

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Výskyt dutin v pájených spojích pro elektrotechniku</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Bc. Tomáš Chvosta</b>
<b>Typ práce:</b>	diplomová
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta strojní (FS)
<b>Katedra/ústav:</b>	Ústav strojírenské technologie
<b>Oponent práce:</b>	Ing. Jiří Šmarhák, PhD
<b>Pracoviště oponenta práce:</b>	G.L.Electronic s.r.o., Podnikatelská 2902/4, Budova B2, 612 00 Brno

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
<p><i>Vzhledem k ekologickým a zdravotním požadavkům je problematika bezolovnatého pájení v současné době velmi živé téma také vesmírné výroby. Přes překotně postupující komercializaci tohoto segmentu, a vzhledem k vysokým požadavkům na odolnost a spolehlivost systémů, je nutné u nových osazovacích metod pečlivě ověřit jejich výsledky. Rostoucí složitost moderních elektronických systémů rovněž vyžaduje využití mikročipů s vyšší úrovní integrace, jako jsou například mikrokontrolery nebo hradlová pole v pouzdech s ball grid array. Přechod na bezolovnatou technologii s sebou rovněž nese řadu výzev, jako je například adaptace teplotních profilů a výběr vhodných pájek a tavidel. Proto se domnívám, že bylo zvoleno téma, které je vysoce aktuální a důležité.</i></p> <p><i>Student vedl projekt samostatně jak po odborné stránce, tak po organizační stránce (návrh časového plánu, rozpočtu, komunikace s kontraktory, kontrola procesu a kvality, atd.), proto hodnotím zadání jako náročnější.</i></p>	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno</b>
<p><i>Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle práce byly splněny. Práce přináší několik nových poznatků a je přínosná jak pro vlastní pochopení studovaných technologií a jevů, tak pro potenciální další využití. Získané výsledky tak, dle mého názoru, přispěly a přispějí k rozvoji daného oboru.</i></p>	

<b>Zvolený postup řešení</b>	<b>správný</b>
<p><i>Dle mého názoru je struktura vlastní práce zvolena vhodně, text je dostatečně podrobný, diskutují se konkrétní výsledky. Text je vyváženou kombinací obecných teoretických definic a jejich aplikací spolu s přehledem výsledků. Výběr témat rešerše je správný, postup při řešení experimentální části je rigorózní. Bylo by vhodné samostatně, například formou krátké kapitoly, uvést porovnání získaných výsledků analýzy zastoupení dutin s ostatními autory, a výsledky pak hlouběji diskutovat. Popřípadě, uvést zhodnocení toho, jak je (vzhledem ke specifickým podmínkám experimentu - konkrétní komponenty a materiály definované v návaznosti na konkrétní průmyslový projekt) možné takové srovnání provést.</i></p>	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>A - výborně</b>
<p><i>Autor správným způsobem zpracoval rešerši a využil znalostí v experimentální části práce. Současně autor také prokázal schopnost s experimentálními daty dále pracovat. Z odborného hlediska práci považuji za jednoznačně přínosnou a užitečnou pro další výzkum, v rámci pracoviště i v širším kontextu. Jsem přesvědčen, že výsledky mohou být velmi významné pro implementaci strojového bezolovnatého pájení ve vesmírném průmyslu. Diplomant tak, dle mého názoru, zvládl danou problematiku v celé šíři.</i></p>	

<b>Formální a jazyková úroveň, rozsah práce</b>	<b>B - velmi dobře</b>
<p><i>Posuzovaná práce má 72 stran, obsahuje 34 obrázků a 28 odkazů na literaturu. Je členěna na 9 hlavních číslovaných kapitol, součástí je též česká a anglická anotace a přehled použité literatury.</i></p> <p><i>Práce je vypracována standardním způsobem. Stylistická a technická úroveň je dobrá. Práce obsahuje několik překlepů a nepřesných formulací, které zde však není třeba zmiňovat. Využití obrázků, grafů a tabulek je adekvátní a efektivní.</i></p>	

**Výběr zdrojů, korektnost citací**

**A - výborně**

*Autor používá relevantní zdroje, vzhledem k rozsahu problematiky, v přiměřeném množství. Všechny citace jsou opatřeny referencemi na použitou literaturu. Autorovy vlastní ideje jsou jasně odděleny od citovaných zdrojů. Práce je opatřena přehledným seznamem použité literatury, který je v korektním formátu.*

