

Modelování teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce při termické separaci desek plošných spojů

Modeling of temperature field for two-layer flat plate by thermic separation of printed circuit boards

Jan Hrabovský



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan HRABOVSKÝ

Osobní číslo: A08283

Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika

Studijní obor: Informační a řídicí technologie

Téma práce: Modelování teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce při termické separaci desek plošných spojů

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii týkající se současných technologií recyklace desek plošných spojů. Zaměřte se na proces tepelné separace vodivých cest od plastové části desek plošných spojů.
2. Popište strukturu dvouvrstvé desky plošných spojů.
3. Popište matematický model teplotních polí ve dvouvrstvé rovinné desce při nestacionárním ohřevu a chlazení.
4. Popište vliv vstupních parametrů na průběh ohřevu a chlazení ve dvouvrstvé rovinné desce.
5. Vytvořte interaktivní softwarovou aplikaci pro výpočet nestacionárních teplotních polí ve dvouvrstvé desce.
6. Provedte posouzení vlivu hlavních parametrů ovlivňujících průběh ohřevu a chlazení dvouvrstvé desky plošných spojů pomocí Vámi vytvořené aplikace.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. MÍKA, Vladimír. Základy chemického inženýrství. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 870 s.
2. CARSLAV, H. S., JAEGER, J. C. Conduction of Heat in Solids. 2. vyd. Oxford University Press, 1986.
3. LYKOV, A., B. Teoria teploprovodnosti. Vyssaja škola. Moskva. 1967
4. KOLOMAZNÍK, Karel, et al. Teorie technologických procesů III. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1976. 139 s.
5. ŠESTÁK, Jiří, RIEGER, František. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. 3. vyd. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2005. 299 s. ISBN 80-01-02933-6.
6. PERRY, R., H.; GREEN, D., W. Perrys chemical engineers handbook. (CD ROM). 7 th ed. New York: McGraw-Hill Book Co. 1999.
7. MICHEJEV M.A. Základy sdílení tepla. 1.vyd. Praha : Průmyslové vydavatelství, 1952. 384s.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Hana Charvátová, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

7. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Stěžejním bodem této práce je modelování teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce jakožto zjednodušeného modelu desky plošného spoje. Literární studie se zabývá problematikou elektroodpadu, resp. odpadu z desek plošných spojů a jejich recyklačními technologiemi. Je zde popsána metoda separace mědi a plastu tepelným šokem, na základě které je v další části práce rozebrána teorie nestacionárního vedení tepla v poloohraničeném masívu a odpovídající matematický model nestacionárního teplotního pole desky složené ze dvou vrstev. Pomocí tohoto matematického modelu byla vytvořena softwarem Wolfram Mathematica 8 interaktivní aplikace, jenž vizualizuje teplotní pole. Touto aplikací jsou posouzeny hlavní vlivy působící na průběh ohřevu a chlazení desky. Aplikace může sloužit jako studijní pomůcka či jako jednoduchý nástroj pro zjištění optimálního procesu ohřívání a chlazení při působení tepelného šoku.

Klíčová slova: Elektroodpad, desky plošných spojů, recyklace, nestacionární vedení tepla, teplotní pole, termická separace, tepelný šok, dvouvrstvá deska, softwarová aplikace, Mathematica

ABSTRACT

The pivotal point of this thesis is modeling of temperature field for two-layer flat plate as a simplified model of printed circuit board. Background research deals with electronic waste or waste from printed circuits boards and their recycling technology. This thesis also describes a method of separation of copper and plastic by thermal stress. This method is base for next section where is analyzes theory of transient heat conduction in semi-infinite region and competent mathematical model transient temperature field in plates composed of two layer. Using this mathematical model was created an interactive application by Wolfram Mathematica 8. This application visualises temperature field. There are assessed major influence occurring in heating or cooling process. The application can be used as learning aid or as simple utility to search of optimal heating or cooling process while occurring thermal stress.

Keywords: Electronic waste, printed circuit boards, recycling, transient heat conduction, temperature field, thermic separation, thermal stress, two-layer flat plate, software application, Mathematica

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Haně Charvátové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Také děkuji za vstřícnost a za čas strávený při konzultacích, který mi věnovala.

Motto:

„Ať si myslíte, že něco dokážete, nebo nedokážete, pokaždé budete mít pravdu.“

Henry Ford

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk 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 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 LITERÁRNÍ STUDIE – TECHNOLOGIE RECYKLACE DPS.....	11
1.1 ELEKTROODPAD	11
1.2 ELEKTRODOPAD Z DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ	14
1.3 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY RECYKLACE DPS.....	16
1.3.1 Odstranění komponent osazené DPS	16
1.3.2 Separace materiálů z neosazené DPS.....	17
2 STRUKTURA DVOUVRSTVÉ DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	27
2.1 STRUKTURA DPS [35].....	27
2.2 POPIS MODELU DVOUVRSTVÉ DPS	28
3 MATEMATICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE	30
3.1 NESTACIONÁRNÍ TEPLOTNÍ POLE [39]	30
3.2 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM [38, 39, 40, 42]	30
3.2.1 Fourier-Kirchoffova rovnice vedení tepla [38]	31
3.3 MATEMATICKÝ MODEL JEDNOROZMĚRNÉHO NESTACIONÁRNÍ TEPLOTNÍ POLE ...	32
3.3.1 Fourier-Kirchoffovy rovnice, počáteční a okrajové podmínky.....	32
3.3.2 Analytické řešení nestacionárního teplotního pole	34
3.3.3 Vliv vstupních parametrů na průběhu ohřevu a chlazení.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
4 POPIS POUŽITÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ.....	38
5 POPIS A OVLÁDÁNÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE.....	40
5.1 PRINCIP FUNKCE MANIPULATE.....	40
5.2 OVLÁDÁNÍ APLIKACE	42
5.2.1 Nastavení modelu.....	43
5.2.2 Vyšetřování teplotních polí	44
6 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI APLIKACE	47
6.1 ZADÁNÍ KONTROLNÍHO PŘÍKLADU	47
6.2 ŘEŠENÍ PŘÍKLADU A JEHO POROVNÁNÍ S APLIKACÍ	47
7 POSOUZENÍ VLIVU HLAVNÍCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH OHŘEVU A CHLAZENÍ POMOCÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE.....	50
7.1 VLIV FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	50
7.2 VLIV ZMĚNY TEPLOTNÍHO ROZDÍLU, TLOUŠTKY VRSTVY A DOBY OHŘEVU.....	51
ZÁVĚR	55
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	57
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
SEZNAM OBRÁZKŮ	64
SEZNAM TABULEK.....	65
SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

V současné době v podstatě kamkoliv, kde upřeme náš zrak, najdeme náznak moderní vyspělé doby. Lidé přenášejí nové poznatky vědy a techniky do praxe pro příjemnější a efektivnější způsob života. Týká se to zejména obrovského rozvoje elektrických a elektronických zařízení, jako jsou mobilní telefony, počítače či domácí spotřební zařízení. Tyto přístroje používáme dennodenně k práci, zábavě či komunikaci. Jsou již velmi snadno dostupné a takřka si nedokážeme i nechceme bez nich práci a zábavu představit. Společnost se tak staví do jisté míry i do role konzumní společnosti. Tj. do společnosti, která je nestřídmá, nesoběstačná a s neustále se zvyšujícími se nároky na spotřebu. Samo o sobě by to nebyl až takový problém. Problém nastává při úvaze masově využívaných přírodních zdrojů, které nejsou na naší zeměkouli nevyčerpatelné, ba jsou dokonce neobnovitelné.

V širším kontextu s tématem této práce bych nastínil, že si lidé obecně stále neuvědomují vážnost situace a důležitost šetrného zacházení jednak s nerostným bohatstvím, které bezhlavě využívá pro co největší osobní zisk a jednak důležitost zacházení s přírodou, potažmo celého ekosystému, jenž již postrádá svou přirozenou schopnost obnovy a autoregulace [1]. Člověk si to nepřipouští jednoduše proto, že se ve své minulosti neměl šanci z tohoto problému poučit. Člověk se tak od doby své přirozenosti k ekosystému, kdy se dokázal prvně zbavit strachu z ohně a získal z něho výhodu, snažil získávat další a další výhody, až jsme dospěli k nynější době, v níž čelíme ekologickým následkům nepřirozeného lidského materialismu. Myslím si, že ten správný směr je vydat se zpět od materialistického systému vstříc k přirozenému modelu ekosystému. Proto se ztotožňuji s odstavcem knihy [2], kde autoři pozvedli myšlenku, že přirozený ekosystém funguje na bázi cyklického mechanismu toku energie a látek. Z dlouhodobé perspektivy je tedy nezbytné transformovat aktuální nepřirozený jednosměrný materiálový a energetický tok na tok cyklický, jehož hlavní podstatou je recyklace využívaných surovin.

Téma této práce se lehce dotýká nového a stále živého tématu recyklace současně nejrychleji rostoucího odpadu – elektroodpadu. Konkrétně recyklace desek plošných spojů, které jsou součástí téměř každého elektroodpadu.

Je zde nastíněná alternativní metoda separace mědi od plastové nosné desky plošných spojů tepelným šokem, neboť měď je hojně využívaný kov a recyklace se jeví jako environmentálně daleko výhodnější než jeho těžba.

Práce se také v dalších částech opírá o teorii nestacionárního teplotní pole a vedení tepla ve dvouvrstvé rovinné desce [3, 4], jakožto modelu dvouvrstvé desky plošného spoje. Na tomto modelu je postavena také praktická část v podobě interaktivní softwarové aplikace, která slouží k modelování nestacionárních teplotních polí ve dvouvrstvé desce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LITERÁRNÍ STUDIE – TECHNOLOGIE RECYKLACE DPS

Nejen expandující stav trhu, v němž výrobci vyrábí stále modernější elektrické a elektronické zařízení (EEZ) a prodejci se předbíhají ve výhodnějších cenách, ale také potřeba modernizace a obnova vysloužilých zařízení způsobuje, že jej spotřebitel vyřazuje jako odpad v mnohem kratších časových intervalech. Na dobu životnosti mají hlavní vliv módní trendy, instalované funkce aj. To je příčinou enormního celosvětového nárůstu objemu odpadů z těchto elektrických a elektronických zařízení (OEEZ). Tento odpad je samozřejmě kvůli jeho nebezpečnému složení oddělen od komunálního a směsného odpadu a je nazýván také jako tzv. elektroodpad.

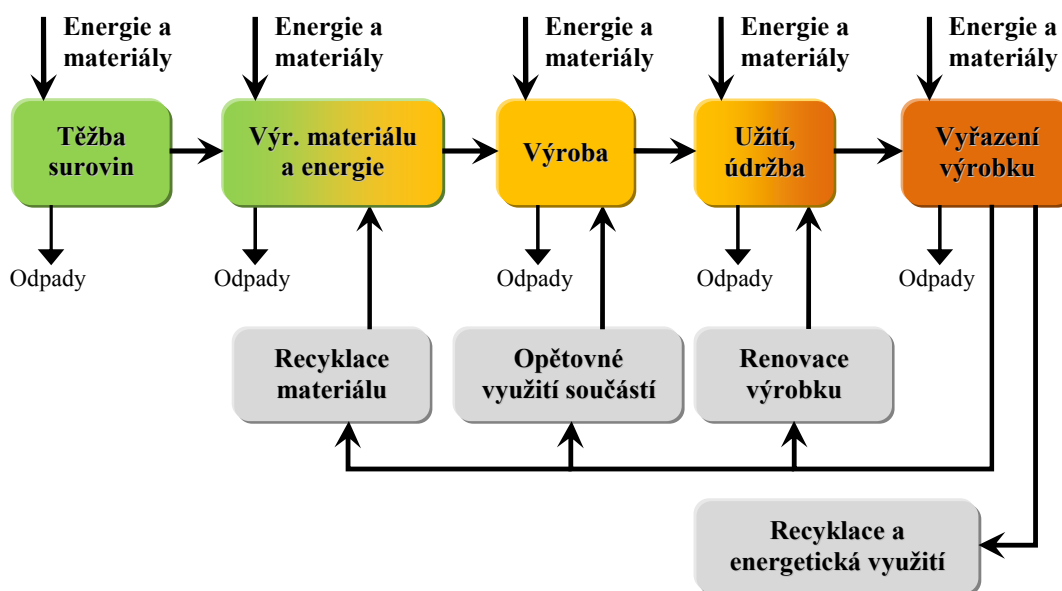
Evropská komise odhaduje, že každý Evropan vyprodukuje ročně asi 17–20 kg elektroodpadu (ročně asi 9 miliónů kg) [5]. Tento odpad je považován za celosvětově nejrychleji rostoucím druhem opadu [6]. A proto je potřeba tento problém řešit a zabývat se nejen otázkou environmentálně šetrné recyklace s neekonomičtější recyklační technologií, ale je také třeba uvažovat nad recyklačními možnostmi už při výrobě.

1.1 Elektroodpad

Problematika elektroodpadu je vážným a stále aktuálním a diskutovaným celosvětovým tématem. Hlavním problémem je ekologická a ekonomická náročnost likvidace a recyklace. Jednou možností, ještě před několika lety velmi rozšířenou, levnou a dnes již nemyslitelnou, avšak ne zcela odstraněnou, je uložení na skládku či spalování.

Na takového skládce mohou některé toxické látky obsažené v elektronice přecházet do vody a následně do půdy a podzemních vod. Například oxid olovnatý v pájce obrazovek a fluorescenční přísady na bázi kadmia. Když se tyto látky na skládce z odpadů vyluhují, jsou silně kyselé, a mohou tak rozpouštět materiály, které by jinak zůstaly v původním stavu (např. olovnaté ionty z rozbitého skla obrazovek). Při spalování brómovaných zpomalovačů hoření (BFR – Brominated Flame Retardant) vyskytujících se v plastech počítačů a desek plošných spojů se mohou rozpouštět ve výluzích a pronikat do okolí. Například oxid antimonitý (Sb_2O_3), který se běžně používá do plastů se samozhášecími přísadami, se při zahřátí rozkládá a produkuje toxické výpary, které působí na plíce, oči, kůži a dýchací trakt. Mimo jiné se také dále uvolňují karcinogenní dioxiny a vysoce těkavé furany.[7]

Čas ukázal, že toho řešení je ve slepé uličce a z dlouhodobé perspektivy je nezbytné kombinovat jednosměrný materiálový a energetický tok na tok cyklický, jehož částí je recyklace použitých surovin [2]. To by měl být do budoucna krok tím správným směrem. Znázornění cyklického materiálového a energetického toku na životním cyklu výrobku ukazuje následující obrázek 1:



Obrázek 1 – Etapy životního cyklu výrobku [8]

Materiálové využití a recyklace tohoto odpadu představuje trvale udržitelný přístup, pro jehož účinnou realizaci je nejdůležitější odpovědný postoj občanů spočívající zejména v třídění tohoto odpadu, tedy odevzdávání vysloužilých elektrospotřebičů na místech k tomu určených.

Elekroodpadem se také zabývá například světová ekologická organizace Greenpeace ve své kampani toxického znečištění. Hlavním důvodem je, že elektroodpad obsahuje kromě velkého množství recyklovatelných a využitelných materiálů (železo, ocel, hliník, měď apod.) a cenných a žádaných komodit (stříbro, zlato, palladium, platinu, aj.) také celou řadu nebezpečných toxických chemikálií a těžkých kovů, které nemohou být bezpečně zlikvidovány nebo recyklovány, a které, jak již bylo řečeno, negativně působí na životní prostředí. Proto nejen Greenpeace ve své kampani za zelenější elektroniku tlačí na producenty EEZ, aby co nejdříve odstranili ze svých výrobků nebezpečné a toxické látky a převzali odpovědnost za bezpečnou recyklaci svých výrobků, a nížili tak dopad výrobních procesů na životní prostředí [6]. Jedná se o tzv. ekodesign.

Ekodesign výrobků EEZ stojí na myšlence, že vlastnosti a užitná hodnota každého výrobku EEZ je daná již v prvních fázích jeho vzniku a dopad výrobku na životní prostředí by měl být minimální během všech fází jeho životního cyklu. Tyto negativní dopady jsou například spotřeba neobnovitelných zdrojů energie, spotřeba neobnovitelných zdrojů materiálu, emise do vody, atmosféry a půdy a rozšiřování užívání půdy pro skládky.[8]

Také v souvislosti se vstupem České republiky (ČR) do Evropské unie (EU) se na OEEZ vztahují právní předpisy vyplývající z legislativy EU a výrobcům tak prodejem výrobku práce nekončí. Nýbrž musejí se dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a zákona č. 7/2005 Sb., který vychází z evropské legislativy o odpadech 2002/96/ES, známého pod českým názvem Směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment), od 13. 8. 2005 spolupodílet se a zajišťovat financování likvidace a recyklaci elektroodpadu.

Účelem zákona je zamezení černých skládek nebezpečného odpadu. Společně s evropskou směrnicí WEEE o elektroodpadu byla také dne 27. 1. 2003 přijata směrnice o omezení užívání některých nebezpečných látek v EEZ. Tzv. směrnice RoHS (Restriction of the use Hazardous Substances). Jejím cílem je omezení šesti látek při výrobě EEZ, které se ve velkých množstvích dostává na skládky. Je to kadmium (Cd), rtuť (Hg), olovo (Pb), šestimocný chrom (Cr^{+6}), polybromované bifenyly (PBB) a polybromované difenylethery (PBDE) [9]. Tato novela je zvláště významná zvláště, jestliže se budou zbytkové komodity u těchto OEEZ používat pro přípravu alternativního paliva, neboť kvalita paliva výrazně ovlivňuje druh a množství emisí z jeho spalování [10].

