



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Dizertační práce

Návrh a modelování ekologického zpracování desek plošných spojů

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

Autor: **Ing. Jiří Křenek**

Studijní program: Inženýrská informatika P3902

Studijní obor: Automatické řízení a informatika 3902V037

Školitel: prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.

Zlín, srpen 2017

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

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

Abstrakt

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

Abstract

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

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval vedoucí dizertační práce paní prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za odborné vedení, trpělivost, cenné rady a připomínky, které mi poskytovala v celém průběhu vypracování dizertační práce a v doktorském studijním programu.

Dále děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Dvořákovi CSc. a Ústavu výrobního inženýrství Fakulty technologické UTB ve Zlíně za spolupráci a konzultace.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, bratrovi, přítelkyni a blízkým za podporu při studiu. I díky jim se mi podařilo tuto práci vypracovat.

OBSAH

OBSAH.....	5
Úvod.....	8
1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU	10
1.1 Legislativní řešení elektroodpadu	10
1.2 Magnetická separace	14
1.3 Separace na bázi specifické hmotnosti	14
1.4 Mechanická separace	14
1.5 Kyanidové loužení	15
1.6 Extrakce v tavenině olova.....	15
1.7 Sulfáto–nitratová cesta.....	15
1.8 Elektrolýza	15
1.9 Zpracování plastů.....	16
1.10 Zhodnocení literární studie.....	16
2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	18
TEORETICKÁ ČÁST	19
3. MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ DPS	19
3.1 CRT monitory a televizní přijímače	19
4. SLOŽENÍ DPS	23
4.1 Technologie výroby DPS.....	23
4.2 Výztuž DPS.....	24
4.3 Pojivo	25
4.4 Vlastnosti organických základních materiálů	27
4.5 Odolnost materiálů v pájecí lázni při 260°C.....	28
4.6 Navlhavost materiálů	28

4.7 Vícevrstvé DPS	29
5. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SEPARACE DPS.....	32
5.1 Délková roztažnost materiálů	32
5.2 Kombinovaný režim rozlepení laminovaného kompozitu	34
5.3 Teplotní namáhání způsobené rozdílnými teplotními roztažnostmi jednotlivých vrstev	36
5.4 Matematický popis teplotního pole v DPS.....	38
PRAKTICKÁ ČÁST	44
6. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY.....	44
6.1 Modelování a simulace DPS	44
6.2 Proces simulace smykového napětí v DPS	45
6.3 Modelování DPS podle podkladu skutečné DPS	48
6.4 Ohřev pomocí teplotního regionu	49
6.5 Přímý ohřev vodivých měděných cest v závislosti na čase.....	50
6.6 Teplotní cyklické namáhání	55
6.7 Možnosti dezintegrace DPS	64
6.8 Simulace lepeného kompozitního nosníku.....	65
6.9 Výsledky separace provedené v laboratorních podmínkách.....	67
7. ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH SIMULACÍ	68
7.1 Parametry výpočetní stanice.....	68
7.2 Časový průběh simulací	68
7.3 Zhodnocení kapitoly.....	68
8. LABORATORNÍ ZKOUŠKY - návrh technologie zpracování DPS	70
8.1 Stanovení teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a plastové desky	70
8.2 Princip zkoušek	72
8.3 Grafické znázornění principu separace DPS	72

8.4 Zařízení pro separaci DPS	74
9. PRAKTICKÉ VÝSLEDKY A DISKUZE	76
9.1 Povrch DPS – vrstva ochranného laku	76
9.2 Počet cyklických namáhání	76
9.3 Vzdálenost vodivých cest na DPS	77
9.4 Ohřev DPS pomocí elektromagnetické indukce.....	78
10. VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ NA ZPRACOVÁNÍ DPS	79
10.1 Nákladové kalkulace	79
10.2 VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ na proces separace DPS.....	81
10.3 Chladicí směsi a roztoky	81
10.4 Ohřev DPS.....	82
10.5 Manuální práce	83
10.6 Materiálové složení DPS a cena materiálů.....	83
10.7 Elektrická energie.....	83
10.8 Celkové náklady na proces recyklace DPS	83
11. ZÁVĚR.....	85
12. POUŽITÁ LITERATURA.....	88
13. SEZNAM TABULEK.....	92
14. SEZNAM OBRÁZKŮ	93
15. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	97
16. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA	101
17. PROFESNÍ ŽIVOTOPIS	103

Úvod

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

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

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

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

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

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

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

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

1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

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

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

V navazujících kapitolách uvádím legislativní řešení elektroodpadu a různé druhy separace elektronického odpadu.

1.1 Legislativní řešení elektroodpadu

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

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

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

1.1.1 Poplatky za recyklaci

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

Výše recyklačního poplatku je stanovena na základě studií ze zemí EU, kde podobný systém již funguje, a je schvalována Ministerstvem životního prostředí ČR [5].

Tab. 1.1 Ceník recyklačních poplatků platný od 1. 1. 2008 [4]

kategorie	druh zboží	cena
telefony	mobilní telefony vč. příslušenství, sluchátka, pevné disky, flashdisky, příslušenství k domácím spotřebičům a bílému zboží	1 Kč
malé spotřebiče (audio, video, navigace)	videokamery – příslušenství, VoIP a kancelářské telefony, diktafony, přenosné přehrávače (radiopřijímače a radiobudíky), MP3 přehrávače, navigační systémy, PDA, počítačové skříně	4 Kč
malé spotřebiče (bílé zboží)	kávovary, žehličky, sendvičovače, elektrické nože, mixery, roboty, toustovače, fritézy, varné konvice, ventilátory, kuchyňské váhy, fény, espressa, lis na citrusy, odšťavňovače, domácí pekárny, mlýnky na maso, elektrické grily, sušičky potravin, fény, parní hrnce, zvlhčovače vzduchu, osobní péče (holící strojky, péče o vlasy, zubní kartáčky, osobní váhy, péče o tělo)	6 Kč
počítače a příslušenství, DVB přijímače	čtečky paměťových karet, kopírky, tiskárny a multifunkční zařízení, notebooky a laptopy, PC sestavy, skenery, DVB přijímače, videokamery, faxy, přenosné přehrávače (radiomagnetofony), fotoaparáty	10 Kč
vysavače, varné desky	mikrovlnné trouby, digestoře, vysavače, varné desky	20 Kč
rekordéry a přehrávače, audio systémy	videorekordéry, CD a DVD přehrávače a rekordéry, hi-fi komponenty (AV receivery, tunery, zesilovače) reprosoustavy, audio systémy, autorádia	30 Kč
monitory a televizory do úhlopříčky 25"	monitory a televizory s úhlopříčkou max. 25" (63 cm)	33 Kč
domácí kina, mini disky	herní konzole, mini disky, projektory, domácí kina, záložní zdroje	60 Kč
bílé zboží	sporáky, trouby, myčky nádobí, pračky a sušičky, ohřívače vody	90 Kč

monitory a televize s úhlopříčkou nad 25"	monitory a televizory s úhlopříčkou nad 25" (63 cm)	200 Kč
veškeré chlazení	ledničky, mrazáky, vinotéky a vitríny	300 Kč

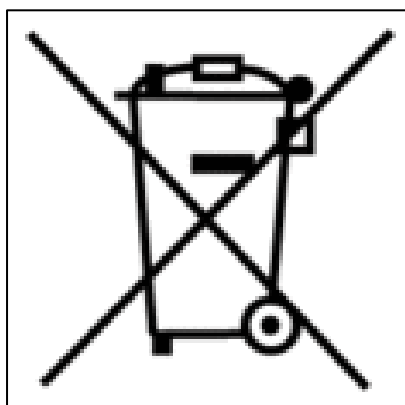
1.1.2 Využití recyklačních poplatků

Recyklační poplatky, které účastníci kolektivního systému hradí, jsou účelně využity na správu zpětného odběru. Kolektivní systém EKOLAMP kromě investic do procesu sběru a ekologického zpracování osvětlovacích zařízení vytváří finanční rezervy, které budou sloužit pro krytí nákladů v momentě konjunktury trhu, kdy výběr poplatků nebude schopen pokrýt náklady spojené se sběrem a recyklací [6].

1.1.3 Symbol přeškrtnuté popelnice

Na každém v současné době prodávaném elektrospotřebiči nebo jeho obalu, v záručním listu či v návodu na použití je uveden symbol přeškrtnuté popelnice. Ten značí, že tento výrobek po ukončení jeho životnosti nesmí být vyhozen do popelnice se směsným domovním odpadem, ale musí být odevzdán na místa k tomu určená, tedy do zpětného odběru tak, aby byla zajištěná jeho ekologická recyklace.

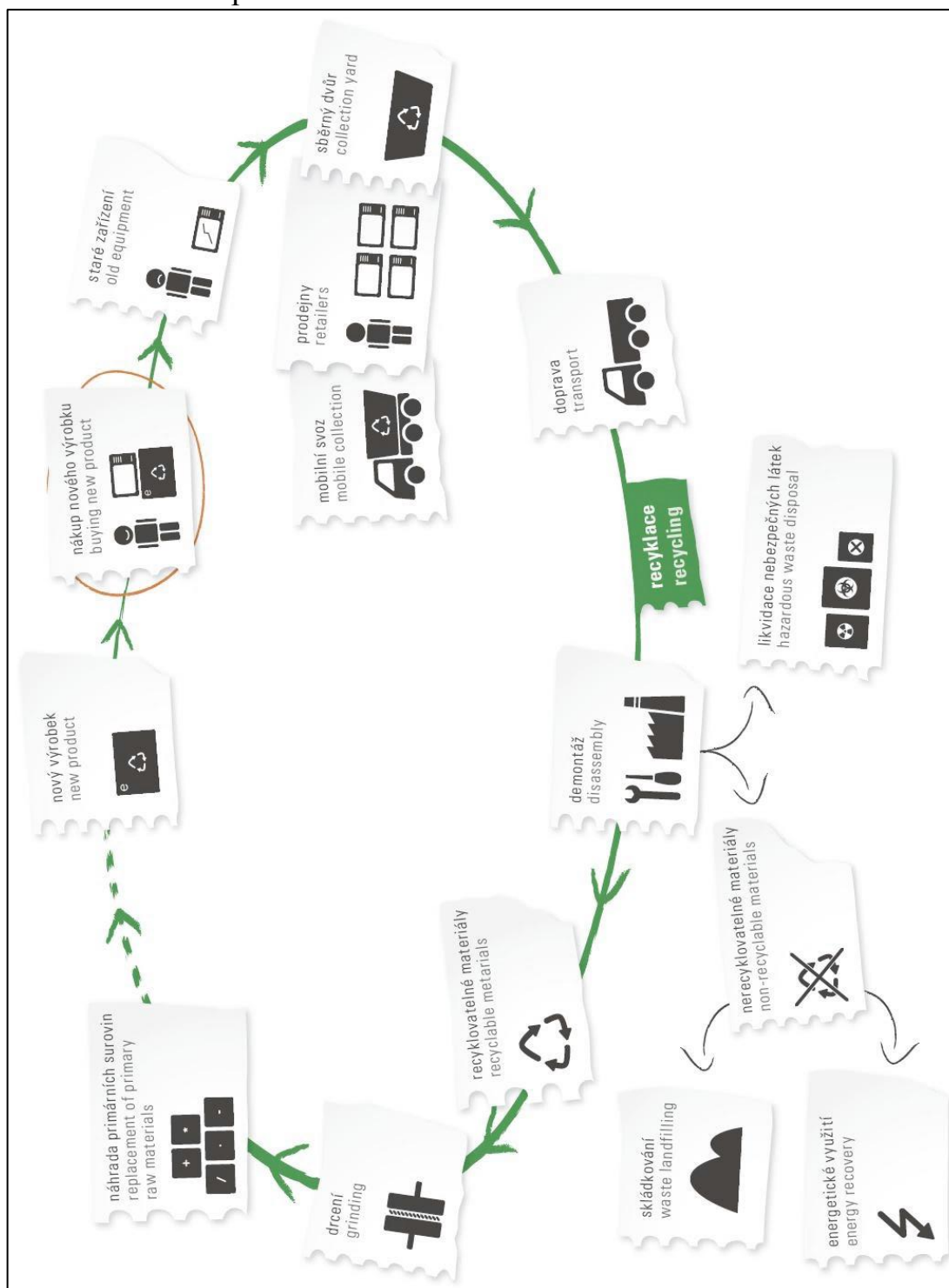
Tato místa se nacházejí zejména ve sběrných dvorech obcí, u prodejců elektra a v servisech. Existují také malé kontejnery červené barvy na drobné spotřebiče, umístované v místech určených pro separovaný odpad. Dále je v některých obcích sbírají sbory dobrovolných hasičů, zapojených do projektu Recyklujte s hasiči. Zařízení, které bylo uvedené na trh do 13. srpna 2005, se označuje jako tzv. „historické elektrozařízení“ a nemá uvedené značení. Nicméně je potřebné jej po skončení jeho používání odevzdat také na místa zpětného odběru [7].



Obr. 1.1: Symbol přeškrtnuté popelnice [7]

1.1.4 Životní cyklus elektro materiálů

Následující obrázek shrnuje předchozí uvedené informace s nakládáním elektroodpadu. Grafický přehled je jednodušší a rychlejší v orientaci koloběhu zpracování elektroodpadu.



Obr. 1.2: Životní cyklus elektromateriálů [8]

V následujících kapitolách uvedu příklady používaných způsobů recyklace, které jsou stručně zhodnoceny.

1.2 Magnetická separace

Principem procesu je využití bubnů pro magnetickou separaci, které jsou zhotoveny z nemagnetické oceli, někdy i z plastu. Uvnitř bubnu je stabilní magnetický systém vybavený buď permanentními magnety, nebo cívkou napájenou z vnějšího zdroje. Výhodou permanentních magnetů je rovnoměrné a stálé magnetické pole, mají však menší přitažnou sílu. Elektromagnety jsou složitější, vyžadují připojení na elektrickou síť a jejich přitažná síla poněkud klesá po zahřátí při delším provozu. Mohou však přitahovat i poměrně těžké částice [9].

1.3 Separace na bázi specifické hmotnosti

Další možnosti separace je separace na bázi specifické hmotnosti. Hlavním principem je využití gravitace. Gravitační třídění pomocí pásového dopravníku (je využito balistického a gravitačního principu), vibračního třídícího zařízení a třídění na bázi hustoty materiálů [9].

1.4 Mechanická separace

V neposlední řadě jsem se zaměřil na tento typ separace, protože obsahuje několik potřebných operací. Typické technologie mechanické separace využívané při zpracování elektroodpadu [10]:

- ruční demontáž
- drcení, mletí, třídění
- separace jednotlivých složek
- rafinace

1.4.1 Ruční demontáž

Jsou to běžné operace při zpracování hodnotného elektroodpadu. Jedná se zejména o demontáž kontaktů z ušlechtilých kovů a vyjmutí desek s tištěnými spoji. V neposlední řadě jde o odstranění součástí s obsahem rizikových kovů. Ruční demontáž je rovněž hlavní operací při odstraňování obrazovek z monitorů, pokud jsou dále zpracovávány celé. Roztříděné části jsou následně označeny. Třídění kabelů lze automatizovat [9].

1.4.2 Drcení, mletí a třídění

Drtiče, mlýny a třídiče se liší v závislosti na kapacitě a hrubosti frakce, množství zpracovaného především železného šrotu závisí na kapacitě specializovaného zařízení [9].

1.4.3 Separace jednotlivých složek

Směs rozdrčeného materiálu je dělena na jednotlivé frakce zařízeními v závislosti na konečném odběrateli, nebo zpracovateli a požadované ceně. Plasty a kovy jsou separovány různými technologiemi:

- Kryogenní technologie používané k rozdrůžování a separaci různých kovů.
- Ohřev pro získání nízkotavitelných kovů obsažených např. v pájce.
- Magnetická separace pro oddělení kovů a plastů.
- Těžkosuspenzní rozdrůžování, rozdělení různých kovů podle jejich hustoty.
- Elektromagnetická separace různých neželezných kovů.
- Rafinace. Využití klasických rafinačních technologií pro odstranění nežádoucích nečistot z finálních produktů [9].

1.5 Kyanidové loužení

Kyanidové loužení – způsob, jak snadno izolovat zlato, které je nejvíce zastoupeným kovem v elektroodpadu. Loužení se provádí zředěnými roztoky alkalických kyanidů. Nejčastěji jsou na bázi mědi, zinku a niklu. Pozlacený materiál musí přitom být v kontaktu s roztokem [13]. Kyanidové loužení však představuje vysokou zátěž a nebezpečí pro životní prostředí.

1.6 Extrakce v tavenině olova

Rozdrčené desky s tištěnými spoji se dávkuje přímo do tavicích zařízení, kde se mísí s roztaveným olovem a kde zlato a většina ušlechtilých kovů vytvoří s olovem rozpustnou slitinu. Plasty vyhoří, železo a část barevných kovů plave na povrchu taveniny a odtud se stahuje. Tavenina se následně provzdušňuje, většina olova a obecné kovy zoxidují 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 je práce ve zdraví škodlivém prostředí [11].

1.7 Sulfáto–nitrátová cesta

Používá se pro separaci palladia. Pokud se surovina s obsahem palladia zpracovává sulfáto–nitrátovou cestou lze vzniklé roztoky po denitraci velmi snadno redukovat formaldehydem a získat s vysokou účinností palladium. Procesu vadí přítomnost halogenidových iontů [9].

1.8 Elektrolýza

Pokud se při procesu recyklace elektrošrotu získá roztok frakce barevných kovů (Cu, Zn, Ni, Cd, Ag, Pd, Fe...), zpracovává se elektrolyticky. Převážně se elektrolýzou získá podíl mědi, případně niklu a drahých kovů, které z většiny

zůstávají v anodických kátech. Pro ekologickou náročnost je elektrolyza používána poměrně zřídka [9].

1.9 Zpracování plastů

Předpokladem výroby kvalitního recyklátu plastických hmot je čisté vytrídění na jednotlivé typy plastů, což je v praxi dosti problematické. Plasty lze třídit automaticky, ručně nebo oba postupy kombinovat. Následující technologie úpravy jako drcení, mletí, zbavení prachu a rozdělení plastů podle hustoty umožňují vznik poměrně čisté drti a to jen v případech, že se jedná o určitý druh elektrošrotu. Pro možnost dalšího využití je nutné co nejlépe roztrždit zpracovávané druhy plastů.

V současné době se používá několik způsobů třídění [9], [11]:

- Fluidace (třídění vzduchem).
- Odstředivé síly (založeno na balistickém a gravitačním principu).
- Flotace (separace ve vodní lázni dle hustoty materiálu).
- Elektrostatické třídění (využití tribologického efektu).

K přesné a rychlé identifikaci plastových odpadů slouží různé automatické detekční metody. Recyklace plastů klade na identifikační systémy velké nároky. Hospodárnost zařízení závisí na rychlosti a přesnosti detekce. Jednou z nejčastěji používaných metod je infračervená spektroskopie. Plasty jsou vystaveny infračervenému záření a molekuly polymerů absorbují z tohoto spektra, podle molekulární stavby, frekvence charakteristické pro určitá skupenství uvnitř molekuly. Alternativní metodou je termografie s laserovým impulsem a rentgenová fluorescenční analýza [12].

1.10 Zhodnocení literární studie

Z literární studie se dají vyvodit hlavní způsoby a aspekty recyklace DPS, kterými jsou legislativní řešení nakládání s elektroodpadem včetně získání cenných materiálů a ochrana životního prostředí.

Vyústěním zákona o nakládání s elektroodpadem jsou poplatky za recyklaci a jejich využití na zpracování elektroodpadu.

Obsah dizertační práce je zaměřen právě na ochranu životního prostředí při návrhu nové ekologické metody recyklace DPS, protože elektroodpad obsahuje mnoho škodlivých látek, které se mohou uvolnit do okolí během recyklace. Například k tomu dochází při spalování odpadních plastů, při kyanidovém loužení, nebo extrakci drahých kovů v tavenině olova.

Další významné body se týkaly způsobu a možnosti recyklace, které se dnes běžně používají. Některé z těchto postupů představují možné riziko pro životní prostředí, jako je například separace chemickou cestou. Proto jsem se zaměřil na

ekologickou separaci měděných vodivých cest z desek plošných spojů vlivem teplotního namáhání, protože se jedná o separaci na základě fyzikálního jevu.

2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V rámci dizertační práce jsou řešeny následující úkoly:

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

TEORETICKÁ ČÁST

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

3. MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ DPS

Stále se zvyšující výrobou a spotřebou elektronických a elektrických výrobků dochází k velkému nárůstu odpadů z těchto zařízení. Následující kapitoly popisují složení těchto odpadů s hlavním důrazem na desky plošných spojů.

Deska s plošnými spoji (DPS) je výsledná deska obsahující plošné vodiče, pájecí body a další prvky vodivého obrazce, která je určena pro montáž součástek i mechanických dílů, nověji nazývaná montážní a propojovací struktura. Deska s plošnými spoji je základní složkou montážní technologie všech elektronických celků. Plní funkci nosného prvku součástek, tj. funkci mechanickou, zajišťuje odvod ztrátového tepla, funguje jako elektrický a v poslední době i jako optický propojovací člen mezi součástkami a systémy. DPS musí být spolehlivá i cenově dostupná [9].

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

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

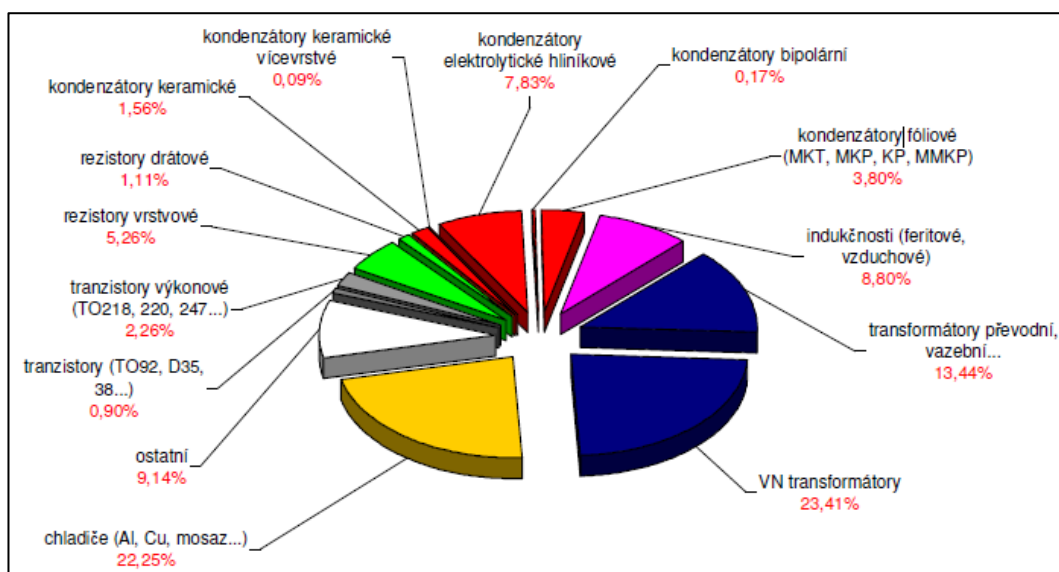
Obrázek obr. 3.3 popisuje hmotnostní zastoupení komponent v elektrozařízení. Některé typy součástek, jako jsou kondenzátory, transformátory, konektory, integrované obvody apod., se vyskytovaly ve všech testovaných souborech, zatímco výskyt jiných součástek, jako jsou např. sloty, akumulátory, optočleny atd., byl vázán pouze na vybraný testovaný soubor. Z obrázku Obr. 3.1 navíc vyplývá, že složení součástek DPS souboru PC komponent se nejvíce odlišuje od ostatních souborů [18].

3.1 CRT monitory a televizní přijímače

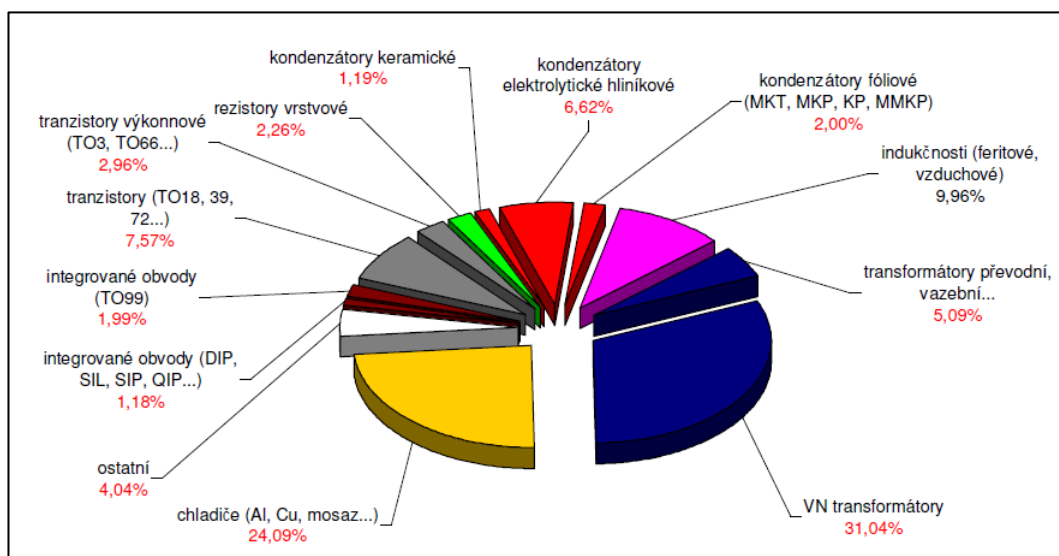
Funkce CRT (Catode ray tube) monitoru a klasického televizního přijímače je založena na stejném principu, a proto jsme při vyhodnocení zastoupení součástek DPS tohoto souboru předpokládali, že hmotnostní zastoupení součástek v DPS CRT monitorů bude obdobné jako zastoupení v DPS televizních přijímačů. Z následujících obrázků Obr. 3.1 a Obr. 3.2, které zachycují zastoupení

separovaných součástek jak v DPS CRT monitorů Obr. 3.1, tak v DPS televizních přijímačů Obr. 3.2 je zřejmé, že se náš předpoklad potvrdil.

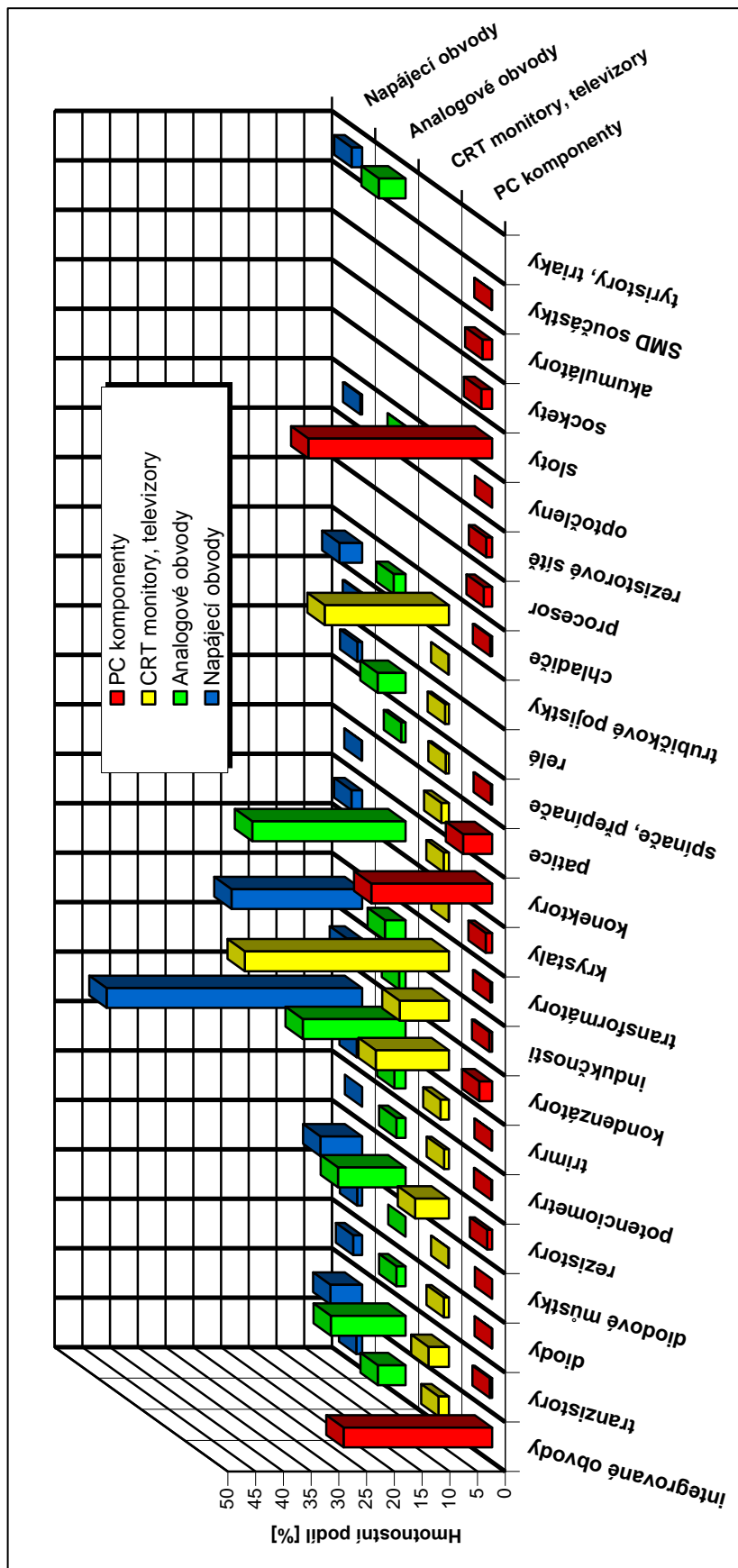
Z výsledku rozboru vyplynulo, že největší hmotnostní zastoupení u obou typů DPS představovaly transformátory, mezi nimiž převládaly transformátory vysokého napětí (VN transformátory) představující u DPS CRT monitorů 23,4 % osazení a u DPS televizních přijímačů 31 % hmotnosti osazení. Více než 20 hmotnostních % osazení DPS daného souboru představovaly chladiče obsahující mosaz, hliník a další kovy. Třetí významnou složkou DPS CRT monitorů a televizních přijímačů byly kondenzátory představující 13,5 hm. % osazení u CRT monitorů a 9,8 hm. % osazení u DPS televizních přijímačů. Kolem 9 % hmotnosti tvořily v testovaných DPS CRT monitorů a televizních přijímačů feritové [18].



