pájení. Použití BGA pouzder je kvůli jejich vyšší ceně spojeno s vyššími výrobními náklady, díky jejich konstrukci však lze uspořit velké množství místa. Tato úspora místa se projeví již při použití obvodů s více jak 16 vývody. Navíc v BGA pouzdru může být umístěno i více čipů. V technické praxi byla také vyzkoušena možnost montovat do těchto pouzder polovodiče v provedení FlipChip. Pokud bychom se shrnout výhody BGA pouzder oproti pouzdrům s páskovými vývody bude tento výčet obsahovat úsporu místa, lepší manipulaci a snížené nebezpečí poškození, lepší elektrické vlastnosti (chlazení), možnost využívat konvenční zařízení pro montáž a možnost umístit více čipů do jednoho pouzdra. [11]

3 MATERIÁLY PRO SUBSTRÁTY DPS

Základní stavební kámen všech elektronických obvodů tvoří speciální materiály nazývané substráty. Na substráty jsou kladeny specifické požadavky, například na tepelnou vodivost, chemickou odolnost, teplotní roztažnost, povrchovou vodivost, povrchovou rovinnost, cenu a další. O použití konkrétního substrátu se rozhoduje již při návrhu obvodu a volí se podle cílové aplikace, kde bude použit a v neposlední řadě záleží na ceně. Levné substráty se často používají při výrobě levných výrobků. Tyto levné substráty se vyznačují značně horšími vlastnostmi oproti dražším a kvalitnějším materiálům. Výrobci, kteří chtějí kvalitu a spolehlivost výrobků udržet na dobré úrovni využívají právě ony kvalitnější substráty. Největší ohled na kvalitu a vlastnosti substrátů se bere ve specializovaných aplikacích určených například pro zdravotnictví či armádu. V následující podkapitole budou popsány dva substráty, které byly použity při experimentech v rámci této práce. [12]

3.1 FR4

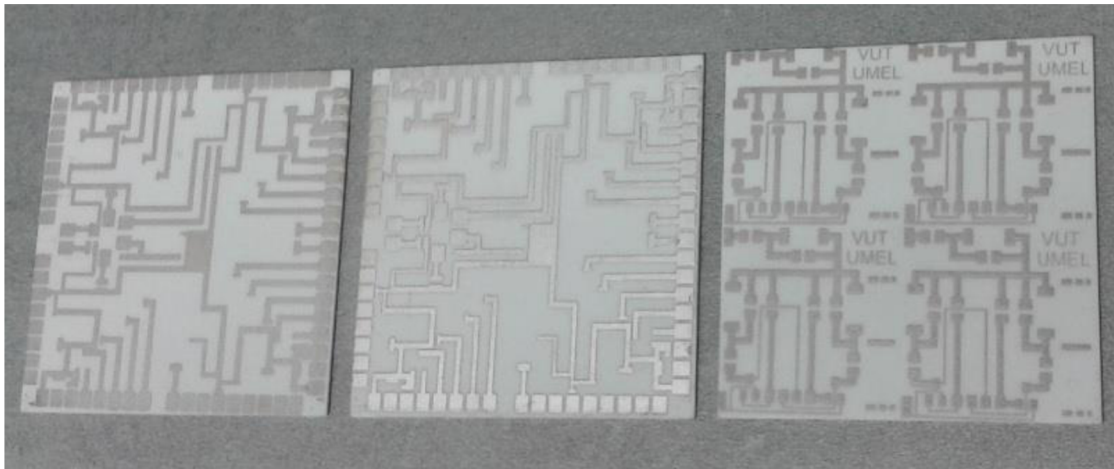
V současné době se jedná o jeden z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu DPS. Jedná o skelnou tkaninu, která je vytvrzována epoxidovou pryskyřicí, na kterou je následně elektrolytickým nanášením vytvořena měděná vrstvička, která se vyznačuje velmi dobrou čistotou Cu (99,5%). Lze Tento materiál se vyznačuje přijatelnými vlastnostmi jak mechanickými tak i chemickými. Materiál má výborný poměr mezi výrobními náklady a výslednými vlastnostmi DPS. Umožňují například vytváření vícevrstvých DPS. Specifické parametry tohoto materiálu budou popsány v tabulce Tabulka 3.1 společně s vlastnostmi korundové keramiky, jež se vyskytuje v praktické části této práce. [11][10]



Obrázek 3.1: Substrát FR4.

3.2 AL2O3

Tento materiál určený k výrobě substrátů pro DPS není již tak masově používán jako FR4. Správný název je korundová keramika a je využívána při výrobě obvodů například tlustovrstvou technologií. Tímto způsobem jsou vyráběny obvody, na které jsou kladeny speciální požadavky a nacházejí tak využití například v armádním, zdravotnickém či kosmickém průmyslu. Využívají se také hojně například k výrobě mikrosenzorů a mikrosenzorových systémů. Materiál je specifický svojí malou mechanickou pružností, velkou křehkostí. Navzdory tomu má však velice dobré elektrické a tepelné vlastnosti, jeho povrchová rovinnost je také na dobré úrovni. Do tohoto materiálu je poměrně složité vrtání otvorů, čímž nastává komplikace při nutnosti použití vývodových součástek, ty však bývají nahrazovány již zmiňovanou tlustovrstvou technologií.



Obrázek 3.2: Substrát AL3O3 (korundová keramika).

3.3 Srovnání substrátů

Z tabulky Tabulka 3.1 lze provést srovnání materiálů, ze kterých jsou vyrobeny substráty, které byly použity při měření v praktické části práce. Z hlediska pájení a optimalizace teplotních profilů pro nás má velký význam zejména tepelná vodivost, která u korundové keramiky je na velmi vysoké úrovni oproti substrátu FR4. Tepelná vodivost má velký význam především na rychlosti náběhu a poklesu teplot. Rychlost náběhu není příliš ovlivňována, jelikož je závislá na tepelné energii dodávané zářiči, avšak rychlost chlazení je díky tepelné vodivosti značně velká. Také při porovnání součinitelů teplotní roztažnosti vykazuje korundová keramika lepší vlastnosti. Čím menší je tento součinitel, o to méně dochází k namáhání pájkových spojů i vývodů jako takových. Srovnáme-li maximální použitelné teploty obou těchto materiálů, opět vítězí korundová keramika, kterou lze používat až do teplot 1150°C, z toho plyne, že i při vystavení vysokým teplotám nedochází k zásadnímu poškození substrátu.

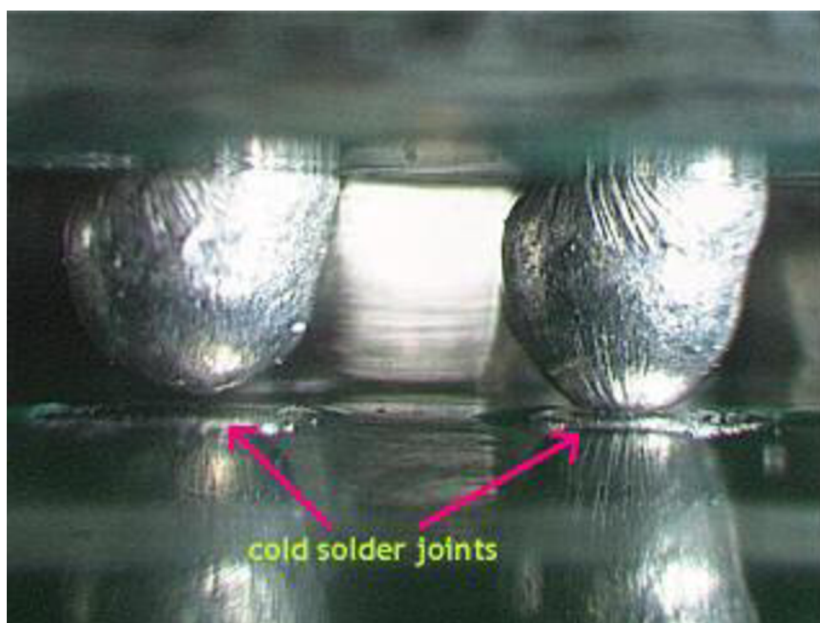
Tabulka 3.1: Srovnání vlastností FR4 a Al₂O₃ (korundové keramiky) [12][13]

Parametr	FR4	Korundová keramika
Tepelná vodivost [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,23	18,36
Součinitel teplotní roztažnosti [$\text{ppm}\cdot\text{K}^{-1}$]	13/60	6,4
Maximální použitelná teplota [$^{\circ}\text{C}$]	130	1550
Měrný odpor [$\Omega\cdot\text{mm}$]	$8\cdot 10^{13}$	$7\cdot 10^{13}$
Tangenta ztrátového činitele [%]	1,9 (1MHz)	0,55 (100MHz)
Relativní permitivita ϵ_r	4,7	9

4 DEFEKTY VZNIKAJÍCÍ PŘI PÁJENÍ

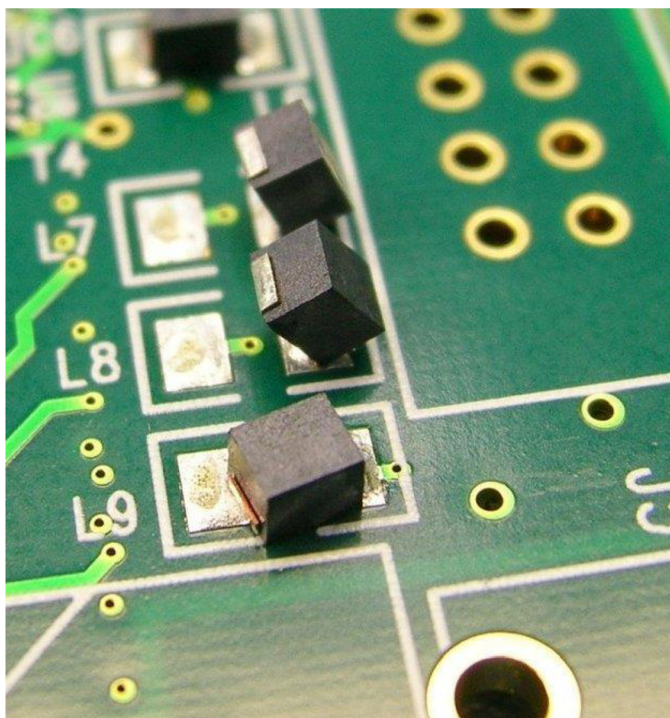
Proces pájení využívá značné množství chemických, tepelných i mechanických jevů, čímž se značně komplikuje. Nesprávně zvoleným postupem může nastat značné množství nejrůznějších defektů, které vznikají jak nesprávnou volbou tavidla, teplotního profilu, nástroje či třeba samotné pájky.