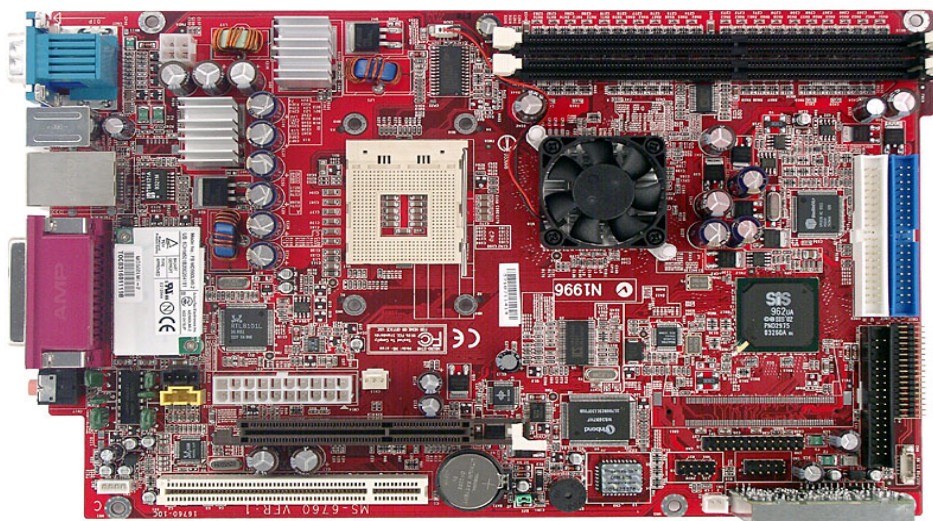
V únoru roku 2011 schválil evropský parlament v prvním čtení novelu směrnice WEEE. Cílem této novely je zlepšení recyklace elektroodpadu, protože se nyní recykluje jen třetina OEEZ. Dalších 13 % mizí na skládkách a skoro u 50 % není známo, kde končí. Podle studie Univerzity spojených národů (UNU – United Nations University) z roku 2008 k zhodnocení směrnice WEEE má do roku 2020 vzrůst objem OEEZ až na 12,3 mil. tun, což představuje 24 kg odpadu na osobu. Podle této novely musejí členské státy EU do roku 2016 vysbírat 85 % elektroodpadu, který vyprodukují. Pro rok 2012 se stanovil průběžný cíl 4 kg na občana za rok. [11]

1.2 Elektroodpad z desek plošných spojů

Desky plošných spojů (DPS) jsou neodmyslitelnou a také lukrativní součástí téměř každého OEEZ. Jsou vyrobeny z plastové desky, jež je pokrytá jednou nebo více kovových vrstev s napájenými elektronickými součástkami. Průměrná roční světová produkce DPS od roku 2004 je 60 milionů kusů [12]. A v posledních letech roční výroba ještě roste asi o 8,7 % (v Číně dokonce o 14,4 %) [13].

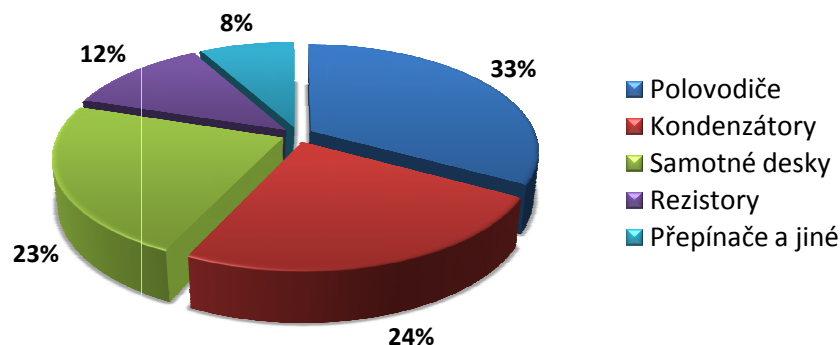
Výrazný podíl plošných spojů v elektroodpadu se vyskytuje u zařízení spadajících do třetí a čtvrté kategorie přílohy 1A směrnice WEEE (Zařízení informačních technologií a telekomunikačních zařízení, spotřební elektronika). Dle přílohy 1B též směrnice jsou to mimo mnoha dalších např. osobní počítače (včetně CPU, myši, monitoru a klávesnice), notebooky, tiskárny, telefonní přístroje, kopírovací přístroje, televize, zesilovače, rádia atd. [14]

Jestliže že se dále zaměříme na odpad z počítačů (PC), tak lze uvést výsledky analytické firmy Gartner. Za rok 2010 prodalo celosvětově téměř 351 miliónu počítačů, což je ve srovnání s rokem 2009 nárůst o 13,5 % [15]. Analytická společnost ICD uvádí, že český trh s počítači v roce 2010 vrostl meziročně o 16 % a celkově se prodalo 1,3 milionů PC, přičemž notebooků se prodalo třikrát více než desktopů [16]. Při tomto trvalém růstu prodeje počítačů se díky rychlému vývoji technologií (rychlost CPU, paměť, atd.) či instalovaných funkcí životnost PC rok od roku zkracuje a staré počítače se vyřazují, přičemž recyklovaných je jen zlomek. Dle studie UNU je životnost PC 4 roky [11].



Obrázek 2 – Ukázka typické osazené DPS z roku 2003 (MS-6760) [17]

Právě počítače obsahují velké množství plošných spojů (ukázka na obrázku 2), jejichž materiálové složení je dáno hlavně účelem, jenž plní. Jejich recyklace je důležitá kromě snižování množství odpadu také získáváním kovů (Cu – měď, Fe – železo, Al – hliník, Sn – cín, Pb – olovo, Au – zlato, Ag – stříbro, Pd – palladium a jiné) a tím šetření primárních zdrojů. Největším problémem při recyklaci tohoto druhu odpadu je komplexnější složení a heterogenita. [18, 19]



Graf 1 – Hlavní podíly na hmotnosti plně osazené DPS [20]

Podle studie Dr. Gooseyho a Dr. Kellnera je typické chemické složení DPS dle následující tabulky 1.

Složka	Obsah [%]
Sklolaminát	> 70
Měď	≈ 16
Pájka	≈ 4
Železo	≈ 3
Nikl	≈ 2
Stříbro	0,05
Zlato	0,03
Palladium	0,01
Jiné (Bizmut, Antimon atd.)	< 0,01

Tabulka 1 – Chemické složení plně osazené DPS [21]

Další Tabulka 2 ukazuje obsah kovů a nekovů v DPS a kde se vyskytují.

Prvek	Použití	Obsah [%]
Měď	vodivé cesty, dráty, chladiče	10–25
Železo	konstrukční a spojovací části	5–10
Olovo	složka pájky, kondenzátory	1–5
Nikl (Ni)	akumulátory	1–3
Hliník	konstrukční části, chladiče	2
Cín	složka pájky, kondenzátory	0,8–4
Zinek (Zn)	fluorescenční materiály	0,3–0,4
Antimon (Sb)	složka pájky, kondenzátory	0,1
Stříbro	elektrické kontakty, konektory	0,05–0,3
Zlato		0,01–0,1
Platina (Pt)		0,004
Palladium	náhrada Au, kontakty, relé	0,004–0,03
Kadmium	akumulátory, baterie, spínače, relé	4–10
Titan (Ti)		
Rtuť		

Tabulka 2 – Obsah kovů v osazených DPS [22]

1.3 Technologické postupy recyklace DPS

Již zmíněná evropská direktiva WEEE rozděluje elektroodpad do 10 kategorií. To vnáší do OEEZ systém. Každá kategorie má specifická složení jednotlivých zařízení, a tak přirozeně charakterizuje OEEZ faktory, jako je typ zařízení, jeho původ a stáří. Tyto skutečnosti znamenají nevyhnutelnost chemické identifikace. A právě důkladná chemická analýza tvoří podklad pro jeho další neefektivnější použité technologické postupy. [18].

1.3.1 Odstranění komponent osazené DPS

V procesu recyklace DPS je zcela zásadní a nezbytnou součástí, která zvyšuje efektivitu dalšího zpracování. Odstraní se elektronické součástky, jež se mohou opětovně využít. Důležité je také odstranění nebezpečných komponent. A v neposlední řadě je to odstranění cenných komponent a materiálů k následnému získání koncentráту bohatého na kovy. [22, 23]

Mezi nejznámější metody demontáže součástek jsou:

- Mechanické odstranění
- Tavení
- Řezání

Mechanické odstranění je vhodné pro selektivní separaci některých součástek. Provádí se mechanickým odstraněním pinů z vhodných komponent. Tato metoda je ekologicky šetrná. Lze ji také realizovat použitím brusných kotoučů. V důsledku zahřívání během procesu se však může plast spékat s kovem, což komplikuje proces a proto je třeba nalézt optimální dobu procesu. [22, 24].

Tavení spočívá v roztavení cínových spojů a uvolnění pinů součástek, které se mechanicky odstraní. Plošný spoj se umístí pod ochranný kryt na hliníkovou desku, která se topnými tělesy ohřeje na teplotu 350–400 °C. [22]

Řezání DPS se provádí tak, že se deska umístí do upínacího rámu, ve kterém se piny odřežou pilou na kov. Nevýhodou je odpad při odřezávání, který obsahuje směs kovových a laminátových pilin. [22]

1.3.2 Separace materiálů z neosazené DPS

V následujícím technologickém procesu jsou kovy a plasty separovány. Existuje již více metod separace, avšak vývoj nových technologií a způsobu je stále aktuální. Snahou je co nejefektivněji a environmentálně nejšetrnější využití a zpracování. Separace může být realizována několika způsoby: [25]:

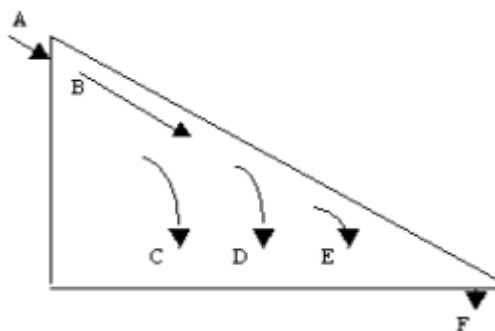
- Mechanicky
- Chemicky
- Termicky

Mechanické metody separace

Po prvotní demontáži se mohou vytrít znovupoužitelné součástky a tepelně nebo automatickým pásovým broušením se může odstranit pájka. Dále se desky dle požadavků na zrnitost drceného materiálu drtí břitovými drtícími stroji, bubnovými drtiči, kladivovými drtiči apod. Lze využít i tzv. kryogenní drcení, při kterém se využívá změny fyzikálních vlastností materiálu ochlazeného až na teplotu -170 °C. Podchlazené materiály

tekutým dusíkem se následně drtí až s polovičním příkonem drtícího zařízení. Důležité je pomalé drcení, aby se minimalizovala tvorba prachu před separací kovu od plastu. Na hrubo drcený materiál se pak mele např. nožovými mlýny, kulovými mlýny apod. Vzniklá drť se podrobuje některé z technologií separace dle zrnitosti drti. Mezi tyto technologie lze zařadit například *magnetickou separaci*, *elektrostatickou separaci*, *separaci vířivými proudy*, mokrým gravitačním splavem či *pneumatickým fluidním separátorem*. Zpracování výsledné suroviny do čisté formy je pak technologicky možné buď tavením, nebo elektrolytickou rafinací neželezných kovů. [13, 20, 21, 22, 26, 27]

Pneumatický fluidní separátor (suchý splav) odděluje materiály hrubější suché sypké směsi (v řádu milimetrů) na rozdíl od mokrého gravitačního splavu, u kterého se využívá jemnozrnného materiálu. Pracuje na principu rozdílné hustoty plastu a kovu. Separační plocha tvaru pravoúhlého trojúhelníku je buzena pravidelnými kmity a současně profukována proudem vzduchu. Separovaná směs vstupuje na třídící plochu v místě A. Směs se dostává kmitáním k místu B (viz obrázek 3). Částice o malé specifické hmotnosti jsou nadlehčovány procházejícím proudem vzduchu. Tudíž na ně působí v omezené míře kmity separační plochy. Působením těchto dvou faktorů se částice o různé specifické hmotnosti na třídícím sítu rozdělí na jednotlivé složky podle specifické hmotnosti jednotlivých částic a ty vystupují z třídící plochy výstupními hubicemi (C, D, E, F). [27]



Obrázek 3 – Princip pneumatického fluidního separátoru [27]

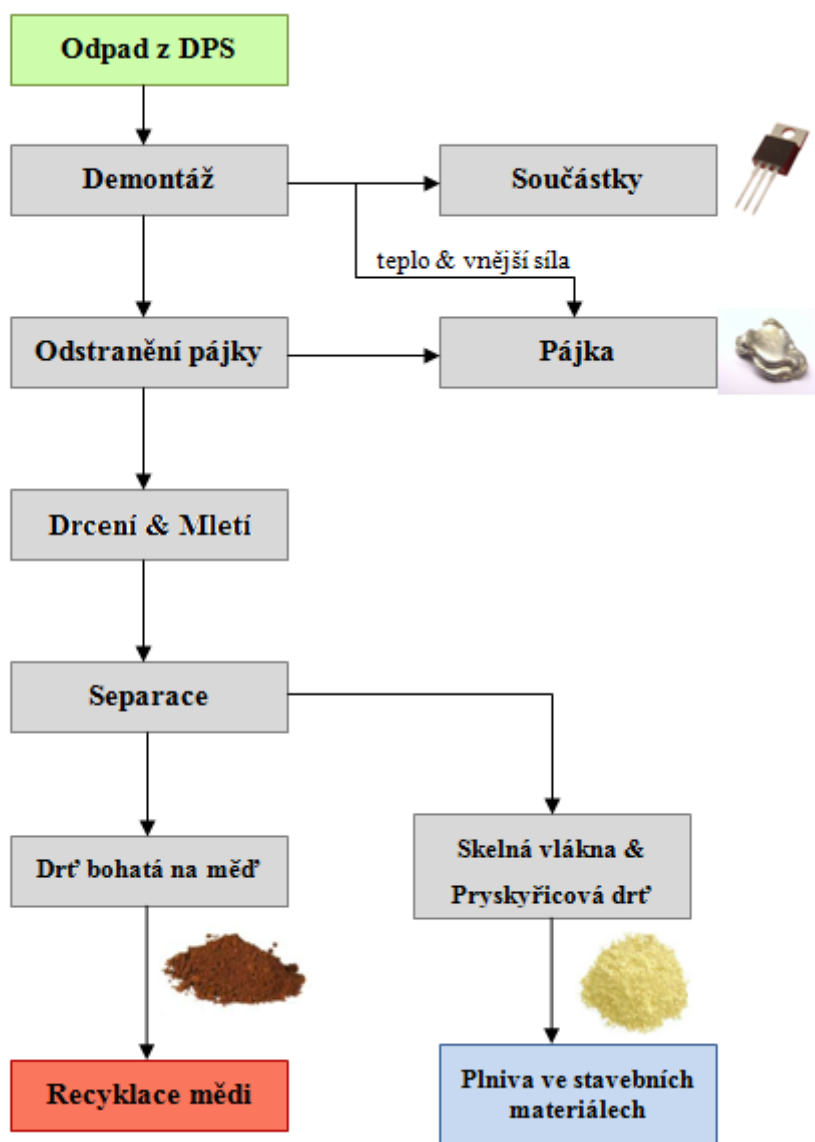
Na obrázku 4 je fluidní separátor, který využívá společnost *Aquatest a.s.*, která má mimo jiné také technologickou linku na recyklaci DPS. S tímto separátorem má firma zkušenosti se separací měděného produktu při zpracování elektrokabelů a vodičů, se separací kovového koncentrátu při zpracování DPS (v kombinaci s elektrodynamickým separátorem) a také i s dočišťováním granulátu z pneumatik [27].



Obrázek 4 – Fluidní separátor [27]

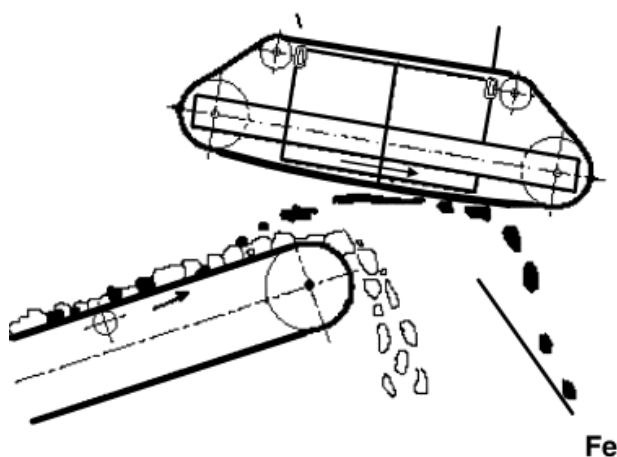


Obrázek 5 – Elektrodynamický separátor – na zpracování DPS [27]



Obrázek 6 – Zjednodušený obecný příklad zpracování DPS [21]

Magnetická separace je založená na rozdílné magnetické susceptibilitě zpracovávaných materiálů. Podle magnetické susceptibility můžeme látky rozdělit na paramagnetické látky, které jsou magnetickým polem přitahované a diamagnetické látky, jež jsou magnetickým polem odpuzované. Silně paramagnetické látky se nazývají feromagnetické látky. Magnetická separace s permanentními magnety se používá i pro oddělení látek s velmi vysokou magnetickou susceptibilitou. Izolace těchto elementů není ani tak ekonomickým přínosem, jako spíš technologickým požadavkem. Obsah těchto látek silně zhoršuje kvalitu kovové složky směsi a navíc způsobuje potencionální riziko vzhledem k pyroforičnosti a jiskřivosti těchto slitin [20, 29].