Obr. 3.1: Hmotnostní podíly jednotlivých typů součástek v DPS CRT monitorů [18].



Obr. 3.2: Hmotnostní podíly jednotlivých typů součástek v DPS televizních přijímačů [18].



Obr. 3.3: Zastoupení jednotlivých typů separovaných součástek [18]

Materiálové složení DPS tvoří především kovy, plasty, keramika. Všechny tyto materiály se vyskytují jak v samotné DPS, tak také v součástkách, kterými jsou osazeny. Hmotnostní podíly jednotlivých materiálů závisí především na typu DPS. Podle studie je typické zastoupení chemických prvků v DPS následující a uvedeno v tabulce [18].

Tab. 3.1: Typické složení DPS [18]

Prvek	Ag	Al	As	Au	S	Ba	Be	Bi	Br	C	Cd
Obsah (g/t)	3300	47	>0,10	80	1	200	1,1	1,7	5,4	96	0,15
Prvek	Cl	Cr	Cu	F	Fe	Ga	Mn	Mo	Ni	Zn	Sb
Obsah (g/t)	17,4	0,5	268	0,94	53	35	4,7	0,03	4,7	15	0,6
Prvek	Se	Sn	Te	Ti	Sc	I	Hg	Zr	Sr		
Obsah (g/t)	41	10	1	34	55	200	1	30	10		

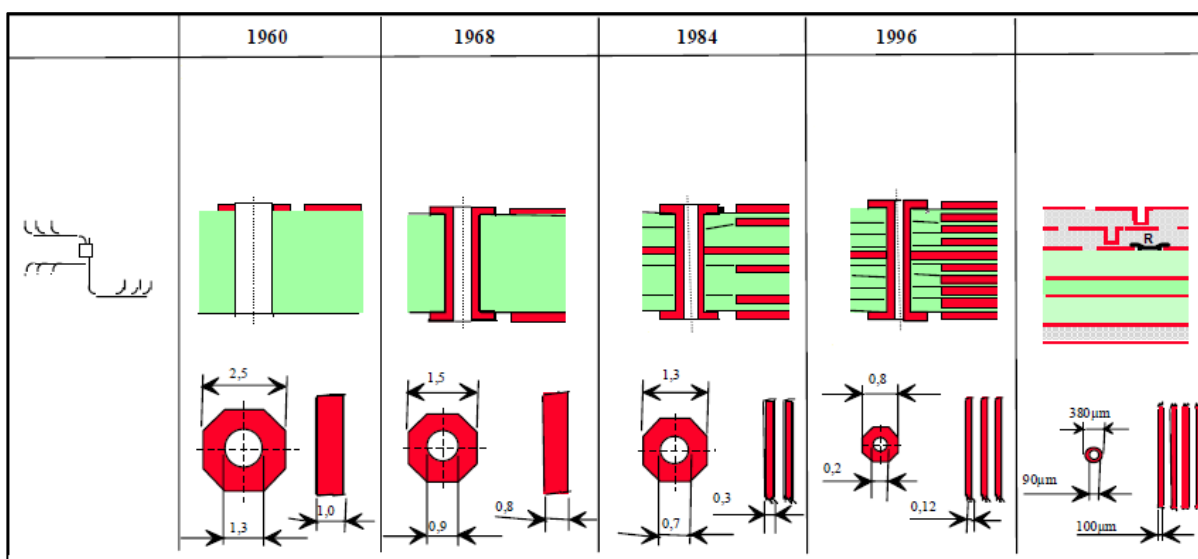
4. SLOŽENÍ DPS

Důležitým aspektem je materiálové složení desek plošných spojů a jejich výroba. V následující části popisují různé druhy DPS a jejich postupný vývoj.

4.1 Technologie výroby DPS

Technologie výroby DPS se za posledních několik desetiletí zdokonalila, ale hlavně minimalizovala. O tomto faktu svědčí následující tabulka, která zobrazuje postupný vývoj v technologii výroby DPS.

Tab. 4.1: Historie technologie výroby DPS [21]



4.1.1 Původní DPS

Vývoj typické dnešní desky s plošnými spoji musel čekat na vývoj moderních umělých pryskyřic, především fenolických a epoxydových a vyztužovacích tkanin ze skleněných vláken. Jeden z prvních pokusů o výrobu plošných spojů se skládal z obvodu kreslených metalizovanými a jinými vodivými inkousty na jemné hedvábí a z kondenzátorů vytvářených z tenkých lístku slídy mezi dvěma pokovenými ploškami na hedvábném podkladě. Mezi křižující se vodiče byly nalepovány kousky hedvábí. Připájením mikro miniaturních elektronek a diod byla dokončována výroba těchto vpravdě tištěných obvodů, které byly údajně používány ve vysílacích a přijímacích stanicích tajných agentů za války [30].

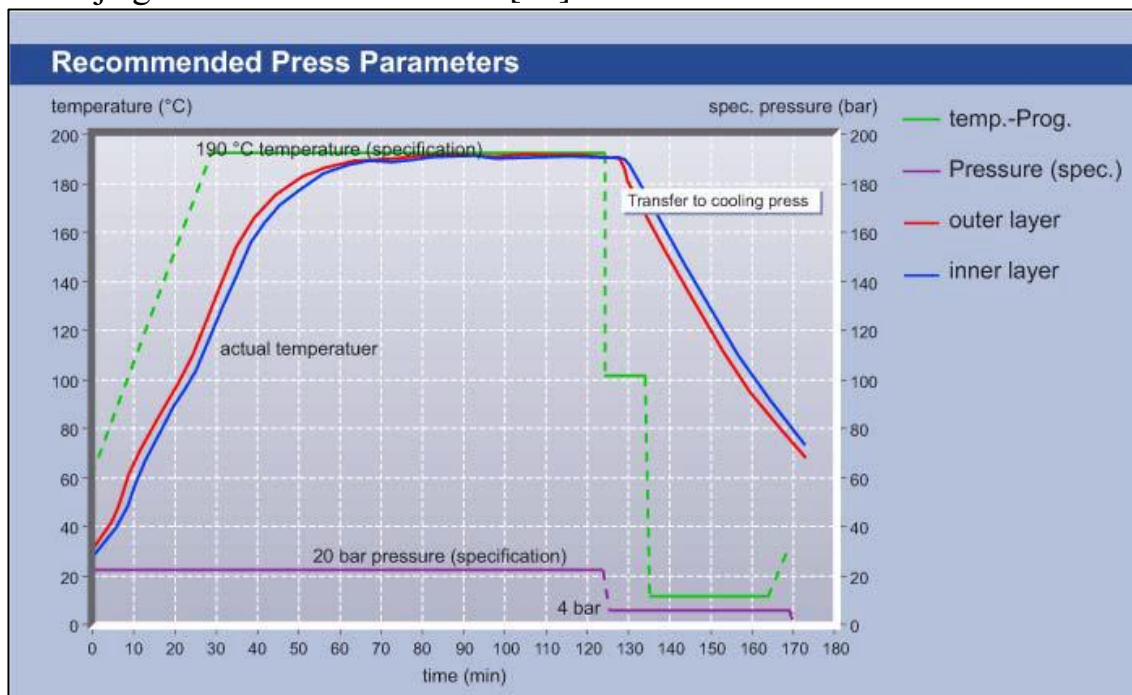
4.1.2 Výroba DPS

Základní materiál nejvíce používaný u uvažovaného typu desek, skelný laminát, se vyrábí impregnační tkaniny ze skleněných vláken pryskyřicí a lisování potřebného počtu vrstev impregnované tkaniny vložených mezi měděné fólie ve velkém hydraulickém lisu. Mezi jednotlivé vrstvy se vkládají plechy z

nerezavějící oceli a lisování se provádí obvykle ve více etážovém lisu. Nejprve se sestava zahřeje na 135°C. Při této teplotě se lisuje 20 minut a poté se teplota zvýší na 175°C po dobu 30 minut. Následně se systém ochlazuje.

Tento postup prováděli v Semtíně u Pardubic ve firmě LAMITEC CZECH s.r.o.

Trochu odlišné nastavení teplot při lisování používá německá firma Isola AG, jak ukazuje graf na obrázku Obr. 4.1 [30].



Obr. 4.1: Průběh lisování DPS [30].

4.2 Výztuž DPS

Určuje mechanické vlastnosti DPS (pevnost v tlaku, tahu, ohybu), rozměrovou stálost v daném teplotním rozsahu, výrazně ovlivňuje elektrické, chemické i teplotní charakteristiky. Výztuž tvoří „kostru“ laminátu a ovlivňuje vyrobiteľnosť a výslednou spoľehlivosť DPS [31].

Druhy výztuží:

- Skleněné vlákno
- Tvrzený papír
- Křemenné vlákno
- Aramidové vlákno
- Uhlíkové vlákno

4.2.1 Skleněné vlákno

E-sklo (Al-Si-B sklo - bez alkalické hlinitoboritokřemičité sklo). Relativní permitivita E-skla je 5,8 - 6,3. Méně se používá S-sklo, které má vyšší mechanickou pevnost a lepší dielektrické vlastnosti. Relativní permitivita S-skla je 3,5 - 5,2. Používá se ve skleněné tkanině nebo jako rohož [21].

4.2.2 Skleněná tkanina

Skleněné tkaniny se nejčastěji dělí na 2 skupiny:

- Velmi jemné skleněné tkaniny s plošnou hustotou 20 -100 g.m⁻² v tloušťce 0,02 - 0,1 mm
- Standardní skleněné tkaniny s plošnou hustotou 100 - 240 g.m⁻² v tloušťce 0,1 - 0,2 mm

Jako příklad uvádím vrstvenou skleněnou tkaninu UMATEXT 222 typ FR-4 tloušťky 1,5 mm, který složen z 8 vrstev skleněné tkaniny [21].

4.2.3 Papír

Používá se pro elektrotechnické účely. Vyrábí se ze sulfátové buničiny a jeho základní parametry jsou:

- struktura, pórovitost, navlhavost, hustota, povrch, tloušťka a rovnoměrnost tloušťky.

Papír se vyrábí v tloušťkách od 5 µm do 150 µm. Důležitá je aklimatizace před laminací vrstvy papíru, protože papír má velkou savost. Optimální laminační proces je ten, při kterém jsou dodrženy následující parametry (tlak, čas, teplota, úroveň vakua) [21].

4.2.4 Aramid

Kategorie aromatických polyamidů (poly-p-benzamid), KEVLAR®. Nejčastěji netkaný aramid, který je dodáváný v rolích, povrch je upraven pryskyřičným systémem nejčastěji epoxidem, polyimidem, kyanátesterem, polytetrafluóretylénem. Aramid má vynikající mechanické i elektrické vlastnosti. Nevýhodou je jeho vyšší navlhavost [21].

4.3 Pojivo

Důležitým bodem při výrobě DPS je pojivo, které zrovnoměňuje působení vnějších vlivů na výztuž, chrání ji před mechanickým poškozením a účinky chemikálií. Používají se reaktoplastové pryskyřice pro neohebné a termoplasty pro ohebné DPS.

4.3.1 Typy pojiv

Typy pojiv rozdělujeme do následující kategorií.:

REAKTOPLASTOVÉ PRYSKYŘICE [46]

- fenolformaldehydové pryskyřice
- epoxidové pryskyřice
- polyesterové pryskyřice
- polyimidové pryskyřice
- bismaleinimidové pryskyřice (BT)
- kyanátestery (CE)

TERMOPLASTY [46]

- polyeterimid
- polytetrafluoretylen (PTFE)
- polyimidové pryskyřice
- polyétersulfon
- lineární polyester -polyetyléntereftalát (PET)
- lineární polyester -polyetylénnaftalát (PEN)

4.3.2 Fenolformaldehydové pryskyřice

Používá se pro méně náročné aplikace (spotřební elektronika) zejména jednovrstvé DPS, dvouvrstvé DPS s Ag pokovením otvorů. Dobře se vrtá a opracovává. Tloušťka desky je v rozmezí 0,6 - 3 mm (nejčastěji 1,5 mm) a tloušťka Cu fólie je 18 - 35 μm . Výztuž tvoří celulósový papír (cca 35% celosvětové spotřeby základních materiálů). Mají relativně nízkou cenu a přijatelné elektrické vlastnosti. Nevýhodou je velká navlhavost a malá odolnost vůči elektrickému oblouku, malá pevnost Cu fólie v odtrhu [21].

4.3.3 Epoxidové pryskyřice

Mají lepší elektrické, mechanické, chemické a teplotní charakteristiky. Aditiva, která modifikují vlastnosti epoxidové pryskyřice, zvyšují teplotu skelného přechodu (T_g), snižují teplotní součinitel délkové roztažnosti (TCE) a tím zvyšují aplikovatelnost těchto materiálů. Máme pět základních druhů, které se liší jak plnivem, tak i modifikací pojiva [21].

4.3.4 Tvrzený papír a epoxidová pryskyřice

Tento typ se označuje FR-3 a v náročnějších aplikacích nahrazuje materiál FR-2. Oproti FR-2 má lepší mechanické, elektrické i tepelné vlastnosti, vyšší pevnost v odtrhu měděné fólie a menší navlhavost. Cena je 65% ceny materiálu FR-4 [21].

4.3.5 Skloepoxidový laminát

Jedná se o skleněnou tkaninu ev. rohož spojenou epoxidovou pryskyřicí. Impregnované skelné tkaniny jsou skládány do vrstev a laminovány s Cu fólií. Epoxidová pryskyřice je vytvrzena během laminace působením tepla, tlaku a vlivem katalyzátoru ve složení pryskyřice. Laminace probíhá ve vakuu.

Výhody: výborné mechanické, dobré elektrické vlastnosti, vyšší teplotní odolnost, malá nasákavost, rozsáhlé použití, zvláště tam, kde nevyhovuje FR2 a FR3 (zejména měřicí a regulační technika) [21].

Nevýhody: horší mechanické opracování, cena je dvakrát vyšší než u FR2. Vyrábí se v tloušťkách 0,6 - 6 mm, oboustranně i jednostranně plátované DPS.

4.4 Vlastnosti organických základních materiálů

Důležitou informací, jak pro analýzy a simulace v SW prostředí, tak pro laboratorní zkoušky jsou základní vlastnosti základních materiálů, ze kterých je DPS vyrobena. Tabulky níže zobrazují hodnoty těchto vlastností.

Tab. 4.2: Vlastnosti materiálů pro DPS [46].

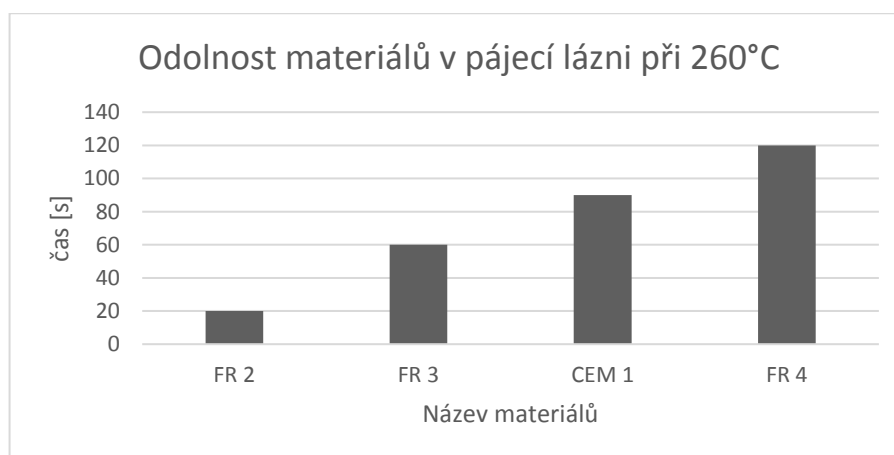
Materiál Vlastnosti		FR2	Fr3	CEM1	FR4
Povrchový izolační odpor	ohm	$1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$
Vnitřní izolační odpor	ohm·cm	$2 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{14}$
Permitivita (1 MHz)	-	4,7	4,9	4,7	4,7
Ztrátový činitel (1 MHz)	-	0,047	0,041	0,031	0,019
Teplota skelného přechodu T _g	°C	105	110	130	130
TCE xy/z (pro T menší T _g)	ppmK ⁻¹	18/300	18/300	13/230	13/60
Cenový faktor (FR4=1)		0,5	0,65	0,85	1

Tab. 4.3: Vlastnosti materiálů pro DPS [46]

Materiál Vlastnosti		BT/EPOXI SKELNÁ TKANINA	POLYIMID SKELNÁ TKANINA	KYANATESTER ARAMID	PTFE KOMPOZIT
Povrchový izolační odpor	ohm	$3,6 \cdot 10^{14}$	$5,5 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
Vnitřní izolační odpor	ohm·cm	$5,8 \cdot 10^{13}$	$4,5 \cdot 10^{14}$	$4,3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$
Permitivita (1 MHz)	-	3,5	4,3	3,2	2,9
Ztrátový činitel (1 MHz)	-	0,013	0,009	0,01	0,001
Teplota skelného přechodu t_g	°C	210	260	více jak 200	75
TCE xy/z (pro T menší T _g)	ppmK ⁻¹	14/60	14/50	9/100	14/220
Cenový faktor (FR4=1)		3 - 4	6	11	více jak 10

4.5 Odolnost materiálů v pájecí lázni při 260°C

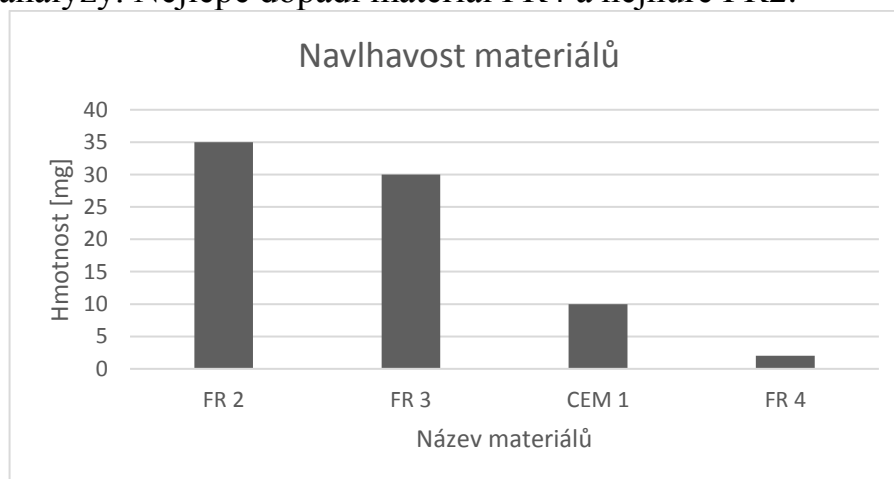
Každý materiál, který je použit pro výrobu DPS má své specifické vlastnosti. Spojením těchto materiálů vzniká základní materiál DPS. Provedl jsem studii odolnosti základních materiálů v pájecí lázni. Výsledky jsou reportovány graficky níže. Z grafů lze vyčíst informaci, že použitím různých výztužných materiálů dostáváme různé výsledky odolnosti v pájecí lázni. Největší odolnost v pájecí lázni při 260 °C má materiál označený jako FR4 a naopak nejmenší odolnost má materiál FR2.



Obr. 4.2: Odolnost základních materiálů v pájecí lázni při 260 °C.

4.6 Navlhavost materiálů

Dalším faktorem základních materiálů je navlhavost. Graf níže zobrazuje výsledky analýzy. Nejlépe dopadl materiál FR4 a nejhůře FR2.

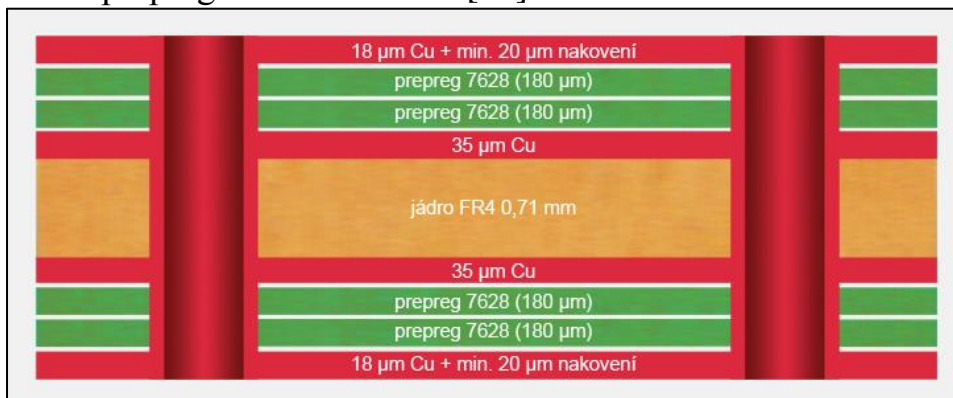


Obr. 4.3: Navlhavost základních materiálů DPS

Z výsledků je patrné, že čím novější základní materiál DPS použijeme, tím dostáváme lepší vlastnosti celkové DPS.

4.7 Vícevrstvé DPS

Složení vícevrstevných desek plošných spojů (DPS) lze sestavit z nabízených materiálů (jádra, prepreg), tak aby bylo dosaženo požadované tloušťky DPS a izolačních vzdáleností mezi vrstvami. Jediné omezení je dáno zajištěním dostatečné izolace mezi vrstvami a z tohoto důvodu se doporučuje použít minimálně 2 ks prepregu mezi vrstvami [23].



Obr. 4.4: Řez vícevrstvou DPS. (Grafické znázornění) [23].

4.7.1 High Density Interconnector (HDI)

Neustálý vývoj v elektronickém průmyslu klade čím dál větší požadavky na integraci osazovaných součástek. Tento požadavek je nutné aplikovat i ve výrobě desek plošných spojů (DPS).

V oblasti, kde již není dostačující minimalizace šíře vodičů a jejich izolačních vzdáleností, je nutné využít možnosti další integrace, jako jsou slepé a pohřbené prokvy a postupná laminace. Tím je možno nabídnout větší možnosti zapojení a zároveň minimalizovat velikost desek plošných spojů (DPS) [23].

Typy vícevrstevných DPS.

- HDI (High Density Interconnector) - vysoká hustota zapojení na dané ploše běžného substrátu nebo desky
- SBU (Sequential Build-Up) - postupná laminace
- Slepé otvory (Blind via) - otvory spojují vnější vrstvu s vnitřní vrstvou
- Pohřbené otvory (Buried via) - otvory spojují pouze vnitřní vrstvy
- Mikro otvory (Micro via) - otvory s průměrem 0,2 mm a menší

Slepé otvory DPS

Slepé otvory – tyto otvory spojují vnější vrstvu DPS s vybranou vrstvou vnitřní. Důležitým omezením je podmínka dodržení tzv. ASPECT RATIO max. 1:1. Pokud je slepé vrtání aplikováno při systému postupné laminace DPS, je slepý otvor zalisován vnější vrstvou, a tím vznikne POHŘBENÝ OTVOR [23].

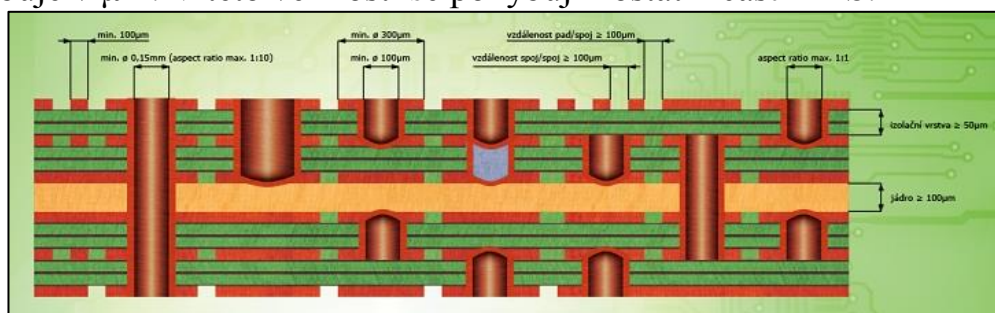
Pohřbené otvory DPS

Pohřbené otvory – zajišťují propojení dvou nebo více vnitřních vrstev DPS – aspect ratio je max. 1:10. Pohřbené otvory jsou vrtány jako standardní průchozí otvory do příslušného jádra (toto jádro může být tvořeno slisováním několika vnitřních vrstev) a následným přilísováním vnějších vrstev je otvor „pohřben“ uvnitř desky plošných spojů [23].

Stacked Vias DPS

Stacked Vias – v případě požadavku na slepý otvor s Aspect Ratio $> 1:1$ je možné použít metodu postupného vrtání otvoru. Pro tento postup se předpokládá, že každé dílčí vrtání má Aspect Ratio max. 1:1 [23].

Na obrázku 4.6 je znázorněn řez vícevrstvou deskou plošného spoje. Jedná se o modernější DPS. Nosným prvkem DPS je jádro z FR4 materiálu, jehož tloušťka se pohybuje v μm . V této velikosti se pohybují i ostatní části DPS.



Obr. 4.5: Grafické znázornění HDI desky [23].

4.7.2 Insulated Metal Substrate

S rozvojem výkonových LED zařízení, výkonnostních obvodů a obecně s potřebou odvádět teplo od součástek je stále častěji využíván materiál insulated material substrate (IMS). Materiál sestává z podložky, která je většinou z hliníku, dielektrické vrstvy a měděné fólie. Hliník může být nahrazen mědí, ovšem tato varianta je výrazně dražší. Podložka se může připojit k chladiči, což zajistí optimální chlazení. Dielektrická vrstva se kromě tloušťky liší ještě teplotní vodivostí. Standardně používáme typ MSC Polymer POLYTHERM 1.3 W-m-1.K-1 a hliník o složení 5052 [23].



Obr. 4.6: Složení IMS materiálu a velikosti jednotlivých vrstev [23].

4.7.3 Rigid-flex a flexi DPS

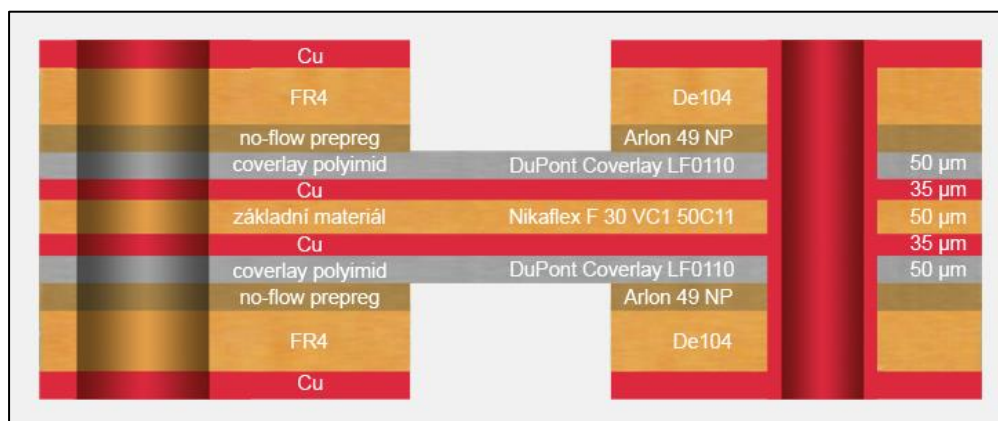
Ohebné plošné spoje se v posledních letech usadily na elektronickém trhu jako standardní produkt. Prosazují se tam, kde je zapotřebí minimalizovat hmotnost a rozměr finálního výrobku. Jako nosný materiál používáme polyimidový film, který je možné zpracovávat a používat ve větších teplotních podmínkách, např. ve srovnání s PET a PEN materiály. Obecně se musí nahlížet na ohebné plošné spoje jako na odlišný druh materiálu oproti standardní FR4 a je tak potřeba si uvědomit, že absorpce vlhkosti, roztažnosti ve všech osách a také adheze mědi výrazně mění jejich technologické možnosti [23].



Obr. 4.7: Grafické znázornění řezu DPS typu flex [23].

Existují 4 typy ohebných DPS:

1. Jednostranné
2. Oboustranné
3. Rigid-flex s flexibilní vnější vrstvou
4. Rigid-flex s flexibilní vnitřní vrstvou



Obr. 4.8: Řez ohebnou DPS se znázorněním velikosti jednotlivých vrstev [23].

