



POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název práce: Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty

Autor: Ing. Martin Hirman

Vysoká škola: Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta: Fakulta elektrotechnická

Katedra: Katedra technologií a měření

Recenzent: doc. Ing. Pavel Mach, CSc., České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie

Dizertační práce Ing. Martina Hirmana se zabývá problematikou připojování elektronických součástek na flexibilní substráty. S neustálým růstem využívání elektronických aplikací takřka ve všech oblastech našeho života je význam elektroniky realizované na flexibilních substrátech neustále rostoucí. Flexibilní substráty zde slouží zejména jako ohebné propoje, které ve stále větší míře nahrazují metalické ohebné propoje. Proto je také třeba věnovat patřičnou pozornost vývoji elektronické montáže na takovéto substráty. Z tohoto důvodu je práce svým tématem zaměřena na velice aktuální a perspektivní oblast elektroniky.

Práce se skládá ze 4 hlavních kapitol, dále jsou zde definovány cíle práce, závěr, použitá literatura, práce autora vztahené k tématu disertační práce a dvou příloh.

Cíle práce jsou definovány s dostatečnou náročností i odbornou hloubkou a směřují k definování rámce pro použití elektricky vodivých lepidel pro adhezní montáž na flexibilní substráty. S ohledem na široké spektrum lepidel a substrátů dostupných na současném trhu, rozdílné vlastnosti lepidel i rozdílné podmínky, ve kterých mohou být zařízení osazená adhezní montáží použita, bylo splnění uvedených cílů práce dosti náročné. Navíc, mimo definované cíle, se autor také zabývá testováním pájených spojů na flexibilních substrátech.

V prvních dvou kapitolách autor mapuje současný stav v oblasti elektricky vodivých lepidel a jejich diagnostiky. Obě kapitoly jsou přiměřeně rozsáhlé, jsou stavěny s logickou návazností a oceňují zde bohaté citování literatury.

Další kapitola se věnuje adhezní montáži prakticky, tedy experimentální činnosti, kde doktorand ověřuje řadu parametrů, které ovlivňují více či méně kvalitu



adhezních spojů. Věnuje se zde vlivu teplotních profilů pro vytvrzování lepidel, mechanickým vlastnostem adhezních spojů, vlivu tvaru šablony na mechanickou pevnost a elektrický odpor spojů i vlivu čištění a drsnosti povrchu na vlastnosti adhezních spojů.

Další kapitola, která je „navíc“ k cílům definovaným v kapitole „Cíle disertační práce“, a která je zaměřená opět na experimentální činnost doktoranda, se autor věnuje pájené montáži v hrubém rámci experimentů prováděných u adhezní montáže. Přesto, že použití pájení je u flexibilních substrátů omezeno zejména potřebnou teplotou pájení a teplotní odolností substrátu, je zde také užíváno. Proto je zde proveden také i experiment s pájkou s nižší teplotou tavení.

K práci mám následující připomínky:

Str. 28 – „1.3.2. Degradací mechanizmy plniva“ : oxidace elektricky vodivého plniva u vodivých lepidel není významná z hlediska nárůstu odporu vlastního plniva, ale je významná z hlediska změn vlastností tunelových vrstev mezi částicemi, protože u lepidel s izotropní elektrickou vodivostí je dominantním mechanismem vodivosti tunelování. Nesouhlasím s tvrzením, že degradace (rozuměj oxidace) plniva nemá významný vliv na mechanické vlastnosti lepeného spoje. Změnou vlastností oxidové vrstvy se mění i adheze lepidla k částicím plniva, což může významně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti (viz např. výsledky DMA).

Str. 28 – „1.4 Substráty“: cituji ...“Jako základní materiál se nejčastěji užívá dielektrikum ...“, konec citace. Funkce základního materiálu u PCB není dielektrická, pokud není PCB užíváno jako kapacitor. Základní materiál u PCB musí mít tedy zejména izolační vlastnosti (zejména izolační odpor a elektrickou pevnost), i když dielektrické (permitivita a ztrátový činitel) jsou také důležité, zejména např. z hlediska přeslechů u vf aplikací.