Jedním z nejznámějších defektů je takzvaný studený spoj. S tímto defektem se lze setkat nejčastěji při ručním pájení, to však není podmínkou a studený spoj lze pozorovat v souvislosti s mnoha dalšími pájecími metodami. Jak již plyne z názvu, podstatou studeného spoje je nedostatečné prohřátí obou pájených kontaktů. Studený spoj lze poznat tak, že nedošlo k nevzlínání pájky na oba kontakty a vytvořila se tak kulička pájky. Mechanická i elektrická vazba kontaktů prostřednictvím tohoto spoje je velmi malá či spíše žádná a v drtivé většině případů vede k následné nefunkčnosti pájeného zařízení. Studený spoj lze velice snadno odstranit opětovným dostatečným prohřátím, v případě BGA pouzder je tento defekt odstranitelný reballingem. [14]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obr. č. 4.1: Studené spoje (převzato z [10]).

Četnost používání SMD součástek v elektrotechnické praxi v kombinaci s bezkontaktní metodou pájení dostává do popředí defekt, jehož diagnostikování je velmi snadné a nazývá se tombstoning. Na rozdíl od studeného spoje zde totiž nedochází k žádnému elektrickému propojení a výrobek se okamžitě jeví jako nefunkční. Tombstoningu lze zabránit osazováním SMD součástek do lepidla, což však zvyšuje výrobní náklady a výrobní dobu. Jestliže nejsou součástky přilepeny a na pájecích ploškách není nanášeno stejné množství pájecí pasty, dojde vlivem povrchového napětí roztavené pájky ke vztyčení jedné strany součástky, což vede k nevytvoření pájeného spoje. Oprava spočívá v demontáži součástky, očištění pájecích plošek a osazení novou součástkou. [14]



Obr. č. 4.2: Tombstone defekt (převzato z [16]).

Při pájení pouzder BGA lze také pozorovat značné množství defektů. Jejich diagnostikování je poněkud obtížnější než u SMD technologie či dokonce vývodových součástek. Tento fakt je dán konstrukčním provedením BGA pouzder, zvláště pak vývody po celé spodní ploše pouzdra. I pouhou kontrolu kvality jednotlivých kuličkových spojů je nutné provádět specializovanými technologiemi, například využitím rentgenového záření je možné kontrolovat spoje i ve středové části vývodového pole. Jednoduší je optická kontrola, která se provádí pouze u kuličkových spojů na okrajích vývodového pole. Opticky lze také například pozorovat, jestli není pouzdro nějak pokrivené a sedí na spojích rovnoměrně, tak jak má. Tento jev kdy je pouzdro usazeno s určitým sklonem vůči DPS může vzniknout při nepřesném dávkování pájecí pasty, do které jsou usazovány pájkové kuličky, nebo při nedostatečném očištění pájecích plošek v procesu nazývaném reballing (viz kapitola 5). Stane se v podstatě to, že na jedné straně pouzdra bude více pájky, než na straně druhé. Může tím dojít ke špatnému, či v extrémním případě dokonce k žádnému, zapájení kuliček, čímž je oslaben pájený spoj a dochází ke snižování spolehlivosti a kvality. Jako jedna z kontrolních metod se u BGA pouzder využívá takzvaný jev dvojitého poklesu, který nastává po roztavení a nevzlínání veškeré pájky tvořící výsledný pájený spoj. Jestliže k tomuto poklesu nedojde, je velice pravděpodobné, že nebyly všechny kuličky dostatečně prohřáté a neprošly přetavením. U velkých pouzder s vývody na spodní straně je velmi podstatný rozdíl teplotních roztažností. Jelikož je velká plocha osazena drobnými vývody, může mít rozdílná teplotní roztažnost pouzdra, pájkových kuliček a substrátu za následek velké pnutí, které vzniká na spoji, ve kterém se vlivem toho mohou tvořit prasklinky a dochází k degradaci. Předpokladem pro správný průběh montáže a demontáže pouzdra BGA je teplotní rozdíl mezi protilehlými rohy pouzdra. Tento rozdíl by neměl překročit 10°C (5°C pro bezolovnatou pájku). Tento požadavek je při využití ohřevu infračerveným zářením v drtivé většině případů splněn díky

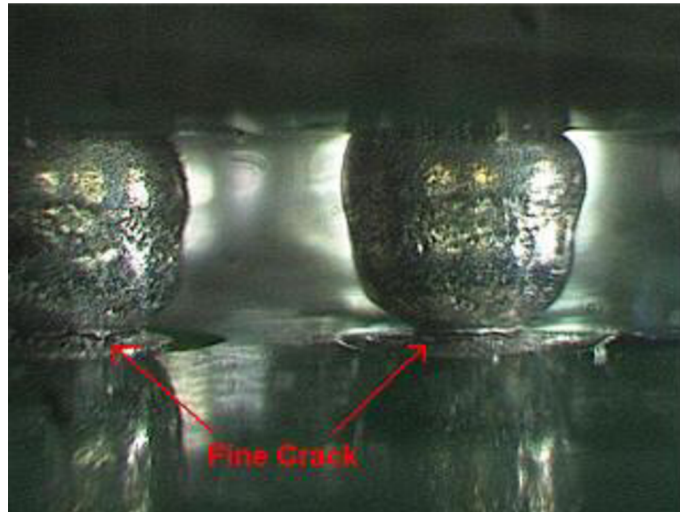
homogenitě ohřevu materiálů stejné barvy. Vlivem příliš rychlého chlazení může také docházet k deformaci pájkových kuliček, v extrémním případě může také vlivem teplotní roztažnosti dojít k odtrhnutí pájecí plošky od substrátu. [16]

Zavedením bezolovnaté pájky se kvůli její horší smáčivosti začal stále více objevovat defekt, který je v anglické literatuře nazýván „Head in pillow“ případně „Ball and socket“. Tento defekt se vyskytuje pouze u pouzder připojovaných pomocí pájkových kuliček a vzniká v případě, že roztavená pájka smočí pájecí plošku avšak kuličku již ne. V podstatě se vytvoří dvě deformované kuličky, k vytvoření slabého elektrického spojení sice dojde, ale mechanická pevnost je tak slabá, že při menším mechanickém pnutí dochází k poškození spoje. Odhalení této poruchy je značně ztíženo faktem, že dojde k vytvoření elektrického spojení, k diagnostikování lze tedy použít optickou nebo rentgenovou inspekci. Po identifikaci tohoto defektu je oprava již snadná, stačí, aby pájený spoj byl opětovně důkladně prohřátý a došlo ke smočení obou kuliček. Do jisté míry je zde podobnost se studeným spojem, který se vyskytoval u vývodových a SMD součástek. [1]

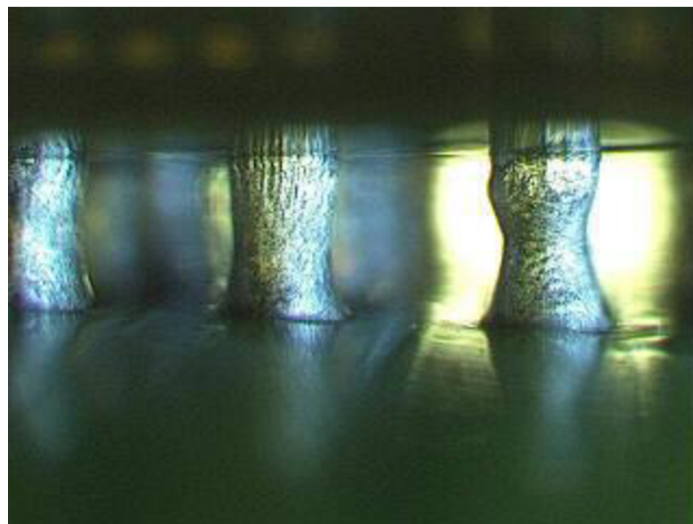


Obrázek 4.1: Head in pillow defekt (převzato z [1]).

Při montáži BGA pouzder se vyskytují i takzvané „cracky“ (viz Obrázek 4.2: BGA crack (převzato z 36[10])) jedná se v podstatě o praskliny na pomezí pájecí plošky a pájkového vývodu. K tomuto defektu dochází při mechanickém namáhání pájeného spoje. Toto namáhání může být způsobeno například rozdílnými teplotními roztažnostmi. Vlivem nanesení příliš velkého množství pájky mohou vznikat defekty zvané v anglické terminologii jako „bridge“. Jak již sám název napovídá, jedná se o zkratky mezi jednotlivými vývody. Defekt může vznikat také v důsledku působení zbytků neodpařeného tavidla. Naopak při nanesení příliš malého množství pájky, může docházet k vytvoření již zmiňovaného studeného spoje. Jestliže je pájky takové množství, aby navzlínala na oba kontakty, avšak není jí dostatek, dochází k deformaci (viz Obrázek 4.3: Deformovan pájkový spoj (převzato z [10]).) pájkového spoje. Tento defekt také může být způsoben nerovnoměrnou vzdáleností pouzdra a DPS. 37[17]



Obrázek 4.2: BGA crack (převzato z 36[10]).