Flexibilní DPS umožňují realizaci složitých sestav a přitom minimalizují velikost a hmotnost výrobku Obr. 4.9. Mají dynamickou a mechanickou pevnost v ohybu.

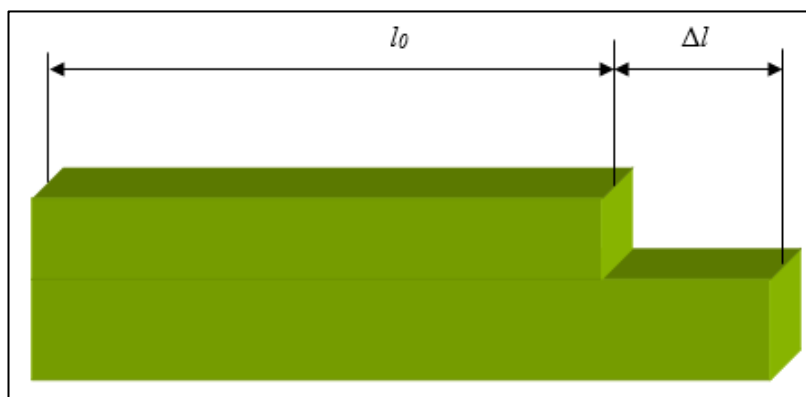
5. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SEPARACE DPS

V následujících kapitolách jsem matematicky popsal multifyzikální úlohy, protože hlavní myšlenkou separace není jen jeden jev, ale několik jevů zároveň, které se navzájem ovlivňují a které je nutno zohlednit.

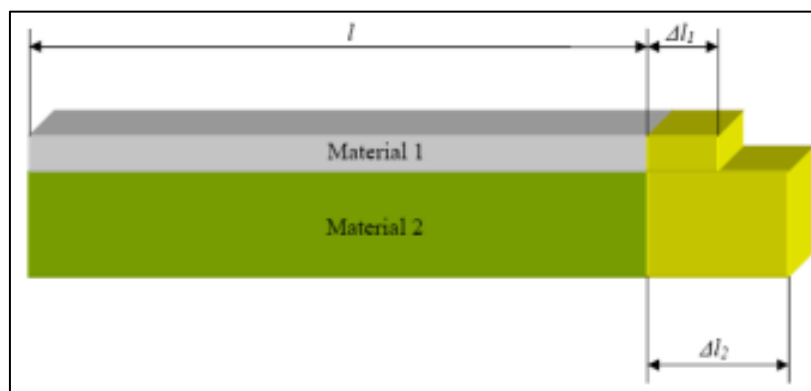
5.1 Délková roztažnost materiálů

Při změně teploty pevného tělesa dochází ke změně rozměrů tělesa. Jedná se o **teplotní roztažnost**. U těles, která mají převažující délku, hovoříme o **teplotní délkové roztažnosti**. Teplotní roztažnost je důsledkem vzdalování středních vzdáleností mezi částicemi látky vlivem jejich většího neuspořádaného pohybu. Závislost prodloužení na druhu materiálu vyjadřujeme s využitím teplotního součinitele délkové roztažnosti (α). Uvádí se ve fyzikálních tabulkách a jednotkou je K^{-1} . Číselná hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti materiálu se rovná číselné hodnotě prodloužení tyče z tohoto materiálu, která je dlouhá 1m, když její teplotu zvýšíme o 1K. Jestliže označíme počáteční délku tyče l_0 , její prodloužení Δl , pak [9]

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.1)$$



Obr. 5.1: Teplotní délková roztažnost



Obr. 5.2: Délková roztažnost dvou různých materiálů [37].

Velikost smykového napětí, které je potřeba k oddělení dvou desek, udává Hookův zákon [9].

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (5.2)$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2 \quad (5.3)$$

kde σ_1 je výsledné smykové napětí prvního materiálu [Pa]

σ_2 je výsledné smykové napětí druhého materiálu [Pa]

E_1 je modul pružnosti prvního materiálu [Pa]

E_2 je modul pružnosti druhého materiálu [Pa]

ε_1 je relativní prodloužení prvního materiálu [-]

ε_2 je relativní prodloužení druhého materiálu [-]

Úpravou a následným spojením více rovnic dostaneme vztah pro výpočet smykového napětí.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

kde σ je výsledné smykové napětí [Pa]

E je modul pružnosti [Pa]

α je součinitel délkové roztažnosti [K^{-1}]

ΔT je rozdíl teplot [K]

5.2 Kombinovaný režim rozlepení laminovaného kompozitu

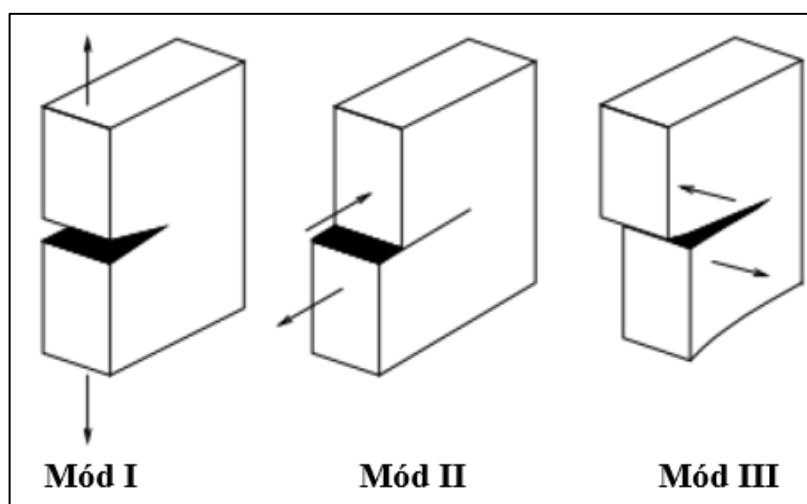
Mezi-povrchové selhání delaminace neboli odlepení je jedním z hlavních stavů laminátu. Mezi-povrchová selhání mohou být simulovány se soudržnou modelovou zónou - Cohesive Zone Model (CZM). Klíčovou složkou modelu soudržné zóny je oddělovací zákon, který popisuje měknutí v kohezní zóně blízko delaminační špičky. Tento příklad ukazuje implementaci CZM s bilineárním zákonem trakčního oddělování realizované v rozhraní COMSOL Multiphysics. Schopnosti CZM je předvídat nástup měknutí v kombinovaném režimu [15].

Tab. 5.1 Materiálové vlastnosti.

Vlastnost	Symbol	Hodnota
Normálová pevnost v tahu	N_s	80 MPa
Pevnost ve smyku	S_s	100 MPa
Tuhost	K_p	106 N·mm ⁻³
Mód I – kritické uvolnění energie	G_{Ic}	969 J·m ⁻²
Mód II – kritické uvolnění energie	G_{IIc}	1719 J·m ⁻²
Exponent Benzeggagh - Kenane (B-K) kritéria	H_b	2,284

CZM - používá se bilineární trakčně - separační zákon. Trakce se zvyšuje lineárně s tuhosti K_p dokud otvírající se trhliny nedosáhnou počátku selhání posuvu u_0 . Po otevření trhliny za u_0 materiál měkne nevratně a tuhost se snižuje jako funkce parametru poškození d . Materiál selže, jakmile tuhost klesla na nulu. To se děje v konečném posuvu u_f .

Hodnoty u_0 a u_f závisí na tom, zda roztažnost je normálová (mód I) nebo tangenciální (mód II a III). V následujících rovnicích, index I označuje mód I - delaminaci, index II mód II a m kombinovaný režim [15].



Obr. 5.3: Tři různé režimy zlomu: tah (Mód I), smyk (Mód II) a kombinace (Mód III) [49]

Počátek selhání posunutí pro mód I je:

$$u_{I0} = \frac{N_s}{K_p} \quad (5.5)$$

Počátek selhání posunutí pro mód II a mód III

$$u_{II0} = \frac{N_s}{K_p} \quad (5.6)$$

Konečné posunutí se určuje z lomové houževnatosti nebo z kritického uvolňování energie pro každý režim.

$$u_{If} = \frac{2G_{IC}}{N_s} \quad (5.7)$$

$$u_{IIIf} = \frac{2G_{IIC}}{S_s} \quad (5.8)$$

Poměr kritické energie módu I a II je vyjádřen vztahem:

$$\beta = \frac{u_{II}}{u_I} \quad (5.9)$$

s pomocí této definice je režim poškození smíšené iniciace řízen:

$$u_{m0} = u_{I0} \cdot u_{II0} \cdot \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{u_{II0}^2 + (\beta u_{I0})^2}} \quad (5.10)$$

Smíšený režim rozpadu soudržnosti materiálu je počítán s Benzeggagh–Kenane kritériem η . Používá se k měření delaminace v kompozitních materiálech.

$$u_{mf} = \frac{2}{K_p \cdot u_{m0}} \cdot \left[G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \cdot \left(\frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \right)^\eta \right] \quad (5.11)$$

5.3 Teplotní namáhání způsobené rozdílnými teplotními roztažnostmi jednotlivých vrstev

Podíl různých koeficientů teplotní roztažnosti jednotlivých vrstev na tepelném namáhání dané vrstvené konstrukce lze identifikovat pouze tehdy, když je vrstvená deska vystavena teplotní změně. Vliv teplotního gradientu je tedy vyloučen. Nechme dvojvrstvou stěnu vystavit změně teploty z výstupního (referenčního) stavu, který se předpokládá, že je bez napětí. Pokud by byly obě vrstvy vzájemně odděleny, změna relativní délky každé z nich by byla stejná ve všech směrech za předpokladu izotropních vlastností obou vrstev [29].

$$u_{mf} \varepsilon_k^T = \alpha_k \cdot \Delta T, \quad k = 1, 2, \quad \Delta T = T - T_m \quad (5.12a,b)$$

Jak je znázorněno na Obr. 5.4, rozdíl teplotní roztažnosti vrstev je vyrovnán pružnou deformací. Během ohřevu nebo chlazení, respektive ΔT , stěna navenek vykazuje (není zabráněno membránovým deformacím) některé makroskopické deformace membrány ε^T . Představme si (bez omezení obecnosti úkolu), že ΔT je pozitivní, tzn. Deska je ohřívána a $\alpha_2 > \alpha_1$. Vrstva 2 (plastový kompozit) je poté stlačena, vrstva 1 (měděná vodivá cesta) je roztažena - viz Obr. 5.1. Membránové deformace desky jsou volné, takže membránové síly v sekcích stěn jsou nulové. Proto platí následující vztah [29]:

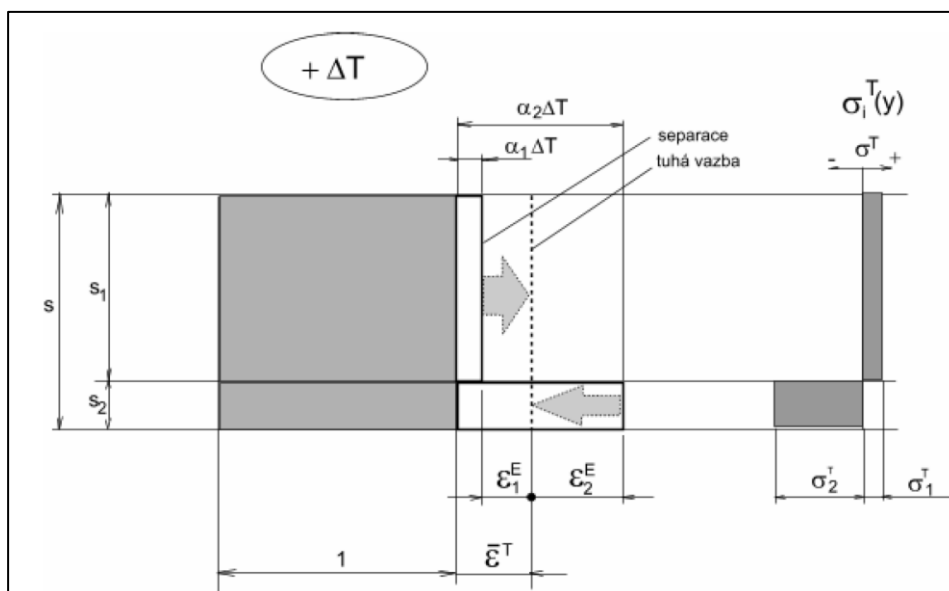
$$\sum_{k=1}^2 S_k \sigma_{ki}^T = 0, \quad i = x, z. \quad (5.13)$$

Napětí v každé vrstvě je ekvibiaxické, za předpokladu izotropie vrstev, takže index a osa souřadnicového systému v rovině stěny mohou být vynechány. Deformace v obou vrstvách se rovnají ε^T a jsou dány algebraickým součtem tepelné roztažnosti a elastické deformace. Vztah 5.14 [29]:

$$\varepsilon^T = \varepsilon_k + \varepsilon_k^T \quad (5.14)$$

Rovnici elasticity pro k-vrstvu lze psát v následujícím tvaru:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{E_k} \cdot (\sigma_k^T - \nu_k \sigma_k^T) = \frac{\sigma_k^T}{E_k^*}. \quad (5.15)$$



Obr. 5.4: Termomechanické chování dvouvrstvé desky při změně teploty [29].

Substituce vztahu 5.15 do vztahu 5.14:

$$\varepsilon^T = \frac{\sigma_k^T}{E_k^*} + \alpha_k \Delta T. \quad (5.16)$$

Pokud odvodíme σ_k^T a substituujeme rovnicí 5.13, dostáváme následující výraz pro efektivní rozšíření stěny

$$\varepsilon^T = \frac{\sum_{k=1}^2 E_k^* s_k \alpha_k}{\sum_{k=1}^2 E_k^* s_k} \Delta T = \alpha \Delta T \quad (5.17)$$

Hodnoty teplotního namáhání pak jsou

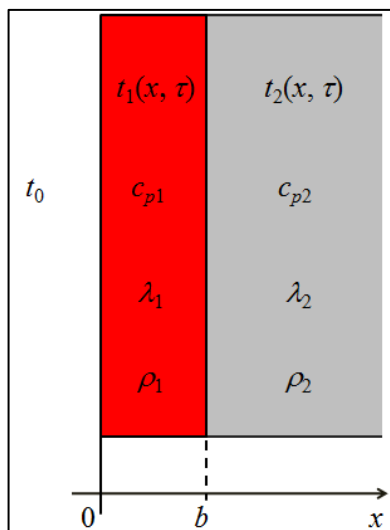
$$\sigma_k^T = E_k^* \Delta T (\alpha - \alpha_k) \quad , \quad k = 1, 2. \quad (5.18)$$

Vztah (5.17) se nevztahuje na oblasti volných okrajů dvouvrstvé desky. Zde je třeba vyřešit příslušnou hraniční úlohu. Napětí je udržováno ve smyslu lineární elasticity, pokud přetrvává změna teplotních podmínek. Ve skutečnosti je předmětem uvolnění kvůli viskoelastickému chování polymerní vrstvy [29].

5.4 Matematický popis teplotního pole v DPS

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

Při fyzikálním popisu neustáleného sdílení tepla ve dvouvrstvé rovinné desce uvažujeme poloohraničený masív v intervalu $0 < b < \infty$ z důvodu intenzivního ohřevu ze strany vodivých cest. Geometrické zobrazení daného problému zachycuje obr. 5.4 [20].



Obr. 5.5: Geometrické zobrazení modelu teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce [20].

Uvažovaná deska o počáteční konstantní teplotě t_p je vystavena náhlému tepelnému působení okolního prostředí. Matematický model daného procesu lze popsat Fourierovou rovnicí vedení tepla (5.19) s počátečními a okrajovými podmínkami (5.20) – (5.23)

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau}(x, \tau) = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}(x, \tau), \quad \tau > 0, 0 < x < b \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau}(x, \tau) = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}(x, \tau), \quad \tau > 0, b < x < \infty \quad (5.20)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_p \quad (5.21)$$

$$t_1(0, \tau) = t_0 \quad (5.22)$$

$$\frac{\delta t_2}{\delta x}(\infty, \tau) = 0 \quad (5.23)$$

$$t_1(b, \tau) = t_2(b, \tau) \quad (5.24)$$

$$\lambda_1 \frac{\delta t_1}{\delta x} (+b) = \lambda_2 \frac{\delta t_2}{\delta x} (-b) \quad (5.25)$$

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

Počáteční podmínka (5.21) je předpokladem počátečního rovnoměrného rozložení teploty v ohřivaném nebo chlazeném tělese. Okrajová podmínka (5.22) předpokládá, že teplota na okraji první vrstvy stýkající se s okolním prostředím je časově neměnná a rovná se teplotě okolí. Okrajová podmínka (5.23) je předpokladem neměnné teploty v nekonečné vzdálenosti druhé vrstvy (poloohraničený masív). Okrajové podmínky (5.24) a (5.25) jsou předpokladem dokonalého styku obou vrstev.

Pro řešení výše uvedeného matematického modelu je výhodné použít Laplaceovu transformaci [19]. Analytické řešení popisující teplotní pole v první vrstvě tělesa $t_1(x, \tau)$ má tvar

$$t_1 = \left[\sum_{n=0}^{\infty} h^n \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)b+x}{2\sqrt{a_1\tau}} - h \cdot \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)b-x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right\} \right] (t_o - t_p) + t_p \quad (5.26)$$

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

$$\frac{t_2 - t_p}{t_o - t_p} = \frac{2K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-b + (2n-1)K_a^{-\frac{1}{2}} b}{2\sqrt{a_2\tau}} \right) \quad (5.27)$$

kde:

$$h = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \quad (5.28)$$

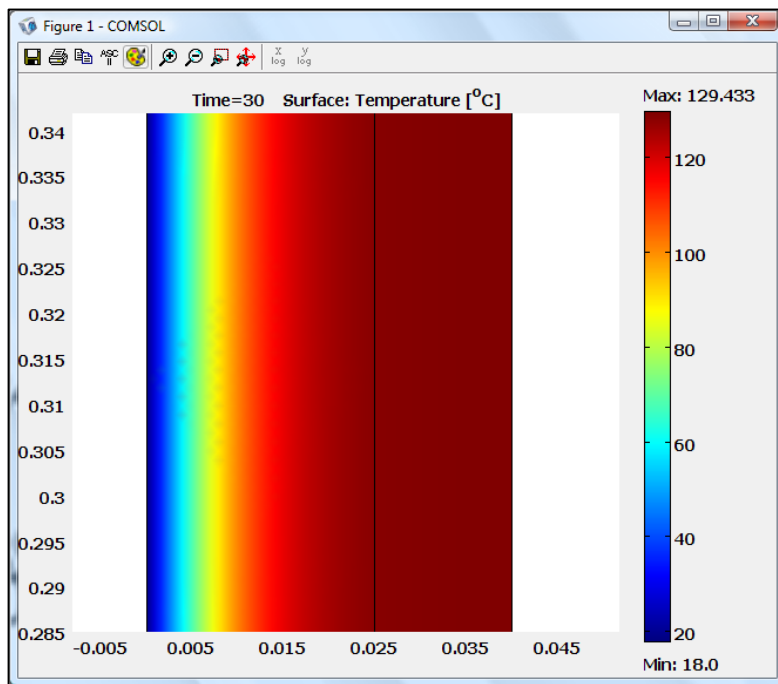
Kriteriální konstanty

$$K_a^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (5.29)$$

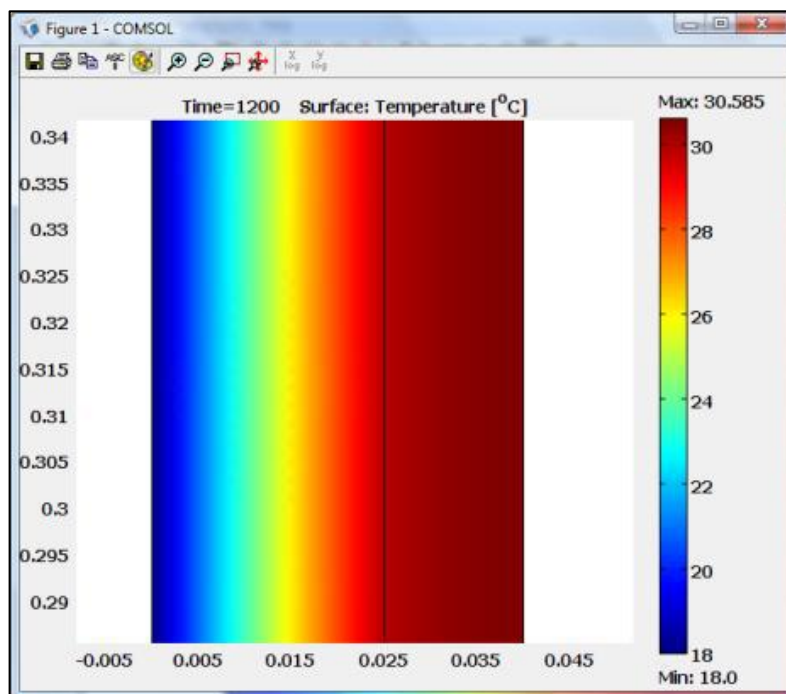
$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_1 c_{p1}}{\lambda_1 \rho_2 c_{p2}}} \quad (5.30)$$

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

Simulované průběhy teplotních polí jsou zachyceny na obrázcích obr. 5.6 a 5.7. Obrázek Obr. 5.6 zachycuje teplotní pole v DPS při termické separaci po dobu 30 sekund. Obrázek Obr. 5.7 znázorňuje průběhy teplotních polí v DPS po dobu 1200 sekund.



Obr. 5.6: Teplotní pole v DPS po dobu 30 sekund [34].



Obr. 5.7: Teplotní pole v DPS po dobu 1200 sekund [34].

5.4.1 Výpočet teplotního pole ve dvouvrstvé DPS

V následující kapitole uvádím konkrétní výpočet teplotních polí ve dvouvrstvé DPS. V první části je uveden výpočet ohřevu DPS a ve druhé chlazení DPS. Použité hodnoty a parametry výpočtu uvádím níže v tabulkách Tab. 5.2 – Tab. 5.5 [50].

Tabulky zadaných hodnot:

Tab. 5.2: Hodnoty a vlastnosti kovu

Parametr	Hodnota
Tloušťka vrstvy b [m]	0.00003
Součinitel tepelné vodivosti λ_1 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	384
Hustota ρ_1 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	8900
Měrná tepelná kapacita c_{p1} [$\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	383

Tab. 5.3: Hodnoty a vlastnosti plastu

Parametr	Hodnota
Tloušťka vrstvy x [m]	0,0015
Součinitel tepelné vodivosti λ_2 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,88
Hustota ρ_2 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1900
Měrná tepelná kapacita c_{p2} [$\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	800

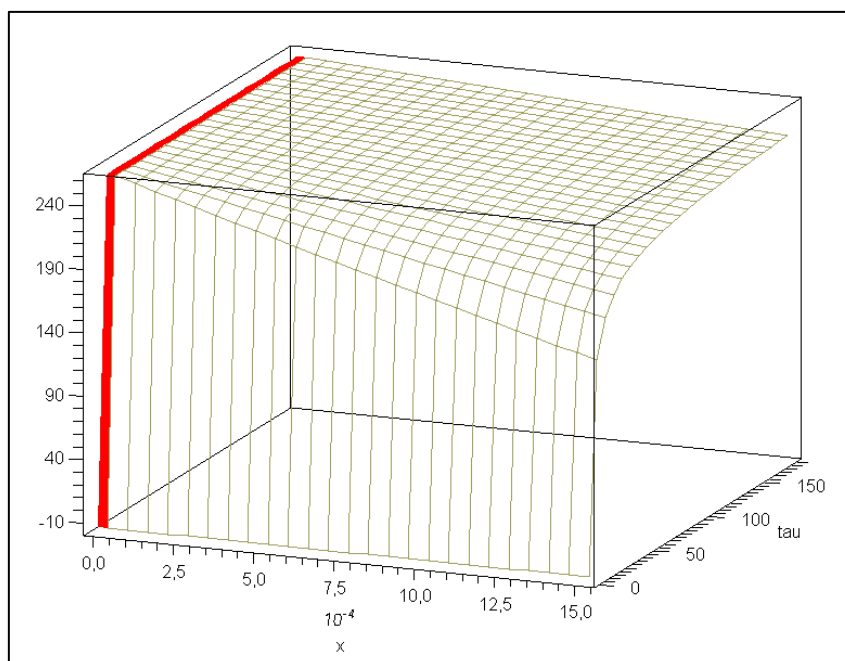
Tab. 5.4: Podmínky ohřevu

Parametr	Hodnota
Počáteční teplota materiálů t_p [$^{\circ}\text{C}$]	14
Teplota ohřevu t_0 [$^{\circ}\text{C}$]	250
Doba ohřevu τ [s]	180

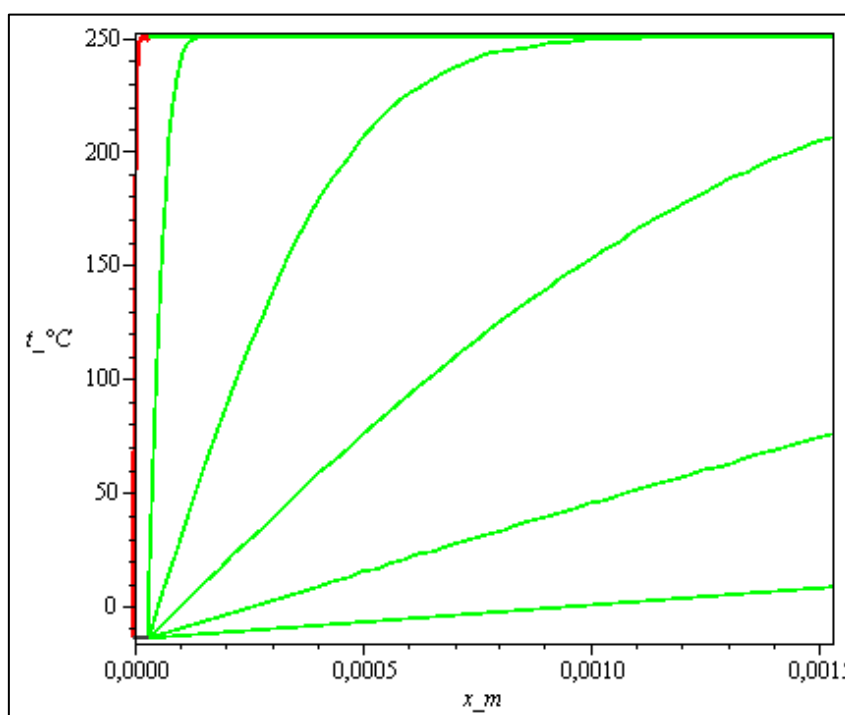
Tab. 5.5: Podmínky chlazení

Parametr	Hodnota
Počáteční teplota materiálů t_p [$^{\circ}\text{C}$]	250
Teplota chlazení t_{chl} [$^{\circ}\text{C}$]	-14
Doba chlazení τ_{ch} [s]	180

Hodnoty v tabulkách jsem použil pro výpočet teplotních polí v DPS. Výsledky jsou zobrazeny na obrázcích Obr. 5.8 a Obr. 5.9. Červená čára v grafu reprezentuje tenkou vrstvu materiálu a její ohřev. Z grafů je zřejmé, že teplota v tomto materiálu je téměř stejná s teplotou ohřevu a téměř okamžitě.

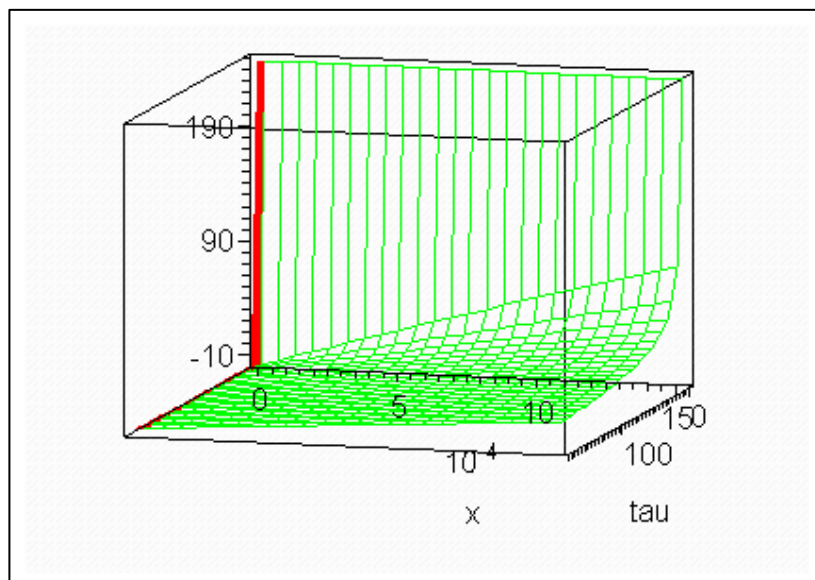


Obr. 5.8: 3D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – ohřev [50]

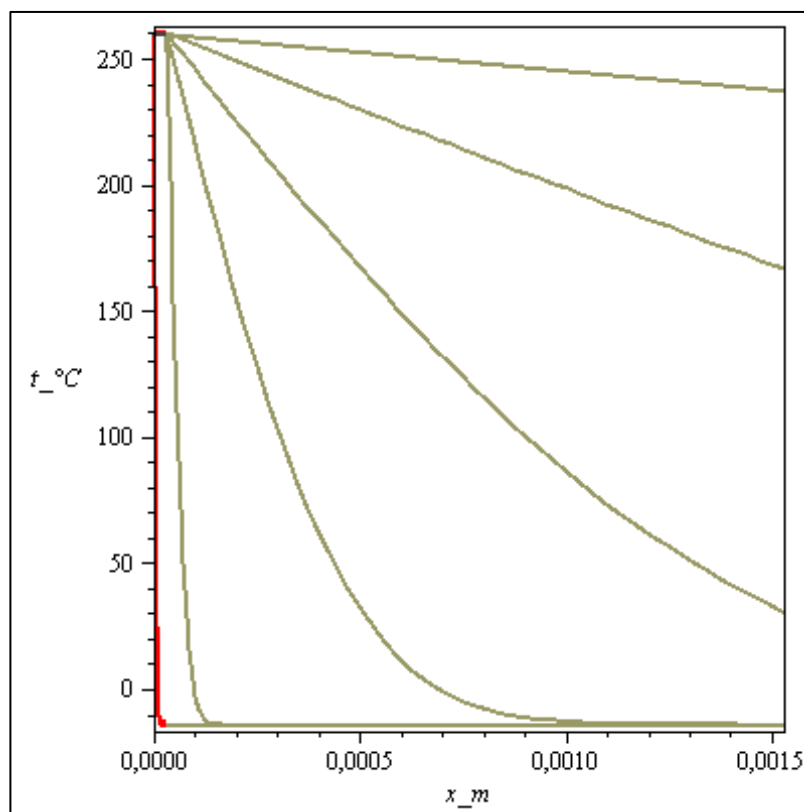


Obr. 5.9: 2D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – ohřev [50]

Grafické zobrazení vypočtených hodnot chlazení Obr. 5.10. Opět vidíme analogii s grafem ohřevu. Teplota v tenké vrstvě, zobrazena červenou čarou, je téměř shodná, jako teplota chlazení.



