

# **Návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných spojů**

Ing. Jiří Křenek, Ph.D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Teze dizertační práce

### **Návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných spojů**

**Design and modeling of ecological processing of printed circuit  
boards**

Autor: **Ing. Jiří Křenek**

Studijní program: Inženýrská informatika P3902

Studijní obor: Automatické řízení a informatika 3902V037

Školitel: prof. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.

Oponenti: doc. Ing. Ondřej Líška, CSc.  
Dr. h. c. prof. Ing. Pavol Božek, CSc.  
prof. Ing. Miluše Vítečková, CSc.

Zlín, srpen 2017

© Jiří Křenek

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.  
Publikace byla vydána v roce 2017

*Klíčová slova: Smykové napětí, teplotní šok, napjatost, délková roztažnost, elektronický odpad, deska plošného spoje (DPS), recyklace, vodivé cesty, Pro/ENGINEER, COMSOL Multiphysics®*

*Key words: Shear stress, thermal shock, stress, linear expansion, electronic waste, printed circuit board (PCB), recycling, conductive paths, Pro/ENGINEER, COMSOL Multiphysics®*

Plná verze dizertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-711-9

## **Abstrakt**

Obsahem dizertační práce je návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných spojů (DPS) s ohledem na studii problémů spojených s návrhem řešení separace vodivých cest od plastu a s ohledem na legislativní přístupy. V úvodu dizertační práce je věnována pozornost stávajícím způsobům separace DPS, složení a výrobě DPS a v neposlední řadě použitým pojivům v DPS. Pro návrh matematického popisu teplotních polí v DPS je využito nástrojů matematického modelování. Velká část dizertační práce se věnuje simulačním experimentům, ve kterých je simulován nestacionární ohřev DPS, cyklické namáhání a další procesy, ke kterým dochází při teplotním nebo mechanickém namáhání. Tyto simulace jsou prováděny v programovém prostředí Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics® a to z důvodu možnosti použití více multifyzikálních procesů zároveň. Výstupy z počítačových simulací jsou výchozím stupněm pro návrh nového ekologického způsobu recyklace DPS. V závěru dizertační práce jsou kalkulovány náklady na navržený proces separace, diskuze poznatků a jejich experimentální verifikace v laboratorním prostředí.

## **Abstract**

The content of the thesis is design and modeling of ecological processing of printed circuit boards (PCB). The study deals with problems associated with the design and recycling solutions of PCB and with regards to approach of legislation. At the beginning of the thesis attention is paid to the current methods of PCBs separation, composition, production of PCBs and recent usage in PCB's binders. The mathematical modeling tools are used to design a mathematical description of temperature fields in PCBs. Large part of the dissertation deals with simulation experiments of nonstationary PCB heating, cyclic loading and other processes that occur with thermal or mechanical load simulation. These simulations are carried out in the Pro/ENGINEER and COMSOL Multiphysics® software environments, due to the possibility of multiple physical processes being used at the same time. Outputs from computer simulations are the starting point for designing of a new eco-friendly way of recycling PCBs. The end of my dissertation thesis quantifies the cost of the proposed separation process, discusses findings and their experimental verification in laboratory environment.

# OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>4</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>6</b>
<b>1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU.....</b>	<b>8</b>
1.1 Legislativní řešení elektroodpadu .....	8
1.2 Poplatky za recyklaci.....	8
<b>2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>9</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>3. MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ DPS.....</b>	<b>10</b>
<b>4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SEPARACE DPS.....</b>	<b>11</b>
4.1 Stanovení $\Delta T$ pro separaci vodivých cest a plastové desky.....	11
4.2 Matematický popis teplotního pole v DPS.....	12
<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>16</b>
<b>5. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY.....</b>	<b>16</b>
5.1 Proces simulace smykového napětí v DPS .....	16
5.2 Přímý ohřev vodivých měděných cest v závislosti na čase.....	17
5.3 Teplotní cyklické namáhání .....	19
<b>6. ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH SIMULACÍ .....</b>	<b>22</b>
6.1 Zhodnocení kapitoly.....	22
<b>7. LABORATORNÍ ZKOUŠKY - návrh technologie zpracování DPS .....</b>	<b>23</b>
7.1 Princip zkoušek .....	23
<b>8. PRAKTICKÉ VÝSLEDKY A DISKUZE.....</b>	<b>25</b>
8.1 Povrch DPS – vrstva ochranného laku.....	25
8.2 Počet cyklických namáhání .....	25
8.3 Vzdálenost vodivých cest na DPS.....	26

<b>9. ZÁVĚR.....</b>	<b>28</b>
<b>10. POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>31</b>
<b>11. SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>32</b>
<b>12. SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>33</b>
<b>13. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>34</b>
<b>14. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA .....</b>	<b>36</b>
<b>15. PROFESNÍ ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>38</b>

## Úvod

Situace s nárůstem elektronického odpadu nebyla nikdy tak aktuální, jak je tomu dnes a to z důvodů velké modernizace těchto zařízení. O tom svědčí i studie českého statistického úřadu (ČSÚ) o počtu užívaných počítačů v České republice (ČR) [1].

V roce 2016 se stolní počítač, notebook či tablet nacházel ve třech čtvrtinách všech českých domácností, což je nejvíce za poslední dekádu. Podíl takových domácností postupně narůstá - v roce 2006 mělo počítač 35% domácností, v roce 2010 téměř 60%, nicméně v posledních letech meziroční růst domácností s počítači slábne s jejich postupnou saturací. Zároveň se v českých domácnostech v průběhu času mění podoba používaného zařízení. Zatímco v roce 2010 byla vybavena stolním počítačem polovina domácností, v roce 2016 je takových domácností v ČR o deset procent méně. Současně se zvyšuje podíl domácností s notebookem, v roce 2010 jich byla čtvrtina, o šest let později více než polovina. Tento trend se projevuje v různých skupinách domácností s výjimkou domácností osob starších 65 let, v nichž stále převládají stolní počítače (18%) nad notebooky (12%). Oba typy počítačů (stolní i přenosný) zároveň využívá zhruba milion domácností ČR (24%). Nejčastěji se jedná o vícečlenné domácnosti či domácnosti s dětmi (40%) a domácnosti s vyšším příjmem, jichž byla více než polovina. Tabletem disponuje v roce 2016 pětina domácností, v nejvyšší míře vícečlenné domácnosti a domácnosti s vyšším příjmem [1].

Jsme obklopeni elektronickými spotřebiči a tato elektronika má velice krátkou životnost a to z důvodu modernizace těchto zařízení. To ale na druhou stranu znamená, že starší elektroniku stále rychleji odkládáme a suneme ji do odpadů. Elektrošrot je velmi rozmanitý a proto recyklace vyžaduje velký stupeň separace.

Možností recyklace elektrošrotu se nabízí celá řada, ale některé jsou pro životní prostředí nebezpečné, zejména na bázi chemických metod např. kyanidové loužení. Při této metodě hrozí nebezpečí průsaků chemikálií do spodních vod a tak hrozí ekologická havárie.

Ve své dizertační práci jsem se zaměřil na část, která je součástí každé elektroniky a to na recyklaci desek plošných spojů (DPS), zejména na oddělení kovových vodivých cest, které jsou obsaženy v DPS, pomocí teplotního cyklického namáhání.

S trendem moderní doby se vyžaduje, aby návrh nových výrobků a jejich uvedení do provozu byl co nejrychlejší a s co nejnižšími náklady. Také si je třeba uvědomit, že návrh nových metod vyžaduje dostatečný počet provedených zkoušek a hledání nejlepších variant na požadovanou metodu, což je velice náročné.

Z výše uvedeného vyplývá, že je velmi aktuální hledat nové ekologické postupy separace desek plošných spojů. Řešením je využití vhodného softwaru pro 3D modelování a simulaci fyzikálních procesů, proto jsem použil SW

Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics®. SW Pro/ENGINEER pro 3D modelování DPS a elektronických součástek a SW COMSOL Multiphysics® pro řešení simulačních úloh pomocí metody konečných prvků (MKP). Software můžeme použít v případech, kdy je nutné řešit multifyzikální úlohy.



# 1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

S vývojem nových technologií, které přináší usnadnění, ale i zrychlení našeho života přímo úměrně roste i výroba elektronických výrobků. Základem těchto výrobků jsou zejména desky plošných spojů. Tak jako Internet, který se stává součástí našeho života, jsou i tyto elektronické výrobky stále potřebnější a žádanější bez kterých se neobejdeme. Tyto výrobky mají určitou dobu životnosti a po její skončení dochází k hromadění těchto výrobků na skládkách, nebo jsou z části recyklovány. Tohoto rozmanitého elektronického odpadu je stále více a dle studií ho přibývá několik tisíc tun ročně.

Obecně vzato je elektronický odpad stále větším problémem a to nejen v lokálním měřítku, ale i v globálním. Možností recyklací se nabízí celá řada, ale některé jsou životnímu prostředí nebezpečné. Zejména na bázi chemických postupů např. kyanidové loužení. U těchto recyklačních metod hrozí nebezpečí průsaků chemikálií do spodních vod a tím vznik ekologické havárie. Další z možností, jak oddělit kovové cesty od plastů, je broušení nebo drcení, magnetická separace, ruční demontáž, apod.

## 1.1 Legislativní řešení elektroodpadu

V následující části je pozornost věnována legislativní úpravě. Položil jsem si otázku. Kde končí elektroodpad, když se platí recyklační poplatek z ceny zakoupeného zboží?

