

# **Modelování teplotního pole ve dvouvrstvé desce plošných spojů za účelem separace vrstev**

Temperature field modeling into two-layers printed circuit board  
for separation

Bc. Martin Malinka

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MALINKA**  
Osobní číslo: **A09444**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Modelování teplotního pole ve dvouvrstvé desce plošných spojů za účelem separace vrstev**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární studii týkající se recyklace elektroodpadu, zaměřte se zejména na recyklaci výpočetní techniky.
2. Seznamte se s matematickými modely popisujícími nestacionární sdílení tepla vedením v desce.
3. V teoretické části práce se zaměřte na separaci vodivých cest a plastu v dvouvrstvé desce plošného spoje (DPS) vlivem cyklického tepelného namáhání a vlivem vzniklé napjatosti.
4. Navrhněte matematický model popisující rozložení teploty a napjatostí cyklicky namáhané DPS.
5. Úlohu simulujte v programovém prostředí Comsol Multiphysics.
6. V laboratorních podmínkách experimentálně ověřte uvedený způsob separace.
7. Dosažené výsledky zhodnoťte v závěru práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Kolomazník, K., Sedlář J., Macháčková A. Teorie technologických procesů III. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno, 1978, 123 s.
2. Křištofová, D.: Kovy a životní prostředí, Ediční středisko VŠB TU Ostrava, 2005
3. Škeřík, J.: Plasty v elektrotechnice a elektronice, 1. vydání.: SNTL Praha, 1991. p. 516. ISBN 80-03-00657-0
4. Šuba, O., Janáčková, D., Žaludek, M.: Modelování transienční teplotní napjatosti vrstevnatých desek. VII. ITC 2009, TOOLS, 3.- 4.2.2009, Zlín, ISBN 978-80-7318-794-1
5. Božek, F., Urban, R., Zemánek, Z., Recyklace. Vyškov 2003. 202s. ISBN 80-238-9919-8
6. Nesvadba, J. Využití elektronického šrotu. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1999, 248s.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.**

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

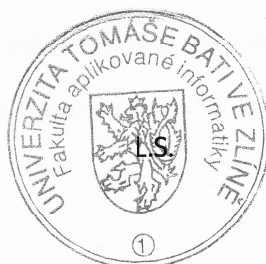
**25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**3. června 2011**

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá zpracováním a likvidací elektroodpadu, teoretická část je zaměřena především na desky plošných spojů . V úvodu je popsána legislativa, která s recyklací elektroodpadu souvisí, dále upřesňuje, co to vlastně elektroodpad je, jaké jsou druhy elektroodpadu, v čem je nebezpečný a možnosti jeho zpracování. Poslední dvě témata teoretické části se věnují přípravě na praktickou část, která se týká přestupu tepla a separaci vodivých cest v DPS. Zde je popsáno teplotní pole, teplotní napjatost, nestacionární sdílení tepla vedením v desce a je zde úvod k práci se simulačním programem COMSOL Multiphysics.

Praktická část je rozdělena na tři hlavní oddíly. První z nich je výpočetní část, která se zabývá výpočtem tepla uvnitř DPS, druhá část ověřuje správnost výpočtů pomocí simulace teploty v programu COMSOL Multiphysics a třetí část je experimentální, zde jsou popsány a prakticky odzkoušeny metody separace vodivé vrstvy na DPS pomocí teploty a teplotních šoků.

Klíčová slova: teplo , teplota, teplotní pole, deska plošných spojů, elektroodpad, epoxidová pryskyřice, recyklace, měď.

## **ABSTRACT**

This work deals with the processing and disposal of electronic waste, the theoretical part is mainly focused on the printed circuit board. The introduction describes the laws that relate to recycling electronic waste, further clarifies what it is electronic waste what are the types of electronic waste, in what is dangerous and possibility of processing. The last of two themes of the theoretical part are preparation to practical part that relates to heat transfer and separation of conductive paths in the PCB. There are a temperature field, thermal stress, transient heat transfer in the direction of the board and there is an introduction to working with the simulation program COMSOL Multiphysics.



The practical part is divided into three main sections. The first one parties computer part that deals with the calculation of heat inside the PCB, the second part verifies the correctness of the calculations using the simulation program the temperature in COMSOL Multiphysics and the third part is experimental, there are practically described and tested methods of separation of conductive layer PCB with temperature and thermal shock .

Keywords: head, temperature ,temperature field, printed circuit board, electronic waste, epoxy resin, recycling, cooper.

Děkuji několika lidem, kteří mi velmi pomohli při tvorbě diplomové práce a to především vedoucí diplomové práce doc. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za odborné vedení a vstřícnou spolupráci.

Dále děkuji Ing. Haně Charvátové, Ph.D. za pomoc při simulaci teplotních polí, doc. Ing. Zdeňku Dvořákovi CSc. z UTB FT ve Zlíně za poskytnutí potřebných zařízení k experimentální části, za ochotu a cenné rady a Ing. Jiřímu Křenkovi za spolupráci při experimentální a podporu při simulační části diplomové práce.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 LEGISLATIVA</b> .....	<b>12</b>
1.1 CO JE TO ELEKTROODPAD? .....	12
1.2 EVROPSKÁ SMĚRNICE O OEEZ .....	12
1.3 POVINNOSTI VÝROBCŮ A SPOTŘEBITELŮ ELEKTROODPADU .....	12
1.3.1 Povinnosti výrobců a dovozců .....	13
1.3.2 Povinnosti spotřebitelů a zpracovatelů.....	15
<b>2 ELEKTROODPAD</b> .....	<b>16</b>
2.1 PROČ RECYKLOVAT? .....	16
2.2 NEBEZPEČNÉ LÁTKY V ELEKTROODPADECH .....	16
2.3 ZASTOUPENÍ MATERIÁLŮ V ELEKTROODPADECH .....	18
2.3.1 Zastoupení materiálů v DPS.....	18
2.3.2 Zastoupení kovů v DPS.....	20
<b>3 RECYKLACE ELEKTROODPADU</b> .....	<b>21</b>
3.1 POPIS TECHNOLOGICKÝCH POSTUPŮ PŘI ZPRACOVÁNÍ ELEKTROODPADU .....	21
3.2 RECYKLAČNÍ TECHNOLOGIE DPS .....	24
3.3 MECHANICKÉ METODY ZPRACOVÁNÍ ELEKTROŠROTU .....	25
3.4 RECYKLACE HDD .....	26
3.5 ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ .....	26
3.6 RECYKLACE CHEMICKOU CESTOU.....	27
3.6.1 Recyklace v tavenině olova.....	27
3.6.2 Kyanidové loužení.....	28
3.6.3 Sulfáto-nitrátový cesta a elektrolýza .....	28
<b>4 VÍCEVRSTVÉ PLOŠNÉ SPOJE</b> .....	<b>29</b>
4.1 KONSTRUKCE VÍCEVRSTVÉ DPS.....	29
4.2 OBOUSTRANNÉ DPS.....	31
4.3 MATERIÁLY PRO PLOŠNÉ SPOJE .....	34
4.4 TEPLOTNÍ NAPJATOST .....	37
4.4.1 Teplotní roztažnost.....	38
4.4.2 Napjatosti materiálů .....	39
4.4.3 Teplotní napjatost ve vícevrstvých DPS .....	41
<b>5 SDÍLENÍ TEPLA</b> .....	<b>42</b>
5.1 SDÍLENÍ TEPLA - ROZDĚLENÍ .....	42
5.1.1 Teplotní pole .....	43
5.1.2 Napětí teplotního pole .....	44
5.1.3 Fourierův zákon vedení tepla .....	44

5.2	NESTACIONÁRNÍ SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM.....	45
5.2.1	Nestacionární teplotní pole v rovinné desce .....	45
<b>6</b>	<b>COMSOL MULTIPHYSICS .....</b>	<b>47</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>VÝPOČETNÍ ČÁST .....</b>	<b>53</b>
8.1	VÝPOČET TEPLoty .....	53
8.2	VÝPOČET TEPLoty PRO KONKRÉTNÍ DPS .....	56
<b>9</b>	<b>SIMULACE .....</b>	<b>62</b>
9.1	ROZLOŽENÍ TEPLoty V DESCE EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE.....	62
9.2	ROZLOŽENÍ TEPLoty V DPS.....	65
<b>10</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>67</b>
10.1	POPIS EXPERIMENTU .....	67
10.2	VÝSLEDEK EXPERIMENTU A ZÁVĚR .....	70
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>76</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>89</b>

## ÚVOD

V posledních dvaceti letech nástup elektroniky do veřejné sféry stoupl natolik, že je téměř nemožné, aby se člověk nedostal do styku s nějakým elektronickým zařízením. Většina z nás je zvyklá denně používat mobilní telefon, počítač, auto nebo alespoň nějaký z domácích spotřebičů, elektronika pronikla již do každé části lidské činnosti a proto se s ní setkáváme prakticky všude a neustále. Ovšem vývoj jde obrovským tempem dopředu a i ta nejmodernější technika pomalu zastarává nebo končí její životnost a stává se odpadem, tento odpad nazýváme elektronickým odpadem nebo také elektroodpadem.

S elektronickým odpadem byl vždy problém, protože na rozdíl od běžných komunálních odpadů obsahuje ve větší či menší míře nebezpečnou složku v podobě toxických a jiných pro člověka i přírodu velmi nebezpečných látek. Za nárůstem elektroodpadu stojí stupeň modernizace, se kterou použití elektroniky souvisí a také poptávka veřejnosti po elektronických zařízeních, které jsou čím dál dostupnější. V devadesátých letech nebyla otázka elektroodpadu ještě tak tíživá, protože ho nebylo takové množství jako dnes, v dnešní době je ovšem nezbytné elektroodpad zpracovávat a v maximální možné míře recyklovat. Proto vznikají nejrůznější technologie pro zpracování elektroodpadu.

Zatímco zpracování odpadů není v dnešní době pokročilých technologií už takový problém, slabím článkem zůstává jeho třídění. I když se tato situace neustále vylepšuje, pořád ještě český člověk zůstává pozadu ve třídění odpadu za evropským průměrem. Problémem, který s tímto souvisí, může být malá informovanost lidí o nakládání s elektroodpadem, přestože na tuto problematiku velmi podrobně pamatuje legislativa ČR a většina lidí ani netuší, že nesprávné nakládání s elektroodpadem může kolidovat se zákonem. Je tedy nezbytné dostat tuto problematiku do podvědomí široké veřejnosti a informovat o právech a povinnostech, které ukládá zákon.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 LEGISLATIVA

### 1.1 Co je to elektroodpad?

Elektroodpad je každé elektrozařízení, které se stalo odpadem, včetně komponentů, konstrukčních dílů a spotřebních dílů, které jsou v tomto okamžiku součástí elektrozařízení. Zkratkou elektrozařízení jsou dle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. v platném znění myšlena elektrická a elektronická zařízení, jejichž funkce musí být závislá na elektrickém proudu nebo na elektromagnetickém poli nebo se musí jednat o zařízení určená k výrobě, přenosu a měření elektrického proudu nebo magnetického pole, a ta elektrozařízení, jež jsou používána při napětí nepřesahující 1000 V pro střídavý proud a 1500 V pro stejnosměrný proud, vyjma zařízení určených výlučně pro účely obrany státu. Aby mohla být elektrozařízení kvalifikována jako elektroodpad, musí spadat do jedné z deseti skupin zákona o odpadech 7/2005 Sb. (Příloha č. 7 k zákonu č. 185/2001 Sb.). Viz příloha P I. [2]

### 1.2 Evropská směrnice o OEEZ

Po vstupu ČR do EU byla přijata do našeho právního řádu řada evropských směrnic a norem jako je evropská směrnice 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ), která přenáší zodpovědnost za své výrobky na dovozce a výrobce v celém jejich životním cyklu a to včetně povinnosti zajištění recyklace těchto výrobků.

Tato novela zákona o odpadech neukládá povinnosti pouze výrobcům a dovozcům, ale také právnickým a fyzickým osobám oprávněným k podnikání. Těm nová legislativa ukládá povinnost financovat recyklaci vysloužilých elektrozařízení na vlastní náklady v případě, pokud jimi používané elektrozařízení bylo uvedeno na trh před 13. srpnem 2005 a zároveň vysloužilá elektrozařízení nejsou nahrazena výrobky stejného typu a množství nebo výrobky, které plní stejnou funkci.[1]

### 1.3 Povinnosti výrobců a spotřebitelů elektroodpadu

Tato část je věnována základním povinnostem výrobců, dovozců a spotřebitelů v oblasti zacházení s elektrozařízeními, jak jim to ukládá zákon o elektroodpadech.



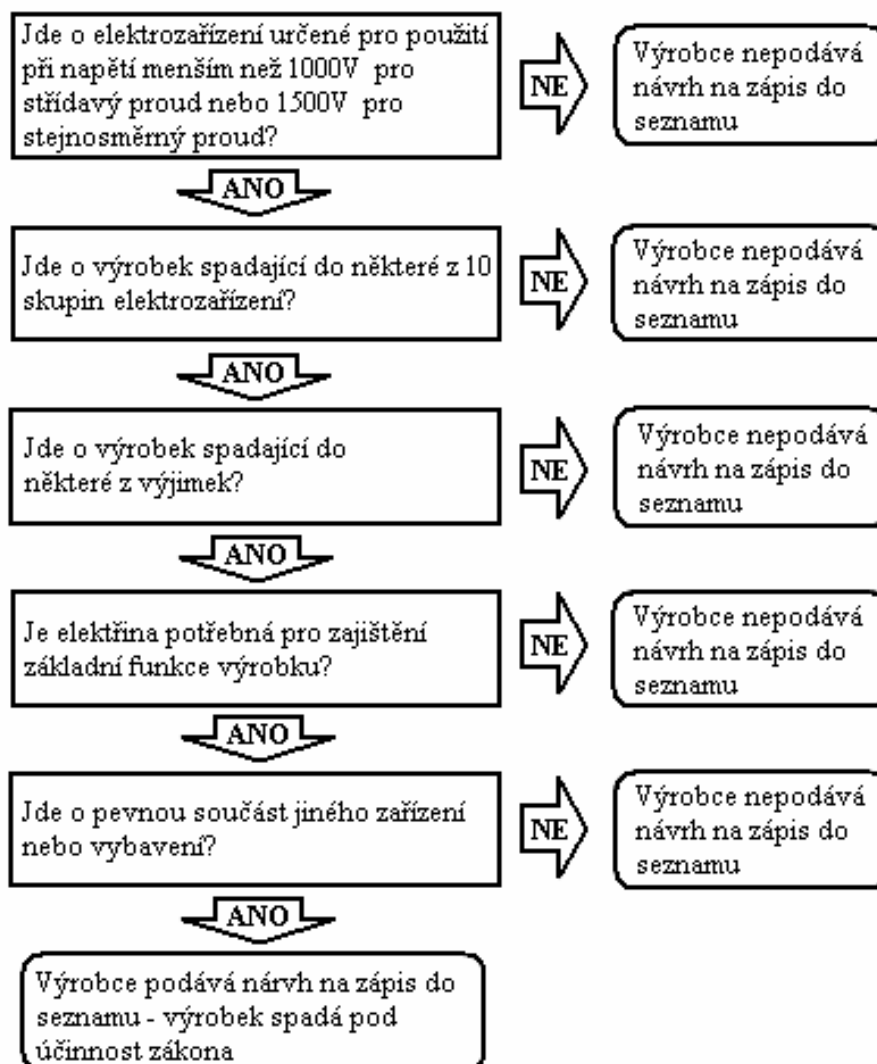
V první části jsou popsány podmínky, za jakých se musí výrobce zaregistrovat do Seznamu výrobců elektrozařízení, jeho další povinnosti a povinnost dovozců elektroodpadu.

V části druhé je popsána povinnost spotřebitelů při skončení životnosti elektrozařízení a povinnosti zpracovatelů elektroodpadu.

### 1.3.1 Povinnosti výrobců a dovozců

Výrobci musí být zaregistrováni v Seznamu výrobců elektrozařízení, vedeném ministerstvem životního prostředí, tento Seznam popisuje § 37g vis příloha P I. Povinnost pro registraci do Seznamu mají výrobci, jejichž elektrozařízení splňují následujících 5 podmínek:

1. Elektrozařízení je určeno pro použití menší než 1000V pro střídavý proud nebo 1500V pro stejnosměrný proud. Tuto podmínku upravuje zákon podle § 37g *písm. a) zákona*. Viz příloha P II.
2. Výrobek spadá do některé z 10 skupin elektrozařízení, které jsou definovány v příloze č. 7 k zákonu č. 185/2001 Sb., viz příloha P I.
3. Jde o výrobek spadající do některé z výjimek, jako jsou infikované lékařské přístroje, přímo žhavené žárovky atd.
4. Elektřina je potřebná pro zajištění základní funkce výrobku.
5. Jde o pevnou součást jiného zařízení nebo vybavení.



Obr. č. 1 – Podmínky pro povinnou registraci do Seznamu výrobců elektrozařzení

Další povinnosti výrobců a dovozců (distributorů):

§ 37h udává základní povinnosti výrobce vzhledem k elektroodpadu a nakládání s ním

§ 37j se týká uvedení elektrozařzení na trh

§ 37k popisuje zpětný odběr elektrozařzení a oddělený sběr elektroodpadu ve spolupráci s distributorem, popisuje způsob zpětného odběru elektrozařzení a povinnost zajistit informovanost konečného uživatele o způsobu provedení

odděleného sběru.

§ 37l ukládá výrobci elektrozařízení vytvořit systém pro zpracování elektroodpadu a poskytnout zpracovatelům veškeré informace, které jsou nutné k jeho zpracování.

§ 37m výrobce zajistí systém, podle kterého bude zajištěno využití elektroodpadu navazující na zpětný odběr nebo oddělené sběr elektroodpadu.

§ 37n definuje, za jakých podmínek má výrobce elektrozařízení financovat nakládání s elektrozařízením pocházejícím z domácnosti.

§ 37o řeší financování nakládání s elektroodpadem.

Všechny výše uvedené paragrafy jsou v plném znění v příloze P III.

### **1.3.2 Povinnosti spotřebitelů a zpracovatelů**

Při skončení životnosti elektrozařízení má spotřebitel povinnost předat EEZ na místo zpětného odběru nebo OEEZ do sběrného systému, a to zpracovateli, který se přímo nebo nepřímo podílí na financování sběru a nakládání s OEEZ (platí část nákladů v ceně nového výrobku), každý nový výrobek by měl být označen symbolem, který spotřebitele upozorňuje, že odpad výrobku má předat na sběrném místě. Další povinnosti ukládá § 37, týkající se zpětného odběru některých výrobků. [3]

## 2 ELEKTROODPAD

Tato část je věnována popisu elektroodpadu, upřesnění pojmu elektroodpad podle zákona o odpadech. Bude se také věnovat otázce recyklace a nebezpečným látkám, které elektroodpad obsahují.

### 2.1 Proč recyklovat?

Hlavním důvodem proč recyklovat elektroodpad je především otázka ekologie, protože desky plošných spojů (DPS) které jsou nedílnou součástí elektroodpadu, obsahují podíl těžkých kovů a jiných nebezpečných látek jako je olovo, rtuť, šestimocný chrom, polychromované bifenyly a jiné. Větší množství těchto látek je obsaženo především v historických zařízeních.

Dalším podstatným důvodem proč recyklovat OEEZ je získání velkého množství cenného materiálu, který se může vrátit zpět do výrobního procesu jako druhotná surovina. Za druhotnou surovinu jsou považovány především kovy, ze kterých jsou vyhotoveny vodivé cesty, kontakty, kontaktní pole, chladiče atd. Jedná se především o kovy jako je železo, měď, hliník, ale nemalou měrou jsou zde zastoupeny také vzácné kovy jako je zlato, titan, platina a mnoho dalších, proto je často žádanou komoditou zpracovatelů elektroodpadu.

Recyklace elektroodpadu také zajišťuje nemalý ekonomický zisk, materiál získaný recyklací značně ušetří nejen vstupní surovinu, která se musí velmi často dovážet, ale také energii potřebnou na její zpracování.

### 2.2 Nebezpečné látky v elektroodpadech

Při práci s elektroodpadem, ať už se jedná o jeho zpracování nebo jinou manipulaci (například zacházení s ním při tvorbě praktické části diplomové práce), je důležité znát jeho vlastnosti a jeho složení, protože elektroodpad s částí obsahuje zdraví nebezpečné látky. Při dostatečné znalosti jeho složení a negativnímu působení na zdraví jsme schopni

se dostatečně bránit používáním vhodných ochranných pomůcek (ochranné rukavice, respirátor atd.).

Pokud elektroodpad obsahuje nebezpečné látky je zařazen mezi nebezpečný odpad a podle toho s ním musí být nakládáno, nebezpečný odpad můžeme rozdělit podle následujících kritérií:

**Výbušný** – má oxidační schopnosti, je hořlavý a dráždivý

**Škodlivý zdraví** – po vdechnutí, požití nebo proniknutí pokožkou

**Toxický** – představuje riziko vážného, akutního nebo chronického poškození zdraví

**Karcinogenní** – může vyvolat nádor nebo zvýšit pravděpodobnost jeho výskytu

**Leptavý a infekční** – zasahuje pokožku

**Teratogenní** – může vyvolat vrozené vývojové vady nebo zvýšit jejich incidenci

**Mutagenní** - může vyvolat dědičné genetické poškození

**Ekotoxický** – poškozující ekosystém

Odpady obsahující látky a přípravky, které uvolňují velmi jedovaté plyny při styku s vodou, vzduchem, kyselinami nebo jsou schopné jakýmkoliv způsobem po uložení uvolňovat jiné látky.

Množství nebezpečných látek obsažených v elektroodpadech se liší v závislosti na druhu a stáří elektrozařízení. Největší obsah nebezpečných látek mají většinou historická zařízení. Výrobky uvedené na trh EU po 1.7.2006, musí mít, podle směrnice 2002/95/ES, vystavené prohlášení o omezení obsahu některých nebezpečných látek v elektrotechnických a elektronických zařízeních, neobsahují-li nadlimitní hmotnostní koncentraci přípustnou v homogenních materiálech.

Tato hmotnostní koncentrace byla stanovena na 0,1% pro olovo, rtuť, šestimocný chrom, polychromované bifenylly, polybromovaný difenyléter a na 0,01% pro kadmium. [2]

## 2.3 Zastoupení materiálů v elektroodpadech

Tato kapitola uvádí obecný přehled zastoupení materiálů a zastoupení kovů v DPS. První část je zaměřena na materiály, které se můžou vyskytovat v DPS a jejich procentuálním zastoupení v DPS. Druhá část se věnuje kovovým materiálům, které se vyskytují v DPS a jejich procentuálním zastoupení.

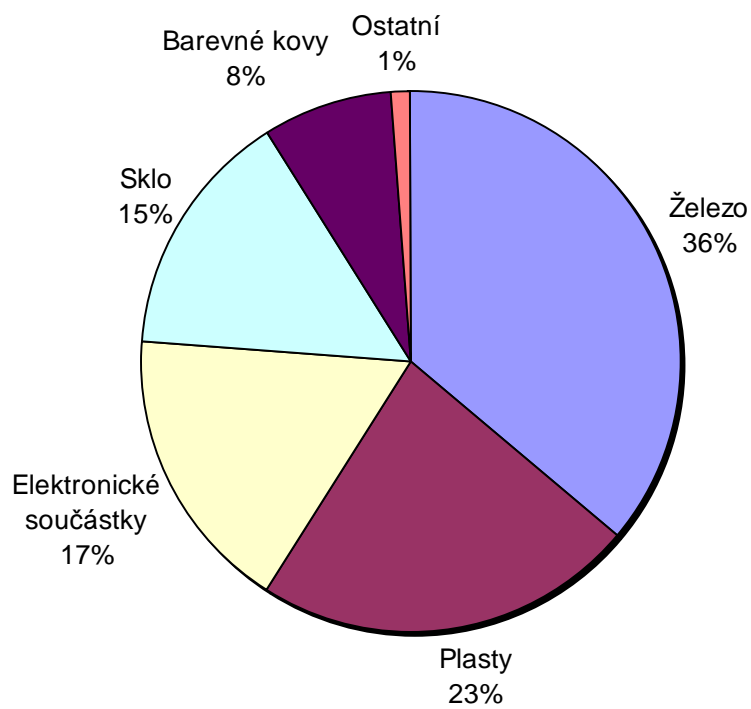
### 2.3.1 Zastoupení materiálů v DPS

Jak je patrné z tabulky č. 1, největší podíl obsahu materiálu v DPS má železo, které průměrně tvoří 36% materiálu, následují různé druhy plastů s 23%, elektronické součástky a sklo. Barevné kovy jsou průměrně zastoupeny 8% celkového obsahu, přesto pro zpracovatele elektroodpadu představují finančně nejzajímavější složku.

Materiály v DPS		
	materiál	zastoupení
1	Železo	36%
2	Plasty	23%
3	Elektronické součástky	17%
4	Sklo	15%
5	Barevné kovy	8%
6	Ostatní	1%

Tab. č. 1 – Průměrné zastoupení materiálů v DPS

## Zastoupení materiálů v DPS



Obr. č. 2 – Grafické znázornění průměrného zastoupení materiálů v DPS

### 2.3.2 Zastoupení kovů v DPS

Tabulka číslo 2 ukazuje průměrné množství kovů zastoupené v DPS, tato čísla jsou průměrnou hodnotou výskytu jednotlivých kovů, liší se v závislosti na konkrétním druhu plošného spoje, ve sběrnách elektroodpadu se vyskytuje velké množství druhů DPS, proto podobné statistiky představují poměrně přesné a cenné informace.

kovy v DPS			
	<b>kov</b>	<b>využití</b>	<b>zastoupení</b>
1	měď	vodiče, chladiče	10-25%
2	železo	vodivé a spojovací prvky	5-10%
3	cadmium, titan, rtuť	akumulátory, baterie, kontakty	4-10%
4	olovo	kondenzátory, složka pájky	1-5%
5	cín	kondenzátory, složka pájky	0,8-4%
6	nikl	akumulátory	1-3%
7	hliník	konstrukční prvky, chladiče	2%
8	zinek	fluorescent materiél	0,3-0,4%
9	stříbro	kontakty a konektory	0,005-0,3%
10	antimon	kondenzátory, složka pájky	0,1%
11	zlato	kondenzátory, složka pájky	0,01-0,1%
12	paladium	náhrada zlata, kontakty, relé	0,004-0,03%
13	platina	kondenzátory, složka pájky	0,004%

Tab. č. 2 – Průměrný obsah kovů v DPS [4]



### 3 RECYKLACE ELEKTROODPADU

Firmy používají při recyklaci elektroodpadu a plastů řadu moderních metod. Nejprve je ale nutné elektroodpad roztřídit. Příchozí odpad se rozděluje především do kategorií, jako jsou počítače, bílá elektronika, televizory atd. Poté následuje ruční demontáž, kde se oddělují především kryty a skleněné části. Po rozdělení se elektroodpad drtí na menší části a pomocí magnetického separátoru se odděluje feromagnetický materiál, někdy je tento materiál opět drcen a probíhá druhý stupeň separace železa a plastů. Dále jsou materiály rozděleny pomocí technologií, jako je prosévání, třídění vzduchem, odstředivou silou atd., na menší frakce a dále děleny pro získání druhotných surovin.