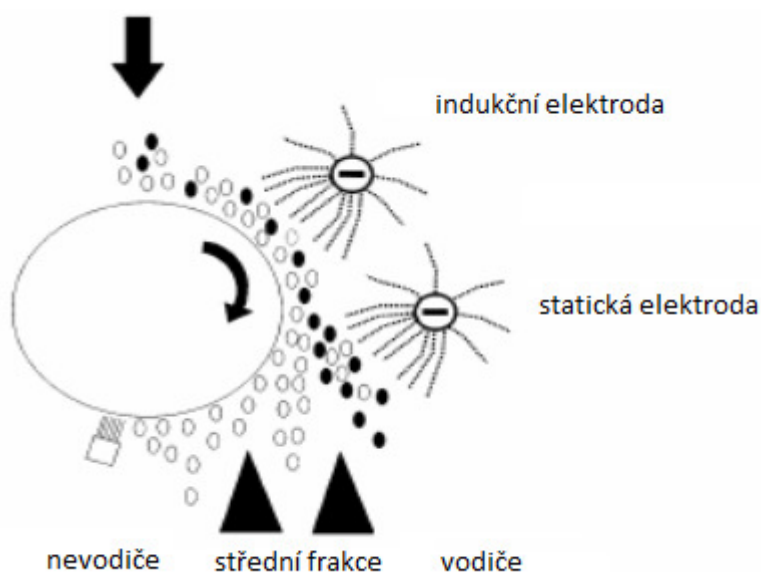


Obrázek 7 – Magnetický separátor [28]

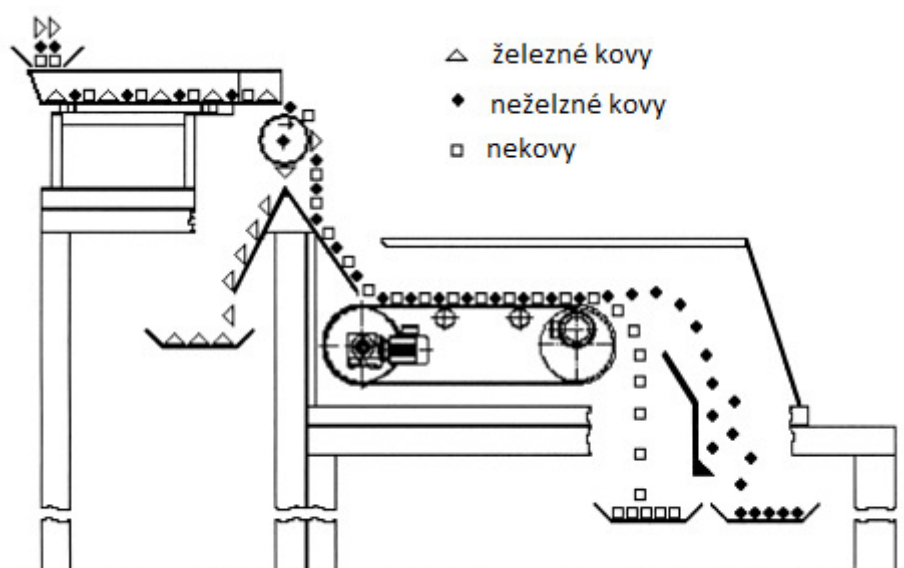
Separátor v elektromagnetickém nebo permanentně magnetickém provedení (princip na obrázku 7) je umístěn nad pásem s odpadem, přičemž vynášení magnetického materiálu může být podélné nebo příčné. Dopravní pás přepravuje materiálovou směs směrem k magnetickému separátoru ve vrchním pásu. Všechny magnetické díly budou přitaženy a pomocí dopravního pásu vyneseny. Nemagnetický přepravovaný materiál sleduje odhazovací parabolu přepravního pásu (není separován). [28]

Elektrostatický separátor odděluje vodivou složku od nevodivé. Tento způsob se využívá pro jemné částice (<1 mm). Zařízení obsahuje dvě elektrody se stejnosměrným elektrickým proudem. První elektroda je indukční (indukuje ve vodivých částicích náboj) a druhá elektroda (statická) tyto nabitě částice přitahuje, čímž mění trajektorii jejich pohybu. Extrémní rozdíly v elektrické vodivosti nebo měrném elektrickém odporu mezi kovy a nekovy poskytuje výborné podmínky pro implementaci tohoto způsobu separace při zpracování jemnozrnného odpadu. Tato metoda se hlavně využívá při získávání mědi a ušlechtilých kovů z DPS. [20] Princip je znázorněn na obrázku 8.

Separace vířivými proudy se také využívá pro oddělení neželezných kovů (Cu, Al, Pb, Zn) z drti. Používá se pro částice větších jak 2 mm. Tyto metody jsou založené na skutečnosti, že v případě přechodu vodivé částice střídavým magnetickým polem se v částici indukují vířivé proudy. Vzájemné působení mezi těmito vířivými proudy a magnetickým polem separátoru má za následek vznik elektrodynamické síly (Lorensova síla), která působí na vodivé částice. V důsledku působení této síly se trajektorie částic neželezných kovů liší od trajektorie nekovových částic (viz. obrázek 9). Parametry ovlivňující Lorensovu sílu jsou velikost částice, tvar částice a poměr elektrické vodivosti k hustotě materiálu. [20].



Obrázek 8 – Elektrostatický separátor [20]



Obrázek 9 – Separátor vířivými proudy [28]

Chemické metody zpracování odpadu z DPS

Chemické metody slouží především k získávání ušlechtilých kovů. Často se jedná o toxicky rizikové metody. Spolu s mechanickými metodami tvoří dva tradiční a nejpoužívanější způsoby recyklace odpadu z DPS. Tyto metody lze dělit na procesy:

- Pyrometalurgie
- Hydrometalurgie
- Jejich kombinace

Pyrometalurgické procesy

Jsou to procesy výroby kovů spočívající ve vytěsňování kovu ze sloučeniny jiným kovem o větší afinitě. Při pyrometalurgických procesech se odpad z DPS taví v plazmových pecích, obloukových pecích, šachtových pecí nebo jiných tavicích zařízeních používaných při výrobě mědi nebo olova při vysokých teplotách za přístupu vzduchu. [23, 30].

Jednou z pyrometalurgických metod k získání ušlechtilých kovů je *extrakce v tavenině olova*. Rozdrcené DPS se dávají přímo do tavicích zařízení, kde se mísí s roztaveným olovem. Plasty vyhoří, železo a část barevných kovů plave na povrchu taveniny a odtud se stahuje. Do roztaveného olova přechází většina ušlechtilých kovů. Tavenina se následně prohání vzduchem, většina olova a obecných kovů zoxiduje a odstraní se jako struska. Zbylá část olova obohacená o drahé kovy se podrobí rafinaci. Získává se tak nejen měď, ale i selen, nikl, tellur, olovo, cín a rtuť. Výhodou procesu je malá náročnost na pracovní sílu a univerzálnost vůči vstupní surovině, nevýhodou pak nepříliš dobrá ekologická šetrnost. [22]

Ušlechtilé kovy se při pyrometalurgické výrobě mědi získávají z anodových kalů vznikajících při elektrolytické rafinaci anodové mědi a z olova při jejich pyrometalurgické rafinaci. Oxidy z části odpadu DPS se při jejich pyrometalurgickém zpracování rozpouštějí v strusku a plasty se spálí. I přes vysokou účinnost získávání ušlechtilých kovů zde existují problémy, které při jejich zpracování vznikají. Za tyto problémy lze považovat:

- Plasty obsažené v odpadu DPS jsou zdrojem znečištění ovzduší. Plasty totiž obsahují brómované zpomalovače hoření a při nedokonalém spalování unikají toxické dioxiny.
- Přítomnost chlóru v plastech může vést ke ztrátě ušlechtilých kovů ve formě jejich chloridů
- Oxidy z keramických částí elektronických komponentů zvyšují množství strusky a tím i ztráty ušlechtilých kovů

[23, 30]

Hlavní předností pyrometalurgických metod je možnost zpracovávat nejen odpad z DPS ale všechny formy OEEZ. Tomuto zpracování nemusí nutně předcházet demontáž součástí obsahující nebezpečné látky, protože v procesu tavení v šachtové peci a následném zpracování odplynů jsou tyto látky zneškodněny. Problematickým jevem při použití této technologie je nutnost vypořádat se s těkavými těžkými kovy, jako je rtuť, kadmium

a selen, které jsou součástí zvláště starých OEEZ a které snadno unikají čistícím systémem odplynů. S touto metodou souvisí také problematika tvorby a následné likvidace dioxinů a furanů, jež vznikají za katalytického působení mědi. Při pyrometalurgickém zpracování OEEZ se drahé kovy obvykle kumulují v měděném regulu (měď je kolektorem drahých kovů). Výtěžnost kovů z vsádky dosahuje 98,5 %, u zlata 99 %. V každém případě není pyrometalurgická část recyklace OEEZ finální koncovkou, ale rafinačním mezistupněm, který většinou předchází elektrolytické rafinaci. [31]

Hydrometalurgické procesy

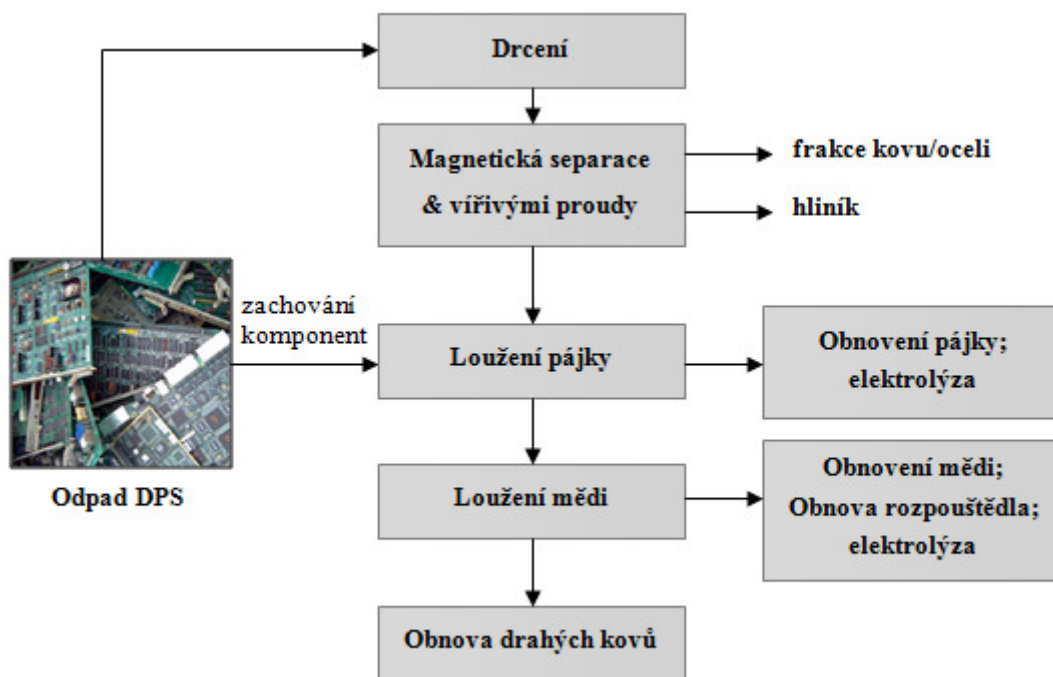
Jsou založené na vhodné úpravě vstupních odpadů a jejich následném loužení vhodným loužicím činidlem. To je volené tak, aby se maximalizovala výtěžnost požadovaných kovů a přitom se minimalizovalo rozpuštění jiných nežádoucích prvků. Po separaci kapalné a pevné fáze se zpracovává výluh metodou extrakce kovů nebo sloučením z roztoku.

Kyanidové loužení je jedním z hydrometalurgických procesů, při kterém je zlato možno selektivně a snadno izolovat loužením zředěnými roztoky alkalických kyanidů. Podmínkou je, aby pozlacený materiál byl obnažen, tedy jeho povrch byl přístupný kontaktu s loužicím roztokem. Loužení má vysokou účinnost a jeho výhodou je fakt, že ostatní kovy nejsou dotčeny. Nejčastěji používané slitiny na bázi mědi, zinku a niklu tak mohou být dále metalurgicky rafinovány, aniž by tyto kovy přecházely do roztoků, ze kterých by musely být složitě izolovány. Nevýhodou je vysoká toxicita použitého činidla. Při správném chemickém zacházení s výluhy je odpadů minimální množství a jsou neškodné. Provozní rizika a potenciální možnost havárie však tento proces činí problematickým. [22]

Dalším příkladem hydrometalurgického procesu je *elektrolýza*. Pokud se při procesu recyklace elektroodpad získá frakce barevných kovů anebo výluh z některého podílu odpadu, zpracovává se elektrolyticky. Roztok ale obvykle obsahuje velké množství kovů (měď, zinek, nikl, kadmium, stříbro, palladium, železo, aj.) a izolace všech složek není ekonomicky možná ani žádoucí. Většinou se elektrolýzou získá podíl mědi, případně niklu a drahé kovy z většiny zůstávají v anodických kalech. Metoda je ekologicky náročná. [22]

Průmyslově se jako nejefektivnější postup uplatnil proces elektrolytické rafinace mědi. Při tomto procesu jsou maximálně využívány jak drahé kovy, tak i obecné kovy získané pyrometalurgickým zpracováním v podobě tzv. blistrové měděné anody. Proces spočívá v elektrolytickém rozpouštění směsné anody v kyselině sírové s následnou depozicí čisté mědi na katodě. Takovýmto způsobem se získá měď o ryzosti 99,9 %. Ta je opět vhodná

pro použití v elektroprůmyslu jako elektrovodná měď. V elektrolytu se kumulují zejména nikl, zinek a kobalt. Z uvedených příměsí se kapalinovou extrakcí a následným odparem a krystalizací vyrábějí sírany využitelné v galvanických procesech. Drahé kovy a některé obecné kovy jako selen a bismut se kumulují v anodovém kalu, který je z procesu elektrorafinace periodicky odebírán a zpracováván. Výstupem je ryzí stříbro, zlato, palladium a selen. [31]



Obrázek 10 – Obecný možný hydrometalurgický postup zpracování DPS [21]

Mezi výhody hydrometalurgické metody oproti pyrometalurgickým patří:

- možnost zpracování materiálů s nízkým i vysokým obsahem žádaných kovů
- procesy probíhají při nízkých teplotách
- dosahují se vyšší vztažnosti jako u pyrometalurgických metod
- nižší provozní náklady a spotřeba energie

Termická separace mědi a plastu

Při termické separaci vodivých měděných cest od nosného plastového materiálu DPS jakožto alternativní metody získávání mědi z DPS se využívá tzv. *tepelného šoku*.

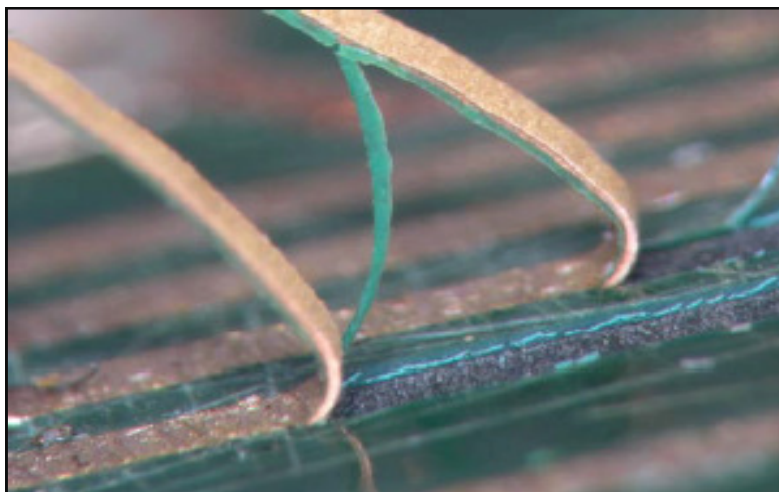
Tato metoda je ekologicky šetrná, avšak energeticky náročná. Proto se v současné době hledají metody pro zjištění optimální technologie [24, 25].

Je principiálně založená na odlišných materiálových konstantách mědi a plastu. Jedná se především o koeficient teplotní délkové roztažnosti (TCE) a teplotně závislý modul pružnosti ve smyku. Působením tepla na desku plošného spoje lze v konečném důsledku dosáhnout oddělení měděné cesty od platové nosné desky. Díky změnám teploty v dece a odlišným teplotním roztažnostem mědi a plastu, předchází separaci vznik vnitřních smykových napětí na rozhraní obou vrstev. Překročení mezních vnitřních napětí (i modulů pružnosti ve smyku) může nastat prasknutí, utržení či poškození vodivé měděné cesty (separaci mědi) v důsledku překonání adhezních sil, jenž oba materiály drží pevně spojené. [32, 33]

Tato metoda není v recyklačních technologiích zatím využívána a je v současné době ve vývoji. Řešení této problematiky termické separace je součástí výzkumného záměru řešeného na Fakultě aplikované informatiky ve spolupráci s Fakultou technologickou Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Separovaný plast z DPS, jenž byl dlouhou dobu dále nevyužíván, byl měl být následně použit s přídavkem speciálního adheziva pro výrobu tepelně-izolačních a antihlukových panelů. [18]

K optimálnímu způsobu provedení tepelného šoku je také důležité znát optimální rozsah teplot a dobu dodávaného tepla. K tomu je potřeba modelovat teplotní pole a zabývat se problémem nestacionárního vedení tepla a matematickým modelem, jenž je náplní třetí kapitoly této práce.

Na obrázku 11 je znázorněn vliv tepelného šoku na vzorek DPS (měď, epoxidová pryskyřice), který v rámci bakalářské práce provedl v laboratorních podmínkách Tomáš Hrubý.



Obrázek 11 – Působení teplotního šoku na DPS [34]

2 STRUKTURA DVOUVRSTVÉ DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

2.1 Struktura DPS [35]

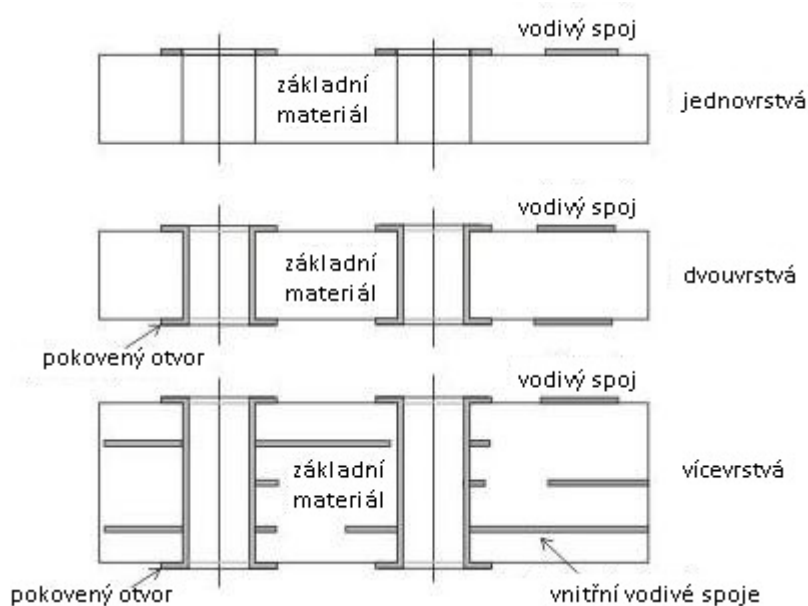
Desky plošných spojů se využívají v naprosto drtivé většině EEZ jako nejpodstatnější součást pro řízení a ovládání daného systému zařízení. Využívají se k mechanickému připevnění a elektrickému propojení elektronických součástek. DPS nahrazují propojení vodičů tenkými vodivými měděnými cestami umístěnými na nosné desce.