Obr. 10 ukazuje, že v rámci práce byla realizována řada experimentů, které jsou přehledově znázorněny na mapě experimentů na obr. 10. Značný objem experimentů byl také realizován na tuhých substrátech. Proč, když práce je zaměřena na flexibilní substráty?

Na autora práce mám následující dotazy:

- 1. V práci doporučujete před použitím lepidel optimalizovat jejich vytvrzovací profil technikou DSC. Tento návrh sice má své opodstatnění, ale ne každý uživatel elektricky vodivého lepidla má k dispozici DSC. Výrobce lepidla k němu vždy dodává, zpravidla více než jeden, vytvrzovací profil. Jak by měl uživatel bez DSC přistoupit k výběru vhodného profilu?*

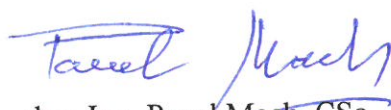


2. *Píšete, že dle výsledku měření pomocí DSC na obr. 49 byla zvolena teplota vytvrzení lepidla 90 °C. Proč? A jaký byl čas vytvrzování? Existuje nějaký podobný vytvrzovací profil pro dané lepidlo doporučený výrobcem?*
3. *Hodnoty odporu lepených a pájených spojů uváděných v tabulce 9 jsou zřejmě v mΩ. Dle našich zkušeností je odpor adhezního spoje u 0R0 odporu typu 1206 přibližně 15-30 mΩ, u pájených spojů je tato hodnota o 1-3 řády nižší. Hodnoty odporu lepených či pájených spojů v hodnotách stovek Ω jsou v elektronické montáži většinou nepoužitelné, snad s výjimkou některých speciálních případů (dovedete si představit, že byste takto montoval nějaký rezonanční obvod, který by měl mít vysoké Q?).*
4. *Jaké hodnoty uvádíte u hranic „box-plot“ grafů např. na obr. 64 a 65, ale i jiných (předpokládám dolní a horní kvartil, medián a minimální a maximální naměřenou hodnotu)? Co vám říká skutečnost, kdy medián není uprostřed mezi oběma kvartily?*
5. *Na str. 91 je uvedeno, cituji: ... “Pro úplné vyhodnocení tohoto experimentu byla vytvořena faktorová analýza (Obrázek 69) ...”, konec citace. Výsledky prezentované v grafu 69 nereprezentují výsledky faktorové analýzy. Co reprezentují?*

Práce je zpracována na výborné grafické úrovni a je psána dobrou češtinou, i když se autor nevyvaroval drobných chyb (např. na str. 95, cituji: ...“Pro tuto část experimentu byly zvoleny tři elektricky vodivá lepidla. ...”, konec citace). Na práci oceňuji řadu dobrých nápadů autora, např. jak ušetřit určité množství vodivého lepidla nebo pájecí pasty a další, i značný objem experimentální práce a kvalitní vyhodnocení výsledků experimentů. Publikační aktivita doktoranda je zcela vyhovující.

K práci, jak z hlediska odborného, tak z hlediska formálního, nemám závažnějších připomínek. Práce obsahuje značný objem systematicky zpracovaných výsledků adhezni a pájivé montáže na flexibilních substrátech. Je zde řada výsledků, které jsou zcela nové a vnáší i nový pohled do dané vědní oblasti. Ocenit je také třeba významný dopad zjištěných výsledků do praktických aplikací, zejména pro uživatele adhezni montáže.

Doktorand prokázal svou erudici a schopnost aplikovat teoretické poznatky v praktických aplikacích a zcela splnil cíle práce. Proto práci, dle zákona č. 111/1998 Sb. par. 47, doporučuji k obhajobě.


doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
ČVUT FEL Praha

V Praze dne 15. července 2017

Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., Fellow IMAPS
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky
Technická 10, 616 00 Brno

Posudek doktorské disertační práce

Doktorand: Ing. Martin Hirman

Název práce: Material and Process Aspects of Components Connecting to Flexible Substrates

Vedoucí práce: Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.

