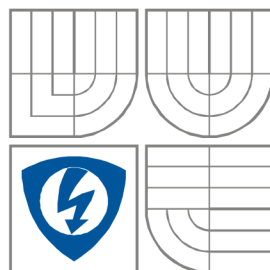


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Ústav elektrotechnologie

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

Department of Electrotechnology

Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

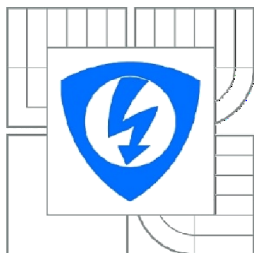
Bc. Aleš Stručovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Aleš Stručovský

ID: 109722

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou pájecí pece a metodikou výpočtu teplotního profilu pomocí metody konečných objemů. Pomocí systému CAD a CAE (Computer Aided Engineering – počítačová podpora inženýrských prací) proveďte analýzu teplotního profilu v pájecí peci při různých variantách teplotních článků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem tohoto projektu je pomocí CAE systému analyzovat rozložení teplotního profilu pájecí pece DIMA 0180. K vytvoření modelu je použit program Solidworks 2012 Premium. Simulace je provedena pomocí modulu Flow simulation. Tato práce navazuje na poznatky diplomové práce Martina Procházky s názvem Vliv rozdílné tepelné kapacity a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením. Vycházíme ze znalosti sdílení tepla, především ze sdílení tepla kondukcí a radiací, které se v peci objevují.

KLÍČOVÁ SLOVA

Solidworks, Flow Simulation, přetavovací pec DIMA SMRO 0180, sdílení tepla, teplotní profil, termočlánek, druhy pájení, radiace, CAD, CAE (počítačová podpora inženýrských prací).

ABSTRACT

The aim of this project is using the CAE system to analyze the distribution of the temperature profile brazing furnace DIMA 0180. To create the model is used SolidWorks Premium 2012. The simulation is performed using the Flow Simulation. This work builds on the knowledge diploma thesis by Martin Procházka titled The effect of different heat capacities and components on the longitudinal temperature profile for reflow soldering. We start from the knowledge of heat transfer, especially of heat conduction and radiation, which appear in the furnace.

KEYWORDS

Solidworks Flow Simulation, reflow oven DIMA SMRO 0180, heat transfer, temperature profile, thermocouple, types of soldering, radiation, CAD - Computer Aided Design, CAE - Computer Aided Engineering.

STRUČOVSKÝ, ALEŠ. *Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 62 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systému CAE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Druhy pájení:	13
1.1.1 Pájení přetavením (Reflow Soldering)	14
1.1.2 Pájení vlnou (<i>Flow Soldering</i>)	18
1.2 Termočlánky	19
1.3 Sdílení tepla	21
1.3.1 Sdílení tepla vedením	21
1.3.2 Sdílení tepla konvekci	24
1.3.3 Sdílení tepla zářením (radiace)	26
1.4 SolidWorks	30
1.4.1 Flow Simulation	31
1.4.2 Metoda konečných objemů (MKO)	34
2 Přetavovací pec	37
2.1 Dima SMRO 0180	37
2.2 Testovací DPS	40
2.3 Naměřené hodnoty	42
3 Teplotní analýza	44
3.1 Simulace	44
3.2 Sdílení tepla radiací	51
3.3 Teplotní profil	57
4 Závěr	60
Literatura	62
Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
Seznam příloh	64

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Příklad teplotního profilu[5]</i>	14
<i>Obr. 2: Přetavovací pec Fritsch [12]</i>	14
<i>Obr. 3: Ersa, zařízení pro pájení vlnou [13]</i>	18
<i>Obr. 4: Zapojení termočlánku</i>	19
<i>Obr. 5: Termočlánky typu K v profiloměru Slim KIC 2000</i>	21
<i>Obr. 6: Přestup tepla kondukcí pro dva různé materiály</i>	22
<i>Obr. 7: Spektrum elektromagnetického záření [7]</i>	27
<i>Obr. 8: Grafické vyjádření Planckova zákona [5]</i>	28
<i>Obr. 9: Grafické prostředí SolidWorks [8]</i>	30
<i>Obr. 10: Příklad proudění vzduchu ve Flow Simulation [8]</i>	31
<i>Obr. 11: Výpočetní síť [10]</i>	34
<i>Obr. 12: Výpočetní síť- kontrolní objem</i>	35
<i>Obr. 13: Obecná výpočetní síť</i>	36
<i>Obr. 14: Vymodelovaná síť v blízkosti zářičů</i>	36
<i>Obr. 15: Přetavovací pec DIMA Smro 0180 (3D model vpravo)</i>	37
<i>Obr. 16: Rozměry přetavovací pece DIMA SMRO</i>	38
<i>Obr. 17: Rozměry zářičů a vzdálenost od DPS</i>	39
<i>Obr. 18: Průřez pecí</i>	39
<i>Obr. 19: Umístění termočlánků na testovací desce</i>	41
<i>Obr. 20: Model DPS s rámečkem</i>	41
<i>Obr. 21: Průběh teploty v čase $t= 650$ s</i>	43
<i>Obr. 22: Průběh teploty v čase $t= 350$ s</i>	43
<i>Obr. 23: Render Dima SMRO 0180</i>	44
<i>Obr. 24: Zjednodušená teplotní simulace přetavovací pece</i>	46
<i>Obr. 25: Rozdíl mezi kondukcí a konvekcí</i>	47
<i>Obr. 26: Změna teploty směrem k DPS</i>	47
<i>Obr. 27: Dokonale a nedokonale přilnutý materiál</i>	47
<i>Obr. 28: Detail ventilátoru</i>	48
<i>Obr. 29: Proudění vzduchu pájecí pecí</i>	48
<i>Obr. 30: PQ křivka ventilátoru po přepočtu</i>	49
<i>Obr. 31: Proudění vzduchu podél zářičů</i>	50
<i>Obr. 32: Rozložení zářičů v peci</i>	51

<i>Obr. 33: Rozložení teplot pro 100 °C</i>	53
<i>Obr. 34: Srovnání měření a simulace pro 100 °C</i>	53
<i>Obr. 35: Rozložení teplot pro 150 °C</i>	54
<i>Obr. 36: Srovnání měření a simulace pro 150 °C</i>	54
<i>Obr. 37: Rozložení teplot pro 200 °C</i>	55
<i>Obr. 38: Srovnání měření a simulace pro 200 °C</i>	55
<i>Obr. 39: Rozložení teplot pro 250 °C</i>	56
<i>Obr. 40: Srovnání měření a simulace pro 250 °C</i>	56
<i>Obr. 41: Rozložení teploty pro 260, 240, 360 °C</i>	57
<i>Obr. 42: Porovnání teplotních profilů s výsledky simulace</i>	58
<i>Obr. 43: Teplotní profil v čase $t = 600$ s, při zapnutém dopravniku</i>	59
<i>Obr. 44: Nastavení teplot 260, 240, 360 °C při vypnutém dopravniku</i>	59
<i>Obr. 45: Tlak v peci</i>	65
<i>Obr. 46: Rozložení teplot na DPS</i>	65
<i>Obr. 47: Rozložení teplot kolem zářičů</i>	66
<i>Obr. 48: Proudění v peci spojitě</i>	66
<i>Obr. 49: Rozložení hustoty v peci</i>	67
<i>Obr. 50: Rychlost proudění v peci</i>	67
<i>Obr. 51: Vnitřní uspořádání pece DIMA</i>	68
<i>Obr. 52: Zprůhledněný horní kryt pece DIMA</i>	68