Obrázek 12 – Typicky osázená DPS / vodivé cesty na neosázené DPS [36, 37]

DPS můžeme kategorizovat podle počtu propojovacích struktur do třech možností:

- Jednovrstvé
- Dvouvrstvé
- Vícevrstvé



Obrázek 13 – Řezy jednotlivých modelů DPS [35]

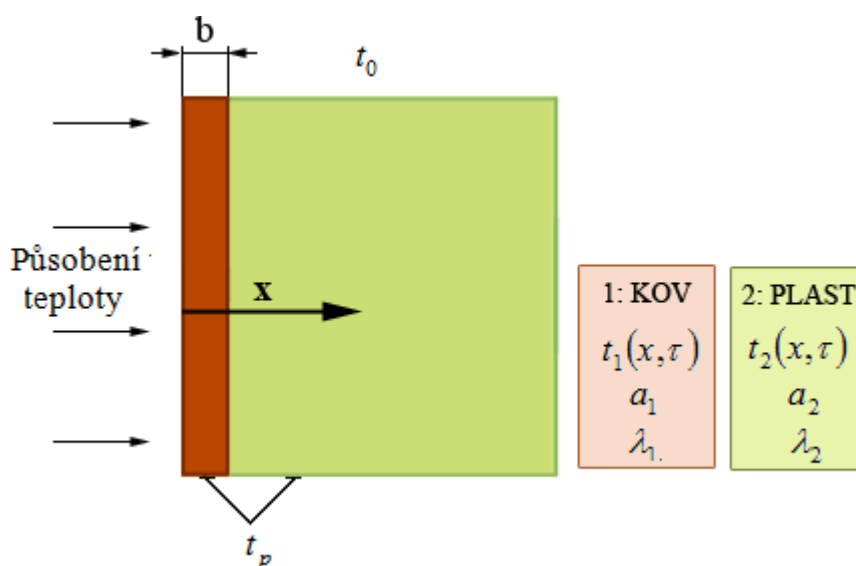
U jednovrstvých DPS jsou součástky umístěny pouze po jedné straně materiálu nosné desky. Jsou vhodné pro jednodušší aplikace. Otvory určené k montáži vývodových součástek nebývají, ale mohou být pokovené pro lepší kontakt součástky s deskou plošných spojů. Základní materiál je jednostranně plátován měděnou fólií.

Dvouvrstvé DPS využívají obě strany k elektrickému propojení součástek – obrázek 11, což výrazně zmenšuje prostor potřebný pro obvod. Vodiče jsou po obou stranách elektricky spojeny průchozím pokovením. Používají se pro náročnější aplikace, které vyžadují podstatně vyšší propojitelnost a integraci součástek. Na osazování se využívají jak vývodové, tak především SMD (Surface Mount Device) součástky, jenž se pájí přímo na povrch plošného spoje.

Stoupající požadavky kladené na nová elektrická zařízení co do technické realizace obvodu, např. zkrácení délky vodičů s cílem zkrátit doby šíření signálu, a požadavky na větší integraci vedly k vývoji vícevrstevných desek. V tomto případě se uvnitř desky plošných spojů vytvářejí další úrovně obvodů. Dosahuje se toho uspořádáním několika tenkých desek plošných spojů nad sebou. Jednotlivé vrstvy vodičů se elektricky propojují rovněž prostřednictvím průchozího pokovení.

2.2 Popis modelu dvouvrstvé DPS

Pro popis matematického modelu dvouvrstvé DPS budu dále uvažovat dvouvrstvou rovinnou desku. Jednu vrstvu bude představovat plastová deska a druhou vrstvou bude kovová vrstva.



Obrázek 14 – Struktura a model dvouvrstvé DPS

Na obrázku 14 je znázorněná struktura dvouvrstvé rovinné desky skládající se z tenké vrstvy kovu o tloušťce b a druhé plastové vrstvy, jejíž tloušťka je mnohem větší než tloušťka kovové vrstvy. Proto budu považovat tuto vrstvu, potažmo celý model za polonekonečný masív s rovinným povrchem neomezených rozměrů. Dá se také říct, že se jedná o dvouvrstvou nekonečnou desku s dokonalou izolací na jednom povrchu [38].

Oba materiály (kov a plast) mají obecně různé fyzikální vlastnosti. Jsou charakteristické především svojí teplotní vodivostí α . Teplotní vodivost je přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti λ a nepřímo úměrná měrné tepelné kapacitě c_p a hustotě materiálu ρ .

Teplota t_p udává počáteční teplotu desky. V okamžiku $\tau = 0$ bude na povrchu první vrstvy ($x = 0$) teplota t_o , která udává teplotu okolního prostředí. Deska je v termodynamické rovnováze. Pro $\tau > 0$ pak teplo proudí do nitra masívu, jehož teplota bude funkcí určité vzdálenosti x a času τ tj. $t_1 = f(x, \tau)$ respektive $t_2 = f(x, \tau)$.

Protože budu vyšetřovat teplotní pole v uvedeném modelu, budu uvažovat:

- působením teploty na levou stranu desky se mění teplota s časem po celém povrchu stejně
- podmínky přestupu tepla v určitém čase jsou také po celém uvažovaném povrchu stejné
- deska zůstává po celou dobu působení teploty rovinná

[38]

Jsou-li splněny tyto podmínky, nemůže z důvodu souměrnosti k rovině kolmé na desku vzniknout teplotní gradient ve směru rovnoběžným s povrchem desky a jedná se tedy o jednorozměrné teplotní pole s teplotním gradientem ve směru kolmém na povrch desky, jak je tomu vyznačeno tlustou šipkou na obrázku 14. [38].

Jednorozměrné teplotní pole je dále podrobněji popsáno v kapitole 3.

3 MATEMATICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

V případě termické separace kovu a plastu tepelným šokem popsané v první kapitole bude třeba pro optimální technologický postup znát rozložení teploty v ohřívané či ochlazované desce. Musíme tedy vyřešit matematický model teplotního pole při nestacionárním sdílení tepla vedením.

3.1 Nestacionární teplotní pole [39]

Nestacionární teplotní pole je prostor, u něhož je v každém místě jednoznačně definována časově proměnná termodynamická teplota t . Nestacionární třírozměrné teplotní pole je dáno skalární funkcí (1).

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

Při popisu nestacionárního pole v tělese jde o popis, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným působením na toto těleso. S nestacionárním vedením tepla se často setkáváme právě u zahřívání nebo ochlazování těles.

3.2 Sdílení tepla vedením [38, 39, 40, 42]

Vedení tepla je jeden ze způsobů přenosu tepelné energie mezi jednotlivými oblastmi hmoty v důsledku teplotního spádu. Uplatňuje se především v pevných látkách, kde je způsobeno chaotickým kmitáním částic kolem svých rovnovážných poloh v krystalické mřížce materiálu. Se zvětšující se teplotou se kmitání zrychluje a částice s vyšší kinetickou energií díky vzájemným srážkám předávají část své kinetické energie částicím s nižší kinetickou energií. Teplo se pak šíří z oblasti vyšší teploty do oblasti nižší teploty. U nestacionárního vedení tepla se teplotní rozdíly se v průběhu času vyrovnávají a těleso se dle nultého zákona termodynamiky blíží tepelné rovnováze.

Teplotní spád je záporný teplotní gradient, který je definován jako vektor, jehož směr udává, ve kterém směru teplota roste nejrychleji a jeho absolutní hodnota udává, jak rychle roste. Teplotní gradient je definován:

$$\nabla t = \left(\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial t}{\partial y}, \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Fourierův zákon vedení tepla definuje intenzitu toku tepla \mathbf{q} dle vztahu (3). Hustota tepelného toku je úměrná teplotnímu gradientu.

$$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z) = -\lambda \nabla t \quad (3)$$

Jestliže se teplota mění pouze ve směru osy x , tak je dle Fourierova zákona tok tepla Φ plochou S kolmou k ose x úměrný velikosti této plochy, záporné hodnotě derivace teploty podle souřadnice a tepelné vodivosti materiálu – dle vztahu (4).

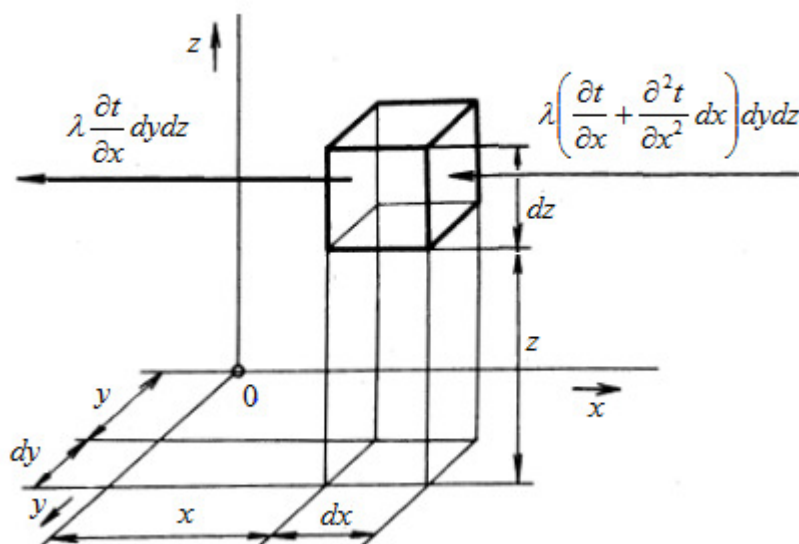
$$\Phi_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} S \quad (4)$$

Tok tepla na jednotku plochy se nazývá *intenzita toku tepla*. Pro intenzitu toku tepla ve směru osy x platí:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (5)$$

3.2.1 Fourier-Kirchoffova rovnice vedení tepla [38]

Řešení nestacionárních polí v pevných tělesech je zvláštní případ řešení energetických bilancí neustálených dějů [39]. Při řešení tepelné bilance elementu tělesa rovinné desky budu uvažovat, že materiál je izotropní a homogenní, v elementu nedochází k uvolňování tepla a teplo, které vnikne do elementu všemi jeho stěnami, se spotřebuje na jeho ohřátí.



Obrázek 15 – Rozměry a poloha elementu [38]

Na obrázku 15 jsou uvedeny pouze tepelné toky ve směru osy x , avšak obdobné tepelné toky jsou i ve směrech os y a z . Avšak tyto směry v této práci neuvažují.

Řešením bilanční rovnice (6) se získá po vyrušení stejných členů a vydělení obou stran rovnice výrazem $\lambda dx dy dz$ neupravenou třírozměrnou Fourier-Kirchhoffovu diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla (7).

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy dz + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right) dy dz - \lambda \frac{\partial t}{\partial y} dx dz + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dy \right) dx dz \\ - \lambda \frac{\partial t}{\partial z} dx dy + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dz \right) dx dy = c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{c_p \rho}{\lambda} \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} \quad (7)$$

3.3 Matematický model jednorozměrného nestacionární teplotní pole

Vzhledem k modelu rovinné desky na obrázku 14, budu dále uvažovat, jak již bylo nastíněno, jednorozměrné nestacionární vedení tepla ve směru osy x . Znamená to, že v této zjednodušené geometrii se vyskytuje pouze jeden teplotní gradient a teplota se mění v daném čase pouze ve směru osy x . Pro popis teplotního pole v desce je potřeba vyřešit Fourier-Kirchhoffovu diferenciální rovnici v souladu s definovanými počátečními a okrajovými podmínkami.

3.3.1 Fourier-Kirchhoffovy rovnice, počáteční a okrajové podmínky

Pro určení teplotního pole v kovové vrstvě 1 resp. plastové vrstvě 2, lze Fourier-Kirchhoffovu rovnici (7) upravit do podoby (8) resp. (9), kde indexy 1 a 2 značí první a druhou vrstvu. První vrstva je určená oblastí $-b < x < 0$ a druhá vrstva oblastí $x > 0$. [4]

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau}(x, \tau) = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}(x, \tau) \quad \begin{matrix} \tau > 0 \\ -b < x \leq 0 \end{matrix} \quad (8)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau}(x, \tau) = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}(x, \tau) \quad \begin{matrix} \tau > 0 \\ x > 0 \end{matrix} \quad (9)$$

Kde:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (10)$$

Pro každou úlohu vedení tepla v tělesech je třeba kromě již specifikovaných geometrických vlastností (tvar, délkové rozměry, apod.) a fyzikálních vlastností (hustota, součinitel tepelné vodivosti, apod.) doplnit Fourier-Kirchhoffovu rovnici o počáteční a okrajové podmínky.

Počáteční podmínky určují počáteční rozložení teplot v tělese. Protože Fourier-Kirchhoffova rovnice (8) resp. (9) obsahuje pouze první derivaci teploty podle času, stačí definovat jedinou počáteční podmínku vztahem (11), jenž vyjadřuje předpoklad počátečního konstantního rozložení teploty v desce. [4, 38]

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_p \quad (11)$$

Okrajové podmínky popisují vzájemné působení mezi tělesem a okolím. Lze je rozdělit na čtyři nejdůležitější: [39, 41]

- 1) Prvního druhu (Dirichletovy podmínky) určují rozdělení teploty na povrchu tělesa v každém časovém okamžiku.
- 2) Druhého druhu (Neumannovy podmínky) určuje podmínky tepelného toku v jednotlivých bodech povrchu tělesa v libovolném časovém okamžiku
- 3) Třetího druhu (Newtonovy podmínky) charakterizuje zákon výměny tepla mezi povrchem a obklopujícím prostředím v procesu zahřívání a ochlazování tělesa.
- 4) Čtvrtého druhu charakterizuje podmínky vedení tepla systémem těles. Uvažuje se zejména rovnost teploty obou vrstev v místě jejich styku.

V uvažovaném modelu máme čtyři okrajové podmínky: [4]

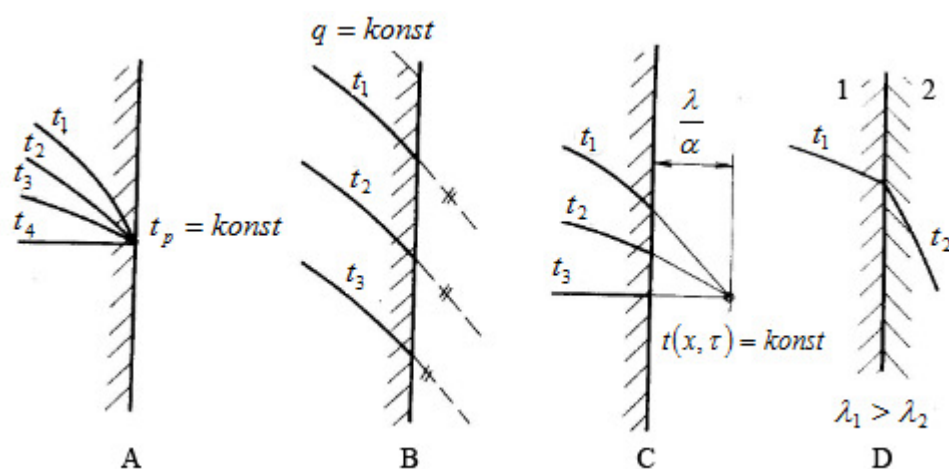
$$t_1(0, \tau) = t_o \quad (12)$$

$$\frac{\partial t_2(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$t_1(b, \tau) = t_2(b, \tau) \quad (14)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(b, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(b, \tau)}{\partial \tau} \quad (15)$$

- Okrajová podmínka prvního druhu (12) charakterizuje dokonalý přestup tepla, kdy se teplota povrchu ustálí prakticky okamžitě na teplotě prostředí t_o .
- Okrajová podmínka druhého druhu (13) předpokládá druhou vrstvu jako polonekonečný masív.
- Okrajové podmínky (14) a (15) jsou čtvrtého druhu a předpokládají dokonalý kontakt v místě styku dvou vrstev s odlišným součinitelem tepelné vodivosti. Musí platit podmínka spojitosti hustot tepelných toků a rovnost teploty obou vrstev v místě jejich styku.



Obrázek 16 – Ukázky okrajových podmínek 1. až 4. druhu [38]

3.3.2 Analytické řešení nestacionárního teplotního pole

Řešení nestacionárního teplotního pole lze provést následujícími způsoby: [38]

- **Analytický**
 - Metoda separací proměnných
 - Metoda pomocí Laplaceova zobrazení
- **Numerický**
 - Diferenční metodou
 - Metodou sítí
 - Metodou konečných prvků
- Experimentálně (na základě analogie teplotní pole s např. elektrickým polem)

V případě složitějšího tvaru tělesa, složitějších počátečních a okrajových podmínkách nebo v případě, kdy materiálové vlastnosti tělesa jsou závislé na fyzikálních parametrech, nelze provést analytické řešení. Proto se buď zanedbají méně významné vlivy jako je tomu v této práci (uvažuji pouze tepelný tok ve směru x , zjednodušení modelu, proměnlivost materiálových vlastností v závislosti na teplotě atd.), nebo lze použít numerické či experimentální metody. Výhoda analytického řešení je v obecnosti platnosti výsledků. Numerické metody jsou vhodnější při řešení vícerozměrného prostoru, při změnách okrajových podmínek a řešení s proměnlivými materiálovými vlastnostmi. Jsou však pracné na sestavení algoritmu a mají sníženou přesnost výsledku danou zvoleným geometrickým krokem. [38, 39]

V této práci bude teplotní pole analytickým řešením dle monografií A. B. Lykova *Teorija teploprovodnosti* [3], které koresponduje i s řešením z díla *Conduction of Heat in Solids* od skotského matematika Carslaw [4].

V praktické části budu v souladu s literaturou [4]. Budu uvažovat polonekonečný masív $-b < x < \infty$, ve kterém je první vrstva definována $-b < x < 0$ a druhá vrstva $x > 0$. Potom pro první vrstvu lze teplotní pole vyjádřit rovnicí (16). Rozložení teplot ve 2. vrstvě je dáno rovnicí (17). [4]

$$\frac{t_1 - t_p}{t_o - t_p} = \sum_{n=0}^{\infty} h^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b + x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) - h \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b - x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) \right] \quad (16)$$

$$\frac{t_2 - t_p}{t_o - t_p} = \frac{2K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=0}^{\infty} h^n \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b + xK_a^{-\frac{1}{2}}}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) \quad (17)$$

Kde pomocné konstanty:

$$h = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \quad (18)$$

$$K_a^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (19)$$

$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (20)$$

Erfc je Gaussova chybová funkce neboli komplementární chybová funkce [42].