Odpověď je následující. Vše je řízeno zákonem č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů [2]. Definiuje povinnosti, které se týkají výrobců, dovozců a prodejců elektrického a elektronického zařízení.

Za rok 2014 se na světě vyprodukovalo téměř 42 000 000 tun elektroodpadu. Do roku 2018 se předpokládá zvýšení o dalších 50 milionů tun [3].

## 1.2 Poplatky za recyklaci

Nakládání s tzv. elektroodpadem upravuje zákon 185/2001 Sb., o odpadech v platném znění, který byl novelizován zákonem č. 7/2005 Sb. (dále jen zákon) a vychází z legislativy EU o odpadech 2002/96/ES [2]. Tyto zákony stanovují podmínky pro nakládání s elektroodpadem, jeho oddělený sběr a likvidaci od 13. 8. 2005. Pro splnění povinností daných zákonem vznikl REMA systém, který sdružuje dovozce a výrobce IT produktů. Na základě zákona je od 1. 9. 2005 ke každému produktu, jehož se zákon týká, přiřazen odpovídající recyklační poplatek. Tento poplatek zahrnuje recyklační náklady a příspěvek na hospodaření s historickým elektroodpadem.

## 2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V rámci dizertační práce jsou řešeny následující úkoly:

1. Studium problémů spojených s návrhem koncepce řešení recyklace desek plošných spojů.
  - a. Stávající procesy recyklace.
  - b. Legislativní řešení nakládání s elektroodpadem.
2. Stanovení matematického modelu separace kovu a plastu.
  - a. Výpočet teplotních polí a napjatosti v desce plošných spojů v daném čase včetně simulace úlohy v programovém prostředí Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics.
3. Experimentální verifikace navržených modelů v laboratorních podmínkách.
  - a. Stanovení minimálního teplotního rozdílu pro teplotní šok.
4. Návrh vhodných podmínek separace.
5. Ekonomické zhodnocení navržené metody separace DPS.
6. Zhodnocení dosažených výsledků:
  - a. význam v teoretické oblasti matematického modelování,
  - b. význam pro průmyslovou praxi.

## TEORETICKÁ ČÁST

V této části jsem se zaměřil na způsoby konstrukce DPS. Na základě těchto znalostí je snazší navrhnout jejich vhodnou separaci, s čímž souvisí návrh matematického popisu děje separace. Navazujícím bodem je matematický rozbor jak navrhované metody, tak různých simulací a dějů probíhajících při teplotním nebo strukturálním namáhání.

### 3. MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ DPS

Stále se zvyšující výrobou a spotřebou elektronických a elektrických výrobků dochází k velkému nárůstu odpadů z těchto zařízení.

Deska s plošnými spoji (DPS) je výsledná deska obsahující plošné vodiče, pájecí body a další prvky vodivého obrazce, určená pro montáž součástek i mechanických dílů, nověji nazývaná montážní a propojovací struktura. Deska s plošnými spoji je základní složkou montážní technologie všech elektronických celků. Plní funkci nosného prvku součástek, tj. funkci mechanickou, zajišťuje odvod ztrátového tepla, funguje jako elektrický a v poslední době i jako optický propojovací člen mezi součástkami a systémy. DPS musí být spolehlivá i cenově dostupná [4].

Cenným přínosem je znát materiálové složení toho odpadu. Důvod? Nebezpečnost odpadů a ekonomická stránka recyklace.

DPS je tvořena kovy, plasty, keramikou, sklem a halogeny. Hmotnostní podíly jednotlivých materiálů závisí především na typu DPS. V jedné tuně odpadu z DPS může být 120 - 150 kg mědi, 10 - 15 kg cínu a olova a až 10 kg zlata, stříbra a platiny [5].

## 4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SEPARACE DPS

V následující kapitolách jsem matematicky popsal stanovení požadovaného teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a plastové desky a teplotní pole v DPS. Další matematické modely jsou uvedeny v dizertační práci.

### 4.1 Stanovení $\Delta T$ pro separaci vodivých cest a plastové desky

Pro Stanovení teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a plastové desky jsem použil mechanické vlastnosti Epoxidové pryskyřice a mědi. Tyto mechanické vlastnosti uvádím v tabulce Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Mechanické vlastnosti materiálů použitých pro výpočet [11].

	epoxidová pryskyřice	měď
Modul pružnosti $E$ [Pa]	$1,4 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^9$
Součinitel délkové roztažnosti $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$

Epoxidová pryskyřice – výpočet smykového napětí pro  $\Delta T = 1K$ .

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

$$\sigma_2 = 1,4 \cdot 10^6 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot 1$$

$$\sigma_2 = \underline{\underline{18,2}} \text{ MPa}$$

Měď – výpočet smykového napětí pro  $\Delta T = 1K$ .

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

$$\sigma_1 = 1,3 \cdot 10^9 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 1$$

$$\sigma_1 = \underline{\underline{2,21}} \text{ MPa}$$

Výpočet výsledné síly.

$$F_T = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot S_j \quad (4.3)$$

$$F_T = (2,21 \cdot 10^6 - 18,2)1 \cdot 10^{-5}$$

$$F_T = 22,099 \text{ N}$$

Výsledná síla musí být větší než dovolené smykové napětí pro dané materiály [4]. Tuto podmínku udává následující vztah 4.4.

$$\frac{F_T}{S_j} > \tau_s \quad (4.4)$$

$$\frac{22,099}{10} > \tau_s$$

Výsledné smykové napětí je dáno v MPa. Pro tvrdé pájky je dáno maximální smykové napětí  $\tau_s = 200$  MPa [12]. Pokračováním ve výpočtu i pro další teplotní rozdíly  $\Delta T$  jsem zjistil, že kritickou mez ve smykovém napětí  $\tau_s = 200$  MPa, pro styčnou plochu mezi materiály  $S_j = 10$  mm<sup>2</sup>, přesáhne při teplotním rozdílu  $\Delta T = 91$  K [4].

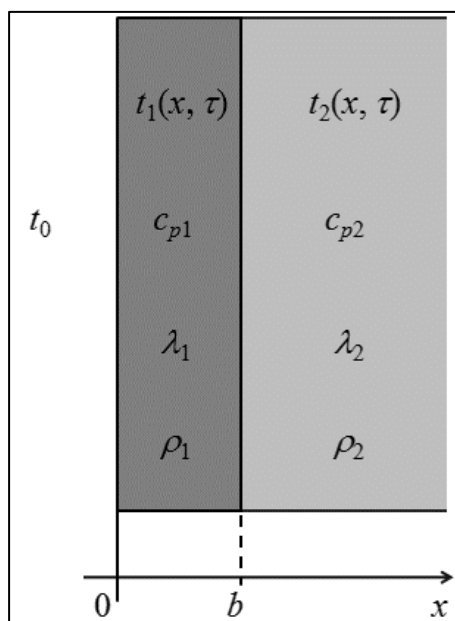
Tab. 4.2: Stanovení potřebného teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a epoxidové pryskyřice.

Teplotní rozdíl $\Delta T$ [K]	Smykové napětí mědi $\sigma_1$ [Pa]	Smykové napětí epoxydové pryskyřice $\sigma_2$ [Pa]	Styčná plocha $S_j$ [mm <sup>2</sup> ]	Vypočítaná síla $F_T$ [N]	Vypočtené smykové napětí $\tau_v$ [MPa]
88	194480000	1601,6	10	1944,784	194,47
89	196690000	1619,8	10	1966,884	196,68
90	198900000	1638	10	1988,984	198,89
91	201110000	1656,2	10	2011,083	201,10
92	203320000	1674,4	10	2033,183	203,31
93	205530000	1692,6	10	2055,283	205,52
...	...	...	...	...	...
366	808860000	6661,2	10	8088,5333	808,85

## 4.2 Matematický popis teplotního pole v DPS

Pro tepelné namáhání DPS bylo nutné se rovněž zabývat matematickým popisem teplotních polí v DPS během ohřevu a chlazení při cyklickém namáhání.

Při fyzikálním popisu neustáleného sdílení tepla ve dvouvrstvé rovinné desce uvažujeme poloohraničený masív v intervalu  $0 < b < \infty$  z důvodu intenzivního ohřevu ze strany vodivých cest. Geometrické zobrazení daného problému zachycuje obr. 4.1 [6].



Obr. 4.1: Geometrické zobrazení modelu teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce [6].

Uvažovaná deska o počáteční konstantní teplotě  $t_p$  je vystavena náhlému tepelnému působení okolního prostředí. Matematický model daného procesu lze popsat Fourierovou rovnicí vedení tepla (4.5) s počátečními a okrajovými podmínkami (4.6) – (4.9)

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau}(x, \tau) = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}(x, \tau), \quad \tau > 0, 0 < x < b \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau}(x, \tau) = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}(x, \tau), \quad \tau > 0, b < x < \infty \quad (4.6)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_p \quad (4.7)$$

$$t_1(0, \tau) = t_0 \quad (4.8)$$

$$\frac{\delta t_2}{\delta x}(\infty, \tau) = 0 \quad (4.9)$$

$$t_1(b, \tau) = t_2(b, \tau) \quad (4.10)$$

$$\lambda_1 \frac{\delta t_1}{\delta x}(+b) = \lambda_2 \frac{\delta t_2}{\delta x}(-b) \quad (4.11)$$

kde  $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_{p1}}$ , resp.  $a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_{p2}}$  je teplotní vodivost první, resp. druhé vrstvy ohřívajícího (chlazeného) materiálu a charakterizuje schopnost materiálu vyrovnávat teplotní rozdíly.