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Nejpoužívanější metody pájení přetavením</i>	15
<i>Tab. 2: Typy termočlánků a jejich vlastnosti [5]</i>	20
<i>Tab. 3: Počáteční nastavení Flow Simulation</i>	32
<i>Tab. 4: Technické parametry přetavovací pece DIMA SMRO 0180</i>	38
<i>Tab. 5: Aritmetický průměr se střední kvadratickou chybou</i>	42
<i>Tab. 6: Materiály použité v simulaci</i>	45
<i>Tab. 7: Výsledné teploty na termočláncích (Flow Simulation)</i>	52
<i>Tab. 8: Průměrná změřená teplota na termočláncích</i>	52
<i>Tab. 9: Absolutní chyby měření</i>	52
<i>Tab. 10: Relativní chyby měření</i>	52
<i>Tab. 11: Teploty na termočláncích, měření 1.</i>	64
<i>Tab. 12: Teploty na termočláncích, měření 2.</i>	64
<i>Tab. 13: Teploty na termočláncích, měření 3.</i>	64
<i>Tab. 14: Teploty na termočláncích, měření 4.</i>	64

ÚVOD

Průmyslové pájení je v dnešní době neodmyslitelně spojeno s rychlostí pájeného spoje, u kterého se neustále zvyšují požadavky na kvalitu, minimalizaci materiálu, ekologii

a spotřebu elektrické energie. K tomu, aby vznikl kvalitní, vodivý kontakt a zároveň se vlivem tepla nezničily citlivé součástky, je vhodné znát teplotní profil pece. Objektem zkoumání je přetavovací laboratorní pec DIMA Smro 0180. K pochopení této práce slouží první kapitola teoretické části, v níž jsou uvedeny metody pájení a jejich problematiky. Zcela ztěžejní je popis jednotlivých sdílení tepla, jelikož všechny tři typy ve větší nebo menší míře působí na zahřívání objekt. V tomto případě se jedná o DPS. Sdílení vedením, konvekcí a zářením jsou uvedeny v další kapitole teoretické části.

Měření je rozděleno na dvě části:

- a) Měření teploty na termočláncích pomocí profiloměru Slim KIC 2000

Zjištění skutečných teplot uvnitř a na povrchu DPS. K přiblížení se homogennímu prostředí jsou teploty na zářičích nastavovány stejně (100, 150, 200, 250 °C). Dalším krokem je změření teplotního profilu dle hodnot technické dokumentace.

- b) Simulace teploty pomocí programu SolidWorks Flow Simulation.

Matematicko-fyzikální model ve 3D je vystaven stejným podmínkám jako při měření na profiloměru Slim KIC 2000. Určení teplot se provádí v místech termočlánců na vytvořených snímacích bodech. Měření teplotního profilu se určuje závislostí $T = f(L)$ z výsledné simulace.

V kapitole teplotní analýza jsou tyto výsledky porovnány. Zde jsou uvedeny také kroky, které bylo nutné provést k uspokojivým výsledkům simulace.

Pochopením teplotní analýzy přetavovací pece umožní nastavovat přesnější hodnoty a tím docílit zvýšení spolehlivosti, kvality a rychlosti tavení pájecí pasty. Důsledkem špatného nastavení přetavovací pece může dojít k přehřátí součástky. To vede k jejímu pnutí, v horším případě může vést i k prasknutí.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Pájení je metalurgický proces, u něhož dochází ke spojení dvou kovových částí pájecí slitinou, zpravidla za přítomnosti tavidel. Atomy, které jsou na povrchu spojovaných kovů, se při tomto procesu promísí s atomy roztavené pájky a dostávají se do jejich těsné blízkosti, čímž se projeví adhezní a kohezní síly. Pájení součástek patří do kategorie měkkého pájení s pracovními teplotami do 450 °C. Výsledkem pájecího procesu by měl být spoj, který bude plnit nároky na elektrické i mechanické propojení součástek. [1] [2]

Při běžném osazování součástek s drátovými přívody postupujeme následujícím způsobem: natvarování přívodů, vložení do prokoveného nebo neprokoveného vývodu, zapájení, odstranění nepotřebného konce přívodu. Povrchová montáž využívá vlastností bezvývodových součástek nebo součástek s vývody, ale pájení probíhá přímo na povrchu desky. V současné době existují mnohé řady pasivních i aktivních součástek včetně různých universálních pouzder a konektorů.

Výhody povrchové montáže:

- zmenšení otvorů a hmotnosti DPS,
- zmenšení počtu prokovených děr pájecích plošek,
- snadné osazování pomocí automatů,
- vyšší spolehlivost,
- nižší cena osazené desky.[3]

Formování pájeného spoje

K vytvoření mechanicky pevného a spolehlivého spoje je zapotřebí brát v úvahu:

- materiálové kombinace:
 - povrchové úpravy pájených povrchů,
 - tavidla,
 - pájky,
- procesní systém:
 - teplota,
 - čas,
 - gradienty nárůstu a poklesu teploty,

- environmentální systém:
 - vzduchu,
 - řízení atmosféry, vakua [1]

Pájitelnost obsahuje 3 hlediska:

- smáčivost - povrch musí umožnit smočení materiálu roztavenou pájkou během dané doby vhodné pro vytvoření pájeného spoje,
- teplotní požadavek - pájené součástky musí umožnit ohřev plochy určené k pájení na požadovanou teplotu během požadované doby,
- odolnost vůči teplu při pájení - teplo a s tím související teplotní namáhání pájených dílů nesmí ovlivnit funkci součástek před definovaným limitem.