a) Zhodnocení významu práce pro obor

Předložená disertační práce řeší aktuální tematiku z oblasti propojování součástek s flexibilními substráty v moderní mikroelektronice, se zaměřením na dosažení co nejlepších mechanických a elektrických vlastností spojů optimalizací technologických faktorů, jako jsou způsob vytvrzování, množství naneseného lepidla, čistota, drsnost spojovaných povrchů atd. Aktuálnost je podpořena nejen legislativním přechodem z olovnatého na bezolovnaté pájení, ale rovněž probíhajícím výzkumem a vývojem v oblasti 3D pouzdrění a také nebývalým rozvojem organické elektroniky. Právě spolehlivost a životnost u bezolovnatých pájecích slitin je dosud ne dobře prokázaným a často diskutovaným faktorem, který s ohledem na nově zjištěné skutečnosti neumožnil určit plnohodnotnou náhradu olovnatých pájek. Vzhledem k tomu, že pro některé aplikace již byly úspěšně jako náhrada pájených spojů využity právě vodivá lepidla, lze konstatovat, že práce zaměřená na zlepšování vlastností vodivých lepidel v elektronice, navíc v aplikaci na flexibilních substrátech, představuje významnou a aktuální tematiku. Její řešení je založeno na prolínání základního i aplikačního výzkumu v oblasti mikroelektronických technologií, což zahrnuje poměrně širokou a také časově náročnou vědní problematiku.

b) Postup řešení, použité metody a splnění cíle disertační práce

Doktorand zvolil tradiční postup řešení, kde se v prvních dvou kapitolách zabývá obecným popisem problematiky propojování součástek na substráty a na to navazuje popisem současného stavu. Experimentální část tvořící jádro práce je potom rozdělena do dvou kapitol, řešících jednak problematiku vodivých lepidel a také pájek. Zde bylo provedeno celkem deset experimentů popsanych v jednotlivých kapitolách, z nichž každý experiment je ještě členěn dle působících faktorů a zpracován v podkapitolách. Každý experiment je vyhodnocen jako součást příslušné kapitoly, což na jedné straně přispělo jistě k získání okamžitých výsledků, ale na druhé straně nedává jednoznačně doporučení pro optimální volbu kombinace faktorů. Práce se často opírá o DSC analýzu, avšak je otázkou, jaké výsledky by byly dosaženy s využitím kombinace faktorů skutečnou faktorovou analýzou, neboť určité interakce faktorů lze předpokládat. To je ovšem oblast velmi široká a časově náročná, která zřejmě přesahuje rámec této práce při zvoleném postupu.

Cíle práce jsou obsaženy v samotném začátku práce a jsou definovány poněkud obecně. Jako hlavní cíl je stanoveno ověření mechanických a elektrických vlastností lepených spojů využívaných na flexibilních substrátech, což bylo ve své podstatě naplněno. Toto považuji za ryze obecný cíl a disertabilní jádro vidím především v prvním dílčím cíli, kterým je optimalizace procesních a materiálových vlivů pro dosažení co nejvyšší jakosti a spolehlivosti lepených spojů. Z toho pak vychází druhý dílčí cíl, definování technologických postupů vedoucích ke zlepšení v praxi. Doktorand správně stanovil na základě studia poměrně značného množství literatury nejvýznamnější faktory,

především teplotu a dobu vytvrzení, k čemuž využíval také DSC analýzu. Na základě toho ve spojení s dalšími testy pak doporučil konkrétní typy lepidel, což bylo vytyčeno v posledním dílčím cíli. Přitom ještě ověřoval vybrané vlastnosti včetně životnosti lepených spojů, kde se rovněž zaměřil na dosud ne příliš probádanou oblast mechanických vlastností.

K disertabilnosti vytyčených cílů v oboru „Elektrotechnika“ přispívá, i přes poměrně široké zaměření disertační práce vyžadující nezbytný vědecký přístup k různým odborným oblastem, především pak k materiálovému inženýrství (výběr a příprava materiálů), ale také k metodice měření a vyhodnocování (měření odporu spoje, testy životnost, mechanické testy atd.), a v neposlední řadě i nastavování a provedení technologických postupů (příprava vzorků), nutnost zvládnutí komplexního přístupu k řešení technologického výzkumu, což doktorand dokázal. Lze konstatovat, že stanovení cílů a jejich plnění proběhlo v rámci daných možností logicky a cíle byly naplněny.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a její přínos

Obsah práce je na horní hranici přiměřeného rozsahu (145 stran, 97 obrázků, 13 tabulek) a je rozčleněn do čtyř kapitol. V seznamu literatury je uvedeno celkem 83 publikací, a dále 20 publikací vlastních včetně spoluautorství. Cenné jsou především 2 publikace v impaktovaných časopisech a publikace na 13 mezinárodních konferencích, kde na sedmi byl zřejmě hlavním prezentujícím autorem.