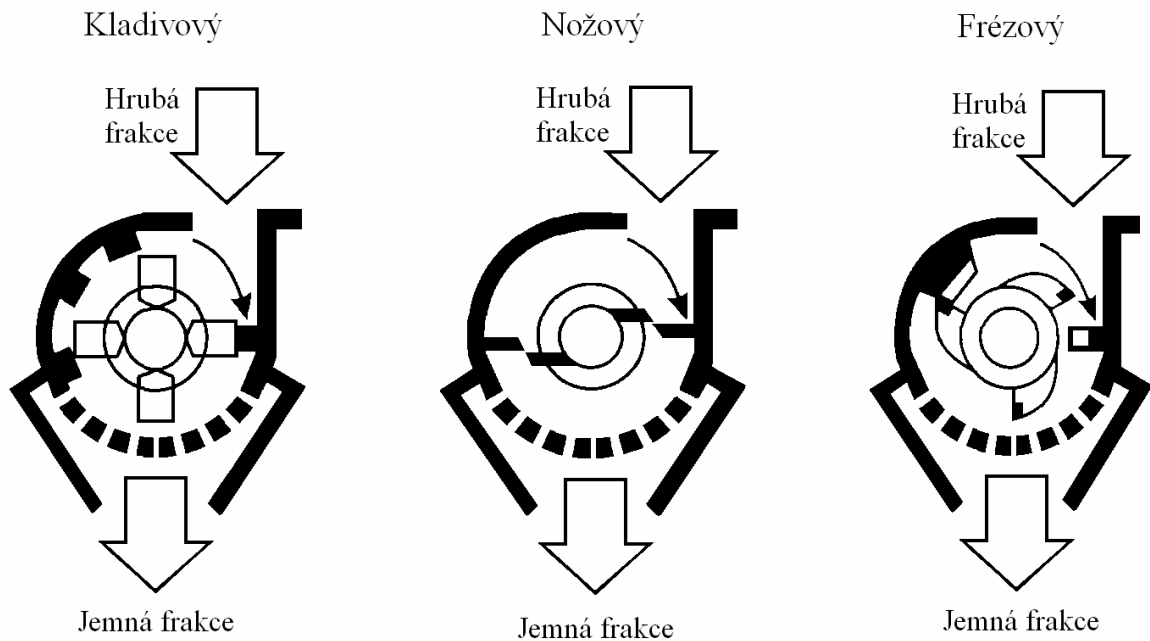
#### 3.1 Popis technologických postupů při zpracování elektroodpadu

##### **Ruční demontáž**

Představuje roztřídění jednotlivých částí, především elektroniky od ostatních materiálů jako jsou kryty zařízení, obrazovky, konektory, reproduktory, dále demontáž kontaktů, větších součástí, kabelů, odstranění škodlivých látek atd. [5]

##### **Drcení**

Pro drcení elektroodpadu se používají drticí zařízení, která jsou volena podle zrnitosti výstupu, struktury, tvrdosti, křehkosti látek, které mají být drceny, podle účelu použití a podle požadovaných vlastností výstupního materiálu. Drtiče jsou schopny zpracovat až 2 tuny materiálu za hodinu. Na výstupu se velikosti frakce pohybují mezi 10 – 100mm. Výhodou této metody jsou nízké náklady na zpracování a šetrnost k životnímu prostředí, naopak nevýhodou je, že při drcení na menší frakce může docházet ke ztrátám drahých kovů. Na obrázku číslo 3 jsou schémata tří používaných robotů pro drcení elektroodpadu. [6]



Obr. č. 3 – Používané drtiče elektroodpadu

### Kryogenní drcení

Je to technologie, pomocí které se drtí DPS, při drcení se používá tekutého dusíku o teplotě  $-100$  až  $-170\text{C}^\circ$ . Při tak nízké teplotě nastává v materiálech pnutí, které způsobí jejich snadnější destrukci při mletí. Tento způsob je výrazně nákladnější než klasické drcení, proto jeho použití není tak časté, nachází se spíše u větších zpracovatelů elektroodpadu. Oproti klasickému drcení je ale potřeba přibližně polovičního příkonu drtiče pro dokonalou fragmentaci odpadu. [2]

### Magnetická separace

Magnetické třídění odpadu je založeno na odloučení feromagnetického materiálu od ostatního odpadu. Zařízení pro separaci je realizováno pomocí magnetického bubnu s pláštěm z nerezavějící (diamagnetické) oceli. Pomocí magnetické separace se odděluje železo od ostatních lanthanoidů, frakce železa se ohřeje na  $300\text{C}^\circ$ , tím dochází k přeorientování krystalové mřížky a zániknutí  $B_R$ . Železo oproti lanthanoidům neztrácí

svůj magnetismus úplně, ale jen do té doby, než se znovu zmagnetizuje. Toho se pak využije při jejich vzájemné separaci.[5]

### **Prosévání odpadu**

Prosévání (třídění) slouží k rozdělení nadrceného odpadu na jemnou a hrubou frakci, je realizováno sítý, které dělí materiál do žádoucích tříd podle velikosti zrna. Pro prosévání se používá více metod, např. setí za sucha, za mokra, na sítu se vzduchem, na vibračním, bubnovém nebo homogenizačním bubnovém sítu. [6]

### **Třídění odpadu vzduchem**

Pro třídění jsou používány vzduchové třídiče s rovným nebo klikatým shozem. Materiál o různé hmotnosti prochází vzduchovým třídičem, lehčí frakce jsou unášeny proudícím vzduchem, těžší pokračují dále. [6]

### **Třídění pomocí odstředivé síly**

Odpad je umístěn do rotačního válce, je zde využíváno gravitačního a balistického principu. [6]

### **Flotace**

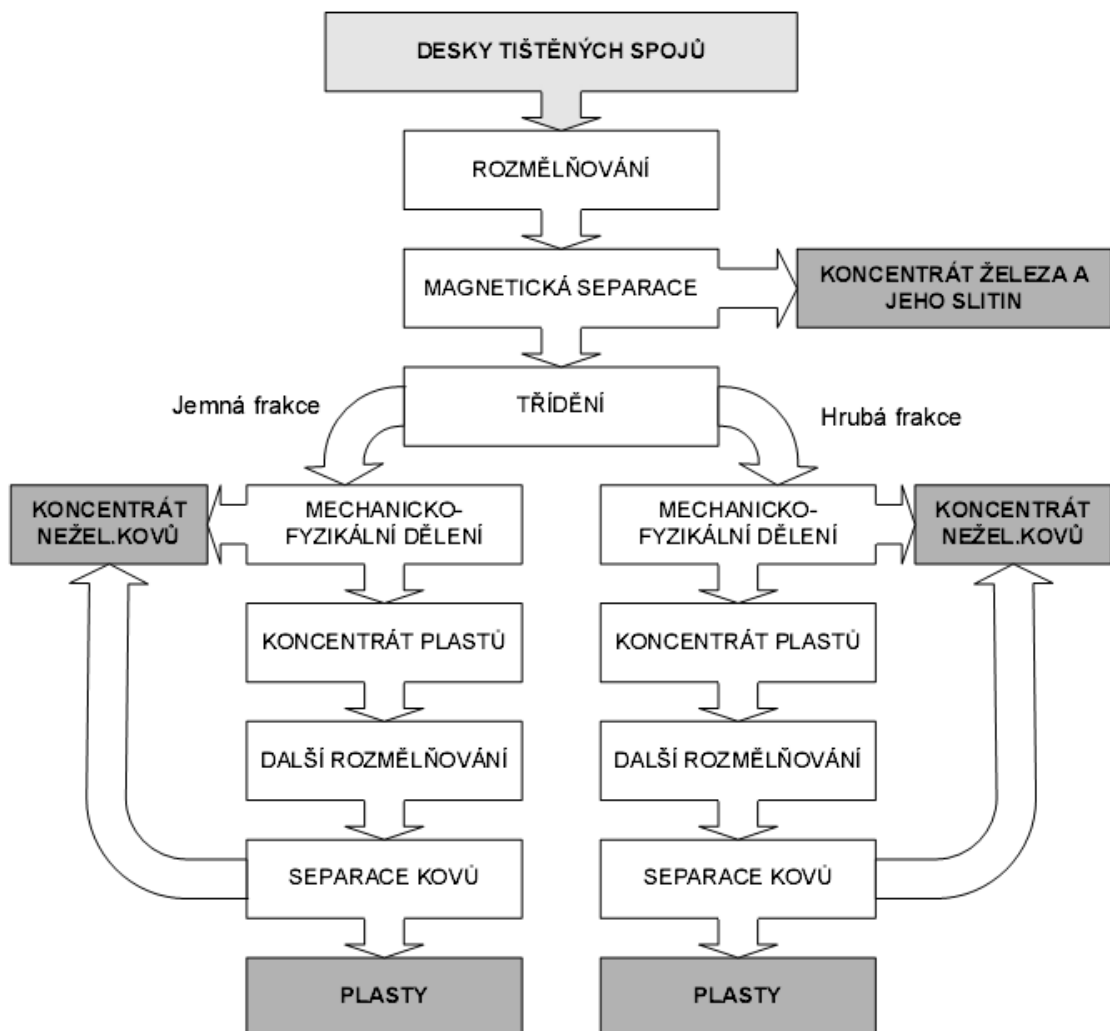
Jeto způsob třídění jemného materiálu, o velikosti zrn maximálně 2mm, o různém složení ve vodě. Tento způsob je založen na rozdílné smáčivosti povrchů různých materiálů. Odpad se vloží do nádoby, kde probíhá separace podle hustoty materiálu. Za přítomnosti vzduchových bublin vytváření hydrofobní, špatně smáčivé částice tzv. flokule, jejichž hustota je nižší než hustota okolního kapalného prostředí a jsou proto dobře vynášeny k hladině. Hydrofilní, dobře smáčivé složky zůstávají na dně nádoby. [6], [9]

### **Elektrostatické třídění**

Využívá se především k separaci plastů. [6]

### 3.2 Recyklační technologie DPS

Recyklačních technologií existuje celá řada, technologie se od sebe navzájem liší především tím, jaký druh elektroodpadu je zpracováván. Recyklační technologie bývají velmi úzce zaměřeny, tím lze získat z elektroodpadu větší množství druhotné suroviny. Na obrázku číslo 4 je uveden příklad recyklační technologie pro recyklaci desek DPS, kde je především nutné oddělit plasty od kovů.



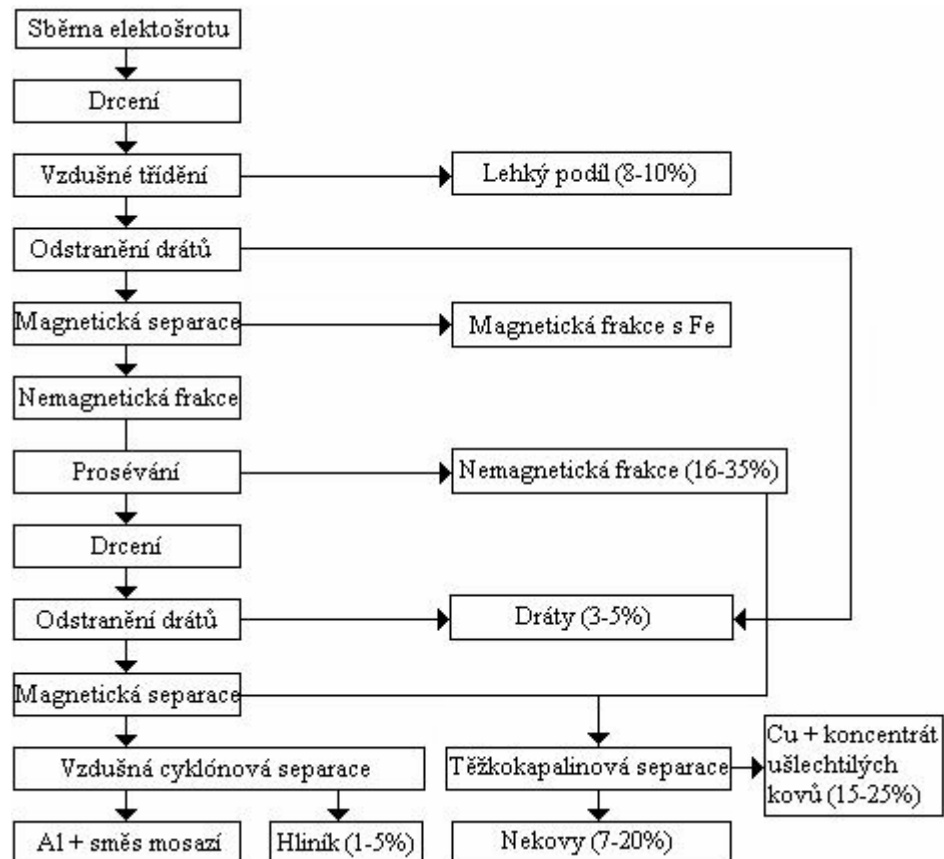
Obr. č. 4 – Postup při recyklaci DPS

Při samotném zpracování se nejprve DPS nadrtí na menší frakce o velikosti 10 – 100mm, tento nadrcený materiál prochází přes magnetické pole, kde se zachytí feromagnetické materiály a oddělí se tak koncentrát železa a jeho slitin, pro kvalitnější zpracování se materiál následně dělí na jemnou a hrubou frakci, které se zpracovávají odděleně. Dalším krokem je mechanicko-fyzikální dělení, kde se oddělí neželezné kovy a plasty, koncentrát plastů se opět rozmělnuje, aby z něj bylo možné získat poslední zbytky kovů. Cílem tohoto postupu je co nejdokonalejší oddělení plastů a kovů.

### 3.3 Mechanické metody zpracování elektrošrotu

Na obrázku číslo 5 je schéma možného zpracování elektroodpadu mechanickou cestou. Elektroodpad se nejprve nadrtí a je přepraven (nejčastěji pomocí pásového dopravníku) ke vzduchovému profuku, kde se oddělí lehký podíl frakce tvořící kolem 8 – 10% celkového objemu. Po odstranění drátů se z drti pomocí magnetické separace odstraní magnetická a následně nemagnetická frakce, následuje prosévání a hrubší odpad je opět nadrcen, jsou z něj odstraněny případné zbytky drátů a prochází přes magnetickou separaci. Odtud je odpad dopraven do vzdušné cyklónové separace, odkud se získá Hliník a směs mosazí a do těžkokapalinové separace odkud se získají nekovy a měď s koncentrátem ušlechtilých kovů.

Výhodou mechanické metody zpracování elektroodpadu je především nižší pořizovací a provozní náklady a odpadá ekologická likvidace chemických látek, které se používají při likvidaci chemickou cestou, naopak oproti zpracování chemickou cestou se mechanickými metodami nedaří tak efektivně získávat cenné druhotné suroviny.



Obr. č. 5 – Schéma mechanické metody zpracování elektroodpadu

### 3.4 Recyklace HDD

V současné době jsou harddisky vyráběny tak, aby bylo možné po skončení jejich životnosti a vyřazení, je strukturovaně rozebrat (structural disassembly). Konstrukce umožňuje především snadné odstranění hliníkových dílů, po jejich separaci se zařízení ohřeje na 300°C, vzácné zeminy (Lanthanoidy) ztratí své magnetické vlastnosti a pomocí magnetické separace se oddělí od feromagnetických látek.

### 3.5 Zpracování plastů

Elektronické plasty obsahují velké množství protipožárních retardantů (plasty obsahují bromované samozhášecí přísady), proto se používání technologie spojování granulí pojivky nebo lisování za tepla. [7]

Zpracování plastů z elektroniky spočívá především ve zmenšování objemu, granulaci plastu na zrna velikosti 4 – 6mm a separaci kovů, které by mohly bránit v dalším zpracování. Důležitou částí recyklace plastů je jejich správné roztřídění podle druhů a barev.

Technologie zpracování elektroplastů se skládá z hydraulického zvedáku, který podává demontované plasty do násypky drtiče, odtud putují nadrcené části o velikosti 10 – 15mm do magnetického separátoru, kde se odloučí feromagnetické kovy, dále putuje drť do separátoru všech kovů. Materiál zproštěný všech kovů je dopravován do granulárního mlýnu, jeho produktem jsou částice (granule) o velikosti 6mm. [7]

Elektronický odpad obsahuje většinou směs několika typů plastů, souhrnně označovaných jako technické termoplasty:

<b>Technické termoplasty</b>		
<b>zkratky</b>	<b>popis termoplastů</b>	<b>obsah v hm. %</b>
ABS	akrylonitrilbutadienstyren	57
PPO	směs polyfenylenoxidu	36
HIPS	vysoce stlačený polystyren	5
PC/ABS	polykarbonát/akrylonitrilbutadienstyren	2

*Tab. č. 3 – Procentové zastoupení jednotlivých druhů plastů [7]*

### **3.6 Recyklace chemickou cestou**

Protože metody recyklace chemickou cestou jsou většinou velmi finančně náročné, snaží se zpracovatelé získat z elektroodpadu především drahé kovy. Pro získávání kovů se využívají metody jako je recyklace v tavenině olova, kyanidové loužení, sulfáto-nitrátová cesta a elektrolýza. [2]

#### **3.6.1 Recyklace v tavenině olova**

Při extrakci v tavenině olova putuje drť PLS do tavicího zařízení, kde se mísí s roztaveným olovem. Plast shoří, železo společně s částí barevných kovů vyplave na hladinu taveniny, kde je vyloveno. V roztaveném olovu zůstane většina ušlechtilých kovů, proto se

tavenina prožene vzduchem, kde část obecných kovů a olova zoxiduje a odstraní se jako struska. Zbylá část taveniny se podrobí rafinaci, při které se získá měď, selen, nikl, tellur, olovo, cín a rtuť. Tento způsob není ale příliš ekologicky šetrný. [2]

### 3.6.2 Kyanidové loužení

Při kyanidovém loužení se získává zlato za podmínky, že pozlacený materiál je obnažen a že celý jeho povrch je v kontaktu s loužícím roztokem. Tento postup je znám svou vysokou účinností a jeho výhodou je fakt, že ostatní kovy nejsou dotčeny, tedy nejčastěji používané slitiny na bázi mědi, zinku a niklu mohou být dále metalurgicky rafinovány, aniž by se tyto prvky dostávaly do roztoků, ze kterých by musely být obtížně extrahovány. Nevýhodou jsou provozní rizika a potenciální možnost havárie spojená s používáním toxického kyanidu. [2]

### 3.6.3 Sulfáto-nitrátový cesta a elektrolýza

Sulfáto-nitrátová cesta se používá pro separaci palladia. Elektrolyticky se zpracovávají frakce barevných kovů nebo výluh z některého odpadu. Roztok obsahuje velké množství kovů (měď, zinek, nikl, kadmium, stříbro atd.), přičemž izolace všech složek ze směsi není ekonomicky a ekologicky možná. Při elektrolýze se většinou získá podíl mědi, drahé kovy zůstávají v anodických kalech. [2]



## 4 VÍCEVRSTVÉ PLOŠNÉ SPOJE

Dvou a vícevrstvé plošné spoje byly vyvinuty proto, že dnešní součástky mívají desítky i stovky vývodů a nebylo by možné je propojit na jednoduché DPS. Vícevrstvé DPS vzniknou nanesením více vodivých vrstev na sebe, přičemž jednotlivé vrstvy jsou od sebe navzájem odděleny a v potřebných místech prokoveny průchodkami.

DPS jsou tvořeny měděnou fólií nalepenou na laminátové desce nejčastěji typu FR4-skelný laminát, plátovaný měděnou fólií (vyřazené DPS mohou obsahovat zbytky cínu, kterým jsou připájeny součástky). DPS jsou běžně opatřeny nepájivou maskou, což je izolační vrstva zelené, šedé nebo hnědé barvy, která zlepšuje izolační vlastnosti desky a brání poškození vodivých cest. V masce jsou jen odkryté pájecí plošky.

Mezi vícevrstvé DPS se dají zařadit také oboustranné plošné spoje. Základem je opět laminátová deska, přičemž vodivé cesty jsou nanесeny z obou dvou stran a každá strana může navíc obsahovat více vrstev vodivých spojů, na zakázku je možné si nechat udělat desku i se 32 vrstvami. Více o této problematice je v následující kapitole 4.2 Oboustranné DPS.

### 4.1 Konstrukce vícevrstvé DPS

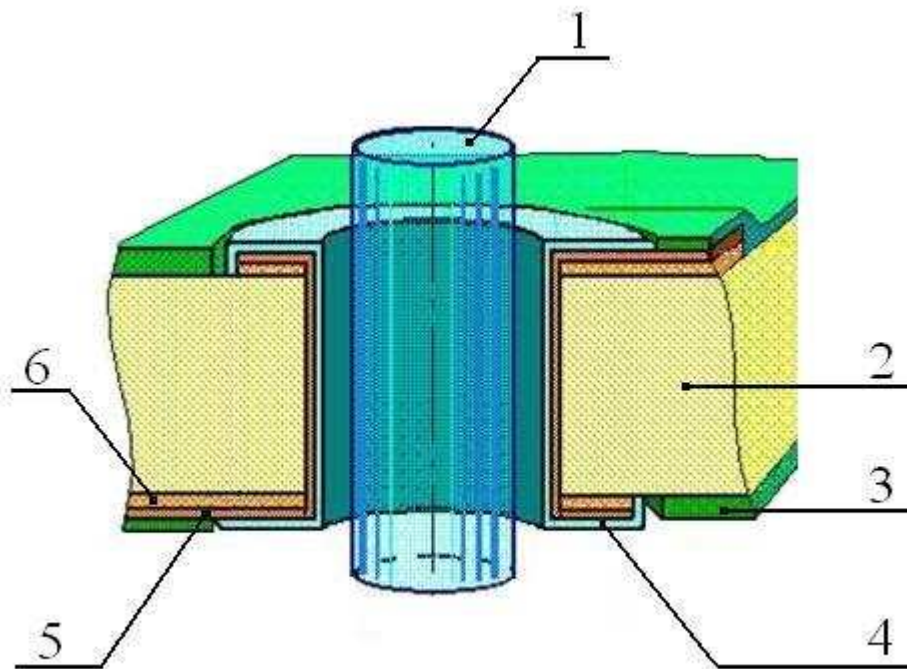
Při návrhu a výrobě DPS by se mělo vycházet z určitých technologických podmínek výroby plošných spojů. Konstruktor se řídí doporučenými hodnotami a podmínkami, jejichž změna vede ke zvýšení technologické náročnosti výroby a v závislosti na tom i ceně. Při výrobě oboustranných vícevrstevných DPS je snaha, aby obě strany měly stejný počet vodivých vrstev, pokud by měla například jedna strana dvě vrstvy a strana druhá jednu vrstvu, výsledný výrobek by byl značně náchylný na prohnutí nebo kroucení. [20]

Základem plošného spoje je nosný materiál, nejčastěji FR 4 (viz kapitola 4.3 Materiály pro plošné spoje), na něj je nanесena vrstva mědi, která představuje vodivé cesty. Vrstva mědi se na nosný materiál může nalisovat nebo nalepit speciálními lepidly. Aby při lisování došlo k lepšímu spojení nosného materiálu s měděnou fólií, projde vnitřní vrstva fólie operací zvanou černění. Při černění dochází k vytvoření tmavé vrstvy oxidů na vnitřní

straně měděné fólie, což zajišťuje lepší přilnutí mědi k nosnému materiálu. Vrstva oxidu může mít tloušťku až  $3\mu\text{m}$ . V případě vícevrstvých plošných spojů jsou jednotlivé vrstvy mědi od sebe izolovány izolační vrstvou zvanou triacetátová folie. [20]

Konečná vrstva je tvořena nepáživou maskou většinou zelené barvy, základním typem nepájivé masky je UV tvrditelná fotomaska, ta slouží k ochraně vodivých cest před vnějšími vlivy a před nežádoucím zkratováním motivu DPS. Nepájivá maska se nanáší v případě oboustranného DPS z obou stran.