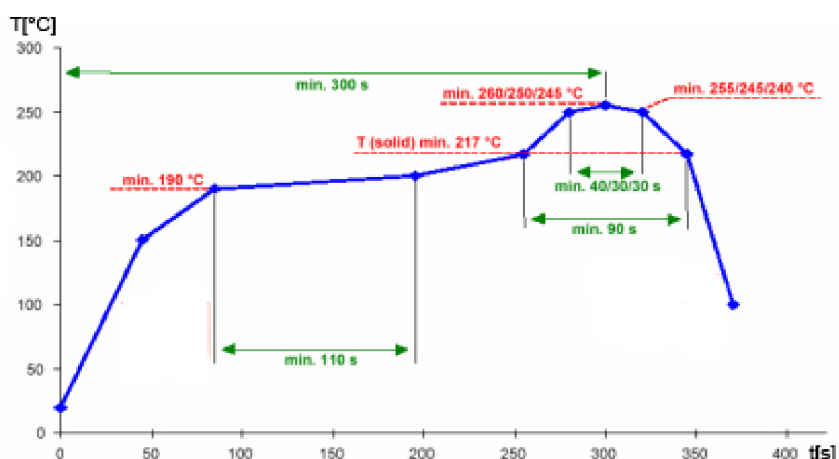
1.1 Druhy pájení:

Díky rozvoji elektrotechniky ve 20. století se požadavky na pájené spoje liší podle odvětví. Existuje celá řada pájecích metod, které se odlišují rychlostí výroby, kvalitou a flexibilitou procesu, ztrátami v podobě zbytků pájky.

Důležitým faktorem je teplotní profil představující průběh teploty na čase po dobu pájení. Nejvyšší teplotou je teplota přetavení, ovšem důležitý je také náběh teploty z počáteční pokojové teploty, dále předehřev a také závěrečná fáze po přetavení - chlazení. To vše ovlivňuje tvorbu a vznik pájeného spoje, a především pak i jeho spolehlivost a životnost.

Základními parametry jsou:

- náběh na teplotu předehřevu,
- teplota a doba předehřevu,
- maximální teplota přetavení,
- doba nad teplotou liquidu,
- průběh chlazení [4]



Obr. 1: Příklad teplotního profilu[5]

1.1.1 Pájení přetavením (Reflow Soldering)

Pájení přetavením vychází z tiskových metod využívaných pro nanášení tlustovrstvých materiálů [4]. Princip je založen na osazení součástek do pájecí pasty, která se v peci přetaví při vyšší teplotě, jako je bod tání pájky obsažené v pastě. Dříve byl nejvíce používaný způsob přetavení pomocí IR zářičů, v dnešní době je nejrozšířenější způsob pájení pomocí horkého vzduchu .[2]



Obr. 2: Přetavovací pec Fritsch [12]

Výhody pájení přetavením:

- pájka a tavidlo se vhodným technologickým postupem aplikují pouze v místech kde je třeba, výsledkem je:
 - úspora materiálu,
 - pájka a tavidlo se dávkuje v přesně definovaném poměru,
- je vyloučena "nekontrolovatelná" přítomnost nečistot, které se mohou dostat na pájený spoj při pájení vlnou, případně jiných postupech,
- pájecí proces probíhá bez teplotních rázů,
- přesný technologický postup aplikace pasty umožňuje dosáhnout vyšší hustoty montáže,
- oboustranná montáž SMD [1].

Přehled způsobů ohřevu pájením přetavením:

- pájení infračerveným zářením (infraohřev),
- pájení horkým vzduchem nebo plynem (konvekční ohřev),
- pájení v kondenzovaných parách (pájení kondenzační),
- pájení laserem,
- pájení vyhřívaným nástrojem (pájení impulsní)
- pájení na horké desce nebo pásu. [4]

Nejpoužívanější jsou systémy pájení infračerveným zářením nebo horkovzdušné konvekce.

Tab. 1: Nejpoužívanější metody pájení přetavením

Faktor	IR	Kondenzace	Konvekce
Řízení procesu	dobré	výborné	velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevné	regulovatelné
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Max. teplota	špatná def.	pevná	špatná def.
Universálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

Pájení infračerveným zářením

K přetavení pájecí pasty dochází energií z IR zářičů. Míra absorbovaného tepla závisí na koeficientu, který vyplývá z vlnové délky záření a barvy povrchu součástek. Obecně je známo, že součástky s tmavším povrchem absorbují více tepla než místa, kde je nanesena pájecí pasta. Tím dochází k nerovnoměrnému zahřívání soustavy, a to má vliv jak na součástky (jsou tepelně namáhány), tak na výslednou kvalitu pájeného spoje [2].

Výhody:

- jednoduchá konstrukce pece,
- nízká „setrvačnost“ mezi primárními ohřivači a výrobkem,
- pásmové ovládání ve značném rozsahu.
- velká účinnost

Nevýhody:

- nehomogenní ohřev,
- velký rozdíl teplot při měření příčného teplotního profilu,
- nelze pájet nové generace součástek typu BGA.

Pájení v kondenzovaných parách (Vapourphase Soldering)

Součástky osazené v pájecí pastě se po předeřtání ponoří do nasycených par fluorovaných uhlovodíků, které na chladnějších částech montážního celku kondenzují.

Výhody:

- není možné přehřát montážní celek, velmi kvalitní výsledky pájecího procesu, uniformní ohřev, vhodné i pro BGA, malé ΔT výrobku,
- pájení probíhá bez přítomnosti kyslíku, je možno použití tavidla s malou aktivitou, inertní prostředí procesní komory,
- výborný přenos tepla.

Nevýhody:

- pájení probíhá často v parách fluorovaných uhlovodíků (upouští se od nich z ekologických důvodů),
- vyšší cena procesu.

Konvekční pájení

Energie potřebná pro přetavení pájecí pasty na DPS se získává průchodem plynu (dusík, vzduch, ev. formovací plyn) přes topný element. Tyto pece byly popsány v roce 1975. Konvekční pece využívají zejména nucenou konvekci. V rámci jednotlivé zóny lze měnit teplotu, příp. i intenzitu proudícího plynu. Zařízení jsou většinou konstruována jako průběžná s pohyblivým dopravníkem prstovým nebo pásovým, na který se umísťuje DPS. [1]

V praxi se používají dva druhy pecí:

- Vsázková - Tyto pece mají pouze 1 zónu, proto je u nich horší regulace teplotního profilu, jsou levnější, vhodné pro malovýrobu.
- Inline - Minimální počet zón jsou 4, to nám umožňuje lepší regulaci teplotního profilu a tím i dosáhnout lepší kvality pájeného spoje. [2]

Výhody:

- umožňuje jednodušší nastavení pájecího profilu pouhou změnou rychlosti posuvu dopravníku.

Nevýhody:

- menší účinnost (20 až 30 %),
- větší energetická spotřeba,
- vyšší míra oxidace pájecí pasty při pájení ve vzduchu.

1.1.2 Pájení vlnou (*Flow Soldering*)

Jeho předností je vysoký stupeň automatizace umožňující vytvářet v kontinuálním procesu velký počet spojů v relativně konstantních podmínkách. Používá se řadu let, je to osvědčený způsob pájení. Využívá se pro pájení součástek SMD, THT nebo jejich vzájemné kombinace. [4]

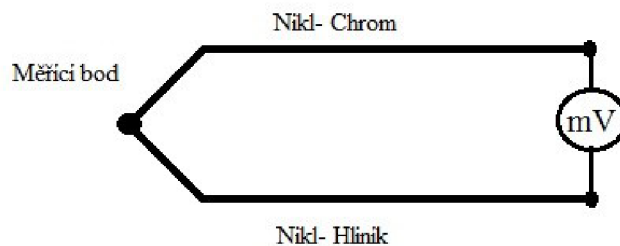


Obr. 3: Ersal, zařízení pro pájení vlnou [13]

Dopravník posouvá desky mezi jednotlivými sekcemi stroje. V první fázi se na desku nanese tavidlo, buď sprejovou tryskou nebo pomocí difuzoru. Poté se deska dostane do předehřívací zóny, kde se odpaří část rozpouštědla z tavidla a deska se zahřeje na teplotu blízkou roztavené pájce. Poté se dostane k pájecí vlně, ta musí být navržena tak, aby se při průchodu DPS roztavená pájka nedostala na stranu součástek [2]. Výhodami systému jsou nižší cena a vysoká spolehlivost.

