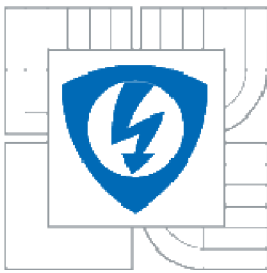




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## MOŽNOSTI PÁJENÍ SMD SOUČÁSTEK POMOCÍ ZAŘÍZENÍ FRITSCH

THE POSSIBILITIES OF SMD COMPONENTS SOLDERING BY EQUIPMENT FRITSCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARTIN JURAČKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ADÁMEK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Mikroelektronika

*Student:* Bc. Martin Juračka

*ID:* 115196

*Ročník:* 2

*Akademický rok:* 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

**Možnosti pájení SMD součástek pomocí zařízení Fritsch**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s technologií pájení, základními výhodami a nevýhodami typů pájecích opravárenských stanic a možnostmi a parametry opravárenské pájecí stanice Fritsch. Otestujte vybrané operace, které opravárenské pájecí stanice Fritsch umožňuje. Na základě získaných znalostí navrhnete a otestujete teplotní profily pro montáž a demontáž vybraných SMD součástek při pájení bezolovnatou pájkou.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle pokynů vedoucího práce

*Termín zadání:* 10.2.2014

*Termín odevzdání:* 29.5.2014

*Vedoucí práce:* Ing. Martin Adámek, Ph.D.

*Konzultanti diplomové práce:*

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

*Předseda oborové rady*

## Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na technologii pájení v mikroelektronice. Popisuje podrobněji základní způsoby pájení a oprav v elektronice. Práce uvádí principy technologických zařízení pro hromadné pájení a užívaná opravárenská zařízení. V teoretické části jsou stručně popsány i pouzdra pro integrované obvody, které byly použité v praktické části diplomové práce. Praktická část se zabývá nastavením teplotních profilů pro horkovzdušnou opravárenskou stanici Fritsch Mikroplacer pro pouzdra LQFP64, SOIC16, TSSOP14, QFN16 a DSBGA5. Byly nastaveny a otestovány pájecí profily pro montáž a demontáž jednotlivých typů pouzder na navrženém a vyrobeném testovacím substrátu. Výsledné teplotní profily jsou porovnány s doporučeným teplotním profilem běžné pájecí pasty SnAg3Cu0,5, která byla pro experimenty použita. Diplomová práce může posloužit jako pomůcka pro další nastavování teplotních profilů u dalších typů pouzder nejen na zařízení Fritsch Mikroplacer, ale i pro další opravárenská zařízení tohoto typu.

## Klíčová slova

Pájení, pájený spoj, Fritsch Mikroplacer, bezolovnaté pájky, fázový diagram, teplotní pájecí profil, posuzování poruch.

## Abstract

This thesis focuses on soldering technology in microelectronics. It describes in detail the basic ways of soldering and repairs in electronics. This piece of work shows the principles of technological equipment for bulk soldering and used repairing devices. In the theoretical part of this work there are also briefly described the packages for integrated circuits that were used in the practical part of the thesis. The practical part of the thesis deals with setting of the heat profiles for hot air repair station Fritsch Mikroplacer for LQFP64, SOIC16, TSSOP14, QFN16 and DSBGA5 packages. The heat profiles for assembly and disassembly of the particular types of the packages on designed and manufactured test printed circuit board were set and tested. The resulting heat profiles are compared with the recommended heat profile of an ordinary solder paste SnAg3Cu0,5 which was used for the test. This thesis can serve as an aid for the further settings of heat profiles in other types of packages not only on Fritsch Mikroplacer devices, but also on other repairing devices of this type.

## Keywords

Solder, solder joint, Fritsch Mikroplacer, lead-free solder, phase diagram, heat profil, assessment failure.

## Bibliografická citace díla

JURAČKA, M. *Možnosti pájení SMD součástek pomocí zařízení Fritsch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Možnosti pájení SMD součástek pomocí zařízení Fritsch“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....  
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

## Obsah

Úvod .....	8
1. Teoretická část.....	10
1.1 Pájení .....	10
1.1.1 Pájení vlnou .....	10
1.1.2 Pájení přetavením .....	11
1.1.3 Ruční pájení.....	14
1.2 Složení pájek a jejich vlastnosti.....	14
1.2.1 Olovnaté pájky.....	15
1.2.2 Bezolovnaté pájky .....	16
1.3 Teplotní profil a jeho měření .....	19
1.4 Opravářská zařízení a postup oprav .....	21
1.4.1 Strategie při opravách.....	21
1.4.2 Kritéria pro posuzování poruch .....	22
1.4.3 Kontrolní metody a systémy.....	24
1.4.4 Systémy a zařízení pro opravy.....	26
1.5 Pájecí kuličky.....	29
1.5.1 Druhy kuliček .....	30
1.5.2 Výroba kuliček .....	30
1.5.3 Reballing.....	31
1.6 Pouzdra a pouzdření.....	32
1.6.1 pouzdro BGA.....	33
1.6.2 Pouzdro SOIC.....	33
1.6.3 Pouzdro QFN.....	34
1.6.4 Pouzdro QFP .....	35
2. Popis opravářské stanice Fritsch a měření teplotních profilů.....	36
2.1 Popis laboratorní horkovzdušné pájecí stanice Fritsch Mikroplacer .....	36
2.2 Výroba testovacích DPS a šablon pro tisk pájecí pasty.....	37
2.3 Teplotní profily, montáž a demontáž IO na stanici Fritsch Mikroplacer.....	38
Závěr.....	55
Seznam literatury .....	56
Seznam zkratk .....	59
Příloha.....	60

## Úvod

Mikroelektronika je jedním z nejrychleji rozvíjejících se oborů. Zasahuje téměř do všech oborů lidské činnosti. Televize, počítače, mobilní telefony, kosmické technologie a mnoho dalšího je přímo závislé na pokroku technologií v mikroelektronice. První integrovaný obvod spatřil světlo světa v roce 1958 ve firmě Texas Instruments. Obvod obsahoval jediný tranzistor a několik pasivních součástek a byl vyroben na destičce germania o ploše 17,6 mm<sup>2</sup> [1]. Od té doby neustále narůstá počet součástek na čipu a s tím i počet vývodů.

V kvalitě mikroelektronických výrobků hraje důležitou úlohu způsob a kvalita propojování jednotlivých součástek mezi sebou pomocí základního substrátu. Připojování součástek k substrátu se provádí nejčastěji pomocí pájení za vzniku pájeného spoje. Se změnami evropské legislativy směrem ke snížení toxicity vyráběných produktů, byly zakázány materiály obsahující olovo, rtuť, kadmium, šestimocný chrom, polybromované bifenyly a polybromované difenylethery [2]. Toto opatření se v elektrotechnickém průmyslu odrazilo v zákazu používání olovnatých pájek a jejich náhradou za pájky bezolovnaté. Bezolovnaté pájené spoje mají často menší kvalitu než spoje olovnaté a jsou náchylnější k poruchám. Z důvodu nedořešených materiálových a spolehlivostních otázek u pájek bezolovnatých existuje mnoho výjimek pro pájky olovnaté a možnost jejich dalšího používání v elektrotechnice, především v armádě a lékařství [3].

Opravy v mikroelektronice na deskách plošných spojů (zejména při využití bezolovnatých pájek) jsou v současnosti proto velmi důležité, a to jak z hlediska oprav pájených spojů při samotné výrobě DPS, tzv. rework, tak i v rámci servisní činnosti. Poruchovost montážních celků je asi z 50 % zapříčiněná vadným (též lidově „studeným“) spojením [4]. Mezi další hlavní příčiny poruch patří únava pájeného spoje zapříčiněná mechanickým pnutím vlivem rozdílných tepelných roztažností materiálů součástky a základního substrátu. Tento problém je specifický u součástek SMD, které nejsou na základní substrát připájeny ohebnými vývody, jako je tomu například u integrovaných obvodů. Vznikající síly jsou značné a mohou způsobit prasknutí spoje, utržení pájecí plošky nebo mohou způsobit poškození součástky [5].

Tato práce se zabývá opravami v mikroelektronice. V teoretické části podává stručný přehled používaných technologií a blíže specifikuje možnosti oprav na laboratorní horkovzdušné pájecí stanici Fritsch Mikroplacer. Dále je rozepsáno téma pájení, ve kterém jsou uvedeny základní metody pájení, nejpoužívanější pájecí slitiny olovnaté a bezolovnaté a druhy pouzder pro integrované obvody s ohledem na použítá pouzdra v praktické části. Praktická část diplomové práce se zabývá problematikou nastavení teplotních profilů na horkovzdušné opravárenské stanici Fritsch Mikroplacer pro pouzdra LQFP64, SOIC16, TSSOP14, QFN16 a DSBGA5. V práci je využito nově navrženého jednostranného testovacího motivu plošného spoje spolu s motivy šablon pro tisk pájecí pasty pro každý druh pouzdra.



Výsledné teplotní profily jsou porovnány s doporučeným teplotním profilem běžné pájecí pasty SnAg3Cu0,5, která byla pro experimenty použita. Diplomová práce může posloužit jako pomůcka pro další nastavování teplotních profilů u dalších typů pouzder nejen na zařízení Fritsch Mikroplacer, ale i pro další opravárenská zařízení tohoto typu.

# 1. Teoretická část

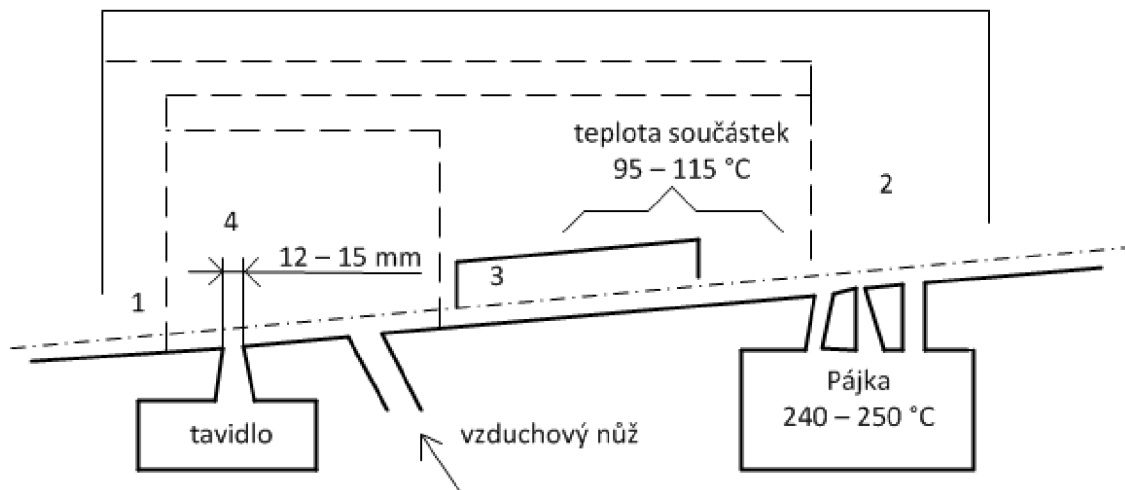
## 1.1 Pájení

Pájení patří mezi metalurgické spojení dvou částí. Pro spojení je potřeba pájky, jako přídavného materiálu. Ke spojení dochází oboustrannou difúzí atomů pájky do materiálu spojovaných částí. Spoj vzniká na hranici spojovaného materiálu a pájky při teplotě nižší, než je teplota tavení spojovaných materiálů [6]. Je to nejrozšířenější a nejspolehlivější metoda spojování součástek a nosných substrátů používaná v elektronice. Spolehlivost pájených spojů má významný vliv na jakost finálního výrobku. U manuálně pájených spojů se dosahuje spolehlivosti  $5 \times 10^9$ . Až po zavedení strojního pájení se dosáhlo hodnot spolehlivosti o dva až tři řády lepších. Přesto i dnes je kolem 50 % všech poruch způsobeno vadnými spoji. Z hlediska způsobu vytváření pájeného spoje existují pro hromadnou výrobu elektronických zařízení dvě odlišné metody – pájení vlnou a pájení přetavením, které se liší podmínkami provedení samotného procesu pájení. Kromě toho je někdy nezbytné použít ruční pájení, především při opravách [4].

### 1.1.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou (Flow Soldering nebo také Wave Soldering) je osvědčený způsob pájení desek plošných spojů. Velkou předností u tohoto způsobu pájení je jeho možnost použití pro kombinovanou montáž klasických součástek s drátovými vývody osazenými na jednom substrátu společně se součástkami pro povrchovou montáž (Mixed Technology). Základní princip zařízení pro pájení vlnou olovnatou pájkou a zásady pro jeho nastavení jsou znázorněny na obr. 1. Substrát s osazenými součástkami je uložen na pásový dopravník, a tak je zajištěn plynulý průchod desek přes následující zóny:

- Nanášení tavidla – většinou pěnou nebo sprejem. Za touto částí je vzduchová tryska nebo odsávací štěrbinová na odstranění přebytečného tavidla [4]. Pro bezolovnaté pájky je vhodná úprava pro nanášení tavidel na vodní bázi [7].
- Předehřev – odstranění rozpouštědel a aktivace tavidla, snížení teplotního šoku pro desku i součástky. U bezolovnatých pájek je nutné zajistit dostatečně dlouhý a výkonný předehřev (oproti 95 až 115 °C u olovnatých pájek je u bezolovnatých 115 až 125 °C – SnAg, SnAgCu [7]).
- Pájení – substrát je vlečen napříč po vlně roztavené pájky vytlačované kolmou tryskou. Používá se převážně dvojité vlny. Pro bezolovnaté pájky musí být vlny co nejbližší za sebou. U bezolovnatého pájení je zvýšená teplota lázně na 240 až 255 °C oproti 240 až 250 °C u olovnatých [7].
- Chlazení – pozvolné ochlazení desky se zapájenými součástkami na teplotu okolí [4].



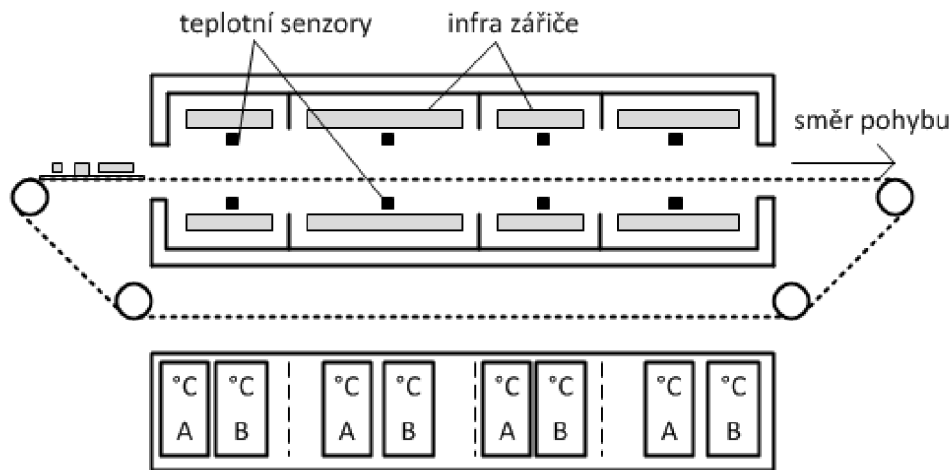
**Obrázek 1: Pájení vlnou – konfigurace zařízení a zásady pro jeho nastavení pro olovnatou pájku Sn60Pb40 eventuelně Sn63Pb37 [4].**

- 1 – rychlost dopravníku  $0,8 - 2,5 \text{ m min}^{-1}$ ,
- 2 – průchod klidovou zónou na vlně v rozmezí  $1,5$  až  $4,5 \text{ s}$  (podle typu tavidla),
- 3 – nastavení teploty předehřevu tak, aby teplota na spodní straně substrátu byla  $120$  až  $150 \text{ °C}$  a na horní straně  $90$  až  $110 \text{ °C}$ ,
- 4 – nastavení nanášení tavidla.

### 1.1.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením (Reflow Soldering) – pájka je nanášena na pájecí kontaktní plochu ve formě pasty před vlastním přetavením. Důležitým momentem je zajištění rovnoměrné a konstantní teploty na celé ploše pájeného substrátu, jež souvisí se způsobem ohřevu resp. přenosem tepla na pájené spoje. Součástky jsou pomocí povrchového napětí automaticky vycentrovány na pájecí plošky. Podle způsobu ohřevu se rozlišují tyto metody pájení přetavením:

- a) Pájení infračerveným zářením – (Infra Red Soldering) – byl zpočátku nejrozšířenější způsob pájení. Zdrojem tepla jsou zářiče umístěné nad i pod dopravníkovým pásem. Tyto pece jsou řešeny jako průběžné. Pro zajištění požadovaného teplotního profilu je pec členěna do několika teplotních zón. Při pájení dochází k pohlcování tepla, jež je závislé na barvě povrchu. Součástky s tmavší barvou jsou více zahřívány než součástky se světlým povrchem. Tato skutečnost má významný vliv na tepelné namáhání součástek. Nemalou roli hrají i vlastnosti povrchu součástky a její materiál. Důsledkem jsou významné teplotní rozdíly na substrátu a na součástce, které mohou nepříznivě ovlivnit kvalitu pájených spojů. Výhodou pájení infračerveným zářením je vysoká účinnost (až  $70 \%$ ), relativní jednoduchost a snadná obsluha [4] [8]. Konstrukce pece pro pájení přetavením s ohřevem infračerveným zářením je ukázána na obr. 2.



**Obrázek 2: Konstrukce pece pro pájení přetavením s ohřevem infračerveným zářením [4].**

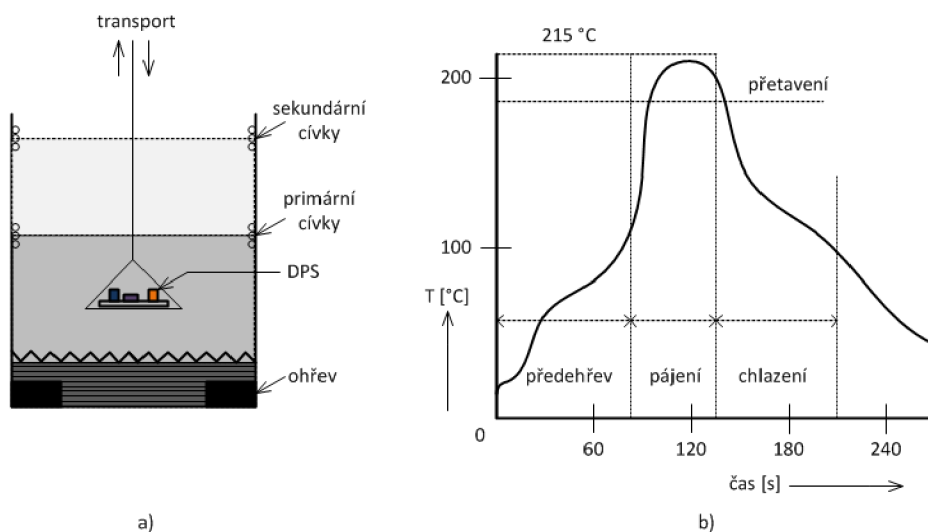
- b) Pájení horkým vzduchem nebo plynem – (Convection Hot Air Soldering) – zařízení je řešeno s více regulovanými zónami. Horký vzduch je dodáván do pájecího prostoru ze shora i spodní strany soustavou trysek v počtu až několika stovek. To umožňuje jednodušší nastavení teplotního profilu. Výhodou je malý teplotní gradient napříč pecí ( $\pm 2\text{ °C}$ ) a možnost pájení všech typů součástek. Relativní nevýhodou je doposud malá účinnost přestupu tepla v zařízení, která se pohybuje mezi 20 až 30 % [10]. Konstrukce pece převzatá z [11] je ukázána na obr. 3.



**Obrázek 3: Pec pro pájení přetavením s konvekčním ohřevem, převzato z [11].**

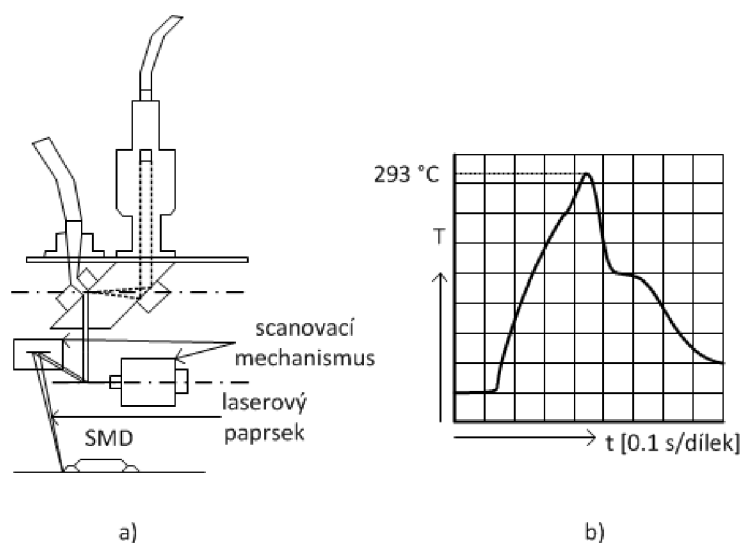
- c) Pájení v kondenzovaných parách – (Condensation Inert Soldering) – je z hlediska rovnoměrnosti rozložení teploty jednou z nejpříznivějších metod. Pájecí teplota je definována bodem varu kapaliny, což zaručuje v celém prostoru konstantní teplotu. Nasycená pára neobsahuje kyslík, proto při pájení nedochází k oxidaci pájených povrchů. To je příznivé pro bezolovnaté pájení, neboť proces probíhá v ochranné atmosféře a v konstantní teplotě, která nejčastěji nepřesahuje  $240\text{ °C}$ . Pro bezolovnaté pájení se běžně používají kapaliny s teplotou varu  $240\text{ °C}$ . Je to např. perfluorpolyether nebo různé fluorouhlíky. Perfluorpolyether se skládá z uhlíku, fluoru a kyslíku a má bod varu  $260\text{ °C}$ . Fluorouhlíky obsahují fluor a uhlík, jejich teplota varu se pohybuje v rozmezí  $220 - 235\text{ °C}$  nebo  $250 - 265\text{ °C}$ . Bod varu

pracovní kapaliny tak definuje velmi přesně mezní teplotu přetavení. Ta je závislá na jediném parametru, což je hlavní předností pájení v parách [4] [8] [10].



**Obrázek 4: Pájení v parách [10],  
a) Princip metody pájení v parách,  
b) Teplotní profil pájecího zařízení.**

d) Pájení laserem – (Laser Soldering) – vlastní ohřev probíhá impulzem dlouhým přibližně 300 ms a při výkonu  $11,4 \text{ W mm}^{-2}$  je dosahováno na pájeném spoji teploty  $293 \text{ °C}$ . Pájení laserem bývá využito jako přídavná operace po pájení vlnou nebo po pájení přetavením. Důvodem je, že obě nejpoužívanější metody mají své limity. Pro pájení vlnou je to tvoření zkratů mezi vývody a pro pájení přetavením pak především rozdílná pohltivost tepla mezi nejmenšími součástkami a velkými součástkami. Základní části zařízení tvoří osazovací modul se zaměřovacím systémem, laser s optickým vláknem a optický systém na směrování paprsku, který je přiveden na pájené místo pod úhlem  $30^\circ$  od kolmice na substrát [4].



**Obrázek 5: Pájení laserem [4],  
a) Provedení pájení součástek laserem,  
b) Teplotní profil.**

- e) Pájení vyhřívaným nástrojem – nazývané také odporové, je možné použít pro pájení pouzder s páskovými vývody (QFP, SOIC). Jako hlavní způsob využití je při opravách a výměně součástek na osazených DPS [4].
- f) Pájení na horké desce nebo pásu – je rozšířené především při použití keramických substrátů díky jejich dobré tepelné vodivosti. Výhodou je rovnoměrné rozložení teploty na substrátu, přímá optická kontrola během pájení a také jednoduchost zařízení a snadná obsluha. Je to způsob velmi účinný pro opravy a laboratorní využití [4]. Základní nevýhodou pájení na horké desce nebo pásu je využitelnost pouze pro desky s SMD součástkami umístěnými pouze na jedné straně substrátu.

**Tabulka 1: Porovnání tří nejdůležitějších metod pájení přetavením, převzato z [3].**

<b>Faktor</b>	<b>Infra Red</b>	<b>Kondenzace</b>	<b>Konvekce</b>
Řízení procesu	dobré	výborné	velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevná	regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Maximální teplota	špatně def.	pevná	špatně def.
Univerzálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

### 1.1.3 Ruční pájení

Hlavní zásadou při pájení běžnými olovnatými pájkami (Sn60Pb40 aj.) je nepřekročit v žádném případě ve spoji teplotu 300 °C. V opačném případě dochází k silné oxidaci cínu v pájce, nárůstu tloušťky difuzní vrstvy a také k přepálení tavidla (nejčastěji kalafunového). Pro ruční pájení součástek s drátovými vývody platí obecně následující pravidla:

- Maximální teplota pájky může být o 80 až 100 °C vyšší, než je nejvyšší teplota pevné fáze pájky.
- Je nutné definovat vztah mezi teplotou pájky a teplotou hrotu.
- Čas vlastního pájení se pohybuje mezi 1 až 4 s [4].

Důležitým konstrukčním detailem je umístění senzoru pro měření teploty, jenž musí být co nejblíže špičce hrotu, aby byla snímaná teplota co nejpřesnější. Základním materiálem hrotů je měď s vynikající tepelnou vodivostí, která je povrchově upravena pro dosažení stálosti a životnosti vrstvami železa a niklu [4].

## 1.2 Složení pájek a jejich vlastnosti

Donedávna byl základem většiny měkkých pájek binární systém cín – olovo (SnPb). Teplota tání SnPb pájky je dostatečně nízká a nedochází tak k porušení komponentů a laminátových materiálů. Ve všech používaných SnPb slitinách nevystupuje olovo jako metalurgicky aktivní prvek a nevznikají tak nežádoucí intermetalické sloučeniny obsahující olovo. Nicméně olovo ovlivňuje například kinetiku růstu tuhé fáze SnCu intermetalických sloučenin [15].

Zákaz použití olova v produktech vyráběných v EU od roku 2006 je hlavní důvod, proč nastalo hledání náhrady olovnatých pájek [2]. Má-li však být náhrada plnohodnotná, musí splňovat požadavky v oblastech technických a ekonomických. Mezi technické požadavky patří především vhodné elektrické a mechanické parametry a mezi ekonomické požadavky se řadí náklady na výrobu, které by neměly u bezolovnaté pájky převyšovat cenu pájky olovnaté, a to nejen v materiálové oblasti, ale i z hlediska provedení vlastního procesu pájení. Přestože je vyvíjen značný tlak na omezení užívání olovnatých pájek kvůli obsahu toxického olova, spotřeba tohoto kovu v elektronice není zdaleka nejvýznamnější částí jeho celosvětové spotřeby [6]. Podíl jednotlivých aplikací na průměrné roční spotřebě olova ve světě ukazuje tab. 2 převzatá z [6].