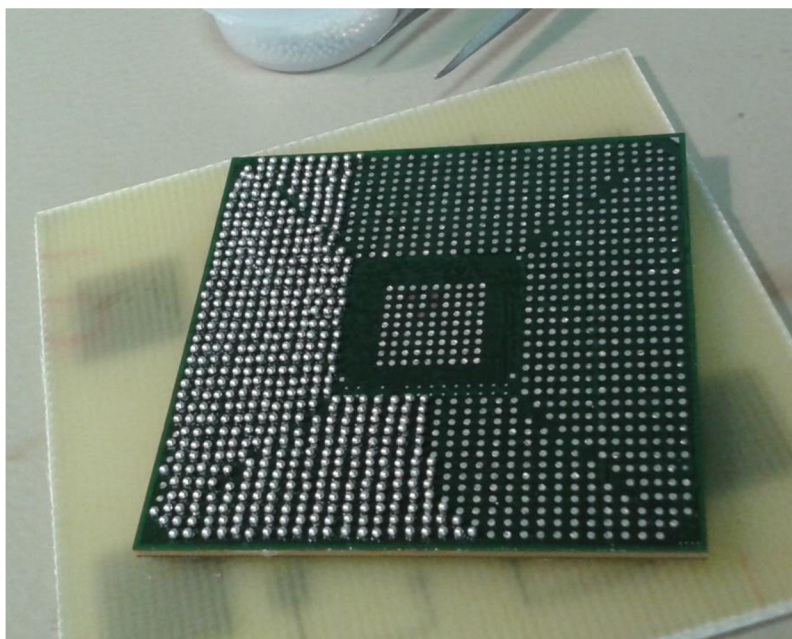
Obrázek 4.3: Deformovan pájkový spoj (převzato z [10]).

5 „REBALLING“ BGA POUZDER

Jedná se o způsob opravy defektů na kuličkových spojích BGA pouzder. Tento proces je značně technologicky náročný, ale defekty odstraní relativně spolehlivě. Princip reballingu je velice jednoduchý a spočívá v opětovném zapájení pouzdra BGA. Prvním krokem je odstranění pouzdra z DPS. To lze provést například na Opravárenské stanici IR-400 (viz kapitola 6), která je k tomu velmi dobře vybavena. Při demontáži pouzdra není zcela nezbytné sledovat průběh teplotního profilu. Jedinou podmínkou je aby se pájka roztavila, tedy aby teplota překročila 217 °C v případě bezolovnatou a 183°C olovnaté pájky, k čemuž dobře poslouží lineární teplotní profil (viz kapitola 1.1).

Existuje několik metod reballingu. Námi prováděná metoda reballingu spočívá v ručním osazování pájkových kuliček do pastovitěho tavidla, či pájecí pasty. Nejčastěji se však využívá způsob osazení pájkových kuliček pomocí šablony, díky které je osazování mnohonásobně zrychleno a je menší pravděpodobnost výskytu defektů.

Prvním krokem při reballingu je oddělení pouzdra od DPS. Po oddělení obou částí je nutné z oblasti vývodů odstranit všechnu přebytečnou pájku a veškeré další nečistoty vzniklé při původní montáži či aktuální demontáži pouzdra. Je nutné nanést, ještě před započítím odstraňování přebytečné pájky, tavidlo, které bude napomáhat lepší smáčivosti pájky. Odstranění pájky je realizovatelné pomocí kontaktních metod, například pomocí minivlny či plochého nástroje upevněného místo pájecího hrotu. Těmito nástroji je následně přebytečná pájka odstraněna z oblasti vývodů. Úroveň odstranění pájky těmito nástroji není však dostatečně velká a je tedy nutné použít měděný knot, na který následně poslední zbytky pájky navzlínají. Stejný postup odstranění přebytečné pájky musí být aplikován i na DPS. Při odstraňování přebytečné pájky je nutné dbát velké opatrnosti, zvláště pokud je použita bezolovnatá pájka. To totiž zvyšuje teplotu potřebnou k roztavení pájky, která při neopatrnosti může poškodit čip jako takový, či může dojít k poškození či dokonce odtržení pájecích plošek. Degradace plošek vede k nevratnému poškození pouzdra, které již dále nemůže pracovat. Po odstranění veškeré pájky se provádí čištění Isopropylalkoholem od tavidlových zbytků.



Obrázek 5.1: BGA pouzdro po očištění a částečném osazení pájkovými kuličkami (pájkové kuličky jsou v levé části).

Po očištění pouzdra je nutné osadit plošky pájkovými kuličkami. Při ručním osazování je třeba dbát co největší pečlivosti a umisťovat kuličky co nejpřesněji na střed pájecích plošek. Jak je vidět na obrázku Obrázek 5.1, kuliček je většinou nutné osadit velké množství, což zvyšuje pravděpodobnost výskytu defektu. Nejčastěji se však v průmyslu osazování kuliček provádí pomocí vakuové hlavy a speciální šablony, přes kterou jsou kuličky vakuem přidržovány. Nejčastěji je tento způsob kombinován s usazováním do tavidla. Jestliže již jsou kuličky přichyceny hlavou, mohou být ponořeny z části do tavidla, následně přeneseny nad čip a tam usazeny. Tímto způsobem dochází k nanesení tavidla pouze na nezbytně nutná místa, což představuje úsporu materiálu. Je také možnost nanášet tavidlo pomocí šablonového či sítotisku, kdy jsou touto metodou vytvořeny jakési tavidlové ostrůvky, do kterých jsou kuličky osazovány pomocí vakuové hlavy. Tyto metody vyžadují tvorbu speciálních šablon, které mají od výroby neměnný tvar. Tento fakt sebou nese nutnost používat na každé vývodové uspořádání jinou šablonu. Mnohonásobně větší variabilitou vyniká systém nanášení lepidla dispensorem. Ten dávkuje tavidlo bod po bodu, je snadno přeprogramovatelný, ale jeho rychlost není taková jako je tomu například u šablonového tisku.

Uchycení kuliček na vakuovou hlavu může být realizováno dvěma metodami. Používá se nádobka, do které jsou kuličky nasypány, tato nádobka je následně vakuovou hlavou uzavřena. Po otočení obou spojených částí jsou kuličky fixovány na požadovaných místech, jsou obě části otočeny do původní polohy a na hlavě zůstanou pouze požadované kuličky. Existuje také způsob, kdy se kuličky vznášejí v inertním plynu a jsou vakuovou hlavou zachyceny a fixovány bez nutnosti otáčet s hlavou.

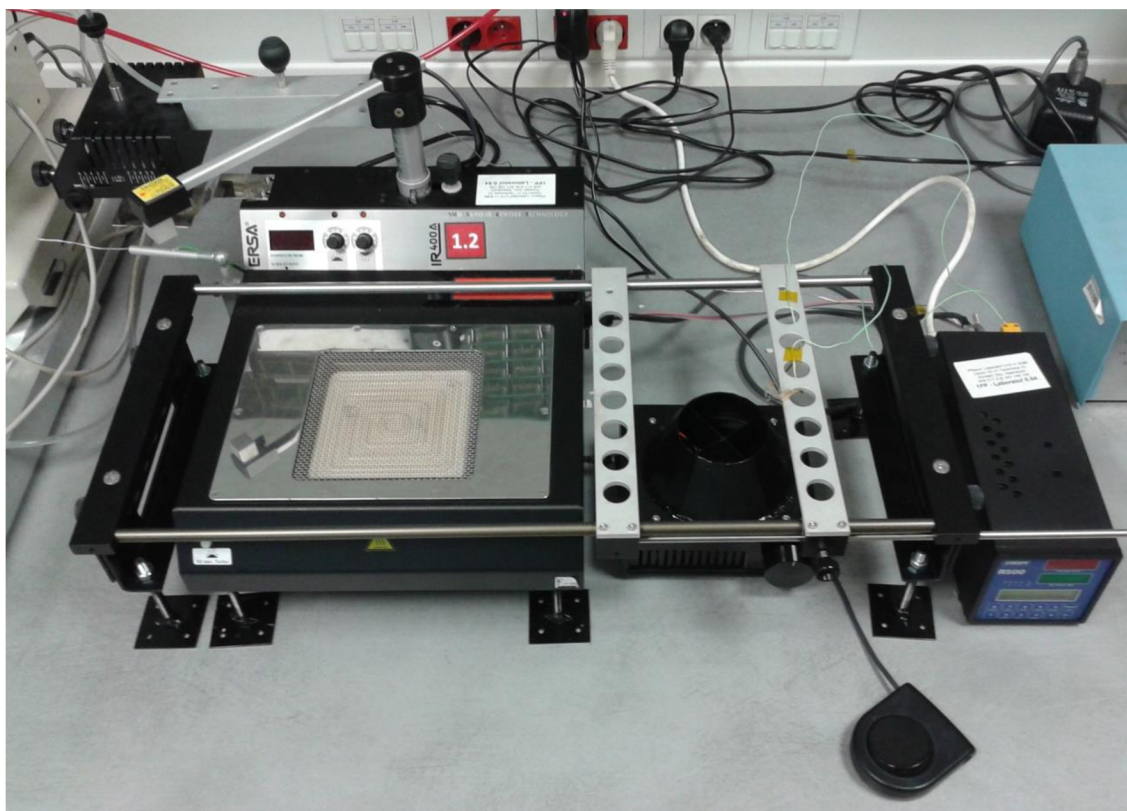
BGA pouzdro osazené kuličkami se nechá projít teplotním profilem, aby došlo k vytvoření kulovitých vývodů a bylo možné poté pouzdro připájet k DPS. Pouzdra, s již vytvořenými vývody jsou strojově přesně usazena na DPS, která je ošetřena pastovitým tavidlem, a následně dojde k přetavení a zapájení celého pouzdra. V technické praxi je zvykem označovat pouzdra, která byla reballována a otestována

žlutou tečkou, která usnadňuje identifikaci od sériových pouzder.

Kvůli výše zmíněným faktorům je lepší a efektivnější využít k rebelování speciální šablony, díky kterým jsou kuličky přesně usazeny během zlomku času oproti ručnímu osazování. Použití šablon navíc nahrává velice špatně proveditelné ruční osazování pájkových kuliček, které mají průměr menší než 0,5mm.