1.2 Termočlánky

Termočlánek se nejčastěji používá jako snímač teploty, využívá principu termoelektrického jevu. Skládá se ze dvou různých kovů, spojených do jednoho bodu. Pokud je tento spoj chlazen nebo zahříván, vzniká na jeho koncích napětí, které je úměrné absolutní teplotě U_t . Podmínkou je, aby $T > T_{\text{okolí}}$.



Obr. 4: Zapojení termočlánku

Pokud je jejich teplota stejná, všechna napětí se vzájemně ruší, nevzniká žádný proud. Spoj ležící v místě měření teploty se označuje jako spoj horký, referenční spoj je často nazýván jako spoj studený. Vzniklé napětí je v řádech milivoltů a platí pro něj vzorec:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (1.1)$$

Kde: S_a a S_b Seebeckovy koeficienty kovů A a B

T_1 a T_2 jsou teploty spojů

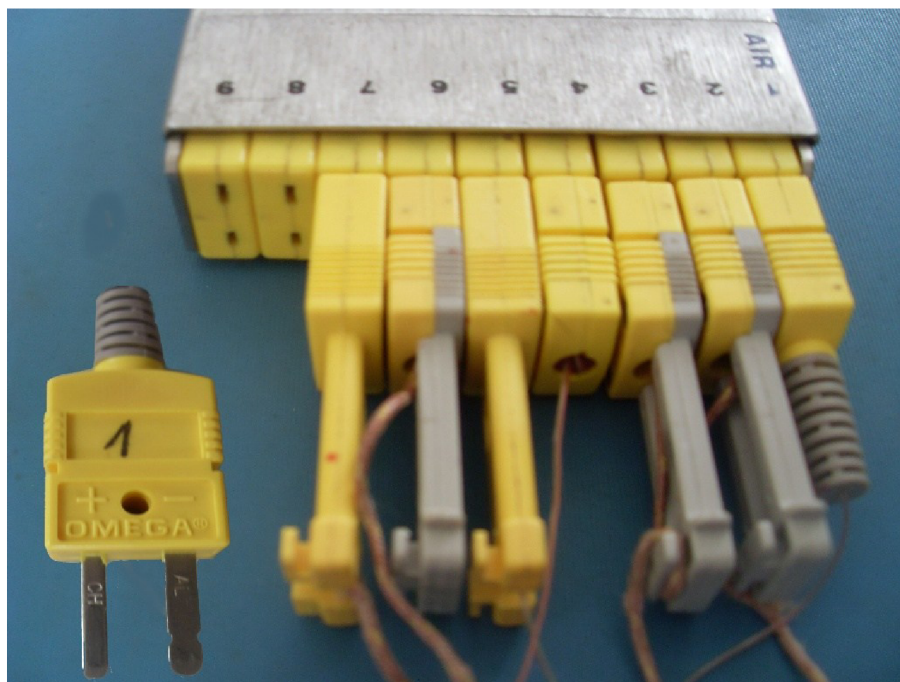
V praxi se používají kombinace mnoha kovů. Nejpoužívanější jsou termočlánky J, K, T, E. Teplotní rozsah je určen jak výběrem kovů, tak průměrem drátu.

Nejistoty lze rozdělit na chyby:

- vzniklé nedokonalým přestupem tepla nebo tepelnou vodivostí měřícího čidla. Naměřená teplota je vždy nižší než skutečná,
- vzniká nečistotami vodiče a jeho homogenitou v celé jeho délce. Standardní odchylka u termočlánku typu K je 0.75% z měřené hodnoty [$^{\circ}\text{C}$].

Tab. 2: Typy termočlánků a jejich vlastnosti [5]

	Kombinace slitin		Tepelný rozsah (°C)		U _{te} (mV)	Dovolená chyba		Prostředí, ve kterém může termočlánek pracovat, pozn.
	Vodič +	Vodič –	Termo- články	Kom. v.		Standard.	Speciál.	
J	Fe (železo)	Cu-Ni (Konstantan)	0 až 750	0 až 200	0 až 42,28 3	2,2°C nebo 0,75%	1,1°C nebo 0,4%	Redukční, vakuum, inertní. Nedopor. pro nízké teploty
K	Ni-Cr (nikl-chrom)	Ni-Al (nikl-hliník)	-200 až 1250	0 až 200	- 5,973 až 50,63 3	a) 2,2°C nebo 0,75% b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Omezené použití ve vakuu a redukč. prostředí.
T	Cu (měď)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 350	-60 až 100	- 5,602 až 17,81 6	a) 1,0°C nebo 0,75% b) 1,0°C nebo 1,5%	0,5°C nebo 0,4%	Střední oxid., redukční vakuum nebo inertní.
E	Ni-Cr (nikl-chrom)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 900	0 až 200	- 8,824 až 68,78 3	a) 1,7°C nebo 0,5% b) 1,7°C nebo 1,0%	1,0°C nebo 0,4%	Oxidační nebo inertní. Omez. Použití ve vakuu nebo v redukč. prost. Největší přírůst. U _{te} na 1°C.
N	Ni-Cr-Si (microsil)	Ni-Si-Mg (nisil)	-270 až 1300	0 až 200	- 4,345 až 47,50 2	a) 2,2°C nebo 0,75% b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Alternativa k typu K. Stabilnější při vysokých teplotách.
R	Pt-13%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 16,74 1	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační nebo inertní. Nevkládat do kovov. ochr. obalů.
S	Pt-10%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 14,97 3	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační nebo inertní. Nevkládat do kovov. ochr. obalů.
B	Pt-30%Rh (platina-rhódium)	Pt-6%Rh (platina-rhodium)	0 až 1700	0 až 100	0 až 12,42 6	0,5% nad 800°C	neudává se	Oxidační nebo inertní...
G	W (wolfram)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 38,56 4	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen.
C	W-5%Re (wolfram-rhenium)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 870	0 až 37,06 6	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Nevhodné pro oxid. prostředí.
D	W3%Re (wolfram-rhenium)	W-25%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 39,50 6	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C.