**Tabulka 2: Spotřeba olova ve světovém průmyslu, převzato z [6].**

<b>Spotřeba olova ve světovém průmyslu</b>	
<b>Produkt</b>	<b>Spotřeba [%]</b>
Akumulátorové baterie	80,81
Barviva	4,78
Munice	4,69
Pláště kabelů	1,41
Trubky	0,72
Pájky	0,49

### 1.2.1 Olovnaté pájky

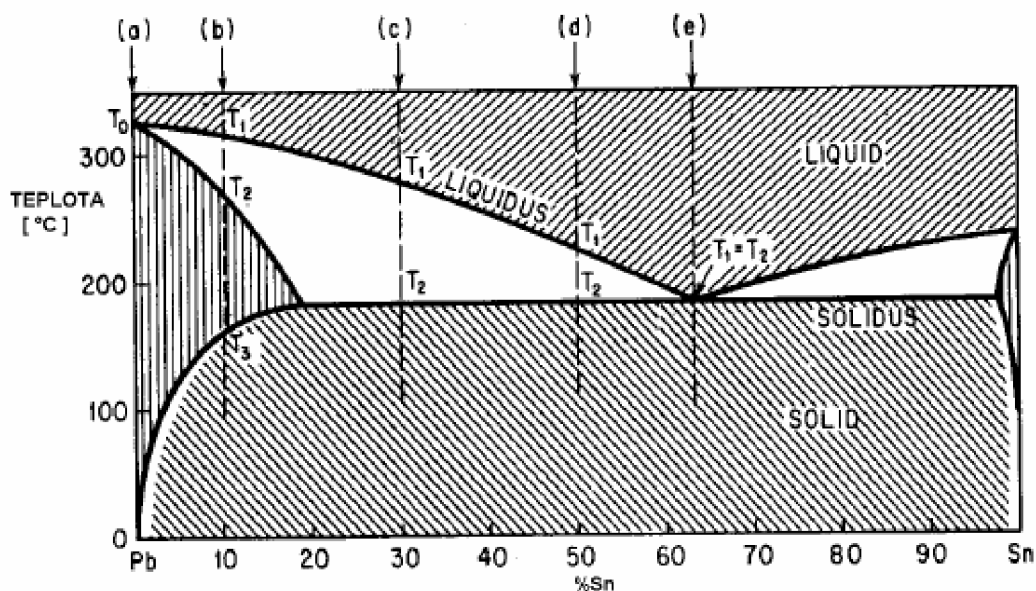
Eutektická slitina SnPb pájky obsahuje 63 % cínu a 37 % olova a má teplotu tavení 183 °C. Do olovnatých pájek bývají přidávány ještě další prvky, které zlepšují smáčivost pájených součástí, pájitelnost nebo jiným způsobem ovlivňují příznivě kvalitu pájeného spoje [6]. Některé typy olovnatých pájek jsou uvedeny v tab. 3 převzaté z [6].

**Tabulka 3: Některé typy olovnatých pájek, převzato z [6].**

<b>Vybrané typy olovnatých pájek užívané v elektronice</b>	
<b>Složení</b>	<b>Interval tavení [°C]</b>
Sn63Pb37	183
Sn50Pb50	183 – 212
Sn40Pb60	183 – 220
Sn38Pb62	236 – 240
Sn5Pb95	272 – 314
Sn57Ag4Pb39	171 – 180

Fázový diagram slitiny SnPb je uveden na obr. 6 převzatého z [3]. Na svislé ose je vynesena teplota slitiny, na vodorovné ose je vynesena poměr kovů tvořící slitinu. Cín má teplotu tání 232 °C, olovo 327 °C. Při poměru Sn63Pb37 je teplota tavení a tuhnutí slitiny jednoznačně dána (183 °C – eutektický bod, úsek „e“ na obr. 6) a je nejnižší. Slitina přechází při ohřevu přímo ze stavu tuhého do stavu kapalného. Při ochlazování tavenina chladne velmi rychle a nemá dostatek času na vytvoření velkých zrn. Při jiném poměru

Sn/Pb např. Sn50Pb50 nemá slitina pevně definovaný bod tání. V pevné fázi je pod teplotou 183 °C a dokonale roztavená je nad teplotou 216 °C (úsek „d“ na obr. 6). U taveniny, která je bohatší na cín proti eutektickému složení, krystalizuje při chladnutí nejdříve cín. Naopak u taveniny bohatší na olovo krystalizuje nejdříve olovo. Proces probíhá tak dlouho, až se dosáhne složení eutektika. Krystality jedné složky vytvořené na počátku tuhnutí jsou zpravidla větší a jsou uloženy v jemnozrnném eutektiku [3].



Obrázek 6: Fázový diagram slitiny SnPb, převzato z [3].

### 1.2.2 Bezolovnaté pájky

Při výběru optimální pájky se zohledňují následující kritéria: toxicita materiálu, dostatečné zásoby, cenová dostupnost, přijatelné smáčení, přijatelná teplota pájecího procesu a schopnost vytvářet spolehlivé spoje [12]. V tab. 4 a 5 jsou uvedeny základní skupiny bezolovnatých slitin podle [6] a [12].

Tabulka 4: Binární skupina bezolovnatých slitin [6] [12].

Skupina slitin	Poznámka
SnAg	Teplota tavení 221 °C, náhrada pro pájení vlnou, spolehlivost souvisí s růstem intermetalické sloučeniny $Ag_3Sn$ .
SnCu	Teplota tavení 227 °C, náhrada pro pájení vlnou, průměrná smáčivost, použitelná pro většinu aplikací.
SnBi	Teplota tavení 138 °C, není použitelná jako hlavní pájecí slitina vzhledem k vysoké ceně a nízké teplotě tavení.
SnZn	Teplota tavení 199 °C. Přítomnost zinku přináší problémy s jeho chemickou aktivitou: nízká doba skladování, používání aktivních tavidel, nadměrná tvorba zplodin, problémy koroze.



**Tabulka 5: Ternární skupina bezolovnatých slitin [12].**

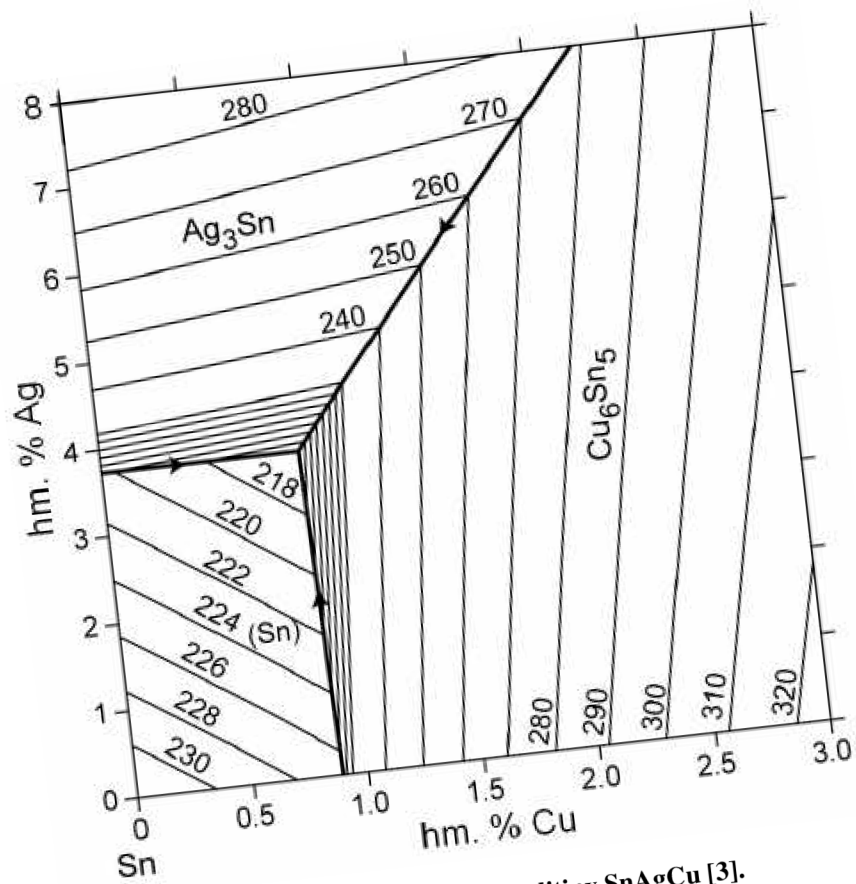
<b>Skupina slitin</b>	<b>Poznámka</b>
SnAgCu	Vhodná pro pájení přetavením, dostačující smáčivost a mechanické vlastnosti, nižší teplota tavení než u binárních slitin SnCu a SnAg.
SnAgBi	Nižší teplota tavení než u SnAgCu, lepší únavové charakteristiky mezi běžnými bezolovnatými pájkami.

Bezolovnaté pájky mají větší podíl cínu ve slitině a potřebují vyšší teplotu pájení, mají větší tendenci k oxidaci i teoreticky lepší smáčecí charakteristiky (v praxi se uplatní pouze v dusíkové atmosféře). Oproti eutektické olovnaté pájce mají bezolovnaté pájky větší povrchové napětí (snáze vytvářejí kuličky pájky) [3].

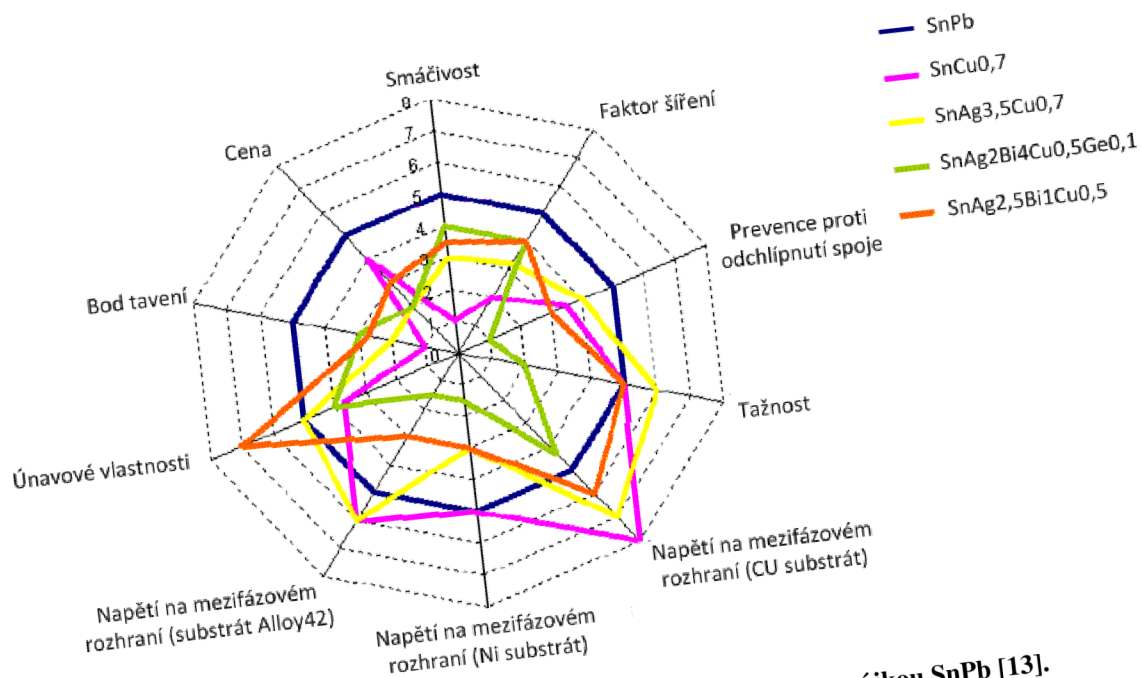
Příměsi In, Zn, Bi a Sb používané v bezolovnatých pájkách vykazují špatné smáčecí charakteristiky. Smáčecí úhly jsou na měděném substrátu oproti eutektické olovnaté pájce vyšší [3]. Měď má tendenci se na deskách plošných spojů (DPS) ve slitinách pájek s vysokým obsahem cínu rozpouštět. Je-li mědi užito jako složky pájecí slitiny, tento problém se částečně odstraní. Antimon má některé vlastnosti výhodné pro pájecí slitiny, ale bylo zjištěno, že je částečně toxický. Proto se jeho využití v bezolovnatých pájkách neočekává. Bizmut, podobně jako Indium, značně mění teplotu tavení slitiny. Slitiny s cínem či s indiem mají jako pájky velice dobré vlastnosti. Stříbro je pro své dobré elektrické vlastnosti užíváno jako složka mnoha bezolovnatých slitin, ale jeho vysoká cena je dosud hlavním omezujícím faktorem. Indium je prvek, který se často užívá ke snížení bodu tání slitiny, neboť jeho teplota tavení je 156 °C. Ve slitině tvoří Indium kompozici, která má teplotu tavení nižší než 100 °C [6].

Největší pozornost je soustředěna na systémy SnAgCu (SAC). Tento systém zahrnuje 4 nejčastěji používané pájky: SnAg<sub>4</sub>Cu<sub>0,5</sub>, SnAg<sub>3,8</sub>Cu<sub>0,7</sub>, SnAg<sub>3,6</sub>Cu<sub>0,5</sub> a SnAg<sub>3,5</sub>Cu<sub>0,7</sub> s teplotou tavení 217 až 219 °C. Technické specifikace se ve vlastnostech liší minimálně. Ternární eutektická slitina SnAg<sub>3,8</sub>Cu<sub>0,7</sub> (SAC387) je široce akceptována v průmyslu jak z důvodu spolehlivosti, tak i možnosti aplikace v hromadné výrobě. Fázový diagram slitiny SnAgCu je na obr. 7. Druhá nejpoužívanější slitina je SN100C (Sn<sub>99,3</sub>Cu<sub>0,7</sub>Ni<sub>0,06</sub> (+Ge)) vhodná pro strojní pájení vlnou a ruční pájení. Vyznačuje se tekutostí srovnatelnou s Sn63Pb37, lesklým vzhledem a nižší cenou oproti pájce SAC. Teplota tavení je 227 °C [3].

Mechanické vlastnosti bezolovnatých pájek výrazně závisí na chemickém složení konkrétní slitiny. Pevnost v tahu olovnaté a bezolovnaté pájky roste se zvyšujícím se obsahem cínu a snižuje se s klesající rychlostí deformace a s nárůstem teploty. Houževnatost a odolnost proti creepu (tečení – pomalý růst deformace v pevném materiálu vznikající pod konstantním zatížením. Závisí na napětí v materiálu a na teplotě [9]) SAC pájky je podstatně lepší, než u konvenční olovnaté pájky. Srovnání důležitých vlastností bezolovnatých pájek s konvenční olovnatou pájkou je na obr. 8. Cílem je dosažení ideálního tvaru polygonu, který v obrázku ilustruje klasická olovnatá pájka [13].



Obrázek 7: Fázový diagram slitiny SnAgCu [3].



Obrázek 8: Srovnání různých typů bezolovnatých pájek s pájkou SnPb [13].

### 1.3 Teplotní profil a jeho měření

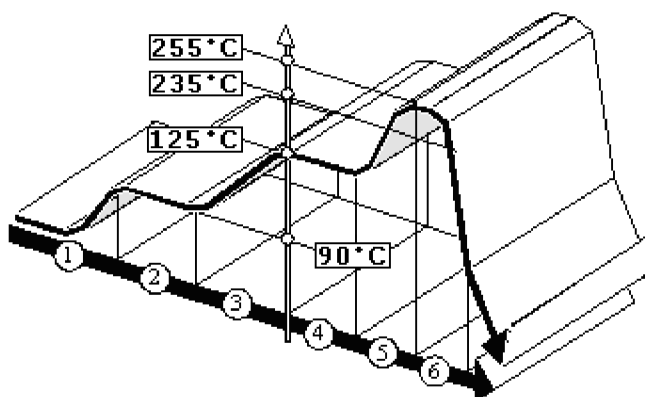
Teplotní profil je závislost teploty na čase, měřený na montážním celku v průběhu pájení. Kromě speciálních kamerových systémů je to jediný spolehlivý nástroj, který v reálném čase podává informace o průběhu pájecího procesu. Teplotní profil je velmi důležitý parametr a musí být nastaven tak, aby byla dosažena kvalitní produkce a minimalizované možné defekty výrobního procesu. Volba teplotního profilu je závislá mimo jiné i na typu použité pájky. Rozeznáváme příčný a podélný teplotní profil [14] [15].

Ke snímání teploty se používají termočlánky typu K. Typy termočlánků jsou uvedeny v tab. 6. Kromě termočlánků vestavěných v pájecích zařízeních lze pro kontrolu využít i samostatných externích profiloměrů, které jsou zpravidla vícekanálové s vlastním napájením a pamětí [14].

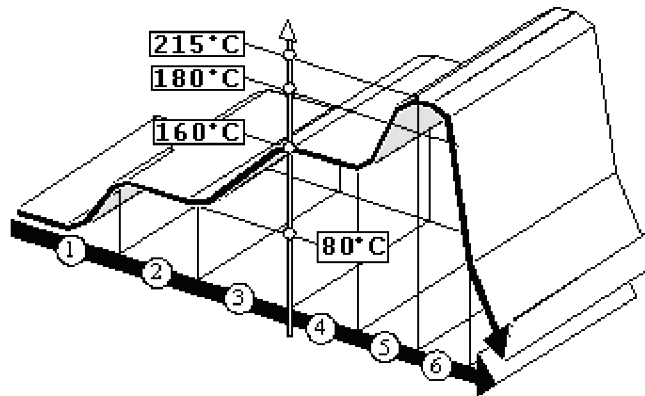
Tabulka 6: Typy termočlánků [16].

označení	Kombinace slitin		tepelný rozsah [°C]	U <sub>TE</sub> [mV]
	vodič +	vodič -		
J	Fe	Cu-Ni	0 až 750	0 až 42,283
K	Ni-Cr	Ni-Al	-200 až 1250	-5,973 až 50,633
T	Cu	Cu-Ni	-200 až 350	-5,602 až 17,816
E	Ni-Cr	Cu-Ni	-200 až 900	-8,824 až 68,783
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si-Mg	-270 až 1300	-4,345 až 47,502
R	Pt-13%Rh	Pt	0 až 1450	0 až 16,741
S	Pt-10%Rh	Pt	0 až 1450	0 až 14,973
B	Pt-30%Rh	Pt-6%Rh	0 až 1700	0 až 12,426
G	W	W-26%Re	0 až 2320	0 až 38,564
C	W-5%Re	W-26%Re	0 až 2320	0 až 37,066
D	W-3%Re	W-25%Re	0 až 2320	0 až 39,506

Teoretické průběhy pro olovnatou a bezolovnatou pájku jsou uvedeny na obr. 9 převzatého z [7] a obr. 10 převzatého z [15]. V grafu jsou vidět jednotlivé teplotní zóny: 1 – náběh teploty, 2 – prodleva, 3 – náběh, 4 – předehřev, 5 – oblast přetavení, 6 – chlazení [4].

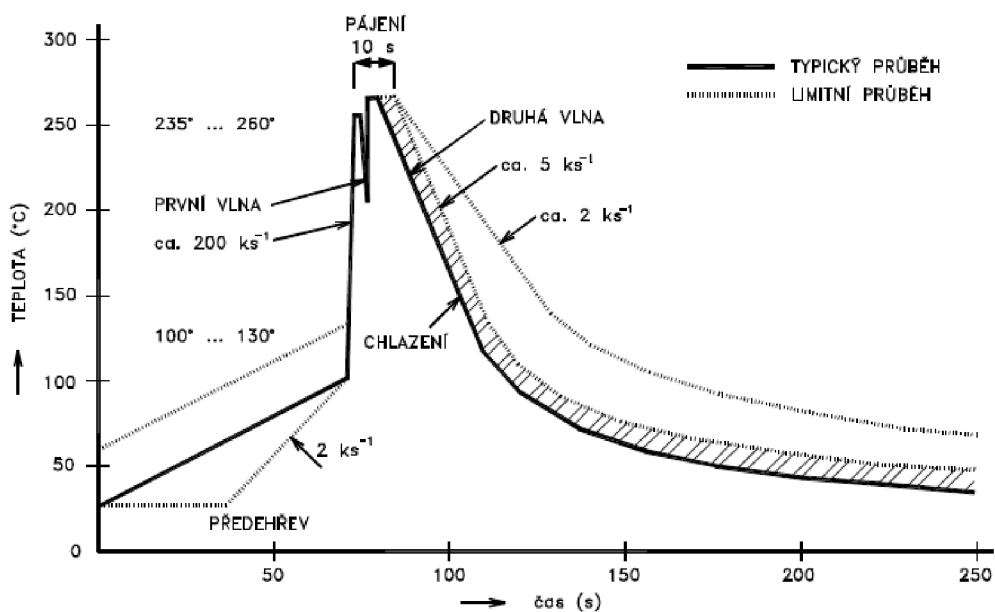


Obrázek 9: Ideální teplotní profil pro bezolovnatou pájku, převzato z [7].



Obrázek 10: Ideální teplotní profil pro olovnatou pájku, převzato z [15].

Během předehřívací fáze je důležité, aby teplotní gradient nepřesáhl  $4 - 5 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$  jinak hrozí příliš nerovnoměrný ohřev součástek. Ten do jisté míry nastane pokaždé vlivem rozdílné tepelné kapacity jednotlivých součástek, rozdílné schopnosti absorpce tepelného záření, použitého materiálu, velikosti součástek a barvy součástek. Proto je součástí profilu „vyrovnávací zóna“, oblast 2, během které teplota pece zůstává stejná a pouze se vyrovnává teplota. V přetavovací zóně 5 jsou důležité tři parametry: maximální teplota, čas nad teplotou tavení a maximální rozdíl teplot. Chladicí zóna by měla zajistit co nejrychlejší ochlazení na teplotu kolem  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Rychlost chlazení by se měla pohybovat do  $5 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$  [14]. Ideální teplotní profily pro pájení vlnou jsou na výše uvedených obr. 9 a 10. V praxi se často používá pájení vlnou se dvěma vlnami, tzv. dvojité vlna. Funkce první vlny je smočit všechny součástky a plochy plošných spojů. Pájka proudí velkou turbulentní rychlostí, aby došlo zejména ke smočení špatně dostupných míst a jejich dokonalé prohřátí. Funkce druhé vlny je, aby dosáhla potřebné kvality pájení. Vlna svým klidným oboustranným prouděním zajišťuje vytvoření dokonalého menisku s definovaným množstvím pájky na pájeném spoji [3]. Teplotní profil je na obr. 11 převzatý z [3].



Obrázek 11: Teplotní profil dvojité vlny, převzato z [3].

## 1.4 Opravárenská zařízení a postup oprav

Během procesu pájení mohou vzniknout závady na montážní a propojovací struktuře a ty je nutné opravit. Všeobecně rozlišujeme dva druhy opravárenských činností:

- Rework – zahrnuje operace v montážním procesu, a to jak před procesem pájení, tak i po procesu pájení. Množství dodatečné práce je nepřímo úměrné úrovni a zvládnutí technologického procesu.

Dodatečná práce před procesem pájení zahrnuje:

- Špatně natisknutou pastu nebo lepidlo
- Špatně osazené nebo neosazené součástky
- Špatně vytvrzené lepidlo

Dodatečná práce po procesu pájení zahrnuje:

- Špatné zapájení vývodů
- Poloha součástek mimo toleranci [4]

- Repair – výměna nefunkční nebo poškozené součástky, oprava DPS. Opravy probíhají po procesu pájení, funkčního testování a během servisní činnosti. Opravy zahrnují:
  - Demontáž a montáž součástek. Tento postup většinou sestává z následujících kroků:
    - příprava desky, její uchycení a podepření
    - vyjmutí součástky bez poškození kontaktních spojů, substrátu a okolních součástek
    - očištění pájecích ploch na substrátu a jejich příprava k pájení
    - zapájení nové součástky
  - Opravy vodičů a pájecích plošek a pájených spojů. Jedná-li se o vodivý můstek mezi spoji (zkrat) nebo špatně zapájený (studený) spoj, je provedení opravy relativně jednodušší a méně náročnější. Používají se klasické pájecí nástroje s přímým kontaktem na pájené místo [3] [4].

### 1.4.1 Strategie při opravách

Vliv lidského faktoru je v procesu oprav podstatně větší, než v průběhu samotného výrobního procesu, ačkoli je zde snaha o automatizování oprav. Většinou je nejúčinnějším řešením volby zařízení pro opravy použití manuálního zařízení. Situace opravy je ve většině případů ztížena přítomností dalších součástek v blízkém okolí, což klade další požadavky na celý proces výměny, ale především na teplotní namáhání při demontáži staré součástky a pájení nové součástky. Překračování teploty požadované pro pájení je škodlivé a nebezpečné, neboť může dojít k poškození pájecích ploch a okolních součástek. Čím

blíže se podaří udržet teplotu u doporučené hodnoty pro pájení, tím vyšší je pravděpodobnost spolehlivého provedení nejen samotného pájení, ale i celé operace výměny součástky. V případě součástek pro povrchovou montáž je základní princip výměny oproti součástkám s vývodovou montáží stejný, avšak hlavní rozdíly lze spatřit v těchto skutečnostech:

- Plocha vývodů SMD součástek je výrazně menší (často o 50 %).
- Pro vytvoření spoje je zapotřebí menšího množství pájky (10 až 50 %).
- Tepelná odolnost součástek SMD závisí na možnosti odvodu tepla.
- Při výměně součástky je ideálním případem ohřát všechny vývody současně [4].

#### 1.4.2 Kritéria pro posuzování poruch

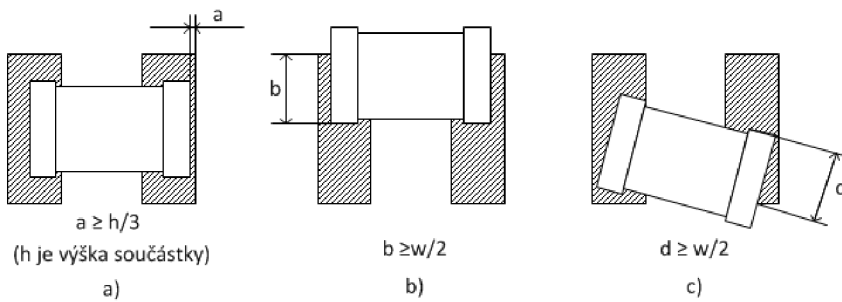
Jakost pájených spojů je hodnocena ze třech důležitých aspektů na základě optického posouzení:

- Smáčivost povrchu (plynulý přechod pájky ze spoje na substrátu).
- Množství pájky ve spoji (spoj musí být kompaktní, s dostatečným množstvím pájky).
- Stav povrchu zapájeného spoje (bez narušení a anomálií) [4].