Obr. 5.10: 3D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – chlazení [50]



Obr. 5.11: 2D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – chlazení [50]

Je zřejmé, že ačkoliv je počítačová simulace zjednodušením reálného procesu, poskytuje velmi rychlou představu o průběhu daného tepelného procesu a vypočtená data lze použít k jeho optimalizaci [20], [48].

PRAKTICKÁ ČÁST

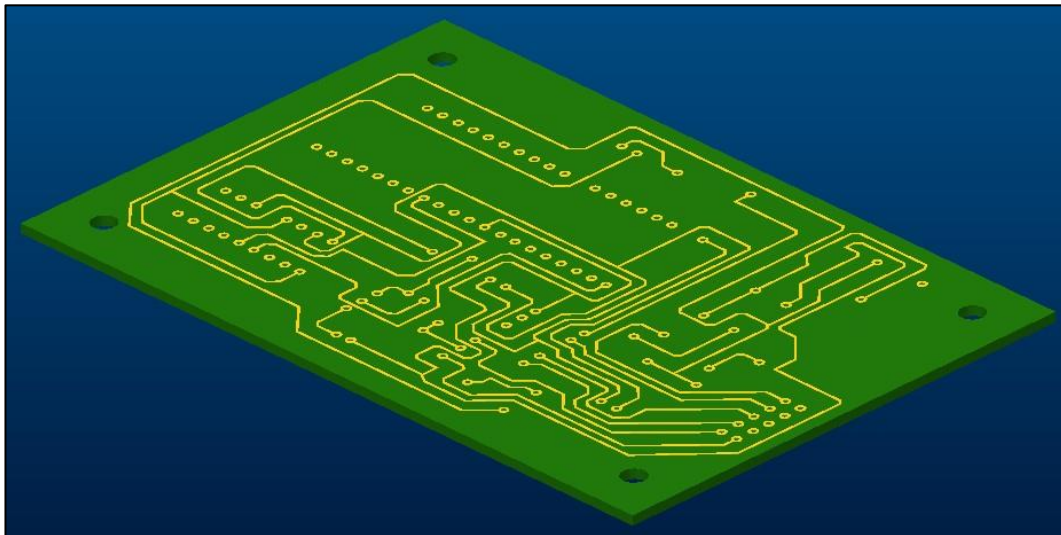
V praktické části se věnuji počítačovým simulacím fyzikálních procesů aplikovaných na DPS a praktickým zkouškám, kterými ověřuji výsledky z počítačových simulací.

6. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY

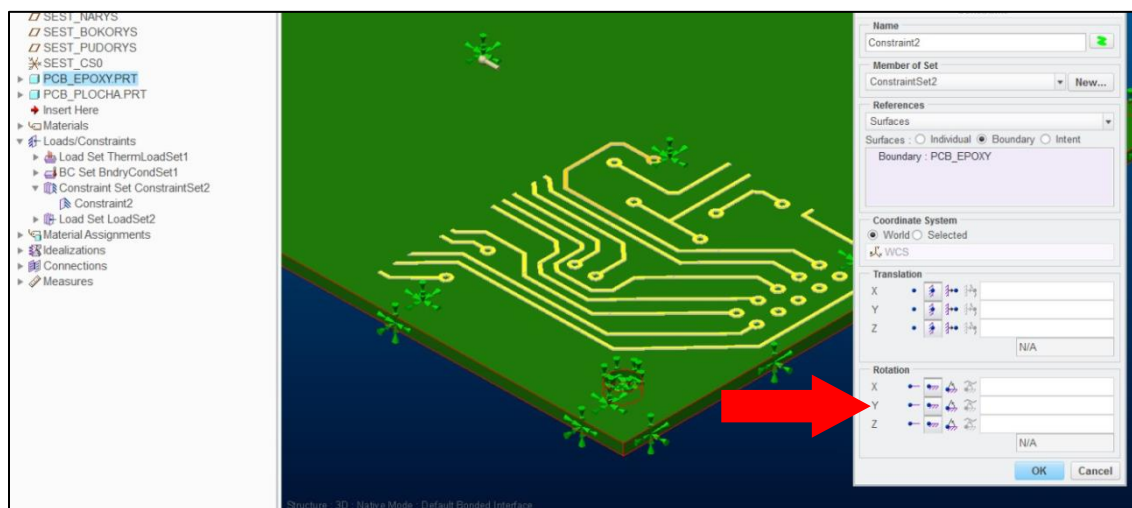
Kapitoly níže popisují provedené počítačové simulace teplotního namáhání v DPS. Použil jsem SW Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics®. SW Pro/ENGINEER pro 3D modelování DPS a elektronických součástek a SW COMSOL Multiphysics® pro řešení simulačních úloh pomocí metody konečných prvků. Software lze s úspěchem používat v situacích, kdy je nutné do modelu zahrnout více fyzikálních procesů – jedná se pak o komplexní multifyzikální úlohy. Tímto postupem je možné dosáhnout výrazně vyšší věrohodnosti modelovaného systému. Uživatel může do jedné úlohy zahrnout libovolný počet fyzikálních jevů, které chce brát při vytváření svého modelu v úvahu [27].

6.1 Modelování a simulace DPS

Zaměřil jsem se na modelování DPS podle podkladu reálné desky plošného spoje, kdy můžu simulovat teplotní přechody a vzniklé smykové napětí v počítači přímo pro konkrétní vzorek a následně jej porovnat v laboratoři. Byl brán ohled na použitou DPS, v tom smyslu, jestli se jedná o desku jednovrstvou nebo složenou a také na použitý materiál. Použil jsem knihovnu materiálů, která je součástí SW.



Obr. 6.1: 3D prostředí SW Pro/ENGINEER.



Obr. 6.2: Simulační prostředí a definice podmínek uchycení DPS

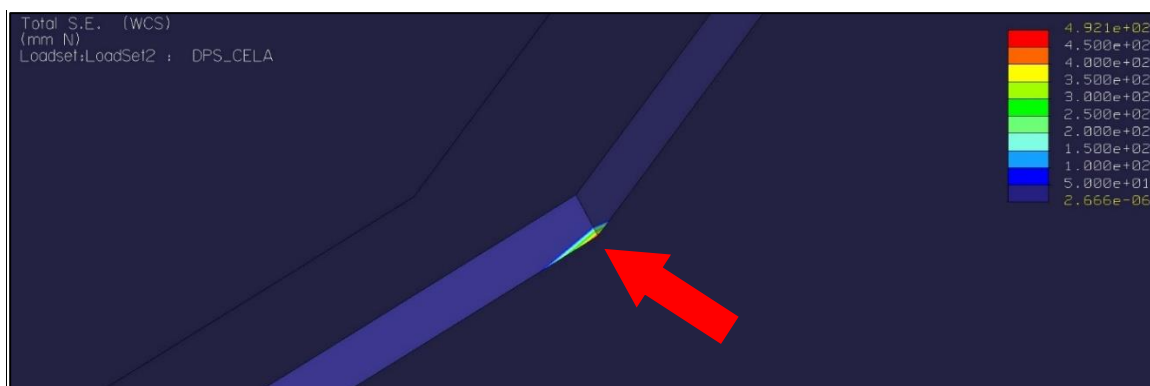
Na obrázku Obr. 6.2 je zachyceno simulační prostředí SW Pro/ENGINEER s oknem pro zadávání podmínek stupňů volnosti. Pro tuto simulaci jsem zvolil uchycení DPS bez stupňů volnosti. Na toto nastavení ukazuje červená šipka.

6.2 Proces simulace smykového napětí v DPS

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

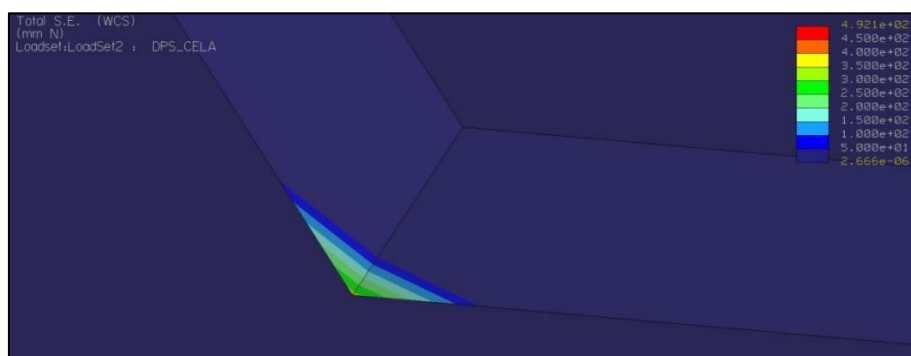
V dalším kroku jsem nadefinoval ohřev na 260°C a okrajové podmínky. Při této simulaci jsem DPS zahříval celou. Jakmile byla teplotní analýza ukončena, použil jsem výsledné rozložení teplot pro strukturální analýzu.

Vlivem různých délkových roztažností materiálu došlo ke vzniku napjatosti mezi materiály a k průvodnímu jevu – smykovému napětí. Výsledek z této analýzy je prezentován na obrázku Obr. 6.3. K maximální napjatosti došlo v místě zobrazené červenou šipkou. Hodnota tohoto namáhání je 492,1 MPa.

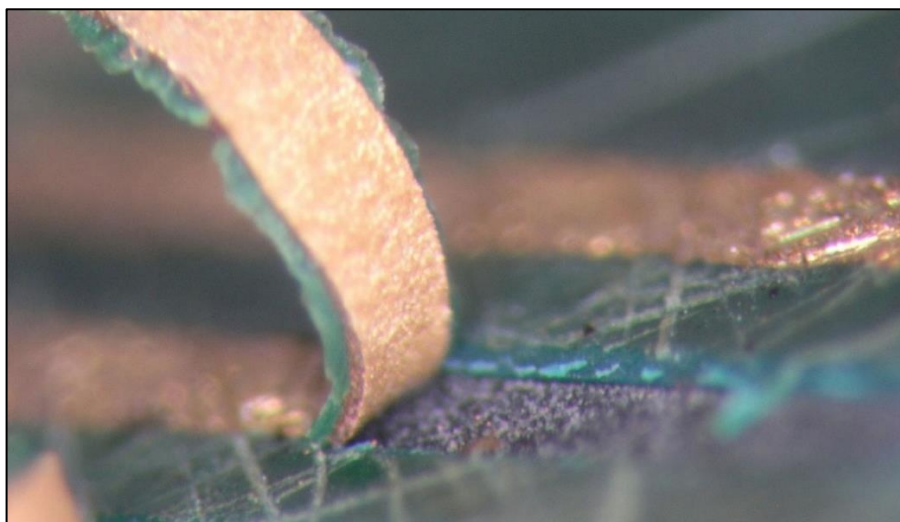


Obr. 6.3: Výsledné smykové napětí mezi měděnou vodivou cestou a Epoxy pryskyřicí.

Výsledky simulace jsou zajímavé z pohledu vzniklého smykového napětí mezi měděnou cestou a Epoxy deskou. Překonané smykové napětí bylo lokální a dle definovaných podmínek se objevovalo na hraně měděné cesty obrázek Obr. 6.4. Dle barevné škály je vidět, že překonalo vypočtené smykové napětí pro lepené spoje a hrozí deformace a následně povolení spoje mezi měděnou vodivou cestou a Epoxy deskou. Sice se objevuje je na několika místech, ale i toto je dostačující pro pokračování separace mechanickým odtržením. Už není potřeba veliké síly pro stržení vodivé cesty z DPS. Což je v souladu s praktickým měřením na obrázku Obr. 6.5.



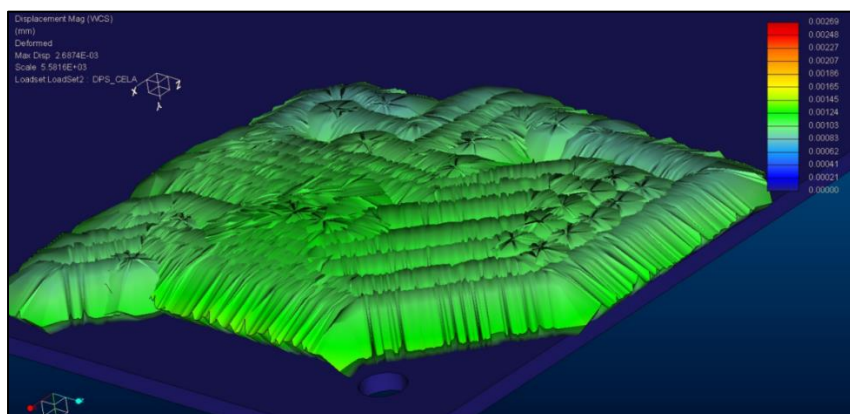
Obr. 6.4: Zobrazení maximální hodnoty namáhání - 492 MPa.



Obr. 6.5: Zobrazení odlupující se měděné vodivé cesty z DPS. Fotografie byla pořizena při 5,6 násobném zvětšení.

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

Následující výsledek, obrázek Obr. 6.6, simulace vychází z výše uvedené simulace. Dle stupnice je vidět délková roztažnost měděných vodivých cest na DPS. Maximální velikost roztažení je 2,69 μm . Opět je dáno menším ohřevem DPS.

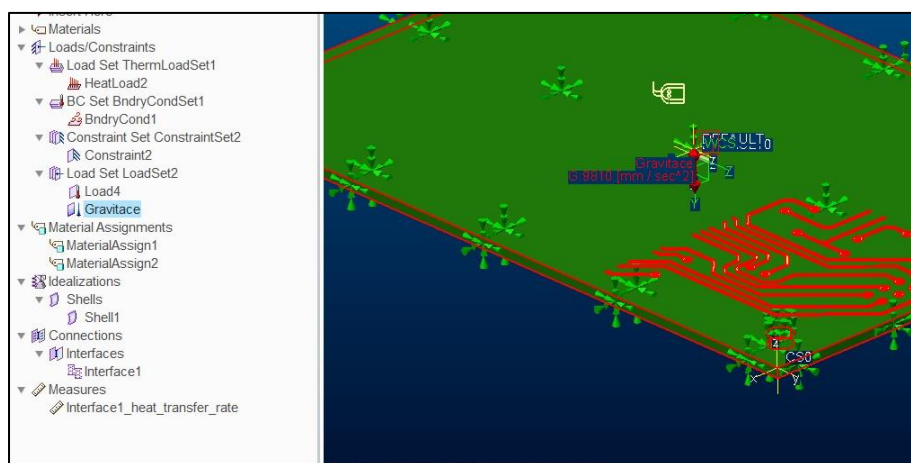


Obr. 6.6: Několikanásobné zvětšení – deformace DPS a měděných vodivých cest, která je způsobena rozdílnými vlastnostmi materiálů.

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

Další ovlivnění výsledné simulace bylo způsobeno změnou podmínek mezi vodivými měděnými cestami a Epoxy deskou. První modely byly počítány a simulovány s podmínkou Bonded (pevné připojení) a další s podmínkou Shell (Existuje tenká vrstva mezi měděnými cestami a Epoxy deskou). Tato podmínka měla obrovský vliv na výsledek simulace, protože docházelo k jinému rozložení teplot a tím i k jiné deformaci DPS. Opět záleželo na podmínce uchycení a počtu stupňů volnosti.

V této analýze byla zahrnuta i gravitace, která působí na DPS. Použitím gravitačního zrychlení v simulaci jsem obdržel reálnější výsledek simulace Obr. 6.7.

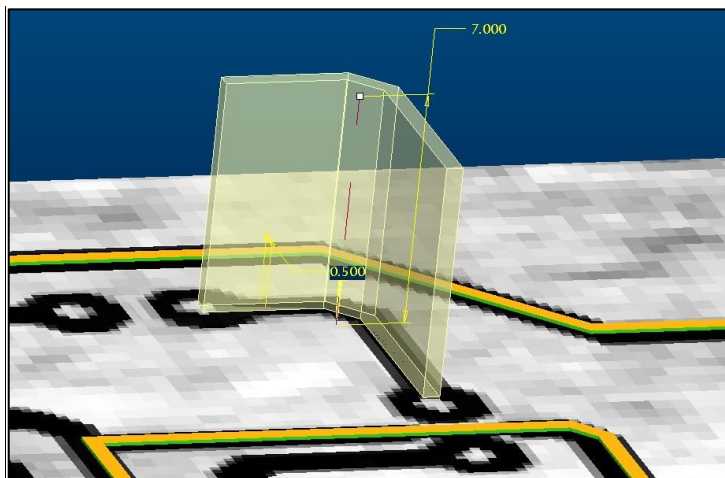


Obr. 6.7: Simulační prostředí s definicí gravitace

6.3 Modelování DPS podle podkladu skutečné DPS

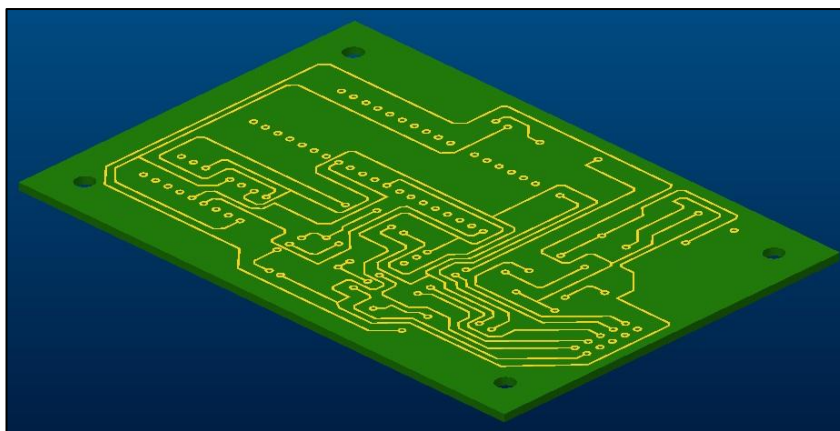
V dnešní době se pro přesnost 3D modelu k fyzickému výrobku používají skenery, které převádí naskenované hodnoty do „mračna“ bodů v počítači a následně se tyto body spojují a vyhlazují tak, aby při optických analýzách nedocházelo ke zkreslení. Touto metodou se vyrábí např. pažby zbraní a hlavice kloubních náhrad. Tato metoda je rychlá, přesná, ale drahá a najde uplatnění jen tam, kde se výsledek ze simulací rychle vrací v podobě včasného a přesného výrobku.

Pro modelování DPS jsem zvolil jinou metodu, a to obtisk obrázku na plochu v 3D prostoru a následně vytažení geometrie do prostoru. Takto lze velice rychle modelovat reálnou součástku, kde není potřeba mít hodně členitou plošnou geometrii Obr. 6.8.



Obr. 6.8: Modelování plošných spojů v 3D prostředí Pro/ENGINEER

Na následujícím obrázku Obr. 6.9 je znázorněna 3D sestava reálné DPS. Tato sestava je složena ze dvou dílů. Prvním z nich jsou měděné vodivé cesty a druhým je Epoxidová deska. Model byl vytvořen jako sestava, protože tento způsob dovoluje lehčí modifikaci pro případné změny podmínek 3D geometrie.

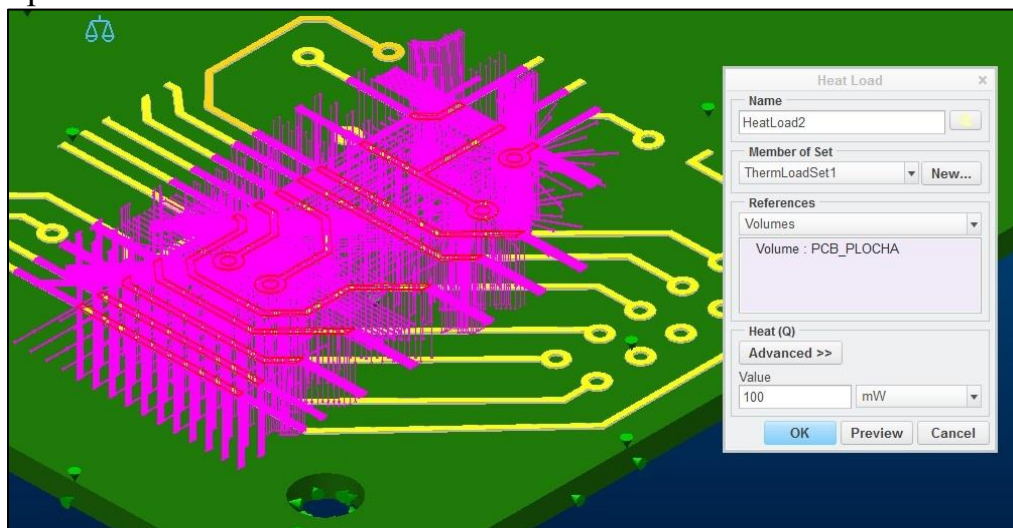


Obr. 6.9: Výstup z modelování - Model DPS dle reálné předlohy.

6.4 Ohřev pomocí teplotního regionu

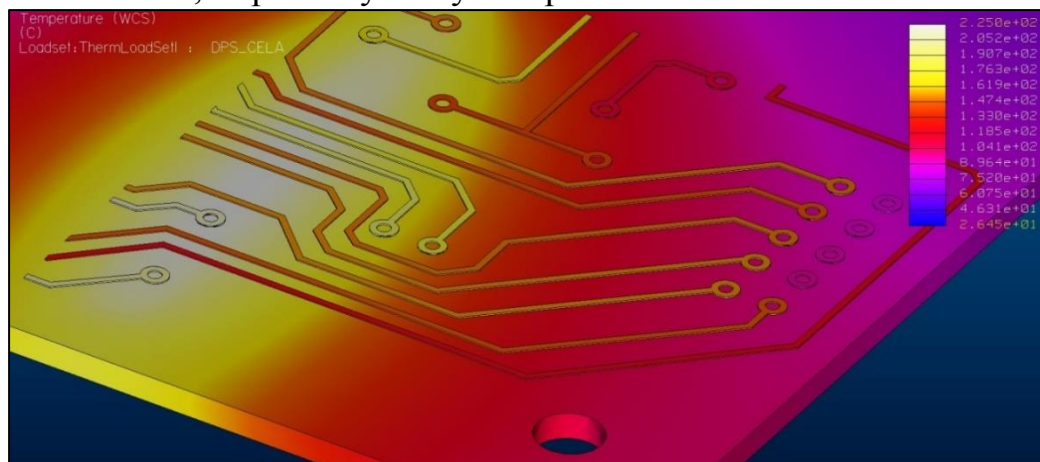
Ohřev pomocí teplotního regionu simuloval ohřev v konkrétním místě na DPS. Takto bylo simulováno chování DPS při lokálním teplotním zatížením. Tímto způsobem ohřevu jsem chtěl dospět k odpovědi na otázku „Jak se DPS zachová při lokálním ohřevu a má tento typ ohřevu vliv na vznik potřebného smykového napětí?“.

DPS jsem zahřival lokálně 100 mW. V tomto případě se jedná o stacionární vedení tepla Obr. 6.10.



Obr. 6.10: Zobrazení místa teplotního regionu a směrů působení nadefinovaného tepla o intenzitě 100 mW.

Výsledné rozložení teplot je patrné na obrázku Obr. 6.11. Maximální teplota ohřevu dosáhla 225 °C. Dle obrázku je také patrné, že výsledná teplota v místě ohřevu závisí na délce měděných vodivých cest. Při této simulaci došlo k postupnému odvodu tepla delšími měděnými cestami z ohřívané oblasti a tím k jejich ochlazování. Cesty, jejichž délka byla krátká anebo přímo končily v ohřívané oblasti, se prohřály na vyšší teplotu.

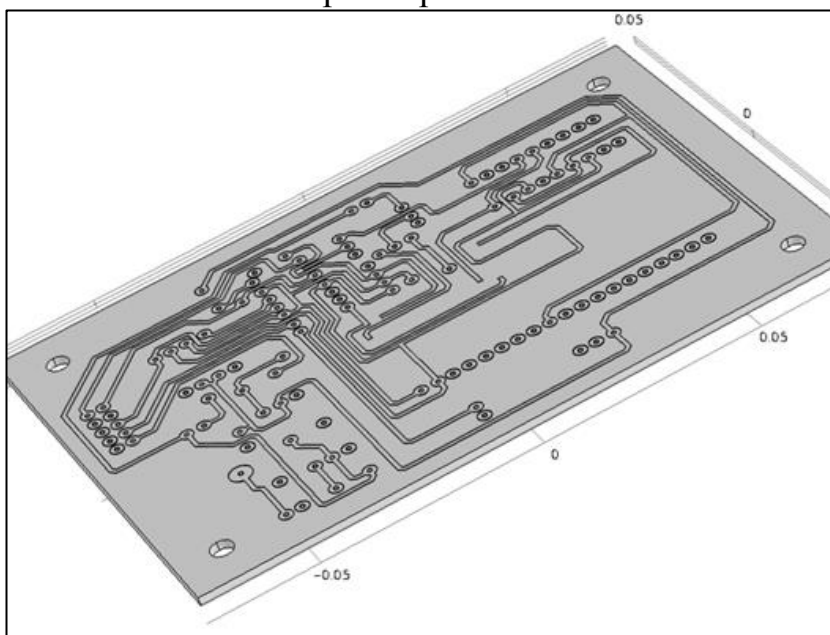


Obr. 6.11: Finální rozložení teploty v DPS. Zahřívání teplotním regionem o 100mW.

6.5 Přímý ohřev vodivých měděných cest v závislosti na čase

V následující části jsem provedl simulaci přímého ohřevu některých vodivých měděných cest DPS v závislosti na čase – nestacionární vedení tepla. Měděné spoje byly zahřívány po dobu 60s na teplotu 400K. Tento počáteční krok v celé řadě simulací vedl k ověření chování teplotních polí v DPS v závislosti na vzdálenosti měděných cest od sebe.

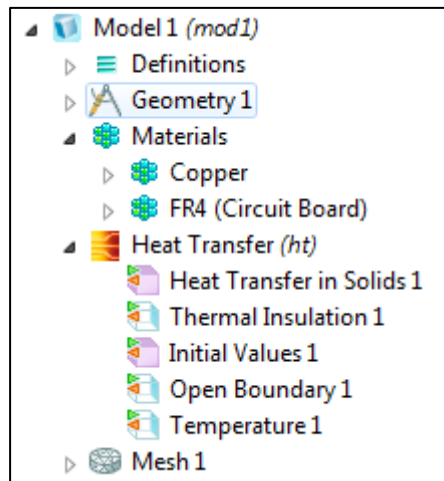
V prvním kroku jsem naimportoval model DPS do prostředí COMSOL Multiphysics®. Na obrázku Obr. 6.12 je 3D model DPS v měřítku 1:1. Obsahuje několik vodivých měděných cest s různou vzdáleností cest tak, aby bylo možné porovnat vliv této vzdálenosti na teplotní pole.