6 ZAŘÍZENÍ IR-400

Jedná se o výrobek firmy Erska, konkrétně o opravárenskou stanici Erska IR-400. Tato stanice je vybavena k demontáži a montáži vývodových pouzder jako jsou například BGA, QFN, PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier), QFP (Quad Flat Package) a dalších. Je možné provádět však i SMD montáž. Nejdůležitější částí celé stanice jsou bezesporu zářiče infračerveného záření, které emitují infračervené záření o vlnové délce 2-8 μ m. Toto záření spadá do oblasti střední vlnové délky a je označováno jako tmavé infračervené záření.



Obrázek 6.1: Opravárenská stanice Erska IR-400.

Stanice využívá dvou těchto zářičů, první je fixně umístěn v základně a zahřívá spodní stranu opravované DPS. Druhý zářič se nachází ve speciální hlavě, která je umístěna na otočném rameni, které je také výškově nastavitelné. Tento horní zářič je stíněn čtyřmi posuvnými ocelovými plechy, které omezují působení záření na součástky, nacházející se v okolí demontovaného pouzdra. Ohřívání těchto součástek je nežádoucí, zvláště jedná-li se například o elektrolytické kondenzátory nebo další součástky náchylné k poškození důsledkem působení vysokých teplot. Součástí horního otočného ramena je také laserový zaměřovač, sloužící k vystředění demontované součástky vůči zářičům. Celé otočné rameno se může nacházet ve třech polohách. První poloha je označována jako pohotovostní stav a rameno nesoucí hlavu se zářičem je v rovnoběžné pozici vůči ovládacímu panelu. Druhým stavem je stav zaměření středu součástky, v tomto okamžiku se využívá již zmíněného laserového zaměřovače k vystředění demontovaného pouzdra. V tomto stavu svírá rameno nesoucí hlavu se

zářičem úhel 45° vůči ovládacímu panelu. Poslední je pracovní stav, kdy dochází k samotnému procesu demontáže či montáže. Úhel, který svírá rameno se zářičem s ovládacím panelem je 90°. Ve středu horního zářiče je vyvedena vakuová pipeta, která slouží k uchycení demontovaného pouzdra a jeho následnému odstranění z DPS. Tato pipeta je ovládána speciální myší, která se zapojuje na zadní straně stanice. Pro dobré přilnutí pipety k povrchu pouzdra a dostatečné přídržné síle je konec pipety opatřen silikonovou přísavkou. Pipetu lze použít dvěma způsoby. První možnost je přisát ji k pouzdru hned na začátku procesu nahřívání, přičemž silou pružiny, kterou je pipeta vybavena, dojde ihned po roztavení pájky k samovolnému oddělení pouzdra od DPS. Druhý způsob spočívá v přisátí pouzdra v momentu, kdy je na DPS taková teplota, která zaručuje, že je pájka roztavená a lze tedy pouzdro demontovat.



Obrázek 6.2: Demontované pouzdro přisátě na vakuové pipetě.

Opravovaná deska je uchycována do dvou rámu, které jsou umístěny na výškově nastavitelném stolku a lze je posouvat do stran. Fakt, že lze výškově nastavit jak stolec, tak i horní otočné rameno s infračerveným zářičem, poskytuje možnost optimalizovat teplotní profily, kterým jsou opravované DPS vystavovány. Samotné výškově nastavitelné komponenty by však k dostatečné optimalizaci nevedly. Změnou výšky otočné hlavy či stolku lze sice upravovat rychlost nárůstu teploty, ale jednotlivé sekce sedlového teplotního profilu takto vytvořeny být nemohou. Klasický a optimální teplotní profil je nastavován a korigován pomocí zařízení, kterým standardně tyto stanice nedisponují. Tímto zařízením je regulátor R500.[18]

Regulátor R500 (Obrázek 6.3) je vyroben firmou SMART ,spol s.r.o. a jedná se o čtyřpásmový programovatelný regulátor, jehož primárním určením je pomocí elektromechanických stykačů, polovodičových relé, nebo proporcionalních výkonových členů řídit odporové pece či jiné soustavy. Regulátory jsou dodávány jako dvou či čtyřpásmové, přičemž jednotlivé vstupní pásma mohou využívat rozdílných vstupních čidel (termoelektrické články, odporové teploměry nebo čidla s proudovým výstupem) a jsou navzájem galvanicky oddělena.

Regulátor je ovládaný pomocí dvanácti tlačítkové klávesnice a veškeré údaje jsou

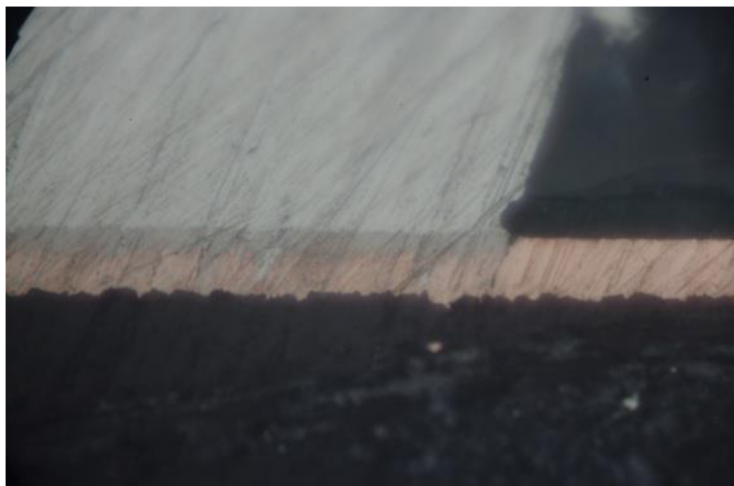
zobrazovány pomocí šestnácti znakového podsvíceného LCD displeje a dvou čtyřmístných LED displejů. Regulátor je vybaven nezávislou pamětí, kde jsou uchovány teplotní profily, které lze ručně upravovat a spouštět. Použitím tohoto regulátoru, který umožňuje poměrně přesné nastavení teplotních profilů, v kombinaci se stanicí IR-400 odpadá nutnost řídit stanici ručně pomocí potenciometrů na ovládacím panelu na těle stanice. [18]



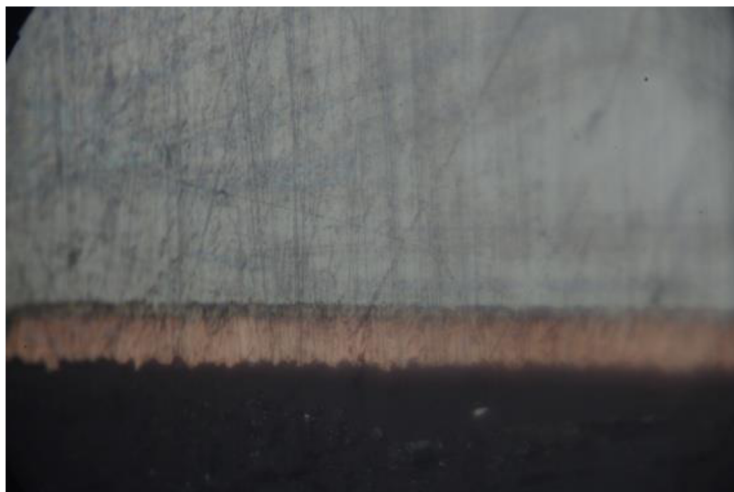
Obrázek 6.3: Čelní pohled na regulátor R500.

7 CHLADÍCÍ MODUL

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5, rychlost chlazení má zásadní vliv na kvalitu pájeného spoje. Opravárenská stanice IR-400 byla již před zahájením této práce vybavena chladícím prototypem, jehož funkce byla v rámci semestrálního projektu dokázána pomocí mikrovýbrusů a měření mocnosti intermetalických vrstev (Obrázek 7.1 a Obrázek 7.2).



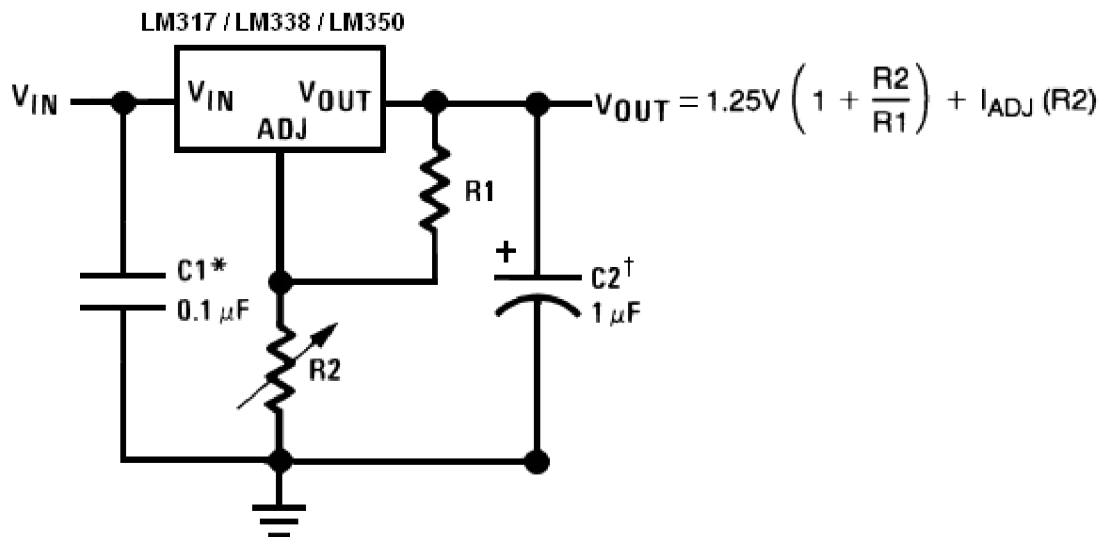
Obrázek 7.1: Mikroskopický záběr mikrovýbrusu s pozorovatelnou vrstvou intermetalických sloučenin (bez chlazení, olovnaté pájecí kuličky).



Obrázek 7.2: Mikroskopický záběr mikrovýbrusu s pozorovatelnou vrstvou intermetalických sloučenin (s chlazením, olovnaté pájecí kuličky).