Počáteční podmínka (4.7) je předpokladem počátečního rovnoměrného rozložení teploty v ohřivaném nebo chlazeném tělese. Okrajová podmínka (4.8) předpokládá, že teplota na okraji první vrstvy stýkající se s okolním prostředím je časově neměnná a rovná se teplotě okolí. Okrajová podmínka (4.9) je předpokladem neměnné teploty v nekonečné vzdálenosti druhé vrstvy (poloohraničený masív). Okrajové podmínky (4.10) a (4.11) jsou předpokladem dokonalého styku obou vrstev.

Pro řešení výše uvedeného matematického modelu je výhodné použít Laplaceovu transformaci [7]. Analytické řešení popisující teplotní pole v první vrstvě tělesa  $t_1(x, \tau)$  má tvar

$$t_1 = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} h^n \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)b+x}{2\sqrt{a_1\tau}} - h \cdot \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)b-x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right\} \right] (t_o - t_p) + t_p \quad (4.12)$$

Rozložení teploty ve druhé vrstvě tělesa  $t_2(x, \tau)$  má tvar [33], [34]:

$$\frac{t_2 - t_p}{t_o - t_p} = \frac{2K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - b + (2n-1)K_a^{-\frac{1}{2}}b}{2\sqrt{a_2\tau}} \right) \quad (4.13)$$

kde:

$$h = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \quad (4.14)$$

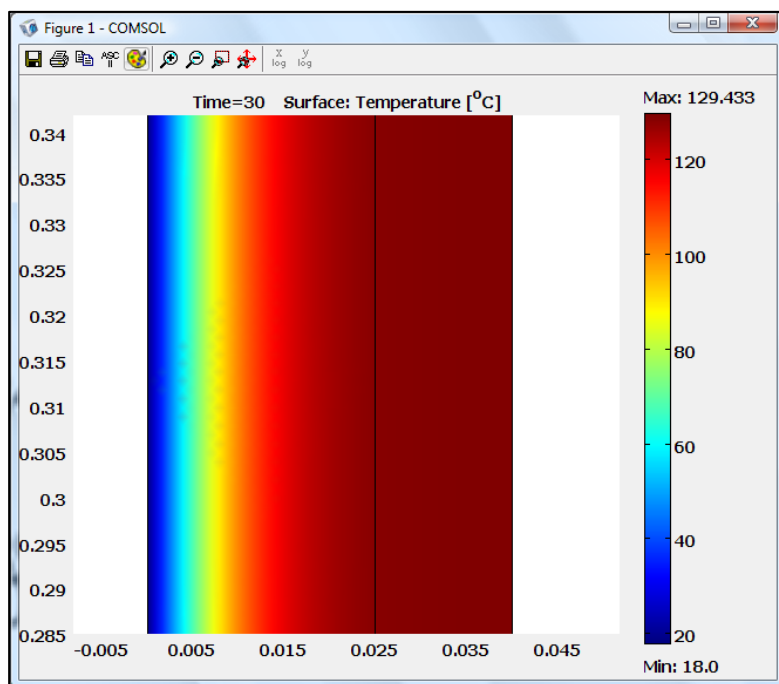
Kriteriální konstanty

$$K_a^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (4.15)$$

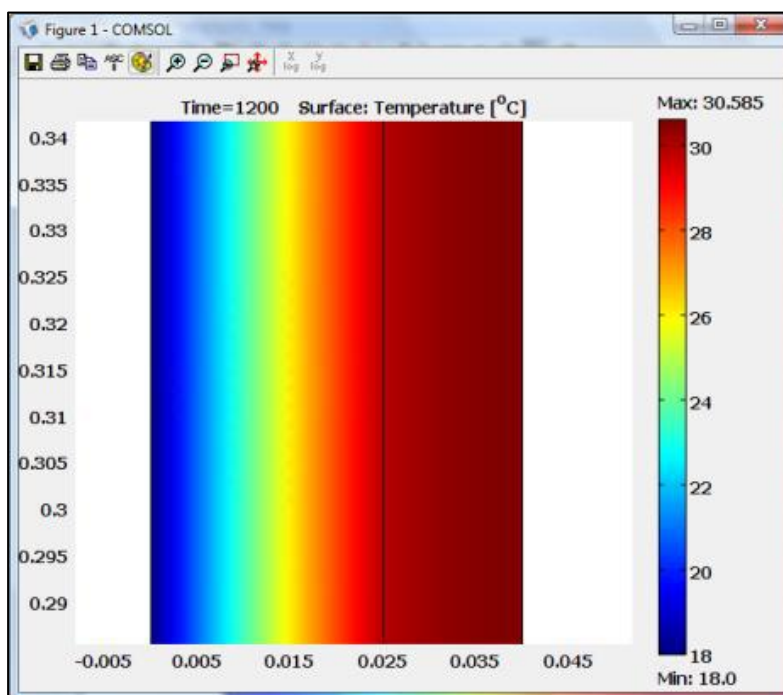
$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (4.16)$$

kde  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  je teplotní vodivost ohřivaného (chlazeného) materiálu a charakterizuje schopnost materiálu vyrovnávat teplotní rozdíly.

Simulované průběhy teplotních polí jsou zachyceny na obrázcích obr. 4.2 a 4.3. Obrázek Obr. 4.2 zachycuje teplotní pole v DPS při termické separaci po dobu 30 sekund.



Obr. 4.2: Teplotní pole v DPS po dobu 30 sekund [8].



Obr. 4.3: Teplotní pole v DPS po dobu 1200 sekund [8].

Obrázek Obr. 4.3 znázorňuje průběhy teplotních polí v DPS po dobu 1200 sekund. Barevná stupnice zobrazuje hodnoty teplotních polí graficky.



## PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části se věnuji počítačovým simulacím fyzikálních procesů aplikovaných na DPS a praktickým zkouškám, kterými ověřuji výsledky z počítačových simulací. Další simulační výsledky jsou uvedeny v dizertační práci.

### 5. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY

Kapitoly níže popisují provedené počítačové simulace teplotního namáhání v DPS. Použil jsem SW Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics®. SW Pro/ENGINEER pro 3D modelování DPS a elektronických součástek a SW COMSOL Multiphysics® pro řešení simulačních úloh pomocí metody konečných prvků. Software lze s úspěchem používat v situacích, kdy je nutné do modelu zahrnout více fyzikálních procesů – jedná se pak o komplexní multifyzikální úlohy. Tímto postupem je možné dosáhnout výrazně vyšší věrohodnosti modelovaného systému. Uživatel může do jedné úlohy zahrnout libovolný počet fyzikálních jevů, které chce brát při vytváření svého modelu v úvahu [10].

#### 5.1 Proces simulace smykového napětí v DPS

V SW Pro/ENGINEER jsem zvolil modul Pro/MECHANICA. Poté jsem vybral materiál z knihovny materiálů a přiřadil geometrii. Výhodou tohoto postupu je, že tyto materiály již obsahují všechny vlastnosti a fyzikální veličiny vhodné pro simulaci.

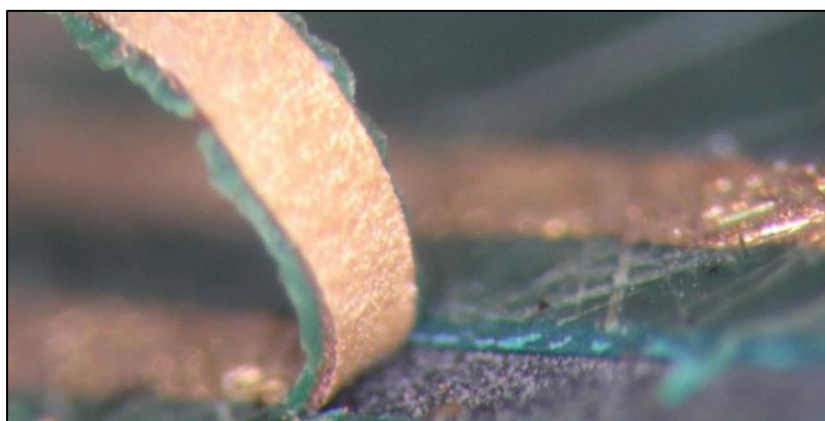
V dalším kroku jsem nadefinoval ohřev na 260°C a okrajové podmínky. Při této simulaci jsem DPS zahříval celou. Jakmile byla teplotní analýza ukončena, použil jsem výsledné rozložení teplot pro strukturální analýzu.

Vlivem různých délkových roztažností materiálu došlo ke vzniku napjatosti mezi materiály a k průvodnímu jevu – smykovému napětí. Výsledek z této analýzy je prezentován na obrázku Obr. 5.1. K maximální napjatosti došlo v místě zobrazené červeno šipkou. Hodnota tohoto namáhání je 492,1 MPa.

Výsledky simulace jsou zajímavé z pohledu vzniklého smykového napětí mezi měděnou cestou a Epoxy deskou. Překonané smykové napětí bylo lokální a dle definovaných podmínek se objevovalo na hraně měděné cesty obrázk Obr. 5.1. Dle barevné škály je vidět, že překonalo vypočtené smykové napětí pro lepené spoje a hrozí deformace a následně povolení spoje mezi měděnou vodivou cestou a Epoxy deskou. Sice se objevuje je na několika místech, ale i toto je dostačující pro pokračování separace mechanickým odtržením. Už není potřeba veliké síly pro stržení vodivé cesty z DPS. Což je v souladu s praktickým měřením na obrázku Obr. 5.2.