Obr. 6.12: Importovaný model do prostředí COMSOL Multiphysics®

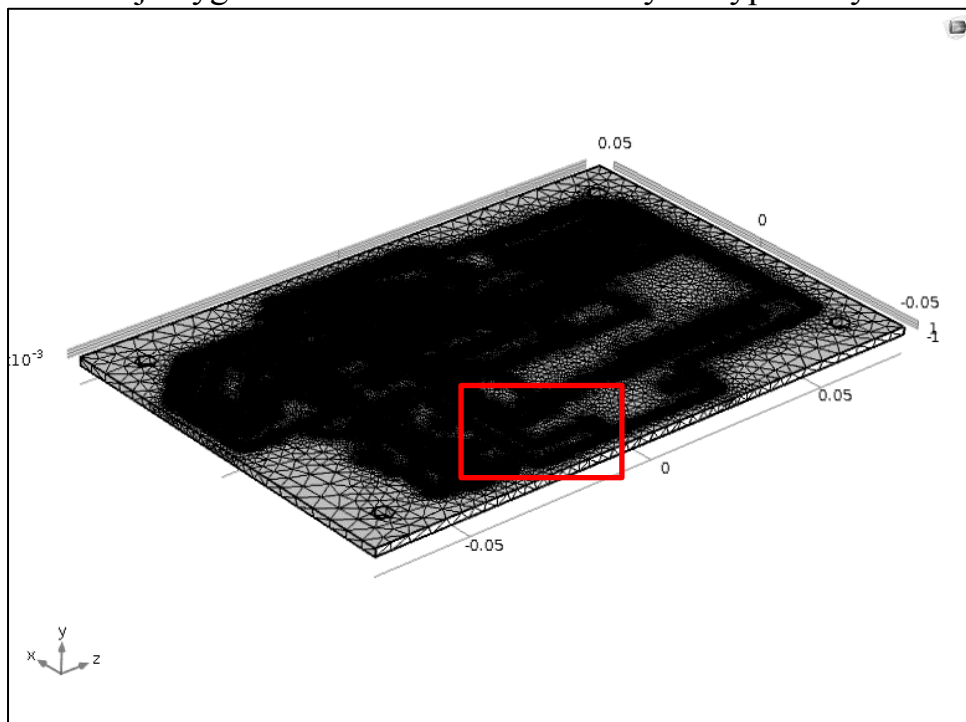
Dalším krokem při simulaci ohřevu DPS byla definice materiálů. K výběru je několik desítek materiálů obsažených v materiálové knihovně. Vybral jsem materiál měď a FR4. Materiály již obsahují vlastnosti a parametry potřebné pro simulace. Pokud by některý z parametrů chyběl, lze jej jednoduše dopsat. V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

Po definici materiálů a jejich přiřazení geometrii následuje krok definice simulačních podmínek např. zdroje tepla, okrajové podmínky, atd.



Obr. 6.13: Definice podmínek pro simulaci v prostředí COMSOL Multiphysics

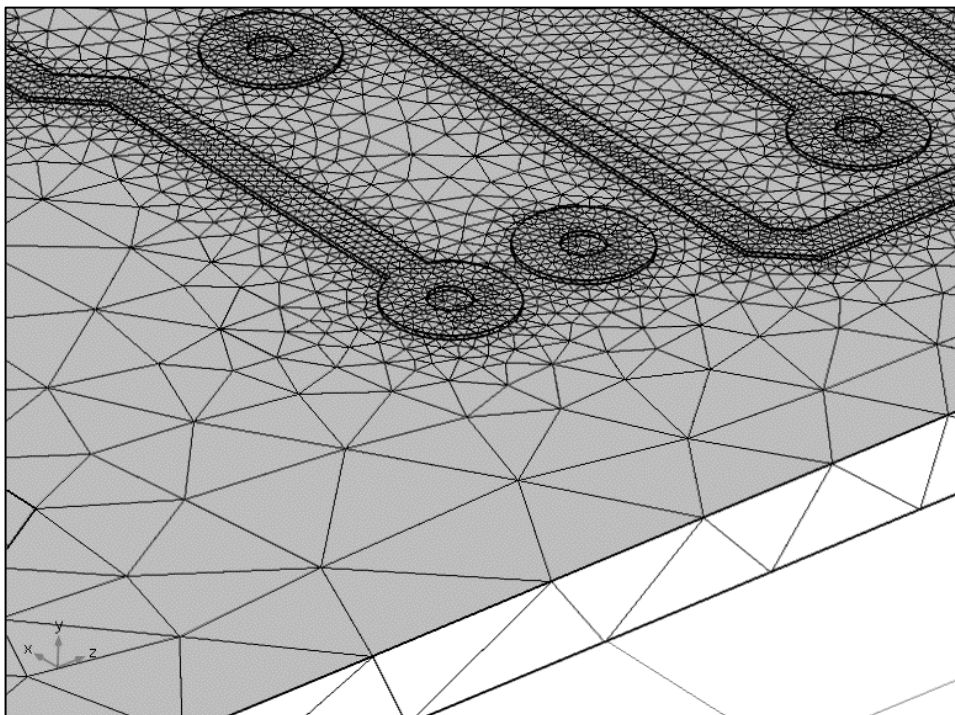
Předposledním krokem je vygenerování sítě, která pokryje geometrii. Obrázek Obr. 6.14 zobrazuje vygenerovanou síť s různě velkými výpočtovými elementy.



Obr. 6.14: Pokrytí modelu DPS výpočtovou sítí.

Celkový pohled na model, který je pokryt výpočtovou sítí, je dost nepřehledný Obr. 6.14, proto jsem na tomto obrázku červeným obdélníkem označil místo a zvětšil na obrázku Obr. 6.15.

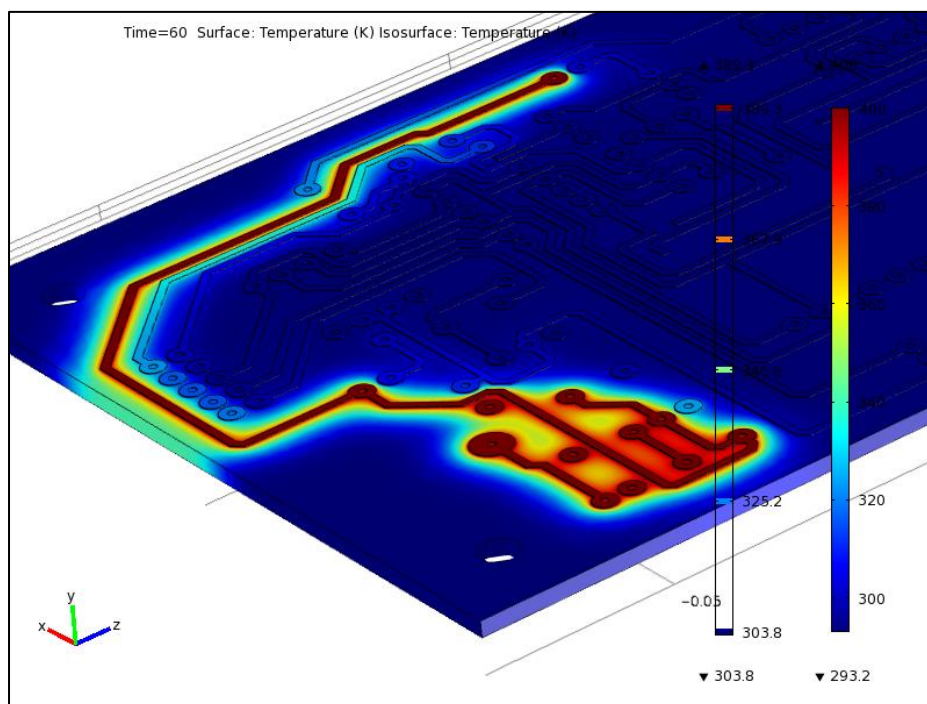
Velikost jednotlivých elementů sítě je patrný na obrázku Obr. 6.15. Různě velké elementy sítě se používají z důvodu zjednodušení a zrychlení výpočtu. Tam, kde není potřeba mít detailní pohled na výsledné chování, se použijí větší elementy sítě a naopak.



Obr. 6.15: Detailní zobrazení různě velkých výpočtových elementů sítě.

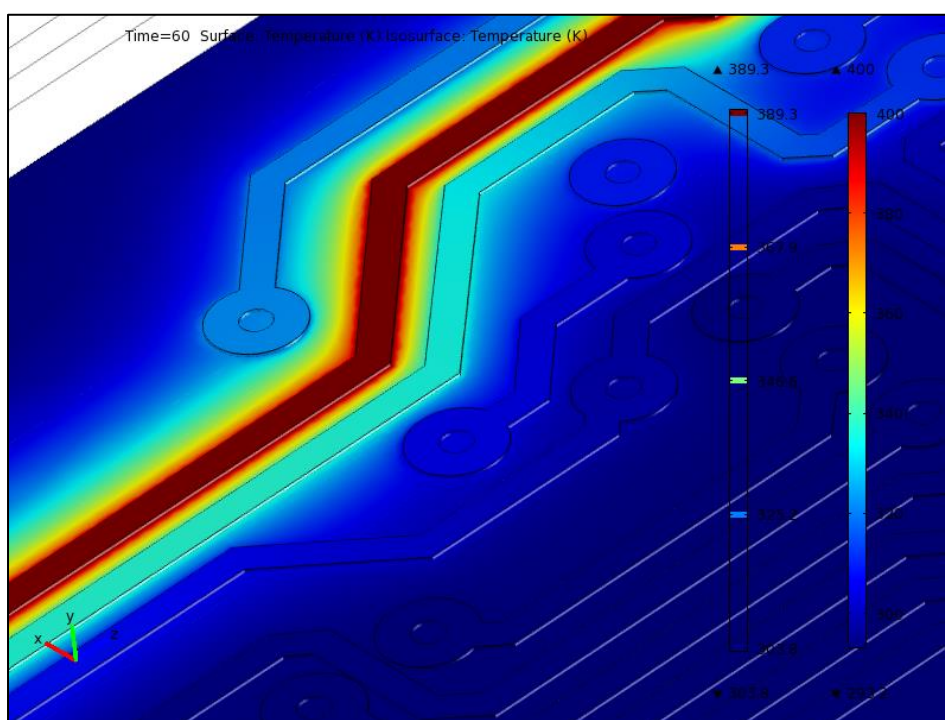
Po definici všech podmínek jsem spustil simulaci. Tato simulace trvala několik desítek minut a jejím výsledkem jsou následující obrázky.

Prvním z nich je celkový pohled na DPS s ohřátými měděnými vodivými cestami na 400K po dobu 60s. Tento pohled dává celkovou představu o chování závislosti vzdálenosti vodivých cest a teploty.



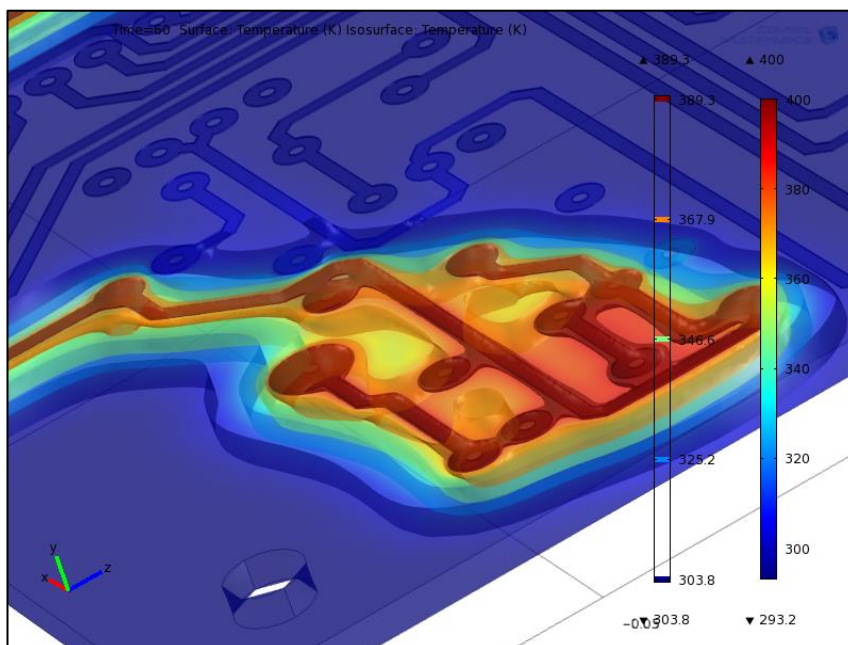
Obr. 6.16: Celkový pohled na DPS s ohřátými cestami na 400K po dobu 60 s.

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



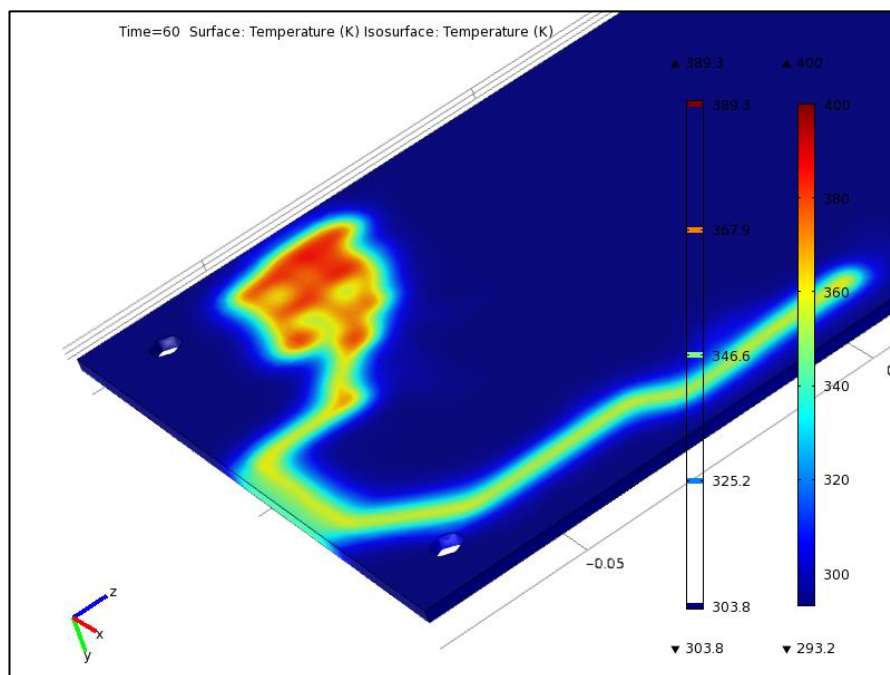
Obr. 6.17: Zobrazení zahřáté vodivé cesty a ovlivnění okolí. Barevná stupnice zobrazuje teplotní rozsah v DPS. Zahřívání po dobu 60 s na teplotu 400 K.

Pro zobrazení teplotních polí uvnitř DPS jsem použil transparentní zobrazení. Toto zobrazení je velice užitečné a pomáhá při analýze vnitřních procesů během simulace.



Obr. 6.18: Transparentní zobrazení teplotních polí uvnitř DPS. Ohřev vodivých cest na teplotu 400K po dobu 60s.

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



Obr. 6.19: Prohřátí DPS za dobu 60s.

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

6.6 Teplotní cyklické namáhání

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

Pomocí rozhraní Fatigue můžeme vypočítat riziko vzniku únavových trhlin v struktuře materiálů, kde byl stav napětí a deformace během jednoho zatěžovacího cyklu. Pro dosažení požadovaného cíle můžeme použít jedno z následujících fyzikálních rozhraní - Solid Mechanics, Shell, Plate, Multibody Dynamics, Thermal Stress, Joule Heating and Thermal Expansion, nebo Piezoelectric Devices.

Mohou být provedeny čtyři základní typy analýzy:

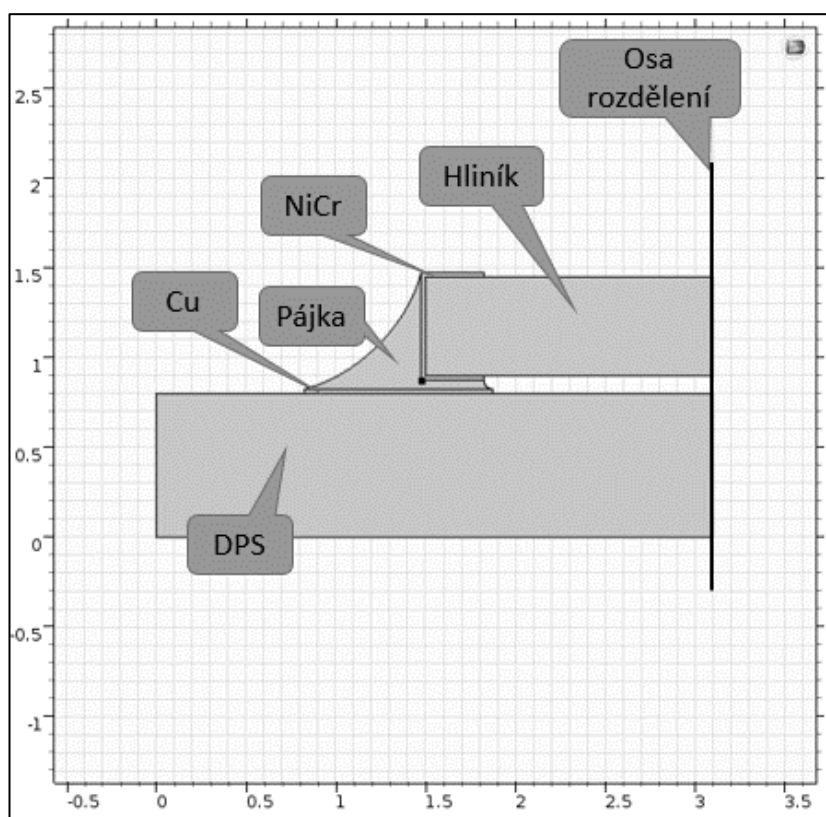
- **Analýza napjatosti** - pro vysokou únavu materiálu. Výsledkem je faktor využití, který říká, jak blízko k únavovému limitu je zatěžovací cyklus.
- **Deformační analýza** - pro nízkou únavu materiálu. Výsledkem je celoživotní predikce z hlediska počtu cyklů na únavu materiálu.
- **Analýza založená na energii**, když rozptýlovaná energie řídí tvorbu trhlin a jejich růst. Výsledkem jsou předpovědi, pokud jde o počet cyklů na únavu materiálu a ztrátu hustoty energie z únavy materiálu.
- **Kumulativní analýza poškození** pro únavu materiálu. Výsledkem je faktor využití, který říká, jak blízko k únavovému limitu je zatěžovací cyklus. Tento typ analýzy počítá napěťové cykly, znázorňující rozložení aplikovaného zatížení a faktor relativního využití z každé úrovně napjatosti.

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

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

6.6.1 Model určený pro simulaci

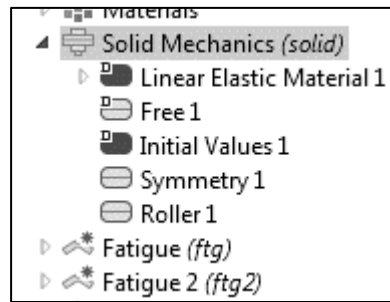
Model jsem do prostředí COMSOL Multiphysics® importoval. Důvodem je složitost konstruování modelu v tomto SW a je lepší veškeré modely vytvořit v jiných SW a následně je importovat. Obrázek Obr. 6.20 zobrazuje použitý model elektronické součástky v měřítku 1:1 a přiřazené materiály ke geometrii. Pro zrychlení výpočtu jsem model rozdělil na dvě stejné části, přičemž druhá část je z výpočtu vynechána. Obdobný princip se používá pro simulace součásti, které jsou symetrické např. příruba.



Obr. 6.20: Model s definovanými materiály, který byl použit pro simulaci únavy materiálů

6.6.2 Modul simulace

Jednou z hlavních podmínek simulace, je výběr správného modulu. Pro tento konkrétní případ jsem zvolil modul Solid Mechanics s doplňkovými podmínkami. Tyto podmínky jsou zobrazeny na obrázku níže. Mezi tyto podmínky patří únavová podmínka, podmínka symetrie, podmínka volných ploch,...

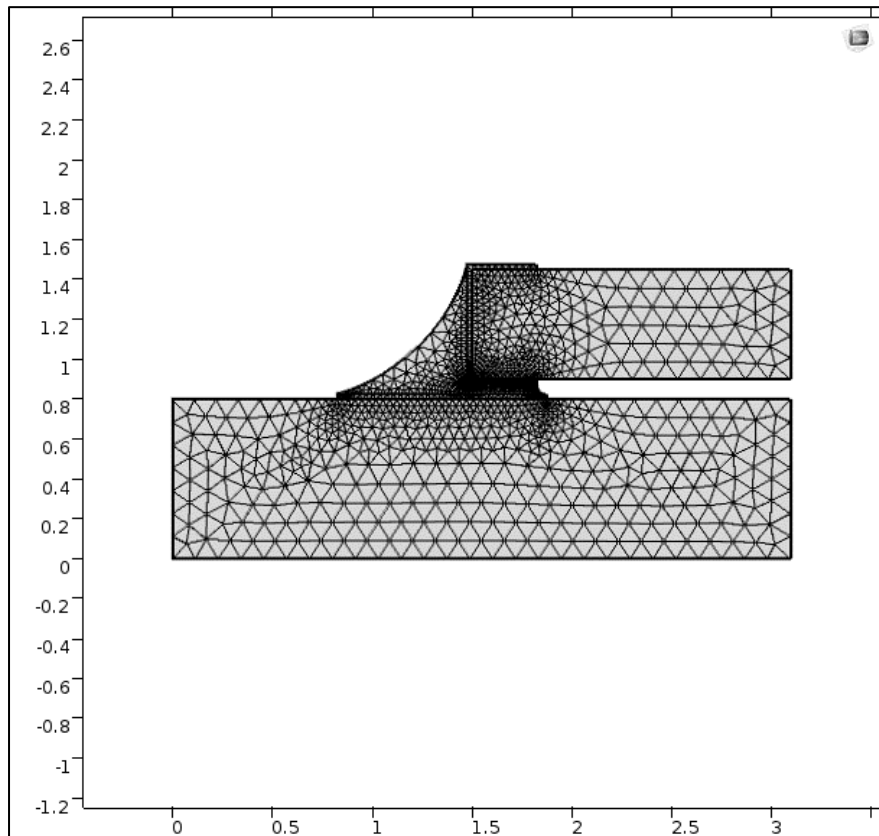


Obr. 6.21: Použitý modul pro simulaci a doplňkové podmínky

6.6.3 Simulační síť

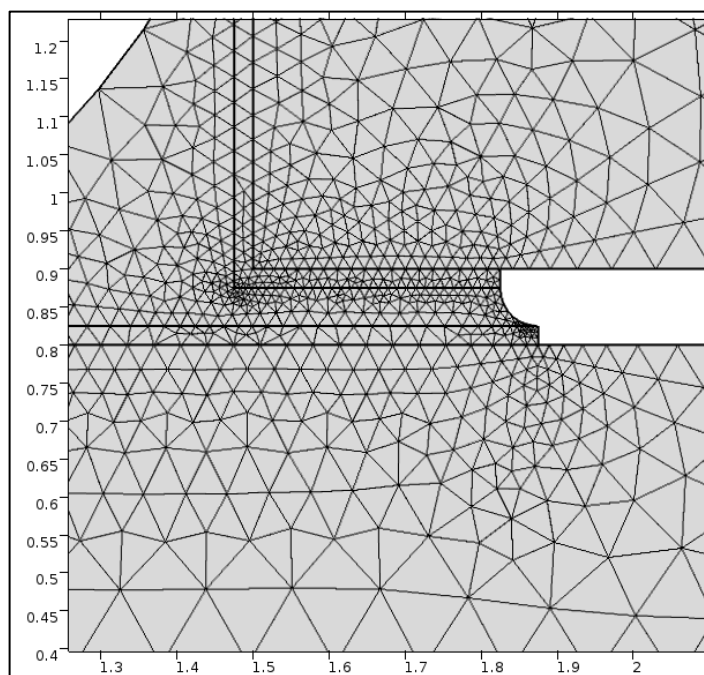
Uzly sítě umožňují diskretizaci geometrie na malé jednotky jednoduchých tvarů, označované jako síťové prvky. Síť je výsledkem vytváření sekvence záběru. Sekvence záběru odpovídající geometrii se skládá z funkcí operace a atributů. Atributy uzlů ukládají vlastnosti, které používají operační uzly při vytváření sítě.

Simulační síť a její rozprostření po geometrii je velice důležitý bod při provádění simulací v počítači. Pokud se sítí pokrývá složitá geometrie o více materiálech, je nutné dbát na to, aby na rozhraní dvou materiálů měly oba materiály společné uzly ležící na rozhraní těchto materiálů. Rozložení sítě je patrné na obrázcích Obr. 6.22. a Obr. 6.23.



Obr. 6.22: Model pokrytý simulační sítí

Detailní zobrazení výpočtové sítě s jednotlivými elementy a uzly. Místo se nachází na rozhraní pájky a elektronické součástky. Z obrázku je patrná drobnější struktura výpočtové sítě. Menší elementy výpočtové sítě se generují v závislosti na velikosti geometrie modelu.



Obr. 6.23: Detailní zobrazení sítě v místě nejmenší geometrie modelu

6.6.4 Časově závislá simulace

Použil jsem simulaci závislou na čase. V tomto procesu se proměnné mění v závislosti na čase. Definici času a stupních hodnot ohřevu jsem provedl pomocí tabulky Tab. 6.1. Čas τ je vstupní čas, kdy teplota ohřevu t_o vstupuje do simulace cyklického namáhání.

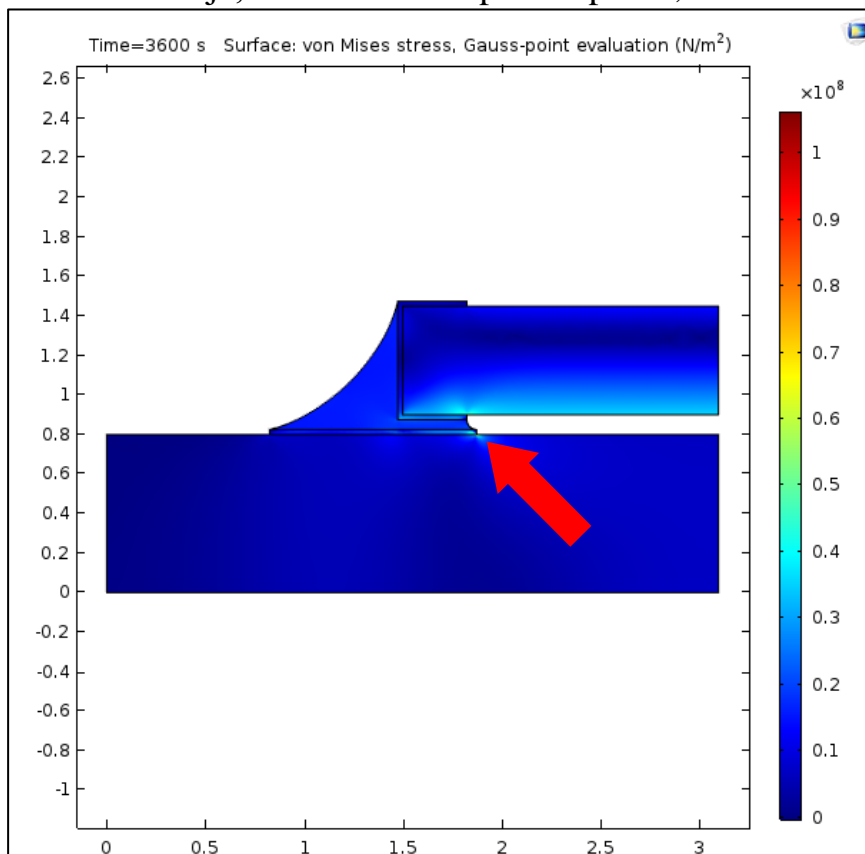
Tab. 6.1: Vstupní hodnoty pro cyklické namáhání

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

6.6.5 Výsledky simulace cyklického namáhání

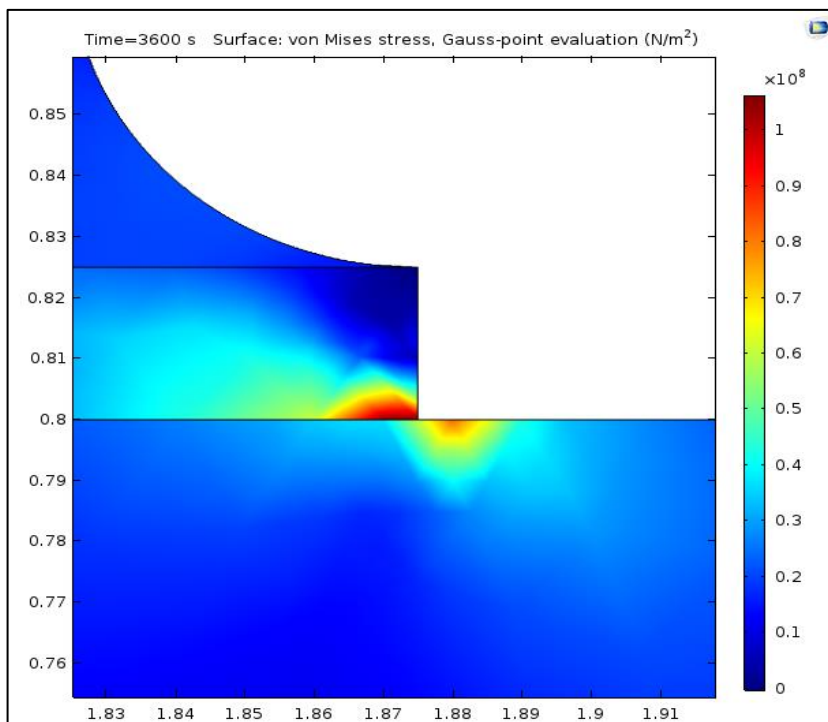
Prvním z výsledků je rozložení napjatosti v materiálech. V simulačních podmínkách byl definován čas jedné hodiny, během které se aplikovaly teplotní šoky z tabulky tab. 6.1.