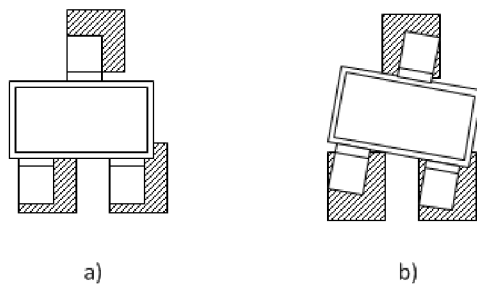
Posuzování jakosti polohy pájených součástek na substrátu vychází z teoretického předpokladu, že všechny součástky mohou být v ideálním případě umístěny ve středu pájecích ploch. Obecně lze přijmout zásadu, že vždy musí být minimálně 50 % plochy kontaktu nebo vývodu součástky na kontaktní ploše umístěné na substrátu. Toto rozhodnutí nabízí řadu praktických výhod, jakými jsou:

- Jednotný přístup k posuzování akceptovatelné polohy u různých součástek.
- Snadná vizuální kontrola v průběhu výroby.
- Relativně dostatečný možný posuv ve výrobním procesu [4].

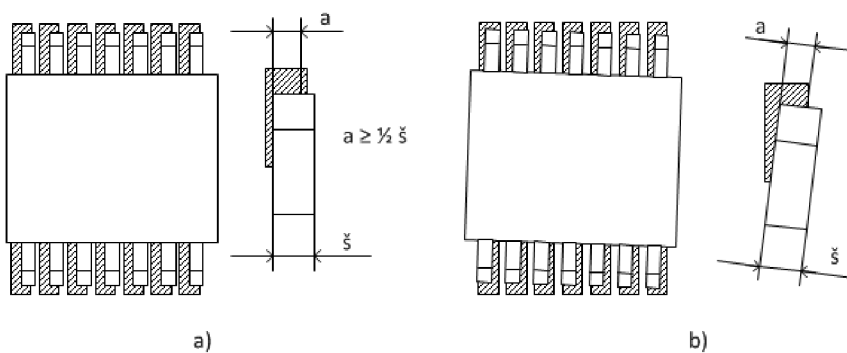
Na obr. 12 jsou uvedeny přípustné polohy pro součástky kvádrového typu (R, L a C). Pro součástky SOT-23 je akceptovatelné vychýlení znázorněno na obr. 13 a pro součástky SOIC je vychýlení hodnoceno z hlediska polohy podle nejméně příznivého vývodu, jak je patrné z obr. 14 a pro součástky s delšími ohebnými vývody (QFP) na obr. 15. Součástky s pouzdem SOIC a QFP budou použity v praktické části diplomové práce. Kritéria pro tvar pájeného spoje jsou shodná jak pro pájení vlnou, tak pro pájení přetavením. Avšak podmínky, při kterých spoj vzniká, jsou odlišné. Existuje obecně platné pravidlo, že jsou akceptovatelné všechny odchylky od ideálního tvaru spoje, které neovlivní jeho spolehlivost. Optimální, akceptovatelné a nevyhovující tvary pájených spojů jsou uvedeny na obr. 16 [4].



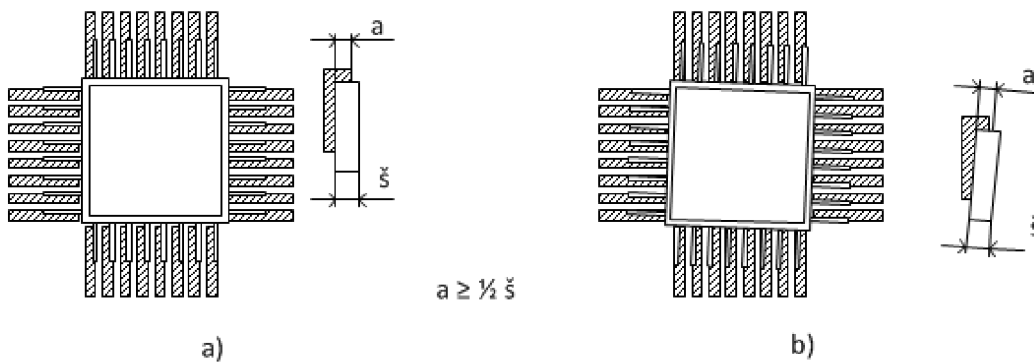
Obrázek 12: Přípustné polohy čipových součástek R, L a C [4].



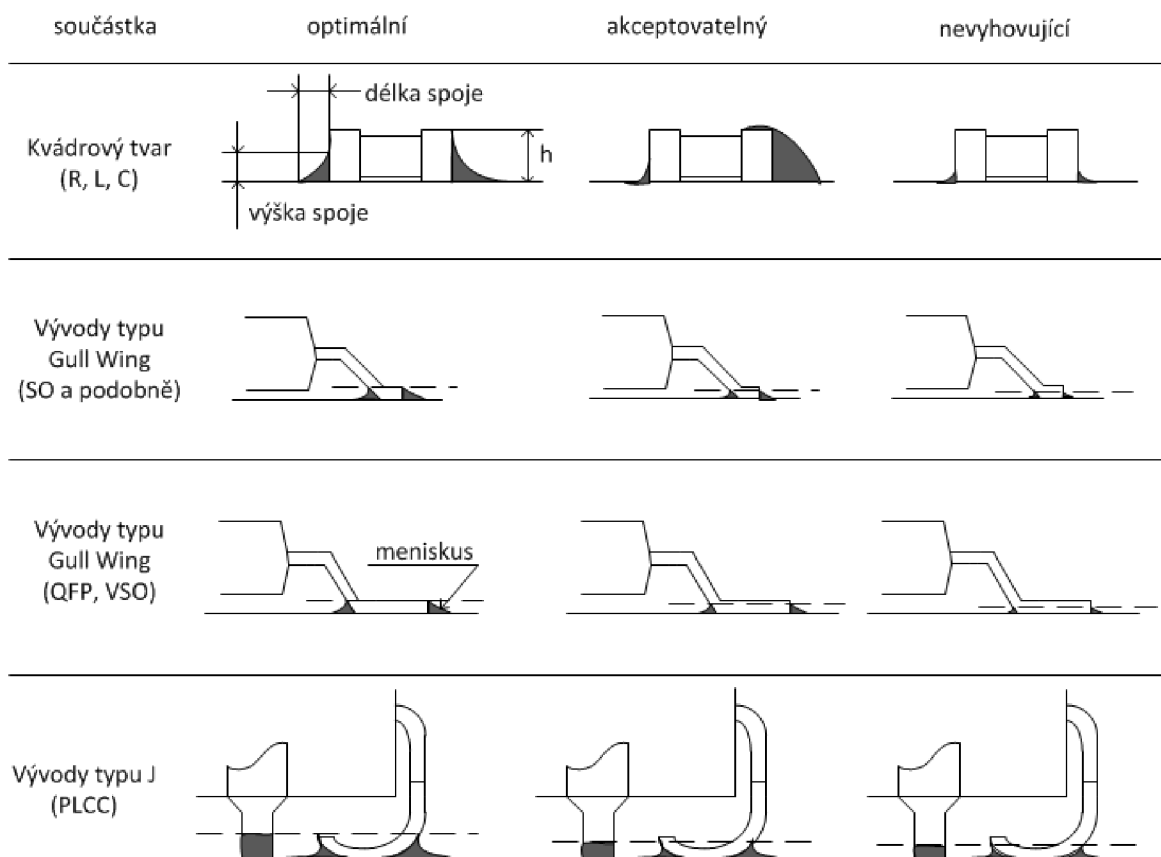
Obrázek 13: Přípustné polohy součástky SOT-23 [4].



Obrázek 14: Přípustné polohy součástek SOIC [4].



Obrázek 15: Přípustné polohy pro součástky QFP apod. [4].



Obrázek 16: Optimální, akceptovatelné a nevyhovující tvary pájených spojů [4].

### 1.4.3 Kontrolní metody a systémy

Existují dva základní přístupy k provádění kontroly, a to manuální optická kontrola a automatizovaná kontrola [4].

#### 1.4.3.1 Manuální optická kontrola

Je nejčastěji používaná, nejlevnější a nejdostupnější způsob kontroly. Tento způsob lze použít také pro kontrolu nanesené pájecí pasty nebo lepidla, umístění součástek případně další operace. I když je tato metoda velmi flexibilní, při větších objemech vyráběných kusů velmi pomalá a od určitého množství kusů v plné míře nerealizovatelná [4]. Zároveň je tento způsob kontroly neúčinný a nespolehlivý. Velice rychle se dostavuje únava pracovníka a po chvíli je lidské oko unavené a snadno se přehlédne chyba [17].

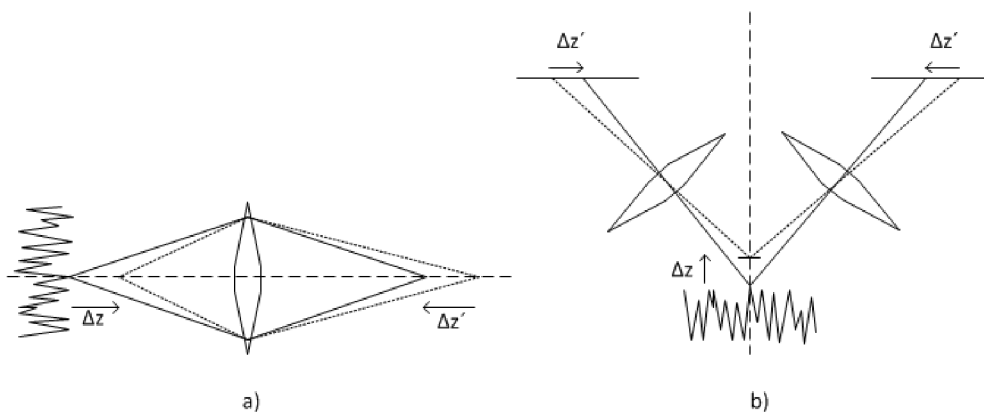
#### 1.4.3.2 Automatizovaná kontrola

Vyznačuje se velkou rychlostí, objektivností a přesností. Metoda je založena na nedestruktivní a bezkontaktní měřící metodě. Z hlediska principu lze rozlišit několik skupin:

- Optické metody – poměrně rozšířený způsob sloužící nejen pro kontrolu, ale i pro analýzu umožňující detailní zobrazení. Z hlediska principu jsou realizovány s 2D, 2D+ a 3D zobrazením. Základní princip je uveden na obr. 17. Tato metoda kontroly může pracovat na principu porovnávání dvou či více obrazů. Program pracuje

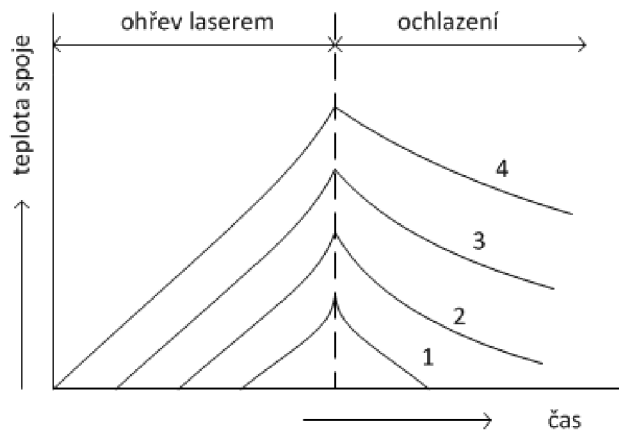


s referenční deskou, která je plně funkční a rozdíly mezi testovanou deskou a referenční jsou vypsány do protokolu s označením konkrétní chyby s přesným určením polohy [4] [17].



**Obrázek 17: Základní princip optických metod [4].**

- Metody využívající rentgenové záření – metoda je založena na transmisním principu, kdy na svisle měřený objekt je na jedné straně umístěn zdroj rentgenového záření a na druhé straně detektor. Nevýhoda tohoto systému je poskytování jediné informace i při průchodu více komponentami. Dokonalejší metoda je transmisní rotační metoda (laminografie), kde určitý sledovaný objekt je snímán pomocí několika obrazů, což umožňuje kontrolu a měření i na oboustranně osazených deskách [4]. Metoda má význam především v kontrole zapouzdřených obvodů (BGA, hermetická pouzdra apod.) [17].
- Mikroskopie využívající povrchové akustické vlny – založena na měření odrazu vysokofrekvenčních vln od měřeného objektu [4].
- Tomografie s využitím povrchových akustických vln – stejný princip jako akustická mikroskopie, rozdíl je v použití nižších kmitočtů [4].
- Laserová mikroskopie akustická nebo tepelná – využívá řízených pulzů energie laseru, v prvním případě k vyvolání vibrací ve spoji a následnému měření jejich kmitočtu (u studeného spoje je kmitočet několikanásobně nižší než u spoje dobrého) a v druhém případě k ohřátí spoje s následným měřením teplotní charakteristiky detektorem infračerveného záření (dobrý spoj rychle odvádí teplo do okolí a zahřívá se méně než spoj s dutinami nebo jinými anomáliemi) [4]. Princip tepelné laserové kontroly je na obr. 18.
- Teplotní zobrazovací metody – sledují teplotní rozložení na substrátu, jež je měřeno detektorem infračerveného záření. Metoda spočívá v porovnávání zkoušené desky s deskou referenční. Zkoušená deska je napájena proudem a termografický obraz je zaznamenán a následně odčítán z obrazu referenční desky a rozdíl mezi obrazy je vyhodnocen. Hodnocení ukáže chladné (možná vadné) nebo zahřáté (možná vadné) součástky [4] [17].



**Obrázek 18: Princip laserové tepelné kontroly [17],**  
**1 - velká tepelná vodivost spoje,**  
**2 - správný spoj,**  
**3 - matný nebo studený spoj,**  
**4 - utržený přívod nebo velké dutiny.**

#### 1.4.4 Systémy a zařízení pro opravy

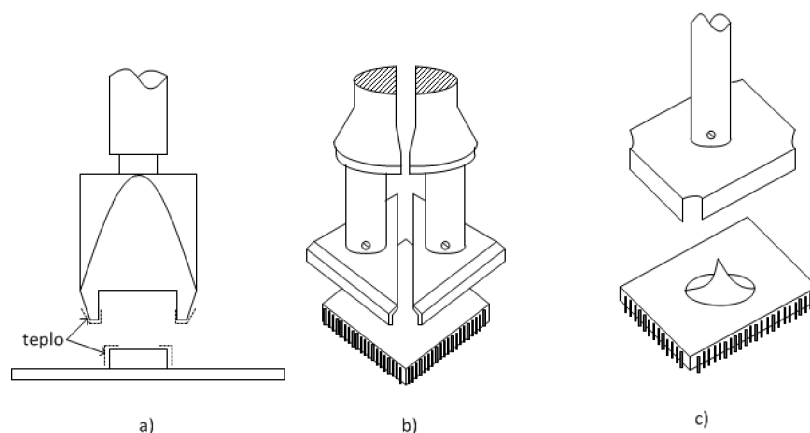
Rozeznáváme tři typy systémů založené na základních principech přenosu tepla, a to kondukce (vedení tepla), konvekce (proudění horkého plynu) a radiace (vyzářením energie) [4].

##### 1.4.4.1 Kondukční ohřev

Tento systém může být v provedení s přímým kontaktem na spoj nebo s nepřímým kontaktem na spoj. V případě systémů s přímým kontaktem se jedná o pájecí nástroje s vyhřívaným hrotem nebo nástavcem, který přichází do přímého styku s vývody součástky. Opravářské systémy jsou vybaveny různými tvary pájecích nástrojů pro různé typy součástek, které se dělí na:

- hroty a nástavce pro pájení SMD součástek R, L a C, menších pouzder SO případně PLCC.
- Termokleště s dělenými nástavci pro vyjmutí součástek, které lze uchopit z boku (SO, PLCC, QFP, SOIC).
- Termopik – kombinace vyhřívaného nástavce s vakuovou pipetou.
- Dual termopik – pro součástky BGA, jenž má vyhřívanou dvojici nástavců a vakuovou pipetu.
- Mikrovlna – speciální hrot s přívodem pájky na jeho špičku. Lze s ním simulovat při vhodném pohybu dynamické vlastnosti pájecí vlny [4].

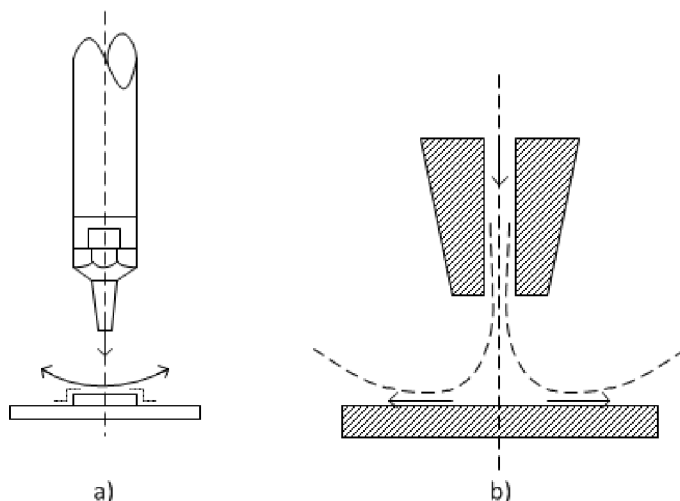
Systémy s nepřímým přenosem tepla se používají především pro opravy prováděné na keramických substrátech. Jedná se v podstatě o přetavení na vyhřívané kovové desce [4].



Obrázek 19: Nástroje pro pájení přímým vedením tepla [4].

#### 1.4.4.2 Konvekční ohřev

Tyto systémy využívají jako přenosové médium proud horkého vzduchu nebo jiného plynu (nejčastěji dusík). Médium je přivedeno na vývody pájené součástky prostřednictvím trysky. Některé systémy nabízejí různé tvary trysek proto, aby bylo možné co nejdokonalěji prohřátí místa vzniku pájeného spoje. Základní princip je znázorněn na obr. 20 [4].



Obrázek 20: Princip pájení horkým vzduchem nebo plynem [4].

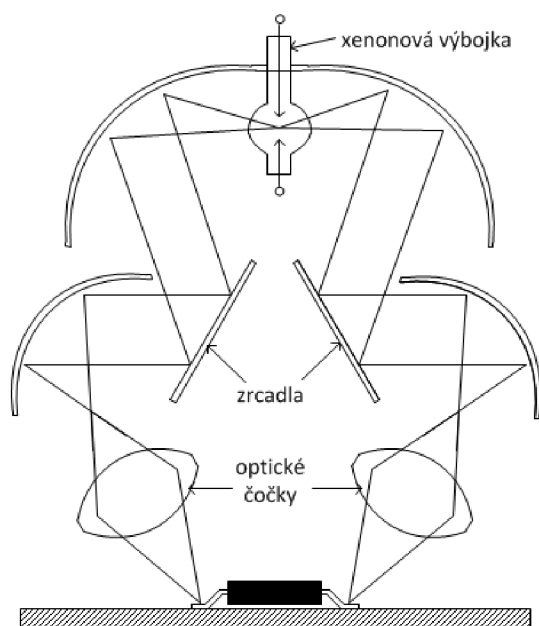
Příkladem může být opravárenská stanice Fritsch Mikroplacer. Tato pájecí stanice umožňuje pájení horkým vzduchem společně s IR předehřevem ze spodní strany DPS. Pomocí počítače je možné nastavit správný teplotní profil pro dané pouzdro. Podrobněji bude opravárenská stanice popsána v kapitole 2.



Obrázek 21: Opravářská stanice Fritsch Mikroplacer.

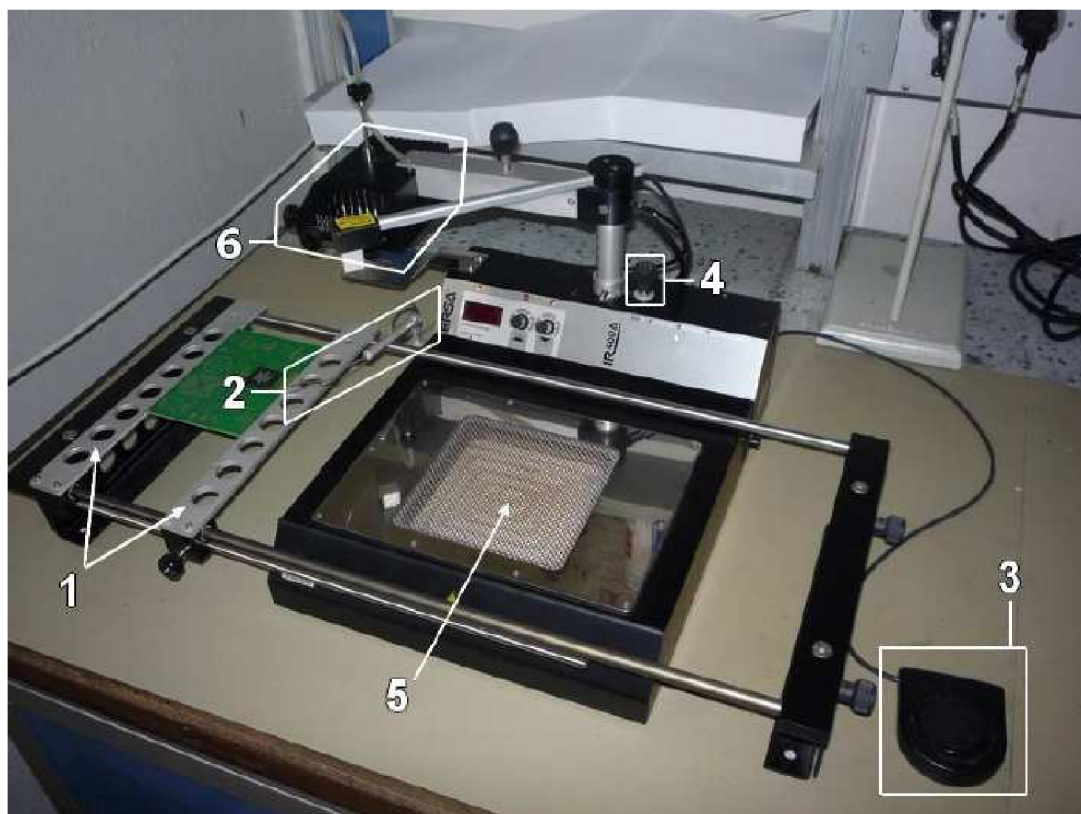
#### 1.4.4.3 Radiční ohřev

Pracuje převážně na principu infračerveného ohřevu. Využívá soustředěného infračerveného záření přiváděného na pájené místo. Perspektivní metody jsou systémy emitující infračervené záření YAG laserem. Jejich předností je dosažení úzkého a účinného paprsku, který neovlivní teplotu okolní součástky a spoje. Hlavní nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. Princip vícebodového pájecího systému je na obr. 22 [4].



Obrázek 22: Princip vícebodového pájecího systému [4].

Příkladem může být opravárenská stanice IR-400 od firmy ERSA (obr. 23). Používá techniku pájení přetavením za pomoci infračervených zářičů a je vhodná pro montáž (nebo demontáž) BGA pouzder a také SMD součástek. U tohoto zařízení dochází k přenosu tepla zářením. Zářiče jsou umístěny na spodní straně pod ocelovou sítkou a v polohovatelné horní hlavě. Topná tělesa emitují záření o vlnové délce 2 až 8  $\mu\text{m}$ . Toto záření má vlastnosti pro rovnoměrné rozložení absorpce (stejněměrné zahřívání tmavé a světlé části na montážním celku). Horní hlava obsahuje nastavitelnou clonu, aby nedocházelo k tepelnému ovlivňování okolních součástek. Clona je realizována jako soustava čtyř nastavitelných nerezových lamel [18].



Obrázek 23: Zařízení IR-400 od firmy ERSA [18],  
 1 – posuvný stolek s úchytnými rámy pro DSP,  
 2 – termočlánek typu K,  
 3 – myš pro zapínání vakuové pumpy,  
 4 – knoflík pro nastavování výšky horního ohřevu,  
 5 – spodní IR zářič,  
 6 – horní IR zářič.

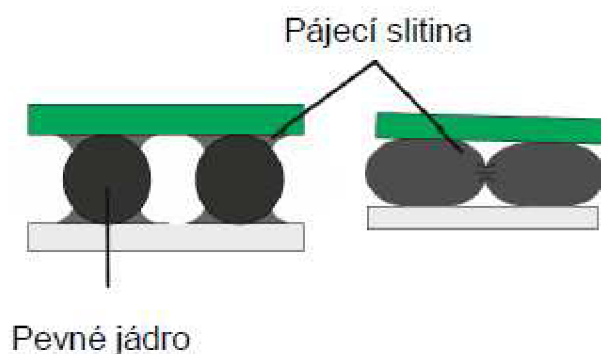
## 1.5 Pájecí kuličky

Cínové kuličky se v praxi používají pro nejrůznější aplikace 3D konstrukcí jako jsou například pouzdra BGA nebo SoP. Jsou nejlepším řešením pro spojení mnohavývodových integrovaných obvodů, které mají vývody na spodní straně pouzdra [19].

### 1.5.1 Druhy kuliček

Cínové kuličky se standardně vyrábějí v rozměrech od 100 do 900  $\mu\text{m}$  a dělí se do třech základních typů:

- Z čistého kovu – představují nejjednodušší typ pro pájení. Nejčastěji bývají vyrobeny z čistého cínu. Využívají se ve výjimečných případech.
- Slitinové – tento typ se využívá nejčastěji. Jsou vyrobeny ze slitin SnPb a nebo SnAgCu. Mají dobré vlastnosti pro pájení. Nevýhodou je, že při pájení může být problém udržet konstantní vzdálenost mezi substrátem a pouzdrem.
- S jádrem – jádro je vyrobeno z kovu (měď, stříbro) nebo z polymeru. Jádro je potaženo tenkou vrstvou pájkové slitiny. Pevné jádro zajišťuje dodržení vzdálenosti mezi substrátem a pouzdrem. Při pájení zůstává měděné jádro tuhé a povrch pájkové slitiny se rozlije pouze na potřebná místa. Jádro z kovu potom slouží jako dobře vodivý element spoje. Rozdíl mezi kuličkou s pevným jádrem a slitinovou kuličkou je na obr. 24 [19].



Obrázek 24: Rozdíl mezi kuličkami s pevným jádrem a slitinovými [19].

### 1.5.2 Výroba kuliček

Na pájecí kuličky jsou kladeny tyto požadavky:

- Homogenní a hladký povrch
- Dobrá elektrická a tepelná vodivost
- Přesnost rozměrů
- Dostupnost materiálu
- Přijatelná cena
- Nízká úroveň nečistot [19]

Existuje více způsobů výroby pájecích kuliček o požadovaných rozměrech, například olejová granulace, pulzní rozprašování nebo metoda UDS. Dále je možné kuličky vyrábět přímou metodou na substrátu, a to šablonovým tiskem, napařováním, galvanickým pokovením nebo metodou C4NP [20].