Obr. 5.1: Zobrazení maximální hodnoty namáhání - 492 MPa.



Obr. 5.2: Zobrazení odlupující se měděné vodivé cesty z DPS. Fotografie byla pořizena při 5,6 násobném zvětšení.

Dalším bodem bylo použití podmínky uchycení DPS bez stupňů volnosti s aplikací na celou Epoxy desku. Výsledkem je deformace vodivých cest na DPS. Deformace probíhala do všech směrů a vzniklo tak potřebné smykové napětí mezi vodivými měděnými cestami a Epoxy deskou. Po provedených analýzách jsem dospěl k závěru, že čím menší teplota tím rapidněji klesá deformace. Ta dosahuje minimálních hodnot v tisícinách milimetru.

Velký vliv na prostup tepla a na vznik teplotního spádu (šoku) měla hustota rozmístění vodivých měděných cest na DPS. Jelikož dřívější simulace probíhaly s jednou případně dvěma vodivými cestami, tak nyní probíhaly s reálnějším modelem DPS a tudíž jsem musel změnit podmínky pro uchycení DPS.

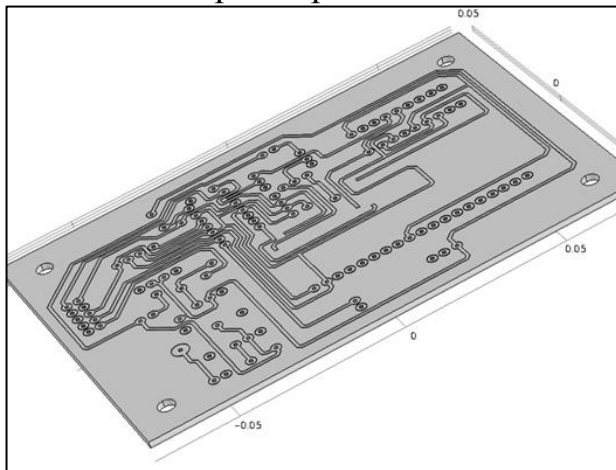
V této analýze byla zahrnuta i gravitace, která působí na DPS. Použitím gravitačního zrychlení v simulaci jsem obdržel reálnější výsledek simulace.

## 5.2 Přímý ohřev vodivých měděných cest v závislosti na čase

V následující části jsem provedl simulaci přímého ohřevu některých vodivých měděných cest DPS v závislosti na čase – nestacionární vedení tepla. Měděné spoje byly zahřívány po dobu 60s na teplotu 400K. Tento počáteční krok v celé

řadě simulací vedl k ověření chování teplotních polí v DPS v závislosti na vzdálenosti měděných cest od sebe.

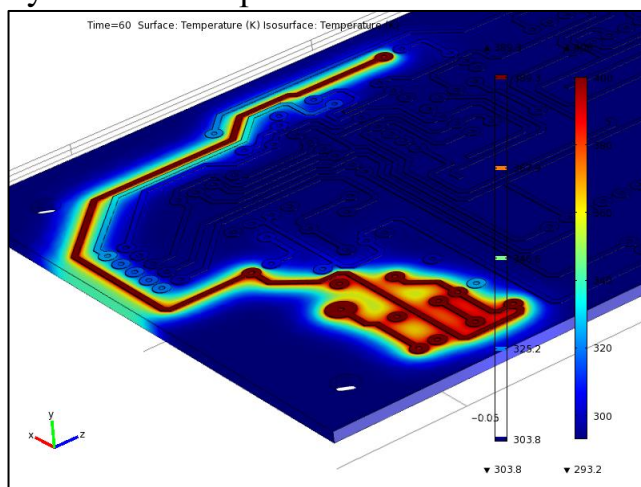
V prvním kroku jsem naimportoval model DPS do prostředí COMSOL Multiphysics®. Na obrázku Obr. 5.3 je 3D model DPS v měřítku 1:1. Obsahuje několik vodivých měděných cest s různou vzdáleností cest tak, aby bylo možné porovnat vliv této vzdálenosti na teplotní pole.



Obr. 5.3: Importovaný model do prostředí COMSOL Multiphysics®

Dalším krokem při simulaci ohřevu DPS byla definice materiálů. K výběru je několik desítek materiálů obsažených v materiálové knihovně. Vybral jsem materiál měď a FR4. Materiály již obsahují vlastnosti a parametry potřebné pro simulace. Pokud by některý z parametrů chyběl, lze jej jednoduše dopsat. V tomto okamžiku ještě není materiál přidělen dané geometrii. Toto se musí provést ručním výběrem v 3D zobrazení a následným přidělením materiálu. Po definici materiálů a jejich přiřazení geometrii následuje krok definice simulačních podmínek např.: zdroje tepla, okrajové podmínky, atd.

Po definici všech podmínek jsem spustil simulaci. Tato simulace trvala několik desítek minut a jejím výsledkem je obrázek Obr. 5.4. Další výsledky z této simulace jsou uvedeny v dizertační práci.



Obr. 5.4: Celkový pohled na DPS s ohřátými cestami na 400K po dobu 60 s.

Je patrné přímé ovlivňování nezahříváných měděných cest zahřívánými vodivými měděnými cestami. Tam, kde jsou cesty příliš blízko u sebe, můžeme očekávat vznik nižší napjatosti, než tam, kde jsou cesty od sebe dál.

Během analýzy výsledku jsem zjistil prohřátí DPS. Za dobu 60s se DPS dokázala prohřát na místech, kde byla z druhé strany zahřívána. Tento poznatek budu brát v potaz při tvorbě simulací nestacionárního vedení tepla ve vícevrstvé DPS.

Velký vliv na sdílení tepla a vznik teplotního spádu (šoku) má hustota rozmístění vodivých měděných cest na DPS. Jelikož dřívější simulace probíhaly s jednou, případně dvěma vodivými cestami, výsledky byly velice zajímavé z pohledu vzniklého smykového napětí mezi vodivými cestami a DPS. Nyní pro simulace vícevrstvých vodivých cest na DPS je nutné změnit podmínky pro uchycení DPS. Důvodem je jiné šíření tepla v desce a vzájemné ovlivňování jednotlivých vodivých měděných cest. Toto ovlivnění je způsobeno minimálními rozměry vzdálenosti mezi vodivými cestami. (Bylo použito reálné rozmístění DPS).

### **5.3 Teplotní cyklické namáhání**

Pro cyklické namáhání jsem použil Únavový modul, který je určen pro únavovou analýzu konstrukce. Pojem únava (Fatigue) je použit k popisu jevu, kdy materiál selže po opakovaných zatíženích, přestože velikost každého jednotlivého zatížení je menší než konečné napětí v materiálu. Únavový modul je doplňkový modul k modulu konstrukční mechaniky v prostředí COMSOL Multiphysics®.

Pomocí rozhraní Fatigue můžeme vypočítat riziko vzniku únavových trhlin v struktuře materiálů, kde byl stav napětí a deformace během jednoho zatěžovacího cyklu.

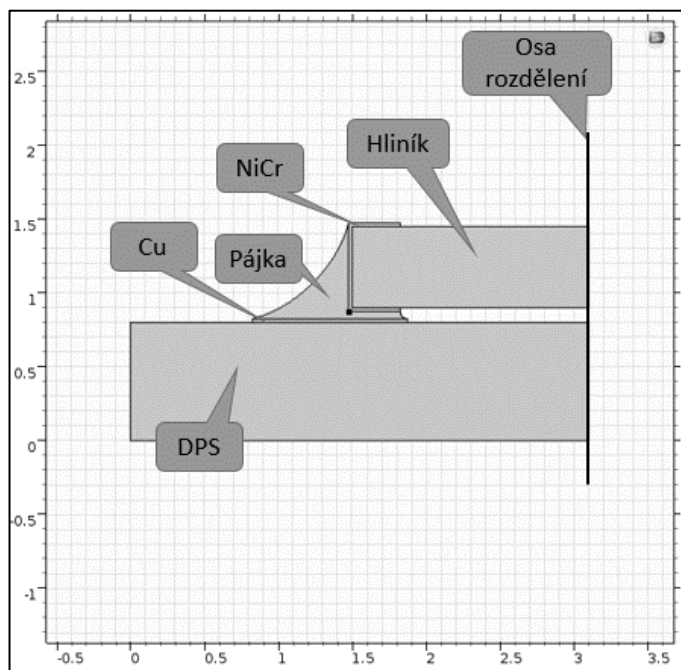
Použil jsem model rezistoru určený pro povrchovou montáž, který byl vystaven tepelnému cyklu. Pájecí spoj, který spojuje odpor s deskou s plošnými spoji, je nejslabším článkem sestavy. Aby byla zajištěna strukturální celistvost sestavy, byla provedena analýza únavy založená na zatížení při tečení a rozptýlené energii.

Simulace cyklického namáhání probíhala v prostředí COMSOL Multiphysics® 5.2, protože tato verze již tento modul obsahuje. Veškeré simulace proběhly se zapůjčenou a časově omezenou licencí od společnosti HUMUSOFT s. r. o.

#### **5.3.1 Model určený pro simulaci**

Model jsem do prostředí COMSOL Multiphysics® importoval. Důvodem je složitost konstruování modelu v tomto SW a je lepší veškeré modely vytvořit v jiných SW a následně je importovat. Obrázek Obr. 5.5 zobrazuje použitý model elektronické součástky v měřítku 1:1 a přiřazené materiály ke geometrii. Pro zrychlení výpočtu jsem model rozdělil na dvě stejné části, přičemž druhá část je

z výpočtu vynechána. Obdobný princip se používá pro simulace součásti, které jsou symetrické např. příruba.