Z obrázku Obr. 6.24 je zřejmé, že k největším napjatostem došlo mezi DPS a měděnou fólií. Místo je zobrazeno červenou šipkou. Maximální hodnota namáhání v tomto místě je, dle barevné stupnice vpravo, $1 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$.



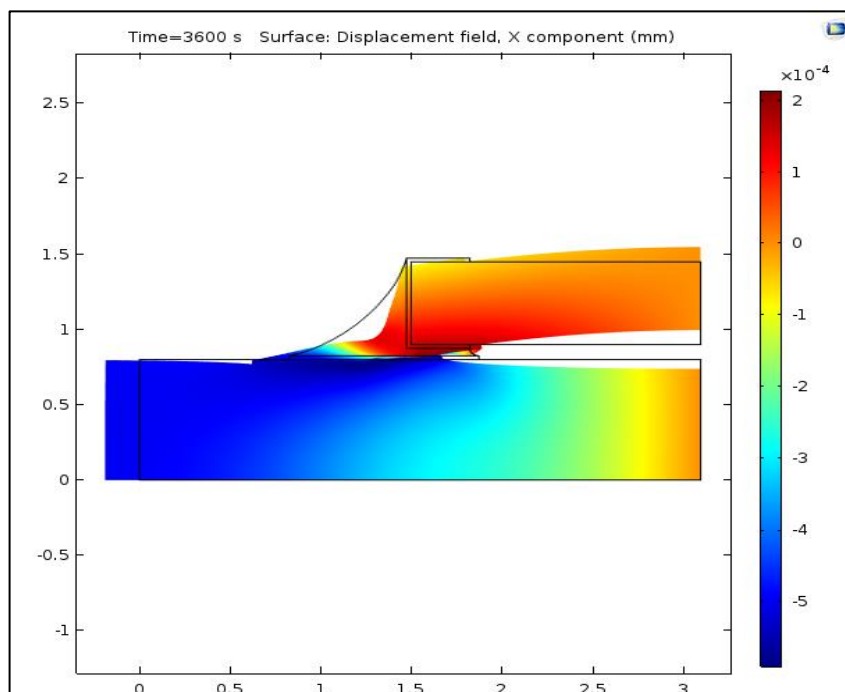
Obr. 6.24: Výsledné namáhání – pohled na celou geometrii součástky.

Na obrázku Obr. 6.25 je zobrazen detail místa, kde došlo k největšímu namáhání. Toto místo je mezi DPS a měděnou fólií. Dle předpokladu došlo k největšímu namáhání na okraji měděné fólie. Barevná stupnice vpravo zobrazuje interval hodnot, které jsou rozprostřeny na geometrii.



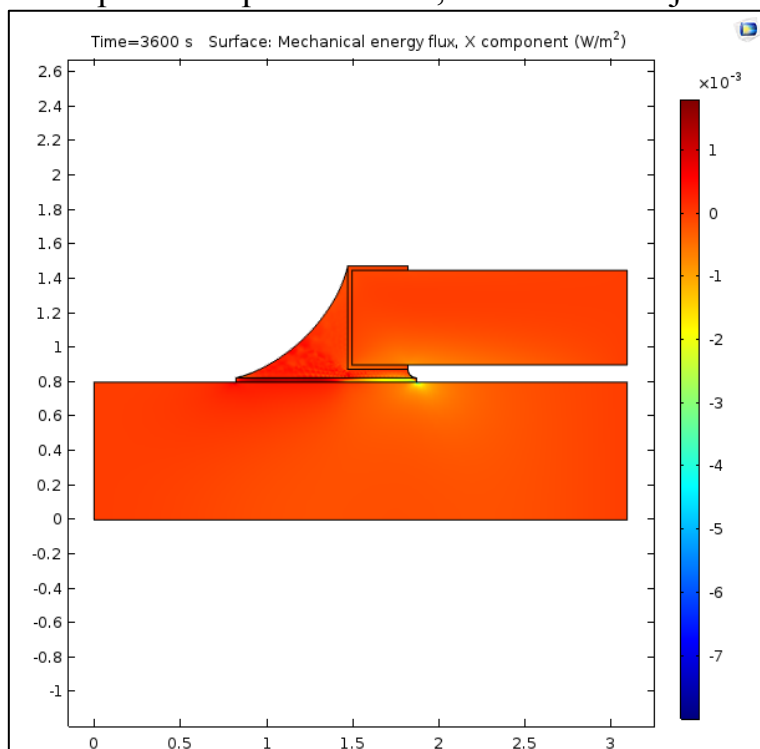
Obr. 6.25: Zvětšení oblasti s největším namáháním. Rozhraní Cu fólie na DPS.

Simulace vyhodnotila i změnu délky v závislosti na změně teploty. K největší změně délky došlo v materiálu pájky. Z tohoto plyne i závěr, že teplotní šoky by mohly být použitelné i pro separaci součástek, kterými je DPS osazena.



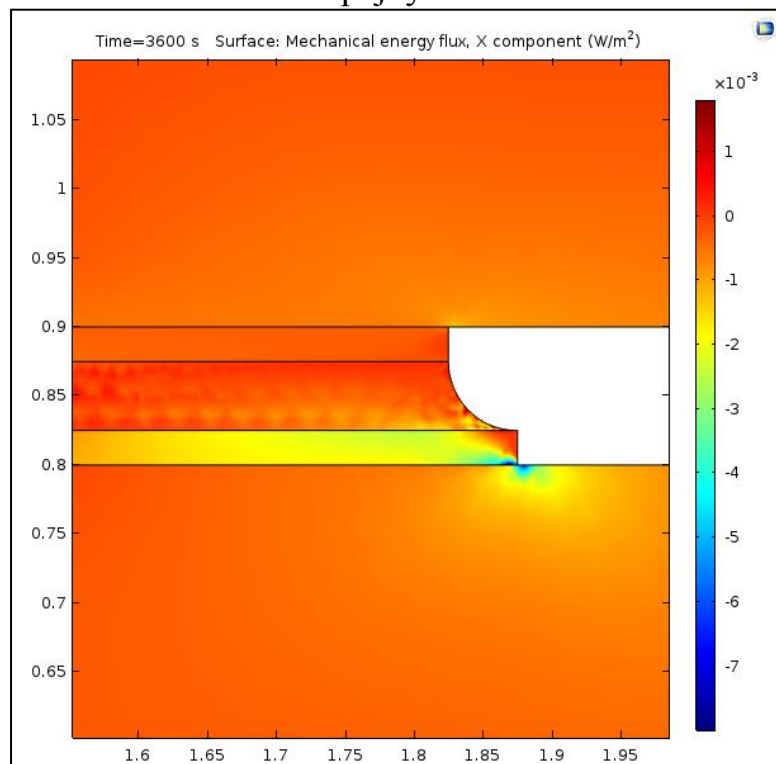
Obr. 6.26: Změna délky různých materiálů v závislosti na teplotě v průběhu simulace

Na dalším výsledku vidíme tok energie. K největšímu rozdílu došlo na rozhraní Cu fólie a DPS. Toto přesně odpovídá místu, kde došlo k největší napjatosti.



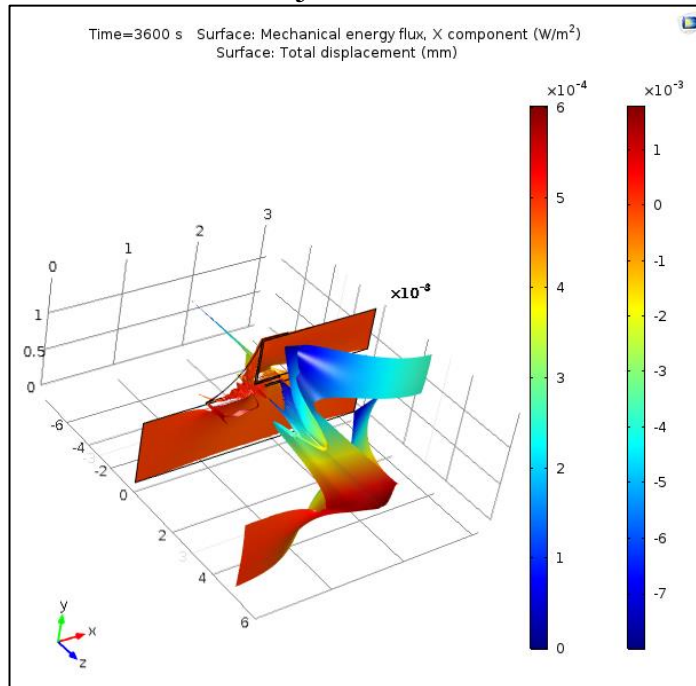
Obr. 6.27: Pohled na geometrii a na místo s největším tokem energie

Zde uvádím detailní pohled na místo s největším rozdílným tokem mechanické energie. Místo se nachází na rozhraní pájky a DPS.



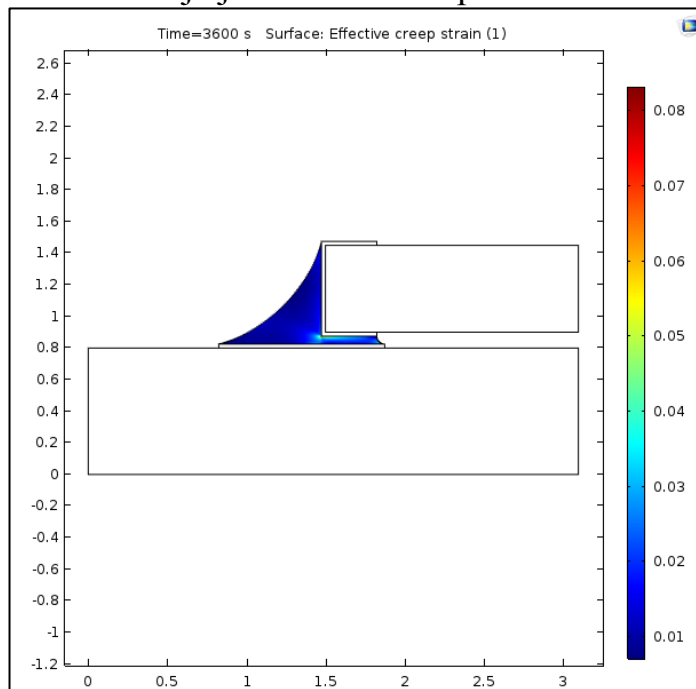
Obr. 6.28: Detailní pohled na místo s největším rozdílem mechanické energie.

Výsledky simulace dovolily i kompaktní zobrazení mezi mechanickou energií a délkovou roztažností. Toto chování je zobrazeno na obrázku 6.29.



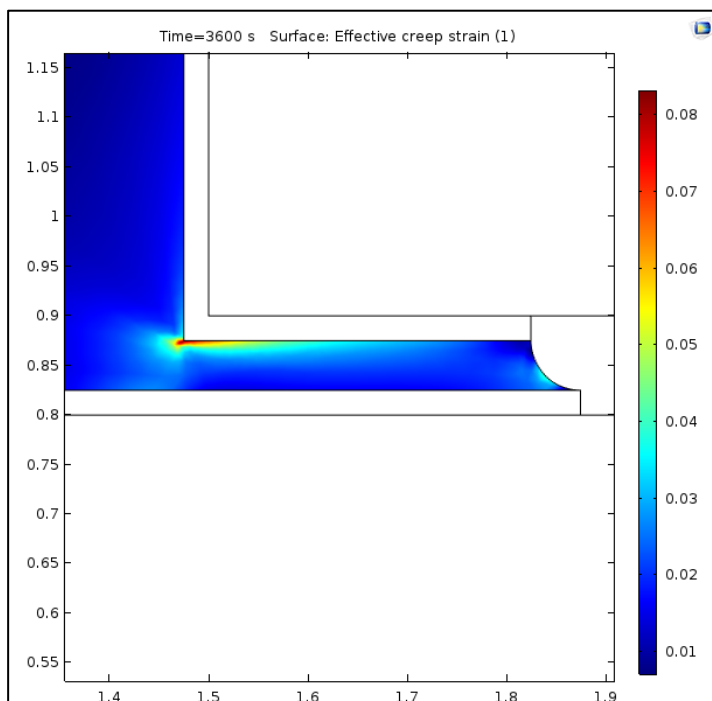
Obr. 6.29: Kompaktní zobrazení mezi rozdílem mechanické energie a roztažností materiálů.

Při této simulaci se potvrdil předpoklad tečení pájky. Obrázky Obr. 6.30 a Obr. 6.31 zobrazují výsledek. Je patrné maximální tečení pájeného spoje. Maximální hodnota, kterou lze dosáhnout je jedna. Hodnota při této simulaci byla 0,08.



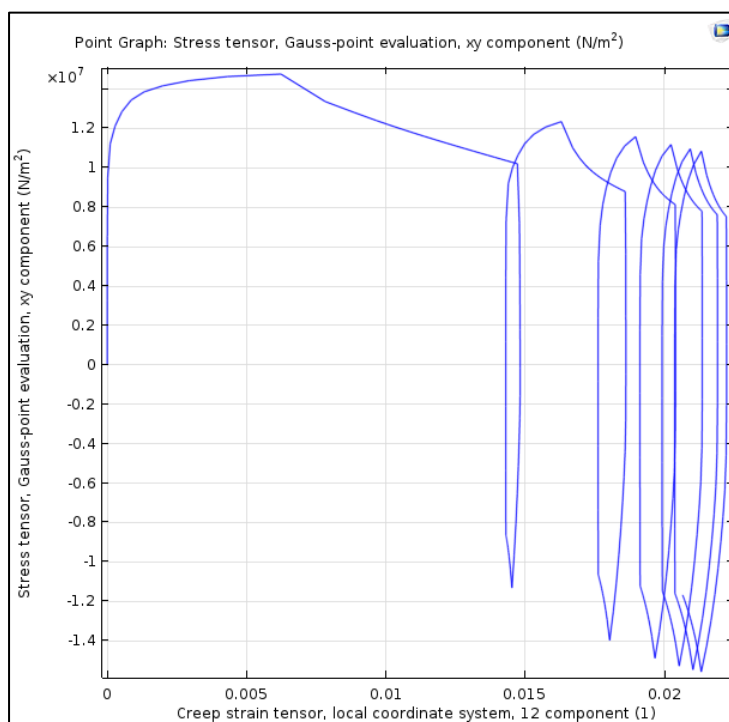
Obr. 6.30: Zobrazení hodnot tečení pájky.

K největšímu nárůstu hodnot došlo na rozhraní pájky a materiálu NiCr. Důvodem jsou rozdílné parametry těchto materiálů a také uzavření geometrie. Detailní zobrazení můžeme vidět na obrázku Obr. 6.31.



Obr. 6.31: Detailní zobrazení místa s největší hodnotou tečení pájky.

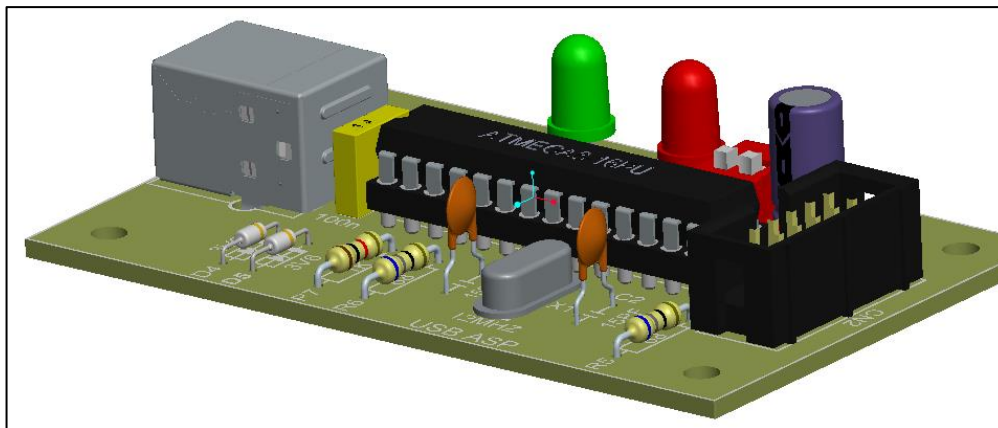
Průběh simulace detekoval změny mechanických vlastností a tyto změny zobrazil jako hysterezní smyčku. Na obrázku Obr. 6.32 jsou tyto změny zobrazeny.



Obr. 6.32: Zobrazení hysterezní smyčky a její hodnoty při průběhu simulace.

6.7 Možnosti dezintegrace DPS

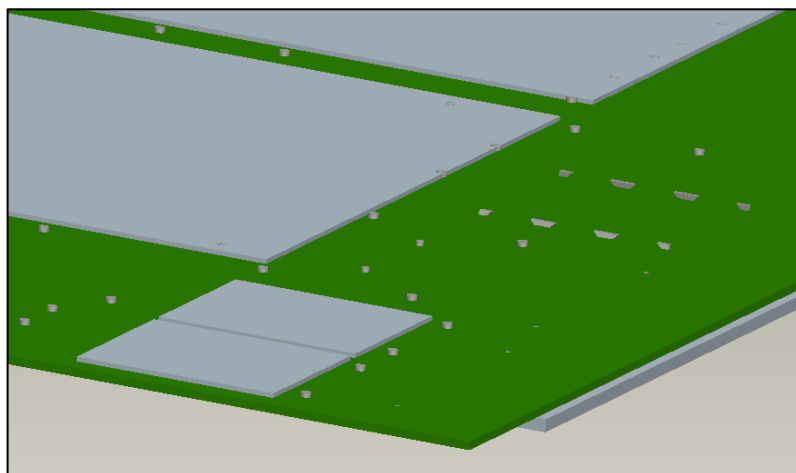
Předpokladem pro zdárné oddělení vodivých cest je nutné odstranit připájené součástky, a proto jsem se zaměřil na separaci elektronických součástek z DPS. Vytvořený model může v budoucnu sloužit jako základ pro rozvoj této ekologické separace DPS. Např. k vytvoření automatické linky na separaci DPS. Model jsem vytvořil v prostředí Pro/ENGINEER, pomocí importované geometrie a dalším domodelováním geometrie elektronických součástek. Model DPS obsahuje diody, odpory, kondenzátor, konektory, popis osazení DPS, a další. Model je vytvořen v měřítku 1:1.



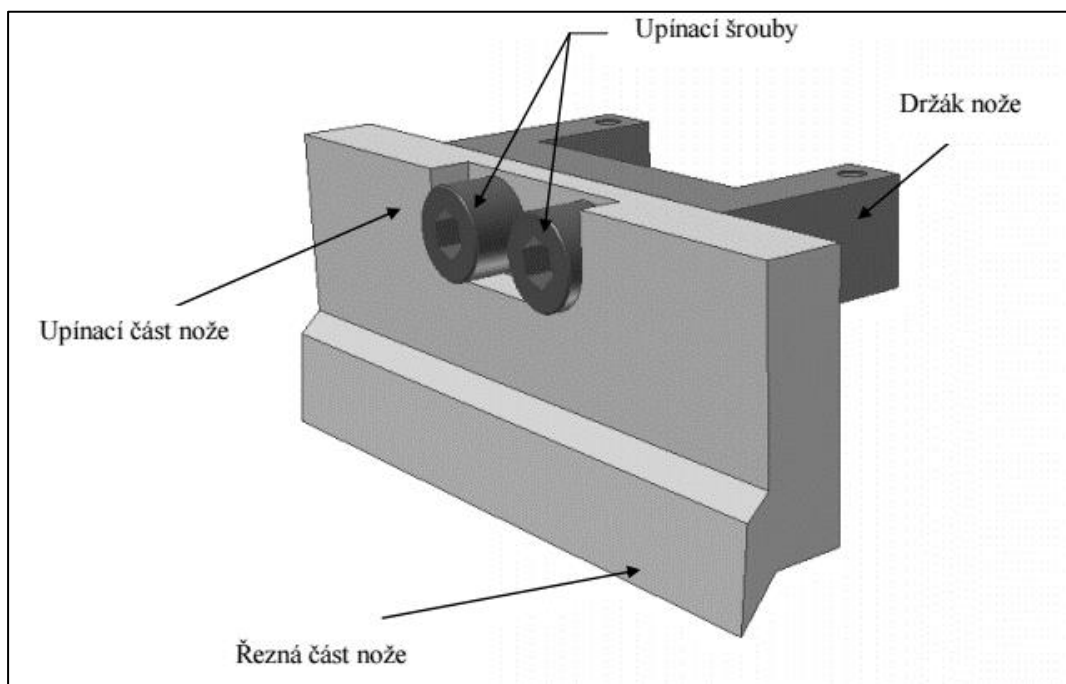
Obr. 6.33: Model DPS osazený elektronickými součástkami.

Na obrázku Obr. 6.34 je znázorněn model se strženými elektronickými součástkami. Jedná se o model z prostředí Pro/ENGINEER.

Ve spolupráci s Ústavem výrobního inženýrství, který je součástí Fakulty technologické UTB ve Zlíně, lze pomocí vhodně konstruovaného nože elektronické součástky z DPS separovat [35]. Nejen součástky, ale lze rozřezat i samotnou DPS na tenké pláty. Zařízení bude možno rovněž využít pro separaci vícevrstevných DPS. Konstrukce nože a část zařízení je zobrazena na obrázcích 6.35 a 6.36.

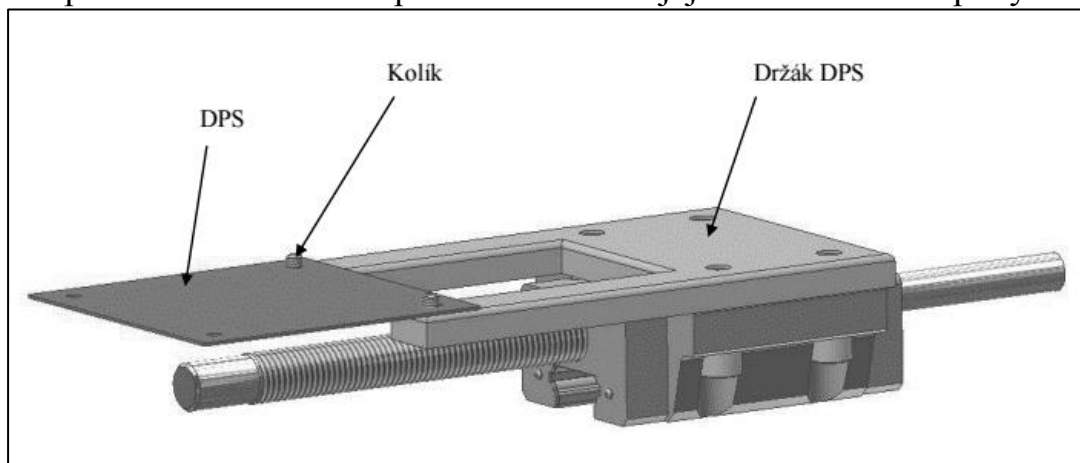


Obr. 6.34: Model DPS zbavený elektronických součástek.



Obr. 6.35: Model nože pro separaci elektronických součástek a prořezání DPS na tenké pláty [22].

Držák DPS je přišroubován pomocí šroubů k vodící konzoli. Deska s plošnými spoji je uchycena pomocí dvojice kolíků k držáku DPS. Otáčením tyče se závitem dojde k posuvu držáku s DPS proti noži a tím k její řezání na tenké pláty.



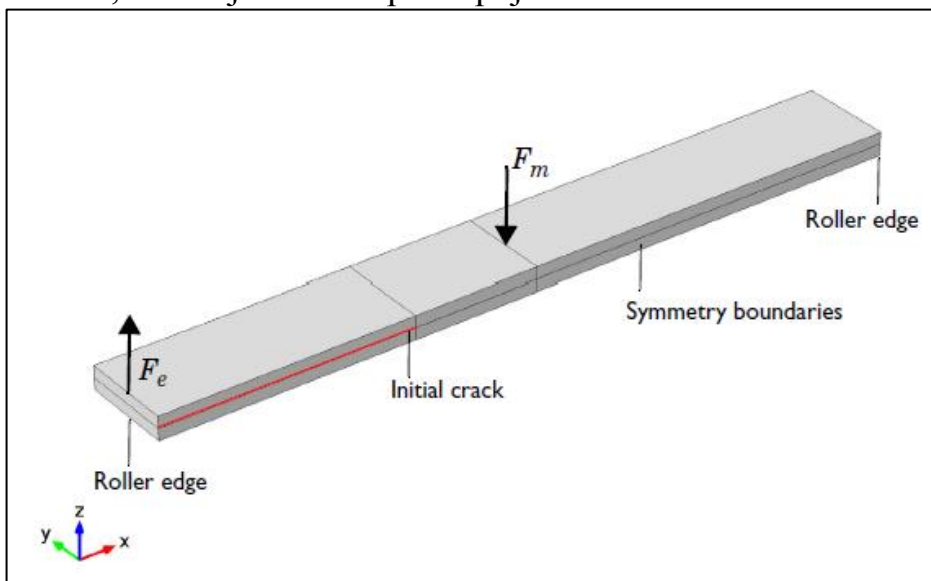
Obr. 6.36: Uchycení DPS v držáku [22].

6.8 Simulace lepeného kompozitního nosníku

Následující simulaci lepeného kompozitního nosníku jsem provedl ve spolupráci se společností Humusoft s.r.o. v SW COMSOL Multiphysics®.

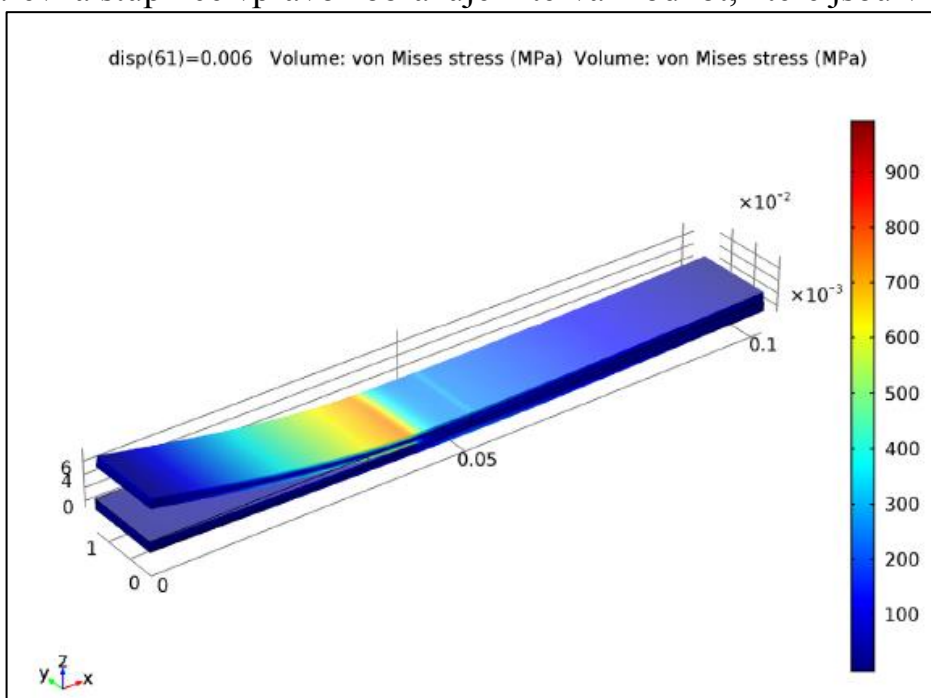
Model, který je realizován v tomto příkladu, je podrobně popsán v článku [7]. Model je použit k predikci šíření trhlin na rozhraní laminovaného kompozitního nosníku pod zatížením v kombinovaném režimu [8].

Na obrázku Obr. 6.37 je zobrazena geometrie modelu nosníku s vyznačením místa namáhání silou F_m a silou F_e . Tažná síla F_e působí na trhliny nosníku. Ve středu působí síla F_m dolů. Vstupní hodnoty do simulace jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.1. Model nosníku je složen ze dvou slepených částí a červená čára naznačuje místo, kde dojde k rozlepení spoje nosníku.



Obr. 6.37: Geometrie modelu kompozitního nosníku o daných parametrech [7]

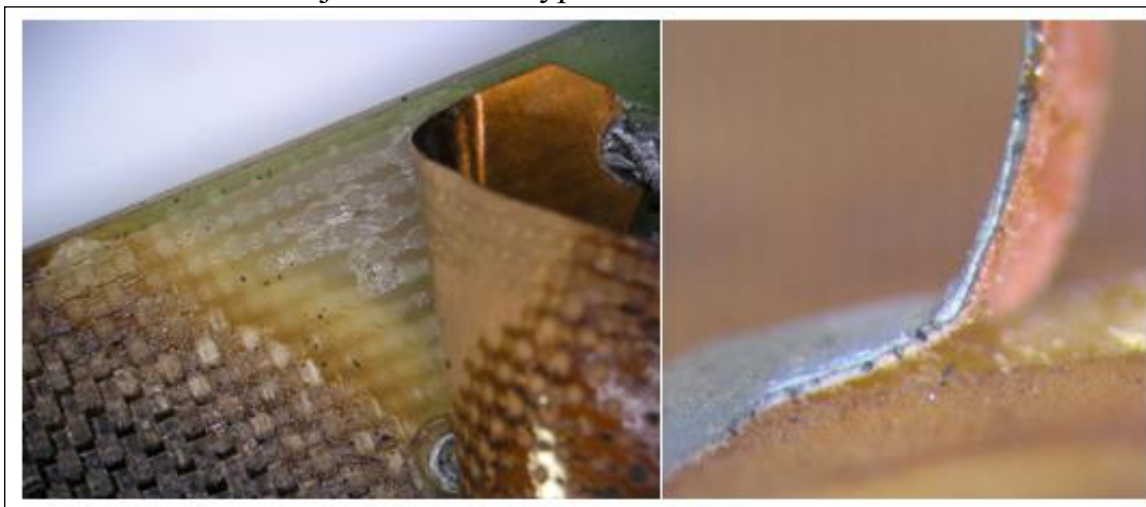
Výsledek simulace je zobrazen na obrázku Obr. 6.38. Z obrázku je zřejmá deformace a rozlepení laminátového kompozitního nosníku v místě lepeného spoje. Barevná stupnice vpravo zobrazuje interval hodnot, které jsou v MPa.