- Olejová granulace – metoda je založena na principu dělení pájkové slitiny na části o dané hmotnosti, kdy po proběhnutí výrobním procesem dostane kulička kulatý tvar.

- Metoda UDS – modernější a efektivnější metoda než olejová granulace. Metoda je založena na schopnosti tvarování roztavené pájky pomocí povrchového napětí.
- Šablonový tisk – hodí se pro aplikace, kdy nepotřebujeme vysokou kvalitu kuliček. Šablona se přiloží k substrátu s volnými plochami v místech, kde se na substrátu nacházejí pájecí plošky, přes které nanese požadované množství pájecí pasty. Poté následuje přetavení, kdy se vlivem povrchového napětí pájecí slitiny vytvoří kuličky pájky.
- Napařování – metoda je založena na principu vypařování a následné kondenzaci na určeném povrchu. Před napařováním se pokoví pájecí plošky tenkou vrstvou kovu (Cr, Cu, Ni nebo Au). Na povrchu substrátu je umístěna kovová maska s otvory na pájecích ploškách, kde se při napařování usadí pájecí slitina. Po odstranění masky následuje přetavení.
- Galvanické pokovení – postup je podobný jako u napařování. Nejdříve se nanese vrstva kovů na pájecí plošky. V dalším kroku se nanese obrazec fotorezistu s otvory na pájecí plošky. Následuje exponování, ponoření do elektrolytické lázně, odstranění masky a přetavení.
- C4NP – (Controlled Collapse Chip Connection – New Process). Tato metoda výroby spojů se používá hlavně pro výrobu na úrovni waferů. Roztavená pájka se ze zásobníku pod tlakem napouští do připravených skleněných forem. Po zatuhnutí pájky ve formách se skleněná podložka otočí a vyrovná se s pájecími ploškami na cílovém substrátu a přetaví se. Poté se formy odstraní a znovu se kuličky přetaví pro získání požadovaného tvaru [20].

### 1.5.3 Reballing

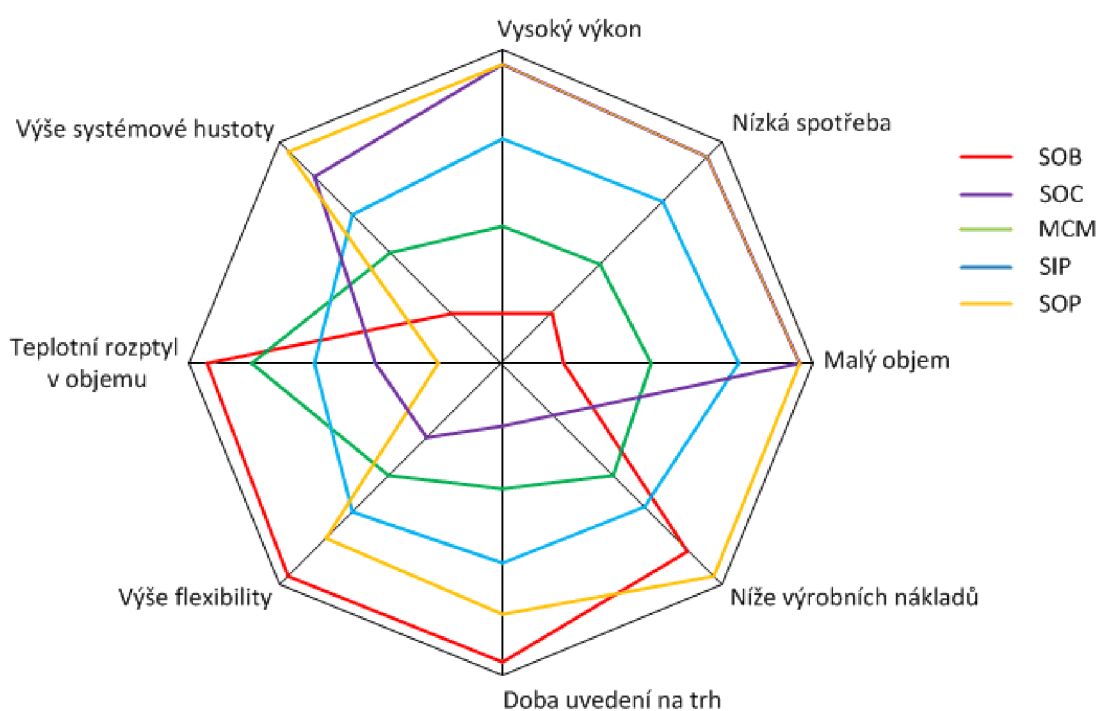
V průběhu používání komponent připojených pájkovými kuličkami může dojít ke zhoršení elektrických vlastností nebo k utržení kuličky ze substrátu nebo pouzdra. V takovém případě je potřeba kuličky vyměnit. U všech metod výměny je potřeba nejprve nanést tavidlo a odstranit staré kuličky, zbytky pájky a nečistoty z pouzdra [20].

- Šablonové osazení – výměna kuliček pomocí šablony je jedna z nejjednodušších metod výměn. Po přiložení šablony s požadovaným počtem a průměrem otvorů na pájecí kuličky se přes ni nanese tavidlo a následně se do otvorů vpraví kuličky jednoduchým nasypáním na šablonu a postupným setřásáním. Celé pouzdro se i se šablonou přetaví a po přetavení a vychladnutí se šablona odstraní.
- Osazení reballing páskou – páska se skládá ze tří složek. Hlavní součástí jsou pájecí kuličky, druhá část je polyimidem tvořený fixační celek s rozmístěním otvorů souhlasně s pájecími ploškami substrátu. Třetí část je páska citlivá na tlak, na jejíž vrchní straně je lepidlo fixující kuličky. Před přetavením je třeba odstranit pásku, která kryje lepidlo, přiložit pouzdro a sesouhlasit otvory pásky obsahující kuličky s pájecími ploškami na pouzdru.
- Osazení kuliček s pomocí laseru – metoda je založena na roztavení pájecí kuličky nad pájecí ploškou a jejím následným tuhnutím na ní. Kulička se ze zásobníku dopraví k hrdlu trysky, kde se působením laseru roztaví a steče na pájecí plošku [20].

## 1.6 Pouzdra a pouzdření

Pojem pouzdro je obecně chápán jako obal, který chrání samotný čip před různými vlivy. Moderní pouzdra musí plnit nejen funkci mechanické ochrany, ale musí zajistit také elektrické, tepelné, chemické a environmentální požadavky. Integrované obvody mohou být jednotlivé prvky, jako například výkonový tranzistor nebo zesilovač, nebo mohou mít mnoho prvků, jako například mikroprocesor používaný v počítačích. Existuje mnoho typů integrovaných obvodů na základě různých aplikací. Jednotlivé typy jsou určeny pro konkrétní oblasti použití, mají své výhody a nevýhody, které předurčují jejich možné využití v dané aplikaci. Nejnáročnější je odhad parametrů, jako je cena, výkon, počet pinů a pracovní frekvence. Proto je volba pouzdra vždy určitým kompromisem [21].

Za současné trendy v pouzdření lze považovat pouzdra SOB, SOP, SOC, MCM a SIP. SOB je nejstarší způsob pouzdření, kde jsou součástky montovány na systémovou desku. Tato technologie je dnes stále používána pro svou flexibilitu, velký teplotní rozptyl a rychlé uvedení na trh. MCM moduly jsou realizovány dvěma nebo více čipy montovanými na jednom substrátu. Substrátem může být sklolaminát FR4 (MCM-L), keramika  $Al_2O_3$  (MCM-C) nebo křemík (MCM-D). Pouzdro SIP (System in Package) je koncept chápáný jako celý systém v jednom pouzdře. V širším slova smyslu jej lze definovat jako vrstvení integrovaných obvodů. Pouzdro SOC (System on Chip) je vrcholem uplatnění vědy o integrovaných obvodech a vědy zabývajícími se obvodovými principy. Jedná se o systém na čipu a je snahou celý systém integrovat. Pouzdro SOB (System on Board) sdružuje několik zapouzdřených obvodů propojených na úrovni jediného substrátu. SOP (System on Package) je analogický s výše uvedeným SOC, rozdíl je v tom, že SOC má za úkol integrovat heterogenní součástky na čip, kdežto snahou SOP je integrace několika funkčních bloků na společný nosný substrát [21].



Obrázek 25: Porovnání pouzdřících technologií [21].

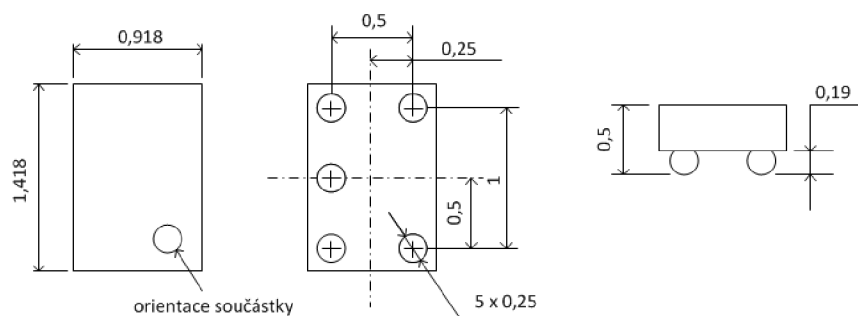


Problematika druhů pouzder u integrovaných obvodů je velmi obsáhlá a pro účely této diplomové práce bude nadále stačit podrobnější pojednání o pouzdrech QFN, QFP, SOIC a BGA, které budou použity pro nastavení teplotních profilů na stanici Fritsch Mikroplicer.

### 1.6.1 pouzdro BGA

Pouzdro BGA má vývody realizovány kuličkami, případně válečkami pájky a konstrukčně vychází z pouzder PGA, která mají drátové vývody umístěny pod pouzdem. Nejběžnějším pouzdem je PBGA (Plastic Ball Grid Array). Skládá se z vícevrstvé podložky plošného spoje a z matice kuliček pájky. Polovodičový čip je přilepen na pozlacenou plošku na základním substrátu nejčastěji z FR4. Keramický BGA (CBGA – Ceramic Ball Grid Array) používá keramickou podložku, k níž je připojen křemíkový čip. CBGA se používá pro menší velikosti pouzder kvůli různé tepelné roztažnosti keramické desky a sklo epoxidové desky, což jsou běžně používané materiály. Další používané druhy pouzder BGA jsou M - BGA a T - BGA. M - BGA (Metal Ball Grid Array) používá jako základní materiál anodicky oxidovaný hliník. Polovodičový čip je seshora zakryt hliníkovým krytem, který je tak lépe elektricky stíněn. T - BGA (Tape Ball Grid Array) – u těchto pouzder je polovodičový čip připevněn technologií Flip Chip na pružnou polyamidovou podložku, která je oboustranně pokovena mědí. Na jedné straně je realizováno propojení a druhá strana je uzemněna a slouží tak jako stínění [15].

Pro účely této diplomové práce bylo vybráno pouzdro DSBGA5 (Die-Size Ball Grid Array 5), které obsahuje 5 pájkových kuliček ze spodní strany pouzdra. DSBGA je typ BGA pouzdra, jehož velikost je právě taková, jaká je velikost matice pájkových kuliček. Toto pouzdro je někdy nazýváno jako „real chip-size“ BGA (CSP) [22].



Obrázek 26: Pouzdro DSBGA5, údaje v mm [23].

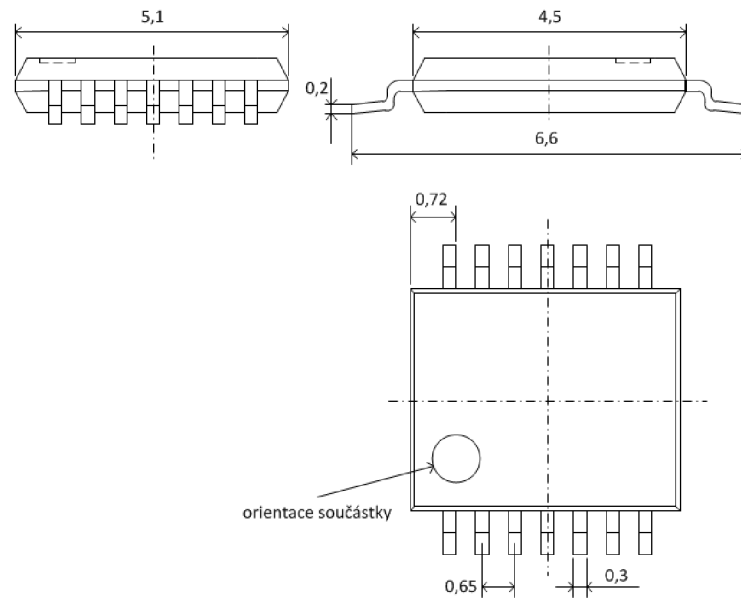
### 1.6.2 Pouzdro SOIC

Pouzdro SOIC (Small Outline Integrated Circuit) je ekvivalentem k pouzdrům DIP, mají stejný počet vývodů na obou stranách. Vývody zaujímají jen polovinu až třetinu plochy oproti pouzdrům DIP. Pouzdra SOIC se dělí na:

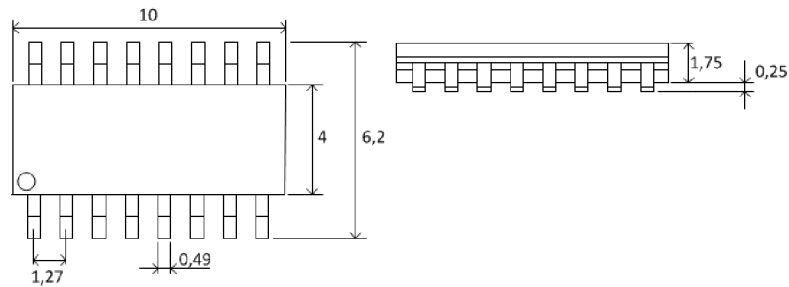
- SOJ – vývody mají tvar písmene „J“ a je možné je pájet nebo montovat do patič.
- SSOP (Shrink Small Outline Package) – je zmenšené SOIC.
- TSSOP (Thin-Shrink Small Outline Package) – tenké SSOP, dělí se na dva typy, na kterých jsou vývody na kratších nebo na delších stranách.
- MSOP (Miniature Small Outline Package) – miniaturní SOP.
- QSOP (Quarted-sized Small Outline Package) – čtvrtinové SOP.

- HSOP (Heat Small Outline Package) – se speciálním chladičem [21].

Pro účely diplomové práce bylo z této kategorie vybráno pouzdra TSSOP14 a SOIC16. Jejich pouzdra jsou nakreslena na následujících obrázcích.



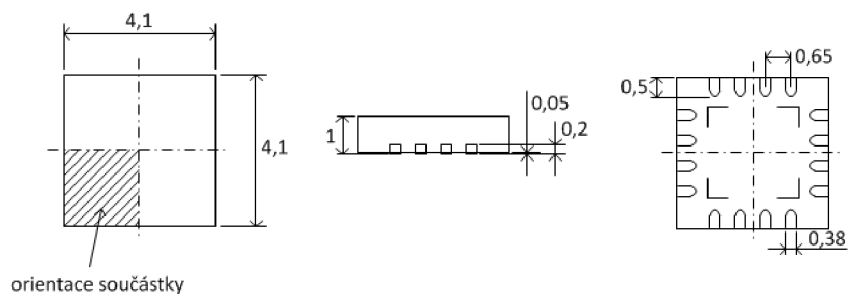
Obrázek 27: Pouzdro TSSOP14, údaje v mm [24].



Obrázek 28: Pouzdro SOIC16, údaje v mm [25].

### 1.6.3 Pouzdro QFN

QFN (Quad Flat No Leads) jsou pouzdra, jejichž vývody nepřesahují povrch pouzdra, vývody jsou umístěny ze spodu pouzdra a jsou tvaru plošek. U těchto pouzder se výrazně snížila indukčnost vývodů [21]. Pro účely diplomové práce bylo vybráno pouzdro QFN16.



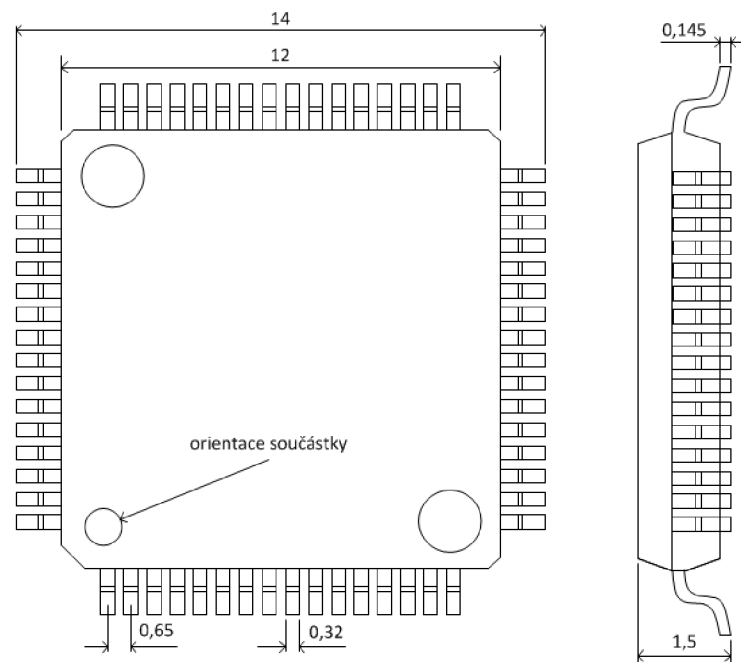
Obrázek 29: Pouzdro QFN16, údaje v mm [26].

### 1.6.4 Pouzdro QFP

QFP (Quad Flat Package) je nástupcem pouzder SOIC. Mají vývody tvaru „J“ nebo „L“ – častější. Rozdíl mezi SOIC je v tom, že QFP mají vývody po všech čtyřech stranách. Dělení pouzder QFP:

- PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) mají vývody ve tvaru „J“.
- LQFP (Low Quad Flat Package) jsou oproti pouzdrům QFP nižší.
- TQFP (Thin Quad Flat Package) jsou pouzdra ještě nižší než LQFP [21].

Pro účely diplomové práce bylo vybráno pouzdro LQFP64.



**Obrázek 30: Pouzdro LQFP64, údaje v mm [27].**

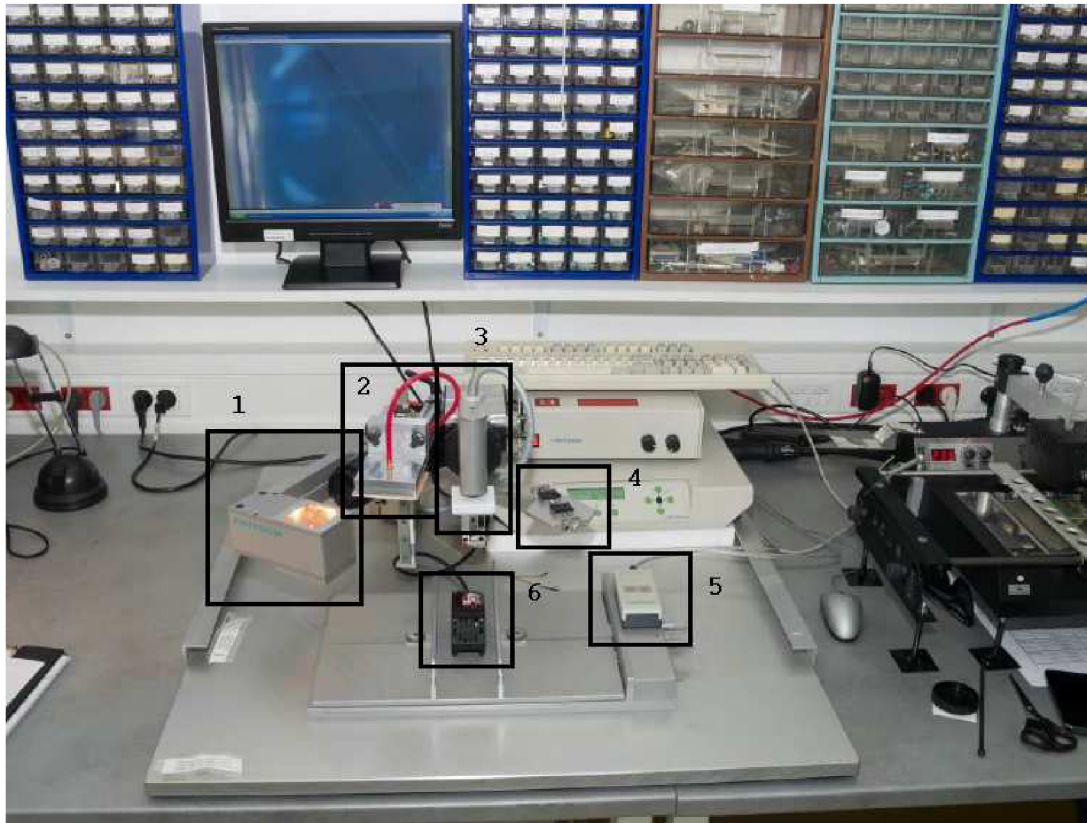
## 2. Popis opravárenské stanice Fritsch a měření teplotních profilů

### 2.1 Popis laboratorní horkovzdušné pájecí stanice Fritsch Mikroplacer

Opravárenská horkovzdušná pájecí stanice Fritsch Mikroplacer umožňuje provádět opravy na DPS formou výměny součástek v pouzdrech jako je například BGA, Ultra – Fine – Pitch a nebo SoP. Horkovzdušná hlava umožňuje při demontáži pouzder pouzdro pomocí podtlaku, po dokončení ohřevu pouzdra nad teplotu tavení pájky, přichytit a zvednout, aniž by bylo nutné pouzdro pomocí ručních nástrojů ze substrátu odstraňovat. Pomocí kamerového systému je osazení pouzder velmi snadné. Rameno kamerového systému obsahuje polopropustné zrcadlo, jímž lze na monitoru PC současně pozorovat pouzdro a substrát a lze tak přesně sesouhlasit pouzdro se substrátem. Pro hrubé sesouhlasení je možné při přísunu stlačeného vzduchu do vzduchové podložky snadno s touto podložkou manipulovat a pro jemné sesouhlasení je podložka vybavena mikroposuvy. Pro lepší prohřev DPS je stanice vybavena IR předehřevem, který se vkládá pod DPS. Software zařízení obsahuje nastavení teplotních profilů pro různě velká pouzdra. Samozřejmostí je tyto přednastavené teplotní profily jakkoliv modifikovat pro potřeby pájení a oprav na deskách plošných spojů.

Pro dosažení kvalitního zapájení součástky a nastavení teplotního profilu pro danou součástku lze na stanici Fritsch Mikroplacer měnit hned několik parametrů. Hlavní parametr je regulace průtoku vzduchu [ $l \text{ min}^{-1}$ ] a jeho teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Další významný parametr je hodnota výkonu pro IR předehřev z dolní strany desky plošných spojů.

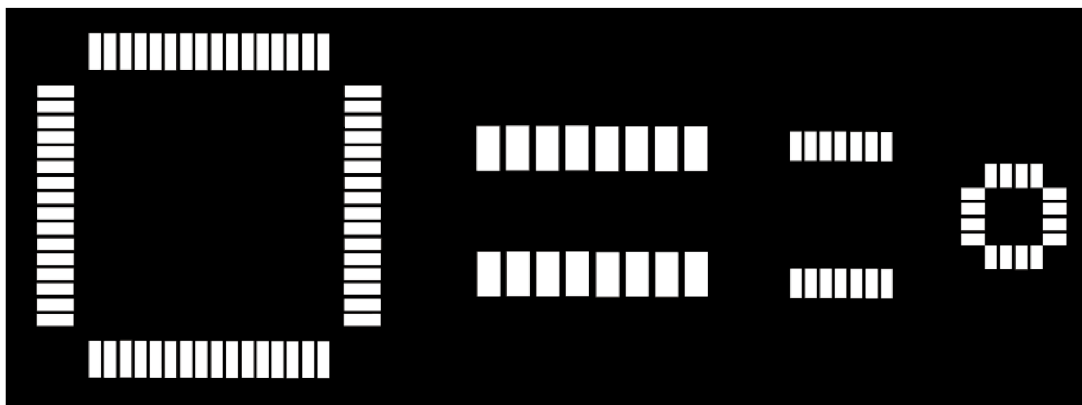
Stanice Fritsch Mikroplacer je vybavena výklopným ramenem pro osazování pájecích kuliček. Toto zařízení je konstruováno jako vakuová vývěva se šablonami, do kterých se nasávají kuličky a poté se umísťují na pouzdra součástek. Šablona (matrice) je výměnná a umožňuje tak osazování kuliček pro nejrůznější pouzdra BGA [19].



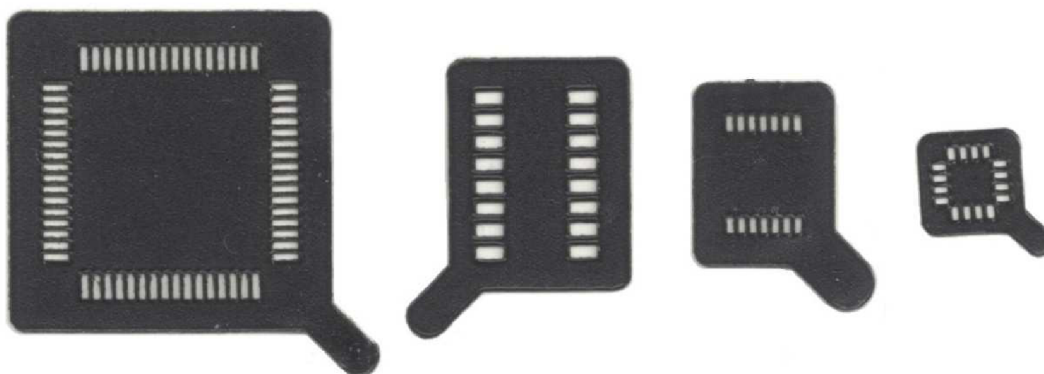
**Obrázek 31: Opravárenská stanice Fritsch Mikroplacer, převzato z [19],**  
 1 – rameno kamerového systému,  
 2 – rameno pro osazování pájecích kuliček,  
 3 – horkovzdušná hlava,  
 4 – rameno pro upevnění pouzdra,  
 5 – ovladač podtlaku a fixace horkovzdušné hlavy,  
 6 – IR přehřev.