7.1 Modul chlazení

Původní prototyp modulu chlazení (viz Obrázek 7.4) nebyl schopen dostatečně usměrnit proud vzduchu na chlazený vzorek, proto se přistoupilo k výrobě nového chladicího modulu, který by vykazoval lepší chladicí vlastnosti. Pro lepší tok vzduchu byl nový modul osazen nastavcem kuželovitého tvaru. Tím se však celý modul značně zvýšil a bylo nutné celou opravárenskou stanici umístit výš o zhruba 10 cm, což bylo provedeno usazením stanice i stolku na ocelové nohy. Stanici IR-400 i nový chladicí modul vybaven kuželovitým nastavce je zobrazen na Obrázek 7.5. Při prvních testech modulu s nastavcem se ukázalo, že v nastavci dochází k víření vzduchu, čímž byl jeho průtok velmi výrazně omezen, takřka potlačen úplně. Do nastavce byly instalovány vnitřní příčky, které víření potlačili natolik, že se tok vzduchu vrátil do normálního stavu. Již původní modul chlazení byl vybaven regulací otáček, která se prováděla pomocí potenciometru. Potenciometr byl připojen ještě s druhým odporem k integrovanému obvodu LM317 (viz. Obrázek 7.3) a celý obvod funguje jako lineární regulátor napětí. Efektivní nastavení otáček ventilátoru fungovalo zhruba ve čtvrtině rozsahu potenciometru. Proto bylo přistoupeno k výměně obou odporů, čímž se docílilo využití zhruba tří čtvrtin rozsahu potenciometru. Tento rozsah byl následně rozdělen pěti značkami podle rychlosti otáček ventilátoru.



Obrázek 7.3: Regulátor napětí s obvodem LM317 (převzato z [24]).



Obrázek 7.4: Původní chladicí modul.

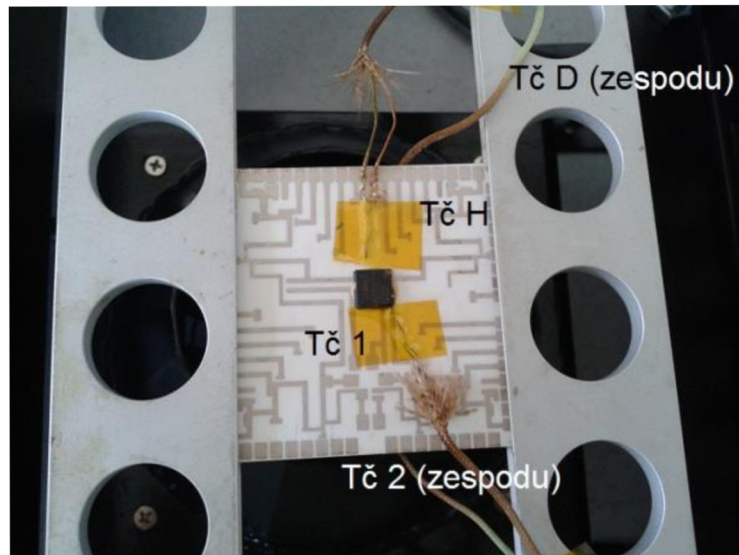


Obrázek 7.5: Stanice IR-400 usazená na ocelových nohách (vlevo) a nový chladicí modul (vpravo).

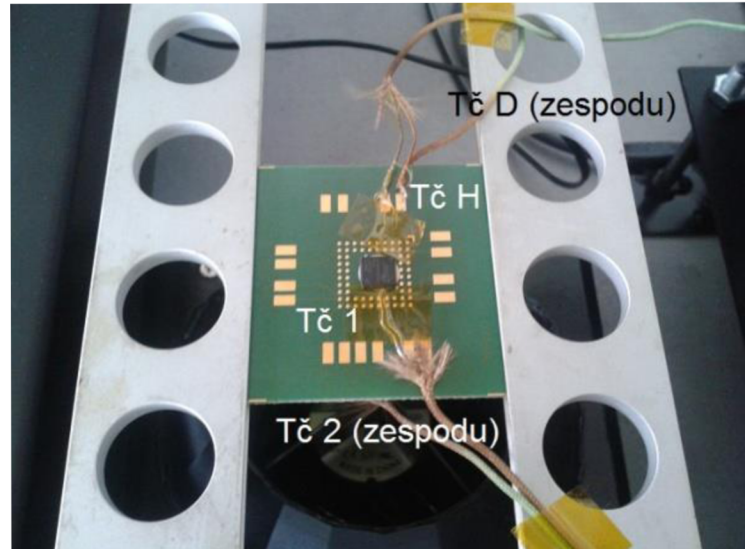
7.2 Rychlost chlazení s využitím prototypu chladícího modulu

Na modernizované stanici byla provedena měření, za účelem stanovit rychlost chlazení chladícího modulu, měření byla provedena pro substráty FR4 i keramické. Měřené vzorky s rozložením termočlánků jsou vyobrazeny na Obrázek 7.6: Vzorek keramického substrátu využitý při měření a rozložení termočlánků.. Byly stanoveny rychlosti chlazení pro pájecí pasty S6M-XM35 (Sn63Pb37) a SAC3-XF3 (SAC305). Stejně tak pro substrátové materiály DPS v podobě FR4 a korundové keramiky.

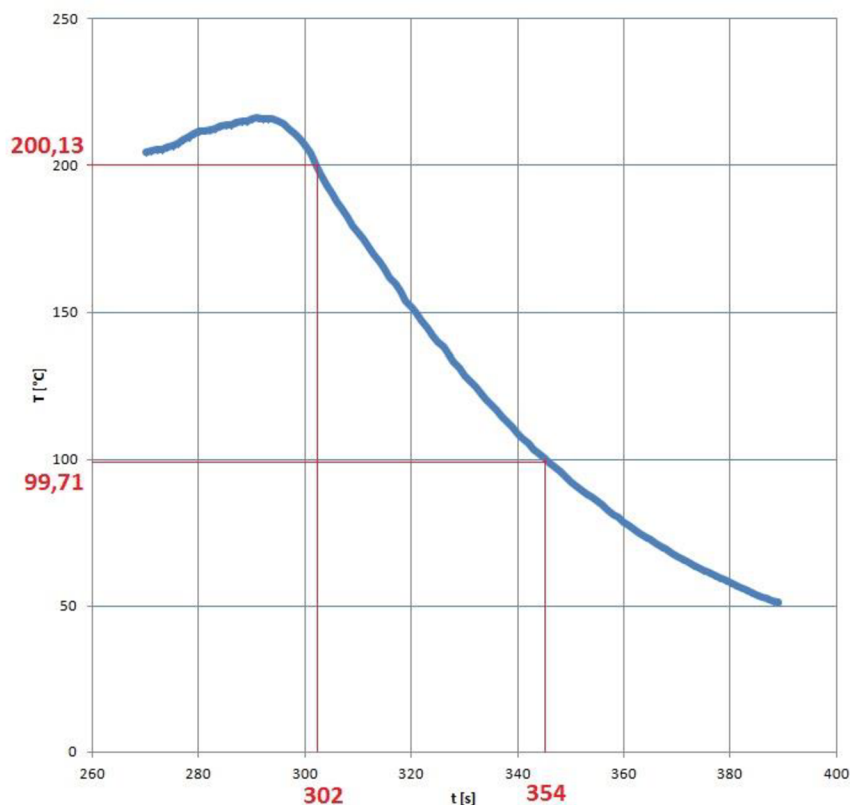
Teplotní profily byly měřeny pomocí profiloměru Omega TC-08, který komunikuje s počítačem pomocí rozhraní USB. Při měření nebyly kontrolovány ostatní fáze teplotních profilů. Optimalizací profilů se zabývala práce [18]. Měření rychlosti poklesu teploty probíhalo v rozmezí teplot 200°C – 100°C. Tento rozsah je ve všech případech teplotních profilů nejlineárnější částí.



Obrázek 7.6: Vzorek keramického substrátu využitý při měření a rozložení termočlánků.



Obrázek 7.7: Vzorek substrátu FR4 využitý při měření a rozložení termočlánků.



Obrázek 7.8: Oblast chlazení teplotního profilu olovnaté pájky S6M-XM35 na FR4 substrátu (úroveň 0)

Rozsah hodnot nastavitelných potenciometrem, který řídí otáčky ventilátoru chladícího modulu, byl oceňován pěti značkami podle otáček ventilátoru. Při úrovni 0 má ventilátor osazen v modulu nejmenší možné otáčky, naopak je tomu při úrovni 4. Změřené rychlosti chlazení jsou zobrazeny Tabulka 7.1 Tabulka 7.1: Změřené rychlosti chlazení na substrátu FR4.a Tabulka 7.2. Je patrné, že keramický substrát má mnohem větší tepelnou vodivost oproti FR4, což odpovídá teoretickým poznatkům (viz kap. 3).

K určení rychlosti poklesu teploty slouží jednoduchá rovnice

$$\Delta T = \frac{T_{200} - T_{100}}{t_{200} - t_{100}}, \quad (\text{Rovnice 7.1})$$

kde T_{200} a T_{100} představují přesné teploty v okolí 200°C a 100°C a t_{200} a t_{100} jsou přesné časy, kdy nastaly teploty T_{200} a T_{100} . Výsledek v podobě ΔT je hledaná rychlost chlazení. Změřené rychlosti chlazení nelze považovat za zcela přesné. Měření bylo ovlivněno několika chybami, které mohli výsledky lehce zkreslit. Chybu do měření vnáší fakt, že posun DPS z aktivní zóny stanice není nijak kontrolovaný, a musí ho provést obsluha ručně po skončení přetavovací části teplotního profilu. Tuto chybu by bylo možné odstranit nějakým systémem posuvu, který by byl řízen regulátorem podle konkrétního teplotního profilu. Ke zkreslení dochází také umístěním celé stanice, která je v laboratoři, kde je relativně vysoký pohyb ostatních pracovníků, čímž dochází k víření vzduchu, který následně ochlazuje opravovanou DPS. Částečně může dojít ke zkreslení i použitím kaptonové pásky k fixaci termočlánků. Páska neobepne

termočlánek dokonale, a pokud je termočlánek na špičce lehce ohnut, nedojde k přímému kontaktu s měřeným materiálem. Tomu lze předejít fixací termočláneků pomocí teplovodivého lepidla, což je způsob pro desku i termočláanky destruktivní. Lepidlo používané na těchto páskách postupně výrazným tepelným namáháním ztrácí svoje vlastnosti a páska se může odlepit. To se však stává po několikanásobném vystavení vysokým teplotám.