Obr. 6.38: Distribuce napjatosti v posledním kroku výpočtu

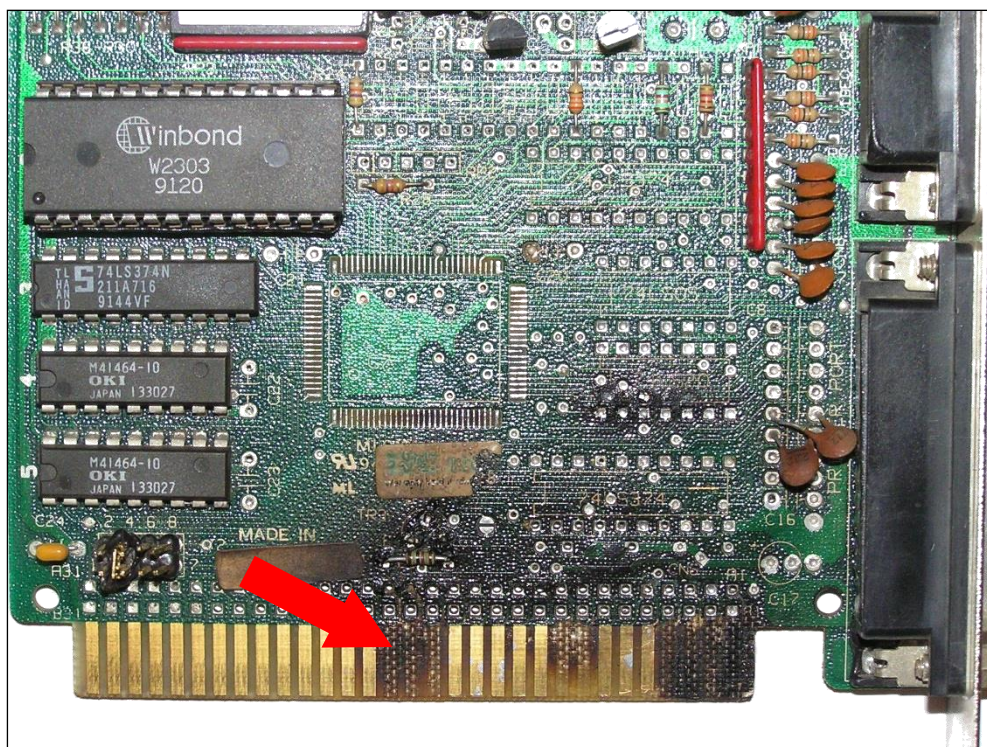
6.9 Výsledky separace provedené v laboratorních podmínkách

Snímky oddělujících se měděných cest z DPS při separaci v laboratoři. Na obrázku Obr. 6.39 se jedná o starší typ DPS.



Obr. 6.39: Detailní pohled na separovanou měděnou cestu pod mikroskopem

Ověření simulačních experimentů jsem zkusil i na DPS, která nebyla připravena podle předpokladů. Je zřejmé odloupení vodičů na okraji DPS (místo je zobrazeno červenou šipkou). Vodičové cesty uvnitř DPS zůstaly beze změny.



Obr. 6.40: DPS grafické karty, která nebyla zbavená součástek.

7. ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH SIMULACÍ

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

Provedl jsem celou řadu simulací DPS v programovém prostředí Pro/ENGINEER a COMSOL Multiphysics® a dospěl jsem k závěrům, které jsem shrnul do těchto podkapitol.

7.1 Parametry výpočetní stanice

Pro analýzy a simulace jsem použil počítač, který byl vybaven základní deskou MB ATX, socket AM3+, AMD 970, 2x PCIe x16, 2x PCIe x1, 2x PCI, 4x DDR3, 6x SATA 6Gb/s, 1x Gb LAN, 6x USB 2.0, 2x USB 3.0, 6x audio Jack, 970A-G43. O výkon se postaral procesor AMD FX-6100 (6core, 3.3GHz, 14MB, socket AM3+, 95W), operační paměť Kingstone 8GB, DDR3, frekvence 1600 MHz (celkově počítač obsahoval 24GB paměti RAM) a grafickou kartou Sapphire AMD R7 250 2GB GDDR5. O ukládání dat se staral HDD Western Digital 1TB, 3.5", SATAIII/600, 7200rpm, 64MB, WD10E. (Pro hladší běh systému a celé výpočetní stanice jsem zvažoval i SSD disk, ale v tomto případě rozhodla cena). Ostatní parametry výpočetní stanice byly volitelné, na výkon a strojový čas simulací neměly vliv, tudíž je uvádět nebudu.

7.2 Časový průběh simulací

Průběh a čas simulací je velice závislý na použitém modelu, jeho geometrické složitosti a také jestli se jedná o 2D nebo 3D model. Simulace složitější geometrie vyžaduje více paměti RAM a větší výkon CPU počítače. Daná simulace je také závislá na použitém simulačním modulu. Např. provedení strukturální analýzy nevyžaduje takové výpočetní nároky jako provedení termální analýzy téhož modelu.

Většina simulací běžela na 100% výkonu procesoru výpočetní stanice a alokovala 23 GB RAM paměti. To bylo způsobeno také tím, že simulace byly prováděny jako časově závislé. Strojový výpočtový čas se pohyboval v rozmezí několika minut pro jednu simulaci až po několik hodin.

7.3 Zhodnocení kapitoly

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

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

- Vodivé měděné cesty nesmí ležet blízko u sebe, protože jejich teplota v čase ovlivňuje samotnou DPS a zahřívá ji.

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

8. LABORATORNÍ ZKOUŠKY - návrh technologie zpracování DPS

V této kapitole jsem se zaměřil na konkrétní výpočet potřebného rozsahu teplot, při kterých dojde k separaci vodivých cest z DPS a laboratorní zkoušky navržené ekologické metody separace měděných vodivých cest z DPS. Jako vstupní informace pro laboratorní zkoušky jsem použil výsledky ze simulací provedených v počítači.

8.1 Stanovení teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a plastové desky

Pro Stanovení teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a plastové desky jsem použil mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice a mědi. Tyto mechanické vlastnosti uvádím v tabulce Tab. 8.1.

Tab. 8.1: Mechanické vlastnosti materiálů použitých pro výpočet [39].

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

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

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \quad (8.1)$$

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

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

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

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad (8.2)$$

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

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

Výpočet výsledné síly.

$$F_T = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot S_j \quad (8.3)$$

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

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

Výsledná síla musí být větší než dovolené smykové napětí pro dané materiály [9]. Tuto podmínku udává následující vztah 8.4.

$$\frac{F_T}{S_j} > \tau_s \quad (8.4)$$

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

Výsledné smykové napětí je dáno v MPa. Pro tvrdé pájky je dáno maximální smykové napětí $\tau_s = 200 \text{ MPa}$ [40]. Pokračováním ve výpočtu i pro další teplotní rozdíly ΔT jsem zjistil, že kritickou mez ve smykovém napětí $\tau_s = 200 \text{ MPa}$, pro styčnou plochu mezi materiály $S_j = 10 \text{ mm}^2$, přesáhne při teplotním rozdílu $\Delta T = 91 \text{ K}$ [9].

Tab. 8.2: Stanovení potřebného teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a epoxidové pryskyřice.

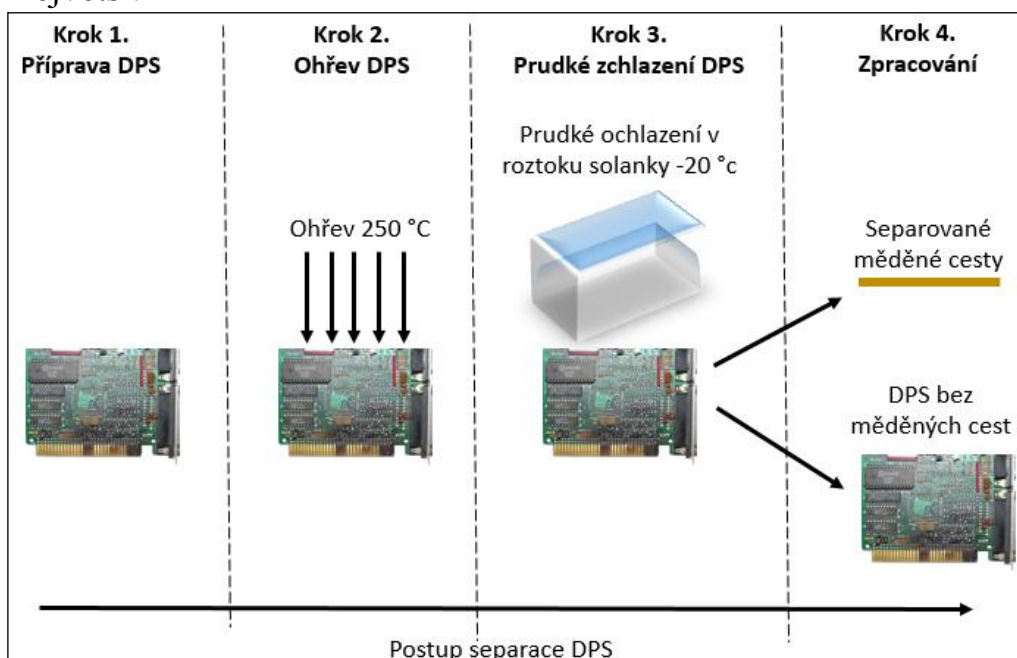
Teplotní rozdíl ΔT [K]	Smykové napětí mědi σ_1 [Pa]	Smykové napětí epoxidové pryskyřice σ_2 [Pa]	Styčná plocha S_j [mm ²]	Vypočítaná síla F_T [N]	Vypočtené smykové napětí τ_s [MPa]
88	194480000	1601,6	10	1944,784	194,47
89	196690000	1619,8	10	1966,884	196,68
90	198900000	1638	10	1988,984	198,89
91	201110000	1656,2	10	2011,083	201,10
92	203320000	1674,4	10	2033,183	203,31
93	205530000	1692,6	10	2055,283	205,52
...
366	808860000	6661,2	10	8088,5333	808,85

8.2 Princip zkoušek

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

8.3 Grafické znázornění principu separace DPS

Obrázek Obr. 8.1 popisuje jednotlivé kroky při separaci vodivých cest z DPS. Jedná se o čtyři kroky, které na sebe úzce navazují a musí být dodrženy. Společným jmenovatelem těchto kroků je **čas**. Nejdůležitějším krokem je prudké ochlazení DPS, které musí být provedeno co nejrychleji po ohřevu DPS, aby došlo k požadovanému efektu a to k teplotnímu šoku a aby interval teplotního rozdílu byl co největší.



Obr. 8.1: Grafické znázornění separace DPS

8.3.1 Krok 1. – Příprava DPS

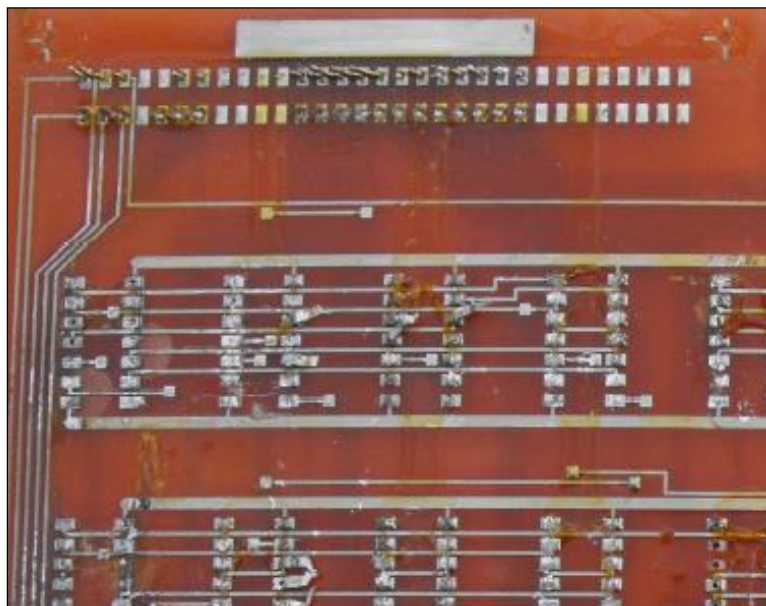
Při vstupu DPS do recyklačního procesu musí být DPS očištěna a zbavena elektronických součástek. Odstranění součástek se děje pomocí speciálního nože, nebo speciální pily.

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

Pokud je DPS opatřena i lakovanou vrstvou, tak tato vrstva musí být odstraněna pomocí brusného papíru nebo okartáčována. Při broušení lakované vrstvy dochází

k vývinu tepla, které se dá použít jako předeřev pro druhý krok recyklace DPS. Nevýhodou je zanášení brusného papíru kousky lepidla.

Na obrázku Obr. 8.1 je znázorněna DPS zbavená elektronických součástek. Na DPS zůstaly jen vodivé cesty.



Obr. 8.1: DPS zbavená elektronických součástek.

8.3.2 Krok 2. – Ohřev DPS

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

Nakonec byl vybrán ohřev horkovzdušnou pistolí.

8.3.3 Krok 3. – Prudké zchlazení DPS

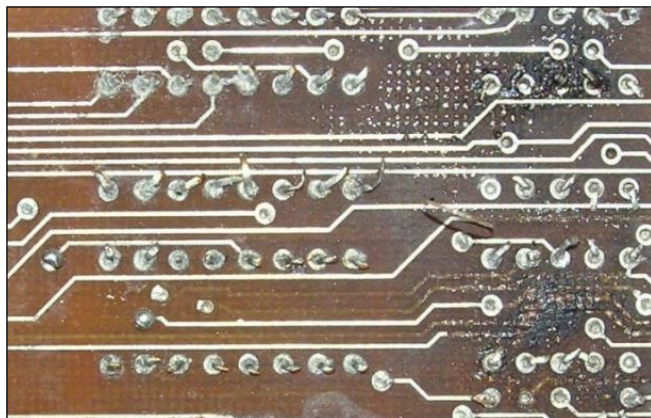
K prudkému zchlazení musí dojít co nejrychleji po ohřátí DPS, aby došlo k teplotnímu šoku a ke vzniku napjatosti mezi materiály.

Pro prudké zchlazení ohřáté DPS jsem použil roztok solanky. Tento roztok dokáže zchladit materiál až na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou tohoto chladicího roztoku je jeho rychlost výroby a nízká pořizovací cena.

K prudkému zchlazení materiálu lze použít i kapalný dusík. Kapalný dusík je extrémně studený. Jeho teplota varu je $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [47]. Nevýhodou použití tohoto chladiwa je jeho cena.

8.3.4 Krok 4. – Zpracování separovaných částí

Po teplotním šoku a odtržení části vodivých cest z DPS lze jednoduše chytit odloupnuté konce vodivých cest a nevelkou silou je strhnout z DPS. Výstupem ze separace jsou odtržené vodivé cesty a samotný materiál DPS (Obr. 8.2).



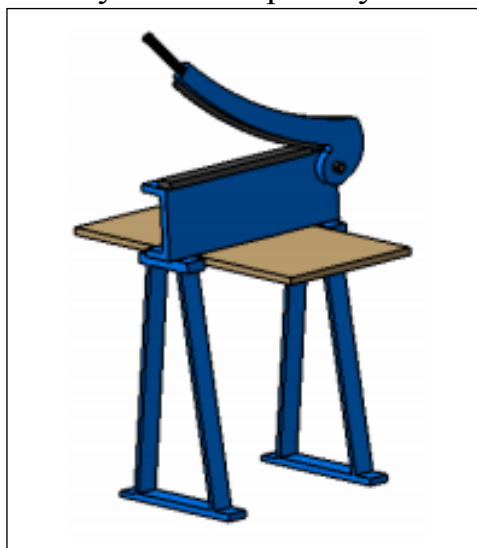
Obr. 8.2: DPS s odtrženými vodivými cestami.

8.4 Zařízení pro separaci DPS

Separace DPS probíhala v laboratorním prostředí, protože laboratoř disponuje vhodným vybavením. V této kapitole uvádím použité zařízení a nářadí při této metodě separace DPS.

8.4.1 Řezání DPS

Řezání DPS na požadovaný rozměr probíhalo pomocí pákových nůžek. Na DPS jsem nakreslil požadovaný rozměr a pákovými nůžkami jej obřezal.



Obr. 8.3: Pákové nůžky s odkládací deskou [41].

8.4.2 Ohřev DPS

K ohřevu DPS jsem použil horkovzdušnou pistoli. Pomocí tohoto způsobu docházelo k ohřevu jen určitého místa na DPS. Zde je podobnost z provedenou simulací ohřevu DPS pomocí teplotního regionu.



Obr. 8.4: Horkovzdušná pistole

8.4.3 Chladicí směs

K prudkému ochlazení DPS po zahřátí jsem využil směs ledu a soli (solanka). Tato chladicí směs dokáže chladit až na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Chladicí směs byla umístěna v plastové vaničce o průměru cca 20 cm.

9. PRAKTICKÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

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

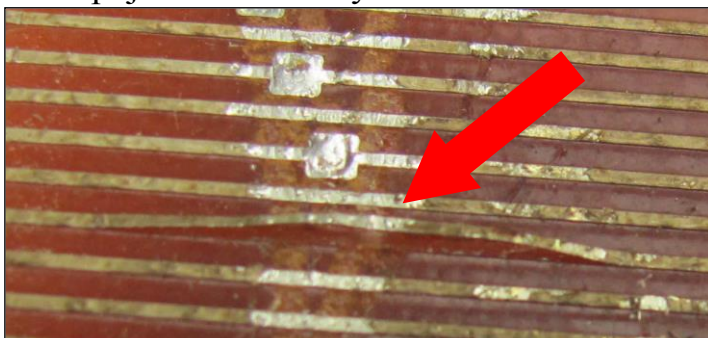
9.1 Povrch DPS – vrstva ochranného laku

Pro ověření vlivu ochranného laku na vznik smykového napětí jsem použil DPS uvedenou na obrázku Obr. 9.1. Na části DPS jsem pomocí brusného papíru odstranil tuto vrstvu a pak DPS zahříval horkovzdušnou pistolí na teplotu 260 °C a po ohřevu prudce zchladil v solance o teplotě -20°C.

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

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

Výsledek experimentu je znázorněn na obrázku Obr. 9.1. Červená šipka znázorňuje místo s odlupujícími se vodivými cestami z DPS.



Obr. 9.1: Odlupující se vodivé cesty z DPS v místě, kde byla vrstva laku odstraněna.

9.2 Počet cyklických namáhání

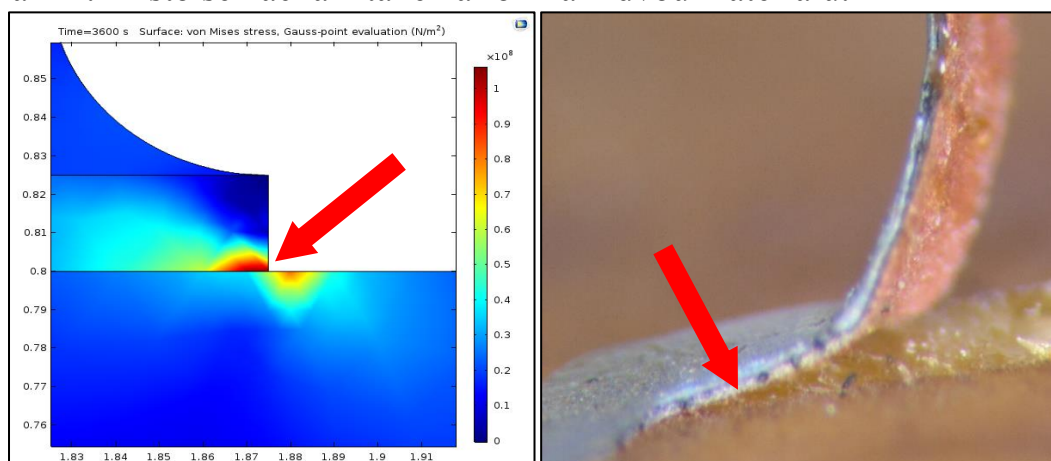
Ze simulací cyklického namáhání vyplynuly poznatky, že určitý počet cyklů ohřevu a prudkého zchlazení aplikovaný na danou geometrii, má za následek vznik místní deformace v objektu. Také není potřeba tak vysoká teplota ohřevu.

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

K podobným závěrům došel i p. Bc. Martin Malinka ve své diplomové práci. Tímto faktem se potvrdilo to, že tento postup separace vodivých cest je funkční

pro určité typy DPS a pro předem připravené DPS – zbavené vrchní vrstvy ochranného laku. U ostatních typů DPS musí být použit jiný postup.

Na obrázku Obr. 9.2 uvádím srovnání simulačních výsledků s experimentálním ověřením v laboratoři. V levé části je výstup ze simulace elektronické součástky cyklickým namáháním. Barevná stupnice reprezentuje hodnoty napjatosti, které jsou rozprostřeny po geometrii, a červená šipka ukazuje na místo s největší hodnotou. Toto místo se nachází na rozhraní dvou různých materiálů. Vpravo je zobrazen výstup z experimentu. Červená šipka označuje místo s největším namáháním. Místo se nachází také na rozhraní dvou materiálů.

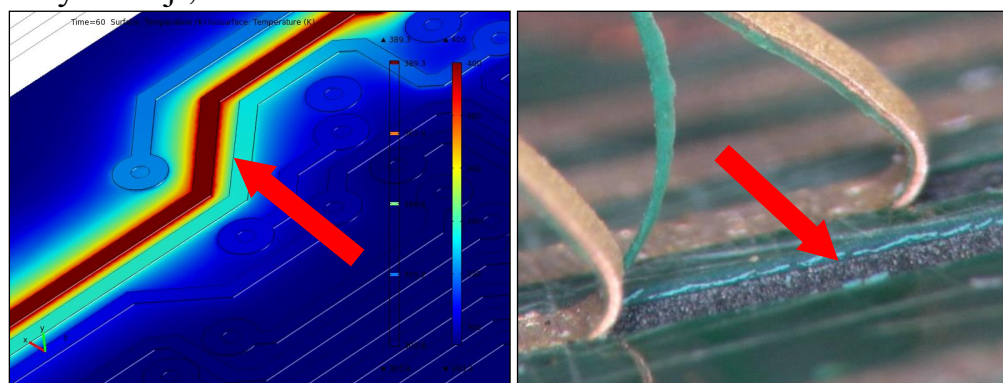


Obr. 9.2: Porovnání výsledků ze simulací (vlevo) s experimentálním ověřením v laboratoři (vpravo).

9.3 Vzdálenost vodivých cest na DPS

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

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



Obr. 9.3: Rozložení teploty v DPS a ověření vlivu teploty na vznik požadované napjatosti.

Na obrázku Obr. 9.3 analyzují vliv vzdálenosti vodivých cest na rozložení teplot v DPS a na vznik požadované napjatosti. Vlevo uvádím výstup ze simulace, kdy jsem zahříval jen jednu vodivou cestu po dobu 60 s na teplotu 400 K. Z výsledků simulace je vidět, že čím je menší vzdálenost mezi vodivými cestami, tím více se sousední cesty zahřívají a také ohřívají samotnou DPS. Dá se předpokládat, že v těchto místech nedojde, při teplotním šoku, k požadované napjatosti a k separaci cest z DPS.

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

9.4 Ohřev DPS pomocí elektromagnetické indukce

Na základě výsledků z kapitoly 9.3 Vzdálenost vodivých cest na DPS navrhuji jako další možnost ohřevu DPS ohřev pomocí elektromagnetické indukce. Předpokladem ohřevu elektromagnetickou indukcí je ohřev jen vodivých měděných cest na DPS.

Výhodou uvedené technologie je vysoká dosažitelná rychlost ohřevu, jeho regulovatelnost a čistota, nedochází ke styku induktoru s ohřívanou částí a lze proto induktor navrhovat na mnohem nižší teplotu, než na jakou ohříváme materiál. Často lze využít i nerovnoměrného rozložení proudové hustoty a tedy i Joulových ztrát v ohřívaném materiálu.

Indukční ohřev je relativně složitý děj charakterizovaný interakcí elektromagnetického a teplotního pole. Při modelování indukčního ohřevu tedy řešíme sdružený problém. Elektromagnetické pole určuje rozložení ztrát a teplota často významně mění elektrické parametry ohřívaného materiálu, tedy vodivost a permeabilitu. Vlnový charakter elektromagnetického pole popisují Maxwellovy rovnice (MR) [43]. Navíc teplotní změny často způsobí z technologického hlediska významné deformace, které je též nutno určit [42].

10. VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ NA ZPRACOVÁNÍ DPS

Tato kapitola je zaměřena na teorii výpočtu nákladů na nový proces. Poskytuje stručný pohled na nákladové kalkulace jakožto nástroj hodnotového řízení.

10.1 Nákladové kalkulace

Kalkulace, zejména ve smyslu nákladové kalkulace, je v dnešní době považována za nejstarší a dnes také nejčastěji používaný nástroj hodnotového řízení. Jedním ze základních potřeb manažerů je identifikace nákladů, které jsou s výkonem podnikových aktivit spojeny. Kalkulaci je možné definovat jako přiřazení nákladů, marže, zisku, ceny nebo jiné hodnotové veličiny k výrobku, službě, činnosti, operaci nebo jinak naturálně vyjádřené jednotce výkonu firmy, tj. kalkulační jednici nebo nákladovému objektu¹. Kalkulační jednice je určitý výkon (výrobek, polotovár, práce nebo služba) vymezený měřicí jednotkou, např. jednotkou množství, hmotnosti, délky, plochy, času apod. [24].

Manažerské účetnictví nabízí velké množství kalkulačních metod a jejich variant. Tyto metody používají různé způsoby alokace režijních nákladů, od těch nejjednodušších až po ty komplexnější. Volba kalkulační metody by v praxi měla vždy vycházet z charakteru organizace a způsobu praktického využití této kalkulace. Jinak řečeno, pro různé účely a pro různé typy organizací jsou vhodné rozdílné metody kalkulací. Při volbě kalkulační metody je třeba brát v úvahu např. strukturu prováděných výkonů, dále skutečnost, že čím přesnější a detailnější kalkulační metoda bude použita, tím vyšší budou náklady na zajištění vstupních dat pro daný typ kalkulace [25].

10.1.1 Druhové členění nákladů

Druhové členění nákladů je nejběžnější členění nákladů v běžném finančním účetnictví. Členíme zde náklady podle druhu spotřebovaného externího vstupu do podnikového transformačního procesu [24].

Mezi nákladové druhy patří:

- Spotřeba surovin a materiálu, paliv a energie, provozních látek,
- Odpisy budov, strojů, výrobního zařízení, nástrojů, nehmotného investičního majetku,
- Mzdové a ostatní osobní náklady (mzdy, platy, provize, sociální a zdravotní pojištění),
- Finanční náklady (pojistné, placené úroky, poplatky aj.)
- Náklady na externí služby (opravy a udržování, nájemné, dopravné, cestovné) [24].

10.1.2 Metoda strojních hodin

Metoda strojních hodin by měla zlepšit správnost kalkulace v podmínkách mechanizace a zejména automatizace výroby. V podmínkách automatizace výroby musí být tedy kalkulování lidské práce (jednicové mzdy) nahrazeno kalkulováním nákladů práce stroje. Čas potřebný na výrobu výrobku se pak měří časem výrobního chodu stroje spotřebovaným při výrobě daného výrobku. Sazby výrobní režie (tj. sazby stanovené v Kč na 1 minutu činnosti technologických pracovišť) se pak stanovují pro každé technologické pracoviště. Čas výrobního chodu násobený sazbou daného technologického pracoviště pak udává náklady výrobní režie tohoto pracoviště, které se týkají výrobku vyráběného na příslušném pracovišti [24].

10.1.3 Metoda dílčích aktivit

Zpřesňuje nákladovou kalkulaci, je metoda dílčích aktivit. V anglo-americké literatuře je známá pod názvem Activity Based Costing (zkráceně ABC metoda). Metoda dílčích aktivit zaměřuje svou pozornost na tzv. nevýrobní úseky (technická příprava výroby, nákup, výzkum a vývoj, administrativa, logistika, apod.), v nichž zjišťuje náklady na procesy a snaží se tak postihnout příčinnou souvislost mezi spotřebou zdrojů v příslušných procesech a jejich podílem na výrobě výkonů. Aplikace metody dílčích aktivit je podmíněna především existencí fungujícího rozpočtnictví a nákladového účetnictví. V rámci metody dílčích aktivit je nutno stanovit tzv. hlavní procesy, které svým charakterem obvykle přesahují několik středisek, v nichž probíhají dílčí procesy, které se vztahují k hlavnímu procesu. Za hlavní proces lze označit např. obsluhu dodavatelů, zpracování objednávek, zpracování výrobních příkazů, dále to mohou být předvýrobní vnitropodnikové výkony, které musí být provedeny ještě před vlastním výrobním procesem (např. výzkum, vývoj a konstrukce). Při aplikaci metody dílčích aktivit jde o transformaci režijních nákladů zachycených v nákladovém účetnictví za střediska, na náklady podle aktivit (procesů), které ve středisku probíhají a o jejich přiřazení výkonům, kterých se týkají [24].