Otvory pro vývody součástek v DPS jsou galvanicky zesíleny přidanou vrstvou mědi a potaženy vrstvou cínu. Příklad běžného typu desky plošného spoje, je vidět na obrázku číslo 6, na tomto obrázku je průřez oboustranné DPS v místě otvoru pro vývod součástky.[20]



Obr. č. 6 – Průřez DPS [20]

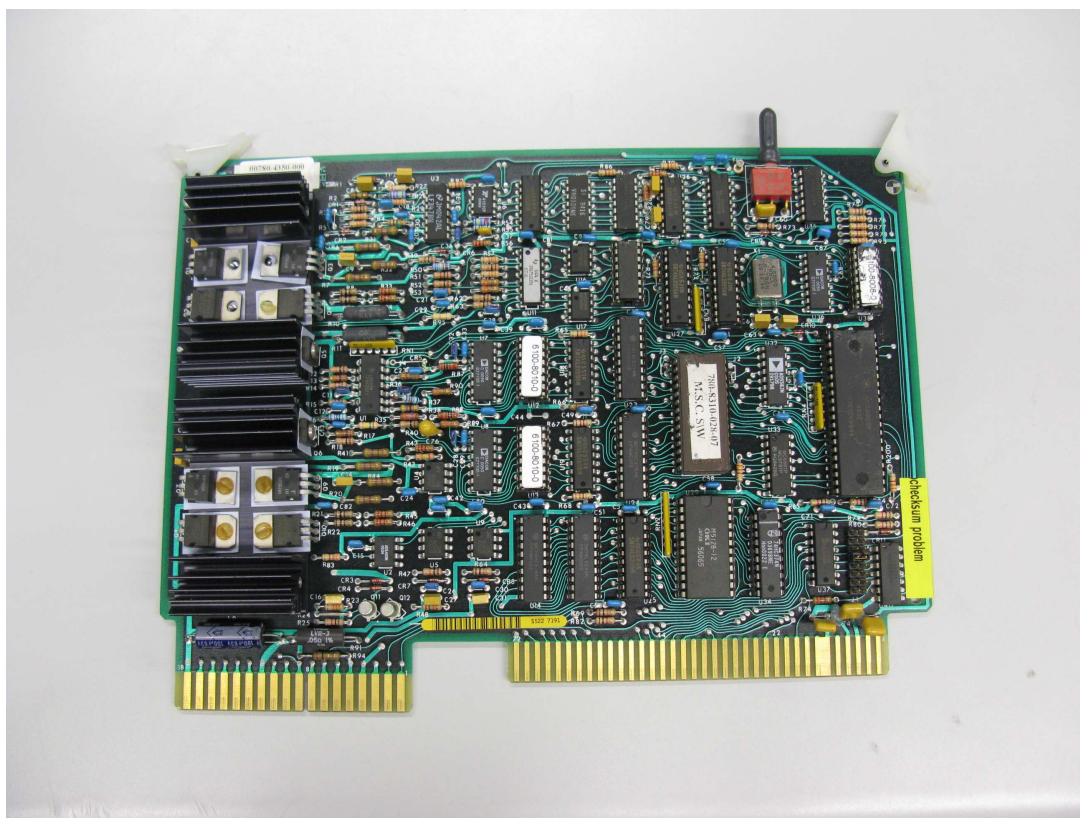
- 1 – Vývod součástky
- 2 – Nosný materiál
- 3 – Nepájivá maska
- 4 – Pokovený otvor

5 – Pájecí očko

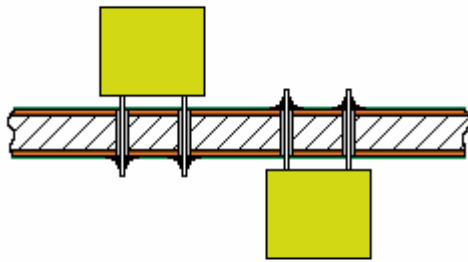
6 – Měděné vodivé cesty

## 4.2 Oboustranné DPS

Podle provedení se dají oboustranné DPS rozdělit do tří základních typů. Prvním typem je DPS obsahující otvory, kterými se prostrčí vývody součástek na druhou stranu a připájí se ke spojům, tvořených vrstvou mědi, součástky mohou být osazeny po obou stranách a tím se ušetří značné množství místa. Viz obrázek číslo 7. a 8.

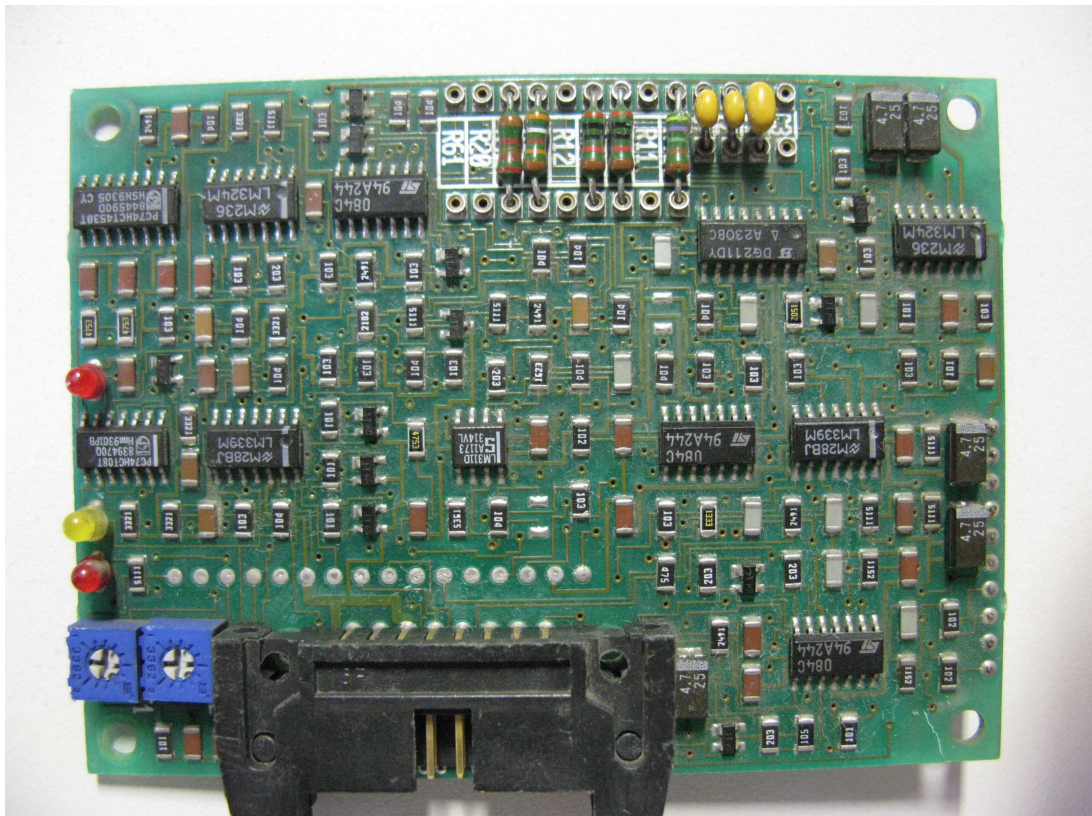


*Obr. č. 7 – Ukázka DPS s klasickou montáží součástek. Vývody součástek jsou napájeny o opačné strany, než jsou osazeny součástky.*



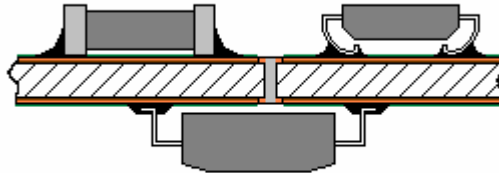
Obr. č. 8 – Průřez oboustranné DPS s  
klasickou montáží součástek

Dalším typem je DPS, kde se využívá v současnosti nejpoužívanější technologie povrchové montáže. Součástky pro povrchovou montáž obsahují kontaktní plošky, za které se připájí na stejnou stranu DPS, na které jsou osazeny. Prokovené otvory slouží k propojení horní a dolní (TOP a BOT) vodivé vrstvy. Příklad takové DPS je na obrázku číslo 9. a 10.



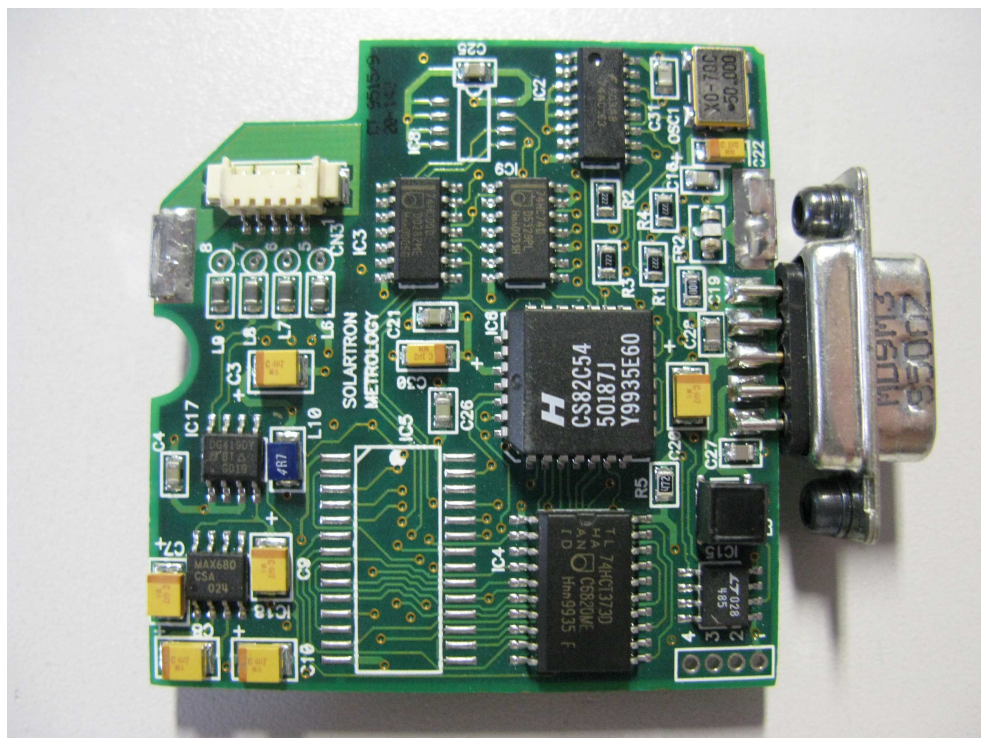


Obr. č. 9 – Příklad DPS s použitím součástek pro povrchovou montáž

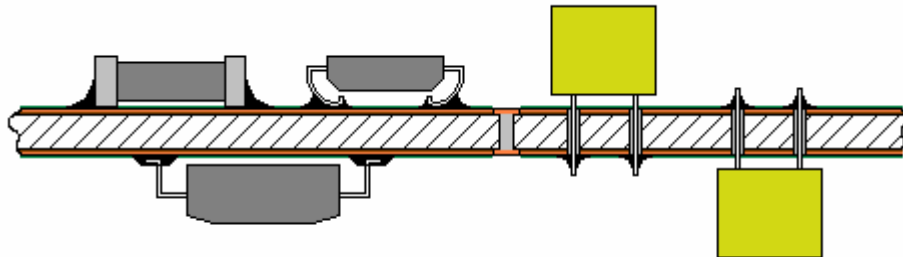


Obr. č. 10 – Průřez oboustranné DPS se součástkami  
pro povrchovou montáž

Třetím typem DPS je také často využívaná kombinace obou předchozích. DPS obsahují v moderních přístrojích především součástky pro povrchovou montáž a součástky s průchozími kontakty jsou hlavně baterie osazené na DPS, piny, konektory a jiné, které na plošném spoji tvoří většinou velmi malou část. Příklad takové DPS je na obrázku 11. a 12.



*Obr. č. 11 – DPS se součástkami pro povrchovou montáž a konektorem  
s vývody, které jsou připájeny i z protější strany.*



*Obr. č. 12 – Průřez oboustranné DPS se součástkami  
pro klasickou a povrchovou montáž*

### 4.3 Materiály pro plošné spoje

Základním materiálem pro výrobu DPS je nejčastěji laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí. Tento materiál je u nás známý především pod názvem Cuprexit. Z jedné nebo obou stran je nanášena měděná folie. Tloušťka laminátu může být od 0,8mm do 2 mm, nejčastěji se pohybuje mezi 1 až 1,5mm, tloušťka měděné folie 17 nebo 35 mikrometrů, pro náročnější účely se používají i další tloušťky. Pro jednodušší výroby, jako je spotřební elektronika, existují lamináty se základní vrstvou ze speciálního papíru nebo mohou být ze skelné tkaniny pouze vnější vrstvy, mezi nimi je netkaná textilie. Pro vysokofrekvenční obvody se užívá laminát na bázi teflonu. [10]

Označení materiálů pro plošné spoje:

**FR1** - Papír nasycený fenolformaldehydovou pryskyřicí - laciný druh

**FR2** - Papír nasycený fenolformaldehydovou pryskyřicí - standardní provedení,

využívá se většinou pro levnější konstrukce, nosným materiálem je několik vrstev celulózového papíru spojeného fenolickou pryskyřicí, lze dobře mechanicky opracovávat, není vhodný do vyšších teplot, pro pokovování otvorů a obsahuje toxické látky.

- FR3** - Papír nasycený epoxidovou pryskyřicí - nosným materiálem je několik vrstev celulóзовého papíru spojeného fenolickou pryskyřicí, lze dobře opracovávat, je vhodný pro použití do teplot 90 C°, nevhodný na prokovování otvorů, doporučuje se na jednostranné DPS.
- FR4** - Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí – nejběžnější druh, nosným materiálem je několik vrstev skelné rohože spojené epoxidovou pryskyřicí, je vhodný pro obrysové frézování, mechanicky odolný, má vysokou ohybovou pevnost, rozměrovou stabilitu, tepelnou odolnost do 130 C°, je určen pro prokovení otvorů, je vhodný na nejnáročnější aplikace DPS.
- FR5** - Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí - zvláště tepelně odolný
- FR6** – Skelná rohož napuštěná polyesterovou pryskyřicí
- G30** – Polyamid-sklotextil – pro tepelně více namáhané konstrukce, základem je jako u FR4 pryskyřice, s tím rozdíle, že její teplota tečení je až 260 C°.
- CEM1** - nosný materiál je konstruován kombinací celulóзовého papíru spojeného epoxidovou pryskyřicí pro vnitřní vrstvy a nalaminovanou vrstvou vyztužující skelné rohože pro vnější vrstvy, má zvýšenou mechanickou odolnost a odolnost proti tepelnému rázu a klimatickým podmínkám, není vhodný na prokovení otvorů. [11], [20]

Materiály pro výrobu plošných spojů můžeme rozdělit na organické a anorganické.

### **Organické materiály:**

Jako výstužný materiál se používá skleněná rohož, tvrzený papír, křemenné, uhlíkové a aramidové vlákno. Materiál pro pojivo se používají u neohebných struktury reaktoplasty, což jsou vysoce zesíťované polymerní řetězce a pro ohebné struktury termoplasty, které na rozdíl od reaktoplastů mají dlouhé lineární molekuly bez

mezimolekulárních vazeb, čímž je dosažena pružnost a odolnost vůči ohybovému namáhání.

**Druhy reaktoplastů:**

- fenolformaldehydové pryskyřice
- epoxidové pryskyřice
- polyamidové pryskyřice

**Druhy termoplastů:**

- polyimid (PI)
- polytetrafluoretylen (PTFE)
- polyetylnaftalát (PEN)
- polyetyltereftalát (PET) [12]

**Anorganické materiály:**

Jsou to elektroizolační keramické materiály s dobrou chemickou odolností a malou teplotní roztažností. Jejich nevýhoda spočívá ve vyšší pořizovací ceně, větší hmotnosti, křehkosti a v některých případech toxicitě materiálu.

**Druhy materiálů:**

- korundový substrát
- beryliový substrát
- ovrstvené kovové jádro
- křemenné a skleněné substráty
- feritový substrát [12]

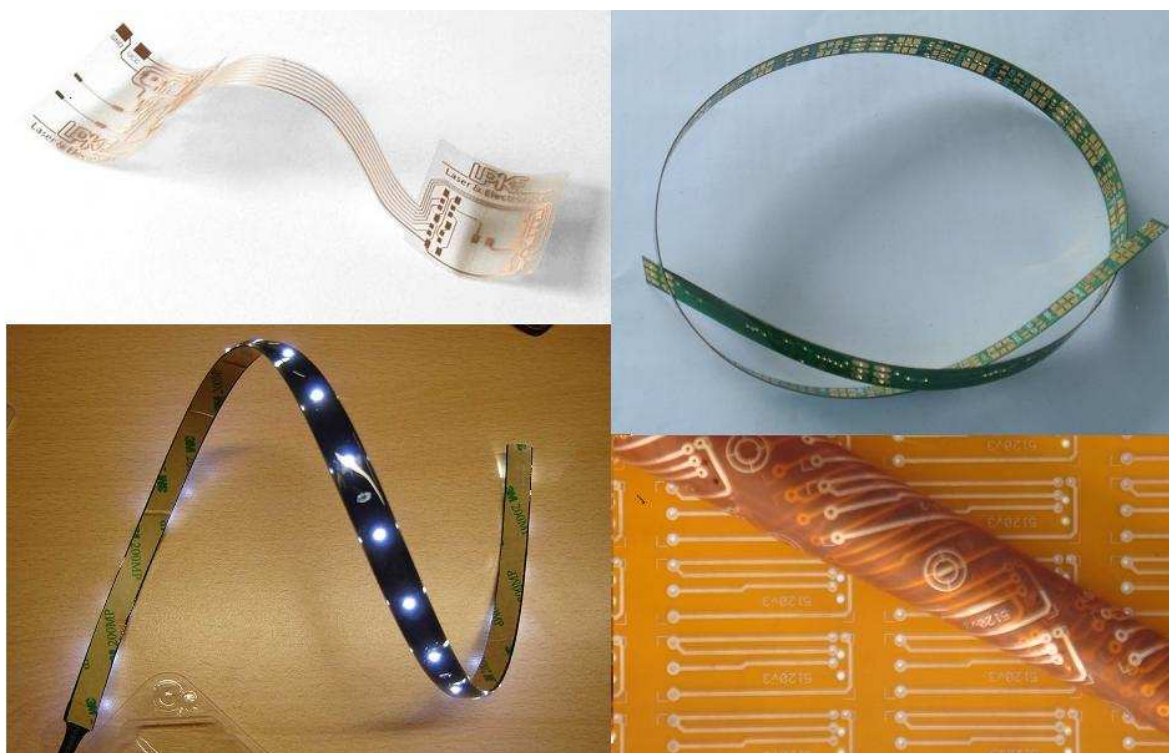


**Pojivo** – napomáhá rovnoměrnému rozložení působení vnějších vlivů na výztuž (zejména teploty), chrání ji před mechanickým poškozením a před chemikáliemi. Pojivo musí mít výborné dielektrické vlastnosti.

#### **Materiál pro pružné a ohebné spoje:**

K výrobě pružných spojů se používá materiál Pyralux o tloušťce 0,1 mm, lze jej prokovovat a snáší opakovaný ohyb o 180°.

Pro výrobu ohebných spojů je používán materiál FR 4 o tloušťce 0,1 mm. Ohebné PS mají vyšší mechanickou pevnost a odolají opakovaným ohybům do 90°. Příklad pružných a ohebných DPS je na obrázku č. 13.



*Obr. č. 13 – Pružné a ohebné DPS*

#### **4.4 Teplotní napjatost**

Teplotní napjatost je vlastnost materiálu, která hraje významnou roli v praktické části této práce, vzniká při změně teploty v každém tělese a zapříčiňuje teplotní roztažnost (deformaci) tohoto tělesa. Tato deformace, vlivem prudkého nárůstu teploty, způsobuje

v případě DPS odloučení vodivých cest od ostatního materiálu, což je předmětem praktické části.

V první části této kapitoly je popsána teplotní roztažnost, co to je, jak ji rozdělujeme a jakým způsobem je můžeme spočítat. V další části je popsána problematika napjatosti materiálů, jak vzniká a jaké vztahy pro výpočet můžeme použít. Poslední část je věnována popisu teplotní napjatosti, která vzniká ve vícevrstvých DPS.

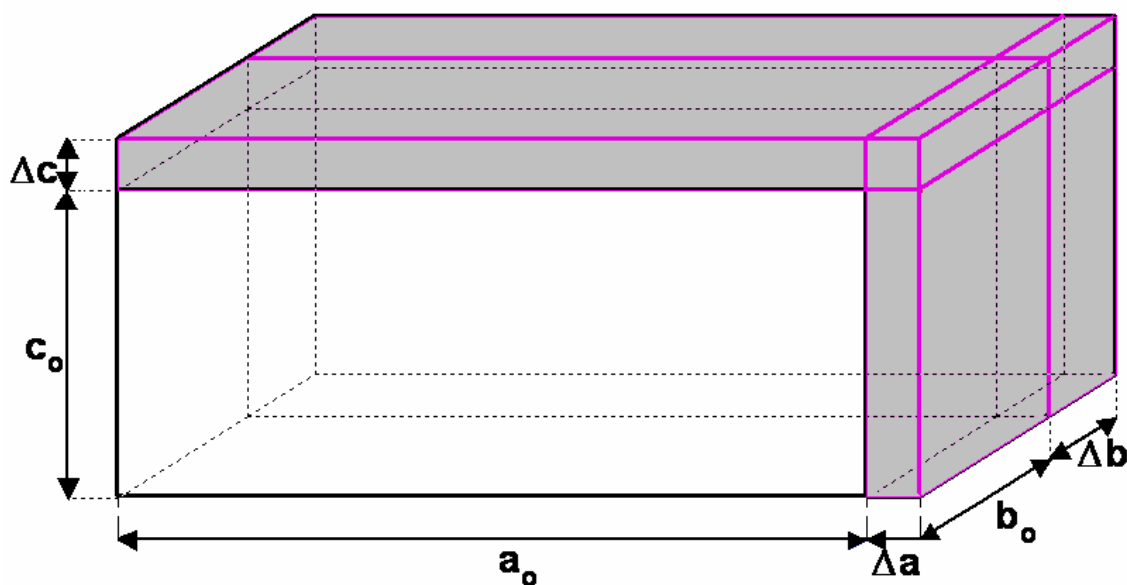
#### 4.4.1 Teplotní roztažnost

Jestliže dochází při změně teploty ke změně rozměrů tělesa, mluvíme o teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost můžeme rozdělit na délkovou a objemovou roztažnost.

Vzrostou-li při zahřátí všechny rozměry tělesa, musí vzrůst i jeho objem. O objemovou roztažnost se jedná především u tekutin. Zvýší-li se teplota pevné látky nebo tekutiny objemu  $V$  o hodnotu  $\Delta T$ , bude přírůstek objemu:

$$\Delta V = V\beta\Delta T \quad (4.1)$$

kde  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti materiálu viz obrázek č. 14.



Obr. č. 14 – Teplotní objemová roztažnost

U těles, které po zahřátí nebo ochlazení změní převážně svou délku, hovoříme o teplotní délkové roztažnosti. Jestliže teplota  $T$  kovové tyčky (v případě plošných spojů plátku mědi) vzroste o  $\Delta T$ , její délka  $l_0$  vzroste o hodnotu  $\Delta l$  (obr. č. 15):

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \quad (4.2)$$

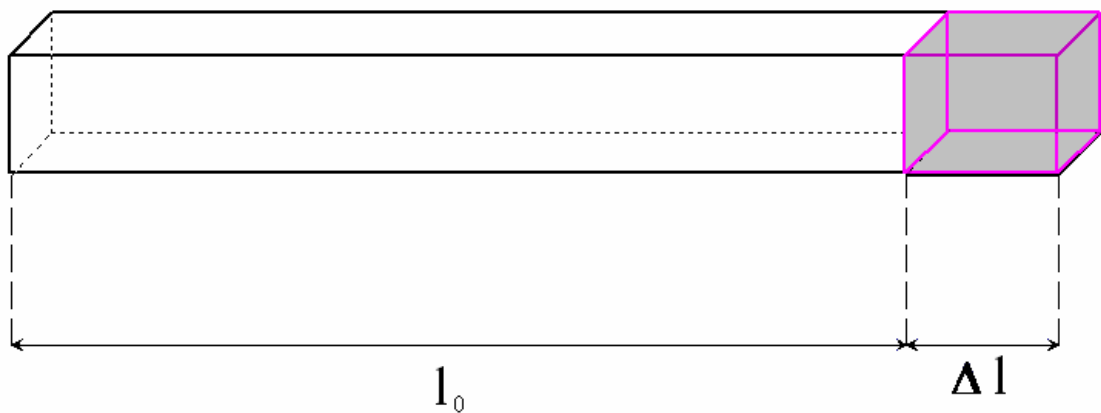
Kde  $\alpha$  je na materiálu závislá konstanta zvaná teplotní součinitel délkové roztažnosti, což je relativní přírůstek délky při jednotkové změně teploty. Její jednotkou je  $K^{-1}$ . Dosadíme-li do vztahu  $\Delta l = l - l_0$ , dostaneme po úpravě vztah:

$$l = l_0 (\alpha \Delta T + 1) \quad (4.2)$$

Součinitele objemové a délkové roztažnosti jsou spojeny vztahem:

$$\beta = 3\alpha \quad (4.3)$$

[5], [13], [21]



Obr. č. 15 – Teplotní délková roztažnost

#### 4.4.2 Napjatosti materiálů

V mechanice tuhých těles předpokládáme, že myšlená tělesa při působení vnějších sil nemění svůj tvar a rozměry, ve skutečnosti taková tělesa neexistují, pokud budeme na těleso působit vnější silou, svůj tvar i velikost změní, říkáme tedy, že se těleso deformuje. Při změně tvaru tělesa se změní rovnovážné polohy částic, ze kterých se těleso skládá, což

vede ke vzniku sil, které mají snahu vrátit částice zpět do rovnovážného stavu. Vzniklé síly působí na povrchu i uvnitř celého tělesa a způsobí stav napjatosti tělesa, které charakterizujeme veličinou zvanou napětí. [16]

Deformace tělesa závisí na velikosti deformující síly a na rozměrech tělesa. Příkladem se nejčastěji uvádí tyč namáhaná v tahu, tahová síla působí po celé délce tyče, takže prodloužení  $\Delta l$  je úměrné její počáteční délce  $l_0$ . Deformaci materiálu, nezávisle na délce tyče, udává poměrné prodloužení  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.4)$$

Účinek síly se v tyči rozkládá po celé ploše průřezu  $S$ , takže mírou namáhání materiálu není síla, ale mechanické napětí  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (4.5)$$

Kde mechanické napětí  $\sigma$  je podílem síly  $F$  a plochy průřezu  $S$ , v němž síla působí.

Účinkem tahové síly, kolmé k průřezu, vzniká normálové napětí  $\sigma_n$ :

$$\sigma_n = \frac{\Delta F_n}{\Delta S} \quad (4.6)$$

Normálové napětí  $\sigma_n$  je při tahu kladné a při tlaku záporné.