Práce má logické složení, její struktura byla zvolena osobitým způsobem, což svědčí o jisté schopnosti doktoranda hledat nové přístupy a řešení, a uplatnit vlastní tvůrčí myšlení. V práci je provedeno na realizovaných vzorcích velké množství testů formou experimentů, což bylo bezesporu časově poměrně náročné. K předložené práci mám několik následujících poznámek:

- Obr. 10 znázorňující přehledovou mapu experimentů by zasluhoval alespoň stručný komentář, proč byly experimenty takto sestaveny.
- Na obr. 14 není zřejmé, co představují dva spodní profily.
- Obr. 35 a následně další (46, 47, 69 atd.) uvádějí vlivy použitých faktorů, ale v celkovém kontextu se ztrácí přehled o váze, resp. významnosti jednotlivých faktorů. Navíc vyvstává otázka vlivu interakcí mezi jednotlivými faktory.
- Obr. 70 ukazuje na nenutnost povrchových úprav pro lepidla, ale nehovoří se o tom, jak eliminovat oxidaci Cu plošek pro lepení.
- V kap. 3.6 se řeší zdrsňení substrátu, kde pozitivním zjištěním je kladný vliv čištění plazmou, ale není zcela jasný proměnný vliv zdrsňení brusným papírem (obr. 83).
- Sedmý experiment zaměřený na čištění neuvažuje chemické metody čištění, které jsou ve výrobcích nejrozšířenější, otázkou je možná přítomnost chemických nečistot.
- Na str. 105 je použit výraz pájitelnost, uvedené tvrzení se vztahuje spíše na smáčivost.
- Na obr. 85 a 86 jsou patrné téměř rovnocenné mechanické vlastnosti pájky SnBi s SnPbAg, což je pozoruhodné, jen není zmínka proč tomu tak je.

d) Přehlednost, formální úprava a jazyková úroveň

Doktorand vytvořil práci poměrně značného rozsahu, vcelku srozumitelnou a s jasnými výstupy. Práce má velmi slušnou grafickou úpravu, obrázky jsou názorné a vypovídající. V práci je minimum formálních chyb resp. překlepů (jako např. str. 25 „různé degradační ... atd.“), zavedená symbolika je zřetelná a uspořádání vcelku logické. Nejsou patrné zásadní chyby ani podstatné nedostatky. Práce má nesporný význam pro tento vědní obor, neboť byly zkoumány nové vlastnosti vodivých lepidel na flexibilních substrátech, a to novým přístupem, zaměřeným na hledání významných faktorů s využitím DoE a DSC analýzy. Z práce lze usuzovat, že doktorand je pracovník se schopnostmi vědecky samostatně pracovat.

Novost je dána obecně charakterem řešícím nové poznatky pro elektroniku se zaměřením na technologie propojování. Zde každé nové originální řešení či poznatek přináší řadu nových skutečností a otvírá nové možnosti, které je třeba prozkoumat a dořešit na základě jak teoretických, tak

experimentálních studií přinášejícími nové poznatky a zjištění, což se obvykle děje opakovaně v delším časovém horizontu. Rovněž nově zvolený přístup k získání nových výsledků naznačuje další možnosti v této oblasti.