## 2.2 Výroba testovacích DPS a šablon pro tisk pájecí pasty

Před zahájením samotné práce na opravárenské stanici Fritsch, bylo nutné navrhnout a vyrobit jednostrannou testovací desku plošných spojů typu FR4 a šablony pro tisk pájecí pasty. DPS byly vyrobeny ve spolupráci s panem Ing. Starým, Ph.D. v laboratořích Ústavu elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně. Šablony byly vyrobeny panem Doleželem v rámci jeho bakalářské práce jako experimentální šablony. Motiv DPS byl navržen v programu Eagle. Motiv pro výrobu DPS byl dále upraven v grafickém programu s cílem získat negativní motiv (z důvodu používání negativního fotorezistu v laboratoři). DPS byla navržena tak, aby se na ni mohlo zapájet 20 – 30 ks integrovaných obvodů od každého druhu, a to z důvodu potřeby experimentovat s nastavením správného teplotního profilu pro zapájení a odpájení každého druhu integrovaných obvodů.



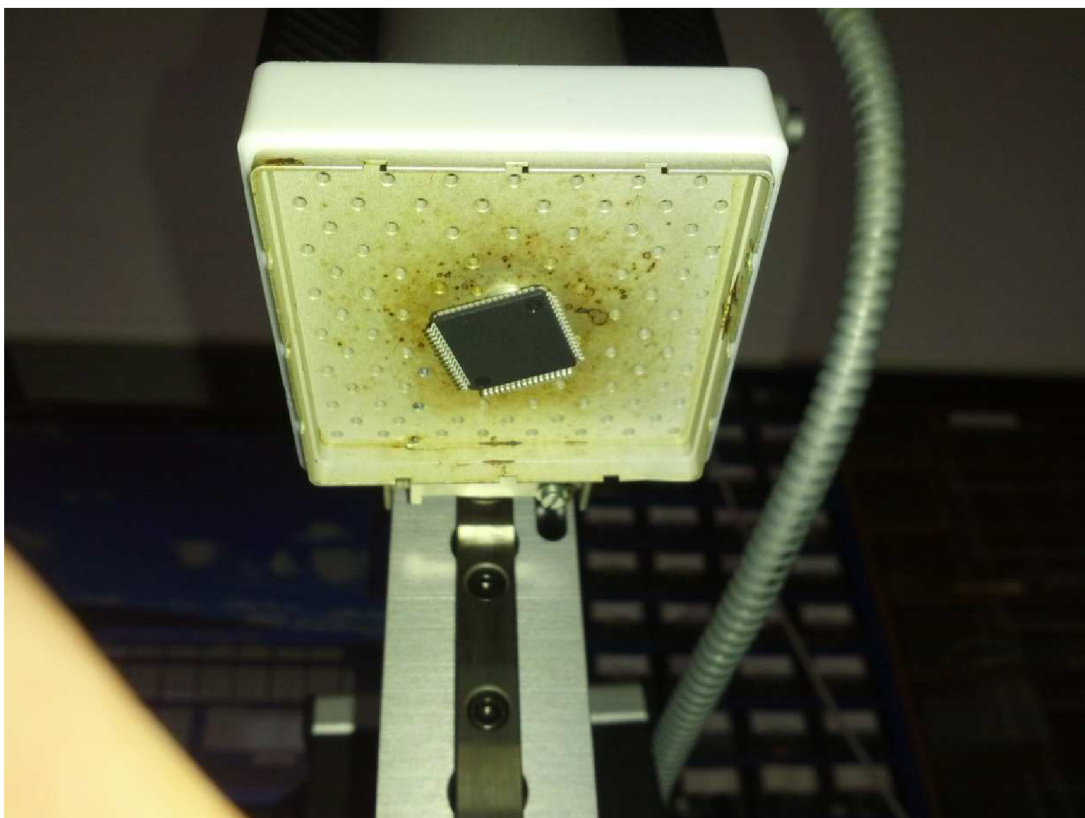
Obrázek 32: Motiv obrazce IO pro výrobu DPS, zleva doprava: LQFP64, SOIC16, TSSOP14 a QFN16



Obrázek 33: Šablony pro tisk pájecí pasty

### 2.3 Teplotní profily, montáž a demontáž IO na stanici Fritsch Mikroplacer

Montáž a demontáž integrovaného obvodu probíhá přímo na stanici Fritsch Mikroplacer. Horkovzdušná hlava umožňuje součástku podtlakem přidržet a pomocí ramene s kamerovým systémem součástku přesně vycentrovat a osadit do pájecí pasty. Poté se zvolí vhodný pájecí profil pro danou součástku, horkovzdušná hlava se umístí těsně nad pájenou součástku, vloží se pod DPS infračervený přehřev a spustí se program. Tisk pájecí pasty se provádí ručně za použití dané šablony, která se přesně umístí na pájecí plošky DPS a pomocí třerky se pasta přenese na pájecí plošky. Pro experimenty je použita bezolovnatá pájecí pasta SnAg3Cu0,5 (Almit) s obsahem 12 % tavidla. V příloze na konci práce jsou uvedeny detailnější obrázky procesu pájení pouzder.



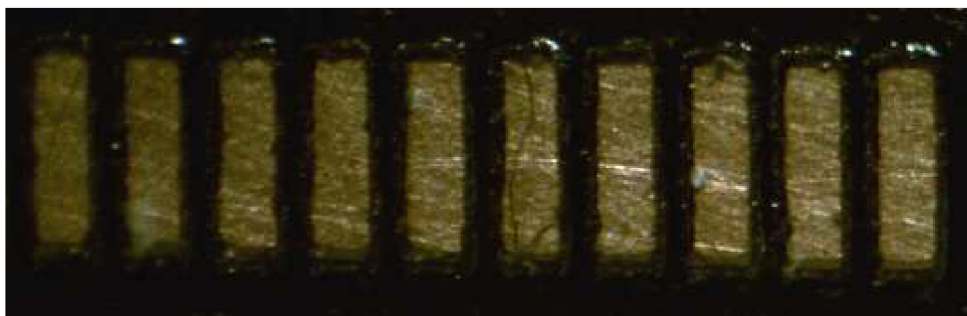
**Obrázek 34: Přichycený integrovaný obvod na horkovzdušné hlavě**

#### 1. Pouzdro LQFP64

Proces umístění šablony na pájecí plošky byl u tohoto typu integrovaného obvodu obtížnější než v ostatních případech. Je to dáno velkým počtem pinů a relativně velkými rozměry pouzdra. Samotný proces tisku pasty probíhal bez problémů, pasta nezůstávala ve velké míře na stěnách šablony a na pájecích ploškách se tak dostalo dostatečné množství pasty pro kvalitní zapájení. Osazení součástky pomocí stanice Fritsch Mikroplacer bylo na monitoru PC dobře zřetelně viditelné a není s ním žádný problém. Kvalitního zapájení integrovaného obvodu se dosáhlo až po několikátém pokusu, pokaždé s odlišným nastavením teplotního profilu. Výsledný teplotní profil spolu s nastavením pro pouzdro LQFP64 je na obrázcích níže (obr. 41 a 42 a tab. 7 a 8). Širší pohled na pouzdro LQFP64 je v příloze na obr. 74 až 79.



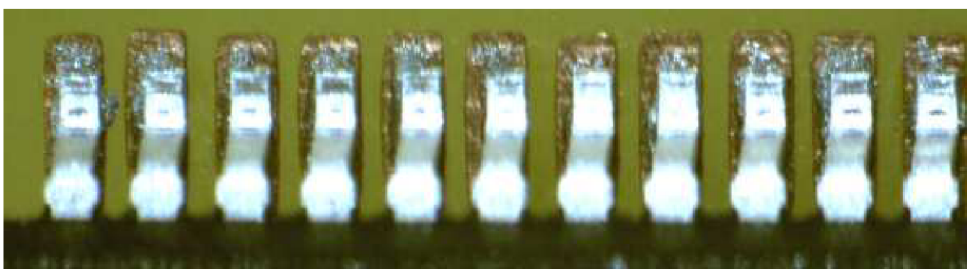
**Obrázek 35: Pájecí plošky na DPS**



**Obrázek 36: Umístění šablony na pájecích ploškách**



**Obrázek 37: Natisknutá pájecí pasta**



**Obrázek 38: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty**

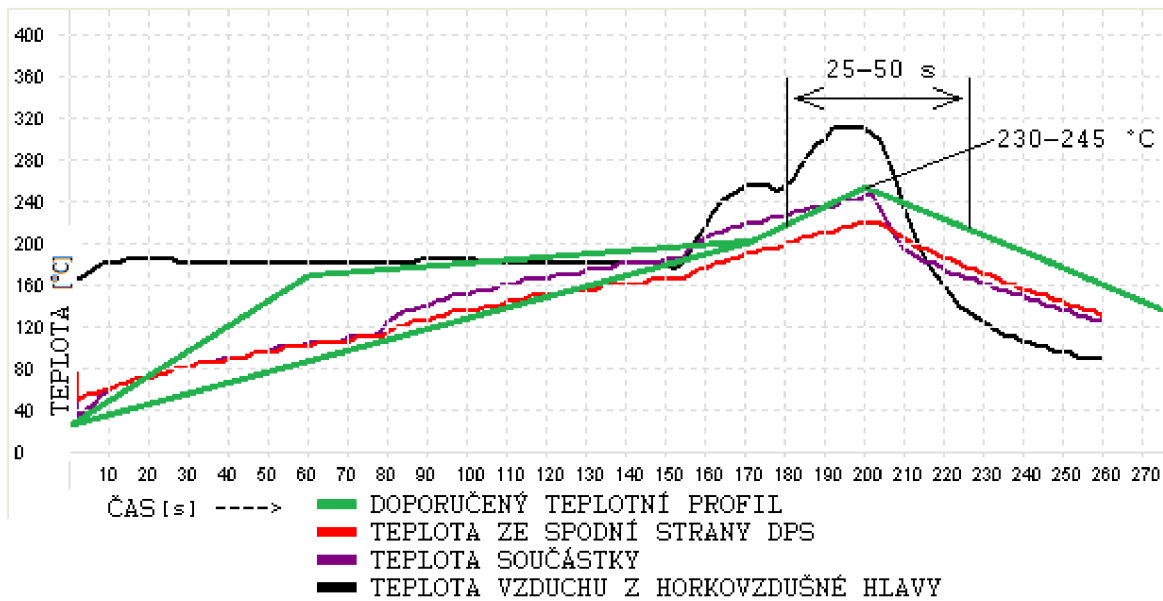


**Obrázek 39: Zapájený integrovaný obvod**

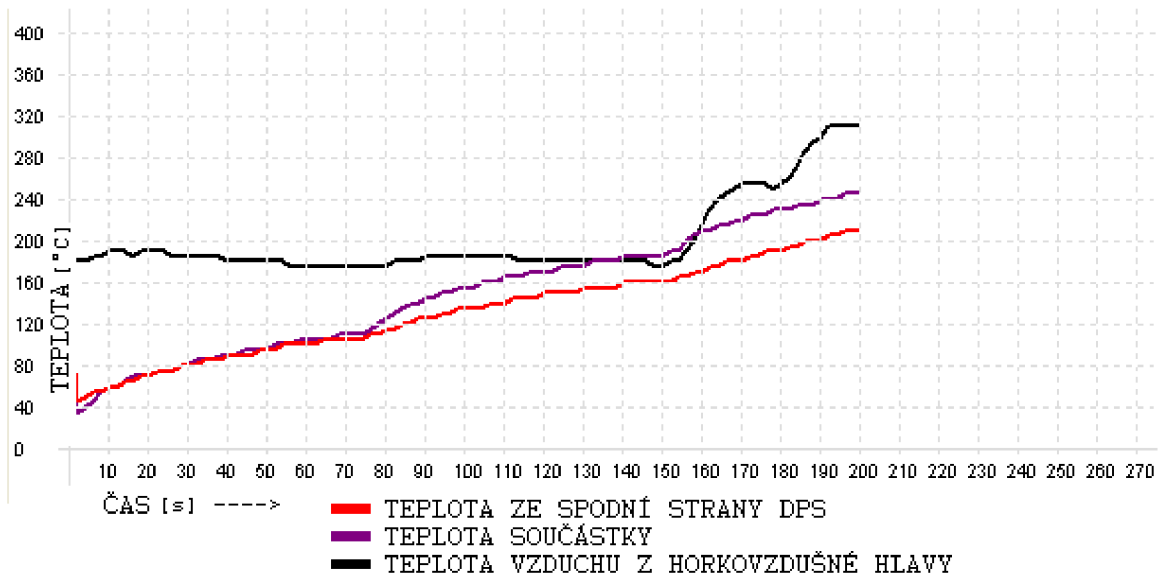


**Obrázek 40: Demontovaný integrovaný obvod**





Obrázek 41: Naměřený a doporučený teplotní profil pro montáž součástky (mezera mezi zelenými čarami je procesní okno)



Obrázek 42: Teplotní profil pro demontáž součástky

Naměřený teplotní profil pro montáž součástky dobře odpovídá doporučenému teplotnímu profilu pro danou pájecí pastu. Čas nad teplotou tavení pájky je 35 s, což dobře zapadá do doporučeného intervalu 25 – 50 s. Vrcholová teplota na součástce je 240 °C. Teplotní profil pro demontáž součástky je v podstatě stejný jako pro montáž, jen je vynechána zóna chlazení. Výsledek po takto demontovaném integrovaném obvodu je vidět na obr. 40. Nastavení teplotních profilů je v tab. 7 a 8. Nejkritičtějšími parametry při nastavování teplotních profilů byla teplota a čas jednotlivých zón.

**Tabulka 7: Hodnoty nastavení teplotního profilu pro montáž součástky**

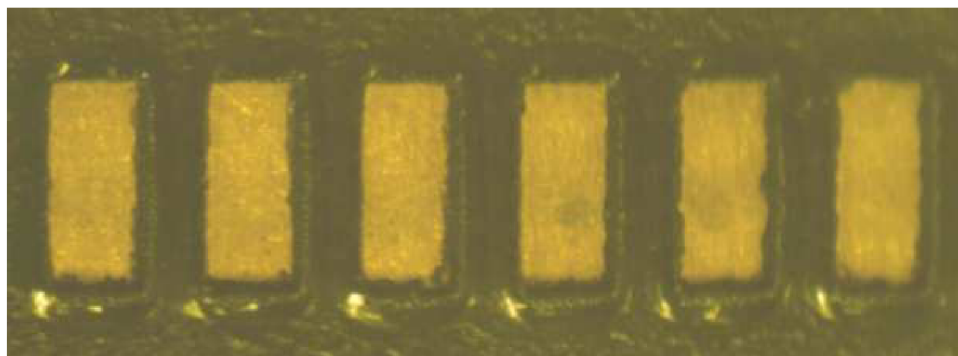
	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	25
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	60
IR předehřev [W]	450	750	-

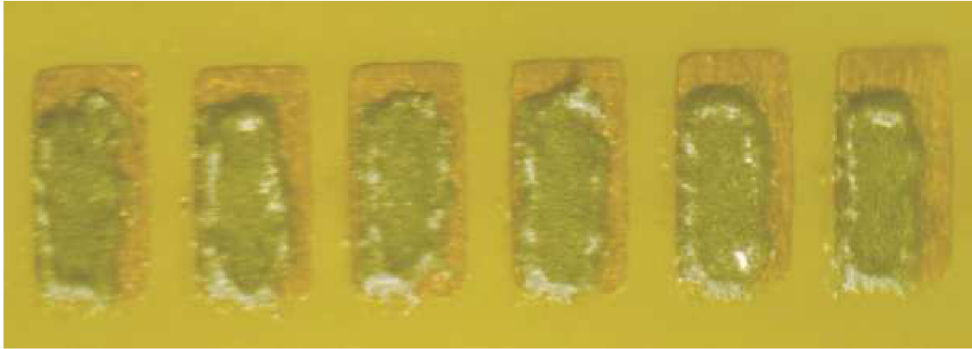
**Tabulka 8: Hodnoty nastavení teplotního profilu pro demontáž součástky**

	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	-
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	0
IR předehřev [W]	450	750	-

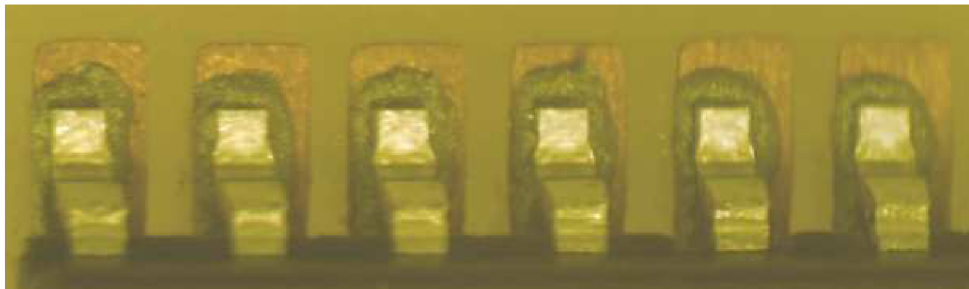
## 2. Pouzdro SOIC16

Tisk pasty přes šablonu pro pouzdro SOIC16 byl ze všech druhů pouzder nejnadhnější, a to z důvodu větších otvorů v šabloně pro pastu. Sesouhlasení šablony a pájecích plošek na DPS bylo snadné. Pasta na stěnách šablony zůstávala jen minimálně. Smáčivost povrchu součástky a pájecí plošky je dobrá, a proto i zapájení součástky je kvalitní. Pro demontáž součástky byl použit stejný teplotní profil jako pro montáž, ale bez zóny chlazení. Výsledný teplotní profil pro pouzdro SOIC16 je na obr. 49 a 50 a jeho nastavení v tab. 9 a 10.

**Obrázek 43: Pájecí plošky na DPS****Obrázek 44: Umístění šablony na pájecích ploškách**



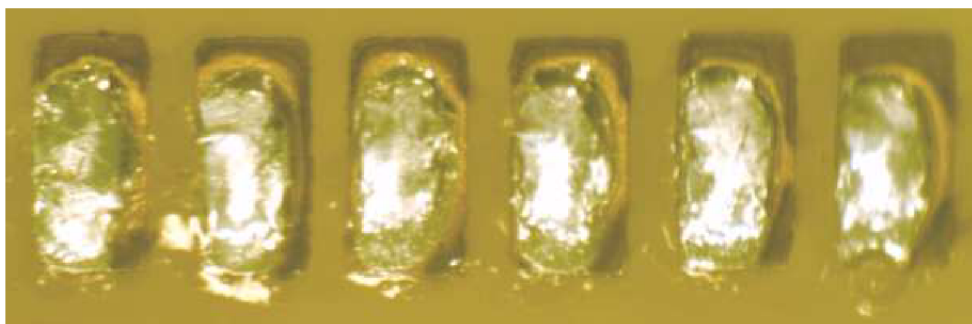
**Obrázek 45: Tisk pasty**



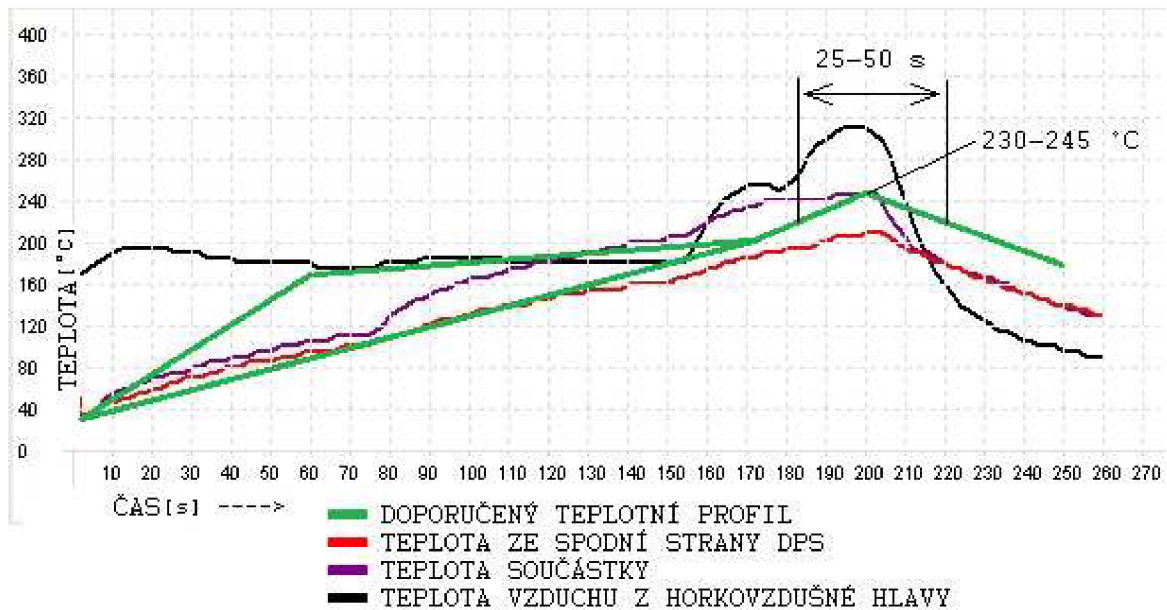
**Obrázek 46: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty**



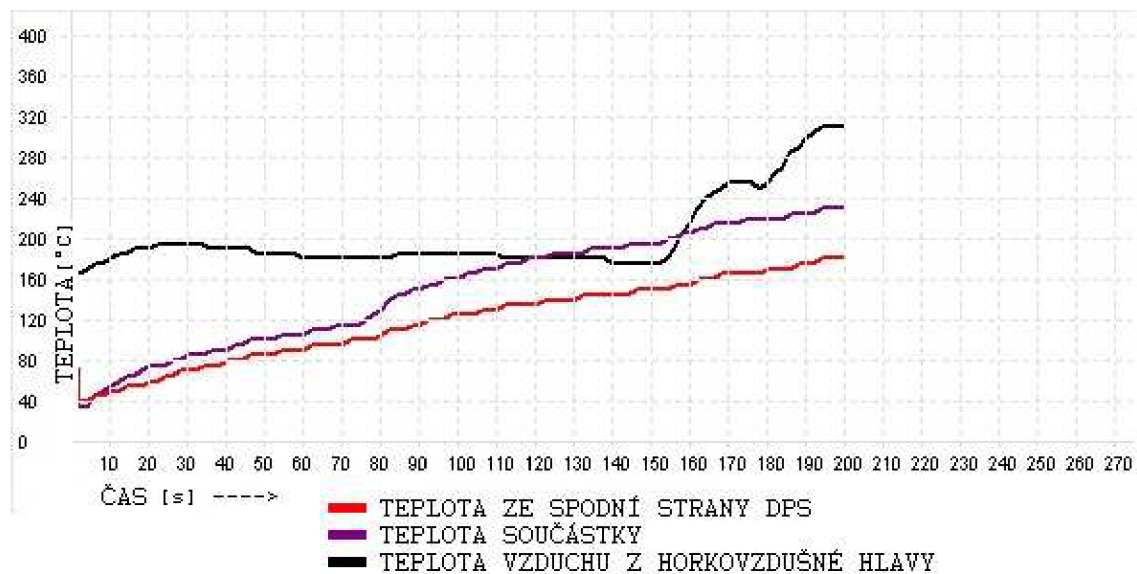
**Obrázek 47: Zapájený integrovaný obvod**



**Obrázek 48: Demontovaný integrovaný obvod**



Obrázek 49: Naměřený a doporučený teplotní profil pro montáž součástky



Obrázek 50: Teplotní profil pro demontáž součástky

Teplotní profil pro montáž součástky dobře odpovídá doporučenému teplotnímu profilu. Vrcholová teplota dosažená na součástce je 245 °C, což je maximální doporučená teplota od výrobce pájecí pasty v intervalu 230 – 245 °C. Čas nad teplotou tavení pájecí pasty je v tomto případě 45 s. V případě teplotního profilu pro demontáž součástky je vrcholová teplota 235 °C. V úseku času 120 až 155 s na teplotním profilu pro montáž součástky je teplota na součástce větší, než je teplota horkého vzduchu vycházejícího z horkovzdušné hlavy. Je to dáno IR přehřevem ze spodní strany DPS, který má velký vliv na celkovou teplotu DPS.

**Tabulka 9: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro montáž součástky**

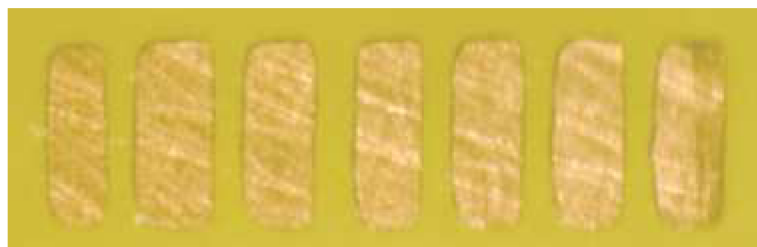
	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	25
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	60
IR předehřev [W]	450	600	-

**Tabulka 10: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro demontáž součástky**

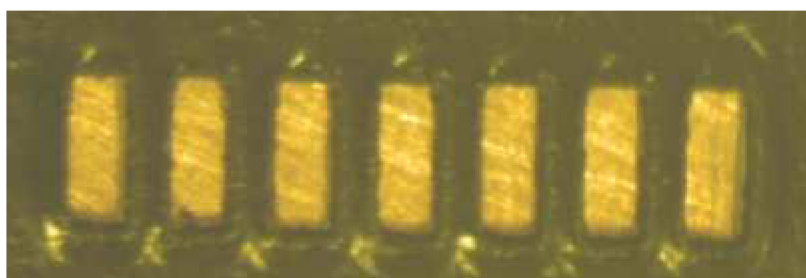
	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	-
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	0
IR předehřev [W]	450	600	-

### 3. Pouzdro TSSOP14

Tisk pasty přes šablonu byl snadný, i když je rozteč pájecích plošek stejná jako u pouzdra LQFP64. Pouzdro je menší a sesouhlasení s pájecími ploškami snadnější. Na pájecí plošky se dostalo dostatečné množství pájecí pasty, které zaručilo kvalitní zapájení součástky (obr. 53).