Podle Hookeova zákona je deformace úměrná napětí materiálu. Obecně vyjádříme Hookeův zákon, jako přímou úměru mezi normálovým napětím  $\sigma_n$  a vznikajícím relativním prodloužením  $\varepsilon$ :

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon \quad (4.7)$$

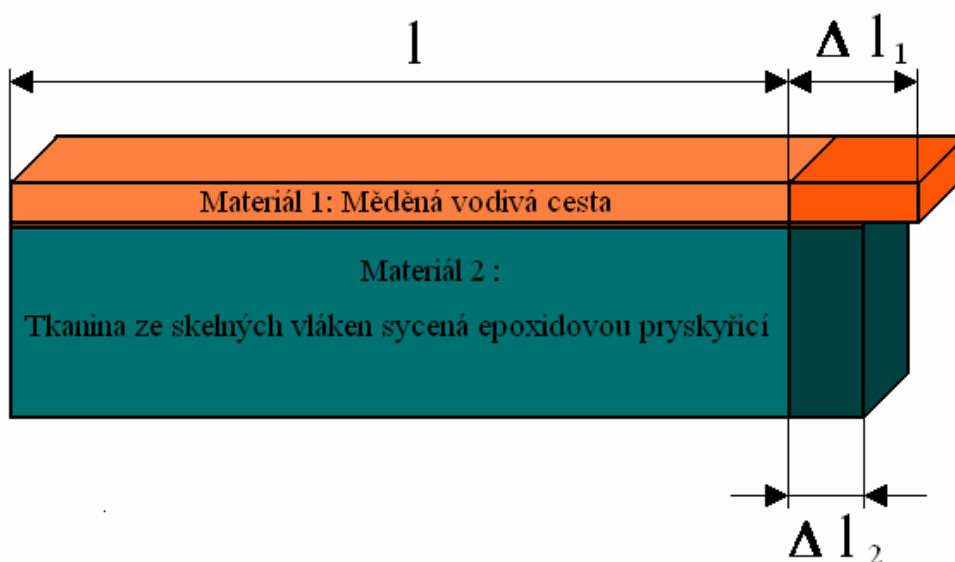
Kde  $E$  je konstanta úměrnosti (Youngův modul pružnosti v tahu), kterou lze pro různé materiály nalézt v tabulkách. [15]

Jestliže síly přestanou na těleso působit, vrátí se elasticky deformované těleso do svého původního stavu, pokud však působí síla větší, přesahující mez pružnosti materiálu, dochází k deformaci plastické, což znamená, že část deformace materiálu je trvalá. Hookeův zákon ale platí jen do hodnoty napětí zvané mez úměrnosti  $\sigma_U$ , po této hodnotě je deformace ještě elastická, ale jen do hodnoty  $\sigma_U$ , což je mez pružnosti, nad touto mezí se

materiál začíná již plasticky deformovat. Při plastické deformaci není přímá úměra mezi normálovým napětím a relativním prodloužením. [14], [15], [16]

#### 4.4.3 Teplotní napjatost ve vícevrstvých DPS

Teplotní napjatost ve vícevrstvých DPS vzniká vlivem změny teploty různých vrstev a jejich vzájemně různému součiniteli délkové roztažnosti. To znamená, že zahříváme (nebo ochlazujeme) více různých materiálů spolu pevně spojených, při změně teploty dochází i ke změně rozměrů obou materiálů, čímž vzniká napjatost mezi materiály. Čím je změna teploty vyšší, tím je větší i změna velikosti a rozdíl změny velikostí všech materiálů a vzrůstá i velikost napětí mezi nimi, jak je vidět na obrázku číslo 16.



Obr. č. 16 – Změna délky materiálů s rozdílnou tepelnou délkovou roztažností

Nejčastěji jsou DPS tvořeny deskou skládající se z tkaniny ze skelných vláken sycené epoxidovou pryskyřicí, na níž je nanášena měděná vodivá cesta. Teplotní roztažnost desky je menší než teplotní roztažnost měděné vodivé cesty, proto při změně teploty dochází k různé změně rozměrů a tím i k vzájemné napjatosti mezi materiály. Při menší změně teploty se tyto změny nemusí ihned projevit, protože do jisté míry může spoj mezi vrstvami vzniklou napjatost pohltit nebo zmírnit. Po překročení určité hranice, ale dochází k deformaci materiálů vlivem vzniklých napjatostí nebo jejich vzájemnému oddělení.

## 5 SDÍLENÍ TEPLA

Protože je praktická část zaměřena především na přestup a vedení tepla v desce plošného spoje, zabývám se v dalších kapitolách teorií přestupu tepla. V kapitole 5.1 je definováno, co to vlastně přestup tepla je a jaké druhy přestupu tepla známe včetně jejich stručného popisu. Následuje problematika teplotního pole, kde nás zajímá hlavně teplotní pole nestacionární, tedy teplotní pole závislé na čase, které je popsáno v podkapitole 5.1.1. a sdílení tepla vedením, které popisuje Fourierův zákon vedení tepla (5.1.2). Kapitola 5.2 je zaměřena na problematiku nestacionárního sdílení tepla vedením v desce, což je případ přestupu tepla objevující se v praktické části.

### 5.1 Sdílení tepla - rozdělení

Sdílení tepla se zabývá procesy přenosu tepla. Přenos tepla je nerovnovážený termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase. Podmínkou sdílení tepla je existence teplotního rozdílu. Sdílení tepla se řídí druhým zákonem termodynamiky, který v Carnotově-Clausiově verzi zní „Teplo samo o sobě nemůže přecházet z látky o teplotě nižší na látku o teplotě vyšší“. Ačkoliv sdílení tepla je velmi složité, je možné jeho dělení na tři mechanismy přenosu tepla: [8]

- a) **sdílení tepla vedením (kondukcí)** – Uplatňuje se hlavně u pevných těles, ale také u kapalin a plynů. Teplo se při tomto způsobu sdílí vzájemnými srážkami neuspořádaně se pohybujících částic látky. Teplo samovolně přechází z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou, intenzita procesu vedení tepla závisí na maximálním teplotním spádu v daném místě prostředí.
- b) **sdílení tepla prouděním (konvekcí)** – při proudění tekutin je teplo přenášeno kombinací: vedením od částice k částici a dále mechanickým přemísťováním jednotlivých částic. Intenzita předávání tepla konvekcí bude tedy záviset na charakteru proudění tekutiny.
- c) **sdílení tepla sáláním (radiací)** – je šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění, přičemž se na rozdíl od vedení a proudění tepelná energie přeměňuje

v energii sálavou a naopak. Elektromagnetické vlnění vysílá každé těleso, jehož teplota je různá od 0 K, jeho vlnová délka se pohybuje od 10  $\mu\text{m}$  do 340  $\mu\text{m}$ . K šíření tepla pomocí elektromagnetického vlnění není zapotřebí látkové prostředí (šíří se i ve vakuu). [8]

Ve skutečnosti se nesetkáváme s jednotlivými druhy sdílení tepla izolovaně, ale s jejich nejrůznějšími kombinacemi.[8]

### 5.1.1 Teplotní pole

Teplotní pole je polem skalárním a charakterizuje rozdělení teplot v tělese. Teplo samovolně přechází z míst o vyšší teplotě do míst chladnějších, intenzita procesu vedení tepla závisí na maximálním teplotním spádu v daném prostředí. Je-li v každém bodě prostoru anebo jeho části jednoznačně určena skalární veličina, potom hovoříme o skalárním poli, které je dáno spojitou funkcí:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (5.1)$$

prostoru a času. Teplotní pole takto definované nám představuje prostor, kde každému bodu v každém okamžiku  $(x, y, z, \tau)$  přísluší určitá termodynamická teplota  $t$ .

Termodynamická teplota se určuje podle zákonů termodynamiky a je mírou kinetické energie pohybujících se molekul. Jestliže teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času ( $\tau$ ), tedy teplota je časově proměnná, hovoříme o teplotním poli nestacionárním (1.1). Nebo se s časem nemění, pak je nazýváme stacionární a píšeme

$$t = t\left(x, y, z, \frac{\partial t}{\partial \tau}\right) = 0. \quad (5.2)$$

Jednotlivé hmotné body v prostoru mají vždy určitou teplotu a geometrická místa bodů o stejné teplotě nám v prostoru vytvářejí plochy s konstantní teplotou, které mohou být obecně uzavřené nebo končí na okrajích soustavy. [8],[17],[18]

### 5.1.2 Napětí teplotního pole

Napětí teplotního pole je definováno vektorem napětí  $\vec{E}$ , který je orientován proti smyslu gradientu teploty, proto má záporné znaménko. Napětí teplotního pole je definováno:

$$\vec{E} = -grad\ t = -\nabla t = -\left(\vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z}\right) \quad (5.3)$$

Nutnou podmínkou sdílení tepla je existence teplotního gradientu, přičemž směr sdílení tepla je shodný se směrem napětí teplotního pole v daném místě. Množství tepla  $Q$ , které projde plochou  $S$  za jednotku času  $\tau$ , nazýváme tepelný tok  $\dot{Q}$ , který vypočítáme ze vztahu:

$$\dot{Q} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{Q}{\tau} = \frac{dQ}{d\tau} \quad (5.4)$$

Vztáhneme-li tepelný tok  $\dot{Q}$  na jednotku plochy  $S$ , dostaneme hustotu tepelného toku  $q$ :

$$q = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{d\dot{Q}}{dS} \quad (5.5)$$

[8]

### 5.1.3 Fourierův zákon vedení tepla

Tento zákon je základním kvantitativním vztahem pro sdílení tepla vedením. Je definován rovnicí:

$$\vec{q} = -\lambda grad T = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (5.6)$$

Hustota tepelného toku  $q [W.m^{-2}]$  je úměrná teplotnímu gradientu (spádu teploty). Konstanta úměrnosti  $\lambda$  se nazývá součinitel tepelné vodivosti, je to konstanta charakteristická pro daný materiál. Množství tepla, které se převede mezi dvěma rovnoběžnými deskami různé teploty, které jsou ve vzdálenosti  $dl$ , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. [8]



## 5.2 Nestacionární sdílení tepla vedením

Rozlišujeme dva druhy sdílení tepla vedením (kondukcí), stacionární a nestacionární. Při stacionárním (ustáleném) vedení tepla se teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa v čase nemění. Naopak při nestacionárním (neustáleném) vedení tepla, se teplotní rozdíly mezi jednotlivými částmi tělesa, mezi kterými se teplo přenáší, postupně vyrovnávají. Rozložení teploty je závislé na čase  $T=T(x,z,y,\tau)$ . [19]

### 5.2.1 Nestacionární teplotní pole v rovinné desce

Nestacionární sdílení tepla vedením má velký význam v technické praxi při ohřevu nebo ochlazování těles. Ve zpracovatelském průmyslu, se velká část zpracovatelských operací odehrává za vyšších teplot (100-200C°), jde tedy o popis odpovídající časově neustálenému sdílení tepla vyvolaného jiným tepelným působením na toto těleso.

Jednorozměrné vedení tepla v desce je popsáno diferenciální rovnicí:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (5.7)$$

Protože rovnice obsahuje první derivaci teploty podle času, je nutné ji doplnit o následující počáteční podmínku a okrajovou podmínku:

$$\begin{aligned} t(x, \tau = 0) &= t_p \\ t(x, \tau \rightarrow 0) &= t_0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Podmínka symetrie:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (5.9)$$

Okrajových podmínek je vícero druhu, používají se na teplotních rozhraních nejčastěji ve tvaru:

**Okrajové podmínky 1. druhu (Neumannovi)** – tato podmínka se aplikuje zejména tam, kde je známa teplota v určitém místě tělesa, nejčastěji na povrchu nebo tam, kde je hranice

tvořena izotermou. Tato podmínka charakterizuje dokonalý přestup tepla s povrchu stěny do okolí, kdy teplota povrchu se prakticky okamžitě ustáli na teplotu okolí:

$$t(x = b, \tau) = t_0 \quad (5.10)$$

**Okrajové podmínky 3. druhu (Newtonovi)** – Tyto podmínky reprezentují přestup tepla konvekcí do prostředí o teplotě  $t_0$ . Charakterizují, že přestup tepla na fázovém rozhraní není dokonalý. Je zadána teplota prostředí  $t_0$ , které těleso obklopuje spolu se součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ . Na povrchu tělesa musí platit spojitost konduktivního toku přivedenému tělesu a konvektivního toku odvedeného z prostředí:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(b, \tau) = \alpha(t - t_0) \quad (5.11)$$

Analytické řešení je možno provést Fourierovou separací proměnných nebo Laplaceovou transformací. Pro popis teplotního pole s uvažovanou podmínkou 3. Druhu v nekonečné desce, obdržíme vztah:

$$t^* = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_p - t_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(g_n)}{[J_1^2(g_n) + J_0^2(g_n)g_n]} J_0\left(\frac{r}{R} g_n\right) e^{\left(-\frac{a\tau}{R^2} g_n^2\right)} \quad (5.12)$$

Kde  $a$  je součinitel teplotní vodivosti,  $b$  – poloviční tloušťka,  $\tau$  – čas,  $R$  – poloměr,  $x$  – vzdálenost od středu,  $t(x, \tau)$  – teplota v daném místě a čase,  $t_p$  - počáteční teplota,  $t_0$  - teplota okolí,  $t^*$  - bezrozměrná teplota,  $q_n$  - jsou kořeny transcendentní rovnice pro desku:

$$\cot(q) = \frac{q}{Bi}.$$

S prodlužující se dobou ohřevu (chlazení), se mění rozložení teploty v tělese. Jak se bude měnit, závisí na tloušťce  $b$ , na vlastnostech materiálu tj. měrné tepelné kapacitě  $q_p$ , součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda$ , hustotě  $\rho$ . [8],[17],[19]

## 6 COMSOL MULTIPHYSICS

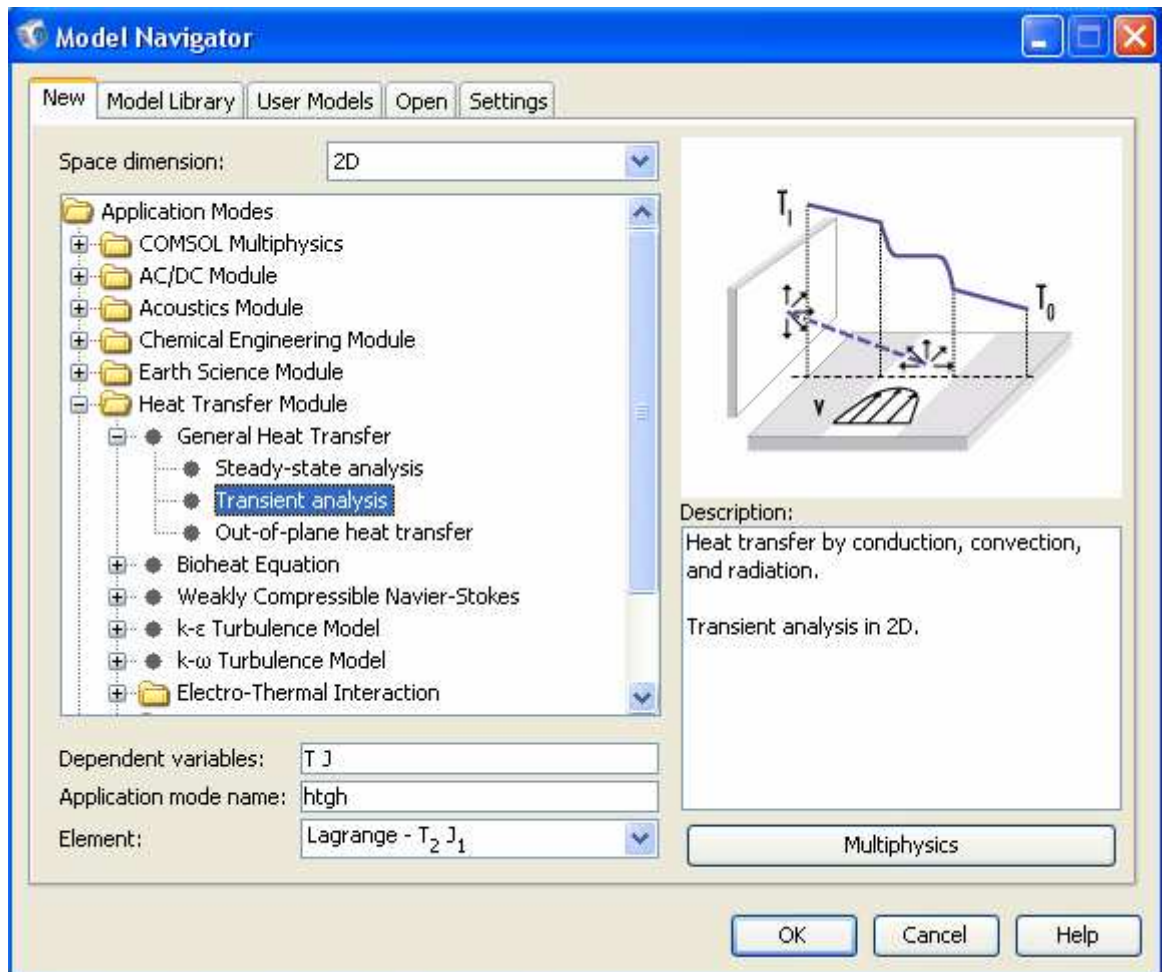
V praktické části této práce se zabývám modelováním teplotních polí v pevných látkách, k simulování těchto dějů jsem použil program COMSOL Multiphysics. Tato kapitola stručně popisuje tento program.

### Popis programu COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je určen vývojářům, výzkumníkům, vědeckým pracovníkům, výzkumným a specializovaným školám. Umožňuje řešit fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi metodou konečných prvků. Programem lze modelovat multifyzikální děje v inženýrské praxi a v mnoha vývojových oblastech technických a vědeckých oborů. Do řešení je možné zahrnout několik fyzikálních vlivů najednou a tak provádět komplexnější analýzu modelu.[22]

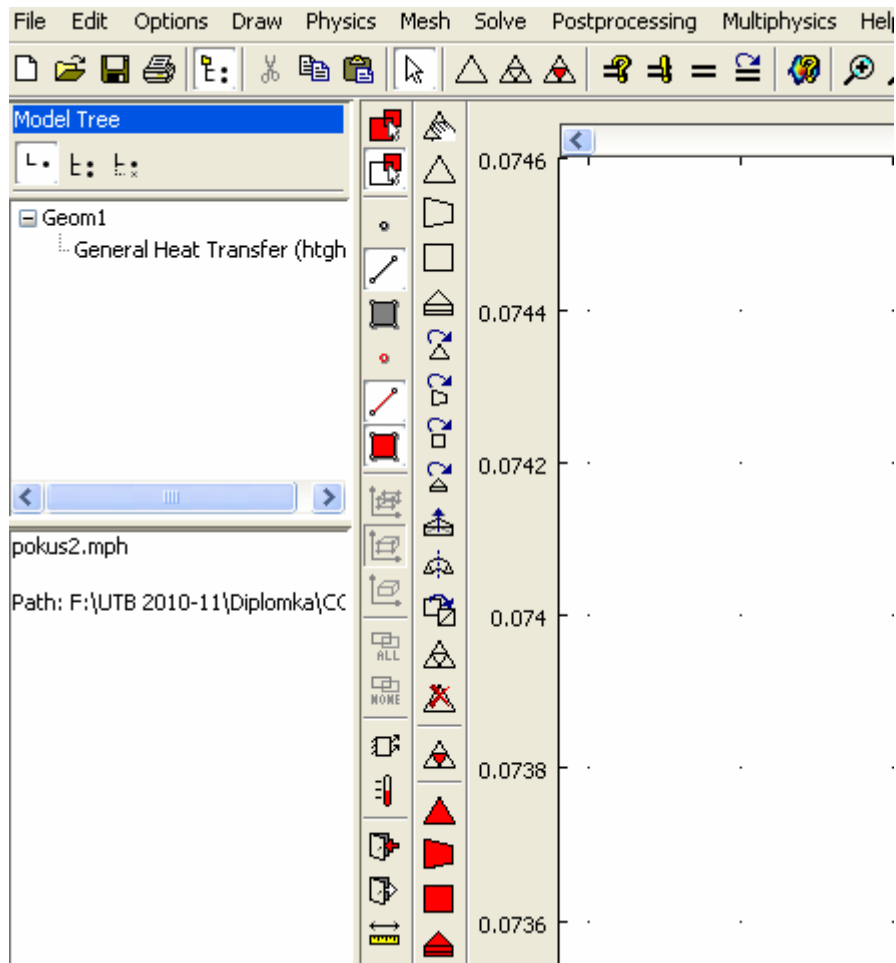
### Popis prostředí a základních funkcí

Při spuštění programu COMSOL Multiphysics se spustí navigátor, pomocí kterého vytvoříme nový model. V záložce New volíme možnosti Heat Transfer Modle->General Heat Transfer->Transient analysis, viz. Obrázek č. 17.



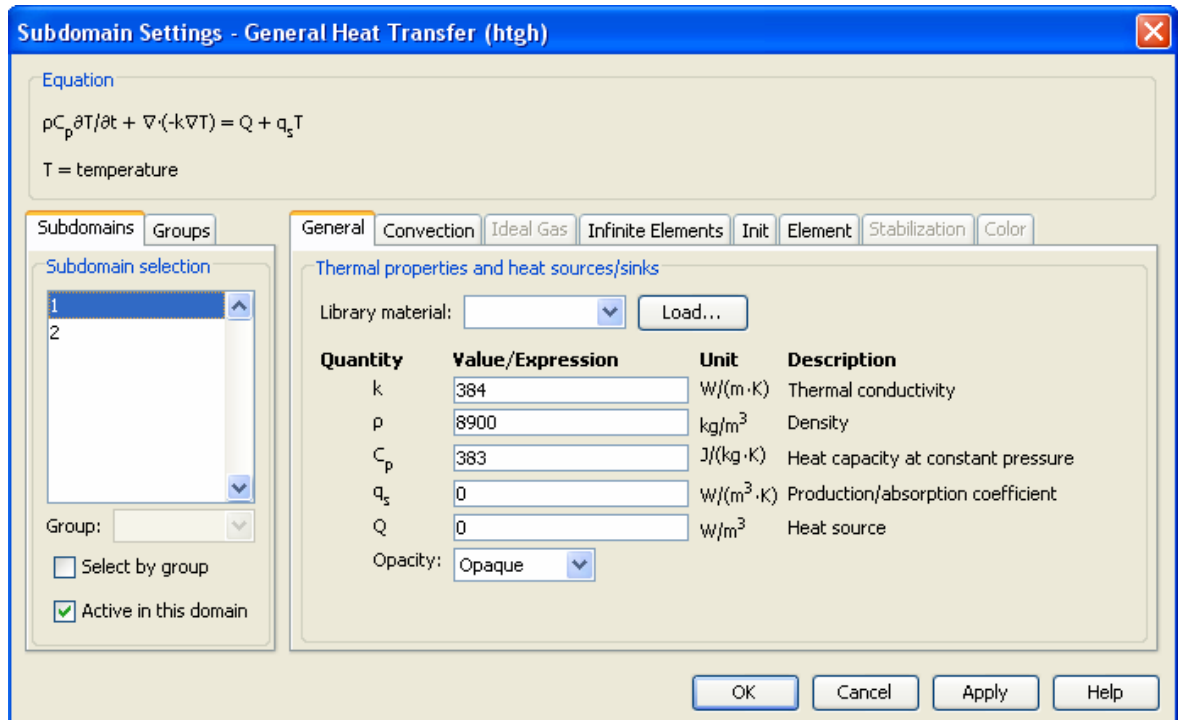
Obr. č. 17 – COMSOL Multiphysics – průvodce novým modelem

Po založení nového modelu se objeví pracovní prostředí, po levé straně jsou okna se zvolenými možnostmi projektu (Model Tree) a pod ním informace o názvu a umístění modelu. Napravo od těchto oken jsou umístěny ikony pomocí kterých je možné navrhnout objekt se kterým budeme pracovat a pomocí kterých můžeme s objektem manipulovat. Centrální část je věnována pracovnímu prostoru a horní lišta obsahuje řadu nástrojů, které budeme využívat pro definování parametrů a vlastností našeho objektu (obrázek č. 18).



Obr. č. 18 – COMSOL Multiphysics – pracovní prostředí

Po navržení objektu je nutné nadefinovat jeho fyzikální vlastnosti, to provedeme v horním menu v záložce Physics->Subdomain Settings. Náš objekt je složen ze dvou vrstev s rozdílnými vlastnostmi, na které budeme teplotně působit, v levé části (Subdomains) si vybereme vrstvu a v pravé části, v záložce General nadefinujeme jeho vlastnosti a v záložce Init jeho teplotu, totéž provedeme s druhou vrstvou (vis. Obrázek č. 19).



Obr. č. 19 – COMSOL Multiphysics – nastavení vlastností objektu

Další potřebné parametry, které budeme využívat, je možné nastavit v záložce Solve->Solver Parameters. Nastavujeme zde především čas, ve kterém chceme daný děj pozorovat a mnoho dalších. Posledním důležitým nastavením je nastavení podmínek, to provedeme v záložce Physics->Boundary Settings, kde nadefinujeme okrajové podmínky.

Spouštění modelu se provádí v záložce Solve->Solve Problem.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

V úvodu praktické části se budu zabývat vyjádřením vztahů pro výpočet vnitřní teploty materiálu, který bude zahříván. Pomocí těchto vztahů je možné spočítat teplotu materiálu v libovolném místě a čase. Dále následuje konkrétní výpočet DPS, který je použit v experimentální části. Výpočet se bude týkat jen vrstvy epoxidové pryskyřice, s měděnou vrstvou, která představuje vodivé cesty, nebudu počítat. Výpočet tepla v libovolném místě a čase je velmi složitý a vrstva mědi by výpočet příliš zkomplikovala, protože měděné vodivé cesty nejsou rozmístěny rovnoměrně a vzniká tím dvouvrstvá deska, pro kterou je výpočet ještě mnohem složitější.

Rozložení teploty v desce plošného spoje budu simulovat v programu COMSOL Multiphysics. Simulace se nejprve bude týkat jen desky epoxidové pryskyřice pro ověření správnosti výpočtů, poté budu v tomto programu simulovat DPS včetně vodivých měděných cest.

Posledním bodem praktické části je pak experiment, pomocí kterého se pokusím oddělit vodivé měděné cesty od desky epoxidové pryskyřice vlivem cyklického zahřívání a ochlazování DPS. Od experimentu se očekává narušení spojení mezi vodivou cestou základovou deskou tvořenou (tvořenou epoxidovou pryskyřicí) vlivem rozdílné teplotní roztažnosti obou materiálů a vlivem vzniklé napjatosti.



## 8 VÝPOČETNÍ ČÁST

Cílem výpočtu je určit teplotu v libovolném místě a čase při zahřívání DPS. Pro výpočet se předpokládá, že lineární rozměry povrchů horní a dolní stěny jsou řádově větší než tloušťka stěny. Jedna ze stěn bude vystavena tepelnému působení okolního prostředí, které má časově neměnnou teplotu  $t_0$ . Před začátkem ohřevu byla teplota stěny ve všech místech stejná a její hodnotu označujeme jako počáteční teplotou  $t_p$ . [8]

K výpočtu teploty použiji vztah 8.15, kde jedinou neznámou je bezrozměrná teplota  $t^*$ , tu vypočítám po dosazení do rovnice 8.12. Abych mohl dosadit do rovnice 8.12, potřebuji znát bezrozměrnou vzdálenost od středu objektu  $X$ , kterou určím podle vztahu 8.13, Fourierovo kritérium, podle rovnice 8.11 a kořeny transcendentní rovnice  $q_n$ , ty určím pomocí Biotova čísla ze vztahu 8.10. Abych mohl určit Biotovo číslo  $Bi$ , musím nejprve vypočítat součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , pro který platí vztah 8.1, ve kterém je neznámá Nusseltovo kritérium dle rovnice 8.2, k jeho určení je potřeba ještě znát Prandtlovo a Grashofovo kritérium, ty určím ze vztahu 8.6 a 8.8. Prandtlovo kritérium je možné pro daný materiál nalézt v tabulkách, pro jeho výpočet je nutné ještě určit součinitel teplotní vodivosti podle rovnice 8.7.