Tabulka 7.1: Změřené rychlosti chlazení na substrátu FR4.

Pájka	Úroveň 0	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Úroveň 4
SAC3-XF3	2,00	2,30	2,51	2,61	2,99
S6M-XM35	1,93	2,32	2,40	2,49	3,26

Tabulka 7.2: Změřené rychlosti chladnutí na substrátu Al₂O₃ (korundová keramika).

Pájka	Úroveň 0	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Úroveň 4
SAC3-XF3	4,31	5,33	5,71	6,68	6,13
S6M-XM35	4,47	5,20	5,68	6,14	6,24

8 OPTIMALIZACE TEPLOTNÍCH PROFILŮ PRO REBALLING GPU

Jako GPU (Graphics Processing unit) jsou označovány čipy, které jsou výpočetní jednotkou všech používaných grafických karet. Fyzicky se jedná o poměrně velká pouzdra BGA. Předmětem práce byla optimalizace teplotních profilů pro montáž takovýchto pouzder. Teplotní profily byly optimalizovány pro substrát FR4 a pájecí pasty od firmy Cobar, konkrétně šlo o olovnatou pastu S6M-XM35 (Sn63Pb37) a bezolovnatou pastu SAC3-XF3 (SAC305). Důležité parametry teplotních profilů udávané výrobcem pájecích past jsou vypsány v tabulce Tabulka 8.1. Obě pájecí pasty byly bezoplachové a jsou určeny pro síťotisk nebo šablonový tisk.

Tabulka 8.1: Parametry teplotních profilů [19] [20].

	S6M-XM35	SAC3-XF3
Špičková teplota [°C]	217-225	235-250
Teplota tavení [°C]	183	217
Doba nad teplotou tavení [s]	35-50	30-50
Teplota vyrovnávací fáze [°C]	155-165 / 165-175	155-175 / 175-195
Doba vyrovnávací fáze [s]	45-60	45-100
ΔT [°C/S]	1-1,2	1-1,3

Tabulka 8.2: Rozložení termočlánků.

Zkratka termočlánku	Umístění termočlánku
TC1	V rohu pouzdra na úrovni pájených spojů
TC2	Spodní strana DPS (pod BGA)
TC3	Vrchní strana BGA (na čipu)



Obrázek 8.1: Rozložení termočlánků při optimalizaci teplotních profilů (zespodu TC2 a TCD).

Parametry nastavené v regulátoru R500 pro optimalizované profily jsou zobrazeny v tabulce Tabulka 8.3 pro bezolovnatou pastu SAC3-XF3, toto nastavení je uloženo v regulátoru pod programem s číslem 6. Parametry pro olovnatou pastu S6M-XM35 jsou uloženy pod programem s číslem 7 a jsou znázorněny v tabulce Tabulka 8.4.

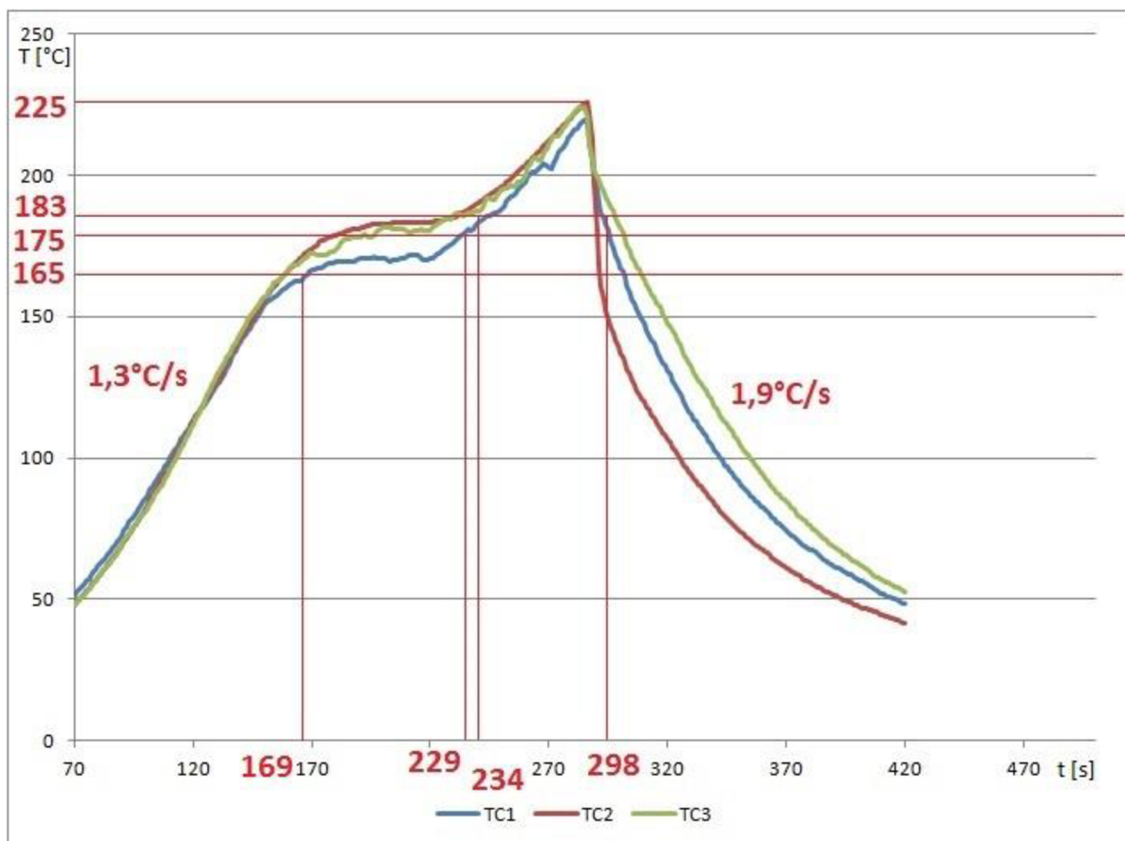
Tabulka 8.3: Parametry nastavení regulátoru pro bezolovnatou pájku SAC3-XF3 (program v regulátoru – 6).

Stolek - 20	Číslo úseku	1	2	3	4
	Čas úseku [s]	3:00	1:10	0:10	0:05
Hlava - 20	TCD [°C]	170	175	245	254
	TCH [°C]	172	175	245	254

Tabulka 8.4: Parametry nastavení regulátoru pro olovnatou pájku S6M-XM35 (program v regulátoru – 7).

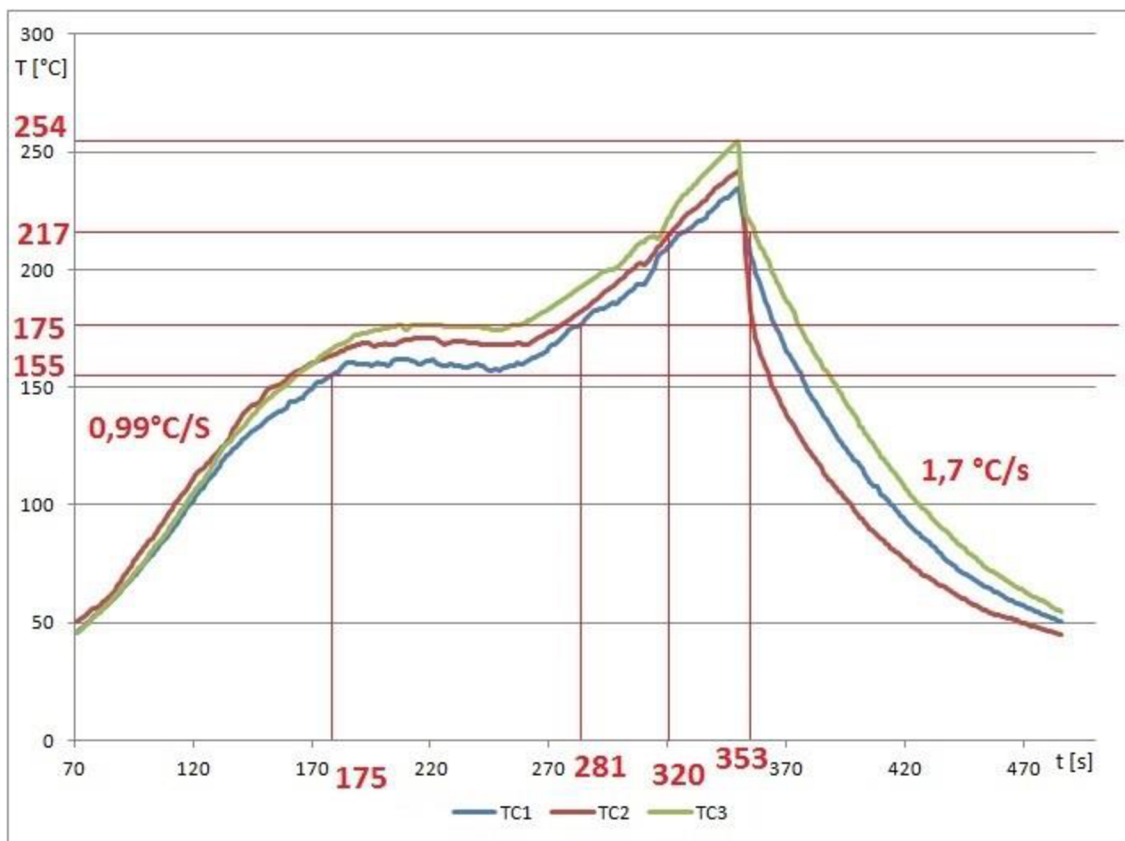
Stolek – 20	Číslo úseku	1	2	3
	Čas úseku [s]	2:45	1:05	0:10
Hlava - 20	TCD [°C]	154	155	225
	TCH [°C]	156	155	225

Optimalizovaný teplotní profil pro olovnatou pastu je zobrazen na obrázku Obrázek 8.2. Jak je vidět z obrázku optimalizovaný teplotní splňuje požadavky na minimální přetavovací profil, a to konkrétně špičkovou teplotu 225°C, dobu trvání vyrovnávací části 60s pro termočlánek 1. Hodnoty ostatních parametrů se velice nepatrně liší, až na dobu nad teplotou tavení, která kvůli pomalé rychlosti náběhu na špičkovou teplotu byla delší o 14s. Kvůli snížení této doby na minimum, musela být nepatrně zvýšena rychlost náběhu teploty v první části teplotního profilu. Rychlost náběhu teploty byla nastavována pomocí změny výšky horního zářiče a nastavitelného stolku, tudíž ji nelze v průběhu teplotního profilu měnit. Teplota termočláneků TC2 a TC3 ve vyrovnávací části vyšplhala výše, než je doporučeno. Toto zvýšení teploty bylo dáno právě umístěním termočláneků (viz Tabulka 8.2). Kvůli velké tepelné vodivosti keramického čipu a velké ploše spodního zářiče došlo k výskytu vyšších hodnot než, je doporučeno. V oblasti pájených spojů, tedy na termočlánek TC1 byly hodnoty v mezích udávaných výrobcem. Rychlost chlazení byla stanovena před začátkem měření do 2°C/s.