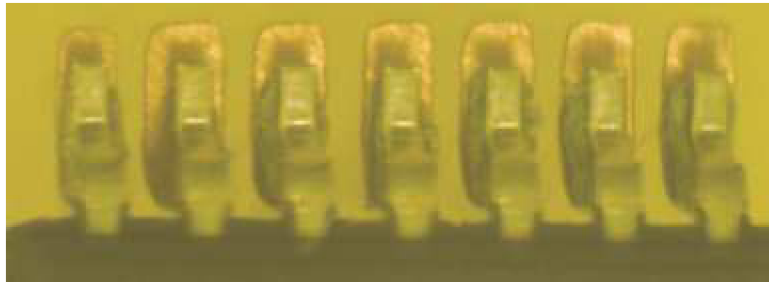
**Obrázek 51: Pájecí plošky na DPS**



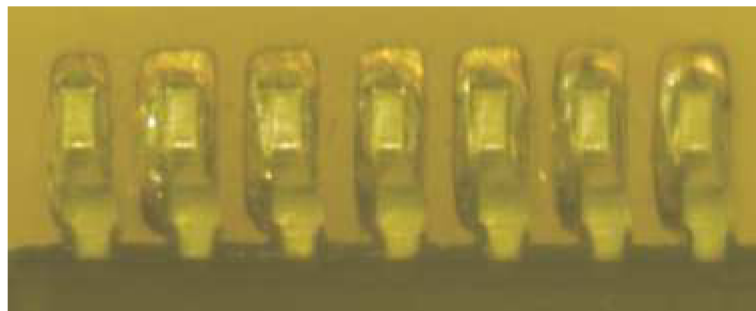
**Obrázek 52: Umístění šablony na pájecích ploškách**



**Obrázek 53: Natisknutá pájecí pasta**



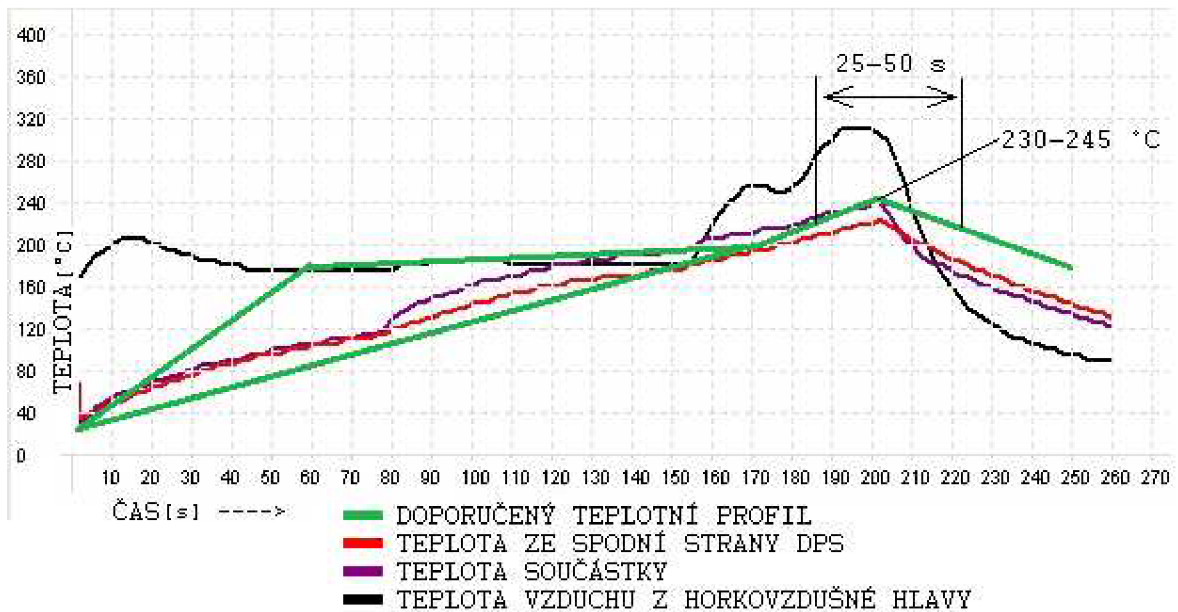
**Obrázek 54: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty**



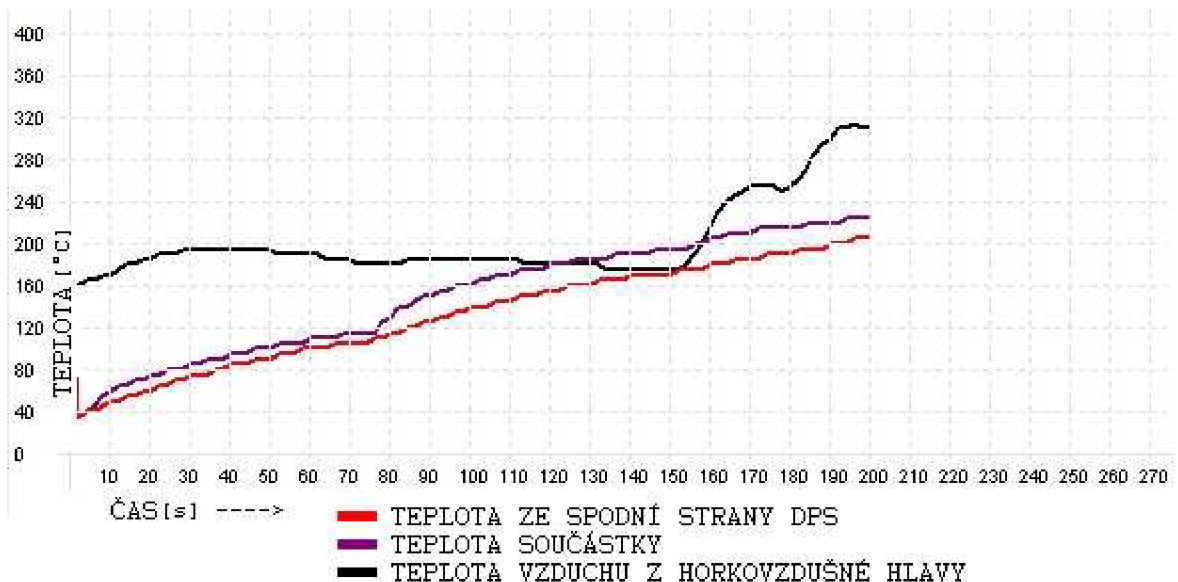
**Obrázek 55: Zapájený integrovaný obvod**



**Obrázek 56: Demontovaný integrovaný obvod**



Obrázek 57: Naměřený a doporučený teplotní profil pro montáž součástky



Obrázek 58: Teplotní profil pro demontáž součástky

V tomto případě byl čas nad teplotou tavení pájecí pasty jen 25 s, což je ještě v rámci doporučeného intervalu 25 – 50 s. Vrcholová teplota zde byla 240 °C. Teplota součástky zde velmi přesně kopíruje doporučený průběh teplotního profilu, jen prvních 10 s chlazení teplota součástky prudce padá a nadále se pak drží v doporučené rychlosti chlazení.

Tabulka 11: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro montáž součástky

	Přehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $l\ min^{-1}$ ]	10	15	25
Teplota [°C]	180	290	-
Čas [s]	150	50	60
IR přehřev [W]	450	600	-

**Tabulka 12: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro demontáž součástky**

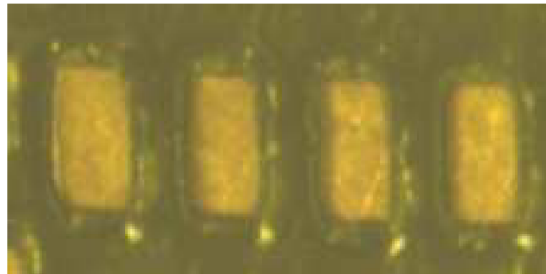
	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	-
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	0
IR předehřev [W]	450	600	-

#### 4. Pouzdro QFN

Tisk pasty přes šablonu byl u tohoto typu pouzdra podobný jako u pouzdra TSSOP14. Velikost šablony je ze všech nejmenší a v důsledku toho často zůstávaly zbytky pasty i mimo šablonu. V tomto experimentu to ničemu nevadilo, ale v případě provádění oprav na osazených DPS by se tomu muselo zabránit. Zabránit tomu lze použitím menší těrky a nanášení méně pasty na šablonu nebo vyrobit větší šablonu.



**Obrázek 59: Pájecí plošky na DPS**

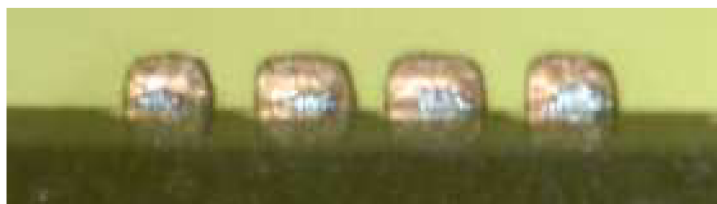


**Obrázek 60: Umístění šablony na pájecích ploškách**



**Obrázek 61: Natisknutá pájecí pasta**

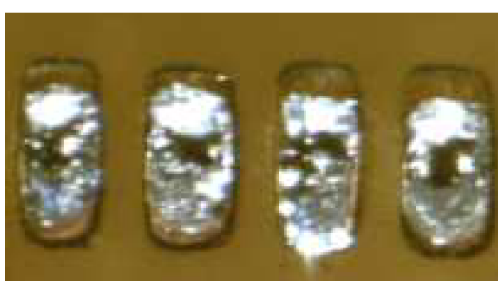




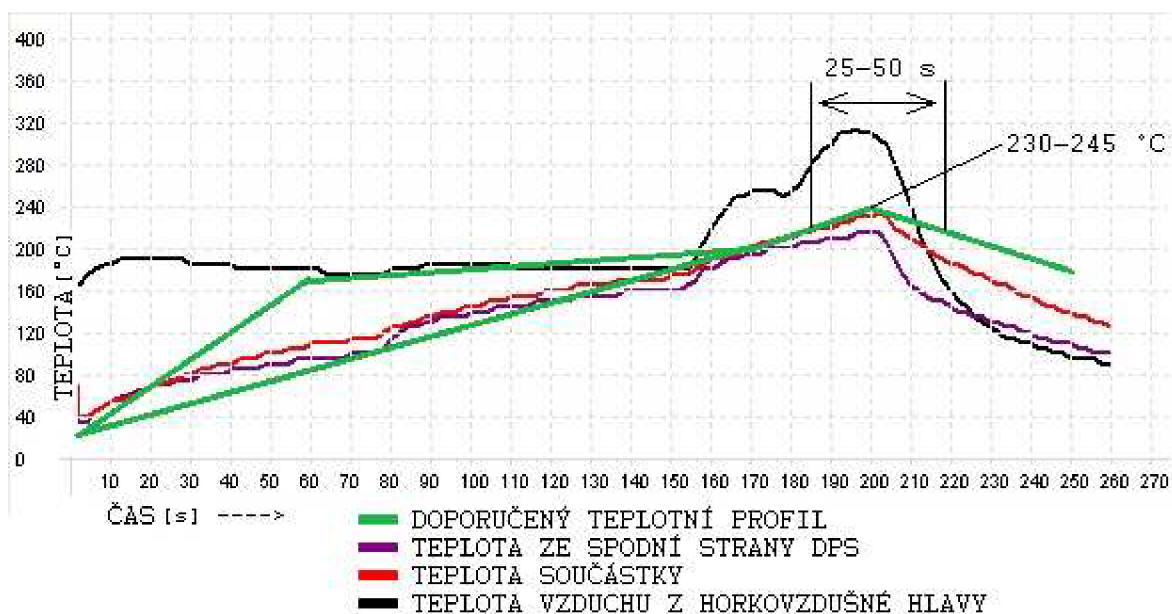
Obrázek 62: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty



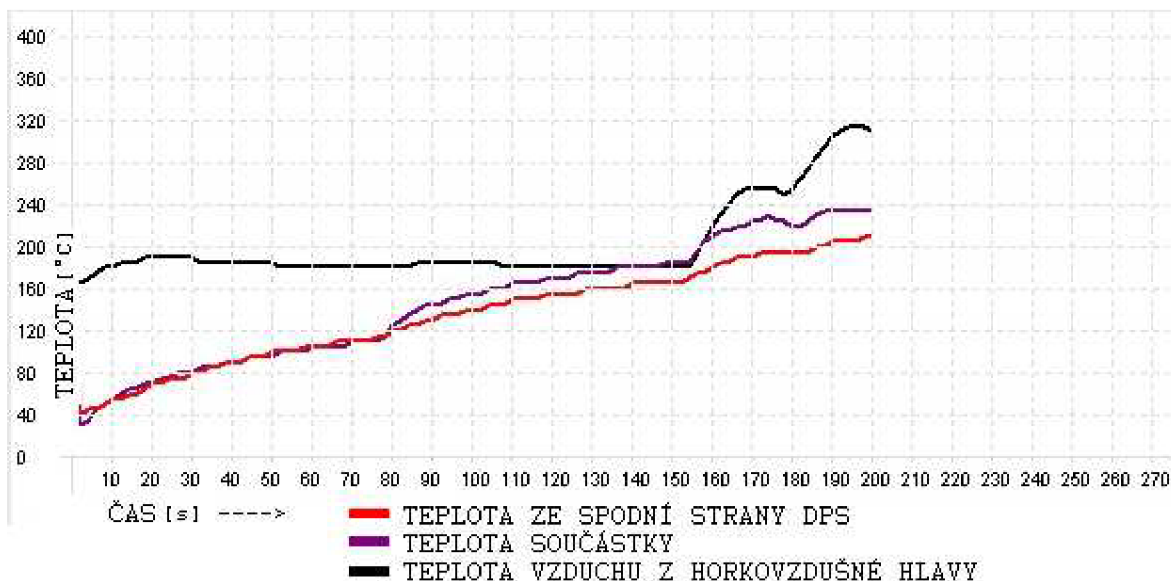
Obrázek 63: Zapájený integrovaný obvod



Obrázek 64: Demontovaný integrovaný obvod



Obrázek 65: Naměřený a doporučený teplotní profil pro montáž součástky



**Obrázek 66: Teplotní profil pro demontáž součástky**

Naměřený teplotní profil i zde dobře odpovídá doporučenému teplotnímu profilu od výrobce pájecí pasty, jen čas nad teplotou tavení pájecí pasty je zde o 5 s kratší, než je doporučený interval, nicméně jak je z obr. 63 patrné, došlo ke kvalitnímu zapájení. Pro demontáž součástky byl použit stejný teplotní profil bez zóny chlazení a takto rozehřátý integrovaný obvod byl uchycen horkovzdušnou hlavou, obdobně jako na obr. 34.

**Tabulka 13: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro montáž součástky**

	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $l\ min^{-1}$ ]	10	15	25
Teplota [ $^{\circ}C$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	60
IR předehřev [W]	450	750	-

**Tabulka 14: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro demontáž součástky**

	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $l\ min^{-1}$ ]	10	15	-
Teplota [ $^{\circ}C$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	0
IR předehřev [W]	450	750	-

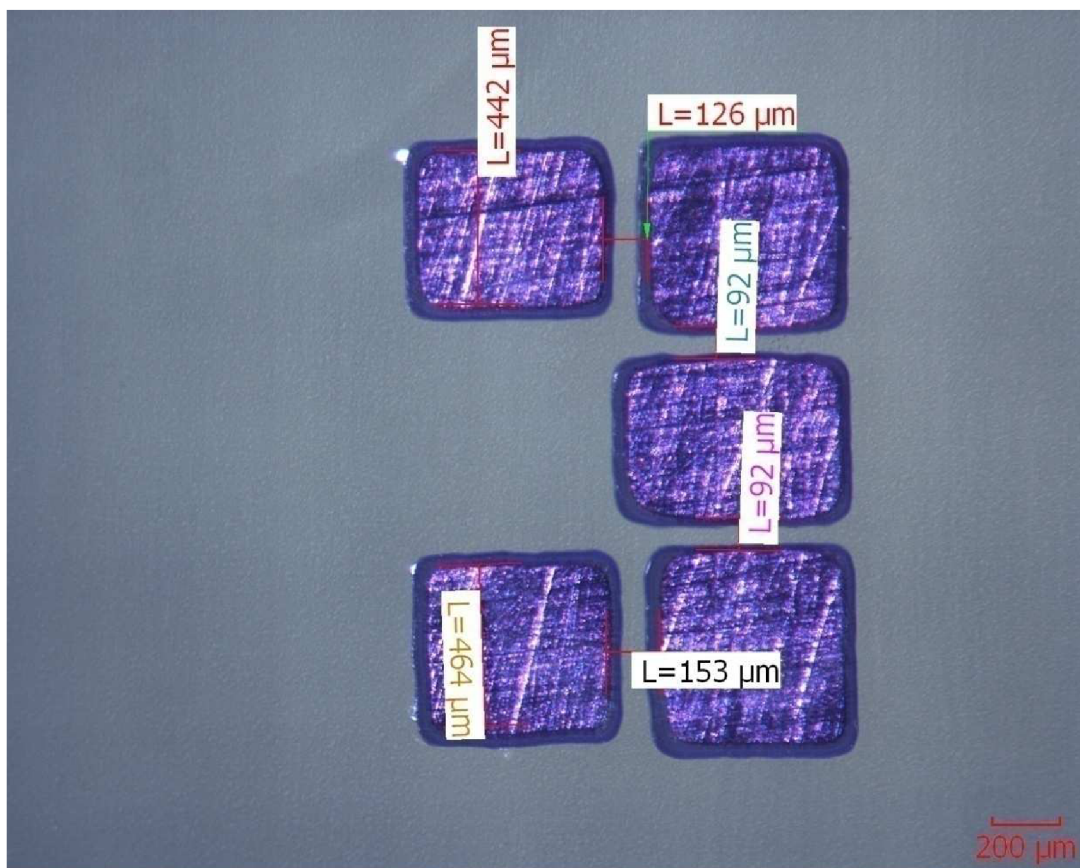
## 5. Pouzdro DSBGA5

Tento typ pouzdra je nejmenší ze všech pájených pouzder v této práci. Pouzdro má ze spodní strany kuličky pájky a jeho montáž na DPS tak spočívá v umístění na pájecí plošky a následné přetavení. Velikost pouzdra je jen  $1,4 \times 1\ mm$  a přesné sesouhlasení pájecích kuliček s pájecími ploškami bylo výrazně obtížnější než v ostatních případech. Na monitoru kamerového systému bylo jen velmi málo vidět a umístění na pájecí plošky bylo

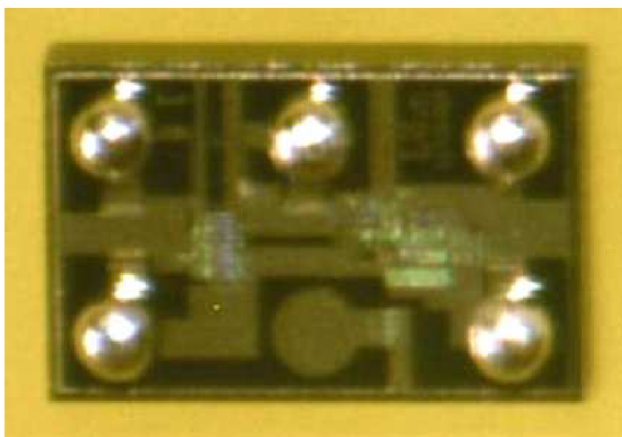
tak spíše orientační, nežli přesné. Bez problémů nebyla ani výroba DPS v laboratořích Ústavu elektrotechnologie. Na testovací DPS kde bylo pájecích plošek pro celkem 32 součástek DSBGA5 jich byla použitelná jen asi polovina. Důvodem jsou velmi malé mezery mezi ploškami, které se pohybovali kolem  $100\ \mu\text{m}$ . Detail pájecích plošek je na obr. 68.



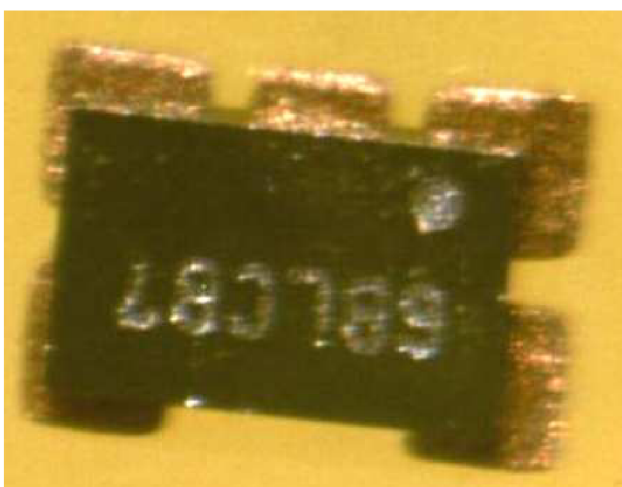
Obrázek 67: Pájecí plošky pro DSBGA5



Obrázek 68: Detail pájecích plošek pro DSBGA5



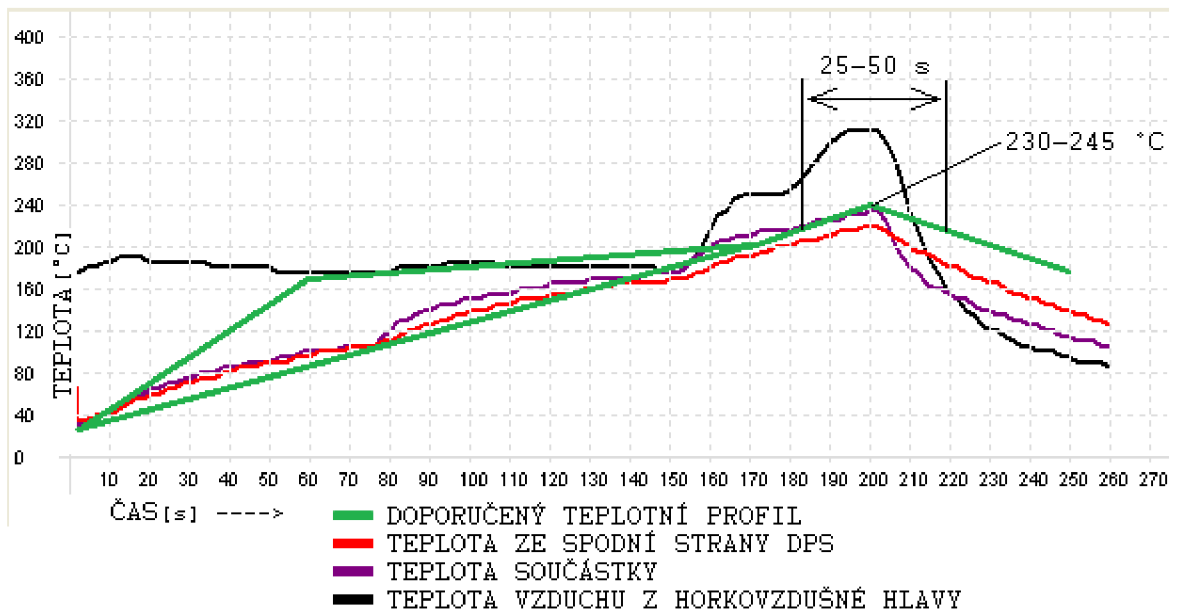
**Obrázek 69: Pouzdro DSBGA5**



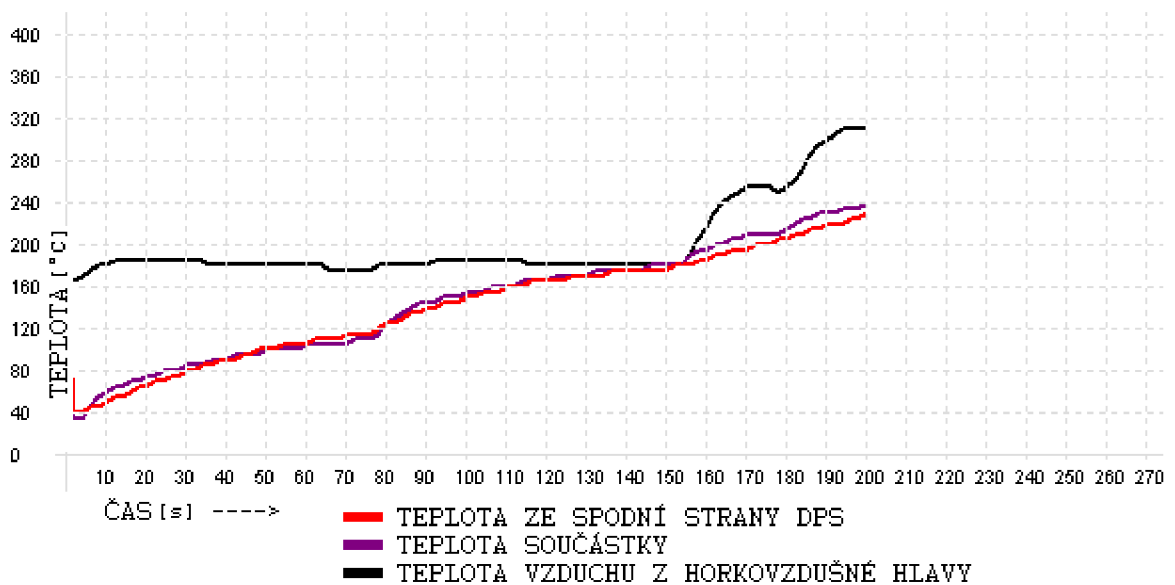
**Obrázek 70: Zapájené pouzdro**



**Obrázek 71: Pájecí plošky a pouzdro po demontáži**



Obrázek 72: Naměřený a doporučený teplotní profil pro montáž součástky



Obrázek 73: Teplotní profil pro demontáž součástky

Tabulka 15: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro montáž součástky

	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	25
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	60
IR předehřev [W]	450	750	-

**Tabulka 16: Hodnoty pro nastavení teplotního profilu pro demontáž součástky**

	Předehřev	Pájení	Chlazení
Vzduch [ $\text{l min}^{-1}$ ]	10	15	-
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	290	-
Čas [s]	150	50	0
IR předehřev [W]	450	750	-

Naměřený teplotní profil dobře odpovídá doporučenému teplotnímu profilu. Vrcholová teplota zde byla  $235\text{ }^{\circ}\text{C}$  a doba nad teplotou tavení pájky 25 s. Demontáž součástky vzhledem k malým rozměrům pouzdra nebyla možná pomocí horkovzdušné hlavy, neboť sací otvor v horkovzdušné hlavě je větší než samotné pouzdro DSBGA5. Pro montáž a demontáž malých součástek existují pro horkovzdušnou hlavici adaptéry, aby byla s těmito menšími součástkami lepší manipulovatelnost. Nicméně při nasazení nejmenšího adaptéru na horkovzdušnou hlavu, nebyl v tak malém adaptéru dostatečně nízký podtlak vzduchu na to, aby bylo pouzdro DSBGA5 úspěšně demontováno. Proto na konci cyklu teplotního profilu bylo pouzdro z pájecích plošek vyzvednuto pinzetou.

## Závěr

V teoretické části diplomové práce je uveden stručný přehled používaných technologií a blíže se specifikují možnosti oprav na laboratorní horkovzdušné pájecí stanici Fritsch Mikroplacer. Podrobněji je rozepsána oblast pájení, ve které jsou uvedeny základní metody pájení a nejpoužívanější pájecí slitiny (olovnaté a bezolovnaté). Dále je zde popsána výroba a druhy pájecích kuliček a druhy pouzder pro integrované obvody s ohledem na použitá pouzdra v praktické části.

Praktická část diplomové práce se zabývá problematikou nastavení teplotních profilů na laboratorní horkovzdušné pájecí stanici Fritsch Mikroplacer pro jednotlivá vybraná pouzdra LQFP64, SOIC16, TSSOP14, QFN16 a DSBGA5. Je zde popsán způsob přípravy pájení – výroba testovací DPS, tisk pasty přes šablonu na pájecí plošky, osazení vybraného typu integrovaného obvodu do pájecí pasty a přetavení pasty na stanici Fritsch. Pro pájení byla jako pájecí pasta vybrána bezolovnatá pájecí pasta SAC305 (Almit) a jako substrát byl zvolen jednovrstvý základní materiál typu FR4.