### 8.1 Výpočet teploty

Pro výpočet teploty pod povrchem materiálu je nejprve nutné určit součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , ten vypočítáme ze vztahu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{vz}}{d} \quad (8.1)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla  $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ ,  $Nu$  je Nusseltovo kritérium,

$\lambda_{vz}$  je součinitel tepelné vodivosti pro vzduch  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ ,  $d$  je šířka materiálu  $[m]$

Pro výpočet Nusseltova kritéria ( $Nu$ ) použijeme vzorec:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (8.2)$$

kde konstanty  $C$  a  $n$  závisí na součinu  $Gr$  a  $Pr$  podle kritériálních vztahů (8.3), (8.4) a (8.5).  $Gr$  je Grashofovo kritérium,  $Pr$  je Prandtlovo kritérium. [8]

Kritériální vztahy pro určení konstant  $C$  a  $n$  Nusseltova kritéria:

$$Nu = 1.18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{8}} \quad \text{pro} \quad 10^{-3} \leq Gr \cdot Pr < 500 \quad (8.3)$$

$$Nu = 0.54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad \text{pro} \quad 500 \leq Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7 \quad (8.4)$$

$$Nu = 0.135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pro} \quad 2 \cdot 10^7 \leq Gr \cdot Pr < 10^{13} \quad (8.5)$$

[24]

Prandtlovo kritérium lze najít v tabulkách nebo je možné jej spočítat z následujícího vztahu:

$$Pr = \frac{\nu}{a_{vz}} \quad (8.6)$$

kde  $\nu$  je rychlost proudění vzduchu,  $a_{vz}$  je součinitel teplotní vodivosti vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

Součinitel teplotní vodivosti vzduchu spočítáme ze vztahu:

$$a_{vz} = \frac{\lambda}{c_{pvz} \cdot \rho_{vz}} \quad (8.7)$$

Grashofovo kritérium vyjádříme ze vztahu:

$$Gr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta_{vz} \cdot \Delta t}{\nu_{vz}^2} \quad (8.8)$$

Kde  $g$  je gravitační konstanta [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $d$  je šířka materiálu [m],  $\Delta t$  je teplotní rozdíl [ $^{\circ}C$ ]

$$\beta_{vz} = \frac{1}{T} \quad (8.9)$$

kde  $T = t_s + 273,15$  a  $t_s$  je střední teplota [ $^{\circ}C$ ]. [8]

Po výpočtu součiniteli přestupu tepla  $\alpha$ , vypočítám Biotovo kritérium  $Bi$ :

$$Bi = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda_{mat}} \quad (8.10)$$

kde  $\lambda_{mat}$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

$b$  je poloviční tloušťka materiálu [ $m$ ]

Biotovo kritérium  $Bi$ , slouží pro nalezení kořenů transcendentní rovnice, které budu dosazovat do vztahu pro výpočet bezrozměrné teploty. Před tímto výpočtem je nutné ještě provést výpočet Fourierova kritéria pro požadovanou dobu:

$$Fo = \frac{a_{mat} \cdot \tau}{b^2} \quad (8.11)$$

kde  $a_{mat}$  je součinitel teplotní vodivosti materiálu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $\tau$  je čas [ $s$ ]

Součinitel teplotní vodivosti materiálu  $a_{mat}$  určíme stejným způsobem jako  $a_{vz}$ , tedy ze vztahu (8.7). [8]

Výpočet bezrozměrné teploty se provede pomocí vztahu:

$$t^* = \frac{t - t_0}{t_p - t_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(q_n) \cdot \cos(X \cdot q_n) e^{-q_n^2 \cdot Fo}}{q_n + \sin(q_n) \cdot \cos(q_n)} \quad (8.12)$$

kde  $X$  je bezrozměrná vzdálenost od středu materiálu určená pomocí rovnice:

$$X = \frac{b - h}{b} \quad (8.13)$$

kde  $h$  je vzdálenost pod povrchem, kde chceme najít určit teplotu,

$q_n$  jsou kořeny transcendentní rovnice určené numerickou metodou ze vztahu:

$$\frac{q}{Bi} = \cot(q) \quad (8.14)$$

K výpočtu skutečné teploty slouží vztah:

$$t = t^* \cdot (t_p - t_0) + t_0 \quad (8.15)$$

kde  $t_p$  je počáteční teplota materiálu [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t_0$  je aktuální teplota materiálu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Vztah (8.15) je výsledným výpočtem, kterým určíme požadovanou teplotu ve zvoleném místě a čase. [8]

## 8.2 Výpočet teploty pro konkrétní DPS

Pro výpočet jsem zvolil desku plošného spoje složeného s epoxidové pryskyřice s vodivou vrstvou mědi, protože se jedná o nejpoužívanější variantu DPS. Cílem výpočtu je určit teplotu v daném čase a místě DPS. Všechny vlastnosti materiálu, které je možné vyčíst z tabulkových hodnot, jsou uvedené v tabulce číslo 4.

Výpočet je pouze pro vrstvu epoxidové pryskyřice bez vodivých cest, výpočet desky obsahující měděné plošné spoje by byl velmi složitý. Výpočet teploty v desce epoxidové pryskyřice bude ověřen simulací v programu COMSOL Multiphysics. V tomto programu pak bude simulována teplota DPS včetně vodivých (měděných) cest.

Teplotu budu počítat 0,5mm pod povrchem desky po 60 sekundách ohřevu. Počáteční teplota je 20 $^{\circ}\text{C}$  a deska bude ohřívána na teplotu 300 $^{\circ}\text{C}$ .

Tabulka hodnot vyčtených z tabulek, potřebných pro výpočet příkladu:

$t_p(^{\circ}\text{C})$	Počáteční teplota	20
$t_{vz}(^{\circ}\text{C})$	Teplota okolí	300
$\lambda_{EP}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2})$	Součinitel tepelné vodivosti epoxidové pryskyřice	0,88
$\lambda_{vz}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2})$	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	0,0344
$\rho_{EP}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Hustota epoxidové pryskyřice	1900
$\rho_{vz}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Hustota vzduchu	0,789
$c_{pvz}(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Měrná tepelná kapacita vzduchu	1030
$c_{pEP}(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Měrná tepelná kapacita epoxidové pryskyřice	800
$\nu_{vz}(\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1})$	Kinematický viskozita	30,6

Tab. č. 4 – Tabulkové hodnoty [24]

Pro výpočet bezrozměrné teploty, která je potřebná pro výpočet skutečné teploty, je nutné určit kořeny transcendentní rovnice, ty určíme pomocí Biotova kritéria. Pro výpočet Biotova kritéria je nutné spočítat součinitel přestupu tepla:

Střední teplota:

$$t_s = \frac{20 + 300}{2} = 160^{\circ} C$$

Výpočet Grashofova kritéria:

$$T = t_s + 273,15 = 433,15^{\circ} K$$

$$\beta_{vz} = \frac{1}{T} = \frac{1}{433,15}$$

$$\Delta t = 300 - 20 = 280^{\circ} C$$

$$G_r = \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta_{vz} \cdot \Delta t}{\nu_{vz}^2}$$

kde platí :

$$\begin{aligned} \frac{9,81 \cdot 0,1^3 \cdot \frac{1}{433,15} \cdot 280}{(30,6 \cdot 10^{-6})^2} &= \frac{9,81 \cdot 0,1^3 \cdot 280}{433,15 \cdot (30,6 \cdot 10^{-6})^2} = \\ &= \frac{2,7468}{4,05584334 \cdot 10^{-7}} = 6772450,93 \end{aligned}$$

Výpočty pro určení Nusseltova kritéria:

$$a_{vz} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_{vz}} \Rightarrow \frac{0,0344}{1030 \cdot 0,789} = 4,23 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$$

$$P_r = \frac{\nu_{vz}}{a_{vz}} \Rightarrow \frac{30,6 \cdot 10^{-6}}{4,23 \cdot 10^{-5}} = 0,7229$$

$$G_r \cdot P_r \Rightarrow 6772450,93 \cdot 0,72 = 4876164,67 \Rightarrow C = 0,54, n = \frac{1}{4}$$

Výpočet Nusseltova kritéria:

$$Nu = C(G_r \cdot P_r)^n \Rightarrow 0,54(4876164,67)^{\frac{1}{4}} = 25,38$$

Výpočet součinitele přestupu tepla:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{vz}}{d} \Rightarrow \frac{25,38 \cdot 0,0344}{0,1} = 8,73072 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Biotovo kritérium pro určení kořenů transcendentní rovnice:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda_{mat}} \Rightarrow \frac{8,73072 \cdot 0,00075}{0,88} = 0,007441$$

Výpočet Fourierova kritéria pro dobu 60s:

$$a_{EP} = \frac{\lambda_{EP}}{c_{pEP} \cdot \rho_{EP}} \Rightarrow \frac{0,88}{800 \cdot 1900} = 5,789 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$F_0 = \frac{a_{EP} \cdot \tau}{b^2} \Rightarrow \frac{5,789 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{5,625 \cdot 10^{-7}} = 61,7493$$

Výpočet bezrozměrné vzdálenosti od středu vylisku, pro 0,5mm pod povrchem:

$$x = b - 0,5 = 0,75 - 0,5 = 0,25 \text{ mm}$$

$$X = \frac{0,25}{0,75} = 0,3\bar{3}$$

Výpočet bezrozměrné teploty:

$$t^* = \frac{t - t_0}{t_p - t_0} = 2 \sum_{n=1}^5 \frac{\sin(q_n) \cdot \cos(X \cdot q_n) e^{-q_n^2 \cdot Fo}}{q_n + \sin(q_n) \cdot \cos(q_n)} \Rightarrow$$

$$2 \frac{\sin(0,0861) \cdot \cos(0,3 \cdot 0,0861) e^{-0,0861^2 \cdot 61,7493}}{0,0861 + \sin(0,0861) \cdot \cos(0,0861)} +$$

$$2 \frac{\sin(3,143959) \cdot \cos(0,3 \cdot 3,143959) e^{-3,143959^2 \cdot 61,7493}}{3,143959 + \sin(3,143959) \cdot \cos(3,143959)} +$$

$$2 \frac{\sin(6,2843692) \cdot \cos(0,3 \cdot 6,2843692) e^{-6,2843692^2 \cdot 61,7493}}{6,2843692 + \sin(6,2843692) \cdot \cos(6,2843692)} +$$

$$2 \frac{\sin(9,4255673) \cdot \cos(0,3 \cdot 9,4255673) e^{-9,4255673^2 \cdot 61,7493}}{9,4255673 + \sin(9,4255673) \cdot \cos(9,4255673)} +$$

$$2 \frac{\sin(12,56696265) \cdot \cos(0,3 \cdot 12,56696265) e^{-12,56696265^2 \cdot 61,7493}}{12,56696265 + \sin(12,56696265) \cdot \cos(12,56696265)} = 0,6332$$

Výpočet skutečné teploty ve vzdálenosti 0,5mm pod povrchem po 60s ohřevu:

$$t = t^* (t_p - t_0) + t_0 \Rightarrow 0,6332 \cdot (20 - 300) + 300 = 122,7^\circ \text{C}$$

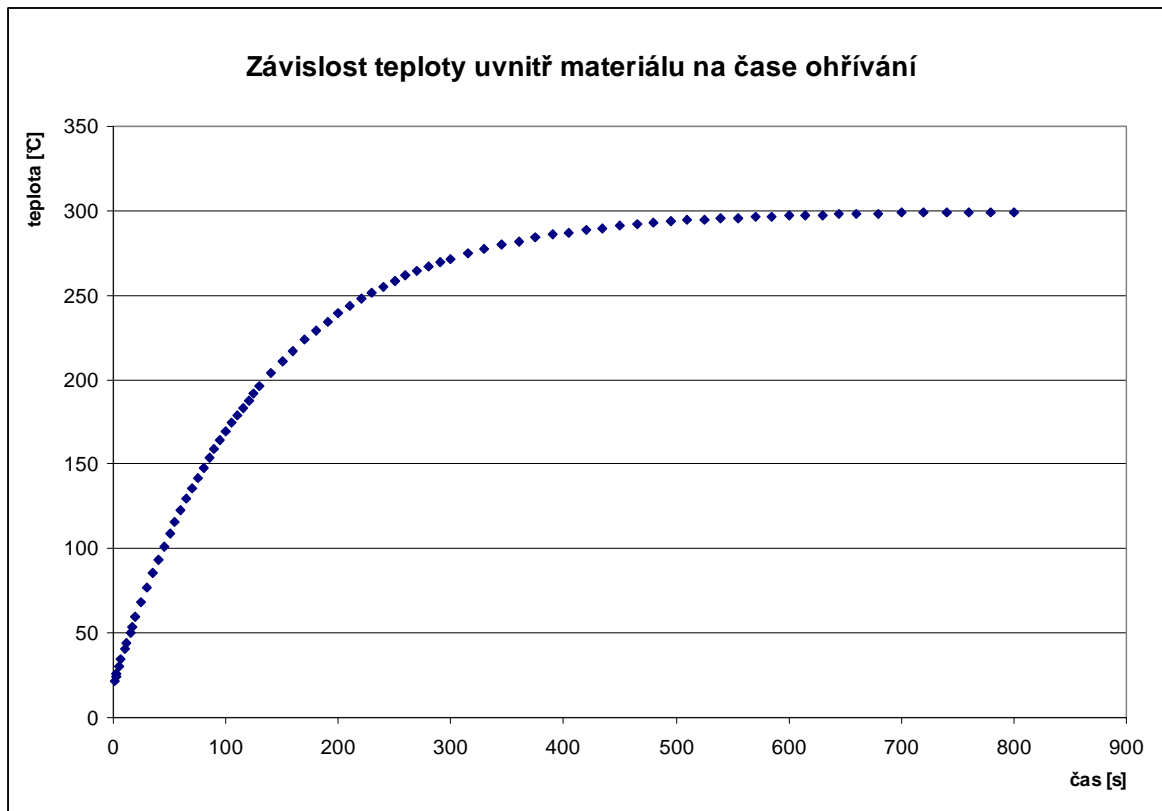
## Vypočtené teploty pro další časy:

čas [s]	teplota [°C]	čas [s]	teplota [°C]	čas [s]	teplota [°C]	čas [s]	teplota [°C]
1	<b>21,90</b>	75	<b>141,87</b>	220	<b>247,69</b>	480	<b>292,80</b>
2	<b>24,01</b>	80	<b>147,79</b>	230	<b>251,53</b>	495	<b>293,58</b>
3	<b>26,11</b>	85	<b>153,49</b>	240	<b>255,09</b>	510	<b>294,28</b>
5	<b>30,26</b>	90	<b>158,97</b>	250	<b>258,39</b>	525	<b>294,90</b>
7	<b>34,34</b>	95	<b>164,25</b>	260	<b>261,45</b>	540	<b>295,45</b>
10	<b>40,35</b>	100	<b>169,33</b>	270	<b>264,28</b>	555	<b>295,94</b>
12	<b>44,29</b>	105	<b>174,22</b>	280	<b>266,90</b>	570	<b>296,38</b>
15	<b>50,07</b>	110	<b>178,93</b>	290	<b>269,34</b>	585	<b>296,77</b>
17	<b>53,86</b>	115	<b>183,46</b>	300	<b>271,59</b>	600	<b>297,12</b>
20	<b>59,43</b>	120	<b>187,82</b>	315	<b>274,66</b>	615	<b>297,43</b>
25	<b>68,43</b>	125	<b>192,02</b>	330	<b>277,40</b>	630	<b>297,71</b>
30	<b>77,10</b>	130	<b>196,06</b>	345	<b>279,84</b>	645	<b>297,96</b>
35	<b>85,44</b>	140	<b>203,70</b>	360	<b>282,02</b>	660	<b>298,18</b>
40	<b>93,47</b>	150	<b>210,77</b>	375	<b>283,97</b>	680	<b>298,44</b>
45	<b>101,20</b>	160	<b>217,33</b>	390	<b>285,70</b>	700	<b>298,66</b>
50	<b>108,64</b>	170	<b>223,40</b>	405	<b>287,25</b>	720	<b>298,66</b>
55	<b>115,80</b>	180	<b>229,02</b>	420	<b>288,63</b>	740	<b>299,01</b>
60	<b>122,70</b>	190	<b>234,24</b>	435	<b>289,86</b>	760	<b>299,15</b>
65	<b>129,33</b>	200	<b>239,07</b>	450	<b>290,95</b>	780	<b>299,27</b>
70	<b>135,72</b>	210	<b>243,54</b>	465	<b>291,93</b>	800	<b>299,37</b>

Tab. č. 5 – Hodnoty teplot 0,5mm pod povrchem v časovém rozsahu 1 – 800s

Provedl jsem výpočty pro další časy, aby bylo možné vidět, jak dlouho trvá prohřátí materiálu, v tomto případě desky epoxidové pryskyřice. Výpočet dalších teplot pro různé časy jsem provedl pomocí programu Microsoft Excel, změna doby působení tepla ovlivňuje jen Fourierovo kritérium, bezrozměrnou teplotu a konečný výpočet skutečné hodnoty, proto je výpočet dalších hodnot poměrně jednoduchý.





Obr. č. 20 – Graf znázorňuje velikost teploty uvnitř materiálu na době, po kterou je prohříván

Jak je patrné z grafu na obrázku č. 20, nejstrmější nárůst teploty probíhá v prvních dvou minutách, poté se tempo ohřívání zvolňuje a kolem 13 minut je teplota téměř ustálená.

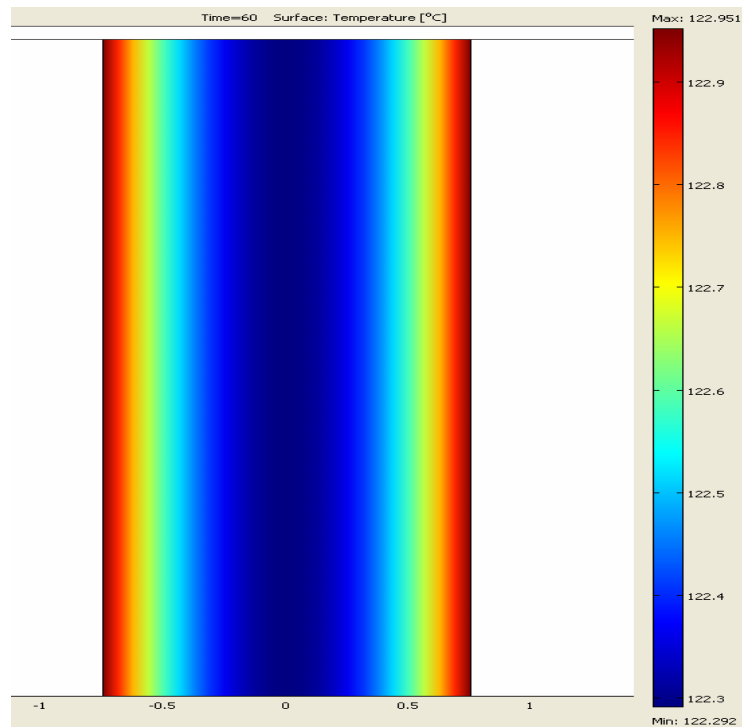
## 9 SIMULACE

Tato kapitola je věnována simulaci rozložení teplot v DPS pomocí programu COMSOL Multiphysics. Abych ověřil správnost mého výpočtu z předešlé kapitoly, simuloval jsem v nejprve rozložení teploty v desce epoxidové pryskyřice, která tvoří základ DPS, není zde tedy vodivá vrstva mědi. V další části je stejným způsobem znázorněno rozložení teploty dvouvrstvé desky, tzn. 1,5mm široké desky epoxidové pryskyřice s měděnou vrstvou.

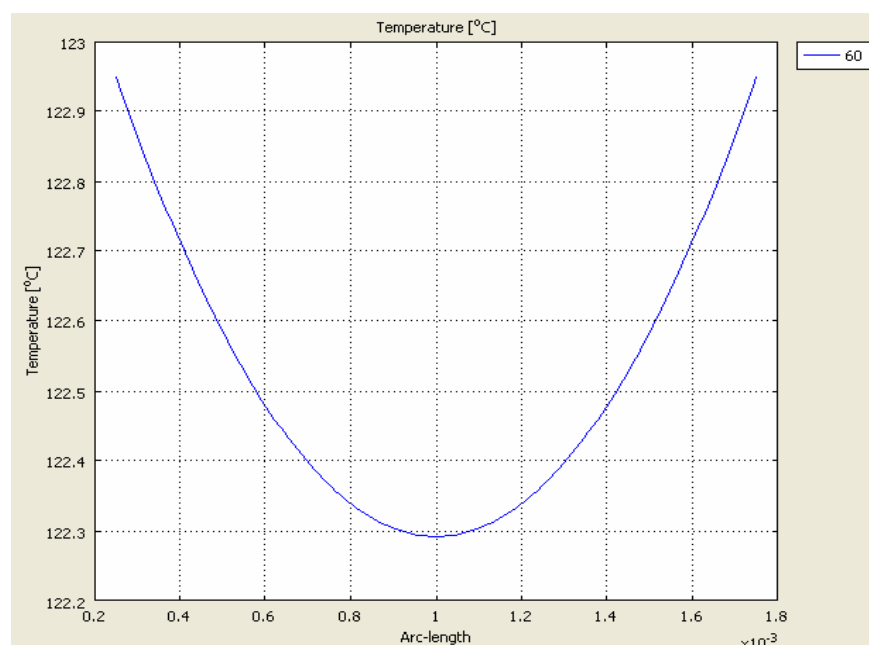
### 9.1 Rozložení teploty v desce epoxidové pryskyřice

Simulace v programu COMSOL Multiphysics ukazuje rozložení teploty v desce epoxidové pryskyřice, viz obrázek č. 21. Na desku působí teplota 300°C po dobu 60s. Protože je deska velmi tenká, rychle se prohřívá a teplota uvnitř desky se pohybuje v rozmezí několika desetinách teploty. Rozdíl stran je příliš velký, proto jsem musel zobrazit jen výřez z bočního pohledu, na znázornění teploty to ale nemá žádný vliv. Zobrazení celé desky ve 2D modelu by bylo příliš úzké a teplota by nebyla tak patrná.

Na obrázku č. 22 je graf znázorňující závislost velikosti teploty na hloubce, ve které mě teplota zajímá. Pro tento čas a hloubku jsem počítal teplotu ve výpočetní části, z grafu je patrné, že teplota uvnitř desky v modelu souhlasí s vypočtenou teplotou, můžu tedy předpokládat, že simulace a výpočet teploty jsou správné, z čehož můžu vycházet v kapitole 9.2 při simulaci DPS, tedy desky epoxidové pryskyřice s tenkou vodivou vrstvou mědi.