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (21)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (22)$$

Uvedený matematický model a jeho analytické řešení použijí pro vytvoření interaktivní aplikace v rámci praktické části této práce.

3.3.3 Vliv vstupních parametrů na průběhu ohřevu a chlazení

Základními vstupními parametry, které mají vliv na průběh ohřevu a chlazení dvouvrstvé desky jsou:

Parametr	Značka	Jednotka
Měrná tepelná kapacita materiálu vrstvy	c_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Hustota materiálu vrstvy	ρ	kg.m^{-3}
Součinitel tepelné vodivosti vrstvy	λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Tloušťka vrstvy 1	b	m
Doba ohřevu (chlazení)	τ	s
Počáteční teplota materiálu	t_p	$^{\circ}\text{C}$
Teplota okolního prostředí	t_o	$^{\circ}\text{C}$

Tabulka 3 – Výčet vstupních parametrů při ohřívání (chlazení)

Měrná tepelná kapacita udává množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň. Hustota materiálu vyjadřuje hmotnost objemové jednotky látky. Součin těchto parametrů, který se vyskytuje ve jmenovateli vztahu (10) udává tepelnou kapacitu jednotkového objemu látky za stálého tlaku [39].

V čitateli vztahu (10) charakterizujícího teplotní vodivost a se vyskytuje součinitel tepelné vodivosti, jenž je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád, přičemž se uvažuje, že se teplo šíří pouze v jednom směru. Vztah (10) tedy vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla v homogenním prostředí (tj. rychlost změny teploty). Teplotní vodivost je přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti λ a nepřímo úměrná měrné tepelné kapacitě a hustotě materiálu. [39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS POUŽITÉHO VÝVOJOVÉHO PROSTŘEDÍ

Pro naprogramování aplikace jsem v první řadě upřednostnil počítačový algebraický systém a s výhodou volil software *Mathematica 8*, který mi byl dostupný ve školní licenci UTB.



Obrázek 17 – Logo softwaru Wolfram Mathematica 8

Mathematica je prostředí, které integruje numerickou a symbolickou matematiku, grafický a dokumentační systém a zajišťuje pokročilé propojení s dalšími aplikacemi (např. Word, Excel, SQL, C, JAVA,...).

První verzi programu Mathematica vyvinula společnost Wolfram Research, Inc., jenž založil v roce 1987 Stephen Wolfram. Přišla v roce 1988 a měla nemalý vliv na způsob využívání PC ve spoustě technických i netechnických odvětví. [43]

Mathematica je silné programové vývojové prostředí. Integruje všechny potřebné sady v jednom produktu. Pro velkou část problému tak obsahuje již implementované funkce, které uživatel může rovnou použít. Přestože je výběr funkcí nepřehledný z mnoha oborů a disciplín, disponuje také programovacím jazykem, díky kterému lze vytvořit vlastní funkce.

K programování v Mathematice lze přistupovat více způsoby:

- Funkcionální programování
- Procedurální programování
- Objektové programování

Mezi klíčové prvky, které bych vyzdvihl je notebookový a dokumentační systém a interaktivní nápověda.

Mathematica notebook zajišťuje dokumentační systém, který zahrnuje intuitivní sazbu matematických výrazů, formátovaného textu, zvuku, grafických prvků, animací či hypertextových odkazů. Notebook je možné převést např. do formátu HTML, TeX, PDF a dalších.

Mezi další z obrovských výhod programu Mathematica je považována její dokumentace a nápověda s pokročilým vyhledáváním, která obsahuje všechny funkce včetně ukázek, rozsáhlý Virtual Book v podobě plně indexovaného notebooku.

V současnosti je Mathematica stále vyvíjena a zdokonalována ve společnosti Wolfram Research, Inc. nejlepšími světovými odborníky pod vedením Stephena Wolframa.

[43, 44]

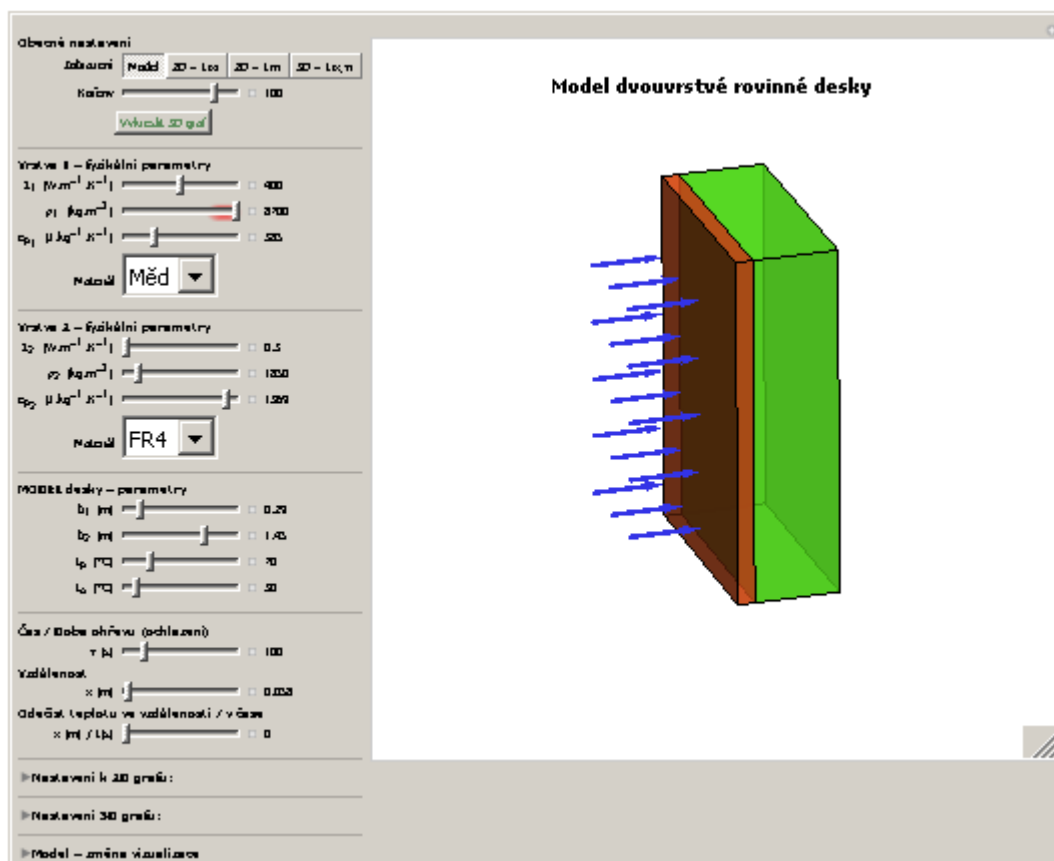
Hlavní využití softwaru Mathematica:

- Zavádění, analýza a vizualizace dat
- řešení rovnic, nerovnic diferenciálních rovnic a minimalizace problémů numericky nebo symbolicky
- výzkum chování numerických modelů a simulací, od jednoduchých regulačních systémů až po srážku galaxií, finančních nebo biologických systémů, chemických reakcí či vlivů na prostředí
- výroba profesionálně kvalitních, interaktivních technických dokumentů pro elektronickou distribuci či tisk
- ilustrace matematických nebo vědeckých konceptů pro studenty
- provádění odborných prezentací a seminářů
- usnadnění rychlého rozvoje engineeringových společností a finančních institucí

[43]

5 POPIS A OVLÁDÁNÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE

V této softwarové aplikaci, kterou jsem vytvořil pro modelování teplotních polí ve dvouvrstvé desce, jsem použil funkci *Manipulate* jakožto základního kamene každé interaktivní aplikace. Manipulate představuje velké množství výkonných interaktivních schopností a umožňuje tak vytvořit rozhraní pro manipulování s parametry v jakémkoliv symbolicky zadaném výrazu.



Obrázek 18 – Celkový pohled na aplikaci

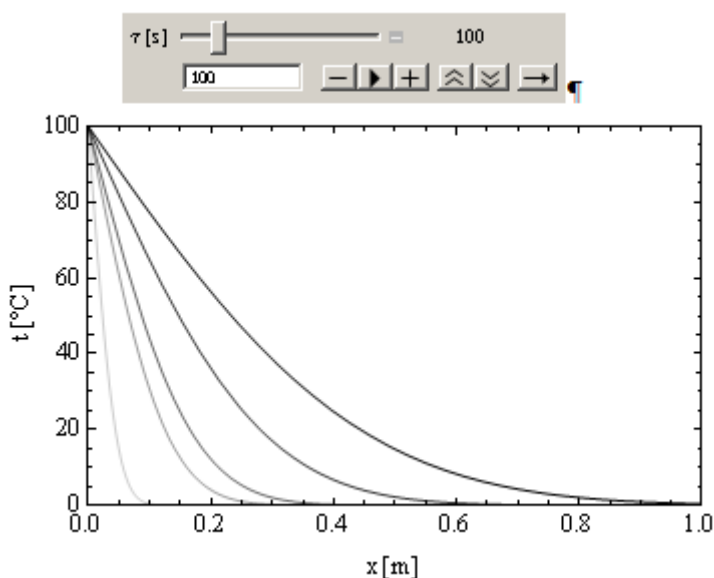
5.1 Princip funkce Manipulate

Příkaz Manipulate má 2 povinné parametry. V prvním parametru je uveden symbolický výraz s určitými parametry, s kterými lze manipulovat pomocí ovládacích prvků, jež jsou definovány v druhém parametru této funkce. Dá se říct, že Manipulate vizuálně rozděluje aplikaci na část prezentační a na část manipulační. Na obrázku 18 lze postřehnout nápadné rozdělení levé části s ovládacími prvky a pravé prezentační části, kde je defaultně po spuštění aplikace zobrazen model dvouvrstvé rovinné desky.

Ve vytvořené aplikaci jsem využil následující ovládací prvky:

1) **Animator** – rozšířený posuvník

Disponuje možností dynamické změny parametru tažením táhla v určitém rozsahu, změnu parametru přímým vepsáním do textového pole a možností animace s požadavky na směr posuvu či rychlost posuvu. Nevýhoda nastává u nevýkonných PC, kde trvá výpočet déle a posuvník, tak ztrácí své kouzlo. Proto také Mathematica poskytuje více řešení pro tento problém. Na obrázku 19 je znázorněn Animator a princip plynulé změny grafu teplotního tažením táhla představující změnu času τ .



Obrázek 19 – Princip Animatoru

2) **SetterBar** – reprezentuje řadu tlačítek představující výběr pouze jedné z možností

Ve vytvořené aplikaci představuje zvolení zobrazení v hlavním zobrazovacím okně

3) **Button** – klasické tlačítko

Do aplikace jsem ho umístil například pro vygenerování grafu do externího souboru nebo kvůli náročnějšímu vygenerování 3D grafu jako spouštěč výpočtu.

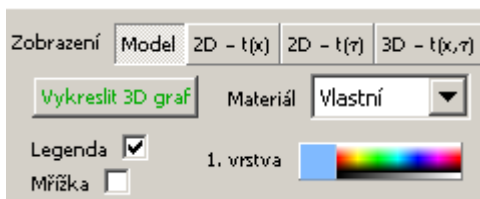
4) **PopupMenu** – rozbalovací nabídka

V aplikaci jsem jej využil pro výběr fyzikálních vlastností vybraných materiálů.

5) **Checkbox** – zaškrtačací políčko

Binární logikou rozhoduje o zobrazení či skrytí například souřadnicových os, legendy grafu, mřížky grafu či výplně grafu.

6) **ColorSlider** – představuje výběr barvy s dynamickým náhledem vybrané barvy.



Obrázek 20 – Ovladače 2) až 6)

5.2 Ovládání aplikace

Vytvořená aplikace umožňuje:

- Základní vizualizace 3D modelu dvouvrstvé desky
 - Zobrazení/skrytí souřadnicových os
 - Změna barev vrstvy a jejich průhlednost
 - Barevné znázornění ohřívání/ochlazování
 - Export modelu (JPG)
- 2D – teplotní pole – funkce $t(x)$
 - Dynamická změna materiálu, času ohřevu a parametrů modelu
 - Dynamický odečet teploty v daném čase
 - Zobrazení/skrytí legendy a mřížky grafu
 - Exportovat funkci – graf (JPG), data (TXT)
 - Dynamická změna barev křivek
- 2D – teplotní pole – funkce $t(\tau)$
 - Dynamická změna materiálu, času ohřevu, měřeného místa v desce
 - Dynamický odečet teploty v daném místě
 - Dále obdobně jako u předchozího grafu
- 3D – teplotní pole – funkce $t(x, \tau)$
 - Graf se vypočítá, vygeneruje a zobrazí až po stisku tlačítka
 - Lze nastavit výplň plochy teplotní mapou nebo pouze síť
 - Nastavitelné vzorkování grafu – nízké, střední a vysoké
 - Export grafu (JPG), nastavení barev u síťového grafu
- Zvolení počtu kořenů transcendentní rovnice, pro které se má výpočet provést
- Výběr z několika přednastavených materiálů či navolení vlastního materiálu
- Ošetření chyb, které se uživatel může dopustit – nastavení stejných vlastností obou vrstev, nastavení nulových fyzikálních parametrů vrstev, nastavení nulové tloušťky vrstev či export 3D grafu, který ještě nebyl vygenerovaný.

Ačkoliv není aplikace sama o sobě příliš rozsáhlá a komplikovaná, při tvorbě aplikace jsem kladl důraz především na přehlednost a intuitivní ovládání, aby byla aplikace použitelná jak pro ty, co jsou s touto problematikou obeznámeni, tak pro začínající uživatele a studenty, kteří se s touto problematikou teprve seznamují. Aplikace také disponuje tzv. *Tooltipy* (zobrazení popisku při najetí kurzorem myši) u téměř každého názvu ovladače.

5.2.1 Nastavení modelu

Při vytváření modelu, u kterého chceme vyšetřovat teplotní pole, musíme provést následující kroky:

1) Nastavení fyzikálních parametrů vrstev

Nastavení lze realizovat pomocí posuvníků nebo textového pole. Fyzikální parametry jsou λ_1, c_{p1} a ρ_1 pro první vrstvu a λ_2, c_{p2} a ρ_2 pro druhou vrstvu. Lze také vybrat jeden z přednastavených materiálů.

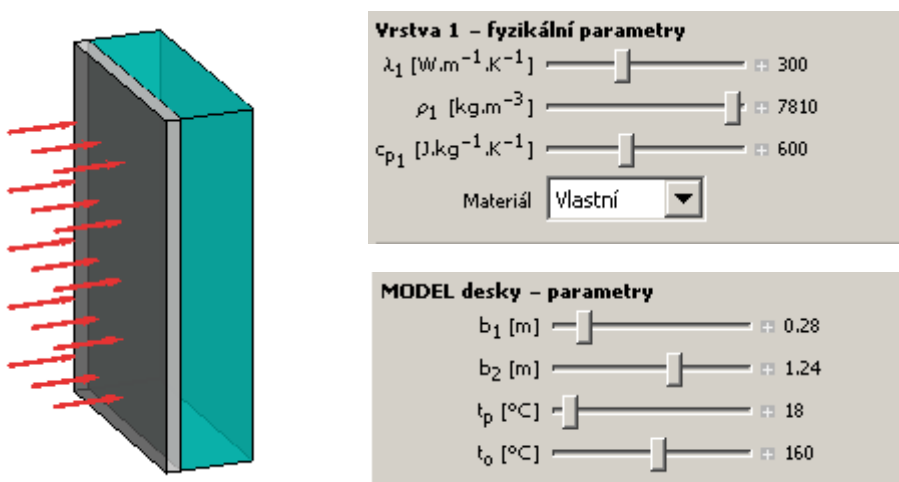
2) Nastavení geometrických parametrů vrstev

Zde se jedná pouze o nastavení tloušťky vrstev b_1 a b_2 .

3) Nastavení počáteční teploty vrstvy a teploty okolního prostředí

Pro nastavení počáteční teploty t_p a teploty prostředí t_o lze opět využít posuvníku nebo textového pole, kde není teplota omezena intervalem. Porovnání obou teplot udává, zda se jedná o ochlazení nebo o ohřev desky. To je vizuálně znázorněno šipkami.

Již během nastavování hodnot lze okamžitě vidět změny na modelu desky.