Obr. 5.5: Model s definovanými materiály, který byl použit pro simulaci únavy materiálů

### 5.3.2 Časově závislá simulace

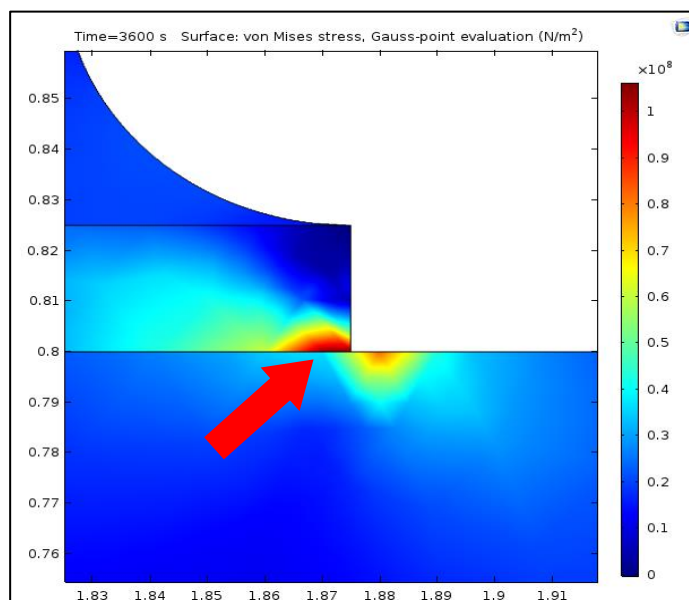
Použil jsem simulaci závislou na čase. V tomto procesu se proměnné mění v závislosti na čase. Definici času a stupních hodnot ohřevu jsem provedl pomocí tabulky Tab. 5.1. Čas  $\tau$  je vstupní čas, kdy teplota ohřevu  $t_o$  vstupuje do simulace cyklického namáhání.

Tab. 5.1: Vstupní hodnoty pro cyklické namáhání

Čas $\tau$ [s]	Teplota $t_o$ [°C]	Čas $\tau$ [s]	Teplota $t_o$ [°C]	Čas $\tau$ [s]	Teplota $t_o$ [°C]
0	20	20	20	40	20
2	70	22	70	42	70
5	70	25	70	45	70
7	20	27	20	47	20
10	20	30	20	50	20
12	70	32	70	52	70
15	70	35	70	55	70
17	20	37	20	57	20
				60	20

### 5.3.3 Výsledky simulace cyklického namáhání

Prvním z výsledků je rozložení napjatosti v materiálech. V simulačních podmínkách byl definován čas jedné hodiny, během které se aplikovaly teplotní šoky z tabulky tab. 5.1.



Obr. 5.6: Zvětšení oblasti s největším namáháním. Rozhraní Cu fólie na DPS.

Z obrázku Obr. 5.6 je zřejmé, že k největším napjatostem došlo mezi DPS a měděnou fólií. Místo je zobrazeno červenou šipkou. Maximální hodnota namáhání v tomto místě je, dle barevné stupnice vpravo,  $1 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## 6. ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH SIMULACÍ

Tato kapitola je zaměřena na hodnocení výsledků z provedených simulací. Jsou zde diskutovány poznatky a různá řešení pro separaci DPS.

Provedl jsem celou řadu simulací DPS v programovém prostředí Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics® a dospěl jsem k následujícím závěrům.

### 6.1 Zhodnocení kapitoly

Nejprve jsem provedl stacionární simulace, které jsou méně náročné na strojový čas výpočetní stanice a také na definici vstupních podmínek. Tyto simulace sloužily jako základ pro nestacionární simulace DPS.

Po provedení simulací s podmínkou, že namáhání je závislé na čase, se výsledky zpřesnily. Níže uvádím své poznatky.

- Vodivé měděné cesty nesmí ležet blízko u sebe, protože jejich teplota v čase ovlivňuje samotnou DPS a zahřívá ji.
- Zahřátí měděných vodivých cest musí být rychlé a efektivní. Zahřívání celé DPS taky vede k požadovanému výsledku, ale pomaleji.
- Záleží na druhu použité DPS a její osazení měděnými cestami.
- Maximální zahřátí DPS jsem stanovil na 260 °C. Vyšší teplotu nedoporučuji, protože dojde k degradaci DPS a k uvolnění škodlivých látek do ovzduší.
- Teplotní šok musí být velice rychlý, aby vyvolal požadované napjatosti mezi materiály.
- K napjatostem dochází na krajích měděných vodivých cest.
- Uchycení DPS při simulacích smykového napětí musí být efektivní. Při různém uchycení DPS, ale při stejných podmínkách ohřevu DPS, došlo k tvorbě jiných a nežádoucích výsledků. Nevzniknou požadované napjatosti mezi vodivými cestami a DPS.

## **7. LABORATORNÍ ZKOUŠKY - návrh technologie zpracování DPS**

V této kapitole jsem se zaměřil na princip zkoušek. Jako vstupní informace pro laboratorní zkoušky jsem použil výsledky ze simulací provedených v počítači. Další laboratorní zkoušky jsou uvedeny v dizertační práci.

### **7.1 Princip zkoušek**

Princip zkoušek spočíval v ohřevu DPS a prudkém zchlazení v chladicím roztoku. Při prudkém ochlazení DPS došlo vlivem různých délkových roztažností materiálů ke vzniku napjatosti mezi materiály a k odtržení měděných vodivých cest z DPS.

#### **7.1.1 Krok 1. – Příprava DPS**

Při vstupu DPS do recyklačního procesu musí být DPS očištěna a zbavena elektronických součástek. Odstranění součástek se děje pomocí speciálního nože, nebo speciální pily.

Pro laboratorní zkoušky jsem DPS nařezal na stejné rozměry 4 x 5 cm. Tímto jsem zaručil to, že rozměry DPS jsou řádově větší než její tloušťka. S touto podmínkou počítám v simulační části své práce.

Pokud je DPS opatřena i lakovanou vrstvou, tak tato vrstva musí být odstraněna pomocí brusného papíru nebo okartáčována. Při broušení lakované vrstvy dochází k vývinu tepla, které se dá použít jako přehřev pro druhý krok recyklace DPS. Nevýhodou je zanášení brusného papíru kousky lepidla.

#### **7.1.2 Krok 2. – Ohřev DPS**

Ohřev DPS probíhal několika způsoby a byl postupně vyhodnocován nejlepší způsob ohřevu. Nejprve byla DPS zahřívána v lisu, poté v mikrovlnné troubě a nakonec horkovzdušnou pistolí. Zvažoval jsem ohřev pomocí elektromagnetické indukce, ale tento způsob ohřevu byl pouze simulován v počítači. Výhoda ohřevu pomocí elektromagnetické indukce může být v tom, že budou zahřívány jen měděné vodivé cesty a ne celá DPS.

Nakonec byl vybrán ohřev horkovzdušnou pistolí.

#### **7.1.3 Krok 3. – Prudké zchlazení DPS**

K prudkému zchlazení musí dojít co nejrychleji po ohřátí DPS, aby došlo k teplotnímu šoku a ke vzniku napjatosti mezi materiály.

Pro prudké zchlazení ohřáté DPS jsem použil roztok solanky. Tento roztok dokáže zchladit materiál až na -20 °C. Výhodou tohoto chladicího roztoku je jeho rychlost výroby a nízká pořizovací cena.



K prudkému zchlazení materiálu lze použít i kapalný dusík. Kapalný dusík je extrémně studený. Jeho teplota varu je  $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13]. Nevýhodou použití tohoto chladiva je jeho cena.

#### **7.1.4 Krok 4. – Zpracování separovaných částí**

Po teplotním šoku a odtržení části vodivých cest z DPS lze jednoduše chytit odloupnuté konce vodivých cest a nevelkou silou je strhnout z DPS. Výstupem ze separace jsou odtržené vodivé cesty a samotný materiál DPS.

## 8. PRAKTICKÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole uvádím praktické výsledky své práce, kterých jsem dosáhl při ověřování simulačních předpokladů.

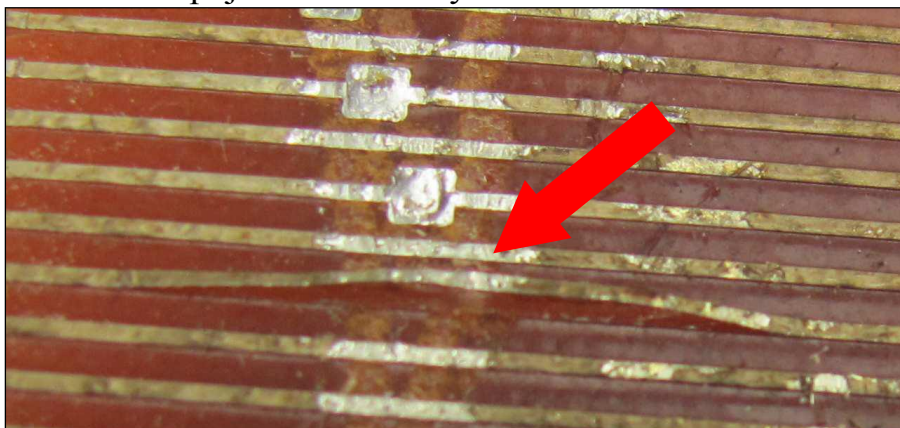
### 8.1 Povrch DPS – vrstva ochranného laku

Pro ověření vlivu ochranného laku na vznik smykového napětí jsem použil DPS s vrstvou ochranného laku. Na části DPS jsem pomocí brusného papíru odstranil tuto vrstvu a pak DPS zahříval horkovzdušnou pistolí na teplotu 260 °C a po ohřevu prudce zchladil v solance o teplotě -20°C.