Doktorand řešil problematiku zaměřenou na propojování flexibilních substrátů, jež jsou uvažovány jako jedna z možností řešení systémů SoP a SiP na organické bázi v 3D elektronických sestavách. Jedná se o řešení založené na experimentálním výzkumu, v němž jsou prezentovány výsledky prováděné na základě měření nových parametrů. Práce rozšiřuje teoretickou i praktickou oblast bádání o vodivých lepidlech a má uplatnění především v pokračování dalšího sledování vlastností lepidel s cílem optimalizace parametrů. Rozšiřuje vědní oblast vodivých lepidel a prezentuje dosud nezkoumanou problematiku.

e) Naplnění samostatné vědecké práce a vyjádření k publikacím

Práce obsahuje v seznamu literatury 83 odkazů, a dále 20 vlastních publikací. Svou váhu mají především 2 publikace v impaktovaných časopisech a 13 publikací na mezinárodních konferencích, včetně konferencí vedených v databázi IEEE. Jak z hlediska kvantity tak také kvality, je požadavek na publikace nejen splněn, ale bohatě překročen. To svědčí o naplnění samostatné vědecké práce v rámci požadavků doktorského studia.

g) Shrnutí

Problematika byla dořešena do realizační fáze s konkrétními závěry získanými měřeními a testováními. Analýza a optimalizace faktorů a tím i ověření vlastností kompozic lepidel a pájek pro spojování flexibilních substrátů je provedeno rozsáhlým souborem zkoušek, jež si vyžádaly náročnou přípravu materiálů a následně i testovacích vzorků. Poměrně obsáhlý rozsah zkoušek může být důvodem pro poněkud stručnější rozbor dosažených výsledků, včetně závěrů a doporučení pro případnou další optimalizaci.

Lze konstatovat, že zvolené téma a zvolený způsob řešení s vytyčenými cíli je dle §47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb. a článku 32, odst. adekvátní požadavkům na disertační práci PhD.

Proto **doporučuji disertační práci Ing. Martina Hirmana k obhajobě.**

V Brně dne 17. 7. 2017



Otázky

1. Uveďte příklad využití faktorových pokusů pro dva hlavní faktory teplotu a čas faktorovou analýzou 2³
2. V seznamu zkratk je výraz TMA. Co to znamená a jaký je její princip?
3. V práci jsou využity některé mechanické testy. Uveďte stručně přehled mechanických testů doporučených normami.
4. Čím lze vysvětlit dobré vlastnosti pájky SnBi, jež byly zjištěny téměř identické pájce SnPbCu a je rozdíl mezi sočivostí a pájitelností?
5. Je možné navázat na výsledky této práce a v případě, že ano, můžete uvést tři základní doporučení pro další pokračování?

Posudek oponenta disertační práce s názvem:
Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty

Autor: Ing. Martin Hirman

Práce obsahuje 141 textových stran, 2 přílohy, 97 obrázků, 13 tabulek. Seznam literatury má 83 položky. Seznam publikací autora vztahujících se k tématu práce má 20 položek.

Předložená disertační práce se řadí do množiny výzkumných oblastí dlouhodobě sledovaných na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Elektrické a elektronické systémy využívající nové součástky a technologie jejich přípravy procesy "tištěné elektroniky" kladou nové požadavky na propojovací struktury. Lze je charakterizovat malými rozměry, ohebností, spolehlivostí, nízkými náklady pořizovacími i provozními. Připojovací technologie se významně rozšiřují o elektricky vodivá lepidla, přičemž dosud převažující pájení se musí vyrovnat s požadavky na snížení tepelného namáhání substrátů z organických materiálů. Aktuálnost tématu práce a jeho význam pro obor jsou zřejmé.

Autor uvádí vytyčené cíle disertační práce (str. 14) – ověření mechanických a elektrických vlastností lepených spojů aplikovaných na ohebné substráty, optimalizace procesních a materiálových vlivů s cílem dosažení vyšší kvality spojů, životnost lepených spojů zrychleným stárnutím, definovat doporučení pro praxi.

Práce je logicky členěna na část rešeršní, část věnovanou detailním návrhům experimentů, jejich realizaci včetně podrobnějších popisů a dílčímu vyhodnocení. Témata pokusů na sebe logicky navazují, výsledky jsou postupně přenášeny do následujících. Z množiny sledovatelných vlastností spojů byl důraz položen na mechanické vlastnosti. V Závěru disertant uvádí, že všechny cíle byly splněny.

Disertační práce vychází z již zpracovaných tezí této práce. V prvních dvou kapitolách uvádí výsledky rešerše dostupných literárních zdrojů týkajících se připojovacích technologií – pájení a lepení – a ohebných substrátů. Uvádí i dostupnost potřebných materiálů na tuzemském trhu.