Na základě prezentovaných výsledků montáže a demontáže různých velikostí pouzder integrovaných obvodů lze říci, že nastavení teplotních profilů na horkovzdušné stanici Fritsch Mikroplacer, bylo pro všechny vybrané velikosti pouzder (LQFP64, SOIC16, TSSOP14, QFN16 a DSBGA5) velice podobné. Všechny velikosti pouzder představovaly pro stanici Fritsch Mikroplacer minimální tepelnou kapacitu a nebylo proto nutné nastavení teplotních profilů pro každé pouzdro příliš modifikovat. Tato skutečnost se na začátku práce se stanicí Fritsch Mikroplacer nepředpokládala. Předpokládá se však, že teplotní profil by se musel mírně modifikovat pokaždé, pokud by se pájelo na jiné struktúře základního materiálu. Použil-li by se místo jednovrstvého základního materiálu FR4 základní materiál dvouvrstvý nebo vícevrstvý (s měděnými cestami v každé vrstvě), musel by se pokaždé změnit teplotní profil. Vícevrstvé základní materiály odvádějí značné množství tepla měděnými cestami mezi jednotlivými vrstvami. Přizpůsobení teplotního profilu proto závisí na konkrétní konstrukci a osazení základního substrátu, a to nebylo v práci dále zkoumáno. Práce se stanicí Fritsch Mikroplacer následně potvrdila skutečnost, že největší vliv na prohřátí DPS má IR přehřev, který se vkládá pod danou DPS. Proud horkého vzduchu z horkovzdušné hlavy přehřeje především součástku a jen z menší části DPS.

Praktická část práce dále uvádí postup při montáži jednotlivých pouzder. Tisk pájecí pasty přes experimentálně vytvořené šablony byl u všech typů pouzder dobře proveditelný. Menší problémy byly se sesouhlasením šablon s pájecími ploškami u pouzder typu LQFP64, a to z důvodu velkého počtu pinů a relativně velké součástce. Nejsnadnější sesouhlasení bylo u pouzdra SOIC16. Tiskové vlastnosti všech typů šablon jsou dobré a vždy na pájecích ploškách zůstalo dostatečné množství pájky pro kvalitní zapájení dané součástky.

Diplomová práce může posloužit jako pomůcka pro další nastavování teplotních profilů u dalších typů pouzder nejen na zařízení Fritsch Mikroplacer, ale i pro další opravárenská zařízení tohoto typu.

## Seznam literatury

- [1] Integrovaný obvod. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11.4.2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [cs.wikipedia.org/wiki/Integrovaný\\_obvod](http://cs.wikipedia.org/wiki/Integrovaný_obvod)
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2011/65/EU: O omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. *EUR - Lex: Přístup k právu Evropské unie* [online]. Štrasburk, 2011 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A32011L0065#text>
- [3] Starý J., Zatloukal M., Stejskal P., *Montážní a propojovací technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 262 stran
- [4] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronické montážní technologie*. Brno: VUTIUM, 1997. ISBN 80-214-0901-0.
- [5] Termomechanické namáhání SMD součástek. ŠANDERA, Josef a Edita HEJÁTKOVÁ. *Elektrorevue* [online]. 2002 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02057/index.html>
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Technologie elektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-2072-3.
- [7] Vaško, Cyril a kol. *Multimediální výukový systém, Ústav mikroelektroniky*. [online]. ©2007 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/pajeni-vlnou/technologie/>
- [8] UHLÁŘ, V. *Tavidlové zbytky po pájení přetavením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..
- [9] PEKAŘ, Václav. *Hypotéza nového přístupu k modelům poruch a strategii údržby a technické inspekce*. Vysoké Mýto, 2013, 48 s. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/file/3/hypoteza-noveho-pristupu.pdf>
- [10] Vaško, Cyril a kol. *Multimediální výukový systém, Ústav mikroelektroniky*. [online]. ©2007 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/pajeni-v-parach/technologie/>
- [11] ERSa tunnel. In: *Prime Option* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: [http://www.prime-option.com/assets/images/ERSa\\_hf\\_3\\_tunnel.jpg](http://www.prime-option.com/assets/images/ERSa_hf_3_tunnel.jpg)
- [12] ŠVECOVÁ, Olga. *Spolehlivost bezolovnatých pájek a vybrané způsoby odhadu jejich životnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 99 s. Doktorská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.



- [13] PEŠINA, Zbyněk. *Aplikace nanomateriálů pro vývoj pájek bez olova*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 104 s. Disertační práce. Vedoucí práce doc. RNDr. Jiří Sopoušek, CSc.
- [14] Adámek M., Vaško C., Drlík M., *Pájení v elektrotechnické výrobě, kontrola jakosti spojů*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 14 stran. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b\\_pajeni\\_a\\_kontrola.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_pajeni_a_kontrola.pdf)
- [15] BUŘIVAL, Tomáš. *Opravy DPS s BGA a FC pouzdry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 50 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [16] STRUČOVSKÝ, Aleš. *Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 62 s. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Maxa.
- [17] VLK, Miroslav. *Metody optického testování osazení desek plošných spojů*. České Budějovice, 2012. 41 s. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.
- [18] OTÁHAL, Alexandr. *Optimalizace procesu pájení na zařízení IR-400*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 52 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [19] BOBEK, Josef. *Návrh a zhotovení zařízení pro osazování pájecích kuliček*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 49 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Michal Nicák.
- [20] SOMER, Jakub. *Parametry spojů BGA na keramických Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrátech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 64 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Michal Nicák.
- [21] ZLÁMAL, J. *Aplikace moderních pouzdřících technologií v elektronice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..
- [22] JEDEC. *Design requirements for outlines of solid state and related products: Die-Size Ball Grid Array Package (DSBGA)*. [Product data sheet]. 11.2-829(S). 2014, 22 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/DGuide4-7F.pdf>
- [23] TEXAS INSTRUMENTS. *SN74LVC1G02: Single 2-Input Positive NOR-Gate* [Product data sheet]. Rev.2013. 1999, 25 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1785816.pdf>

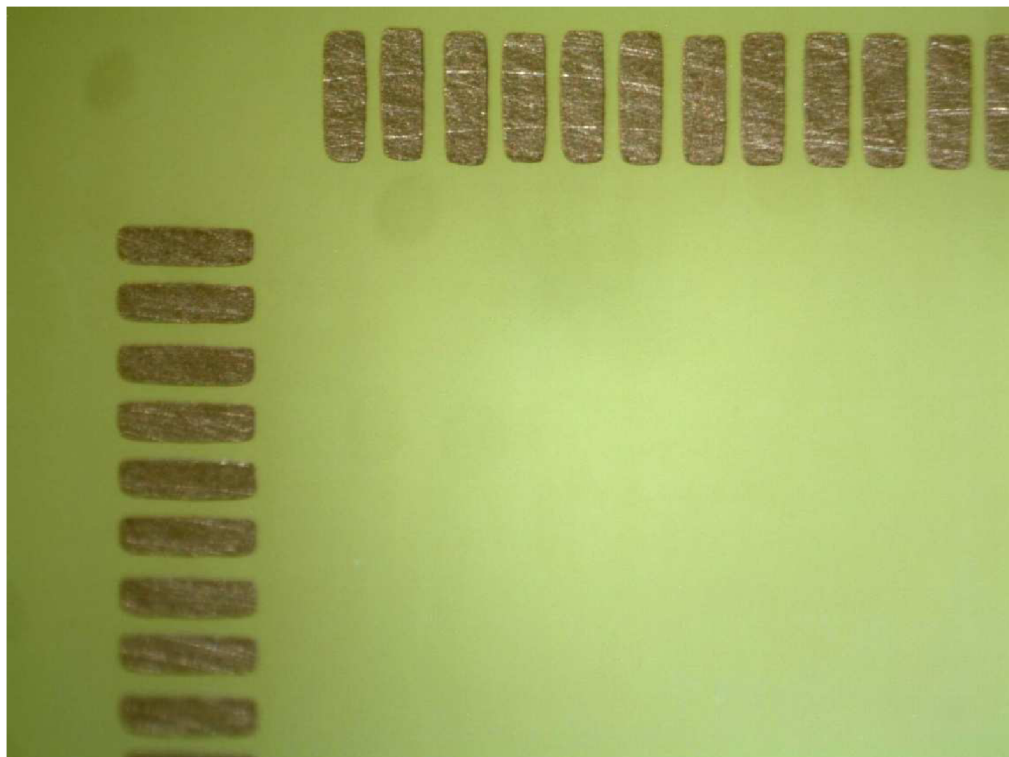
- [24] NXP SEMICONDUCTORS. *74HC27; 74HCT27: Triple 3-input NOR gate* [Product data sheet]. Rev.4. 2013, 17 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1730138.pdf>
- [25] ON SEMICONDUCTOR. *MC74HC139A: Dual 1 of 4 Decoder / Demultiplexer* [Product data sheet]. Rev.9. 2005, 10 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/7472.pdf>
- [26] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430G2x31, MSP430G2x21: Mixed Signal Microcontroller* [Product data sheet]. Rev.2013. 2010, 57 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2231.pdf>
- [27] FUJITSU. *MB95F104AJSPMC-GE1: 8-bit Proprietary Microcontrollers* [Product data sheet]. 2006, 72 s. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: <http://www.fujitsu.com/downloads/CN/fmc/8fx-2007/datasheet/MB95F108/DS-MB95100AM-e712614-2e.pdf>

## Seznam zkratek

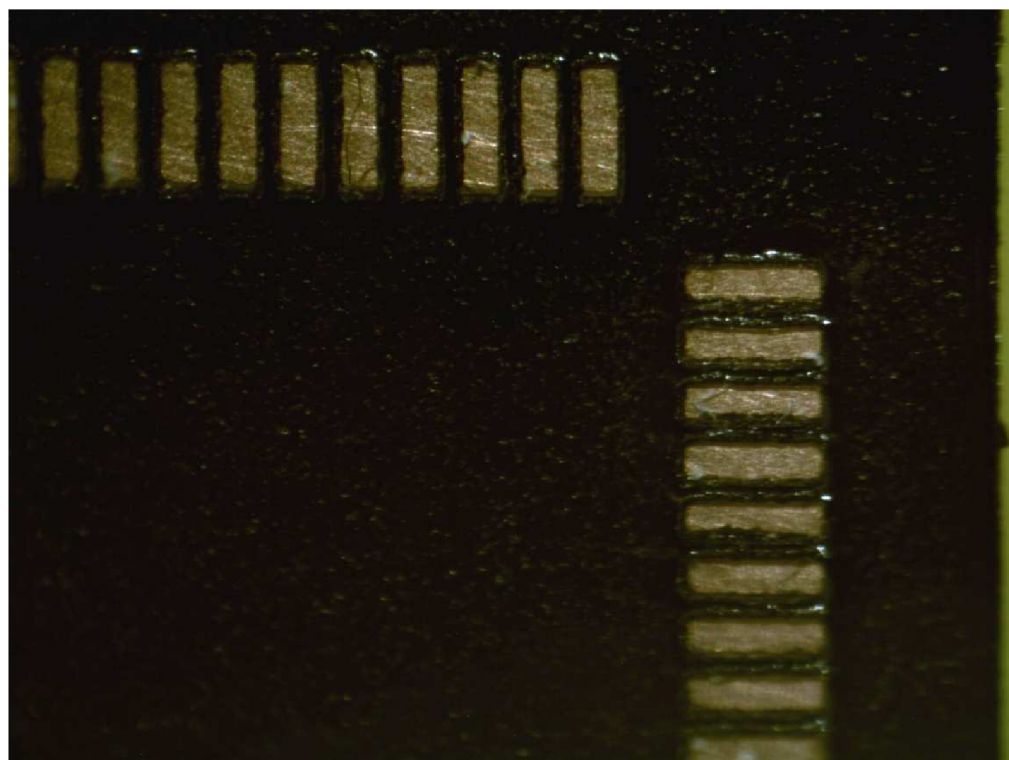
Wafer	substrát z monokrystalu křemíku sloužící pro výrobu čipů
Soldering	pájení
Teplotní profil	grafické zobrazení závislosti teploty na čase
BGA	ball grid array (pouzdro s kulovými vývody)
DPS	deska plošných spojů
IR	Infra Red (infračervené záření)
SnPb	slitina cínu a olova používaná pro pájení
SnAgCu	slitina cínu, stříbra a mědi používaná pro bezolovnaté pájení
Reflow	přetavení
QFP	Quad Flat Package (ploché čtyřhranné pouzdro)
SOIC	Small-outline integrated circuit (integrováný obvod s krátkými vývody)
SOT-23	Small-outline transistor (tranzistor s krátkými vývody)
PLCC	Plastic Leaded Chip Carrier (plastový nosič čipu s vývody)
SAC	označení pájecí slitiny SnAgCu
SAC305	označení pájecí slitiny SnAg <sub>3</sub> Cu <sub>0,5</sub>
SAC387	označení pájecí slitiny SnAg <sub>3,8</sub> Cu <sub>0,7</sub>
SN100C	označení pájecí slitiny Sn <sub>99,3</sub> Cu <sub>0,7</sub> Ni <sub>0,06</sub>
Rework	opravy montážních celků DPS v rámci technologického procesu výroby
Repair	opravy montážních celků DPS v rámci servisní činnosti, výměna vadných součástek
YAG laser	označení pro laser Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet)

## Příloha

### 1. Pouzdro LQFP64



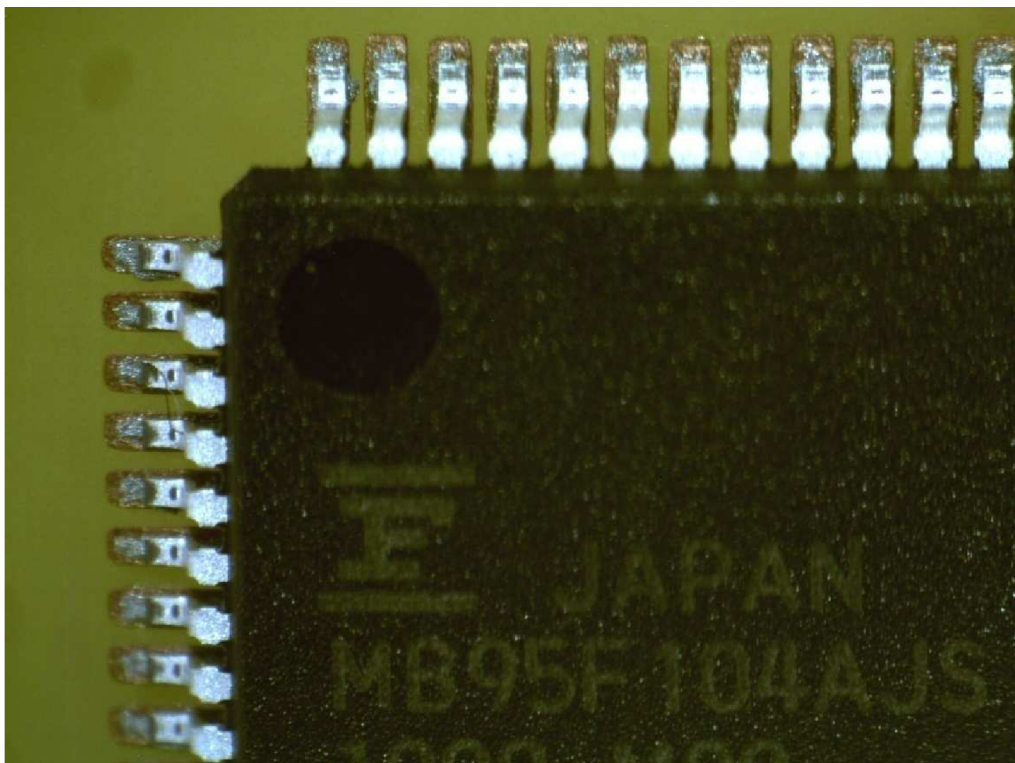
Obrázek 74: Pájecí plošky na DPS



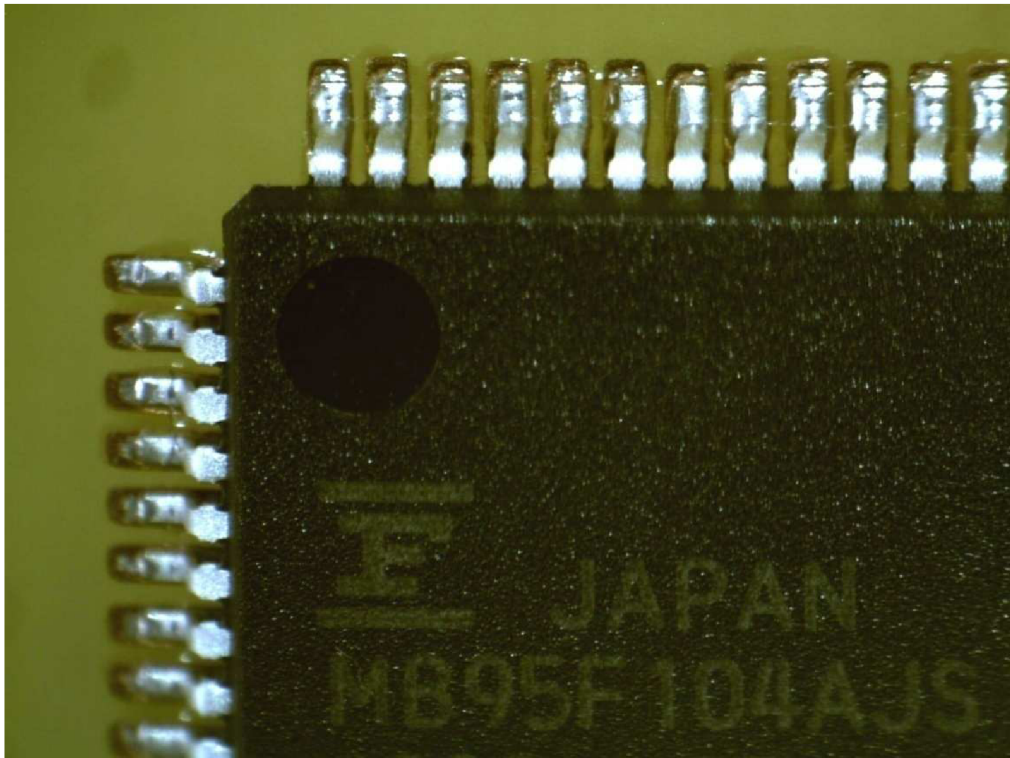
Obrázek 75: Umístění šablony na pájecích ploškách