Obr. 5: Termočlánky typu K v profiloměru Slim KIC 2000

Maximální chyba termočlánku je 0,75 % z dané hodnoty. Pro 250 °C je chyba:

$$\Delta T_{250} = 0,0075 \cdot 250 = 1,875 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1.3 Sdílení tepla

1.3.1 Sdílení tepla vedením

Sdílením tepla se nazývá přenos energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s teplotou nižší. To je dáno platností druhého zákona termodynamiky.

Základní zákony:

Teplotní pole - existující teplotní pole a především existující rozdíl teplot je základním předpokladem pro uskutečňování sdílení tepla vedením. Matematicky toto lze zapsat jako:

$$t = f(x, y, z, \tau) \tag{1.2}$$

kde: t teplota [$^\circ\text{C}$]

x, y, z souřadnice [m]

τ čas [s]

Tato rovnice znamená, že teplotní pole je funkcí tří souřadnic. Pole představuje izotermické plochy tzn. místa, ve kterých je stejná teplota.

Teplota v materiálu se mění ve všech směrech. Nárůst teploty je dán gradientem teploty, což je vektor, kolmý k izotermě a směřující na stranu nárůstu teploty,

$$\mathit{grad} t = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} = \nabla t \quad [K \cdot m^{-1}] \quad (1.3)$$

kde ∇ je Hamiltonův operátor $[m^{-1}]$

Tepelný tok P - množství tepla přenesené přes izotermický povrch za jednotku času.

$$dP = q \cdot dS \quad [W] \quad (1.4)$$

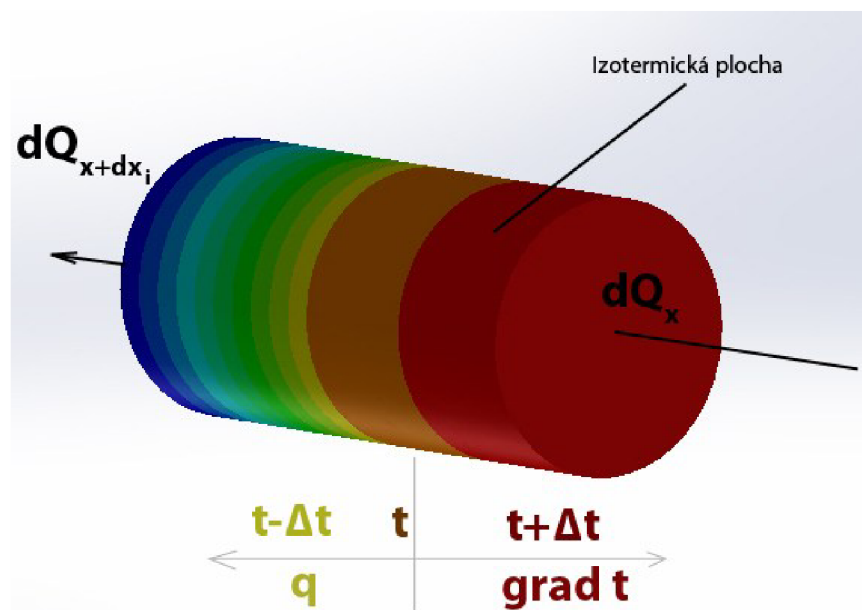
Hustota tepelného toku q - tepelný tok vztažený na jednotku izotermické plochy.

Množství tepla Q , procházející izotermickou plochou je dáno:

$$dQ = q \cdot dS \cdot dt \quad [J] \quad (1.5)$$

První Fourierův zákon - hustota tepelného toku je úměrná zápornému gradientu teploty.

$$q = -\mathit{grad} t = -\left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z}\right) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.6)$$



Obr. 6: Přestup tepla kondukcí pro dva různé materiály

Druhý Fourierův zákon - jedná se o rovnici vedení tepla $t = f(x, y, z, \tau)$. To znamená, šíření tepla v tělese za působení času (nestacionární vedení tepla). Při matematickém popisu vycházíme ze zjednodušujících předpokladů:

- těleso je homogenní a izotropní,
- fyzikální vlastnosti jsou konstantní,
- objemové zdroje jsou rozmístěny rovnoměrně,
- uvažujeme izobarický děj $p = \text{konst.}$

Změna entalpie dI je rovna součtu přivedeného tepla za dobu $d\tau$ do objemu díky tepelné vodivosti dQ_λ a tepla, které za stejný čas uvolní vnitřní objemové zdroje dQ_V .

$$dI = dQ_\lambda + dQ_V \text{ [J]} \quad (1.7)$$

Celkový přírůstek tepla do elementárního rovnoběžnostěnu v důsledku tepelné vodivosti:

$$dQ_\lambda = dQ_{\lambda,x} + dQ_{\lambda,y} + dQ_{\lambda,z} = - \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) \cdot dV \cdot d\tau \text{ [J]} \quad (1.8)$$

kde: $dV = d_x \cdot d_y \cdot d_z \text{ [m}^3\text{]}$

Množství tepla uvolněného v objemu dV za čas $d\tau$ se rovná:

$$dQ_V = q_V \cdot dV \cdot d\tau \text{ [J]} \quad (1.9)$$

Přírůstek entalpie dI pro izobarický děj se vyjádří:

$$dI = m \cdot c_p \cdot dt = \rho \cdot dV \cdot d\tau = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot dt = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau \text{ [J]} \quad (1.10)$$

Dosadíme (1.8), (1.9), (1.10) do původní rovnice (1.7):

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_V \quad (1.11)$$

neboli:

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\text{div } q + q_v \text{ [W} \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \quad (1.12)$$

kde i je měrná entalpie $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$

Jednotlivé složky hustoty tepelného toku z rovnice (1.11) lze zapsat vztahy:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}; q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y}; q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1.13)$$

Z rovnice (1.11) vyjde tzv. Fourierova rovnice vedení tepla:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1.14)$$

Rovnice vychází z toho, že jsou fyzikální vlastnosti konstantní, pak platí:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c_p} \quad [K \cdot s^{-1}] \quad (1.15)$$

Fourierova rovnice vedení tepla:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot t + \frac{q_v}{\rho \cdot c_p} \quad [K \cdot s^{-1}] \quad (1.16)$$

kde: ∇^2 Laplaceův operátor (m^{-2})

α součinitel teplotní vodivosti $\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [m^2 \cdot s^{-1}]$

1.3.2 Sdílení tepla konvekcí

Sdílení tepla konvekcí se uskutečňuje při *pohybu* tekutiny a zároveň dochází k *výměně (sdílení) tepla*. Konvekce tak představuje současné vedení tepla (kondukce) a proudění tekutiny – hovoříme o **konvektivně-kondukčním** sdílení tepla. Poměr konvekce a kondukce na celkovém přestupu tepla je různý a záleží na druhu proudění a fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny [5].

Podíl přirozené konvekce je tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění a čím větší jsou teplotní gradienty kapaliny.

Fourierova – Kirchhoffova rovnice

Tato rovnice popisuje teplotní pole proudící tekutiny. Předpokládá se proudění tekutiny homogenní, izotropní, s konstantními fyzikálními vlastnostmi a s rovnoměrně rozprostřenými vnitřními objemovými zdroji.[6]

Vycházíme z 1. Fourierova zákona vedení tepla v tuhém tělese.