Obrázek 8.2: Optimalizovaný teplotní profil pro olovnatou pastu S6M-XM3S.

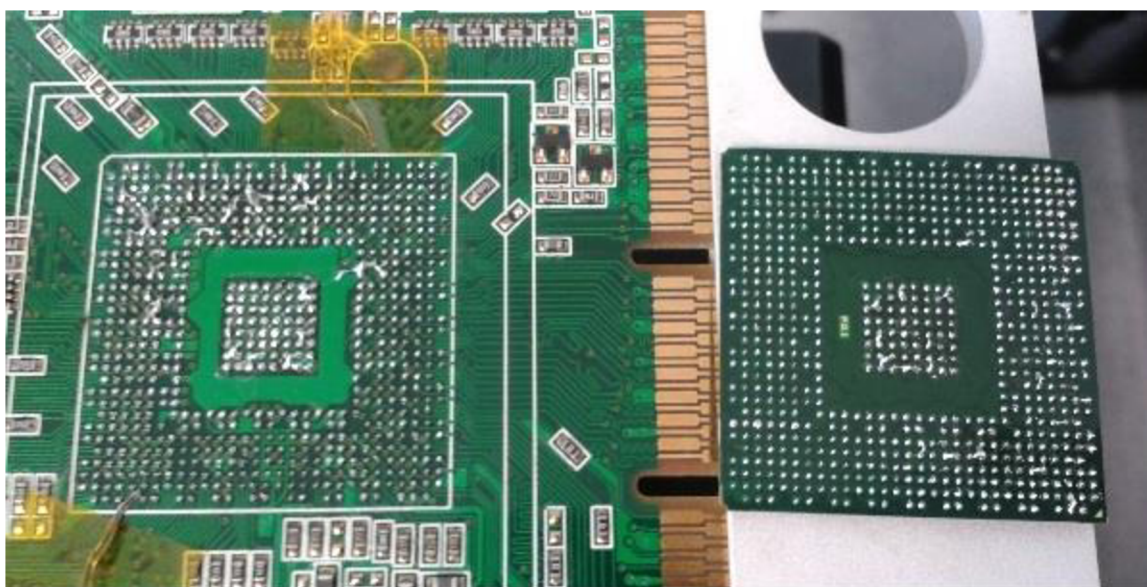
Z optimalizovaného teplotního profilu pro bezolovnatou pájku SAC3-XF3 (viz Obrázek 8.3) je možné vidět a spočítat, že profil v mnoha parametrech vyhovuje doporučenému profilu, který je udáván výrobcem (viz Tabulka 8.1), avšak například špičková teplota pro TC3, který byl umístěn přímo na křemíkovém čipu BGA pouzdra, překročila krátce doporučenou hranici 250°C o 4°C. Tato odlišnost s udávanými parametry musela být akceptována, jinak by nedošlo k dosažení minimální špičkové teploty (235°C) u TC1, který byl umístěn v oblasti pájených spojů. Rychlost náběhu teploty v první části teplotního profilu se lišila od minimální hodnoty udávané výrobcem o 0,1°C/S, což lze považovat za minimální chybu. Rozsah teplot ve vyrovnávací části byl vůči doporučení výrobce dodržen, avšak trval o 6 sekund déle, než je doporučeno. Doba nad teplotou tavení bezolovnaté pájky (217°C) byla 33s, což je v rozmezí udávaném výrobcem.



Obrázek 8.3: Optimalizovaný teplotní profil pro bezolovnatou pastu SAC3-XF3.

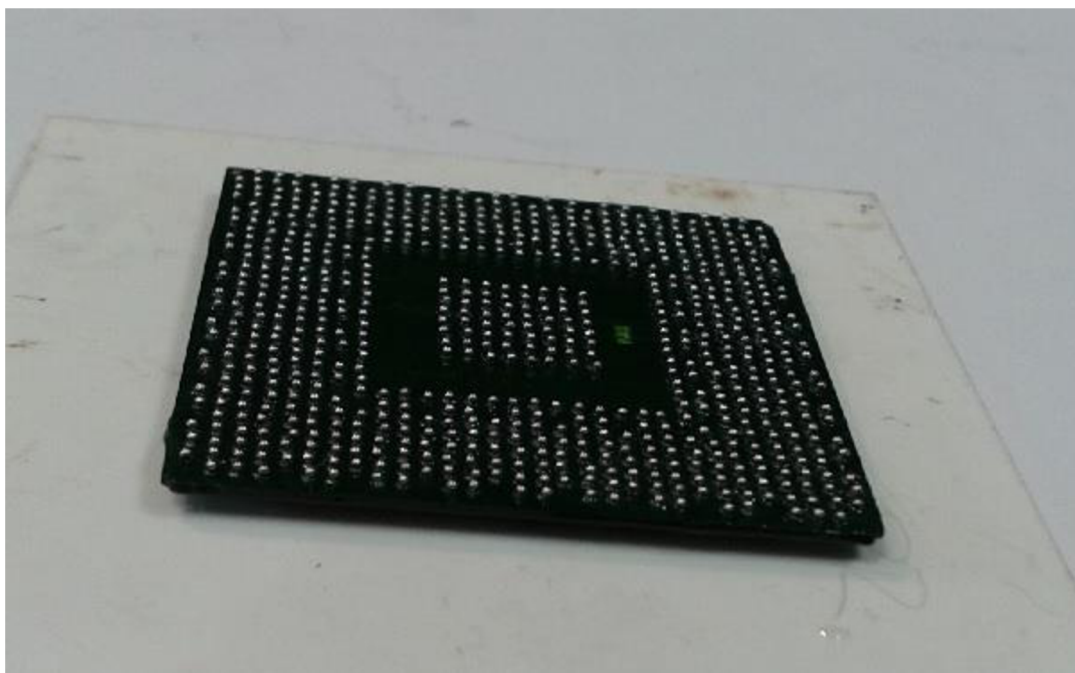
9 REBALLING GRAFICKÉ KARTY

V rámci ověření funkčnosti optimalizovaných teplotních profilů byl proveden reballing starší grafické karty. Jednalo se o stejný model, jako byla grafická karta využita při optimalizaci teplotních profilů, avšak o jiný kus, který nebyl poškozený opakovanými průběhy teplotních profilů při optimalizaci. Pracovní postup koresponduje s popisem v kapitole 5. Demontáž byla provedena na stanici IR-400 za použití vakuové pipety. Výsledek po demontáži pouzdra lze vidět na obrázku Obrázek 9.1, kde jde vidět přebytečná původní pájka, která tvoří zkratky na vývodech pouzdra i DPS. Tato přebytečná pájka byla odstraněna za pomoci pastovitého tavidla a měděného knotu. Následně bylo provedeno očištění isopropilalkoholem. Po očištění byla nanесena tenká vrstvička bezoplachového prstovitého tavidla určeného k osazování BGA pouzder, do které byly ručně usazeny bezolovnaté pájkové kuličky (viz Obrázek 9.2).



Obrázek 9.1: Demontované BGA pouzdro.

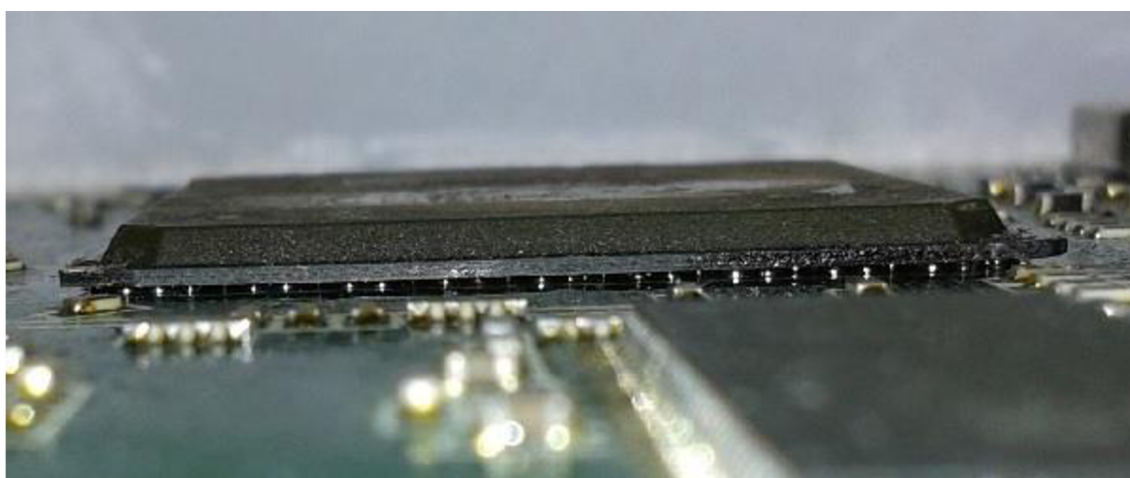
Po osazení kuliček byly kuličky přetaveny na stanici IR-400, čímž byli vytvořeny kulovité pájkové vývody. Při osazování a přetavování lze pozorovat efekt samovystředění, kdy i kuličky které nebyli zcela přesně usazeny na pájecích ploškách byli povrchovým napětím vystředěny. Tato část ručního osazování kuliček byla velice náchylná na vznik defektů. Při nanесení příliš velkého množství pastovitého tavidla může dojít vlivem povrchového napětí tavidla ke slití několika kuliček dohromady, což vede k nutnosti pouzdro opakovaně čistit od přebytečné pájky a to je spojen os dalším teplotním namáháním pouzdra. Příklad nepovedeného přetavení pájkových kuliček lze vidět na obrázku