Následující dvě kapitoly obsahují poněkud formálně netradiční popis prováděných dílčích experimentů s vyhodnocením. Třetí kapitola je věnována připojování elektricky vodivými lepidly, jejich technologickými variantami, vytvrzováním, elektrickým a mechanickým parametrům. Čtvrtá kapitola sleduje různé konstrukční a technologické varianty připojování součástek pájením na ohebné substráty včetně užití nízkoteplotní pájecí slitiny.

Lze souhlasit s konstatováním disertanta uvedeném v Závěru, že stanovených cílů bylo dosaženo. Pro připojení součástek na ohebné plošné spoje byla vytipována dvě konkrétní lepidla.

Za nová zjištění považuji:

Doporučení na množství a tvar nanášeného lepidla,
úpravy teplotních profilů pro vytvrzování lepidel,
řízeným neúplným vytvrzením lepidla prodloužení životnosti spoje.

Disertační práce p. Ing. Hirmana je přehledná, je psána velmi srozumitelně, logicky uspořádaná, vyznačuje se vynikající grafickým provedením.


Publikace disertanta jsou velmi rozsáhlé (20 položek), od vystoupení na různých konferencích až po články v impaktovaných časopisech, z let 2014 až 2017. Dokládají soustavnou práci na řešené problematice.

K práci mám několik poznámek a dotazů:

- 1) Ve svém posudku tezí tehdy proponované práce jsem uváděl, že ke slovu "tuhý" je opositum "ohebný". K disertační práci mám poznámku stejného charakteru, jen s prohozením termínů. Mělo by být respektováno ustálené názvosloví obsažené ve standardech.
- 2) Kapitola 3.1.3. nese název "Měření mechanické pevnosti lepeného spoje". V textu je popis zařízení a postup měření, při kterém je zaznamenávána hodnota síly potřebné k porušení spoje. Pevnost obecně je dána mechanickým napětím na mezi pevnosti daného případu. Je název kapitoly a označování síly jako pevnosti v celém textu práce korektní?
- 3) Pevnost lepeného spoje závisí na čtyřech parametrech: na přilnavosti lepidla k lepenému povrchu – adhezi, na vnitřní pevnosti lepidla – kohezi, na smáčivosti lepeného povrchu kapalným lepidlem, na soudržnosti lepeného materiálu. Poslední v našem případě je jistě splněn (SMD). Z obr. 39, 40, 44, 45 lze usoudit, že u sledovaných vzorků k oddělení došlo ztrátou adheze, pravděpodobně nebyly splněny podmínky dobré smáčivosti plošky resp. součástky (na uvolněných plochách nejsou stopy po přítomnosti lepidla). Problémem se zabýval 6. experiment. Zkoušky na tuhých DPS nejsou pro téma práce relevantní. Na ohebných DPS použité metody čištění neměly očekávaný účinek. Není uvedeno, zda nějaký čisticí proces proběhl i na SMD rezistorech.
- 4) V 1. experimentu se zabýváte hypotézou (B), že vytvrzení za zvýšeného tlaku bude znamenat vyšší pevnost lepeného spoje. Přítomnost tlaku při dané viskozitě lepidla jistě způsobí snížení tloušťky vrstvy lepidla. Při vámi popsaném vytvoření přitlaku přiložením závaží přes tuhý DPS tomu tak u všech lepených SMD pravděpodobně nebude, protože rozdíly v tloušťce rezistorů způsobí různý dílčí tlak na součástky. Jak tento přitlak byl realizován u pájených spojů (byly součástí 1. experimentu)? Jak jste přepočítal sílu na tlak?
- 5) V rešeršní části (str.32 nahoře) uvádíte, že "Nejvýznamnější vlastností parylenu je jeho nízká dielektrická konstanta. Parylen je tedy již při malé tloušťce velmi dobrý izolant." Vysvětlíte toto tvrzení.

Disertační práce pana Ing. Martina Hirmana na téma Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty splňuje podmínky dle zákona č. 111/1998 Sb., §47 a doporučuji ji k obhajobě.

Doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jan Urbánek', written in a cursive style.

V Poděbradech dne 24. července 2017