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \mathbf{grad} t \quad (1.17)$$

Jelikož se jedná o pohybující se vedení tepla je potřeba k vektoru \mathbf{q} přidat teplo, které tekutina o rychlosti \mathbf{v} , hustotě ρ a měrné entalpii přenese přes jednotku plochy za jednotku času.

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \mathbf{grad} t + \rho \cdot \mathbf{v} \cdot i \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.18)$$

Za předpokladu, že ρ, λ jsou konstanty, po dosazení složek x, y, z do rovnice dostaneme:

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\text{div} \mathbf{q} + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.19)$$

rovnice nabude tvaru:

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) - \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) - \rho \cdot i \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.20)$$

Pro nestlačitelné tekutiny platí $\rho = \text{konst}$:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad [\text{s}^{-1}] \quad (1.21)$$

Pak se vztah (1.20) zjednoduší na:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial i}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) = \lambda \cdot \nabla^2 t + q_v \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.22)$$

U izobarického děje platí $di = c_p \cdot dt$, takže vztah (1.22) přejde na tvar:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \cdot \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p} \cdot \rho \quad [\text{K} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.23)$$

Pokud by složky $v_x = v_y = v_z = 0$ jedná se opět o Fourierovu rovnici vedení tepla v tuhých tělesech.

1.3.3 Sdílení tepla zářením (radiace)

Sdílení tepla je založeno na elektromagnetickém záření, v tomto případě na záření tepelném. Tento typ radiace je specifický tím, že k přenosu tepla nepotřebuje zprostředkující látku (nepotřebuje ke sdílení tuhé, kapalné nebo plynné látky). Tepelné záření leží v rozsahu vlnových délek od $10^{-4}m - 10^{-7}m$. Záření s vlnovou délkou $10^{-7}m > \lambda > 10^{-4}m$ již není tělesy dobře pohlcováno a nemá proto pro sálavý přenos podstatný význam.

Podstata záření

Přenos energie při sdílení tepla zářením se uskutečňuje elektromagnetickým vlněním, které se šíří rychlostí světla. Světlo má *vlnově – částicovou povahu* (dualismus světla). Podle toho rozlišujeme dvě teorie chování světla:

- **Vlnová teorie.**

Za jistých okolností lze světlo popsat klasickou elektromagnetickou teorií (vlnovou/Maxwellovou), tedy šíření světla, lom světla, odraz, ohyb, apod. Světlo se řídí zákony vlnové optiky, má tedy charakter vlny a rychlost světla lze matematicky vyjádřit jako součin frekvence a vlnové délky.

$$c = f \cdot \lambda [m \cdot s^{-1}] \quad (1.24)$$

- **Kvantová (korpukulární) teorie.**

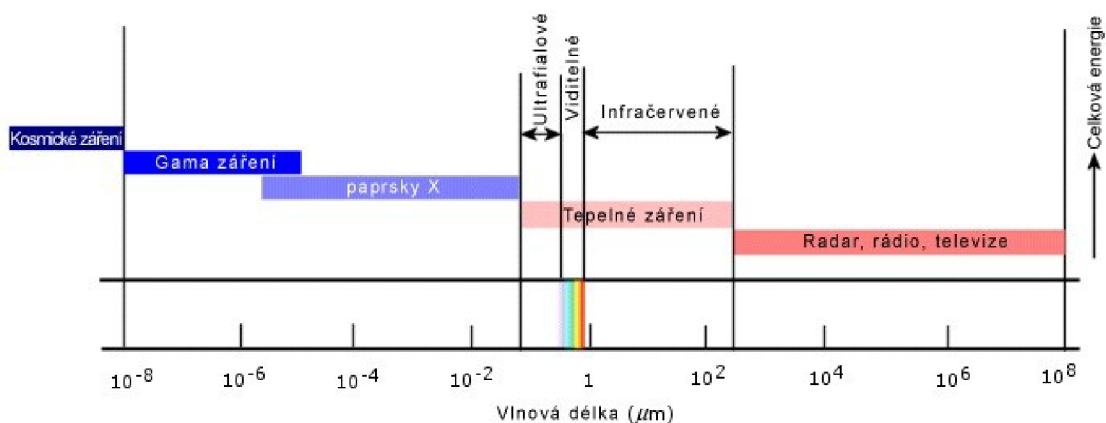
Jedná se o interakci světla s látkou. Světlo je elektromagnetické vlnění v rozmezí vlnových délek 390 až 760 nm. Tato teorie zavádí pojem energetického kvanta, které je atomy vyzařováno, nebo pohlcováno. Max Planck vyslovil předpoklad, že záření vydávané nebo pohlcované nemůže mít libovolnou energii, ale vždy je vyzařováno, nebo pohlcováno v určitých dávkách – kvantech [5].

Energie záření je úměrná frekvenci f a konstantě úměrnosti h [6].

$$Q = h \cdot f [J] \quad (1.25)$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} J \cdot s$)

Tyto kvanta se nazývají fotony. Fotony se chovají jako částice s hmotností: $m = \frac{h \cdot f}{c^2}$, hybností $\frac{h \cdot f}{c}$, jejich klidová hmotnost je nulová. Čím kratší vlnovou délku má elektromagnetická vlna, tím výraznější částicové (kvantové) chování u ní pozorujeme.



Obr. 7: Spektrum elektromagnetického záření [7]

Základní pojmy

Intenzita vyzařování E - zářivý (sálavý, radiační) **tok** P (W) vztažený na jednotku povrchu tělesa.

$$E = \frac{dP}{dS} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.26)$$

Směrová intenzita vyzařování I - představuje množství energie, vyzážené v určitém směru z elementární plochy dS do elementárního prostorového úhlu $d\omega$ za jednotku času. Je-li směr odkloněn od normály n k plošce dS o úhel φ , pak směrová intenzita vyzařování je dána rovnicí [5]:

$$I_\varphi = \frac{d^2 P_\varphi}{dS_1 \cdot d\omega} = \frac{dE_\varphi}{d\omega} [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}] \quad (1.27)$$