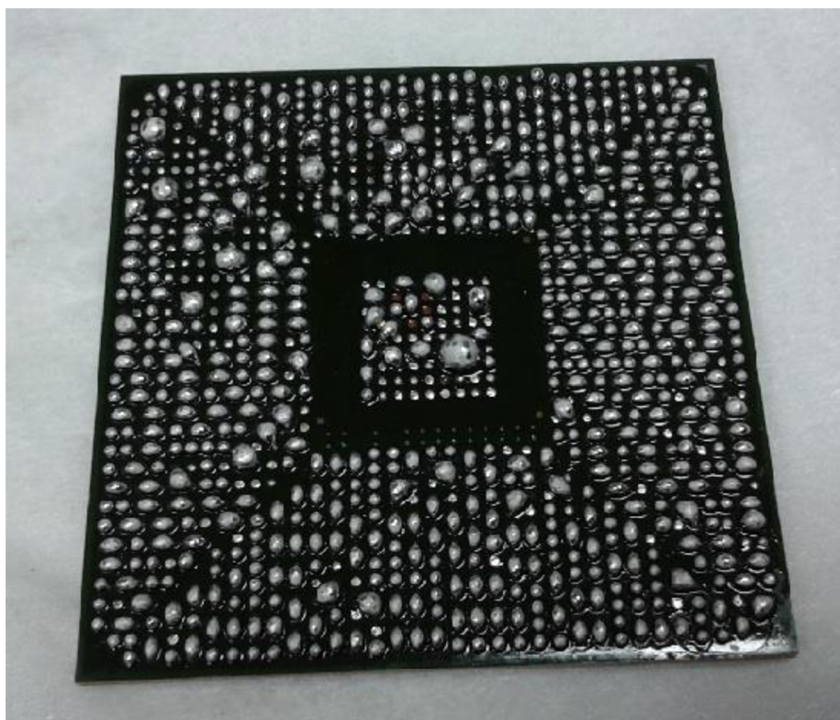
Obrázek 9.2: BGA pouzdro osazené pájkovými kuličkami před zapájením.

Po přetavení pájkových kuliček, bylo nutné nanést vrstvičku bezoplachového pastovitého tavidla na kontakty DPS. Na takto ošetřenou DPS bylo uloženo a sesouhlaseno BGA pouzdro. Následně se nechala celá osazená DPS projít přetavením konkrétním teplotním profilem, určeným druhem kuliček.

Grafická karta po reballování nebyla otestována na funkčnost, jelikož komunikovala přes AGP sběrnici, která se dnes již do osobních počítačů neosazuje a nepodařilo se sehnat žádný starší počítač, který by disponoval touto sběrnici. Byla provedena pouze optická kontrola (viz Obrázek 9.3), při které bylo zjištěno, že kuličkové pájkové spoje se vytvořily a nedošlo ke slítí kuliček, či jinému defektu. Ke zjištění stavu pájeného spoje uprostřed BGA pouzdra by bylo nutné využít sofistikované metody kontroly.



Obrázek 9.3: Optická kontrola zapájení testovacího BGA.



Obrázek 9.4: Pouzdro se znehodnocenými pájkovými vývody

10 ZÁVĚR

Předmětem této bakalářské práce bylo inovování chladicího modulu pro opravárenskou stanici Ersá IR-400. Tento modul byl oproti předcházejícímu prototypu zcela předělán po konstrukční stránce a byla inovována řídicí deska tak, aby bylo možné efektivněji regulovat otáčky ventilátoru. V návaznosti na tyto inovace byla nutná i úprava samotné stanice IR-400, která byla i s polohovatelným stolem umístěna pomocí ocelových nohou o řádově 10 centimetrů výše.

Nový chladicí modul byl opatřen stupnicí, která umožňuje regulovat rychlost chlazení pro pájené vzorky a desky plošných spojů v rozsahu zhruba 2 až 3°C/s pro substrát FR4 a 4,3 až 6°C/s pro keramický substrát Al₂O₃, neboli korundovou keramiku. Tyto rozsahy jsou pomocí stupnice rozděleny na 5 stupňů, ve kterých byly rychlosti chlazení stanoveny měřením.

Cílem bylo také optimalizování teplotních profilů pro opravy BGA pouzder u grafických karet. Tyto profily byly úspěšně optimalizovány a jejich funkčnost byla otestována při reballingu BGA pouzdra osazeného na starší grafické kartě.

LITERATURA

- [1] BRIGGS, Edf a Roland C. LASKY. Best Practices Reflow Profiling for Lead-Free SMT Assembly. *Indium Corporation Tech Paper* [online]. [s.n.] [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://kicthermal.com/wp-content/uploads/2012/11/Best-Practices-Reflow-Profiling-98675.pdf.pdf>.
- [2] VIVARI, John. First Principles of Solder Reflow. *Nordson* [online]. [s.n.] [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/efd/Literature/White-Papers/Solder/Nordson-EFD-First-Principles-Solder-Reflow.pdf>
- [3] LEE, Ning-Cheng. Optimizing Reflow Profile Via Defect Mechanisms Analysis. *Nortec* [online]. [1998] [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.nortec.co.il/image/users/82719/ftp/my_files/int/optimizing_reflow_profile_via_defect_mechanisms_analysis.pdf?id=3723713
- [4] Thermocouple fundamentals. PARK, Rochard M. *Advinsys* [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.advinsys.com/ApNotes/tcfundamentals.pdf>
- [5] Kapton tapes. *kaptontape.com* [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.kaptontape.com/>
- [6] SHILOH, P. John a Jonh MALBOEUF. How to Profile a PCB. *APS Novastar* [online]. 2009 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: www.ddmnovastar.com/
- [7] Taking the pain out of Pb-free reflow. HOUSTON, Paul N. *Lead free magazine* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.leadfreemagazine.com/pages/pdf/pain_out_of_reflow.pdf
- [8] Mechanism of adhesive film popcorn in electronic packaging. ZHAO, Junfeng. *Ecadigital library* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://ecadigitallibrary.com/pdf/57thECTC/s11p5lpa.pdf>
- [9] New observations on intermetallic compound formation in gold ball bonds: general growth patterns and identification of two forms of Au₄Al. *Microelectronics Reliability* [online]. 2004, roč. 44, č. 6, 973–981 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271404000770#FIG10>
- [10] Cold Solder Joint. *Soft solder* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://softsolder.com/2010/12/16/cold-solder-joint/> - http://www.caltexsci.com/bga_scope.htm timhle to nahradit...

- [11] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [12] Starý, J. Plošné spoje a povrchová montáž. 2003. s. 208.
- [13] Soutor, Z., Šavel, J. a Žůrek, J. Hybridní integrované obvody. SNTL/ALFA. Praha 1982. 04-532-82 s. 400.
- [14] Basic Soldering: Technical Manual. *Department of Defense Education Activity* [online]. 2002 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.wieshs.eu.dodea.edu/Courses/PTS/Electronics/ComputerServiceSupport/css/Forms/Doc/SolderGD.pdf>
- [15] VIVARI, John. First Principles of Solder Reflow. *Nordson* [online]. [s.n.] [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/efd/Literature/White-Papers/Solder/Nordson-EFD-First-Principles-Solder-Reflow.pdf>
- [16] Ferrite Tombstone. *Listserve 16.0* [online]. 2006 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://stevezeva.homestead.com/files/Ferrite_Tombstone.jpg
- [17] Lead-free SMT Soldering Defects How to Prevent Them. *Kester: connecting innovation* [online]. 2003 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Kester_117/pdf/kester-wp-leadfree-smt-soldering-defects.pdf?redirected=1
- [18] OTÁHAL, A. Optimalizace procesu pájení na zařízení IR-400. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 52s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. C_Optimalizace_IR400
- [19] Tisková pájecí pasta S6M-XM3S. *Cobar* [online]. 2006 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: www.pbt.cz/produkty/stahnout_prilohu/134
- [20] Bezolovnatá pájecí pasta COBAR SAC3-XF3+. *Cobar* [online]. 2010 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: www.pbt.cz/produkty/stahnout_prilohu/132
- [21] LEE, Ning-Cheng. Optimizing Reflow Profile Via Defect Mechanisms Analysis. *Nortec* [online]. [1998] [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.nortec.co.il/image/users/82719/ftp/my_files/int/optimizing_reflow_profile_via_defect_mechanisms_analysis.pdf?id=3723713

- [22] BGA: Reballing instructions. *Emulation* [online]. 2002 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.emulation.com/pdf/102003BGA_Reballing_Instruction_Manual.pdf
- [23] CANNON, Mark. BGA Repair: A Better Understanding can Reduce Fears, Guarantee Process Control and Save Money. *Ersa: Global connections* [online]. 2004 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.ersa.com/media/pdf/fachartikel/fachartikel_englisch/bga_repair_a_better_undestanding_can_reduce_fears_guarantee_process_control_and_save_money__16.pdf
- [24] LM338 / LM350 / LM317 VOLTAGE REGULATOR CALCULATOR. *Electronic projects circuits: Collection of electronic circuits* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.eleccircuit.com/lm338-lm350-lm317-voltage-regulator-calculator/>
- [25] SMIC Technical Bulletin: Sparkle ball for BGA, CSP, Flip Chip application. 1997. s 22.