Obrázek 21 – Ovládací prvky a ukázka nastaveného modelu

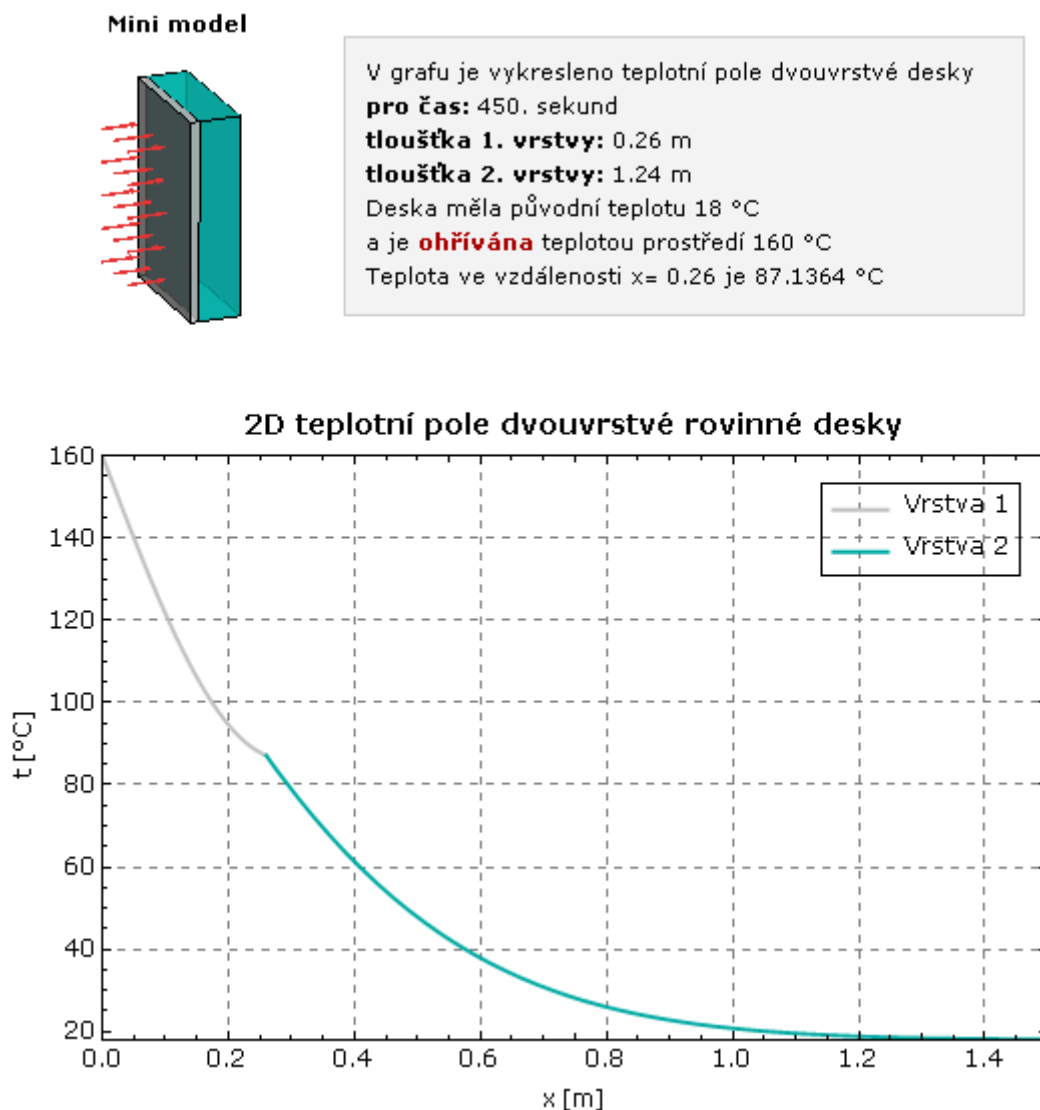
5.2.2 Vyšetřování teplotních polí

V aplikaci je několik možností zobrazení teplotního pole:

- 2D- $t(x)$
- 2D- $t(\tau)$
- 3D- $t(x, \tau)$

První možností je zobrazení funkce $t(x)$ při parametru času τ . Při této volbě lze vyšetřovat teplotu napříč celou tloušťkou desky při daném čase. V tomto módu lze dynamicky měnit veškeré vlastnosti a parametry vrstev, počáteční teplotu i teplotu okolí a především nastavení času ohřevu, pro který chceme teplotní pole zobrazit.

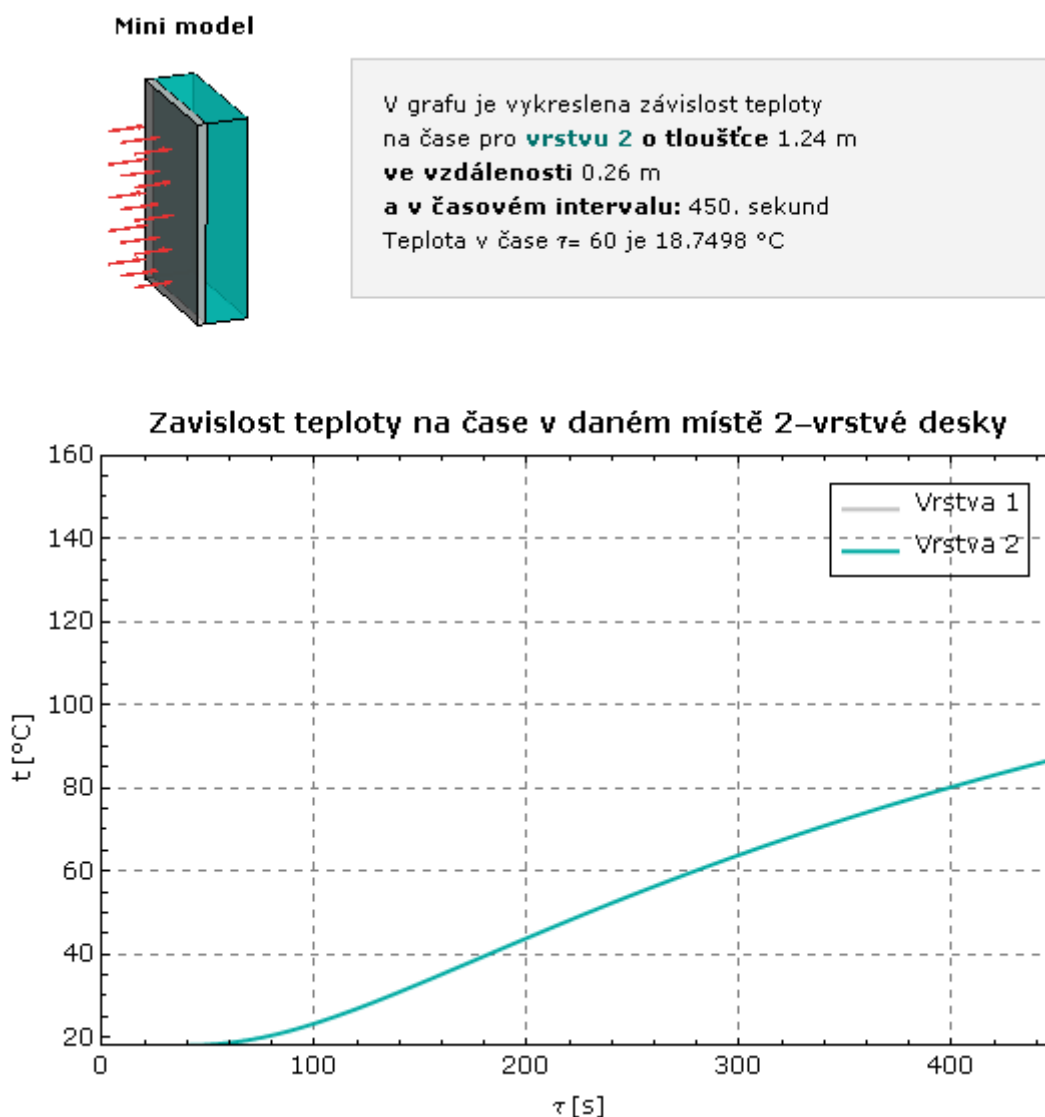
Posuvník odečtení teploty umožňuje výpis hodnoty teploty v libovolném místě desky.



Obrázek 22 – Pohled při výběru zobrazení 2D - $t(x)$

Druhou možností je zobrazení funkce $t(\tau)$ při parametru vzdálenosti x . Při této volbě lze vyšetřovat teplotu napříč celý časovým intervalem v daném místě desky. V tomto módu lze také dynamicky měnit veškeré dostupné vlastnosti i posuvník nastavení vzdálenosti, pro kterou chceme teplotní pole zobrazit. Rovněž lze i v tomto zobrazení použít posuvník odečtení teploty, který zde umožňuje vypsát přesnou hodnotu teploty v libovolném čase.

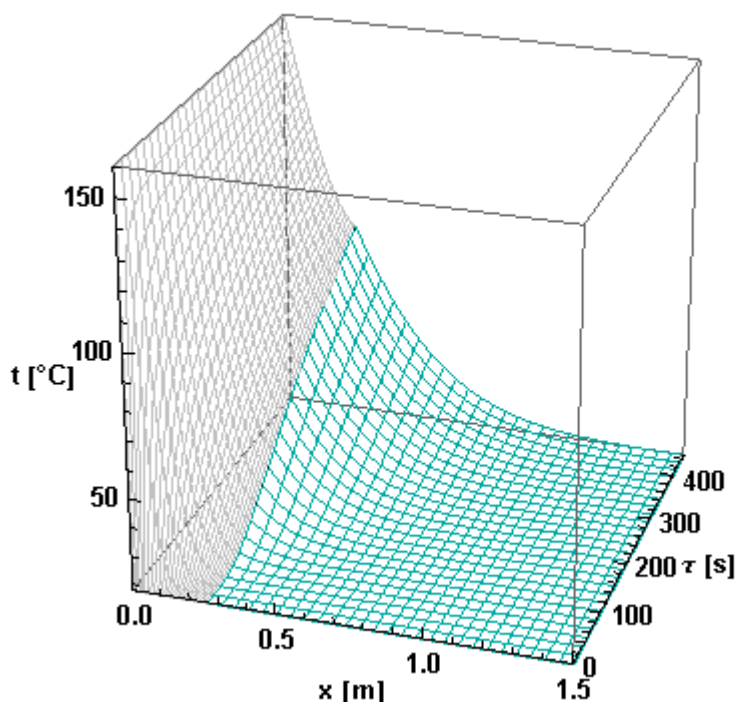
Při změně volby vzdálenosti, ve které požadujeme teplotu vyšetřovat, se mění automaticky barva křivky v grafu v závislosti na tom, zda se jedná o místo ve vrstvě 1 nebo o místo ve vrstvě 2.



Obrázek 23 – Pohled při výběru zobrazení 2D - $t(\tau)$

V předcházejících zobrazení je možnost vygenerování externího textového souboru, který obsahuje souřadnice grafů. Lze tak data použít i v jiných programech. To lze provést tlačítkem „Exportovat data“.

Třetí poslední možností je zobrazení plochy dvourozměrné funkce $t(x, \tau)$ při parametru. Tato volba zobrazí plochu teplotního pole. V tomto módu lze opět dynamicky měnit veškeré dostupné vlastnosti. Ovšem s rozdílem, že po každé změně je nutné kliknout na tlačítko „Vykreslit 3D graf“. U toho módu zobrazení je možnost nastavení míry vzorkování a možnost výplně teplotní mapou. Tyto možnosti mohou z důvodu větší náročnosti ovlivnit prodlevu zobrazení grafu.



Obrázek 24 – Ukázka zobrazení 3D grafu

Posledním nastavením je nastavení počtu kořenů transcendentní rovnice (počet členů sumy). Tento počet ovlivňuje přesnost výpočtu, ale také výrazně prodlužuje dobu výpočtu.

Možné chyby, kterých se uživatel může dopustit, jsou ošetřeny a oznámeny uživateli stylem na obrázku 25.

Nelze nastavit u obou vrstev stejné vlastnosti nebo hodnoty c_p , λ , ρ nesmí být nulové !

Obrázek 25 – Ukázka chyby v aplikaci

6 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI APLIKACE

6.1 Zadání kontrolního příkladu

Počáteční teplota desky: $t_p = 18\text{ °C}$
 Teplota okolního prostředí: $t_o = 160\text{ °C}$
 Doba ohřevu: $\tau = 100\text{ s}$

VRSTVA 1

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_1 = 300\text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$
 Měrná tepelná kapacita: $c_{p1} = 600\text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$
 Hustota: $\rho_1 = 7810\text{ kg.m}^{-3}$
 Tloušťka: $b_1 = 0,15\text{ m}$

VRSTVA 2

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_2 = 20\text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$
 Měrná tepelná kapacita: $c_{p2} = 740\text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$
 Hustota: $\rho_2 = 1900\text{ kg.m}^{-3}$
 Tloušťka: $b_2 = 0,10\text{ m}$

6.2 Řešení příkladu a jeho porovnání s aplikací

Pro ověření jsem vycházel ze vztahu (16) a (17). Výpočet teplot do tabulky 3 jsem provedl pro první vrstvu v intervalu $\langle 0; 0,15 \rangle$ po $0,015\text{ m}$ a pro druhou vrstvu v intervalu $\langle 0,15; 0,25 \rangle$ po kroku $0,01\text{ m}$.

Vrstva 1		Vrstva 2	
Vzdálenost [m]	Teplota [°C]	Vzdálenost [m]	Teplota [°C]
0	160	0,15	63,992
0,015	145,706	0,16	60,663
0,030	131,744	0,17	57,518
0,045	118,435	0,18	54,451
0,060	106,078	0,19	51,758
0,075	94,941	0,20	49,132
0,090	85,251	0,21	46,668
0,105	77,194	0,22	44,360
0,120	70,911	0,23	42,202
0,135	66,493	0,24	40,188
0,150	63,987	0,25	38,311

Tabulka 4 – Tabulka vypočtených hodnot

Ukázka výpočtu:

Příklad výpočtu teploty pro vzdálenost 0,105 m a pro vzdálenost 0,25 m. Použil jsem vztah (16) a upravil jsem jej do vztahu (23) resp. pro druhou vrstvu jsem využil vztahu (17) a upravil do vztahu (27):

$$t_1 = \sum_{n=0}^{100} h^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b+x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) - h \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b-x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) \right] (t_o - t_p) + t_p \quad (23)$$

Kde:

$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} = \frac{300}{20} \sqrt{\frac{20 \cdot 7810 \cdot 600}{300 \cdot 1900 \cdot 740}} \Rightarrow K_\varepsilon = 7,071 [-] \quad (24)$$

$$h = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} = \frac{1 - 7,071}{1 + 7,071} \Rightarrow h = -0,752 [-] \quad (25)$$

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_{p1}} = \frac{300}{7810 \cdot 600} \Rightarrow a_1 = 64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (26)$$

Pak:

$$t_1 = 142 \sum_{n=0}^{100} (-0,752)^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)0,15 - 0,045}{2\sqrt{64 \cdot 10^{-6} \cdot 100}} \right) - (-0,752) \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)0,15 + 0,045}{2\sqrt{64 \cdot 10^{-6} \cdot 100}} \right) \right] + 18$$

$$t_1 = 77,194 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = \frac{2K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=0}^{100} h^n \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)b + xK_a^{-\frac{1}{2}}}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) (t_o - t_p) + t_p \quad (27)$$

Kde:

$$K_a^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 7810 \cdot 600}{300 \cdot 1900 \cdot 740}} \Rightarrow K_a^{-\frac{1}{2}} = 0,471 [-] \quad (28)$$

Pak:

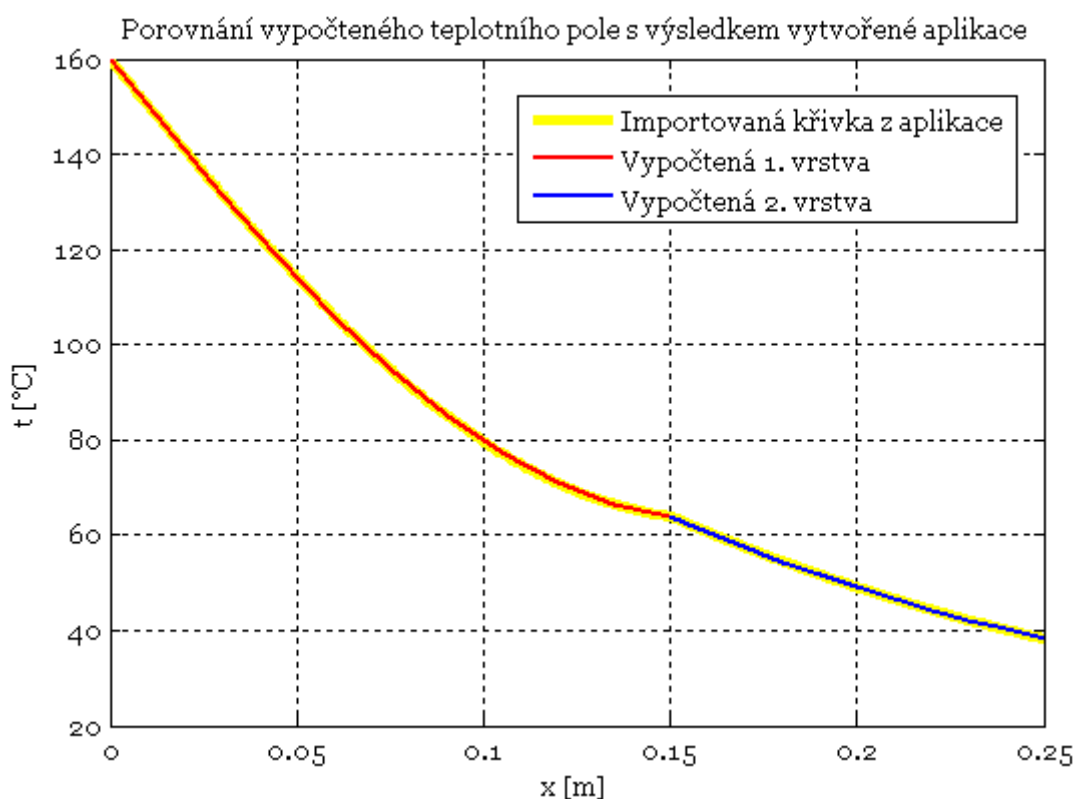
$$t_2 = \frac{2 \cdot 7,071}{1 + 7,071} \sum_{n=0}^{100} (-0,752)^n \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)0,15 + (0,25 - 0,15) \cdot 0,471}{2\sqrt{64 \cdot 10^{-6} \cdot 100}} \right) (160 - 18) + 18$$

$$t_2 = 38,311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota ve vzdálenosti 0,105 m je 77, 194 °C. Teplota ve vzdálenosti 0,25 m je 38,311 °C.

Grafické řešení příkladu:

Pro grafickou prezentaci řešení a jeho porovnání s výsledkem vytvořené aplikace jsem využil softwaru MATLAB. Ve vytvořené aplikaci jsem otestoval exportování grafu. Jeho souřadnice jsem tak přenesl do tabulkového procesoru MATLABu, kde jsem vykreslit tuto křivku a vypočtené hodnoty z tabulky 4. Výsledek je na obrázku 26.



Obrázek 26 – Grafické řešení a porovnání kontrolního příkladu s aplikací

Zhodnocení výsledků a porovnání s aplikací:

Ve vzdálenosti 0,105 m jsem vypočetl teplotu 77,194 °C. Ve vzdálenosti 0,25 m teplotu 38,311 °C.

Odečtením hodnot teplot z aplikace jsem dospěl pro vzdálenost 0,105 m k hodnotě 77,213 °C a pro 0,25 m k hodnotě teploty 28,270 °C.

Hodnoty se liší pouze nepatrně a to především díky zaokrouhlení při výpočtu.

Na základě grafického řešení na obrázku 26 se tedy dá konstatovat, že kontrolní výpočet a jeho grafické řešení koresponduje s řešením vytvořené aplikace, tudíž se aplikace jeví jako správná.