Obrázek 76: Natisknutá pájecí pasta



Obrázek 77: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty



Obrázek 78: Zapájený integrovaný obvod

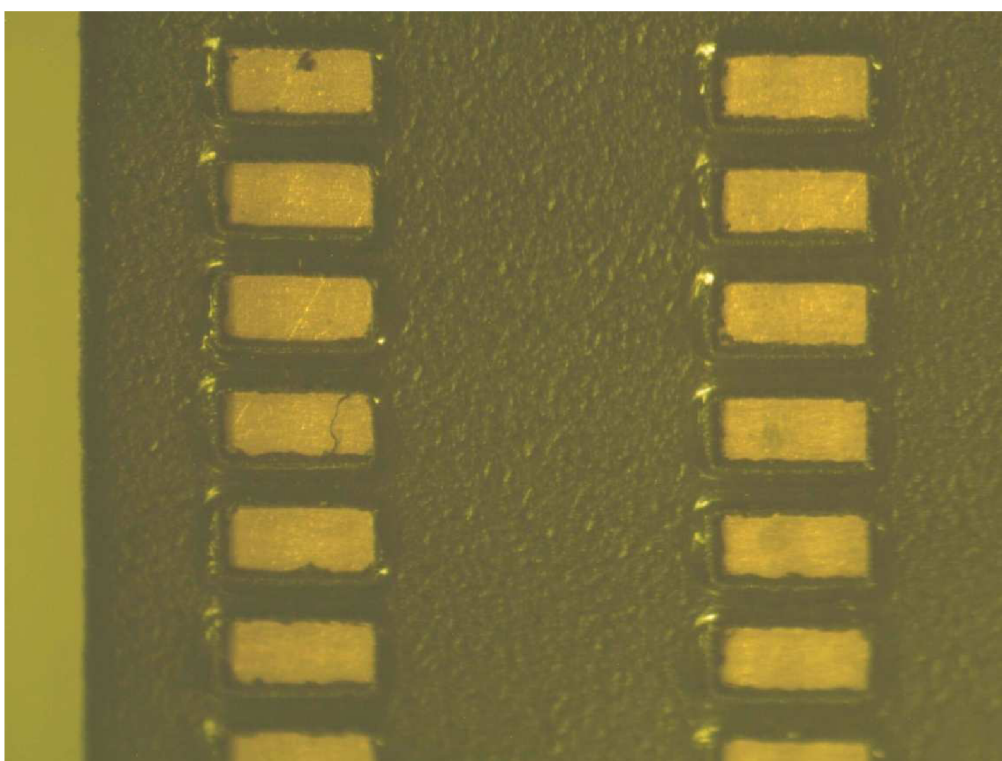


Obrázek 79: Demontovaný integrovaný obvod

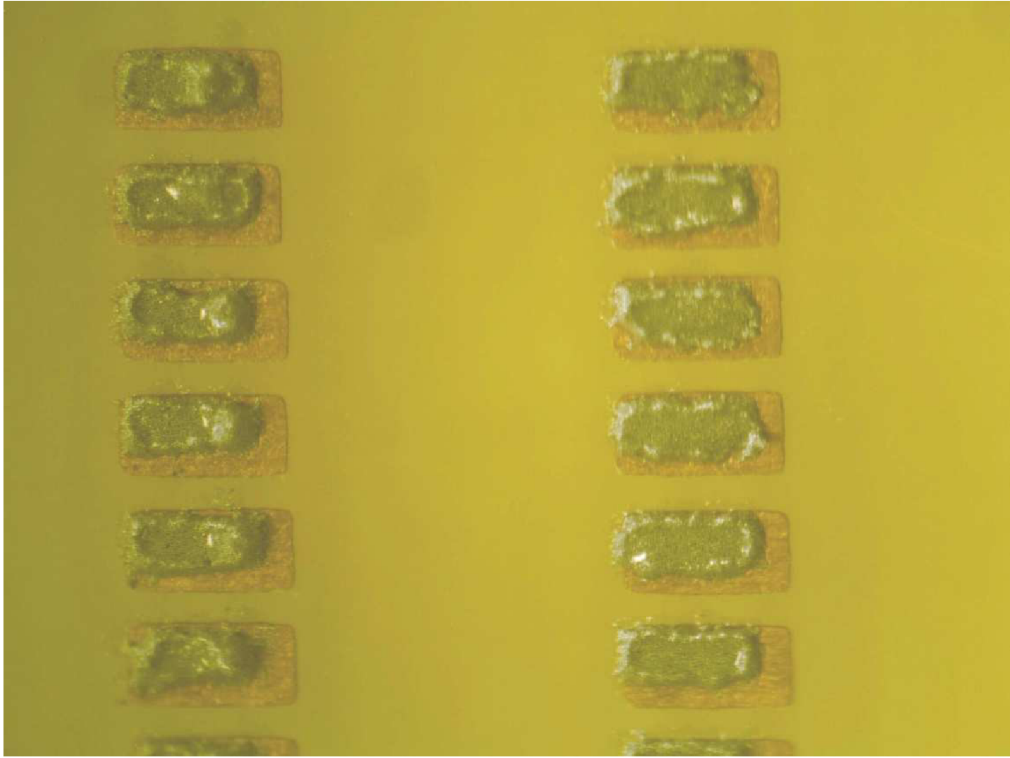
## 2. Pouzdro SOIC16



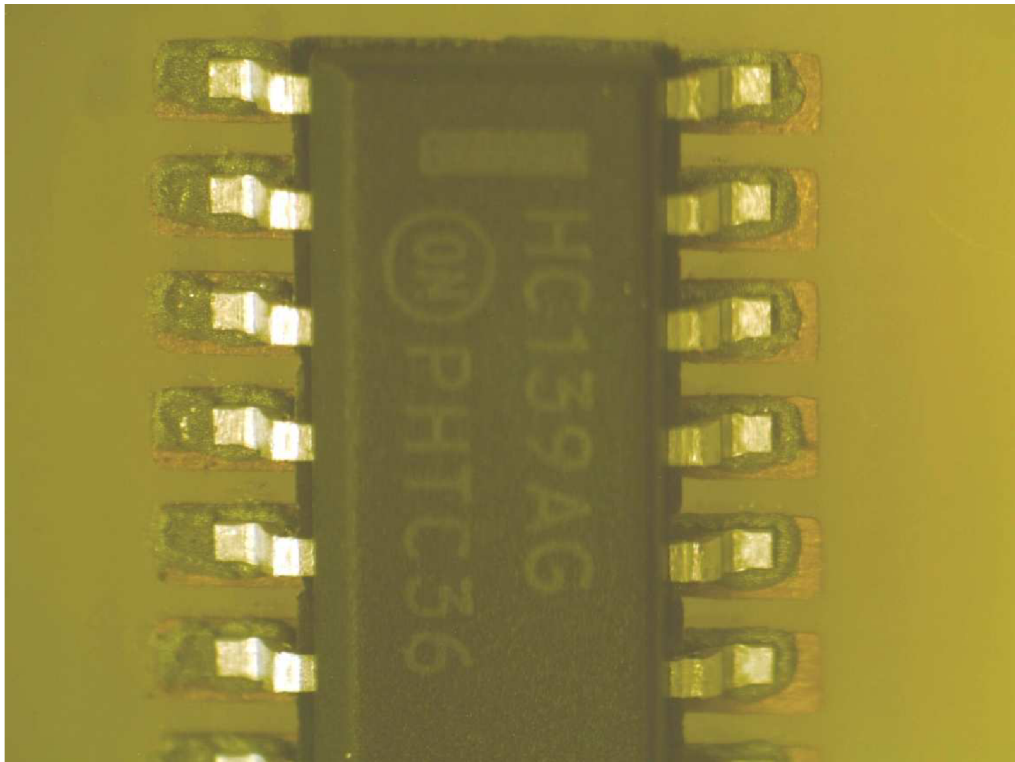
Obrázek 80: Pájecí plošky na DPS



Obrázek 81: Umístění šablony na pájecích ploškách

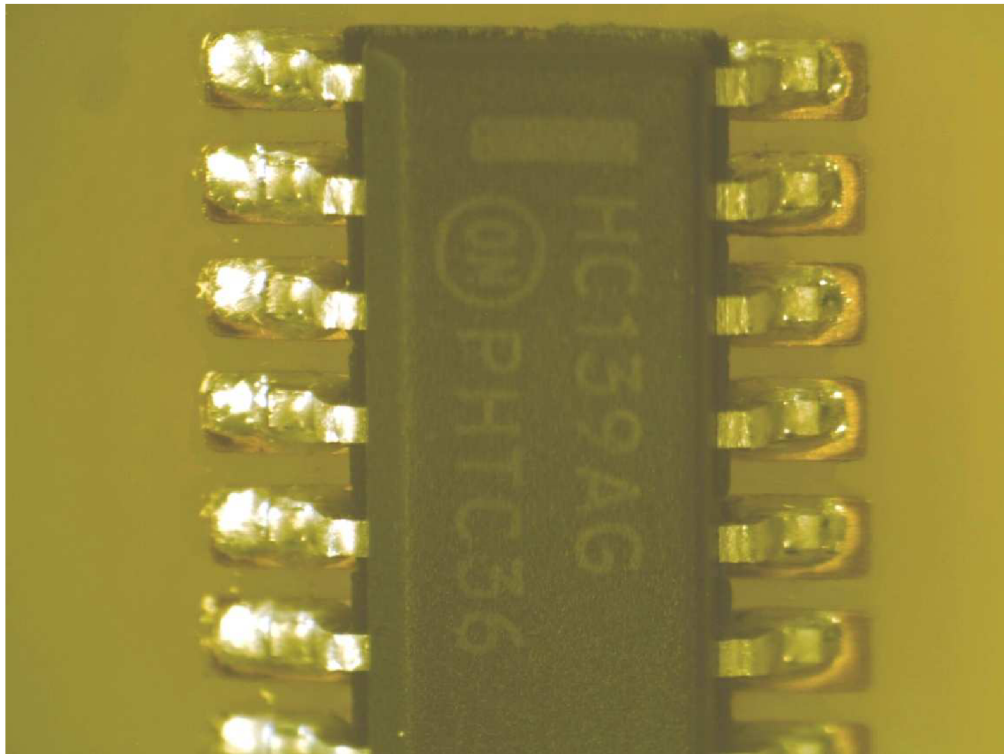


Obrázek 82: Natisknutá pájecí pasta

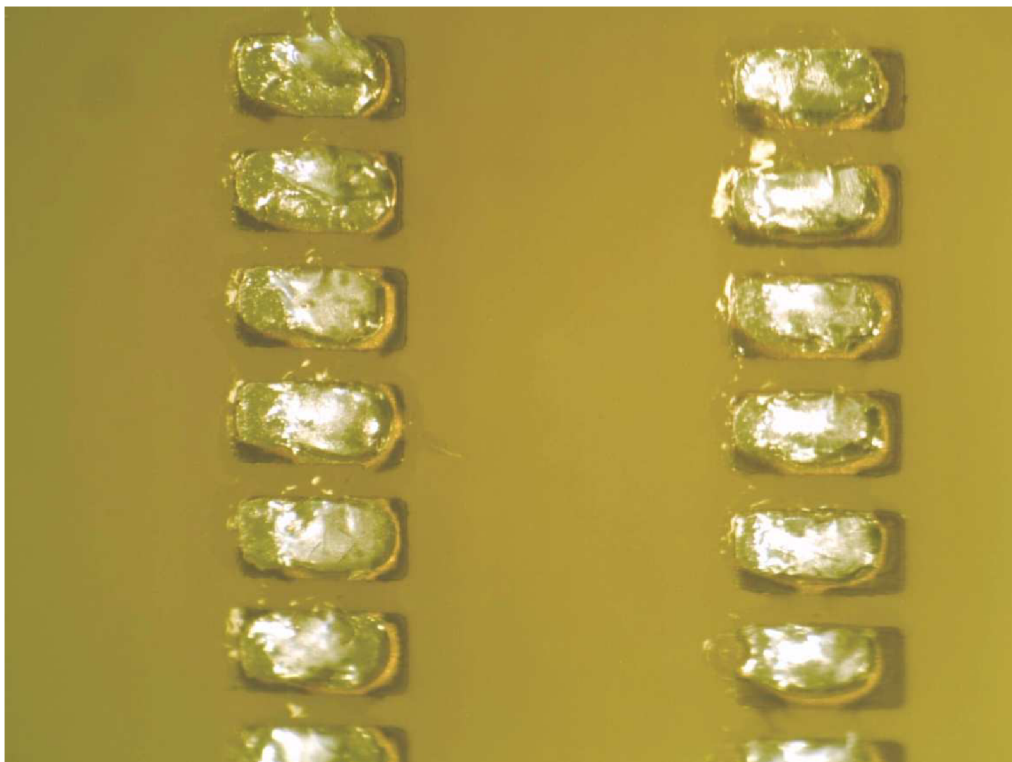


Obrázek 83: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty



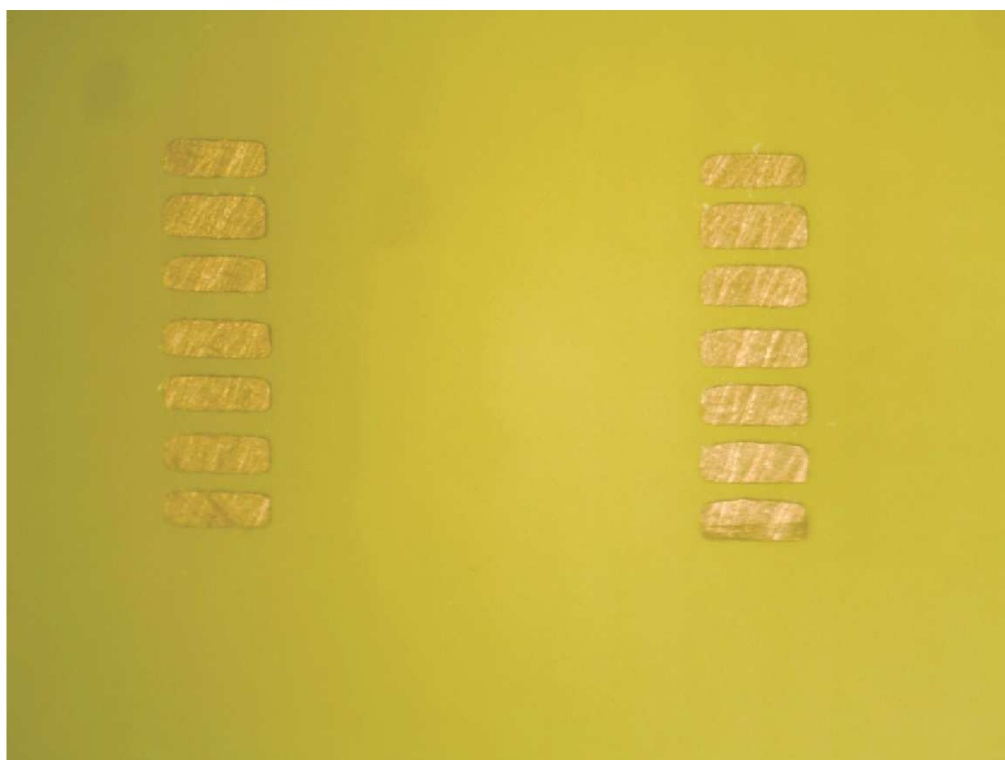


**Obrázek 84: Zapájený integrovaný obvod**

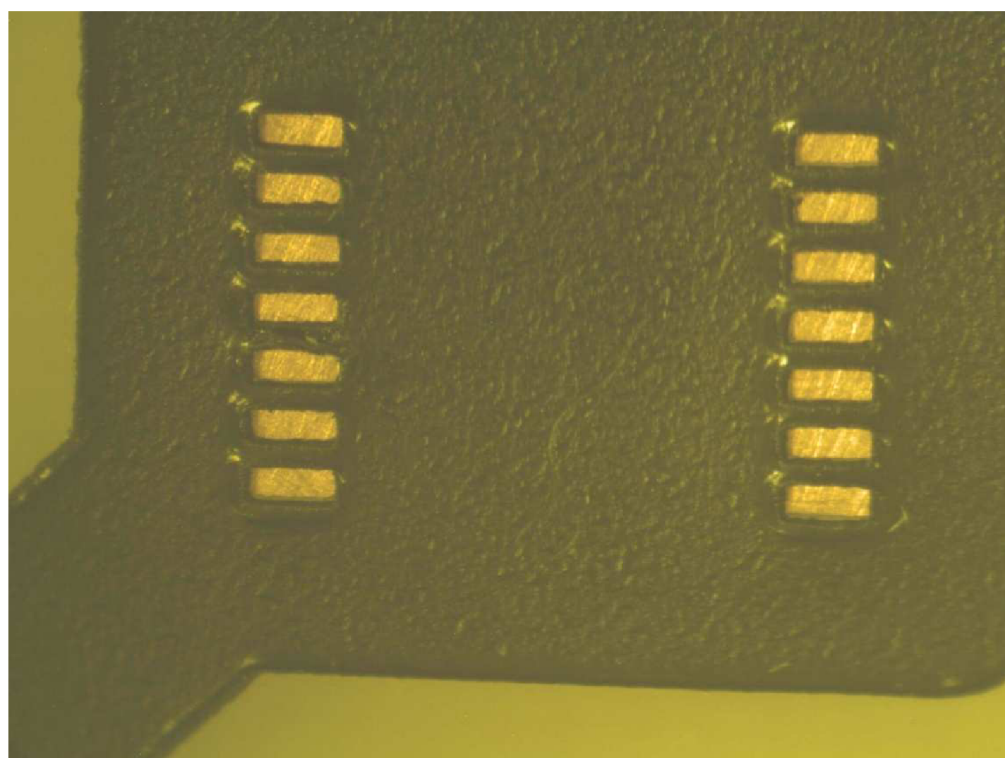


**Obrázek 85: Demontovaný integrovaný obvod**

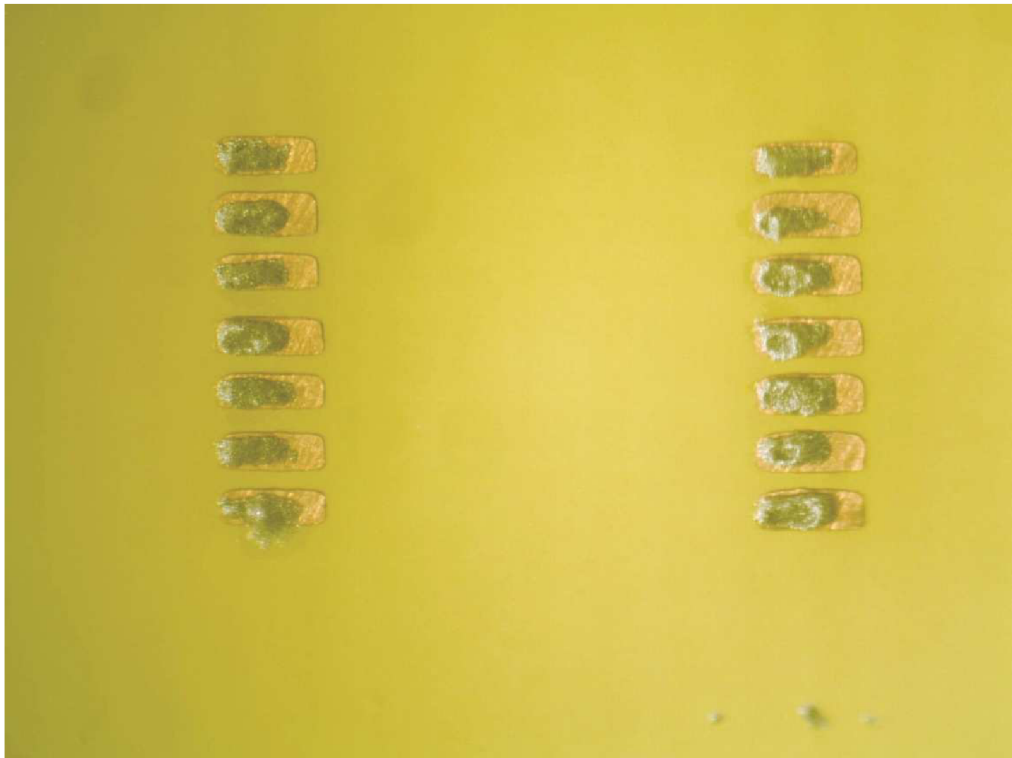
### 3. Pouzdro TSSOP14



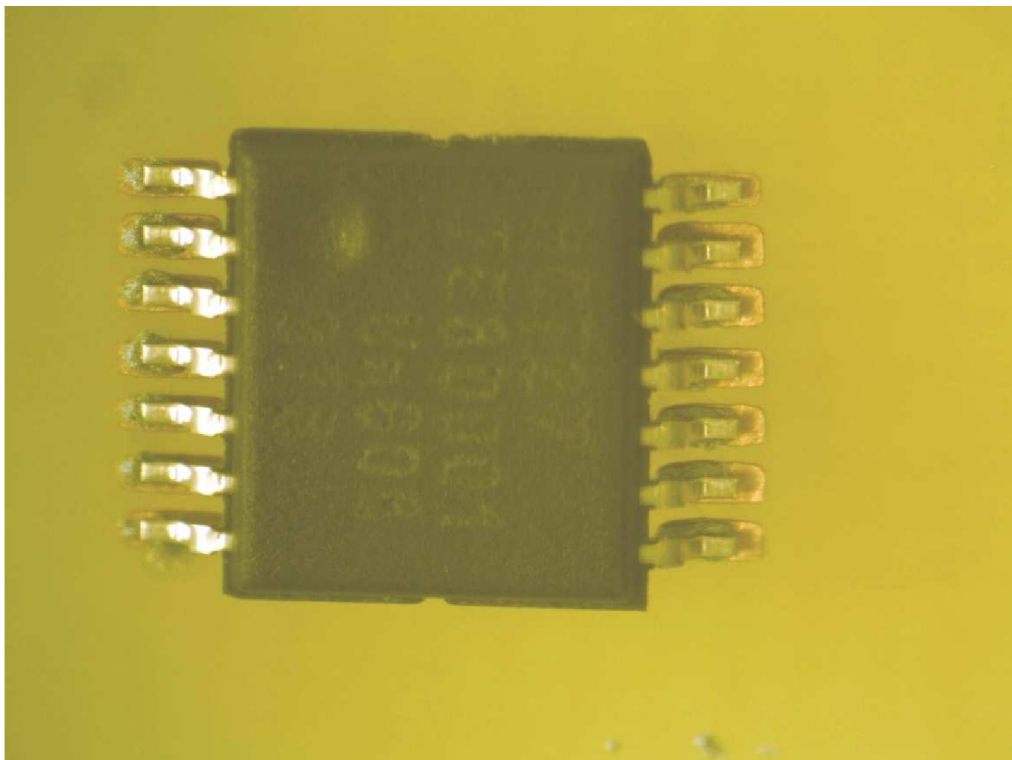
**Obrázek 86: Pájecí plošky na DPS**



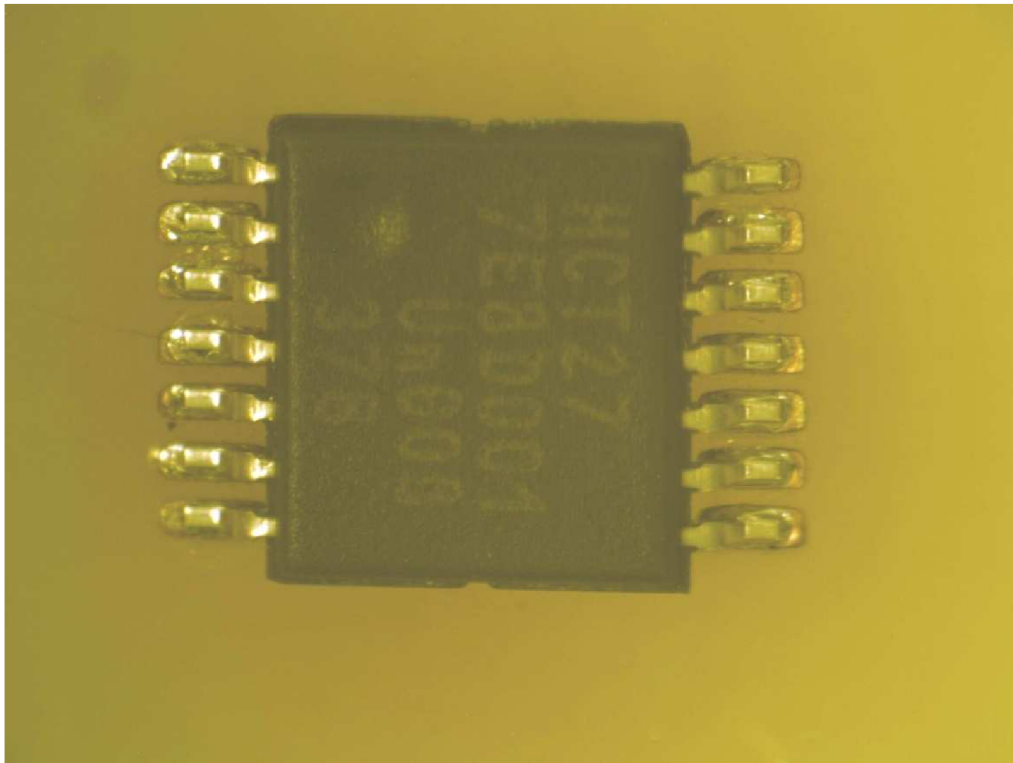
**Obrázek 87: Umístění šablony na pájecích ploškách**



**Obrázek 88: Natisknutá pájecí pasta**



**Obrázek 89: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty**

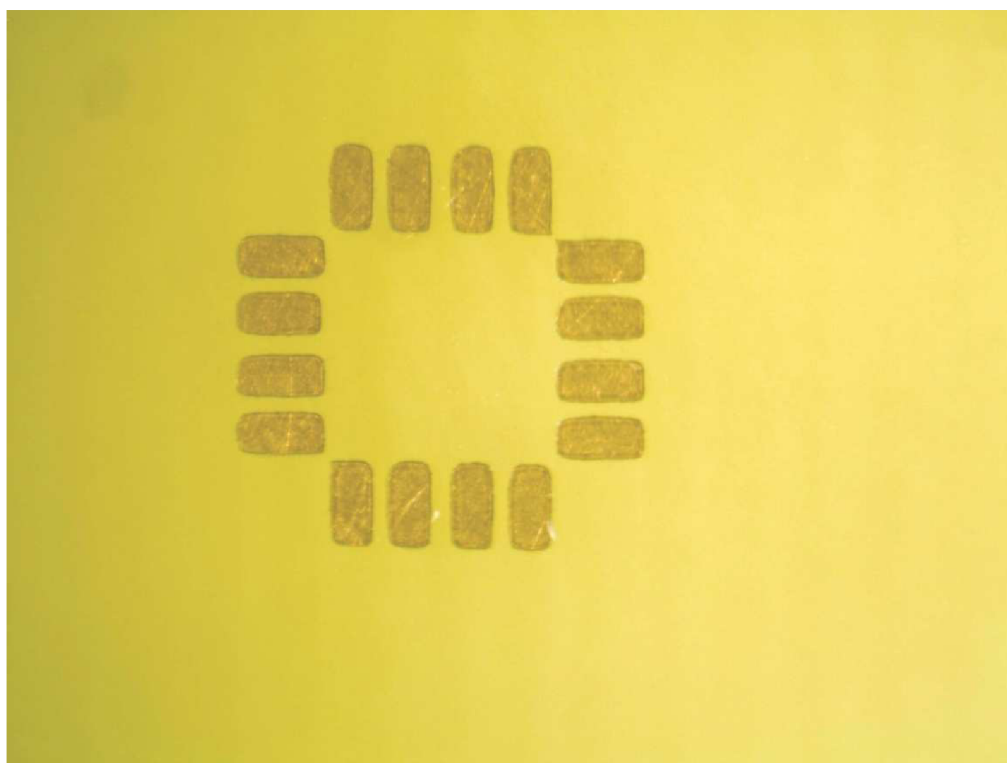


**Obrázek 90: Zapájený integrovaný obvod**

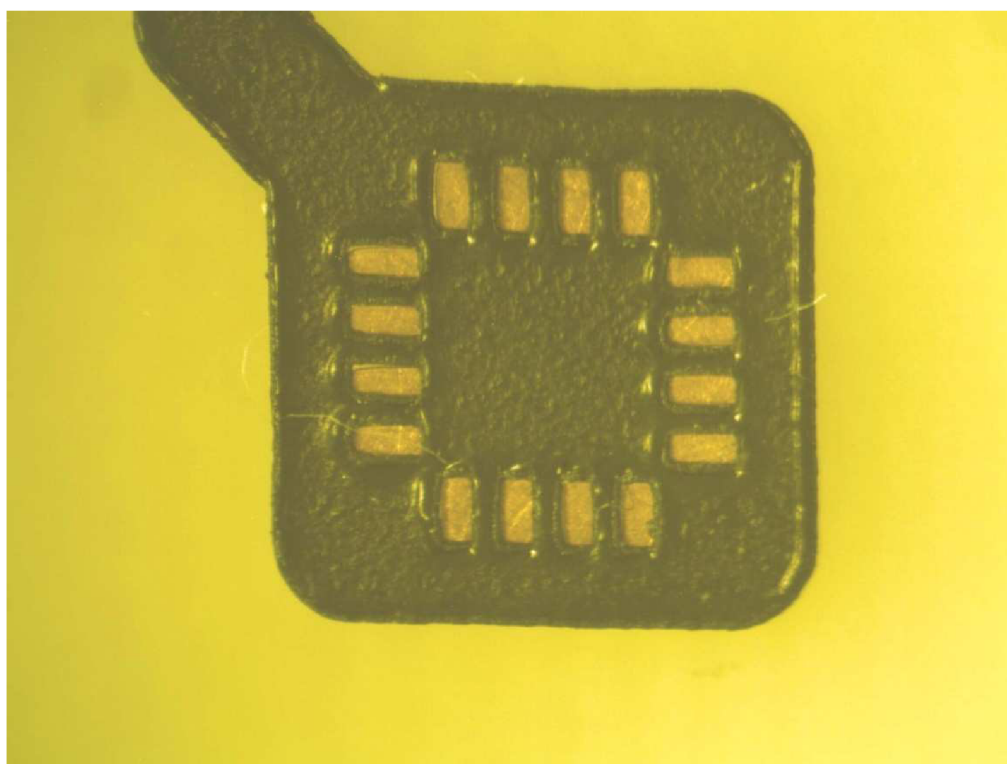


**Obrázek 91: Demontovaný integrovaný obvod**

#### 4. Pouzdro QFN16



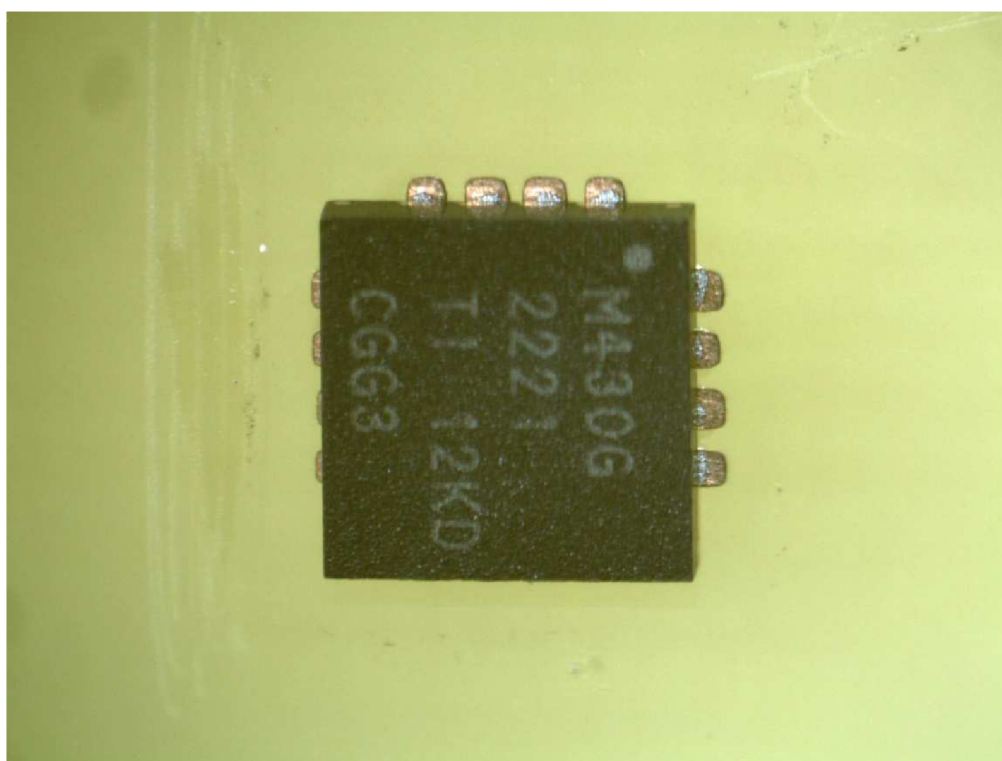
Obrázek 92: Pájecí plošky na DPS



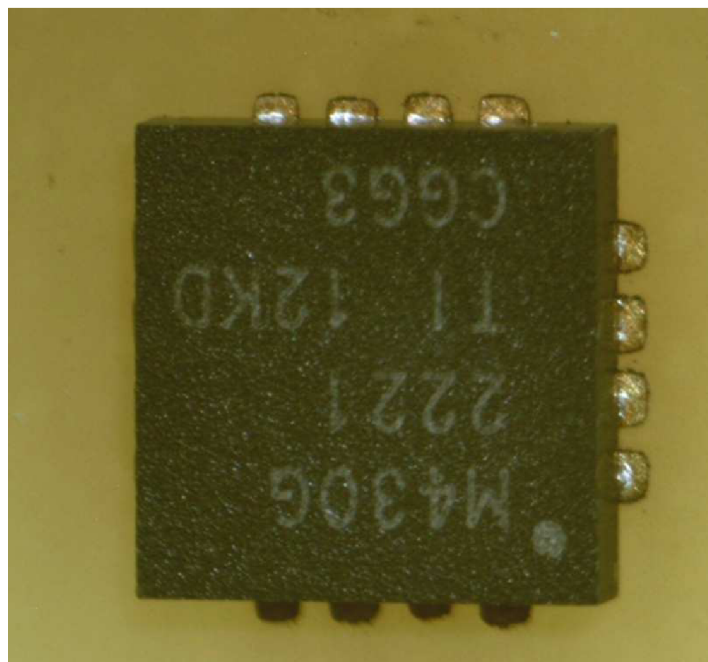
Obrázek 93: Umístění šablony na pájecích ploškách



Obrázek 94: Natisknutá pájecí pasta



Obrázek 95: Osazený integrovaný obvod do pájecí pasty



**Obrázek 96: Zapájený integrovaný obvod**



**Obrázek 97: Demontovaný integrovaný obvod**