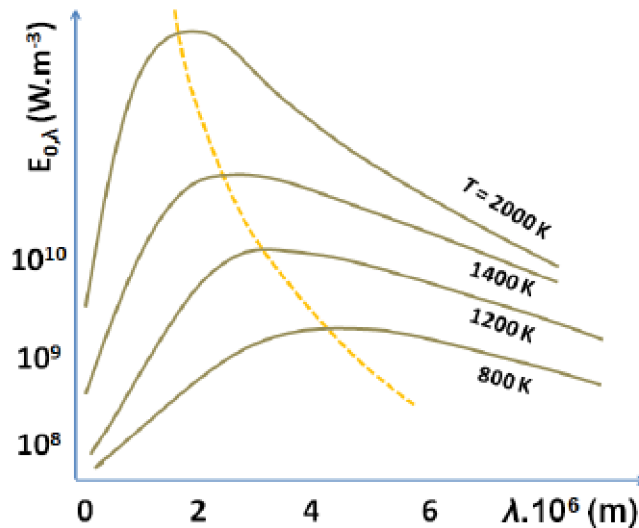
Plošná zářivost L - se vyjadřuje jako směrová intenzita vyzařování I , je ale vztažena k elementární plošce dS_s , která je průmětem dS na rovinu kolmou ke směru s [6]:

$$L_\varphi = \frac{d^2 P_\varphi}{dS_s \cdot d\omega} = \frac{d^2 P}{dS_1 \cdot \cos\varphi \cdot d\omega} = \frac{I_\varphi}{\cos\varphi} [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}] \quad (1.28)$$

Planckův zákon - intenzita vyzařování (spektrální) černého tělesa je závislá na vlnové délce a teplotě. Tento tvar Planckova zákona je nejvyužívanější.

$$E = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} [W \cdot m^{-3}] \quad (1.29)$$

kde: $c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} W \cdot m^{-2}$, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} m \cdot K$



Obr. 8: Grafické vyjádření Planckova zákona [5]

Wienův posunovací zákon - z Planckova zákona plyne, že pro každou teplotu T má funkce $E_{0,\lambda} = f(\lambda)_{T=konst}$ maximum. Na obrázku je znázorněn Planckův zákon, kde se s rostoucí teplotou maximum posouvá (žlutá křivka).

$$\left(\frac{E(0, \lambda)}{d\lambda} \right)_{T=konst} = \frac{d}{d\lambda} \cdot \left(\frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \right)_{T=konst} \quad (1.30)$$

Za podmínky, že derivace je rovna nule a po diferenciální úpravě lze vztah zapsat:

$$e^{-a} + \frac{a}{5} - 1 = 0 \quad (1.31)$$

kde $a = \frac{c_2}{\lambda_{max} \cdot T}$

Pro maximum na křivkách platí:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} [m \cdot K] \quad (1.32)$$

Dosazení tohoto vztahu do Planckova zákona dostaneme maximální závislost spektrální intenzity vyzařování:

$$E_{0,\lambda,max} = 1,286 \cdot 10^{-5} \cdot T^5 [W \cdot m^{-3}] \quad (1.33)$$

Stefan-Boltzmannův zákon - integrální intenzita vyzařování černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty [5].

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (1.34)$$

$$\text{kde: } \sigma = \frac{c_1 \cdot \pi^4}{c_2^4 \cdot 15} = \frac{3,7415 \cdot 10^{-16} \cdot \pi^4}{1,4388 \cdot 10^{-2} \cdot 15} = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$$

je Stefan-Boltzmannova konstanta

V praxi se používá upraveného výrazu:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (1.35)$$

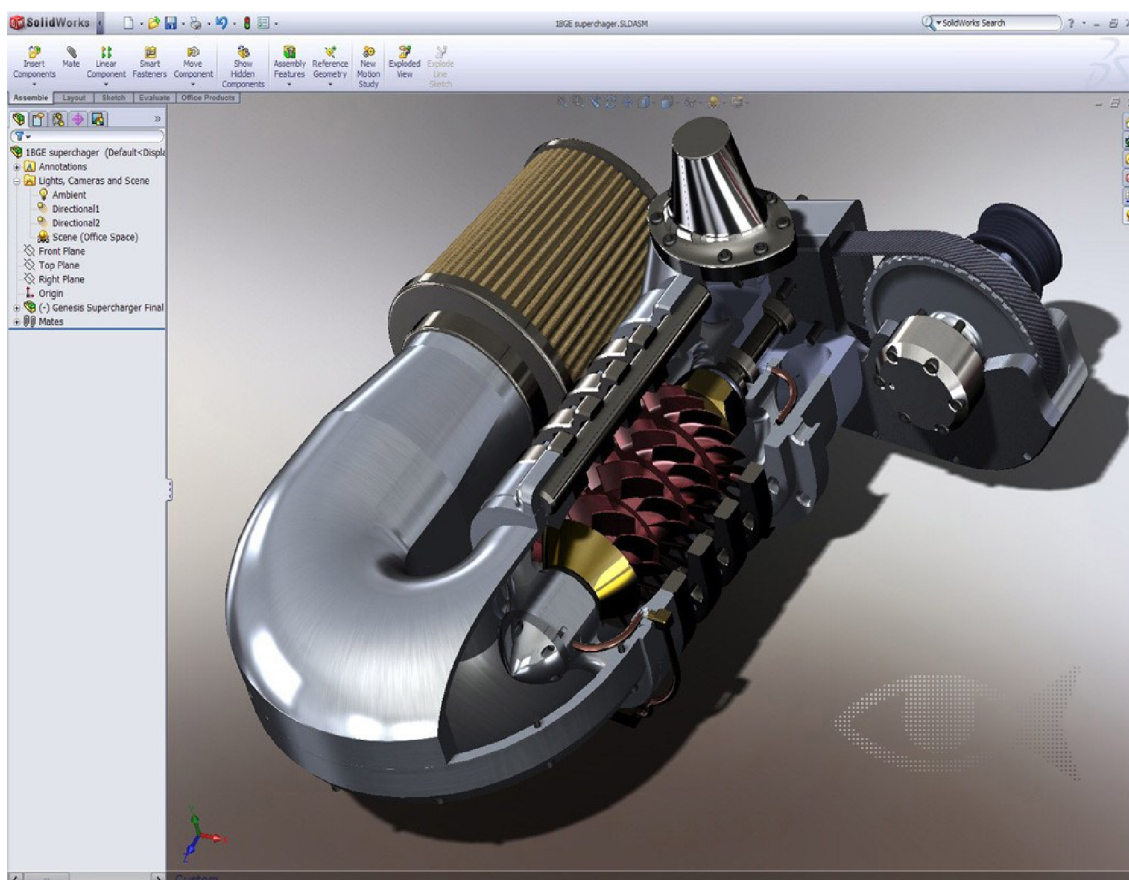
kde:

C_0 je součinitel vyzařování dokonale černého tělesa $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

1.4 SolidWorks

SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes SolidWorks je v současné době nejúspěšnější strojírenský 3D CAD systém na českém trhu.