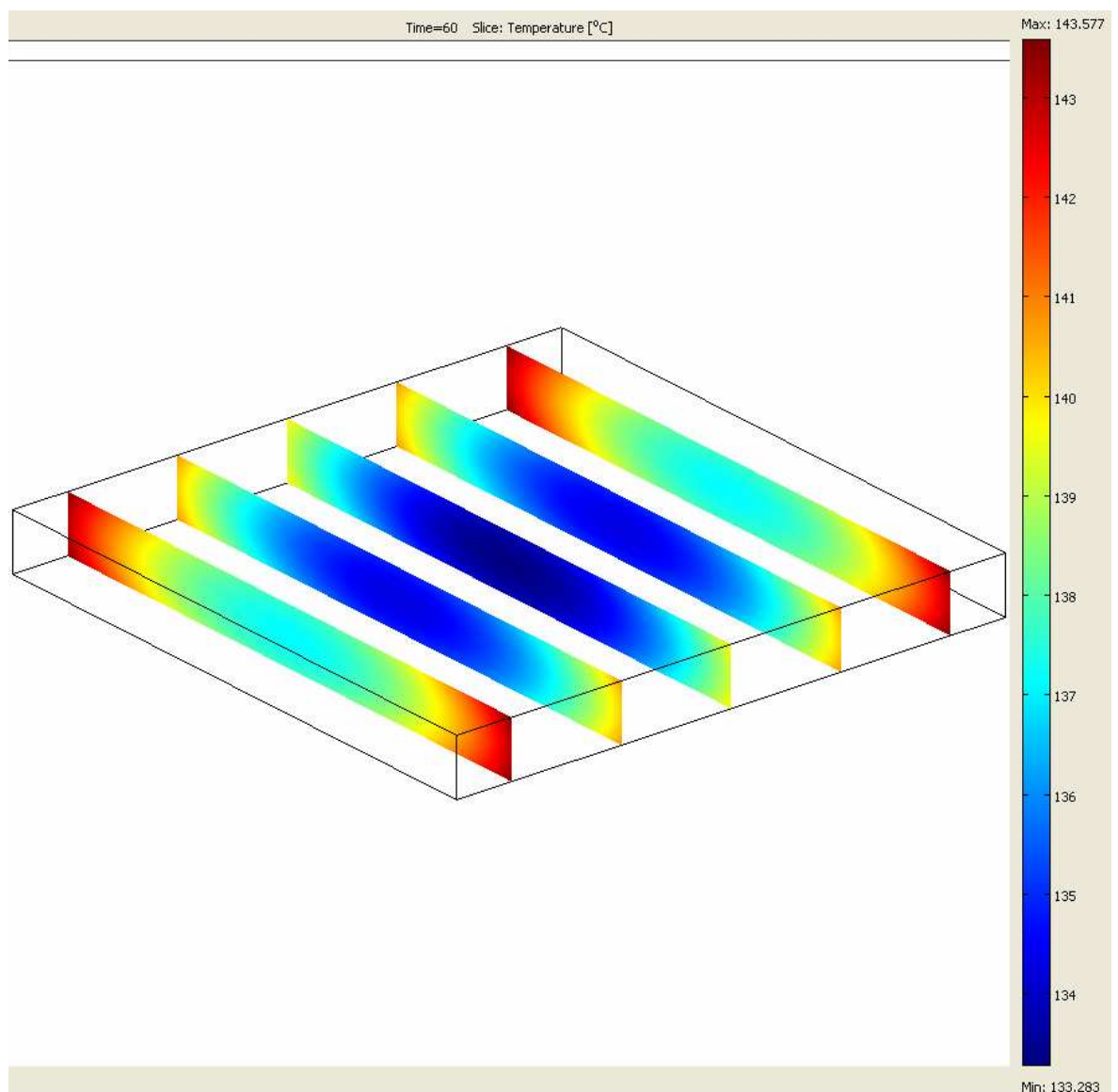


Obr. č. 21 – Simulace teploty DPS v 2D modelu –  
zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C



Obr. č. 22 – Graf znázorňuje závislost velikosti teploty na hloubce v materiálu –  
zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C

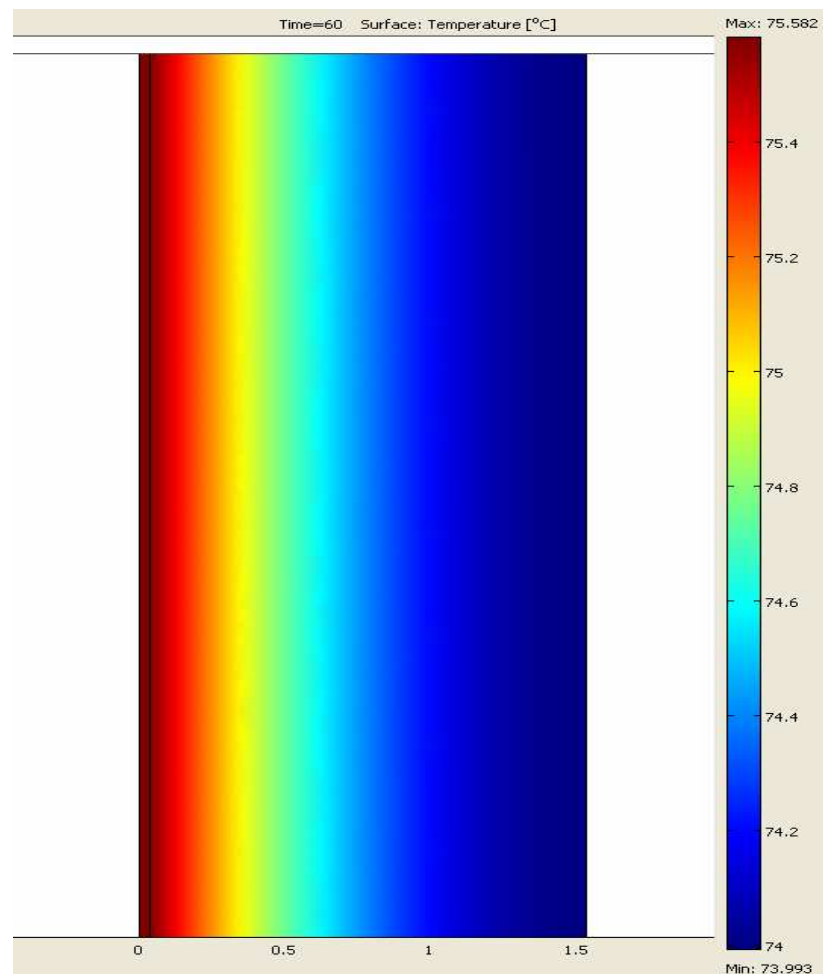
Simulaci jsem provedl i v 3D modelu viz obrázek č. 23. Nastaveny jsou stejné podmínky jako u předchozích simulací, jen poměr stran jsem zmenšil, aby bylo dobře vidět teplotu rozloženou po celé desce. Velikosti stran desky je i v tomto případě řádově větší než její tloušťka, takže i tento upravený 3D model se shoduje s vypočtenými hodnotami.



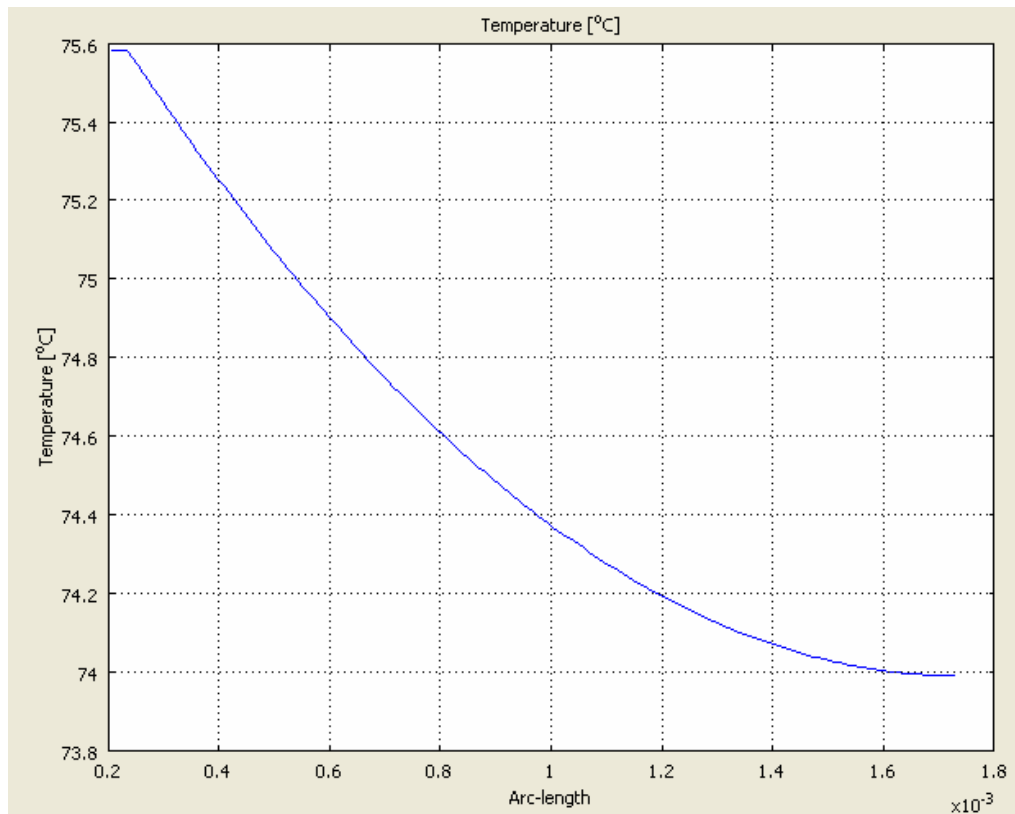
*Obr. č. 23 – Simulace teploty DPS v 3D modelu –  
zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C*

## 9.2 Rozložení teploty v DPS

Tato simulace ukazuje teplotu DPS včetně tenké měděné vrstvy, která tvoří vodivou vrstvu. Simulace má znázorňovat rozložení teploty při ohřívání DPS tak, jak je tomu v experimentální části, tzn. deska je ohřívána jen z jedné strany. Deska je ohřívána teplotou 300°C po dobu 60s. jak je tomu předchozím případě jednovrstvé desky viz obrázek č. 24.



Obr. č. 24 – Simulace teploty DPS s vodivou vrstvou mědi - zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C



Obr. č. 25 – Závislost teploty na vzdálenosti od ohříváné stěny materiálu

Z grafu na obrázku č. 25 je vidět velikost teploty v závislosti na vzdálenosti od stěny ohřevu. Zatímco v tenké vodivé vrstvě mědi je teplota už ustálená na maximální hodnotě, v desce epoxidové pryskyřice ještě probíhá přestup tepla.

## 10 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části budu prakticky ověřovat vliv cyklického tepelného namáhání DPS na pevnost spojení vrstvy epoxidové pryskyřice a měděné vodivé cesty. Deska bude ohřívána na požadovanou teplotu a ihned potom chlazena, tento postup budu provádět několikrát za sebou a sledovat změny vodivých cest plošného spoje. Poté bude použita stejná deska, kde budou vodivé cesty narušeny tak, aby netvořily souvislé pásy. Zahřívání budu provádět pro různé velikosti teplot, více druhů DPS a v závěru hodnotit nejlepší postup.

### 10.1 Popis experimentu

#### Příprava

Pro experiment jsem použil následující pomůcky:

Přístroj pro měření teploty	Digital Multimetr MY-64
Horkovzdušná pistole	Steinel HL2010E elektronik
Chladicí kapalina	Solanka
DPS	Zásuvný modul zbavený součástek

*Tab. č. 5 – Pomůcky použité při experimentu*

Měření teploty jsem provedl digitálním multimetrem s tepelným čidlem, měřicí přístroj je schopný měřit teplotu do 400°C, což je pro experiment dostačující. Před samotným měřením je nutné ověřit správnou funkci teploměru. Pro ověření jsem ponořil teplotní čidlo do ledové tříště, kde displej ukazoval 0,1°C a poté do vroucí vody, naměřená teplota 100°C poukazuje na správnou kalibraci měřicího přístroje.

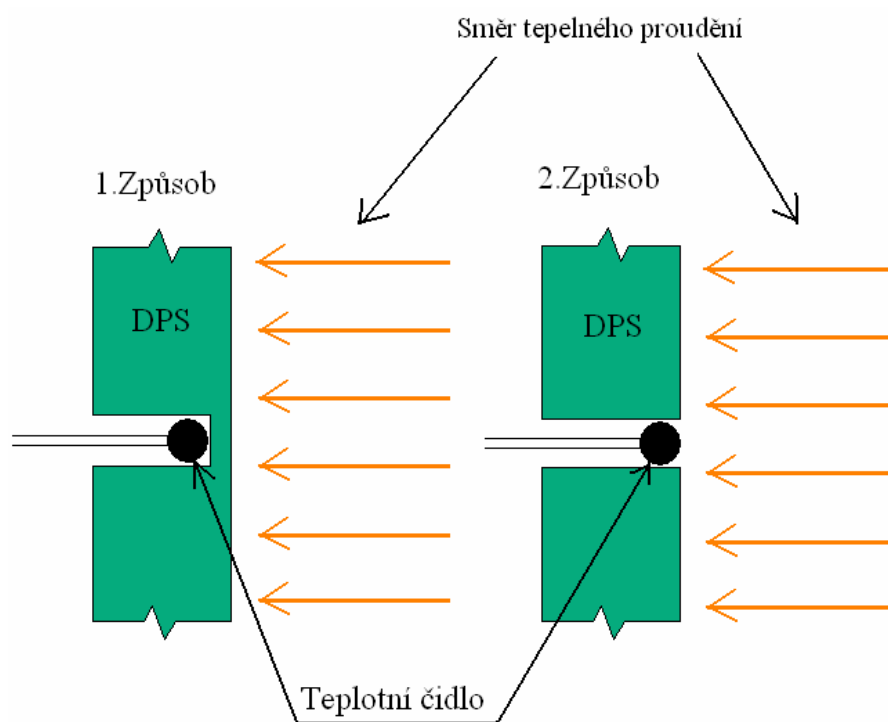
Pro zahřívání desky plošného spoje jsem použil horkovzdušnou pistoli, která je schopna zahřát vzduch do 630°C, na pistoli je možné nastavit jak teplotu, tak rychlost proudění ohříváného vzduchu. Teplotu lze měnit skokově po 10°C a na displeji sledovat její velikost. Přepínat lze mezi třemi rychlostmi proudění, neznáme však rychlost proudění. Před použitím bylo nutné vždy změřit teplotu vzduchu u ústí pistole. Teplota 340°C, kterou

jsem zahřival DPS, se objevila až po nastavení pistole na teplotu 610°C, tento rozdíl je způsoben pravděpodobně velkou ztrátou tepla mezi topnou spirálou a ústím horkovzdušné pistole.

Jako chladicí kapalinu jsem použil předem připravenou solanku, rozpuštěnou sůl ve vodní lázni, která chladí až na teplotu -18°C.

Pro pokus jsem použil více druhů DPS, prvním z nich byla oboustranná DPS, z níž jsem předem mechanicky odstranil připájené součástky, deska nemá klasickou nepájivou masku, je to starší typ zásuvného modulu, její povrch je ošetřen vrstvou laku, který desku chrání před teplotními vlivy a mechanickým poškozením (viz obrázek č. 27), proto je nutné jej také odstranit, nejlépe ocelovým kartáčem. Druhým typem je novější oboustranná DPS která má klasickou nepájivou masku zelené barvy.

Měření teploty DPS jsem provedl dvěma způsoby. Abych teplotu povrchu změřil co nejlépe, v prvním případě jsem navrtal otvor z neohřívané strany, pro teplotní čidlo teploměru tak, aby se čidlo nacházelo co nejbližší ohřívanému povrchu. V druhém případě jsem skrz desku provrtal díru, aby čidlo bylo přímo vystaveno tepelnému proudění. (viz. obrázek č. 26)



Obr. č. 26 – Dva způsoby měření teploty při zahřívání DPS horkovzdušnou pistolí

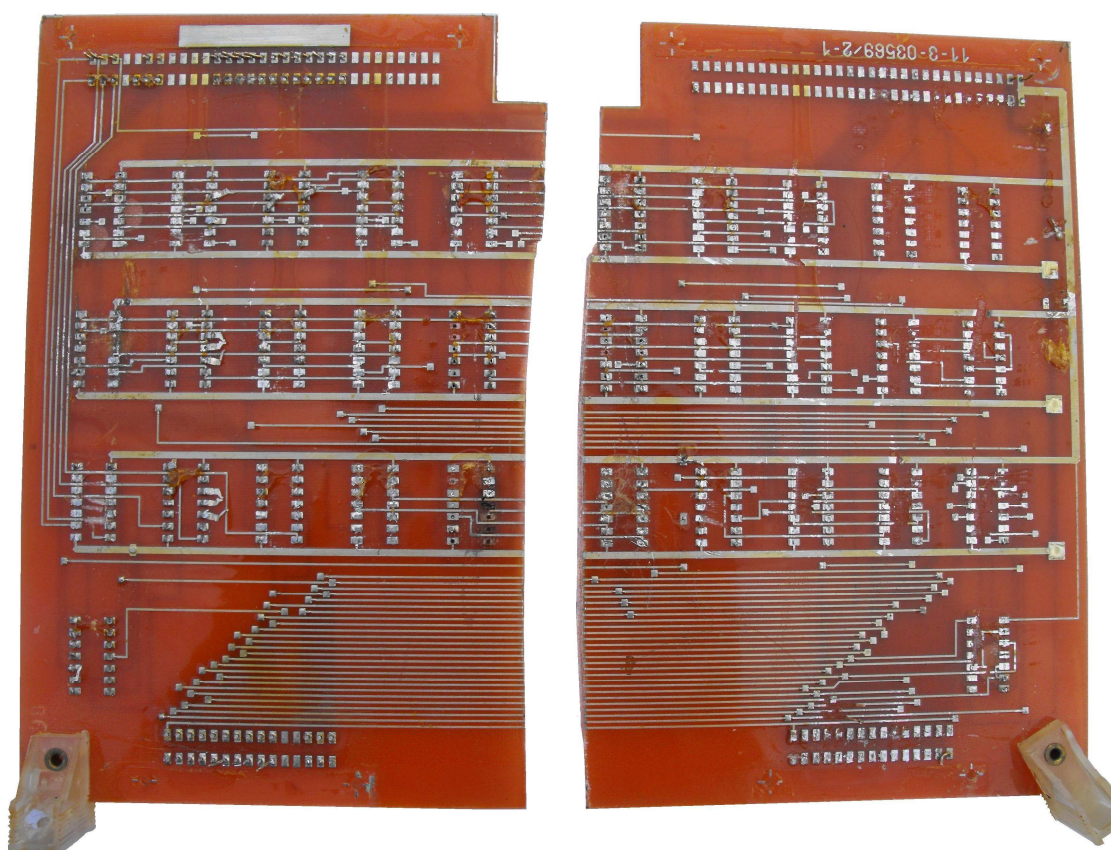


## Průběh experimentu

Experiment jsem provedl s Ing. Jiřím Křemkem v laboratoři C206, laboratoř je vhodná pro tento experiment, protože je zde k dispozici digestoř s odtahem vzduchu.

Jako chladicí lázeň jsem použil solanku, která vznikne smícháním ledové tříště a soli, v poměru 100:33 (na 100g vody 33g soli). Při mém pokusu dosahovala teplota vody -13°C.

DPS jsme volili dostatečně velkou, aby rozměry, i po rozpůlení desky, byly řádově větší než její tloušťka, s čímž se počítá ve výpočetní části. Viz. Obrázek č. 27.



Obr. č. 27 – DPS připravená pro experiment (zbavená součástek)

Jednu polovinu desky budu cyklicky zahřívát horkovzdušnou pistolí na teplotu okolo 340°C a chladit solankou na -13°C, přitom by mělo vznikat pnutí mezi oběma vrstvami, což povede k jejich oddělení. Na druhé polovině desky naruším vodivé cesty tak, aby netvořily souvislou vrstvu, a podrobím opět cyklickému tepelnému namáhání. Podobný experiment provedu i s ostatními typy DPS.

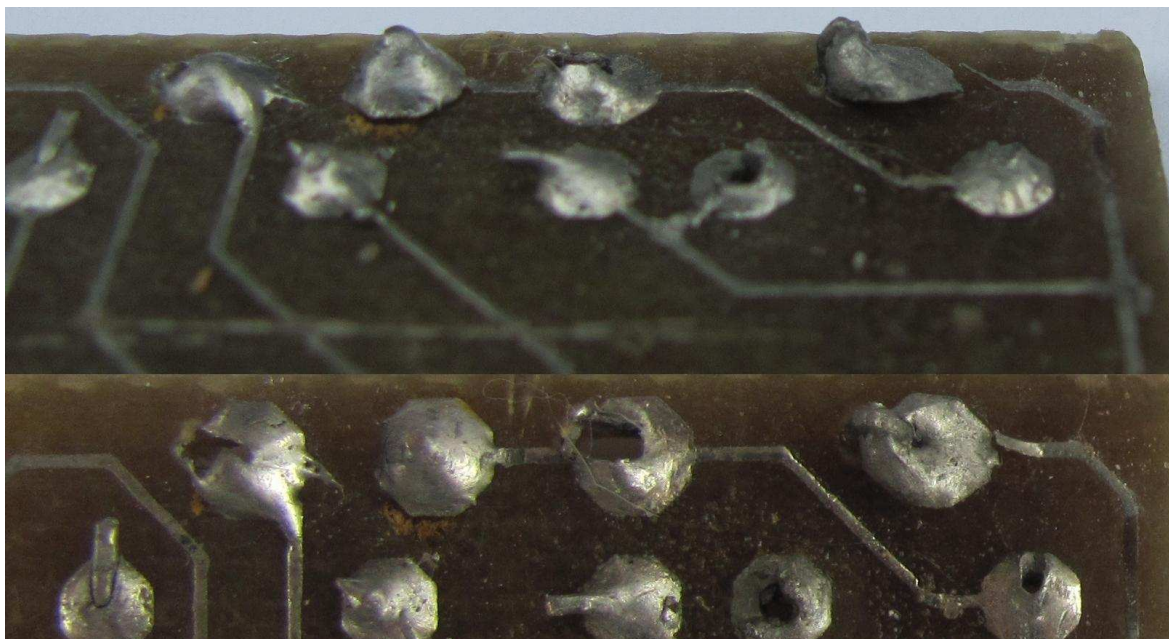
## 10.2 Výsledek experimentu a závěr

### Měření teploty povrchu DPS

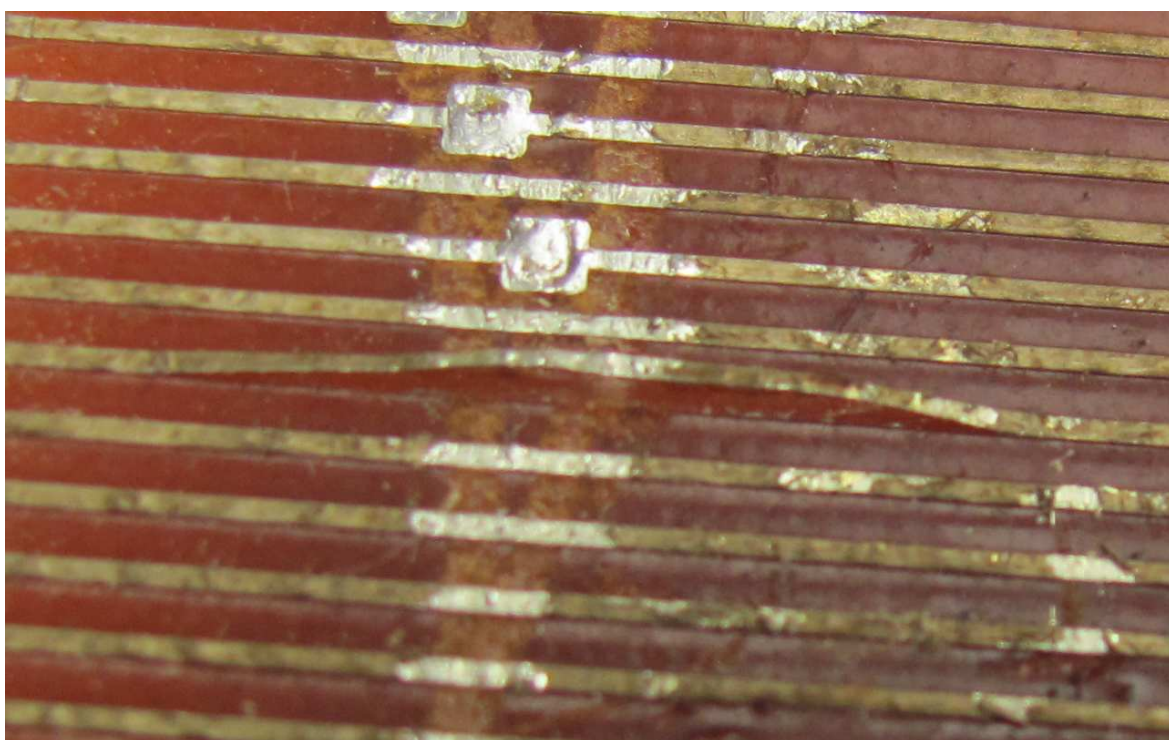
Měření teploty povrchu při ohřevu desky jsem se pokoušel měřit pomocí čidla připojeného k digitálnímu multimetru. Měření je ovšem velmi nepřesné a naměřené teploty je potřeba brát jen jako orientační. V prvním případě, kdy bylo čidlo prostrčeno skrz desku, viz obrázek č. 26, se naměřené teploty více blížily skutečným hodnotám, protože čidlo přímo ohříval vzduch z horkovzdušné pistole, zatímco měření těsně pod povrchem bylo příliš mnoho ovlivněno odváděním tepla okolním materiálem, to se projevilo větším zpožděním nárůstu teploty.

### Cyklické teplotní šoky DPS

V prvním případě jsem cyklicky zahříval a chladil DPS staršího typu bez nepájivé masky, desku jsem zahřál asi na teplotu 340°C a poté ponořil do solanky o teplotě -13°C, tento postup jsem opakoval 10krát. Jak je vidět na obrázku č. 28, k odloupení vodivé vrstvy došlo v oblasti s větším množstvím cínu, kterým byl připájen vývod součástky a v jeho těsné blízkosti.