Výsledkem je zjištění vlivu ochranného laku na povrchu DPS na vznik napjatostí mezi vodivými cestami a DPS. V místech, kde nebyl ochranný lak odstraněn, nedošlo k požadovanému smykovému napětí a DPS zůstala beze změny.

Závěr z toho experimentu je následující. Povrch některých typů DPS je tímto lakem ošetřen a tato vrstva musí být odstraněna.

Výsledek experimentu je znázorněn na obrázku Obr. 8.1. Červená šipka znázorňuje místo s odlupujícími se vodivými cestami z DPS.



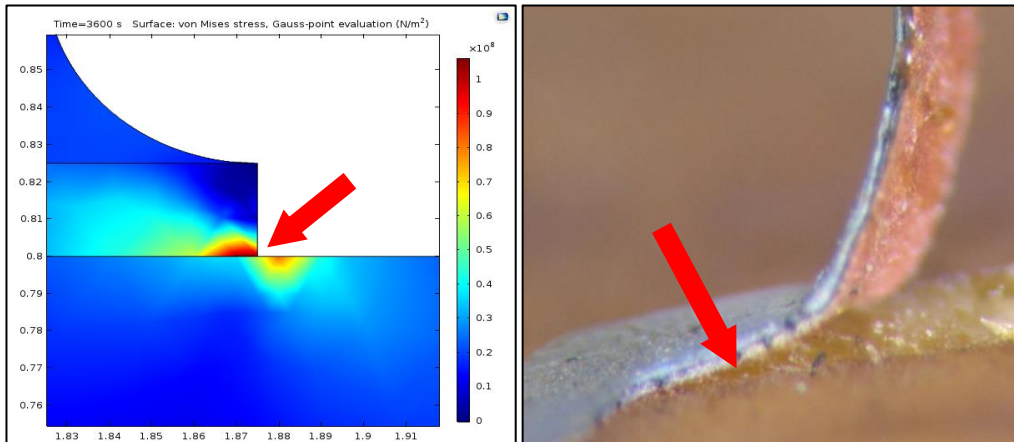
Obr. 8.1: Odlupující se vodivé cesty z DPS v místě, kde byla vrstva laku odstraněna.

### 8.2 Počet cyklických namáhání

Ze simulací cyklického namáhání vyplynuly poznatky, že určitý počet cyklů ohřevu a prudkého zchlazení aplikovaný na danou geometrii, má za následek vznik místní deformace v objektu. Také není potřeba tak vysoká teplota ohřevu.

Tento závěr jsem aplikoval do praxe a ověřil v laboratorním prostředí. DPS jsem cyklicky zahříval horkovzdušnou pistolí na 260 °C a prudce zchladil pomocí chladicí směsi ledu a NaCl. Experimentem jsem došel k závěru, že **deset cyklů ohřevu a zchlazení je dostačující** pro vznik požadované napjatosti pro separaci vodivých cest. Při této metodě ovšem také záleželo na typu DPS. U některých DPS deset cyklických namáhání nestačilo k oddělení vodivých cest a musel jsem použít více cyklických namáhání.

Na obrázku Obr. 8.2 uvádím srovnání simulačních výsledků s experimentálním ověřením v laboratoři. V levé části je výstup ze simulace elektronické součástky cyklickým namáháním. Barevná stupnice reprezentuje hodnoty napjatosti, které jsou rozprostřeny po geometrii, a červená šipka ukazuje na místo s největší hodnotou. Toto místo se nachází na rozhraní dvou různých materiálů. Vpravo je zobrazen výstup z experimentu. Červená šipka označuje místo s největším namáháním. Místo se nachází také na rozhraní dvou materiálů.

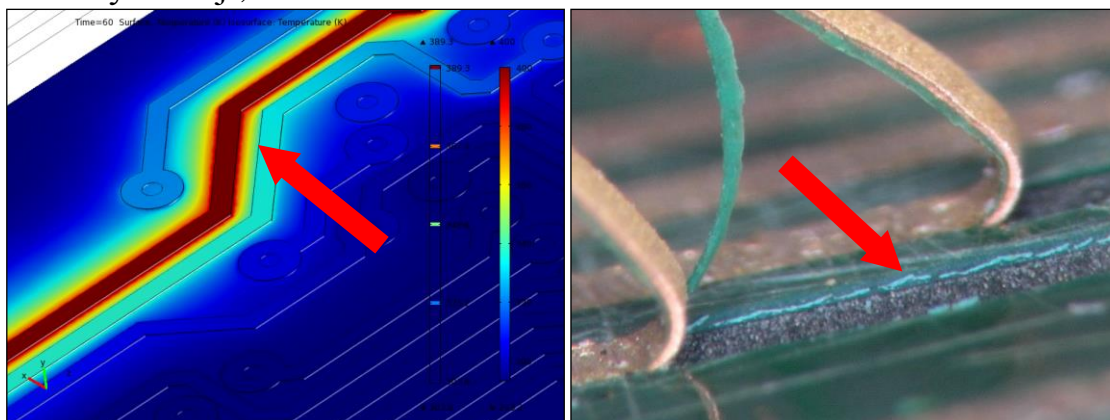


Obr. 8.2: Porovnání výsledků ze simulací (vlevo) s experimentálním ověřením v laboratoři (vpravo).

### 8.3 Vzdálenost vodivých cest na DPS

Dalším výsledkem je ověření, zdali má vzdálenost vodivých cest od sebe vliv na rozložení teploty v DPS a tak i vliv na vznik požadované napjatosti, která je důležitá pro separaci těchto cest z DPS.

V první fázi jsem provedl simulaci nestacionárního ohřevu vodivých cest na DPS v počítačovém programu. Výsledkem simulace byl fakt, že ohřev konkrétní vodivé cesty časem ohřival i vodivé cesty okolo. Na jak velkou teplotu se okolní vodivé cesty zahřejí, záviselo na čase ohřevu.



Obr. 8.3: Rozložení teploty v DPS a ověření vlivu teploty na vznik požadované napjatosti.

Na obrázku Obr. 8.3 analyzuji vliv vzdálenosti vodivých cest na rozložení teplot v DPS a na vznik požadované napjatosti. Vlevo uvádím výstup ze simulace,

kdy jsem zahřival jen jednu vodivou cestu po dobu 60 s na teplotu 400 K. Z výsledků simulace je vidět, že čím je menší vzdálenost mezi vodivými cestami, tím více se sousední cesty zahřívají a také ohřívají samotnou DPS. Dá se předpokládat, že v těchto místech nedojde, při teplotním šoku, k požadované napjatosti a k separaci cest z DPS.

Tento předpoklad se potvrdil, což je vidět v pravé části obrázku. Červená šipka ukazuje na místo, kde je vzdálenost mezi vodivými cestami větší a tak při teplotním šoku došlo k odloupení cest z DPS. Kde jsou cesty blíže u sebe, tam k odloupení cest nedošlo. Tento fakt je patrný v pravé horní části obrázku.

## ZÁVĚR

V dizertační práci jsem stručně zmapoval naléhavosti a účelnosti nakládání s elektroodpadem, jak v České republice, tak v celosvětovém měřítku. Zdůraznil jsem některé důležité body týkající se legislativy, jako jsou například poplatky za recyklaci a jejich využití a životní cyklus elektro materiálu.

V literární studii jsem se dále věnoval stávajícím způsobům recyklace elektroodpadu. Některé recyklační postupy, zejména na bázi chemické cesty, nejsou čisté technologie a produkují další nežádoucí odpady.

Pro návrh nové metody separace DPS jsem provedl analýzu výroby DPS a jejich složení. Důvodem bylo seznámení se se strukturou DPS, protože pro návrh nové ekologické metody recyklace je nutné znát výrobní postup DPS a jejich vnitřní strukturu. Z počátku byly DPS konstruovány jako dvouvrstvé s použitím jednoduchých pojiv. S rozvojem moderních technologií se začaly používat DPS vícevrstvé vyztužené skelnými vlákny s epoxidovou pryskyřicí.

Ze zpracované literární studie vyplynulo, že nárůst elektroodpadu je alarmující, z čehož vyplývá i nutnost tento elektroodpad zpracovat pokud možno stoprocentně a bez další produkce nežádoucího vedlejšího odpadu. Ukázalo se, že jednou z takových možností by mohla být ekologická separace vodivých cest pomocí teplotního cyklického namáhání založená na různé teplotní délkové roztažnosti materiálů.

Nový postup ekologické separace DPS byl navržen jako multifyzikální děj, jednak na základě provedených výpočtů a simulací, ale také s ohledem na životní prostředí. Proto jsem jako první bod provedl matematický popis a modelování teplotních polí v DPS, dále matematický popis rozlepení kompozitního nosníku a výpočet délkové roztažnosti pevných těles s výpočtem potřebného smykového napětí, které je dáno rozdílem tahových napětí obou materiálů.