**Další komentáře a hodnocení**

*Předložená diplomová práce pana Bc. Tomáše Chvosty, vypracovaná v rámci Ústavu strojírenské technologie a ve spolupráci s katedrou Elektrotechnologie ČVUT v Praze a firmou G.L. Electronic s.r.o., je věnována teoretickým základům a, zejména, experimentům s bezolovnatým pájením. Hlavní cíl práce přitom spočíval v seznámení se s technologií a teoretickými modely pájení v moderní elektronice za účelem implementace bezolovnatého strojového pájení mikročipů s ball grid array pro vesmírný průmysl.*

*Úvod (kapitola 1) je krátké shrnutí historie pájení od počátku věků až po současné trendy. V kapitole 2 autor nejprve uvádí zdravotní rizika spojená s použitím olova, a dále poskytuje přehled legislativy ošetřující využití toxických substancí v elektronice, a to v různých zemích a EU. Kapitola 3 se již věnuje přímo bezolovnatému pájení. Tato kapitola v úvodu obsahuje popis rozdílů oproti olovnatému pájení, dále popisuje složení pájecích past, jejich vlastnosti, způsob aplikace a vliv vnějšího prostředí během procesu osazování. Dále přehledně popisuje vliv jednotlivých prvků na vlastnosti pájecích slitin. Následující kapitola 4 popisuje technologie pájení vlnou a přetavením, s důrazem na druhou metodu, kterou pak autor realizoval v rámci experimentální části. Pozornost autor věnuje teplotním profilům a různým druhům ohřevu včetně zhodnocení jejich výhod a nevýhod. V kapitole 5 autor popisuje druhy chyb v pájených spojích. Popisuje vznik a vlastnosti intermetalických vrstev, včetně teoretického modelu kinetického růstu. Dále v této kapitole autor uvádí podrobný přehled typů dutin a příčiny jejich vzniku. Kapitola 6 je věnována nejprve přehledu norem spojených s hodnocením kvality pájených spojů. Autor poskytuje přehledný popis metalografie, vibrační zkoušky, teplotního cyklování, a zvláštní pozornost je věnována rentgenové analýze. Kapitola 7 je věnována experimentu, je nejobsáhlejší a je těžištěm celé diplomové práce. Autor v ní podrobně popisuje celý proces osazování zvolených ball grid array komponentů, postupně od návrhu kvalifikační desky plošných spojů až po analýzu dutin pomocí rentgenů. Rovněž připojuje zhodnocení splnění požadavku ECSS normy využívané v evropském kosmickém průmyslu. Kapitola 8 shrnuje dosažené výsledky v krátkém závěru. Kapitola 9 pak obsahuje seznam použité literatury. Za touto kapitolou je ještě seznam tabulek, rovnic a obrázků.*

*Předloženou diplomovou práci je možno hodnotit kladně, z odborného pohledu jako kvalitní, předpokládám také uspokojivé zodpovězení vybraných dotazů a připomínek. Závěrem mohu prohlásit, že předložená diplomová práce splňuje všechny požadavky kladené na tento typ práce příslušnými právními předpisy. Práci proto doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu doporučuji udělení vědeckého titulu Ing.*

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

K předložené diplomové práci mám následující dotazy, resp. připomínky, k některým z nich by se autor (pokud tak nebude učiněno v rámci prezentace) mohl během obhajoby vyjádřit.

1. Autor v práci zmiňuje, že rentgenová analýza dutin je limitována jejich velikostí a určité typy dutin tak nelze touto cestou zkoumat. Rovněž zmiňuje, že je možné rozlišení zvýšit bližším umístěním zdroje záření. Zajímalo by mě, jaký je teoretický limit rozlišení rentgenové analýzy a čím je daný.
2. Zajímalo by mě, jestli forma rovnice 1.1 vychází jako řešení nějaké diferenciální rovnice, respektive, jak se k této rovnici došlo.
3. Autor uvádí, že tloušťky intermetalických vrstev, uváděné dvěma různými autory, jsou odlišné. Čím to může být způsobeno? Jedná se o teoretické nebo naměřené výsledky? Prosím autora, aby více okomentoval tabulku 6 a zmiňované články.

4. Při použití bezolovnaté technologie pájení je jedním z velkých problémů riziko výskytu cínového moru a whiskers. Řešil toto nějak autor v kontextu této práce (třebaže mimo její rámec)?
5. Zajímalo by mě, které části v kapitole 7 byly pro autora náročné a proč. Rád bych také, aby autor zhodnotil finanční stránku projektu a časovou náročnost jednotlivých fází experimentální sekce.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně**.

Datum: 30.8.2023

Podpis: Jiří Šmarhák