10.2 VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ na proces separace DPS

Na základě provedených počítačových simulací a ověření výsledků simulací v laboratorním prostředí uvádím vyčíslení nákladů na tento ekologický proces separace DPS.

10.3 Chladicí směsi a roztoky

Jako první uvádím informace o chladicích směsích a roztocích, které mohou být použity pro ochlazení DPS po ohřevu Tab. 10.1 – 10.3. Pro ochlazení DPS jsem použil směs ledu a chloridu sodného (NaCl).

Součástí ochlazení DPS byl i test s tekutým dusíkem. Při ponoření DPS do tekutého dusíku došlo k separaci měděných vodivých cest i bez zahřátí DPS. Tato metoda prudkého zchlazení je velice účinná, ale na druhou stranu velice nákladná.

V následujících tabulkách jsem uvedl chladicí směsi a cenu za jednotlivé chemikálie. Uvedená cena chemikálií byla konzultována se společností VWR International s. r. o. [27].

Tab. 10.1: Vodní chladicí směsi [25]

Směs M : 100 kg vody + kg látky	Teplota t_{chl} [°C]	Cena k_{pp} [Kč]
36 kg NaCl	5,0	2800
30 kg KCl	0,6	4800
30 kg NH ₄	-5,1	3000
250 kg CaCl ₂ .6H ₂ O	-8,0	37000
33 kg NH ₄ Cl + 33 kg NaNO ₃	-12,0	6600 + 6600
60 kg NH ₄ NO ₃	-13,6	12000
150 kg KSCN	-18,0	105000
100 kg NH ₄ Cl + 100 kg NaNO ₃	-25,0	20000 + 20000

Tab. 10.2: Chladicí směsi na bázi ledu [26]

Směs M : 100 kg ledu + kg látky	Teplota t_{chl} [°C]	Cena k_{pp} [Kč]
10 kg K_2SO_4	-2	3700
13 kg KNO_3	-3	4100
30 kg KCl	-11	4800
25 kg NH_4Cl	-15	5000
33 kg $NaCl$	-20	2560
200 kg $CaCl_2$	-35	26000
100 kg H_2SO_4 (98%)	-37	6700
150 kg $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	-50	22200

Tab. 10.3: Chladicí směsi s tuhým CO_2 [26]

Směs M tuhého CO_2 s látkou	Teplota t_{chl} [°C]	Cena k_{pp} [Kč]
Etanol 85%	-68	440 Kč / 1 l
Chloroform	-77	140 / 1 l
Éter	-78	250 / 1 l
Kapalný SO_2	-82	4833 / 1 kg
Aceton	-86	74 / 1 l

10.4 Ohřev DPS

Ohřev DPS probíhal pomocí horkovzdušné pistole uvedené v kapitole 8.4.2. Příkon horkovzdušné pistole je 2000 W a dobu použití jsem odhadl na 2 hodiny denně. V tabulce Tab. 10.4 jsou uvedeny hodnoty spotřeby elektrické energie a cena za tuto energii pro konkrétní období používání.

Tab. 10.4: Náklady na spotřebovanou elektrickou energii horkovzdušné pistole.

Období	Spotřeba energie W [kWh]	Cena k_e [Kč]
1 hodina	2,00	7,-
1 den	4,00	14,-
1 měsíc	121,67	426,-

10.5 Manuální práce

Do vyčíslení nákladů na tento proces musíme započíst i manuální práci pracovníka, který separaci DPS provádí. Celý proces separace je manuální, dokud nebude vypracován postup pro automatické / poloautomatické řízení procesu recyklace DPS. Mzdu M_z pracovníka jsem předpokládal 18000,- Kč měsíčně.

10.6 Materiálové složení DPS a cena materiálů

V jedné tuně odpadu z DPS může být 120 - 150 kg mědi, 10 - 15 kg cínu a olova a až 10 kg zlata, stříbra a platiny [10]. Následující informace mapují cenu jednotlivých složek odpadu. Tyto ceny budou zahrnuty do výpočtu.

Provedl jsem analýzu trhu s komoditami a výstupem je tabulka s cenami jednotlivých komodit. Cena jednotlivých komodit je zprůměrována, protože trh z komoditami se neustále pohybuje.

Tab. 10.5: Cena komodit [45].

Komodita	Cena k_k [Kč/kg]
Měď	150
Cín	200
Olovo	40
Zlato	9000
Stříbro	370
Platina	7000

10.7 Elektrická energie

Tato položka musí být zahrnuta také, protože nejen ohřev, ale také podpůrné procesy separace N_r , jako je osvětlení, elektrické spotřebiče, atd., spotřebovávají elektrickou energii. Tuto spotřebu jsem stanovil na 5 kWh denně, což odpovídá, při průměrné ceně elektrické energie 3,50 Kč/kWh, 18,- Kč za den.

10.8 Celkové náklady na proces recyklace DPS

V této kapitole uvádím výpočet celkových nákladů na proces recyklace DPS cyklickým namáháním.

Celkové náklady N na proces separace jsou počítány dle vztahu:

$$N = M_z + N_r + \sum_{k=1}^{\infty} M \quad (10.1)$$

Při ověřování navržené ekologické metody separace DPS v laboratoři jsem použil chladicí směs na bázi ledu a NaCl, proto následující příklad výpočtu bude zaměřen na tento typ chladicí směsi.

Pro chladicí směs jsem použil směs 1 kg ledu a 0,33 kg NaCl, což odpovídá ceně 25,60 Kč. Chladicí směs nevydrží dlouho chladit na požadovaných -20°C a pozvolna se led rozpouští a směs se otepluje. Pro odhad nákladů na proces a pro zjednodušení výpočtu jsem zvolil předpoklad, že tato chladicí směs bude chladit po dobu jedné hodiny. Čili celý výpočet nákladů je vztažen na jednu hodinu provozu a následně je přepočítán na jeden den.

$$N_h = 107 + 9,25 + \sum (77,60 \cdot 0,33) \quad (10.2)$$

$$N_h = 141,8 \text{ Kč}$$

Přepočet hodinového nákladu na osmi hodinovou pracovní dobu (jeden den).

$$N_d = N_h \cdot 8 \quad (10.3)$$

$$N_d = 1134,4 \text{ Kč}$$

V následující části jsem k nákladům na proces separace započtl i výtěžnost γ separovaných měděných cest. Při předpokladu zpracování 10 kg DPS denně je výtěžnost, dle tabulky Tab. 3.1, 2,68 g mědi. Při ceně mědi 150 Kč/kg je výsledkem zisk 0,40,- Kč za den.

Celkové náklady na proces separace DPS na jeden den jsou:

$$N = N_d - (\gamma \cdot k_k) \quad (10.4)$$

$$N = 1134,4 - 0,40$$

$$N = \mathbf{1134, -Kč}$$

ZÁVĚR

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

12. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Vybavenost domácností počítači a připojením k internetu [online]. [cit. 2017-02-01]. Český statistický úřad. Dostupné z: <https://www.czso.cz>
- [2] Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [3] Elektroodpad [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/elektroodpad>
- [4] Prodáváte elektroniku? Nezapomeňte na recyklační poplatek! [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.podnikatel.cz/clanky/nezapomente-na-recyklačni-poplatek>
- [5] INFORMACE o aplikaci "Zákona o elektronickém odpadu" [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.cs24.cz/elektroodpad.htm>
- [6] Dnes končí výběr poplatku za likvidaci starého elektroodpadu, za recyklaci nově nakoupených spotřebičů se bude stále platit [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/96755>
- [7] Symbol přeškrtnuté popelnice [online]. [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.elektrowin.cz/cs/informace-pro-verejnost/kolobeh-elektrospotrebice/koupili-jste-novy/symbol-preskrtnuta-popelnice.html>
- [8] Proč je dobré recyklovat vysloužilá elektro zařízení? [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://www.kasa.cz/asekol>
- [9] KŘENEK, J.: *Separace elektronického odpadu vlivem teploty*, Diplomová práce, FAI UTB, Zlín, 2007
- [10] Příručka pro výrobce EEZ [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.cir.cz>
- [11] HORÁČEK, J.: *Zpracovny nekovového odpadu*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2001. str. 96. ISBN 80-213-0775-7
- [12] VOLEK, J., POSPÍCHAL, Z.: *Dekompozice a utilizace vysloužilé domotechniky*. Technický týdeník, 2000, roč. 48, č. 25. str. 8 – 9. ISSN 0040-1064
- [13] Chemické metody při recyklaci elektroodpadu [online]. Dostupné z: <http://www.sroty.cz/>
- [14] CAMANHO P., P., DAVILA C., G., DEMOURA, M., F., *Numerical Simulation of Mixed-mode Progressive Delamination in Composite Materials.*, Journal of composite materials 37.16 (2003): 1415-1438.
- [15] *Mixed-Mode Debonding of a Laminated Composite*, nápověda programu COMSOL Multiphysics.

- [16] Povrchová montáž součástek [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://147.229.68.79/SMT/eltext/PSPM/1.pdf>.
- [17] ENVIC - síť informačních center v oblasti životního prostředí. [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z <http://www.envic.cz>
- [18] CHARVÁTOVÁ, J., JANÁČOVÁ, D., MOKREJŠ, P., KOLOMAZNÍK, K. *Vyhodnocení hmotnostního zastoupení separovaných součástek v deskách plošných spojů*. FAI UTB, Zlín, 2016
- [19] Lykov, A., B. Teoria teploprovodnosti. Vysšaja škola. Moskva. 1967
- [20] JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H, KOLOMAZNÍK, K., MOKREJŠ, P., VAŠEK, V. Matematický model a software pro řešení nesymetrických nestacionárních teplotních polí. In *Automatizacia a riadenie v teórii a praxi 2011*, Stará Lesná, 16. – 18. 2. 2011
- [21] STARÝ, J. *Zpracování pomocných výukových textů pro MMOT*, VUT v Brně, Brno 2006.
- [22] MALUČKÝ, M. *Konstrukce dělicího stroje*, Bakalářská práce, FT UTB, Zlín, 2010
- [23] Vícevrstvé DPS [online]. [cit. 2017-08-18]. Dostupné z <http://www.pcb.gatema.cz>
- [24] BALOUN, Z. *Optimalizace výrobních nákladů v procesu výroby nových výrobků*, Bakalářská práce, Masarykova univerzita, Brno, 2010
- [25] POPEŠKO, B.: *Moderní metody řízení nákladů*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2009. 240 s. ISBN 978-80-247-2974-9
- [26] ANDRLÍK, K., UHER, O., WEGIEL, J., DVOŘÁK, K.: *Chemické tabulky pro středné priemyselné školy chemické*. 3. neomezené vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. 376 s. bez ISBN.
- [27] COMSOL Multiphysics® [online]. [cit. 2017-07-20]. Dostupné z. <http://www.humusoft.cz>.
- [28] Cena chemických látek [online]. [cit. 2017-07-21]. Dostupné z. <https://cz.vwr.com/store/>
- [29] ŠUBA, O., SÝKOROVÁ, L., ŠANDA, Š., STANĚK, M.: *Modelling of Thermal Stresses in Printed Circuit Boards*. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic control, modelling & simulation (ACMOS'11), WSEAS Press, Lanzarote, Canary Islands
- [30] HRUBÝ, T. *Vliv teploty a času na pevnost lepených spojů kov – plast*, Bakalářská práce, FAI UTB, Zlín 2007.
- [31] STARÝ, J. *Plošné spoje a povrchová montáž, laboratorní cvičení*, VUT v Brně, Brno 2011.
- [32] KŘENEK, Jiří, JANÁČOVÁ, D. Simulace cyklického ohřevu desky plošného spoje v prostředí Pro/ENGINEER. SW FAI UTB, 2011.

- [33] JANÁČOVÁ, Dagmar, MOKREJŠ, Pavel, VAŠEK, Vladimír, DRGA, Rudolf, LÍŠKA, Ondrej, KŘENEK, Jiří. Mathematic model of heat transport in materials during cutting process. In Annals of DAAAM International for 2015, Volume 26. Vienna: DAAAM International Vienna, 2015, s. CD 007. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-06-8.
- [34] JANÁČOVÁ, Dagmar, VAŠEK, Vladimír, MOKREJŠ, Pavel, KŘENEK, Jiří, DRGA, Rudolf. Temperature fields solving in two-layer plate with Comsol Multiphysics software. In Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity". Vienna: DAAAM International Vienna, 2011, s. 115-116. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
- [35] JANÁČOVÁ, Dagmar, CHARVÁTOVÁ, Hana, DVOŘÁK, Zdeněk, KŘENEK, Jiří. Aparatura pro separaci desek plošných spojů. FAI UTB, Funkční vzorek, 2011
- [36] CHARVÁTOVÁ, Hana, VAŠEK, Vladimír, DRGA, Rudolf, KŘENEK, Jiří. Software application for solving of non-stationary temperature fields in two-layer plate. In Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity". Vienna : DAAAM International Vienna, 2011, s. 359-360. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
- [37] JANÁČOVÁ, Dagmar, KOLOMAZNÍK, Karel, VAŠEK, Vladimír, KŘENEK, Jiří, UHLÍŘOVÁ, Michaela. Separation of printed circuit board by temperature shock. In WSEAS World Science and Engineering Academy and Science, The 5th WSEAS Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment HTE'07 (pp. 268-271).
- [38] Recyklační poplatek. [online]. [cit. 2017-08-12]. Dostupné z. <https://www.elme.cz/recyklacni-poplatek>.
- [39] Licencovaná databáze ústřední knihovny Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. [online]. [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: <http://www.knovel.com>.
- [40] KAŠTÁNEK, O., VAŠEK, V.: *Části strojů*. 2. vydání. Brno: VUT Brno, 1979. str. 224. bez ISBN.
- [41] MIKLAS, P.: *Návrh pracoviště pro recyklaci DPS*, Diplomová práce, FT UTB, Zlín, 2010.
- [42] MATIČKA, O., MUSIL, L., PRSKAVEC, L., KYNCL, J., DOLEŽEL, I., ULRÝCH, B. *Simulace indukčního ohřevu*. Fakulta elektrotechniky ČVUT Praha. [online]. [cit. 2017-08-18]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab02/musil.pdf

- [43] KUNC, M. *Průmyslové využití ohřevů elektromagnetickou indukcí*, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2014.
- [44] BAUMRUK, M. *Maxwellovy rovnice v obecném tvaru*, učební text k přednášce UFY102, Univerzita Karlova. [online]. [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Maxwellovy_rovnice.pdf
- [45] Cena komodit [online]. [cit. 2017-08-11]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity>
- [46] STARÝ, J., ŠANDERA, J. *Technika povrchové montáže (SMT)*. Brno, SMTplus.CZ,s.r.o., Brno 2003
- [47] Periodická tabulka, Dusík [online]. [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/7.html>
- [48] CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., KOLOMAZNÍK, K., MOKREJŠ, P., VAŠEK, V. *Matematické modelování teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce*. Automatizácia a Riadenie v teórii a praxi 2011. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2011, s. 211-217. ISBN 978-80-553-0606-3.
- [49] NOORMAN, D.C. *COHESIVE ZONE MODELLING IN ADHESIVELY BONDED JOINTS*. Delft University of Technology. [online]. [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: <http://repository.tudelft.nl/>
- [50] JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K. *Softwarová aplikace pro výpočet teplotních polí v dvouvrstvé rovinné stěně*. Softwarová aplikace FAI UTB, 2010

13. SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Ceník recyklačních poplatků platný od 1. 1. 2008.....	11
Tab. 3.1: Typické složení DPS	22
Tab. 4.1: Historie technologie výroby DPS	23
Tab. 4.2: Vlastnosti materiálů pro DPS.....	27
Tab. 4.3: Vlastnosti materiálů pro DPS.....	27
Tab. 5.1 Materiálové vlastnosti.	34
Tab. 5.2: Hodnoty a vlastnosti kovů.....	41
Tab. 5.3: Hodnoty a vlastnosti plastů	41
Tab. 5.4: Podmínky ohřevu	41
Tab. 5.5: Podmínky chlazení	41
Tab. 6.1: Vstupní hodnoty pro cyklické namáhání	58
Tab. 8.1: Mechanické vlastnosti materiálů použitých pro výpočet.....	70
Tab. 8.2: Stanovení potřebného teplotního rozdílu pro separaci vodivých cest a epoxidové pryskyřice.	71
Tab. 10.1: Vodní chladicí směsi	81
Tab. 10.2: Chladicí směsi na bázi ledu.....	82
Tab. 10.3: Chladicí směsi s tuhým CO ₂	82
Tab. 10.4: Náklady na spotřebovanou elektrickou energii horkovzdušné pistole	82
Tab. 10.5: Cena komodit	83

14. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Symbol přeškrtnuté popelnice	12
Obr. 1.2: Životní cyklus elektromateriálů.....	13
Obr. 3.1: Hmotnostní podíly jednotlivých typů součástek v DPS CRT monitorů	20
Obr. 3.2: Hmotností podíly jednotlivých typů součástek v DPS televizních přijímačů	20
Obr. 3.3: Zastoupení jednotlivých typů separovaných součástek.....	21
Obr. 4.1: Průběh lisování DPS.....	24
Obr. 4.2: Odolnost základních materiálů v pájecí lázni při 260 °C.....	28
Obr. 4.3: Navlhavost základních materiálů DPS	28
Obr. 4.4: Řez vícevrstvou DPS. (Grafické znázornění).....	29
Obr. 4.5: Grafické znázornění HDI desky	30
Obr. 4.6: Složení IMS materiálu a velikosti jednotlivých vrstev	30
Obr. 4.7: Grafické znázornění řezu DPS typu flex	31
Obr. 4.8: Řez ohebnou DPS se znázorněním velikosti jednotlivých vrstev	31
Obr. 5.1: Teplotní délková roztažnost.....	32
Obr. 5.2: Délková roztažnost dvou různých materiálů	32
Obr. 5.3: Tři různé režimy zlomu: tah (Mód I), smyk (Mód II) a kombinace (Mód III)	34
Obr. 5.4: Termomechanické chování dvouvrstvé desky při změně teploty	37
Obr. 5.5: Geometrické zobrazení modelu teplotního pole ve dvouvrstvé rovinné desce.....	38
Obr. 5.6: Teplotní pole v DPS po dobu 30 sekund	40
Obr. 5.7: Teplotní pole v DPS po dobu 1200 sekund.....	40

Obr. 5.8: 3D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – ohřev....	42
Obr. 5.9: 2D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – ohřev....	42
Obr. 5.10: 3D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS – chlazení	43
Obr. 5.11: 2D grafické zobrazení vypočtených průběhů teplot v DPS - chlazení	43
Obr. 6.1: 3D prostředí SW Pro/ENGINEER.....	44
Obr. 6.2: Simulační prostředí a definice podmínek uchycení DPS.....	45
Obr. 6.3: Výsledné smykové napětí mezi měděnou vodivou cestou a Epoxy pryskyřicí.....	45
Obr. 6.4: Zobrazení maximální hodnoty namáhání - 492 MPa.....	46
Obr. 6.5: Zobrazení odlupující se měděné vodivé cesty z DPS. Fotografie byla pořízena při 5,6 násobném zvětšení.	46
Obr. 6.6: Několikanásobné zvětšení – deformace DPS a měděných vodivých cest, která je způsobena rozdílnými vlastnostmi materiálů.....	47
Obr. 6.7: Simulační prostředí s definicí gravitace.....	47
Obr. 6.8: Modelování plošných spojů v 3D prostředí Pro/ENGINEER	48
Obr. 6.9: Výstup z modelování - Model DPS dle reálné předlohy.	48
Obr. 6.10: Zobrazení místa teplotního regionu a směrů působení nadefinovaného tepla o intenzitě 100 mW.	49
Obr. 6.11: Finální rozložení teploty v DPS. Zahřívání teplotním regionem o 100mW.	49
Obr. 6.12: Importovaný model do prostředí COMSOL Multiphysics®	50
Obr. 6.13: Definice podmínek pro simulaci v prostředí COMSOL Multiphysics	51
Obr. 6.14: Pokrytí modelu DPS výpočtovou sítí.....	51
Obr. 6.15: Detailní zobrazení různě velkých výpočtových elementů sítě.....	52

Obr. 6.16: Celkový pohled na DPS s ohřátými cestami na 400K po dobu 60 s.	53
Obr. 6.17: Zobrazení zahřáté vodivé cesty a ovlivnění okolí. Barevná stupnice zobrazuje teplotní rozsah v DPS. Zahřívání po dobu 60 s na teplotu 400 K.....	53
Obr. 6.18: Transparentní zobrazení teplotních polí uvnitř DPS. Ohřev vodivých cest na teplotu 400K po dobu 60s.....	54
Obr. 6.19: Prohřátí DPS za dobu 60s.....	54
Obr. 6.20: Model s definovanými materiály, který byl použit pro simulaci únavy materiálů	56
Obr. 6.21: Použitý modul pro simulaci a doplňkové podmínky.....	57
Obr. 6.22: Model pokrytý simulační sítí	57
Obr. 6.23: Detailní zobrazení sítě v místě nejmenší geometrie modelu.....	58
Obr. 6.24: Výsledné namáhání – pohled na celou geometrii součástky.....	59
Obr. 6.25: Zvětšení oblasti s největším namáháním. Rozhraní Cu fólie na DPS	60
Obr. 6.26: Změna délky různých materiálů v závislosti na teplotě v průběhu simulace	60
Obr. 6.27: Pohled na geometrii a na místo s největším tokem energie	61
Obr. 6.28: Detailní pohled na místo s největším rozdílem mechanické energie.	61
Obr. 6.29: Kompaktní zobrazení mezi rozdílem mechanické energie a roztažností materiálů.....	62
Obr. 6.30: Zobrazení hodnot tečení pájky.	62
Obr. 6.31: Detailní zobrazení místa s největší hodnotou tečení pájky.	63
Obr. 6.32: Zobrazení hysterezní smyčky a její hodnoty při průběhu simulace..	63
Obr. 6.33: Model DPS osazený elektronickými součástkami.	64
Obr. 6.34: Model DPS zbavený elektronických součástek.....	64

Obr. 6.35: Model nože pro separaci elektronických součástek a prořezání DPS na tenké pláty.....	65
Obr. 6.36: Uchycení DPS v držáku	65
Obr. 6.37: Geometrie modelu kompozitního nosníku o daných parametrech	66
Obr. 6.38: Distribuce napjatosti v posledním kroku výpočtu	66
Obr. 6.39: Detailní pohled na separovanou měděnou cestu pod mikroskopem..	67
Obr. 6.40: DPS grafické karty, která nebyla zbavená součástek.....	67
Obr. 8.1: Grafické znázornění separace DPS	72
Obr. 8.2: DPS s odtrženými vodivými cestami.	74
Obr. 8.3: Pákové nůžky s odkládací deskou.....	74
Obr. 8.4: Horkovzdušná pistole.....	75
Obr. 9.1: Odlupující se vodivé cesty z DPS v místě, kde byla vrstva laku odstraněna.....	76
Obr. 9.2: Porovnání výsledků ze simulací (vlevo) s experimentálním ověřením v laboratoři (vpravo).....	77
Obr. 9.3: Rozložení teploty v DPS a ověření vlivu teploty na vznik požadované napjatosti.	77

15. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Součinitel délkové roztažnosti [K^{-1}]
β	Poměr kritické uvolněné energie módu I a II [-]
γ	Výtěžnost [kg]
Δl	Prodloužení materiálu [m]
Δl_1	Prodloužení prvního materiálu [m]
Δl_2	Prodloužení druhého materiálu [m]
ΔT	Rozdíl teplot [K]
ϵ_k	Tepelná roztažnost
ϵ_k^t	Elastická deformace
ϵ^T	Deformace membrány [-]
ϵ_1	Relativní prodloužení prvního materiálu [-]
ϵ_2	Relativní prodloužení druhého materiálu [-]
η	Exponent Benzeggagh - Kenane (B-K) kritéria [-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_1	Součinitel tepelné vodivosti materiálu I [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_2	Součinitel tepelné vodivosti materiálu II [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
μ	Permeabilita prostředí [$H \cdot m^{-1}$]
ρ	Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_1	Hustota materiálu I [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_2	Hustota materiálu II [$kg \cdot m^{-3}$]
σ_1	Výsledné smykové napětí - měď [Pa]
σ_2	Výsledné smykové napětí - epoxidová pryskyřice [Pa]
σ_k^t	Teplotní namáhání [Pa]
τ	Doba ohřevu [s]
τ_{ch}	Doba chlazení [s]
τ_s	Maximální dovolené smykové napětí materiálu [MPa]
τ_v	Vypočtené smykové napětí [MPa]
a	Teplotní vodivost [$m^2 \cdot s$]
a_1	Teplotní vodivost první vrstvy [$m^2 \cdot s$]
a_2	Teplotní vodivost druhé vrstvy [$m^2 \cdot s$]

b	Tloušťka kovové vrstvy [m]
C_p	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{p1}	Měrná tepelná kapacita materiálu I [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{p2}	Měrná tepelná kapacita materiálu II [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
D	Elektrická indukce [$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$]
d	Parametr poškození [-]
E	Modul pružnosti [Pa]
E_1	Modul pružnosti prvního materiálu [Pa]
E_2	Modul pružnosti druhého materiálu [Pa]
E_k^*	Modul pružnosti k - vrstvy [Pa]
$erfc$	Chybová funkce [-]
F_e	Tažná síla působící na trhliny nosníku [N]
F_m	Síla působící na střed nosníku [N]
F_T	Výsledná síla [N]
G_{Ic}	Mód I – kritické uvolnění energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
G_{IIc}	Mód II – kritické uvolnění energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
H	Intenzita magnetického pole [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
H_b	Exponent Benzeggagh - Kenane (B-K) kritéria
J	Hustota volných proudů [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]
k	Počet členů sumy [-]
K_ε	Konstanta podobnosti [-]
K_a	Konstanta [-]
k_e	Cena elektrické energie [Kč]
k_k	Cena komodity [$\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$]
K_p	Tuhost [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-3}$]
k_{pp}	Cena chemické látky [Kč]
l_0	Původní délka materiálu [m]
m	Kombinovaný režim [-]
M	Chladicí směs [-]
M_z	Mzda pracovníka [Kč]
N	Celkové náklady na proces recyklace DPS [Kč]
N_d	Náklady na jeden den procesu separace [Kč]
N_h	Náklady na jednu hodinu [Kč]

N_r	Režijní náklady [Kč]
N_s	Normálová pevnost v tahu [MPa]
S_j	Styčná plocha obou materiálů [m ²]
S_k	Tloušťka k – vrstvy [m]
S_s	Pevnost ve smyku [MPa]
t_0	Teplota okolí [°C]
t_1	Teplota prvního materiálu [°C]
t_2	Teplota druhého materiálu [°C]
t_g	Teplota skelného přechodu [°C]
T_g	Teplota skelného přechodu [K]
t_{chl}	Teplota chlazení [°C]
t_p	Počáteční konstantní teplota [°C]
T_m	Konečná teplota [K]
u_{I0}	Počátek selhání posunutí pro mód I [-]
u_{II0}	Počátek selhání posunutí pro mód II a mód III [-]
u_f	Konečné posunutí [-]
u_{If}	Kritické uvolnění energie pro mód I [-]
u_{IIIf}	Kritické uvolnění energie pro mód II [-]
ν	Poissonovo číslo [-]
W	Spotřeba elektrické energie [kWh]
x	Tloušťka druhého materiálu - plastu [m]
2D	Dvoudimenzionální zobrazení
3D	Trojdimenzionální zobrazení
AV	Audio-vizuální
CD	Compact Disc
CRT	Catode Ray Tube
CZM	Cohesive Zone Model
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
DDR3	Double Data rate 3
DDR4	Double Data rate 4
DPS	Deska plošného spoje
DVB	Digital Video Broadcasting
DVD	Digital Video Disc
EU	Evropská Unie

FR2	Flame Retardant class 2
FR3	Flame Retardant class 3
FR4	Flame Retardant class 4
HDD	Hard Disk Drive
HDI	High Density Interconnector
LAN	Local Area Network
MM	Matematický model
MP3	Motion Picture experts group - layer 3
MR	Maxwellej Rovnice
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PDA	Personal Digital Assistant
RAM	Random Access Memory
SSD	Solid State Drive
SW	Software
TCE	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
USB	Universal Serial Bus
VN	Vysoké Napětí
VoIP	Voice Over IP

16. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

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

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

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

17. PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

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



Vzdělání:

09/2007 – dosud

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

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

09/2005 – 09/2007

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

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

09/2002 – 06/2005

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

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

Pracovní zkušenosti:

08/2017 – dosud

Varroc Lighting Systems, s. r. o

IT Project Leader

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

08/2016 – 07/2017

ON Semiconductor Czech Republic, s. r. o.

IT Project Manager

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

Aplikační inženýr

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

Jazyky:

- Angličtina – středně pokročilá
- Němčina – začátečník

Další dovednosti:

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

Řidičský průkaz:

- Skupina A, B

Certifikáty:

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