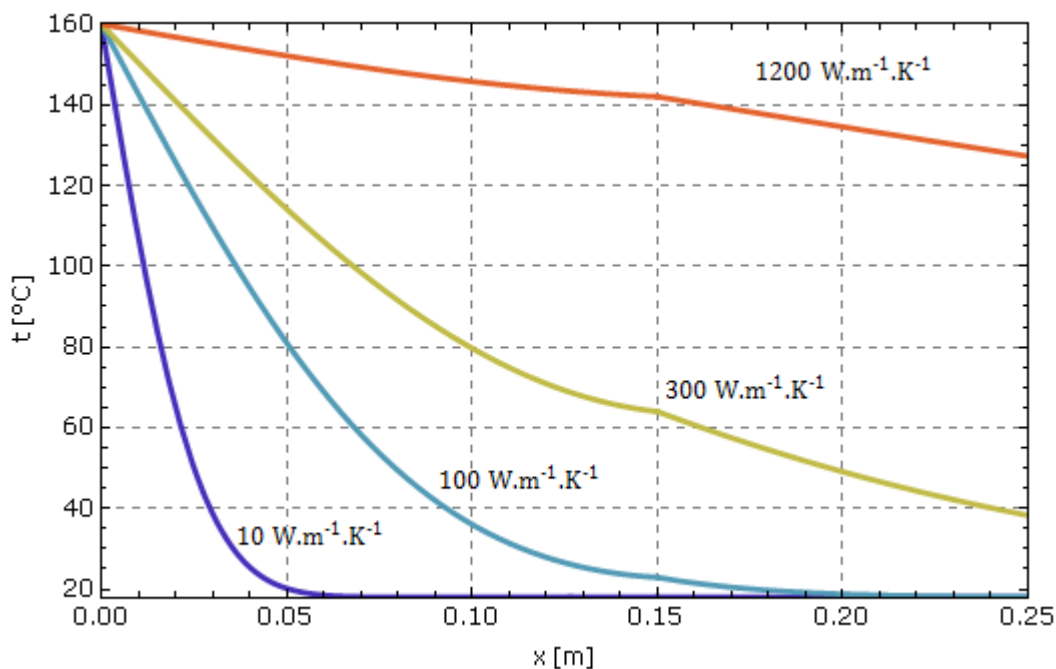
7 POSOUZENÍ VLIVU HLAVNÍCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH OHŘEVU A CHLAZENÍ POMOCÍ VYTVOŘENÉ APLIKACE

Mezi hlavní parametry ovlivňující průběh ohřevu a chlazení dvouvrstvé desky plošných spojů patří veličiny popsané v tabulce 3 kapitoly 3.3.3. V následujících odstavcích posoudím a znázorním vliv hlavních parametrů na průběh ohřevu, avšak analogicky lze principy vztáhnout i na průběh chlazení.

7.1 Vliv fyzikálních vlastností materiálu

V případě ohřívání znamená větší teplotní vodivost λ , že ve stejné vzdálenosti a ve stejném čase bude teplota větší než by způsobila menší teplotní vodivost v totožné vzdálenosti a čase. Tedy do určitého místa v daném čase se tepelná energie působící na těleso dostane rychleji při větší tepelné vodivosti. To lze ukázat pomocí vytvořené aplikace obrázkem 27, kde jsou porovnány čtyři různé tepelné vodivosti první vrstvy λ_1 při parametrech:

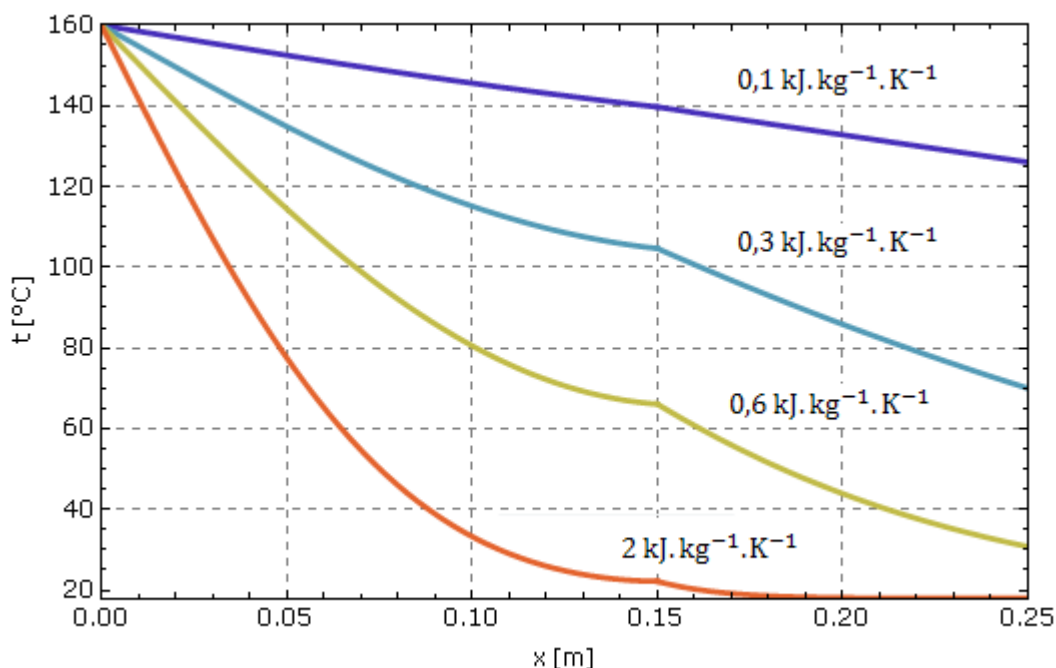
λ_1 – proměnná	$\lambda_2 = 20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_o = 160 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_{p1} = 600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_{p2} = 740 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_p = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_1 = 7810 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_2 = 1900 \text{ kg.m}^{-3}$	$\tau = 100 \text{ s}$
$b_1 = 0,15 \text{ m}$	$b_2 = 0,10 \text{ m}$	



Obrázek 27 – Porovnání teplotních polí při změně tepelné vodivosti λ_1

Naopak v případě zvětšování měrné tepelné kapacity první vrstvy c_{p1} klesá rychlost změny teploty resp. rychlost změny tepelného obsahu (viz obrázek 28). Uvažované parametry:

$\lambda_1 = 300 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\lambda_2 = 20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_o = 160 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_{p1} - \text{proměnná}$	$c_{p2} = 740 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_p = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_1 = 7810 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_2 = 1900 \text{ kg.m}^{-3}$	$\tau = 100 \text{ s}$
$b_1 = 0,15 \text{ m}$	$b_2 = 0,10 \text{ m}$	

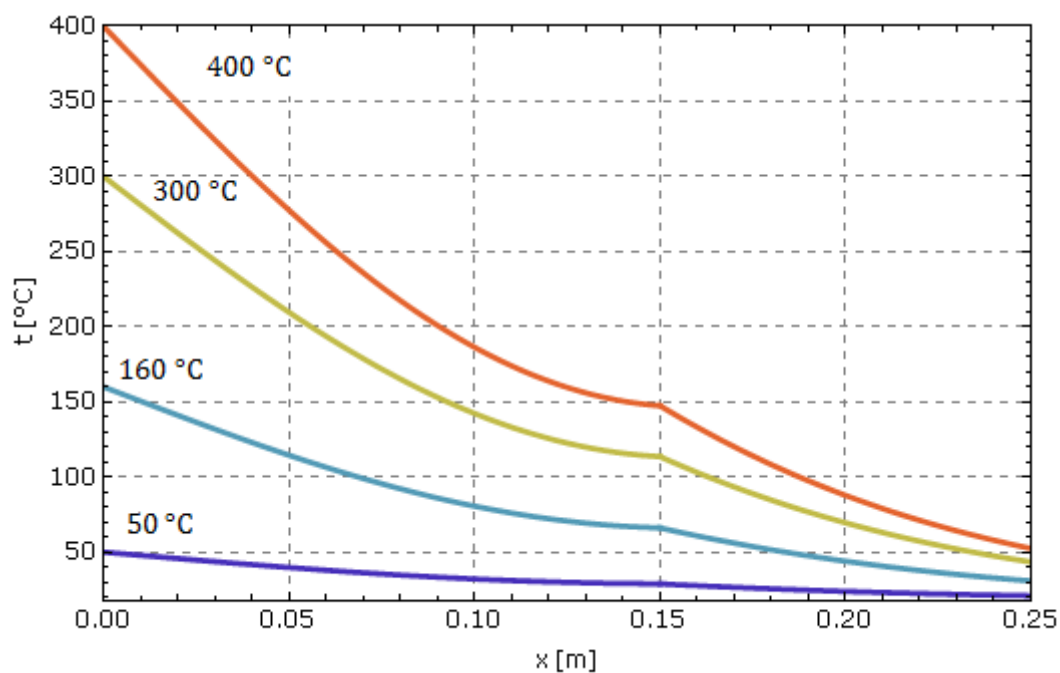


Obrázek 28 – Porovnání vlivu změny tepelné kapacity c_{p1} při ohřevu

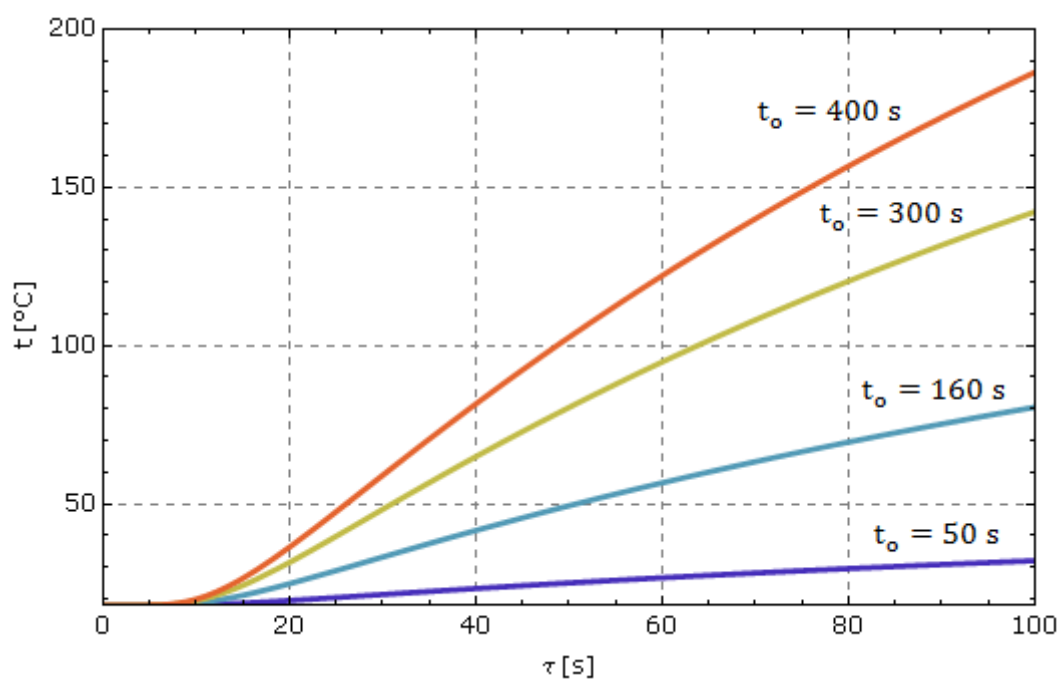
7.2 Vliv změny teplotního rozdílu, tloušťky vrstvy a doby ohřevu

Průběh změny teplotního pole při ohřívání a chlazení desky také ovlivňuje teplotní rozdíl okolního prostředí a počáteční teploty desky. Obrázek 29 znázorňuje čtyři různé hodnoty teplot okolního prostředí t_o . Je evidentní, že v daném místě desky za stejnou dobu ohřevu bude tím větší teplota, čím větší bude teplota okolního prostředí. Na obrázku 30 je znázorněn průběh teploty v místě $x = 0,10 \text{ m}$ za dobu ohřevu $\tau = 100 \text{ s}$ pro různé teploty okolního prostředí. Uvažované parametry pro obrázek 29 a obrázek 30:

$\lambda_1 = 300 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\lambda_2 = 20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_o - \text{proměnná}$
$c_{p1} = 600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$c_{p2} = 740 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$t_p = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_1 = 7810 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_2 = 1900 \text{ kg.m}^{-3}$	$\tau = 100 \text{ s}$
$b_1 = 0,15 \text{ m}$	$b_2 = 0,10 \text{ m}$	



Obrázek 29 – Porovnání různých teplot okolního prostředí t_o při zahřívání

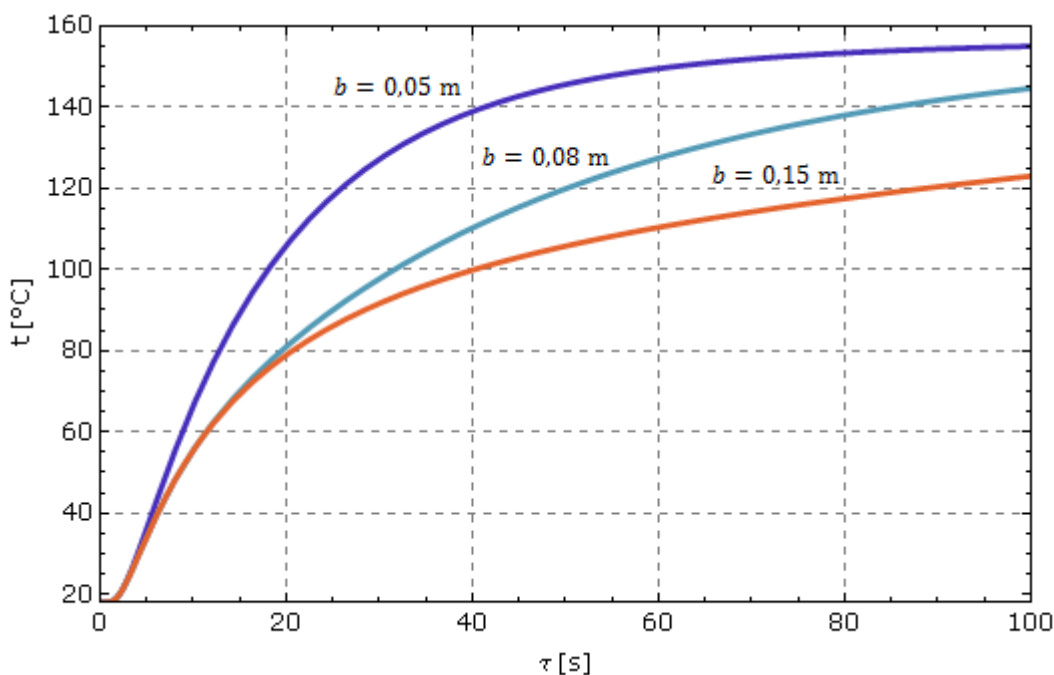


Obrázek 30 – Závislost teploty na čase v místě desky 0,10 m

Obrázek 31 ilustruje závislost teploty na čase v místě $x = 0,04$ m pro 3 různé tloušťky první vrstvy. Z toho obrázku vyplývá, že se zmenšováním tloušťky vrstvy se v místě x dosáhne teploty okolního prostředí za kratší čas.

Uvažované parametry pro obrázek 31:

$\lambda_1 = 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda_2 = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$t_o = 160 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_{p1} = 600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$c_{p2} = 740 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$t_p = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_1 = 7810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_2 = 1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\tau = 100 \text{ s}$
b_1 – proměnná	$b_2 = 0,10 \text{ m}$	



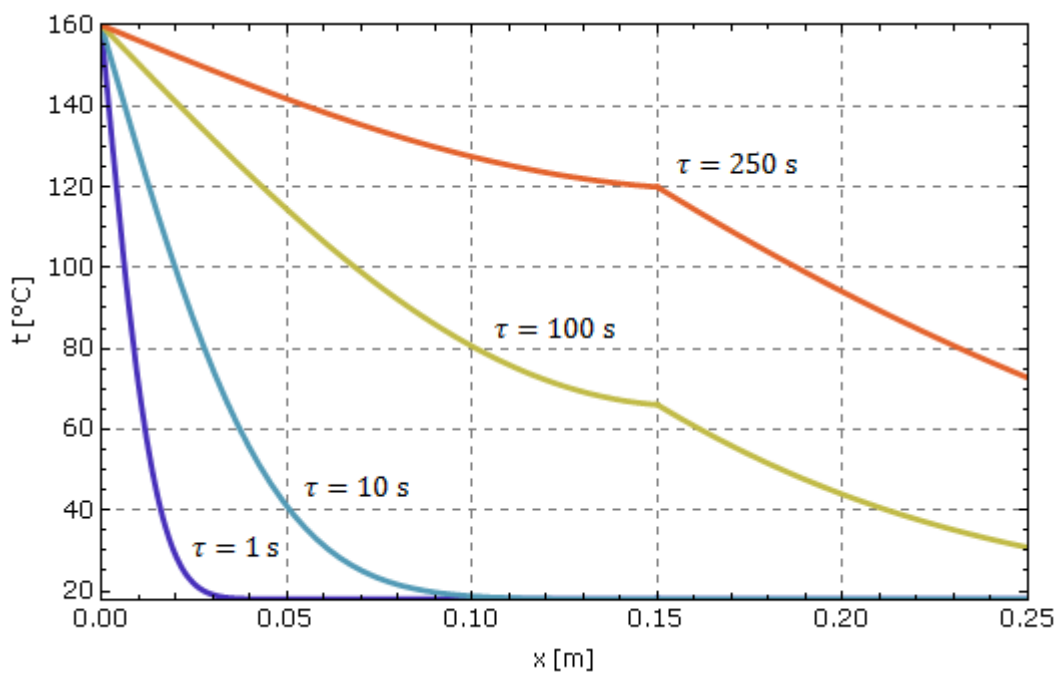
Obrázek 31 – Závislost teploty na čase v místě desky 0,04 m v průběhu ohřevu

Optimální dobu ohřevu bychom mohli zjistit prodloužením časového intervalu doby ohřevu. Zjistili bychom, za jak dlouho dosáhneme požadované teploty v určitém místě desky. Pro uvedený obrázek 31 bychom zjistili, že pro tloušťku vrstvy 0,05 m by byla ve vzdálenosti 0,04 m teplota okolního prostředí (160 °C) v čase cca 150 s. Pro 0,08 m až přibližně ve 300 s. A pro 0,15 m v čase cca. 700 s.