Na základě provedených výpočtů a s ohledem na následně provedené simulace jsem dospěl k výsledku minimálního teplotního rozdílu  $\Delta T=91\text{K}$ . Při tomto teplotním rozdílu dojde ke vzniku potřebného smykového napětí na oddělení vodivých cest od plastu. Do výpočtu jsem také zahrnul styčnou plochu materiálů, protože se vyrůstající styčnou plochou je potřeba větší smykové napětí na oddělení vodivých cest od DPS.

Před provedením počítačových simulací jsem vytvořil 3D modely DPS v SW Pro/ENGINEER v reálném měřítku a dle skutečné DPS, aby pozdější výsledky ze simulací byly relevantní. Model DPS neobsahoval elektronické součástky a ani vrstvu laku.

S vytvořenými 3D modely a s výsledky z matematického modelování jsem provedl počítačové simulace. Nejprve jsem simuloval vznik smykového napětí na základě různých teplotních délkových roztažnostech vodivých měděných cest a Epoxydové desky. Výsledky simulace jsou zajímavé s pohledu vzniklého smykového napětí mezi měděnou cestou a Epoxy deskou. Překonané smykové

napětí bylo lokální a dle definovaných podmínek se objevovalo na hraně měděné cesty. Při této simulaci záleželo na uchycení DPS v prostoru. Když jsem použil jiné uchycení DPS, ale se stejnými simulačními podmínkami, tak se DPS jen prohýbala a k požadované velikosti smykového napětí nedošlo.

Dále jsem provedl ohřev DPS pomocí teplotního regionu o výkonu 100 mW, kterým jsem ohříval jen určitou část DPS. Maximální teplota ohřevu dosáhla 225 °C. Při této simulaci došlo k postupnému odvodu tepla delšími měděnými cestami z ohřivané oblasti a tím k jejich ochlazování. Cesty, jejichž délka byla krátká anebo přímo končily v ohřivané oblasti, se prohřály na vyšší teplotu. Tato počítačová simulace byla provedena jako stacionární.

Další simulací jsem prezentoval možnost nestacionárního ohřevu pomocí elektromagnetické indukce, kdy jsem zahříval jen měděné vodivé cesty po dobu 60 s na teplotu 400 K. Modul, pro elektromagnetickou indukci, jsem nemohl použít, protože v SW COMSOL Multiphysics® je vázán licenci, kterou jsem neměl k dispozici. Na vznik teplotního šoku má vliv hustota rozmístění vodivých měděných cest na DPS, protože docházelo k teplotnímu ovlivňování okolních cest.

Zabýval jsem se i simulací nestacionárního teplotního cyklického namáhání DPS. Pro cyklické namáhání jsem použil Únavový modul, který je určen pro únavovou analýzu konstrukce. Pojem únava je použit k popisu jevu, kdy materiál selže po opakovaných zatíženích, přestože velikost každého jednotlivého zatížení je menší než konečné napětí v materiálu. Simulaci jsem provedl na pájeném spoji elektronické součástky.

Také jsem vytvořil 3D model reálné DPS se součástkami. Tento model bude sloužit jako podklad pro rozvoj metody na dezintegraci DPS.

Provedené počítačové simulace jsem ověřil v laboratorním prostředí. Experimenty kopírovaly podmínky ze simulací, abych obdržel relevantní výsledky a daly se porovnat ze simulačními výsledky. Pro laboratorní experimenty jsem použil dvouvrstvé DPS. Pro sendvičové DPS se dá použít navržený nůž a DPS nakrájet na tenké pláty, čímž obdržíme opět dvouvrstvou DPS.

Při prvním experimentu jsem se zaměřil na vliv ochranné vrstvy laku na vznik požadované napjatosti mezi materiály. DPS jsem zahříval na 260°C a prudce zchladil v chladicí směsi solanky (-20°C). Zjistil jsem, že vrstva laku brání vzniku smykového napětí při teplotním šoku a musí být před separací vodivých cest odstraněna.

Ve druhém experimentu jsem ověřil hned několik závěrů z provedených simulací. Při aplikování cyklických teplotních namáhání došlo k separaci vodivých cest z DPS. Ověřil jsem předpoklad, že cyklickým namáháním se hranice největšího namáhání posouvá od krajů vodivých cest směrem k jejím středům, až dojde k úplnému oddělení konců vodivých cest z DPS. Poté stačí mechanicky tyto konce uchopit a nevelkou silou strhnout z DPS. Výhoda tohoto

postupu je v tom, že nepotřebujeme použít více cyklických namáhání, aby došlo k úplnému oddělení vodivých cest od DPS. Počet cyklů, kterými lze vodivé cesty separovat, jsem experimenty stanovil na deset. Další výhodou je úspora nákladů na proces separace, protože není potřeba tak velký ohřev nebo chlazení.

Ve třetím experimentu jsem se zaměřil na vzdálenost vodivých cest na DPS a jejich ovlivňování se navzájem při ohřevu. Poznatkem a závěrem je informace, že čím jsou vodivé cesty blíže a jsou déle zahřívány, tím se více ovlivňují a nedochází k požadovanému teplotnímu spádu mezi cestami a DPS. Pro tento případ navrhuji použít elektromagnetický ohřev. Jeho výhodou je rychlý a přesný ohřev požadovaného místa, ohřev jen měděných vodivých cest a nastavení hloubky prohřátí.

Z laboratorních pokusů, výpočtů a provedených simulací jsem zjistil, že tato cesta je schůdná a pro životní prostředí velmi přívětivá, protože tato metoda neprodukuje žádné nebezpečné odpady. Hlavní přednost této metody tkví v tom, že je ekologická a z tohoto důvodu jsem se tomuto tématu ve své dizertační práci věnoval.

Na základě experimentů jsem také provedl vyčíslení nákladů na pracování DPS. Jelikož se zatím jedná o manuální proces separace, jsou náklady vysoké. Jeden pracovní den, po odečtení ceny za separovanou měď, stojí 1134,- Kč. Pokud se v budoucnu docílí větší výtěžnosti, například použitím automatizace některých kroků, bude tato metoda i ekonomicky zajímavá.

Po zhodnocení všech výsledků a informací vyplývá, že navržený technologický postup ekologické separace vodivých cest z DPS cyklickým namáháním je realizovatelný a domnívám se, že bude přínosný v praxi.

## 10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Vybavenost domácností počítači a připojením k internetu [online]. [cit. 2017-02-01]. Český statistický úřad. Dostupné z: <https://www.czso.cz>
- [2] Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [3] Elektroodpad [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/elektroodpad>
- [4] KŘENEK, J.: *Separace elektronického odpadu vlivem teploty*, Diplomová práce, FAI UTB, Zlín, 2007
- [5] Příručka pro výrobce EEZ [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.cir.cz>
- [6] JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H, KOLOMAZNÍK, K., MOKREJŠ, P., VAŠEK, V. Matematický model a software pro řešení nesymetrických nestacionárních teplotních polí. In *Automatizacia a riadenie v teórii a praxi 2011*, Stará Lesná, 16. – 18. 2. 2011
- [7] Lykov, A., B. Teoria teploprovodnosti. Vysšaja škola. Moskva. 1967
- [8] JANÁČOVÁ, Dagmar, VAŠEK, Vladimír, MOKREJŠ, Pavel, KŘENEK, Jiří, DRGA, Rudolf. Temperature fields solving in two-layer plate with Comsol Multiphysics software. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna: DAAAM International Vienna, 2011, s. 115-116. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
- [9] ŠUBA, O., SÝKOROVÁ, L., ŠANDA, Š., STANĚK, M.: *Modelling of Thermal Stresses in Printed Circuit Boards*. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic control, modelling & simulation (ACMOS'11), WSEAS Press, Lanzarote, Canary Islands
- [10] COMSOL Multiphysics® [online]. [cit. 2017-07-20]. Dostupné z. <http://www.humusoft.cz>.
- [11] Licencovaná databáze ústřední knihovny Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. [online]. [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: <http://www.knovel.com>.
- [12] KAŠTÁNEK, O., VAŠEK, V.: *Části strojů*. 2. vydání. Brno: VUT Brno, 1979. str. 224. bez ISBN.
- [13] Periodická tabulka, Dusík [online]. [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/7.html>



## **11. SEZNAM TABULEK**

Tab. 4.1: Mechanické vlastnosti materiálů použitých pro výpočet.....	11
Tab. 4.2: Stanovení potřebného teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a epoxidové pryskyřice. ....	12
Tab. 5.1: Vstupní hodnoty pro cyklické namáhání .....	20

## 12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1: Geometrické zobrazení modelu teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce.....	13
Obr. 4.2: Teplotní pole v DPS po dobu 30 sekund .....	15
Obr. 4.3: Teplotní pole v DPS po dobu 1200 sekund.....	15
Obr. 5.1: Zobrazení maximální hodnoty namáhání - 492 MPa. ....	17
Obr. 5.2: Zobrazení odlupující se měděné vodivé cesty z DPS. Fotografie byla pořízena při 5,6 násobném zvětšení.....	17
Obr. 5.3: Importovaný model do prostředí COMSOL Multiphysics® .....	18
Obr. 5.4: Celkový pohled na DPS s ohřátými cestami na 400K po dobu 60 s...	18
Obr. 5.5: Model s definovanými materiály, který byl použit pro simulaci únavy materiálů .....	20
Obr. 5.6: Zvětšení oblasti s největším namáháním. Rozhraní Cu fólie na DPS.	21
Obr. 8.1: Odlupující se vodivé cesty z DPS v místě, kde byla vrstva laku odstraněna. ....	25
Obr. 8.2: Porovnání výsledků ze simulací (vlevo) s experimentálním ověřením v laboratoři (vpravo). ....	26
Obr. 8.3: Rozložení teploty v DPS a ověření vlivu teploty na vznik požadované napjatosti.....	26