*Obr. č. 28 – DPS po teplotních šocích – po pravé straně odloupnutí vodivé cesty*

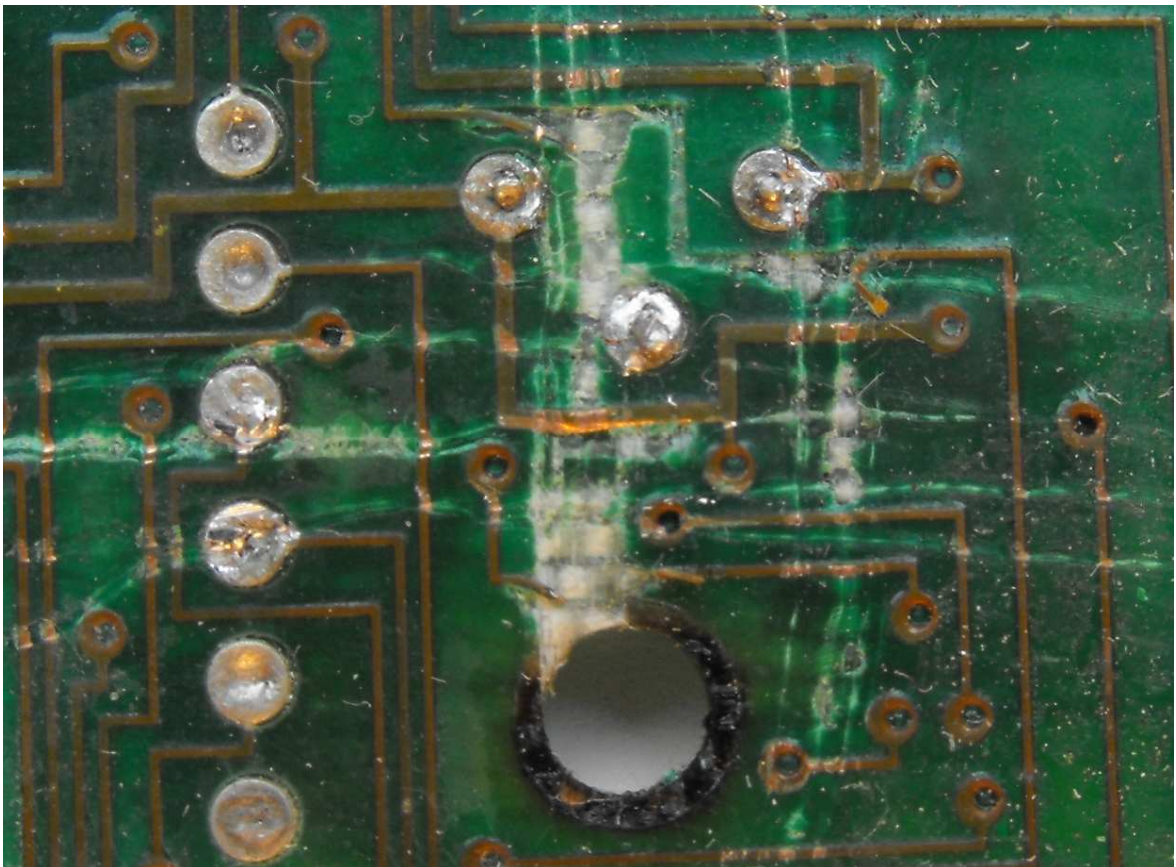


*Obr. č. 29 – DPS po teplotních šocích – separace se projevuje v místech odstraněného laku*



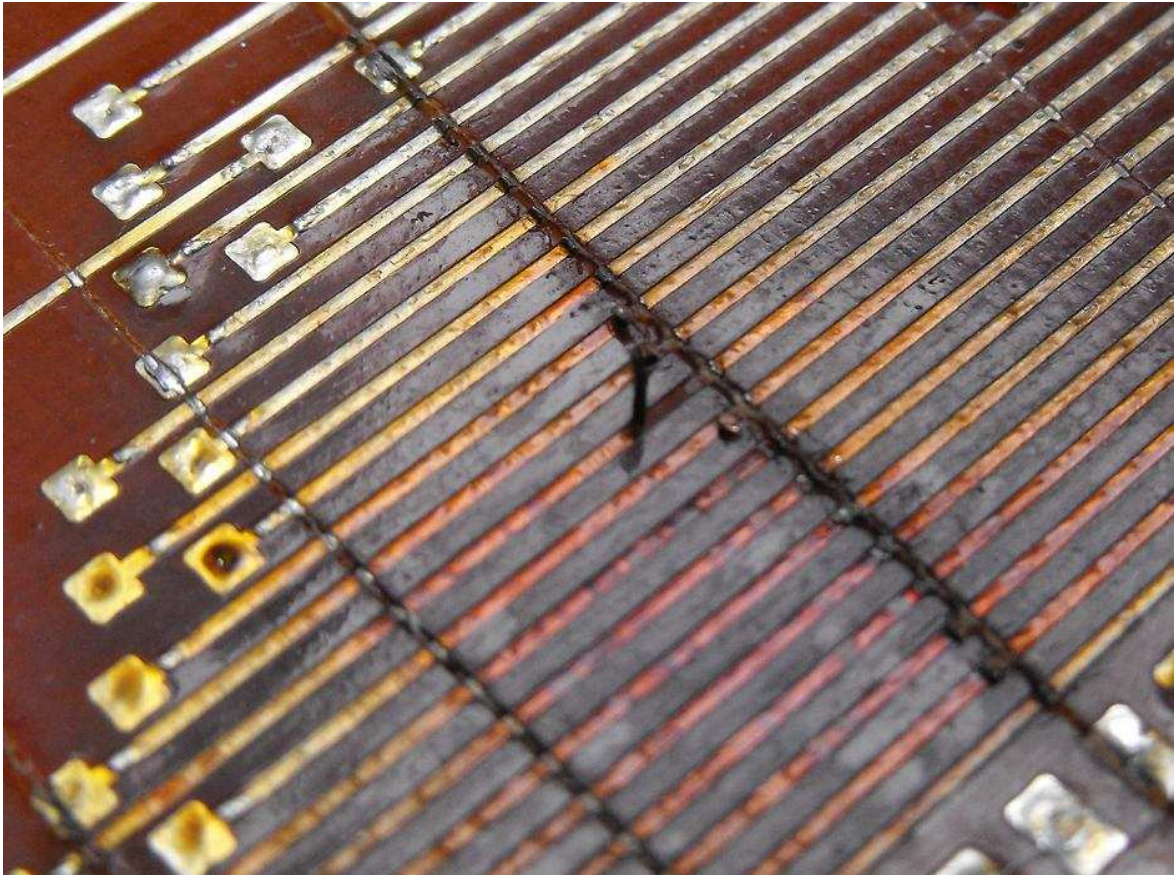
Druhým typem byla také starší DPS, na které je na rozdíl od prvního typu povrch ošetřen vrstvou laku, stejně jako u předchozí, byla i tato deska vystavena cyklickým tepelným šokům. Výsledkem je odloučení vodivé vrstvy od desky v místě, kde byla odstraněna vrstva ochranného laku, jak je vidět na obrázku č. 29, v tomto místě lze vrstvu mědi pomocí pinzety odloupnout, na místech, kde jsem vrstvu laku neodstranil, došlo pouze k deformaci celé DPS ale ne k odloupení vodivých cest.

Posledním testovaným typem DPS byla deska novějšího typu s nepájivou ochrannou maskou zelené barvy. Postup tepelného namáhání byl stejný jako u předchozích typů. U tohoto typu desky se tepelné namáhání projevilo jen deformací desky a to jak při pokusu s nepájivou maskou tak i při jejím částečném odstranění Viz obrázek č. 30.



*Obr. č. 30 – DPS po teplotních šocích – nepájivá maska brání v separaci vodivých cest*

V další části experimentů jsem vodivé cesty na desce plošného spoje nařezal pomocí ostrého předmětu tak, aby došlo k jejich přerušení, poté bylo místo s přerušenými spoji vystaveno cyklickému tepelnému namáhání, jak tomu bylo u předešlých pokusů. Výsledkem bylo odloupení vodivé cesty na přerušených místech, pomocí pinzety šly tyto vodivé cesty snadno odstranit. Uvolněný kousek vodivé cesty je vidět na obrázku č. 31.

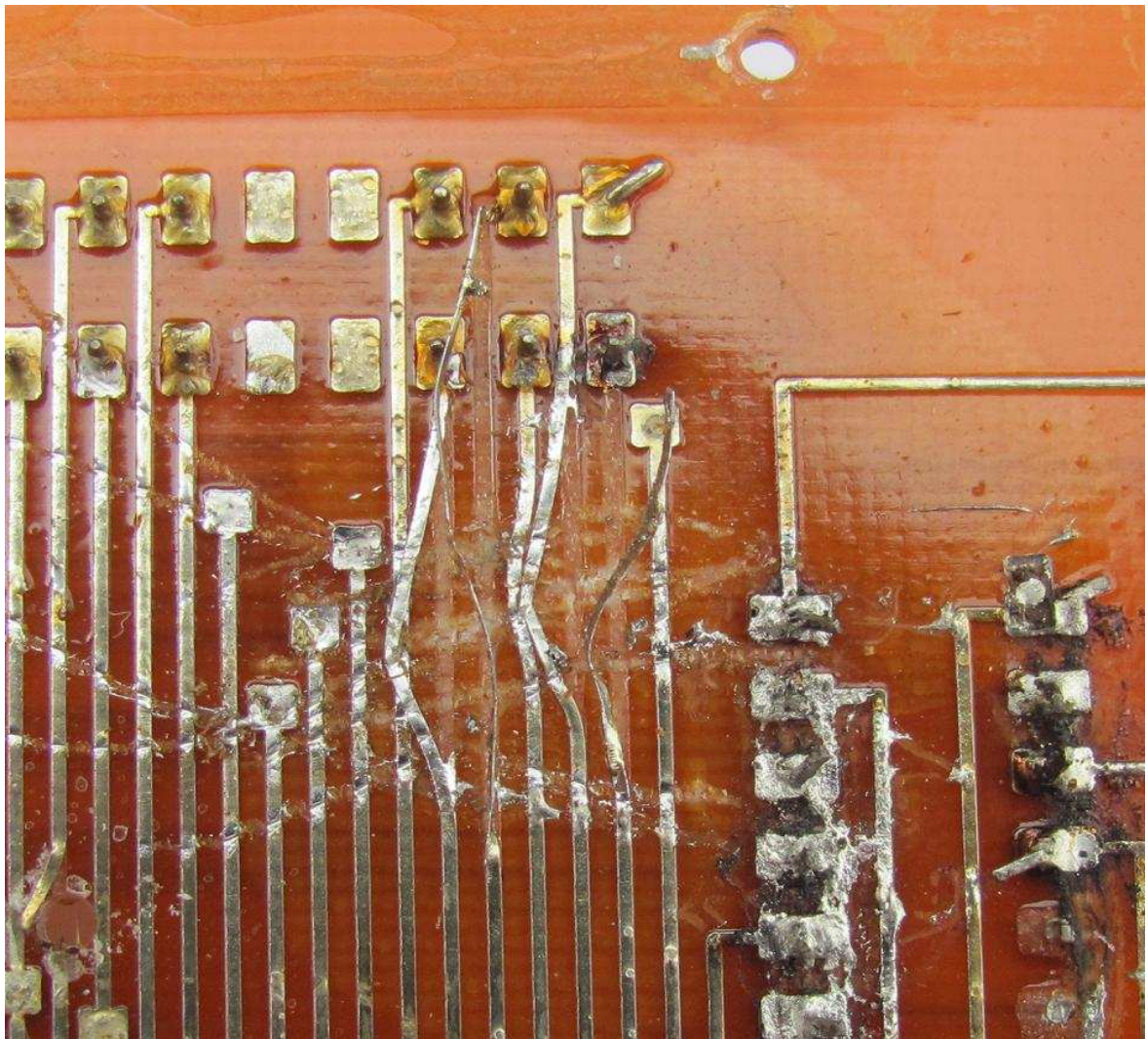


*Obr. č. 31 – DPS po teplotních šocích – v narušených místech se vodivé cesty začínají odlupovat*

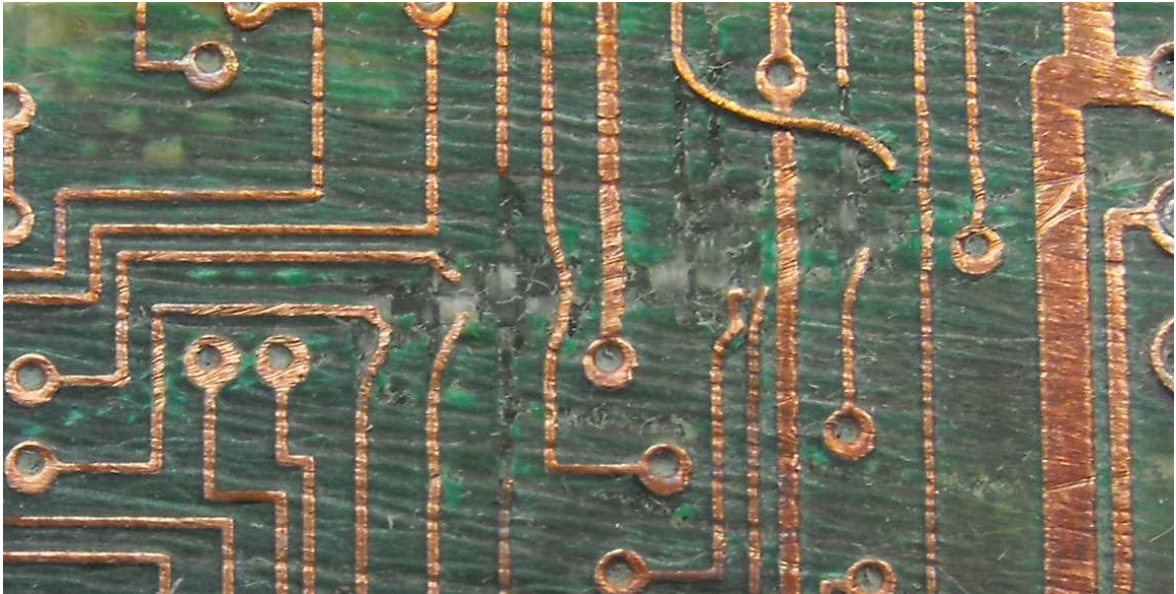


### Separace vodivých cest při prohřáté DPS

Při dalším pokusu o separaci vodivých cest jsem použil pouze horkovzdušnou pistoli, zahříval jsem DPS delší dobu a nižší teplotou aby nedošlo ke spálení desky. Při teplotě kolem 280°C začínala deska měknout a stávala se ohebnou, než začala deska opět tuhnout, přešel jsem přes vodivé cesty ostrým kovovým předmětem, výsledkem bylo odloupení vodivých cest s minimální námahou, tento způsob fungoval u všech typů DPS. Viz obrázky č. 32 a 33.



Obr. č. 32 – Separace vodivých cest ohřevem a mechanickým narušením-starší typ DPS



*Obr. č. 33 – Separace vodivých cest ohřevem a mechanickým narušením-novější typ DPS*

### **Porovnání experimentu se simulací a výpočtem**

Ve výpočtové části jsem počítal teplotu desky epoxidové pryskyřice, která je v hloubce 0,5mm pod povrchem, jestliže na ni budu působit teplotou 300°C po dobu 60s. Výsledná teplota 122,7°C se téměř shoduje s teplotou, kterou jsem získal pomocí simulace v programu COMSOL Multiphysics za definování stejných podmínek, zde teplota vychází 122,6°C. Na základě toho jsem předpokládal, že výpočet i simulace jsou správné a simuloval jsem teplotní podmínky pro DPS, tedy desku epoxidové pryskyřice s vodivou vrstvou mědi. Tyto výsledky jsem použil v experimentální části, kde jsem podle času potřebného pro prohřátí desky mohl odhadnout dobu, po kterou budu zahřívat DPS, abych dosáhl změknutí DPS a následně separaci vodivých cest v zahřátém stavu, což se jeví jako jedno z nejlepších řešení.

## ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na zpracování elektroodpadu a na to, co se zpracováním elektroodpadu souvisí. Aby mohlo být zpracováno co největší množství elektroodpadu, je důležité, aby bylo co největší procento lidí obeznámeno se svými právy a povinnostmi, které s recyklací elektroodpadu souvisí, z tohoto důvodu jsem na úvod práce zařadil kapitolu, která tuto problematiku popisuje. V další části se věnuji popisu elektroodpadu, jak je možné jej rozdělit, co může obsahovat a jaké s sebou tento odpad přináší rizika. Tato kapitola má upozornit především na to, že recyklace a likvidace je nezbytná a jaká nebezpečí se můžou skrývat za podceněním tohoto problému.

Třetí kapitola je věnována samotné recyklaci, rozdělení recyklačních technologií a způsobu zpracování elektroodpadu a složek, které obsahuje. Další kapitolu jsem zaměřil na popis desek plošných spojů, jejich rozdělení, složení, konstrukce a vlastnosti při tepelných změnách. Část kapitoly je věnována teplotní roztažnosti a napjatosti materiálů. Předposlední kapitolou teoretické části je sdílení tepla, kde je popsáno teplotní pole, rozdělení sdílení tepla, Fourierův zákon týkající se vedení tepla, napětí teplotního pole a v poslední části je popis nestacionárního teplotního pole v rovinné desce. Navazuje popis programu COMSOL Multiphysics, který jsem využil pro simulaci teplotního pole. Tyto poslední tři kapitoly jsou přímo zaměřeny na problematiku, kterou se zabývám v praktické části.

Hlavním úkolem a cílem praktické části bylo aplikací teplotních šoků separovat vodivou měděnou vrstvu na desce plošného spoje. Praktickou část jsem rozdělil do tří kapitol. V první kapitole jsem provedl výpočet pro určení teploty v požadovaném místě a čase na desce plošného spoje, ve druhé kapitole jsem tento výpočet ověřil pomocí simulace v programu COMSOL Multiphysics. Výpočet i simulaci jsem provedl jen pro desku epoxidové pryskyřice, která je základem desky plošného spoje, tedy desky bez vodivé měděné vrstvy. Teplotu ohřevu jsem zvolil 300°C po dobu 60s ve vzdálenosti 0,5mm pod povrchem. Vypočtená a nasimulovaná teplota se od sebe lišily jen v desetínách stupně, kde vypočtená hodnota vyšla 122,7°C a z nasimulovaného modelu jsem odečetl hodnotu 122,6°C. Dál jsem tedy vycházel z toho, že obě hodnoty jsou správné a provedl jsem simulaci dvouvrstvé desky plošného spoje, tedy desky epoxidové pryskyřice s vodivou vrstvou mědi.



Následuje experimentální část, zde jsem pomocí horkovzdušné pistole nahřál desku plošného spoje na teplotu 340°C a poté zchladil na teplotu -13°C. Rozdílná teplotní roztažnost materiálů způsobila pnutí mezi vrstvami a následně jejich separaci. Tento postup jsem cyklicky opakoval a vyzkoušel na různých typech desek plošných spojů. Nejmenší úspěch měla tato metoda při desce s nepájivou maskou, která separaci velmi omezila nebo znemožnila. Mnohem lepších výsledků jsem dosáhl při ohřátí desky na teplotu 280 až 300°C, kdy deska začínala měknout a vodivou vrstvu jsem mohl při této teplotě velmi lehce odstranit kovovým předmětem. Při tomto prohřívání jsem vycházel z vypočítaných teplot. Tato metoda je výhodná v tom, že při ní není potřeba tak vysoké teploty a odpadá cyklické zahřívání a ochlazování desek plošných spojů. Je tedy energeticky a časově úspornější, přičemž jsem v tomto případě dosáhl mnohem lepších výsledků u všech typů desek.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This work is focused on the processing of electrical and what is related to the processing of electronic waste. To be treated as the greatest amount of electrical waste, it is important that the greatest percentage of people familiar with their rights and duties associated with recycling electronic waste from the home because I work included a chapter that describes this issue. The next part I describe the electronic waste, how it can be divided and what are risks. This chapter is particularly noted that the recycling and disposal is necessary and what danger may be behind the pricing of this issue.

The third chapter is dedicated to recycling, distribution of recycling technologies and processing and electrical components it contains. Another chapter was focused on the description of printed circuit boards, their distribution, composition, structure and properties during thermal changes. Part of the chapter is devoted to thermal expansion and confinement materials. The penultimate chapter of this part is the heat, which describes the temperature field distribution of heat, Fourier's law for heat conduction, thermal stress field in the last part is a description of the unsteady temperature field in a flat plate. It follows a description of the program COMSOL Multiphysics, which I used for simulating the temperature field. These chapters are the last to be directly focused on the issue, which deals with the practical part.

The main task and aim of the practical applications of the thermal shock to separate the conductive copper layer on the PCB. The practical part is divided into three chapters. The first chapter was calculated to determine the temperature at the desired place and time on the PCB, the second chapter, I verified this calculation by using simulation program COMSOL Multiphysics. Calculation and simulation, I made a plate of epoxy resin, which is the basis of printed circuit board, this is plate without a conductive layer. I chose the heating temperature  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 60 seconds at a distance of 0.5 mm below the surface. Calculated and simulated temperature differed only in tenths, where the calculated value was  $122.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  and in simulation I determined the temperature  $122.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . So I came away from the fact that both values are correct and I made two layer simulation of printed circuit board, a board with conductive epoxy resin coated.

The following experimental section, here I'm using a heat gun recorded the PCB to a temperature of  $340\text{ }^{\circ}\text{C}$  and then cooled to a temperature of  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Differential thermal

expansion of materials caused tension between the layers and their subsequent separation. This process I repeated cyclically and tested on various types of printed circuit boards. The smallest had success with this method the board with solder mask, which greatly restricted or separation impossible. Much better results I have achieved during the heating plate temperature 280-300 ° C, when the board began to melt and a conductive layer I at this temperature could easily remove the metal object. When I was warming up that was based on the calculated temperatures. This method is advantageous in that when it does not need such high temperatures and no cyclic heating and cooling of the PCB. It is therefore time- and energy-efficient, which in this case, I achieved much better results in all types.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kovohutě Příbram nástupnická, a. s. [online]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.kovopb.cz/cz/menu/29/divize-elektroodpad/legislativa/> >
- [2] Vejvodová, E., Odpady jako nedílná součást výrobní produkce v elektrotechnickém průmyslu. FEL ZČU Plzeň. Dostupný z WWW:  
<<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/84.pdf>>
- [3] VaV, Příručka pro zpracovatele OEEZ [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.cir.cz/prirucky-k-oeez/482658/1833662>>
- [4] Janáčková, D., Šuba, O., Kolomazník, K., Charvátová, H., Vašek, V., Modeling of Metal and Plastic Separation from the Printed Circuit Boards, UTB ve Zlíně FAI
- [5] Křenek, J., Separace elektronického odpadu vlivem teploty, UTB ve Zlíně, FAI, Diplomová práce, 2007, 70str.
- [6] Kohout, V., Zpracování elektroodpadu, dostupné z WWW:  
< [http://vaclavkohout.euweb.cz/prezentace/Zpracování elektroodpadu.ppt](http://vaclavkohout.euweb.cz/prezentace/Zpracování_elektroodpadu.ppt) >
- [7] Křištofová, D., Kovy a životní prostředí, Ediční středisko VŠB TU Ostrava, 2005,64str.
- [8] Kolomazník, K., Sedlář, J., Macháčková, A., Teorie technologických procesů III, Ediční středisko VUT Brno, 1978, 139str.
- [9] Principy flotace [online]. Vysoká škola chemicko-technologická Praha. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/uchi/michani/flotace/>>
- [10] Plošný spoj [online]. Wikipedie. Dostupné z WWW:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD\\_spoj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD_spoj)>
- [11] Máčalík, T., Možnosti recyklace tištěných spojů, UTB FAI, Bakalářská práce, 2007, 42 str.
- [12] Malučký, M., Konstrukce dělicího stroje DPS, UTB FT, Bakalářská práce, 2010, 41 str.

- [13] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., Fyzika, Mechanika-Termodynamika, VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 1997, 283str.
- [14] Horák, Z., Krupka, F., Fyzika, Příručka pro vysoké školy technického směru, Svazek 1, Nakladatelství SNTL, Praha 1976, Typové číslo L11-C3-IV-41/17693, 422str.
- [15] Binko, J., Kašpar, I., Fyzika stavebního inženýra, Nakladatelství SNTL, Praha 1983, Typové číslo L11-C3-V-31/17780, První vydání, 662str.
- [16] Gascha, H., Pflanz, S., Kompendium fyziky, Nakladatelství Euromedia Group, k.s.-Universum, Banská Bystrica 2008, ISBN 978-80-242-2013-0, 488str.
- [17] Žitný, R., Dostál, M., Střesák, P., COSMOS v procesním inženýrství a strojnictví, II. část -Výukové příklady ČVUT, 1994, 20str., dostupný z WWW:  
<<http://www.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/skripta/predmet/naz/cosprikl.pdf>>
- [18] Žitný, R., COSMOS v procesním inženýrství a strojnictví, I. část- metody dimenzování aparátů, ČVUT, 1994, 101str., dostupný z WWW:<<http://www.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/skripta/predmet/naz/naz.pdf>>
- [19] Janáčková, D., Dolinay, V., Charvátová, H., Výukový program pro výpočet teplotních polí v tuhých látkách, UTB ve Zlíně, FAI, 4 str., dostupný z WWW:  
<<http://everest.natur.cuni.cz/konference/2006/prispevek/janacova.pdf>>
- [20] Printed s.r.o., Technologické podmínky výroby DPS, [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.printed.cz>>
- [21] Edutorium, Teplotní délková roztažnost [online]. Dostupné z:  
<<http://www.techmania.cz/edutorium/index.php>>
- [22] Humusoft, COMSOL Multiphysics [online]. Dostupné z :  
<<http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>>
- [23] Přenos tepla, [online]. Dostupné z :

<<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/teorie/T10-01.pdf>>

[24] Charvátová, H., Janáčková, D., Kolomazník, K., Dvořák, Z., Tabulky pro předmět procesní inženýrství, Vydavatel UTB ve Zlíně, Zlín 2009, ISBN 80-7318-511-3, 123str.

[25] Šeřík, J.:Plasty v elektrotechnice a elektronice, 1.vydání.:SNTL Praha, 1991.p.516.  
ISBN 80-03-00657-0

[26]Štuba, O., Janáčková, D., Žaludek, M.: Modelování transientní teplotní napjatosti vrstevnatých desek. VII.ITC 2009, TOOLS, 3.-4.2.2009, Zlín, ISBN 978-80-7318-794-1

[27] Božek, F., Urban, R., Zemánek, Z., Recyklace. Vyškov 2003. 202s.  
ISBN 80-238-9919-8

[28] Nesvadba, J., Využití elektronického šrotu. 1.vydání Praha:ČVUT, 1999,248s.