V neposlední řadě má také zásadní vliv na průběh ohřevu doba ohřevu τ . Závislost teploty na vzdálenosti při různých časech ohřevu je na obrázku 32. Tento graf symbolizuje, že se zvyšující se dobou ohřevu se zvyšuje množství přijaté tepelné energie. S časem se tak teplo dostává dále do nitra desky a postupně se tak ohřívá celá deska napříč její tloušťkou.

Uvažované parametry pro obrázek 32:

$\lambda_1 = 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda_2 = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$t_o = 160 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_{p1} = 600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$c_{p2} = 740 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$t_p = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_1 = 7810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_2 = 1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	τ – proměnná
$b_1 = 0,15 \text{ m}$	$b_2 = 0,10 \text{ m}$	



Obrázek 32 – Průběh teploty v průběhu ohřívání při různých časech ohřevu

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci se zabývám především popisem a výpočtem nestacionárních teplotních polí v rovinné desce složené ze dvou vrstev symbolizující zjednodušený model desky plošného spoje. Také se zde zabývám recyklací elektroodpadu potažmo recyklací desek plošných spojů. Kvůli obrovskému kvantu toho odpadu jsou recyklační technologie stále ve stádiu hledání environmentálně i ekonomicky nejvhodnější metody. Proto jsem zde rozvedl problematiku elektroodpadu včetně odpovídajících legislativ a naléhavost řešení problému s neustále se zvyšujícím se množstvím elektroodpadu.

V první části práce jsem popsal nejpoužívanější metody recyklace toho druhu odpadu od možností dekompozice desek plošných spojů přes jejich další úpravy (drcení, mletí, ...) až k samotné separaci kovové složky a plastové složky. Popsal jsem také metodu termické separace tenké měděné fólie od plastové nosné desky jako alternativní metody recyklace mědi a plastu.

Hlavní náplní práce bylo modelování průběhu ohřevu a chlazení dvouvrstvé desky při tomto ději. Pro popis teoretického pozadí metody termické separace se opírám zejména o teorii nestacionárního vedení tepla ve vícevrstvé rovinné desce. Konkrétně pro model desky plošného spoje jsem využil nestacionárního vedení tepla v polonekonečném masívu.

V práci jsem také popsal použitý matematický model včetně uvažovaných počátečních a okrajových podmínek. Tohoto matematického modelu jsem dále využil pro tvorbu softwarové aplikace.

Protože je potřeba v praxi pro optimální technologický proces znát teplotu, na kterou musí být deska ohřátá resp. ochlazená a její dobu ohřevu resp. dobu chlazení, vytvořil jsem v programu Wolfram Mathematica 8 softwarovou interaktivní aplikaci pro vizualizaci teplotního pole. Tato vizualizace dokáže poskytnout údaje o rozložení teploty v neměřitelných místech desky.

Po vytvoření aplikace jsem analytickým výpočtem teplotního pole ověřil na kontrolním příkladu správnost numerického výpočtu vytvořenou aplikací. Výsledky se až na chyby způsobené zaokrouhlováním při analytickém výpočtu shodovali. Proto lze správnost aplikace potvrdit.

Aplikace umožňuje zobrazit funkci teploty napříč celou tloušťkou desky pro daný čas ohřevu. Také dokáže zobrazit funkci teploty v celém časovém intervalu ohřívání (chlazení)

desky v požadovaném místě desky. V neposlední řadě lze zobrazit trojrozměrný komplexní pohled na teplotní pole, jenž umožňuje určit teplotu v libovolném čase a místě. V závěrečné části práce jsem posoudil vliv hlavních parametrů působících na průběh ohřívání (chlazení) právě pomocí vytvořené aplikace.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In my bachelor's work I deal with especially describing and calculating transient temperature field in flat plate composed of two layers which represents a simplified model of printed circuit board (PCB). Also I deal with recycling electronic waste (e-waste) or recycling PCB's. Recycling technologies are still in the stage of the search for environmentally and economically most suitable method due to a huge quantum of this waste. Therefore, I am specifying problems of e-waste, including related laws and urgency solution of problem with growing quantum of e-waste.

In the first part of this thesis I describe the most common method of recycling this kind of waste. From disassembling PCB through further treatment (crushing, grinding, ...) to the separation of metal components and plastic components. I also describe a thermic separation of thin copper film from the plastic slab as an alternative method recycling of copper and plastic.

For a describe theoretical background of thermic separation I used especially theory of transient heat conduction in semi-infinite region. In thesis I also describe used mathematical model with competent boundary conditions and initial condition. This mathematical model I used later for create software application.

In practice is needed know heating (cooling) temperature and heating (cooling) time for optimal technologic process. Therefore I made software interactive application in Wolfram Mathematica 8 for visualisation of temperature field. This visualisation can give temperature distribution also in immeasurable places in flat plate.

Then I analytic computed temperature field for sample example and I compared computed temperature field with temperature field numeric computed by created application. Obtained results are corresponds. Divergences was caused by rounding at manually calculation.

The created application allows display function of temperature across whole thickness for given time. Also can display function of temperature across the time interval of heating (cooling) for given place in flat plate. Last but not last the application can display three-dimensional complex view on temperature field which allows determine temperature in arbitrary time and place. In the final part i examine the influence of main parameters occurring on heating or cooling process by created application.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Příroda: příroda, ekologie, život...* [online]. c2011 [cit. 2011-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.priroda.cz/slovník.php?detail=92>>.
- [2] BOŽEK, František; URBAN, Rudolf; ZEMÁNEK, Zdeněk. *Recyklace*. 1.vyd. Vyškov: Vysoká vojenská škola pozemního vojska, 2003. 202 s. ISBN 80-238-9919-8.
- [3] LYKOV, A., V. *Teoria teploprovodnosti*. Vysšaja škola. Moskva. 1967.
- [4] CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C. *Conduction of Heat in Solids*. 2.vyd. Oxford University Press. 1986.
- [5] *Enviweb* [online]. 2011-02-14 [cit. 2011-03-28]. Elektroodpad se nebude vyvážet ale recyklovat. Dostupné z WWW: <<http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/85287/elektroodpad-se-nebude-vyvazet-ale-recyklovat>>.
- [6] *Greenpeace* [online]. 2010 [cit. 2011-03-27]. Zelenější elektronika. Dostupné z WWW: <<http://www.greenpeace.org/czech/cz/Kampan/Toxické-znecistění/Zelení-elektronika/>>.
- [7] CHRISTIANOVÁ, Anna. *Remasystem* [online]. 2006-06-19 [cit. 2011-04-04]. Problematika elektrozařízení. Dostupné z WWW: <http://www.remasystem.cz/archiv/dokumenty/pdf/problematika_elektrozariadeni.pdf>.
- [8] Příručky k OEEZ. *Příručka pro výrobce EEZ* [online]. 2005 [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.cir.cz/prirucky-k-oeez>>.
- [9] Evropská unie. Directive 2002/95/EC on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. *Ústavy států Evropské Unie*. Brusel, 2003. Dostupné také z WWW: <http://www.gidos.net/_library/Directive2002_95_EC_Jan%202003.pdf>.
- [10] Příručky k OEEZ. *Možnosti energetického využití zůstatků OEEZ* [online]. 2005 [cit. 2011-03-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.cir.cz/prirucky-k-oeez>>.

- [11] United Nations University. *2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment : Final Report* [online]. 2007-08-05 [cit. 2011-04-01]. Dostupné z WWW: <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf>.
- [12] *AZ Materials: A to Z of Materials* [online]. 2003 [cit. 2011-04-06]. Computer and Electronic Scrap Recycling. Dostupné z WWW: <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1767>>.
- [13] LI, JIA, et al. Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* [online]. 2007, 41, 6, [cit. 2011-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es0618245>>.
- [14] Evropská unie. Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment *Ústavy států Evropské Unie*. Brusel, 2003–03–27. Dostupné z WWW: <http://components.omron.eu/en/company_info/environmental/weee_directive/default.html>
- [15] BUCHTA, Martin. *Channelworld* [online]. 2011-01-11 [cit. 2011-03-29]. Hardware. Dostupné z WWW: <<http://channelworld.cz/hardware/gartner-prodeje-pocitacu-ve-ctvrtem-ctvrtletí-2010-pribrzdily-tablety-3477>>.
- [16] GREGOR, Pavel. *Reseller Magazine* [online]. 2011-02-16 [cit. 2011-03-29]. Stručně z trhu. Dostupné z WWW: <<http://www.reselleronline.cz/idc-v-cr-se-prodalo-1-3-milionu-pc>>.
- [17] Dostupné z WWW: <<http://www.ixbt.com/mainboard/msi/mega-pc/mainboard.jpg>>
- [18] CHARVÁTOVÁ, Hana; JANÁČOVÁ, Dagmar; KOLOMAZNÍK, Karel; MOKREJŠ, Pavel. Vyhodnocení hmotnostního zastoupení elektronických součástek v deskách plošných spojů. *Waste forum: Časopis pro výsledky výzkumu a vývoje pro odpadové hospodářství* [online]. 2009, 2, [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <http://www.wasteforum.cz/cisla/WF_2_2009.pdf>.
- [19] CUI, Jirang; FORSSBERG Eric. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment. *Journal of Hazardous Material* [online]. 2003-02-13 [cit. 2011-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://infolib.hua.edu.vn/Fulltext/ChuyenDe2009/CD305/21.pdf>>.

- [20] KUKURUGYA, František; ORÁČ Dušan; HAVLÍK Tomáš. Možnosti fyzikálnej separácie zložiek z vyradených dosiek plošných spojov. *Moderné trendy v spracovaní druhotných zdrojov neželezných kovov* [online]. 2008 [cit. 2011-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/stofko/Kukurugya2.pdf>>.
- [21] GOOSEY, Martin; KELLNER, Rod. *A Scoping Study: End-of-Life Printed Circuit Board* [online]. 2002-08 [cit. 2011-04-03]. Dostupné z WWW: <http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf>.
- [22] CHMELA, Tomáš. Možnosti recyklace plošných spojů. *Odpadové fórum: Odborný měsíčník o všem, co souvisí s odpady* [online]. 2006-11, 2006, 11, [cit. 2011-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.odpadoveforum.cz/2006/11.pdf>>.
- [23] STEVENS, Gary; THOMAS, Janet; FOTEA, Catalin. *Recovery & Recycling of Waste Electronic Circuit Boards* [online]. 2015-06-01, [cit. 2011-04-2]. Dostupné z WWW: <http://www.veoliatrust.org/docs/recovery_and_recycling_of_waste_electronic_circuit_boards.pdf>.
- [24] JANÁČOVÁ, Dagmar; CHARVÁTOVÁ, Hana; KOLOMAZNÍK, Karel; VAŠEK, Vladimír. Modeling of temperature fields inside two layers board copper – plastic materials during treatment. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on engineering education* [online]. 2009 [cit. 2011-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/rodos/EDU/EDU26.pdf>>.
- [25] CHARVÁTOVÁ, Hana; JANÁČOVÁ, Dagmar; KOLOMAZNÍK, Karel; FIALKA Miloslav. *Mass analysis of the components separated from printed circuit boards. Acta Montanistica Slovaca* [online]. 2010, 15, 1, [cit. 2011-04-09]. Dostupný z WWW: <<http://actamont.tuke.sk/pdf/2010/n1/12charvatova.pdf>>.
- [26] BOUŠA, Martin. *Projekt recyklace elektronických zařízení* [online]. Vitaro, 2003 [cit. 2011-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.vitaro.cz/?pg=projektRecyklaceElektronZar&m=elektro>>.
- [27] *Aquatest* [online]. 2003 [cit. 2011-04-09]. Dostupný z WWW: <<http://aquatest.cz.kappa.nen.cz/cz/>>.

- [28] Elektromagnetická separace odpadů. *Odpadové fórum: Odborný měsíčník o všem, co souvisí s odpady*. 2005, 9, [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.odpadoveforum.cz/2005/9.pdf>>.
- [29] GRUBER, Václav. *Chemické metody recyklace elektroodpadu* [online]. 2006-06-01 [cit. 2011-04-09]. Dostupný z WWW: <<http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/013.pdf>>.
- [30] ORÁČ Dušan; KUKURUGYA, František; HAVLÍK Tomáš. Možnosti spracovania odpadu z elektrických a elektronických zariadení. *Moderné trendy v spracováni druhotných zdrojov neželezných kovov* [online]. 2005, 5, [cit. 2011-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/stofko/Orac2.pdf>>.
- [31] Technologie získávání drahých a obecných kovů z odpadních elektrických a elektronických zařízení. *Elektro* [online]. 2008 [cit. 2011-04-09]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26293>.
- [32] *Elektrorevue* [online]. 2002 [cit. 2011-04-21]. Termomechanické namáhání SMD součástek. Dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02057/index.html#2>>.
- [33] Informační systém výzkumu experimentálního vývoje a inovací [online]. 2009 [cit. 2011-05-29]. Separace vodivých cest desek plošných spojů vlivem teplotního šoku. Dostupné z WWW: <http://www.isvav.cz/resultDetail.do?rowId=RIV%2F70883521%3A28140%2F09%3A63507832!RIV10-MSM-28140___>.
- [34] HRUBÝ, Tomáš. *Vliv teploty a času na pevnost lepených spojů kov - plast*. 2008. 41 s. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [35] *SMT centrum* [online]. 2010-06-01 [cit. 2011-04-22]. Výroba desek plošných spojů. Dostupné z WWW: <<http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/>>.
- [36] Dostupné z WWW: <http://www.sev-litovel.cz/images_s/deska_velky.jpg>
- [37] Dostupné z WWW: <http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRuewBu400C-t07YJ6cjqSrQkHb0TFf2b5fl7KMmSWAH_qwtN5&t=1>
- [38] KLEČKOVÁ, Marie. *Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojích částech*. Praha: SNTL, 1979. 280 s.

- [39] KOLOMAZNÍK, Karel et al. *Teorie technologických procesů III*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1796. 139 s.
- [40] ŠNITA, Dalimil, et al. *Chemické inženýrství I*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. 318 s. ISBN 80-7080-589-7.
- [41] ŠESTÁK, Jiří; RIEGER, František. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 299 s.
- [42] MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. Praha: STNL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 870s.
- [43] CHRAMCOV, Bronislav. *Základy práce v prostředí Mathematica*. FT UTB ve Zlíně. 2006. ISBN 80-7318-268-8.
- [44] *Wolfram Mathematica 8: Documentation center* [online]. 2011 [cit. 2011–05-19]. Dostupné z WWW:
<<http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Koeficient přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ	Koeficient tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
τ	Čas	$[\text{s}]$
ρ	Hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Φ	Tepelný tok	$[\text{W}]$
a	Teplotní vodivost	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
b	Tloušťka vrstvy	$[\text{m}]$
c_p	Měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
h	Pomocný výraz pro vztah (16) a (17)	$[1]$
K_a	Pomocný výraz pro vztah (17)	$[1]$
K_ϵ	Pomocný výraz pro vztah (16) a (17)	$[1]$
q	Hustota tepelného toku	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
S	Průřez	$[\text{m}^2]$
t_1	Teplota vrstvy 1 v daném místě a čase	$[^\circ\text{C}]$
t_2	Teplota vrstvy 2 v daném místě a čase	$[^\circ\text{C}]$
t_o	Teplota okolního prostředí	$[^\circ\text{C}]$
t_p	Počáteční teplota desky	$[^\circ\text{C}]$
$\frac{t_1 - t_p}{t_o - t_p}$	Bezrozměrná teplota	$[1]$
x, y, z	Souřadnice prostoru	$[\text{m}]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Etapy životního cyklu výrobku [8].....	12
Obrázek 2 – Ukázka typické osazené DPS z roku 2003 (MS-6760) [17]	14
Obrázek 3 – Princip pneumatického fluidního separátoru [27].....	18
Obrázek 4 – Fluidní separátor [27]	19
Obrázek 5 – Elektrodynamický separátor – na zpracování DPS [27]	19
Obrázek 6 – Zjednodušený obecný příklad zpracování DPS [21].....	20
Obrázek 7 – Magnetický separátor [28]	21
Obrázek 8 – Elektrostatický separátor [20]	22
Obrázek 9 – Separátor vířivými proudy [28].....	22
Obrázek 10 – Obecný možný hydrometalurgický postup zpracování DPS [21].....	25
Obrázek 11 – Působení teplotního šoku na DPS [34].....	26
Obrázek 12 – Typicky osazená DPS / vodivé cesty na neosazené DPS [36, 37]	27
Obrázek 13 – Řezy jednotlivých modelů DPS [35].....	27
Obrázek 14 – Struktura a model dvouvrstvé DPS	28
Obrázek 15 – Rozměry a poloha elementu [38]	31
Obrázek 16 – Ukázky okrajových podmínek 1. až 4. druhu [38].....	34
Obrázek 17 – Logo softwaru Wolfram Mathematica 8	38
Obrázek 18 – Celkový pohled na aplikaci	40
Obrázek 19 – Princip Animatoru	41
Obrázek 20 – Ovladače 2) až 6).....	42
Obrázek 21 – Ovládací prvky a ukázka nastaveného modelu	43
Obrázek 22 – Pohled při výběru zobrazení 2D - τ_x	44
Obrázek 23 – Pohled při výběru zobrazení 2D - τ_y	45
Obrázek 24 – Ukázka zobrazení 3D grafu.....	46
Obrázek 25 – Ukázka chyby v aplikaci	46
Obrázek 26 – Grafické řešení a porovnání kontrolního příkladu s aplikací	49
Obrázek 27 – Porovnání teplotních polí při změně tepelné vodivosti λ_1	50
Obrázek 28 – Porovnání vlivu změny tepelné kapacity cp_1 při ohřevu.....	51
Obrázek 29 – Porovnání různých teplot okolního prostředí t_o při zahřívání	52
Obrázek 30 – Závislost teploty na čase v místě desky 0,10 m	52
Obrázek 31 – Závislost teploty na čase v místě desky 0,04 m v průběhu ohřevu	53
Obrázek 32 – Průběh teploty v průběhu ohřívání při různých časech ohřevu.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Chemické složení plně osazené DPS [21]	15
Tabulka 2 – Obsah kovů v osazených DPS [22]	16
Tabulka 3 – Výčet vstupních parametrů při ohřívání (chlazení)	36
Tabulka 4 – Tabulka vypočtených hodnot.....	47

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Na přiloženém CD disku se nachází tato práce v elektronické podobě včetně zdrojového kódu vytvořené softwarové aplikace.