## 13. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\alpha$	Součinitel délkové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]
$\Delta T$	Rozdíl teplot [K]
$\lambda_1$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu I [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\lambda_2$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu II [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\rho_1$	Hustota materiálu I [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_2$	Hustota materiálu II [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\sigma_1$	Výsledné smykové napětí - měď [Pa]
$\sigma_2$	Výsledné smykové napětí - epoxidová pryskyřice [Pa]
$\tau$	Doba ohřevu [s]
$\tau_s$	Maximální dovolené smykové napětí materiálu [MPa]
$\tau_v$	Vypočtené smykové napětí [MPa]
$a$	Teplotní vodivost [ $m^2 \cdot s$ ]
$a_1$	Teplotní vodivost první vrstvy [ $m^2 \cdot s$ ]
$a_2$	Teplotní vodivost druhé vrstvy [ $m^2 \cdot s$ ]
$b$	Tloušťka kovové vrstvy [m]
$C_p$	Měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$C_{p1}$	Měrná tepelná kapacita materiálu I [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$C_{p2}$	Měrná tepelná kapacita materiálu II [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$E$	Modul pružnosti [Pa]
$erfc$	Chybová funkce [-]
$F_T$	Výsledná síla
$k$	Počet členů sumy [-]
$K_\varepsilon$	Konstanta podobnosti [-]
$K_a$	Konstanta [-]
$S_j$	Styčná plocha obou materiálu [ $m^2$ ]
$t_0$	Teplota okolí [ $^\circ C$ ]
$t_1$	Teplota prvního materiálu [ $^\circ C$ ]
$t_2$	Teplota druhého materiálu [ $^\circ C$ ]
$t_p$	Počáteční konstantní teplota [ $^\circ C$ ]
$x$	Tloušťka druhého materiálu - plastu [m]

3D	Trojdimenzionální zobrazení
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
DPS	Deska plošného spoje
EU	Evropská Unie
FR4	Flame Retardant class 4
MKP	Metoda konečných prvků
SW	Software

## 14. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

- [1] KŘENEK, Jiří, JANÁČOVÁ, Dagmar. *Simulace cyklického ohřevu desky plošného spoje v prostředí Pro/ENGINEER*. SW FAI UTB, 2011.
- [2] JANÁČOVÁ, Dagmar, MOKREJŠ, Pavel, KOLOMAZNÍK, Karel, VAŠEK, Vladimír, DRGA, Rudolf, LÍŠKA, Ondrej, KŘENEK, Jiří. Optimization of suspensions filtration with compressible cake. In *MATEC Web of Conferences*. Les Ulis : EDP Sciences, 2016, s. "nestr.". ISSN 2261-236X.
- [3] JANÁČOVÁ, Dagmar, MOKREJŠ, Pavel, VAŠEK, Vladimír, DRGA, Rudolf, LÍŠKA, Ondrej, KŘENEK, Jiří. Mathematic model of heat transport in materials during cutting process. In *Annals of DAAAM International for 2015, Volume 26*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2015, s. CD 007. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-06-8.
- [4] JANÁČOVÁ, Dagmar, VAŠEK, Vladimír, MOKREJŠ, Pavel, KŘENEK, Jiří, DRGA, Rudolf. Temperature fields solving in two-layer plate with Comsol Multiphysics software. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2011, s. 115-116. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
- [5] JANÁČOVÁ, Dagmar, VAŠEK, Vladimír, MOKREJŠ, Pavel, KŘENEK, Jiří, DRGA, Rudolf. Temperature fields solving in two-layer plate with Comsol Multiphysics software. *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*, 2011,
- [6] JANÁČOVÁ, Dagmar, CHARVÁTOVÁ, Hana, DVOŘÁK, Zdeněk, KŘENEK, Jiří. *Aparatura pro separaci desek plošných spojů*. FAI UTB, Funkční vzorek, 2011
- [7] CHARVÁTOVÁ, Hana, VAŠEK, Vladimír, DRGA, Rudolf, KŘENEK, Jiří. Software application for solving of non-stationary temperature fields in two-layer plate. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2011, s. 359-360. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
- [8] JANÁČOVÁ, Dagmar, KOLOMAZNÍK, Karel, VAŠEK, Vladimír, KŘENEK, Jiří, UHLÍŘOVÁ, Michaela. *Separation of printed circuit board*

*by temperature shock*. In WSEAS World Science and Engineering Academy and Science, The 5th WSEAS Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment HTE'07 (pp. 268-271).

- [9] KŘENEK, Jiří, JANÁČOVÁ, Dagmar, LIŠKA, Ondřej, VAŠEK, Vladimír, ŠUBA, Ondřej. *Dividing of metal and plastic components of printed circuit boards*. 21<sup>st</sup> International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2017), Agia Pelagia Beach, Crete Island, The Journal "MATEC Web of Conferences", ISSN (Electronic Edition): 2261-236X, July 2017.
- [10] JANÁČOVÁ, Dagmar, KOLOMAZNÍK, Karel, MOKREJŠ, Pavel, VAŠEK, Vladimír, KŘENEK, Jiří, LIŠKA, Ondřej. *The balance model for heat transport from hydrolytic reaction mixture*. 21<sup>st</sup> International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2017), Agia Pelagia Beach, Crete Island, The Journal "MATEC Web of Conferences", ISSN (Electronic Edition): 2261-236X, July 2017.
- [11] KŘENEK, Jiří, JANÁČOVÁ, Dagmar, LIŠKA, Ondřej, DRGA, Rudolf. *Simulace teplotního namáhání v desce plošného spoje pomocí software Pro/ENGINEER*. Strojárstvo Extra, 2017, ISSN 1660-9336. (v tisku)
- [12] JANÁČOVÁ, Dagmar, KŘENEK, Jiří, VAŠEK, Vladimír, KOLOMAZNÍK, Karel. *Ecology separation of printed circuit board components*. Journal of Computational Electronics. (podáno do tisku)

## 15. PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

**Titul:** Inženýr (Ing.)  
**Jméno:** Jiří  
**Příjmení:** Křenek  
**Datum narození:** 2. Listopad 1982  
**Adresa:** Prostřední Bečva 597  
PŠČ 756 56  
**Telefon:** +420 724 262 838  
**E-mail:** jiri1krenek@gmail.com



### Vzdělání:

09/2007 – dosud

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta aplikované informatiky**

- Ph.D. titul: Inženýrská informatika (kombinovaná forma studia)
- Obor studia: Inženýrská informatika
- Dizertační práce: Návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných spojů

09/2005 – 09/2007

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta aplikované informatiky**

- Inženýrský titul: Chemické a procesní inženýrství
- Obor studia: *Automatizace a řídicí technika*
- Diplomová práce: *Separace elektronického odpadu teplotním šokem*

09/2002 – 06/2005

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

- Bakalářský titul: Chemické a procesní inženýrství
- Obor studia: *Automatizace a řídicí technika*
- Bakalářská práce: *Možnosti technologického procesu Pultruze*

**Pracovní zkušenosti:**

08/2017 – dosud

**Varroc Lighting Systems, s. r. o**

IT Project Leader

- Řízení IT projektů napříč společností. Plánování rozpočtu projektu do jednotlivých fází.
- Konzultace při zavádění PLM systému.
- Reportování stavu projektu manažerům a přímým nadřízeným.

08/2016 – 07/2017

**ON Semiconductor Czech Republic, s. r. o.**

IT Project Manager

- Celková koordinace IT projektů a rozsáhlých pracovních zakázek. Plánování, vývoj, stabilizace a zajištění spolupráce v rámci projektového týmu k dosažení očekávaných výsledků projektových aktivit s omezenými zdroji (čas, zdroje, rozpočet).
- Reportování stavu projektu manažerům a zákazníkům.
- Spolupráce při vytváření, implementaci, podpoře a vývoji systému jakosti a zajištění vysoké úrovně kvality.
- Spolupráce s vedoucími manažery při správě zdrojů přidělených projektům a poskytování informací pro řízení výkonosti.



**Aplikační inženýr**

- Implementace Windchill PLM SW
- Projektový manažer implementací Windchill.
  - Analýza rizik.
  - Změnové řízení a Workflow
  - Reportování
- Technická podpora
  - Řešení zákaznických dotazů
  - Komunikace se zahraničními zákazníky
- Lektor pro Českou republiku a zahraničí (Španělsko, Bulharsko, Německo)
- IT řešení pro zákazníky
  - Práce s VMware, Oracle, MS SQL

**Jazyky:**

- Angličtina – středně pokročilá
- Němčina – začátečník

**Další dovednosti:**

- MS Office
- Software (Mathematica, Femlab, Comsol Multiphysics, AutoCad - (basic), Pro/ENGINEER, ProductView, Windchill, ProjectLink).

**Řidičský průkaz:**

- Skupina A, B

**Certifikáty:**

- Project Management for Managers – CMC Graduate School of Business o.p.s.
- Windchill Change & Product Structure Management - PTC
- MCAD Data Management in Windchill - PTC
- Anti-Bribery for Business Partners - PTC
- VAR Windchill Learning Path - PTC



Ing. Jiří Křenek

**Návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných  
spojů**

Design and modeling of ecological processing of printed circuit boards

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Jiří Křenek

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Pořadí vydání: první

Rok vydání: 2017

ISBN 978-80-7454-711-9