[29] Bussines center.cz, Zákony o odpadech, dostupný z WWW:

<<http://business.center.cz/business/pravo/zakony/odpady/priloha7.aspx>>

[30] eAgra.cz, Legiskativa. Dostupné z WWW:

<<http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/100196462.html> >

[31] eAgra.cz. Legislativa, dostupné z WWW:

< [http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/Legislativa-ostatni\\_uplna-zneni\\_zakon-2001-185.html](http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/Legislativa-ostatni_uplna-zneni_zakon-2001-185.html) >

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_{EP}$	Součinitel teplotní vodivosti epoxidové pryskyřice [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$a_{vz}$	Součinitel teplotní vodivosti vzduchu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$b$	Poloviční tloušťka [m]
$Bi$	Biotovo kritérium
$c_{pEP}$	Měrná tepelná kapacita epoxidové pryskyřice [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_{pvz}$	Měrná tepelná kapacita vzduchu [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$d$	Šířka materiálu [m]
$DPS$	Desky plošných spojů
$E$	Konstanta úměrnosti
$EEZ$	Elektrické a elektronické zařízení
<i>elektrozařízení</i>	elektrické nebo elektronické zařízení
$F$	Síla [N]
$Fo$	Fourierovo kritérium
$g$	Gravitační konstanta [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$Gr$	Grashofovo kritérium
$grad$	Gradient teplotního pole
$h$	Vzdálenost pod povrchem [mm]
$K$	Stupeň Kelvina
$l$	Délka [m]
$Nu$	Nusseltovo kritérium
$OEEZ$	Odpadní elektrické a elektronické zařízení
$PEN$	Polyetylnaftalát
$PET$	Polyetyléntetreftalát
$PI$	Polyimid

$PLS$	Plošné spoje
$Pr$	Prandtlovo kritérium
$PTEE$	Polytetrafluoretylen
$q$	Hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$q_n$	Kořeny transcendentní rovnice
$S$	Plocha průřezu [ $m^2$ ]
$t$	Teplota [ $C^\circ$ ]
$t(x, \tau)$	Teplota v daném místě a čase [ $C^\circ$ ]
$t^*$	Bezrozměrná teplota [1]
$t_0$	Teplota okolí [ $C^\circ$ ]
$t_p$	Počáteční teplota [ $C^\circ$ ]
$t_s$	Střední teplota [ $C^\circ$ ]
$V$	Objem [ $m^3$ ]
$\nu_{vz}$	Kinematický viskozita [ $m^2 \cdot K^{-1}$ ]
$x$	Osa x, vzdálenost od středu [m]
$X$	Bezrozměrná vzdálenost [1]
$y$	Osa y
$z$	Osa z
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\beta$	Teplotní součinitel objemové roztažnosti [ $m^3$ ]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení [m]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\lambda_{EP}$	Součinitel tepelné vodivosti epoxidové pryskyřice [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\lambda_{vz}$	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\rho$	Hustota [ $kg \cdot m^3$ ]



---

$\rho_{EP}$	Hustota epoxidové pryskyřice [kg.m <sup>3</sup> ]
$\rho_{vz}$	Hustota vzduchu [kg.m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Mechanické napětí [N.m <sup>-2</sup> ]
$\sigma_n$	Normálové napětí [N.m <sup>-2</sup> ]
$\tau$	Čas [s]
$\vec{E}$	Napětí tepelného toku
$\dot{Q}$	Tepelný tok [W]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

*Obr. č. 1 – Podmínky pro povinnou registraci do Seznamu výrobců elektrozařízení*

*Obr. č. 2 – Grafické znázornění průměrného zastoupení materiálů v DPS*

*Obr. č. 3 – Používané drtiče elektroodpadu*

*Obr. č. 4 – Postup při recyklaci DPS*

*Obr. č. 5 – Schéma mechanické metody zpracování elektroodpadu*

*Obr. č. 6 – Průřez DPS*

*Obr. č. 7 – Ukázka DPS s klasickou montáží součástek. Vývody součástek jsou napájeny o opačné strany než jsou osazeny součástky.*

*Obr. č. 8 – Průřez oboustranné DPS s klasickou montáží součástek*

*Obr. č. 9 – Příklad DPS s použitím součástek pro povrchovou montáž*

*Obr. č. 10 – Průřez oboustranné DPS se součástkami pro povrchovou montáž*

*Obr. č. 11 – DPS se součástkami pro povrchovou montáž a konektorem s vývody, které jsou připájeny i z protější strany.*

*Obr. č. 12 – Průřez oboustranné DPS se součástkami pro poklasickou a povrchovou Montáž*

*Obr. č. 13 – Pružné a ohebné DPS*

*Obr. č. 14 – Teplotní objemová roztažnost*

*Obr. č. 15 – Teplotní délková roztažnost*

*Obr. č. 16 – Změna délky materiálů s rozdílnou tepelnou délkovou roztažností*

*Obr. č. 17 – COMSOL Multiphysics – průvodce novým modelem*

*Obr. č. 18 – COMSOL Multiphysics – pracovní prostředí*

*Obr. č. 19 – COMSOL Multiphysics – nastavení vlastností objektu*

*Obr. č. 20 – Graf znázorňuje velikost teploty uvnitř materiálu na době, po kterou je prohříván*

*Obr. č. 21 – Simulace teploty DPS v 2D modelu – zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C*

*Obr. č. 22 – Graf znázorňuje závislost velikosti teploty na hloubce v materiálu – zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C*

*Obr. č. 23 – Simulace teploty DPS v 3D modelu – zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C*

*Obr. č. 24 – Simulace teploty DPS s vodivou vrstvou mědi - zahřívání desky po dobu 60s na teplotu 300°C*

*Obr. č. 25 – Závislost teploty na vzdálenosti od ohřívané stěny materiálu*

*Obr. č. 26 – Dva způsoby měření teploty při zahřívání DPS horkovzdušnou pistolí*

*Obr. č. 27 – DPS připravená pro experiment (zbavená součástek)*

*Obr. č. 28 – DPS po teplotních šocích – po pravé straně odloupení vodivé cesty*

*Obr. č. 29 – DPS po teplotních šocích – separace se projevuje v místech odstraněného laku*

*Obr. č. 30 – DPS po teplotních šocích – nepájivá maska brání v separaci vodivých cest*

*Obr. č. 31 – DPS po teplotních šocích – v narušených místech se vodivé cesty začínají odlupovat*

*Obr. č. 32 – Separace vodivých cest ohřevem a mechanickým narušením-starší typ DPS*

*Obr. č. 33 – Separace vodivých cest ohřevem a mechanickým narušením-novější typ DPS*

**SEZNAM TABULEK**

*Tab. č. 1 – Průměrné zastoupení materiálů v DPS*

*Tab. č. 2 – Průměrný obsah kovů v DPS*

*Tab. č. 3 – Procentové zastoupení jednotlivých druhů plastů*

*Tab. č. 4 – Tabulkové hodnoty*

*Tab. č. 5 – Hodnoty teplot 0,5mm pod povrchem v časovém rozsahu 1 – 800s*

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I Seznam Skupiny elektrozařízení

Příloha P II § 37g písm. a) zákona

Příloha P III § 37h - Základní povinnosti výrobců elektrozařízení

# **PŘÍLOHA P I: SEZNAM SKUPINY ELEKTROZAŘÍZENÍ**

"Příloha č. 7 k zákonu č. 185/2001 Sb.

## **Skupiny elektrozařízení**

1. Velké domácí spotřebiče
2. Malé domácí spotřebiče
3. Zařízení informačních technologií a telekomunikační zařízení
4. Spotřebitelská zařízení
5. Osvětlovací zařízení
6. Elektrické a elektronické nástroje (s výjimkou velkých stacionárních průmyslových nástrojů)
7. Hračky, vybavení pro volný čas a sporty
8. Lékařské přístroje (s výjimkou všech implantovaných a infikovaných výrobků)
9. Přístroje pro monitorování a kontrolu
10. Výdejní automaty".[29]

## **PŘÍLOHA P II: § 37G PÍSM. A) ZÁKONA**

§ 37g

### **Základní pojmy**

Pro účely tohoto dílu zákona se rozumí

a) elektrickým nebo elektronickým zařízením (dále jen "elektrozařízení") - zařízením, jehož funkce závisí na elektrickém proudu nebo na elektromagnetickém poli nebo zařízením k výrobě, přenosu a měření elektrického proudu nebo elektromagnetického pole, které náleží do některé ze skupin uvedených v příloze č. 7 k tomuto zákonu a které je určeno pro použití při napětí nepřesahujícím 1000 V pro střídavý proud a 1500 V pro stejnosměrný proud, s výjimkou zařízení určených výlučně pro účely obrany státu. [30]

## **PŘÍLOHA P III: § 37H - ZÁKLADNÍ POVINNOSTI VÝROBCŮ ELEKTROZAŘÍZENÍ**

### **§ 37h**

#### **Základní povinnosti výrobců elektrozařízení**

(1) Výrobce splní povinnosti stanovené pro oddělený sběr, zpětný odběr, zpracování, využití a odstranění elektrozařízení a elektroodpadu

- a) samostatně, organizačně a technicky na vlastní náklady,
- b) společně s jiným výrobcem nebo výrobcí na základě písemně uzavřené smlouvy; smluvní strany odpovídají za plnění povinností stanovených v tomto dílu zákona solidárně,
- c) přenesením těchto povinností na jinou, právnickou osobu, zajišťující společné plnění povinností výrobců podle tohoto dílu zákona; odpovědnost výrobců za plnění povinností stanovených v tomto dílu zákona, pokud tato právnická osoba povinnosti neplní, nezaniká.

(2) Výrobce je povinen zpracovávat roční zprávu o plnění povinností podle odstavce 1 za uplynulý kalendářní rok (dále jen "roční zpráva") a každoročně ji zasílat ministerstvu do 31. března. V případě, že výrobce plní povinnosti uvedené v odstavci 1 společně s jiným výrobcem, může spolu s ním zpracovat společnou roční zprávu. V případě podle odstavce 1 písm. c) zpracovává roční zprávu příslušná právnická osoba. Tato roční zpráva nahrazuje roční zprávu podle § 38 odst. 10.

(3) Ministerstvo stanoví prováděcím právním předpisem bližší podmínky jednotlivých způsobů plnění povinností výrobců podle odstavce 1 a obsah roční zprávy podle odstavce 2. [31]

### **§ 37j**

#### **Uvádění elektrozařízení na trh**

(1) Výrobce elektrozařízení zajistí, aby elektrozařízení bylo navrženo a vyrobeno tak, aby se usnadnila demontáž a využití, zejména opětovné použití těchto elektrozařízení a materiálové využití elektroodpadu, jeho komponentů a materiálů v souladu s právními předpisy na ochranu životního prostředí a právními předpisy na ochranu veřejného zdraví.<sup>31o</sup>

(2) Výrobce elektrozařízení uvedeného na trh<sup>31p</sup> po 13. srpnu 2005 zajistí, aby z



označení elektrozařízení bylo patrné, že bylo na trh uvedeno po tomto datu, a bylo možné zjistit výrobce, na kterého se vztahují povinnosti podle tohoto dílu zákona.

(3) Výrobce elektrozařízení, které náleží do skupin 1 až 7 nebo 10 podle přílohy č. 7 k tomuto zákonu včetně elektrozařízení určených výlučně pro účely obrany státu, a výrobce elektrických žárovek nebo svítidel určených k použití v domácnostech zajistí, aby elektrozařízení, je-li uvedeno na trh po 30. červnu 2006, neobsahovalo olovo, rtuť, kadmium, šestimocný chrom, polybromované bifenyly (PBB) a polybromované difenylétery (PBDE), nejedná-li se o

a) použití látek podle seznamu uvedeného v prováděcím právním předpise, nebo

b) náhradní díly určené k opravě nebo opětovnému použití elektrozařízení uvedeného na trh před 1. červencem 2006.

(4) Ten, kdo v rámci své podnikatelské činnosti prodává elektrozařízení nepocházející od výrobců zapsaných v Seznamu podle § 37i, nese odpovědnost výrobce za plnění jeho povinností stanovených v tomto dílu zákona.

(5) Ministerstvo stanoví prováděcím právním předpisem způsob označení elektrozařízení podle odstavce 2 a seznam látek, na které se za vyhláškou stanovených podmínek nevztahuje ustanovení § 37j odstavce 3. [31]

#### § 37k

### **Zpětný odběr elektrozařízení a oddělený sběr elektroodpadu**

(1) Výrobce elektrozařízení zajistí zpětný odběr elektrozařízení pocházejícího z domácností. Pro elektroodpad nepocházející z domácností výrobce elektrozařízení zajistí jeho oddělený sběr.

(2) Výrobce elektrozařízení pro účely zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadu označí elektrozařízení grafickým symbolem. Není-li možné elektrozařízení takto označit vzhledem k jeho velikosti nebo funkci, označí se grafickým symbolem obal nebo návod k použití nebo záruční list elektrozařízení.

(3) Výrobce prostřednictvím distributorů<sup>31p)</sup> zajistí, aby byl konečný uživatel informován o způsobu provedení odděleného sběru. Distributor informuje při prodeji elektrozařízení konečného uživatele o způsobu zajištění odděleného sběru.

(4) Poslední prodejce zajistí, aby spotřebitel<sup>31r</sup>) měl při nákupu elektrozařízení možnost odevzdat ke zpětnému odběru použité elektrozařízení v místě prodeje nebo dodávky nového elektrozařízení, ve stejném počtu kusů prodávaného elektrozařízení podobného typu a použití.

(5) Zbavit se elektroodpadu nebo elektrozařízení pocházejícího z domácností smí jeho držitel jen jeho předáním zpracovateli podle § 371 nebo na místo zpětného odběru nebo odděleného sběru. Elektrozařízení z míst zpětného odběru a elektroodpad z míst odděleného sběru musí být předán pouze zpracovateli podle § 371, není-li elektrozařízení jako celek opětovně použito.

(6) Způsob provedení zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadu a jejich předání zpracovateli nesmí ztížit opětovné použití nebo materiálové využití elektrozařízení nebo jejich komponentů, nebo materiálové využití elektroodpadu.

(7) Ministerstvo stanoví prováděcím právním předpisem vzor grafického symbolu pro označování elektrozařízení pro účely zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadu. [31]

## § 371

### **Zpracování elektroodpadu**

(1) Výrobce elektrozařízení vytvoří systém pro zpracování elektroodpadu za použití nejlepších dostupných technik<sup>31s</sup>) jeho zpracování, využívání a materiálového využívání.

(2) Výrobce elektrozařízení poskytne zpracovatelům elektroodpadu veškeré informace, které jsou nutné k jeho zpracování, především údaje o obsažených nebezpečných látkách, možnostech opětovného použití elektrozařízení a materiálového využití elektroodpadu, případně způsobu jejich odstranění. Tyto informace výrobce elektrozařízení poskytne pro každý typ nového elektrozařízení do jednoho roku od data uvedení výrobku na trh. Informace poskytne v návodech na použití nebo na technickém nosiči dat nebo prostředky dálkové komunikace.

(3) Zpracovatel elektroodpadu je povinen

a) provozovat zařízení ke zpracování elektroodpadu v souladu s jeho provozním řádem a plnit další povinnosti oprávněné osoby,

- b) přednostně odstranit z elektroodpadu všechny látky a součásti stanovené prováděcím právním předpisem,
- c) skladovat a zpracovávat elektroodpad v souladu s technickými požadavky stanovenými prováděcím právním předpisem,
- d) zajistit využití elektroodpadu v souladu s § 37m,
- e) vést v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem evidenci o převzatém elektroodpadu a způsobu jeho zpracování a zasílat příslušnému správnímu úřadu údaje o zařízení.

(4) Rozhodnutí, kterým se uděluje souhlas k provozu zařízení ke zpracování elektroodpadu a s jeho provozním řádem (§ 14 odst. 1), musí obsahovat podmínky nezbytné ke splnění požadavků podle odstavce 3 písm. b) a c) a § 37m.

(5) Elektroodpad může být převezen přes hranice ke zpracování v souladu s předpisy Evropských společenství upravujících dozor nad přepravou odpadů v rámci Evropského společenství<sup>39)</sup> a v souladu s částí devátou. Zpracování elektroodpadu ve státě, který není členským státem Evropské unie, lze zahrnout do plnění požadavků stanovených v § 37m, doloží-li vývozce, že využití, opětovné použití nebo materiálové využití proběhlo za podmínek srovnatelných s podmínkami stanovenými tímto zákonem.

(6) Tímto ustanovením nejsou dotčeny povinnosti zpracovatele stanovené zvláštním právním předpisem<sup>31t)</sup> pro zacházení s regulovanými látkami.

(7) Ministerstvo stanoví prováděcím právním předpisem technické požadavky na přednostní odstranění látek a součástí z elektroodpadu, skladování a zpracování elektroodpadu, rozsah a způsob vedení evidence o převzatém elektroodpadu a způsobech jeho zpracování a využití a způsob ohlašování zařízení ke sběru, zpracování a využití elektroodpadu. [31]

## § 37m

### **Využívání elektroodpadu**

(1) Výrobce elektrozařízení vytvoří systém, podle kterého bude zajištěno využití elektroodpadu navazující na zpětný odběr elektrozařízení nebo oddělený sběr

elektroodpadu.

(2) Zpětně odebraná a odděleně sebraná elektrozařízení se před předáním zpracovateli přednostně opětovně použijí jako celek. Opětovně lze použít pouze elektrozařízení či jejich komponenty, které splňují požadavky příslušných právních předpisů. 31o)

(3) Výrobce elektrozařízení je povinen zajistit využití elektroodpadu předaného zpracovatelům v souladu s § 37k odst. 5 minimálně v tomto rozsahu

a) u elektrozařízení uvedeného ve skupinách 1 a 10 přílohy č. 7 k tomuto zákonu v rozsahu 80 % jeho průměrné hmotnosti a opětovné použití a materiálové využití komponentů, materiálů a látek v rozsahu 75 % jeho průměrné hmotnosti,

b) u elektrozařízení uvedeného ve skupinách 3 a 4 přílohy č. 7 k tomuto zákonu v rozsahu 75 % jeho průměrné hmotnosti a opětovné použití a materiálové využití komponentů, materiálů a látek v rozsahu 65 % jeho průměrné hmotnosti,

c) u elektrozařízení uvedeného ve skupinách 2, 5, 6, 7 a 9 přílohy č. 7 k tomuto zákonu v rozsahu 70 % jeho průměrné hmotnosti a opětovné použití a materiálové využití komponentů, materiálů a látek v rozsahu 50 % jeho průměrné hmotnosti,

d) u výbojek a zářivek opětovné použití a materiálové využití komponentů, materiálů a látek v rozsahu 80 % jejich hmotnosti. [31]

#### § 37n

#### **Financování nakládání s elektrozařízením pocházejícím z domácností**

(1) Je-li elektrozařízení uvedeno na trh po dni 13. srpna 2005, výrobce elektrozařízení je povinen financovat zpětný odběr, zpracování, využití a odstranění elektrozařízení pocházejícího z domácností, které bylo zpětně odebráno podle § 37k a 38, jedná-li se o elektrozařízení, jehož je výrobcem podle tohoto zákona. Náklady vynaložené podle tohoto odstavce se při prodeji nových elektrozařízení odděleně neuvádějí.

(2) Před uvedením elektrozařízení podle odstavce 1 na trh, je výrobce povinen poskytnout záruku prokazující, že nakládání s veškerým elektroodpadem bude finančně zajištěno. Tato záruka musí být dostatečná k pokrytí financování zpětného odběru, zpracování, využití a odstranění elektrozařízení pocházejícího z domácností, které bylo odevzdáno v rámci systému zpětného odběru vytvořeného a provozovaného podle § 37k a

38. Výrobce, který zajišťuje plnění povinností podle § 37h odst. 1 písm. a), poskytne záruku formou účelově vázaného bankovního účtu nebo pojištění za podmínek stanovených prováděcím právním předpisem. Údaje o stavu a čerpání z účelově vázaného účtu nebo výši pojistného plnění za uplynulý rok uvádí v roční zprávě. Prostředky uložené na účelově vázaném bankovním účtu mohou být použity pouze se souhlasem ministerstva k zajištění financování zpětného odběru, zpracování, využití a odstranění elektrozařízení pocházejícího z domácností; tyto prostředky nemohou být předmětem nařízení a provedení výkonu rozhodnutí, ani exekuce, ani zahrnuty do konkurzní podstaty výrobce. Výrobce, který zajišťuje plnění povinností podle § 37h odst. 1 písm. b) nebo c), záruku neposkytuje.

(3) Bylo-li elektrozařízení uvedeno na trh do dne 13. srpna 2005, jsou k zajištění zpětného odběru, zpracování, využití a odstranění elektrozařízení pocházejícího z domácností, které bylo zpětně odebráno podle § 37k a 38, výrobci povinni vytvořit systém, do kterého v odpovídajícím rozsahu, zejména podle podílu na trhu, přispívají všechny osoby, které jsou podnikatelsky činné v okamžiku vzniku příslušných nákladů. Na dobu osmi let od účinnosti tohoto zákona a na dobu deseti let v případě elektrozařízení uvedeného ve skupině 1 přílohy č. 7 k tomuto zákonu od účinnosti tohoto zákona mohou tyto osoby při prodeji nových elektrozařízení odděleně uvádět náklady na zpětný odběr, zpracování a odstranění elektrozařízení uvedených na trh do dne 13. srpna 2005. Uvádí-li výrobce, ve smyslu tohoto ustanovení, náklady odděleně, je takto povinen je uvádět každý prodávající při prodeji v rámci své podnikatelské činnosti. Uvedené náklady nesmí překročit náklady skutečně vzniklé.

(4) Povinnosti podle odstavců 1 a 2 plní i výrobce obchodující s využitím prostředků dálkové komunikace pro elektrozařízení dodávaná do členského státu Evropské unie, ve kterém má kupující bydliště nebo sídlo.

(5) Ministerstvo stanoví po projednání s Ministerstvem financí prováděcím právním předpisem bližší podmínky financování, zejména způsob výpočtu minimální výše uložených finančních prostředků na účelově vázaném bankovním účtu a minimální výše pojistného plnění.[31]

§ 37o

### **Financování nakládání s elektroodpadem**

(1) Výrobce elektrozařízení zajistí financování odděleného sběru, zpracování, využití a odstranění elektroodpadu takto:

- a) je-li elektrozařízení uvedeno na trh po dni 13. srpna 2005, zajistí jeho financování sám,
- b) bylo-li elektrozařízení uvedeno na trh do dne 13. srpna 2005 a je-li nahrazováno výrobky stejného typu nebo výrobky, které plní stejnou funkci, zajistí financování výrobce takového nového výrobku při jejich dodávce, nejvýše však v počtu dodávaných elektrozařízení,
- c) bylo-li elektrozařízení uvedeno na trh do dne 13. srpna 2005, není však nahrazováno výrobky stejného typu nebo výrobky, které plní stejnou funkci, zajistí financování koneční uživatelé, kteří nejsou spotřebiteli.

(2) Ministerstvo stanoví po projednání s Ministerstvem financí prováděcím právním předpisem bližší podmínky financování podle odstavce 1.

31m) Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/96/ES ze dne 27. ledna 2003 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních, ve znění směrnice Evropského parlamentu a Rady 2003/108/ES.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/95/ES ze dne 27. ledna 2003 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních.

31n) § 53 zákona č. 40/1964 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů.

31o) Například zákon č. 102/2001 Sb., o obecné bezpečnosti výrobků, ve znění pozdějších předpisů, zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů, zákon č. 634/1992 Sb., o ochraně spotřebitele, ve znění pozdějších předpisů, zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

31p) § 2 zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

31r) § 2 zákona č. 634/1992 Sb., o ochraně spotřebitele, ve znění pozdějších předpisů.

31s) Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů (zákon o integrované

prevenci), ve znění zákona č. 521/2002 Sb.

31t) Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší), ve znění pozdějších předpisů.

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 2037/2000 ze dne 29. června 2000 o látkách, které poškozují ozónovou vrstvu, ve znění pozdějších předpisů."

19. V § 38 odst. 1 písmeno f) zní:

"f) elektrozařízení pocházející z domácností [§ 37g písm. f)]."

20. V § 38 odst. 3 se slovo "dovází" nahrazuje slovy "uvádí na trh v České republice výrobky zahraničního výrobce" a na konci textu odstavce 3 se doplňují slova " , a to bez ohledu na výrobní značku a do výše, které za vykazované období stanovené podle odstavce 10 vyrobí nebo doveze. Na zpětný odběr elektrozařízení pocházejícího z domácností se vztahuje § 37n".

21. V § 38 se na konci odstavce 4 doplňuje věta "Výrobce elektrozařízení dále zajistí informování spotřebitele o

a) požadavku, aby elektrozařízení nebyla odstraňována spolu se směsným komunálním odpadem, ale byla fyzickými osobami odkládána na místech k tomu určených nebo v místech jejich zpětného odběru,

b) jejich úloze v opětovném použití elektrozařízení a materiálovém nebo jiném využití elektroodpadu,

c) možných škodlivých vlivech nebezpečných látek obsažených v elektrozařízení na životní prostředí a na lidské zdraví."

22. V § 38 se na konci odstavce 7 doplňuje věta "Zpětný odběr použitého výrobku lze odmítnout v případě, že použitý výrobek z důvodu kontaminace ohrožuje zdraví osob, které zpětný odběr provádějí.31u)".

Poznámka pod čarou č. 31u) zní:

"31u) Například vyhláška č. 184/1999 Sb., kterou se stanoví postup hodnocení rizika nebezpečných chemických látek pro zdraví člověka, vyhláška č. 89/2001 Sb., kterou se stanoví podmínky pro zařazování prací podle kategorií, limitní hodnoty ukazatelů

biologických expozičních testů a náležitosti hlášení prací s azbestem a biologickými činiteli."

23. V § 39 odst. 3 se za slova "k odstraňování nebo využívání odpadů" vkládají slova " , provozovatelé zařízení ke sběru a zpracování autovraků, provozovatelé zařízení ke sběru, zpracování, využívání a odstraňování elektroodpadu (§ 37g)".

24. V § 39 odst. 5 se za slova "a způsobech jejich zpracování" vkládají slova "a provozovatelé zařízení k oddělenému sběru, zpracování, využití a odstraňování elektroodpadu jsou povinni vést evidenci a zasílat údaje o typu, množství a způsobu zpracování, využití nebo odstranění elektroodpadu v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem".

25. V § 39 odst. 7 se za slova "převzatých autovraků a způsobů jejich zpracování" vkládají slova " , typu, množství a způsobů zpracování, využití, nebo odstranění elektroodpadu".

26. V § 39 odst. 8 se za slova "podle § 26 písm. c)" vkládají slova "nebo provozují zařízení, která mohou obsahovat PCB a podléhají evidenci podle § 26 písm. d)", na konci věty první se tečka zrušuje a doplňují se slova "a oznámit tuto skutečnost ministerstvu do 31. prosince 2004, pokud tak dosud neučinily." a na konci odstavce 8 se doplňuje věta "Tato povinnost se nevztahuje na laboratorní standardy."

27. V § 39 odst. 12 písm. b) se za slova "jejich zpracování" vkládají slova " , o typu, množství elektroodpadu a způsobech jeho zpracování, využití nebo odstranění".

28. V § 47 odstavec 1 zní:

"(1) Pokud provozovatel skládky neodvedl obci nebo Státnímu fondu životního prostředí vybraný poplatek ve stanovené lhůtě, uloží mu povinnost zaplatit poplatek krajský úřad, který vydal souhlas k provozování skládky, rozhodnutím, na návrh příjemce poplatku. Za neodvedený poplatek se platí penále ve výši 0,5 promile ze zadržené částky denně. Penále je příjmem obce."

29. V § 49 odst. 2 větě poslední a v § 51 odst. 2 se slova "finanční záruky a" zrušují.

30. V § 51 odst. 4 se na konci textu písmene b) doplňují slova " , odpadu ukládaného jako technologický materiál na zajištění skládky a odpadu azbestu".



31. V § 54 se nadpis zrušuje a v odstavci 2 se písmeno a), označení písmene b) a poznámka pod čarou č. 40) zrušují.

32. V § 54 se doplňuje odstavec 3, který zní:

"(3) Odpad vzniklý v České republice se přednostně využívá v České republice, nejedná-li se o jeho využití v jiných členských státech Evropské unie."

33. V § 58 se na konci odstavce 3 doplňuje věta "Opravný prostředek proti tomuto rozhodnutí nemá odkladný účinek."

34. V § 66 odst. 3 se na konci písmene h) tečka nahrazuje čárkou a doplňuje se písmeno i), které zní:

"i) nezařadí jako odpad a nenakládá jako s odpadem s vytěženou zeminou, hlušinou nebo sedimentem z říčních toků nebo vodních nádrží, které nevyhovují limitům znečištění, stanoveným pro jejich využití k zavážení podzemních prostor a k úpravám povrchu terénu (terénním úpravám) prováděcím právním předpisem."

35. V § 72 odst. 1 písm. i) se za slova "převzatých autovracích a způsobech jejich zpracování," vkládají slova "typu, množství a způsobu zpracování, využití nebo odstranění elektroodpadu,".[31]