Jako parametrický 3D modelář vám SolidWorks nabízí výkonné objemové i plošné modelování, vertikální nástroje pro plechové díly, svařence a formy, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

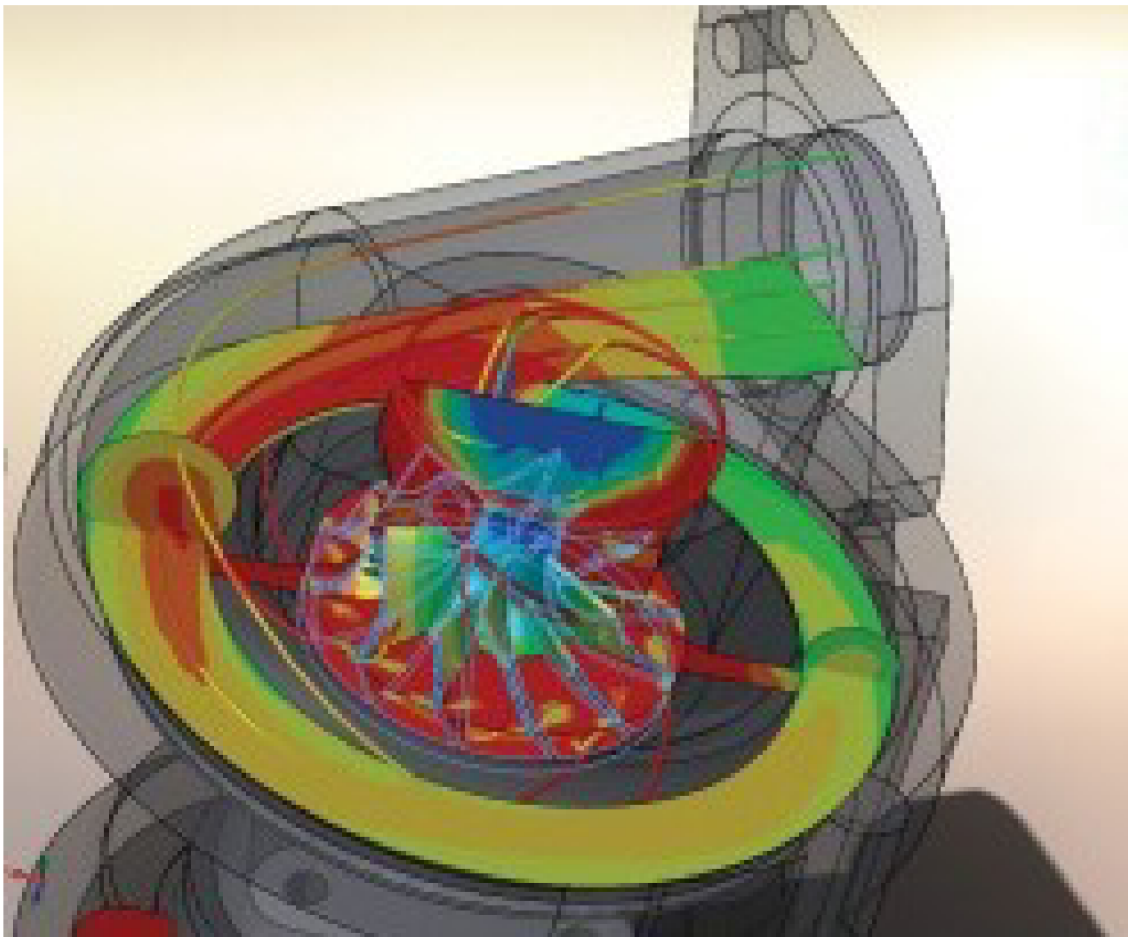


Obr. 9: Grafické prostředí SolidWorks [8]

SolidWorks je velmi intuitivní a nabízí pohotové pracovní postupy, rapidně snižuje nutné pohyby myši a umožňuje okamžitou, kontextově závislou interakci s uživatelem. Ovládání je založené na technologii SWIFT, která redukuje potřebu opakujících se úkonů, manuálních zásahů i takových operací, kde si ani zkušený uživatel není dopředu jist postupem a často sahá po metodě pokus omyl [8]. K základnímu softwaru lze dokoupit různé nastavbové moduly, pro simulace proudění je nejvhodnější modul Flow Simulation.

1.4.1 Flow Simulation

Pro komplexní simulace dynamiky tekutin a sdílení tepla (CFD – Computational Fluid Dynamics) je určen integrovaný nástroj SolidWorks Flow Simulation. Jeho praktické nasazení se týká nejrůznějších oblastí, jako je například proudění plynů ve vzduchotechnice, kapalin v potrubí, analýza chlazení uzavřených prostorů či exponovaných součástí nebo externí aerodynamika.



Obr. 10: Příklad proudění vzduchu ve Flow Simulation [8]

Hlavní funkce Flow Simulation:

- analýza sdílení tepla - vedením, prouděním a zářením,
- analýza vnitřního a vnějšího proudění,
- analýza rotačních oblastí (ventilátory, čerpadla,...),
- analýza přechodových dějů, tj. časově proměnné děje.

Další funkce Flow Simulation

- analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles (například obtékání vzduchu nad křídlem letadla nebo proudění vody kolem ponorky),
- analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-epsilon pro výpočet turbulentního proudění (například proudění plynů z motorové trysky letadla),
- simulace skutečného plynu pro přesné řešení aplikací plynu o vysokém tlaku nebo nízké teplotě,
- analýza stlačitelného proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech,
- výpočet poklesu tlaku v trubkách se započtením vlivu nerovnosti povrchu,
- optimalizace návrhu pomocí proudění na základě parametrů simulace proudění a rozměrových parametrů,
- analýza proudění neneutronovských kapalin (krev, zubní pasta a roztavený plast),
- analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu.

Dobrym pomocnikem v nastaveni zakladnich parametrů je průvodce Wizard. V tabulce jsou uvedeny parametry, které lze nastavit. [9]

Tab. 3: Počáteční nastavení Flow Simulation

Počáteční nastavení			Mezní podmínky	
Počáteční parametry	Počáteční teplota	Počáteční parametry sítě	Pro přívod a vývod	Pro přívod
Teplota			Objem tělesa	Teplota
			Objemový tok	
			Rychlost	Složení
Tlak			Machovo číslo	
Rychlost toku			Statický tlak	Parametry turbulence
Složení tekutiny	Celkový tlak			
		Tlak stěny		

Základní fyzikální zákony popisující proudění jsou zákony zachování hmotnosti, hybnosti, energie. Ty jsou vyjádřeny Navierovými Stokesovými rovnicemi spolu s rovnicí kontinuity.

Pro rovnici kontinuity pro středovanou hodnotu platí:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1.36)$$

Navier-Stokesovy rovnice změny hybnosti se udává jako:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} + F_i \quad (1.37)$$

kde: $\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j}$ jsou setrvačné síly,

$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}$ tlaková síla (normálové napětí),

$(\mu + \mu_i) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}$ třecí (viskózní) síla (tečné napětí),

F_i ostatní síly (odstředivá, elektromagnetická)

Rovnice energie pro stlačitelné kapaliny udává tato rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{E}) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j f_j + \frac{\partial(\tau_{jl} \bar{u}_j)}{\partial x_l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (1.38)$$

Kde $E = U + \frac{1}{2} \bar{u}_j^2$

$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$

Pro stlačitelné medium se definuje hustota pro ideální plyn takto:

$$\rho = \frac{p_{op} + \bar{p}}{rT} \quad (1.39)$$

Okrajové a počáteční podmínky

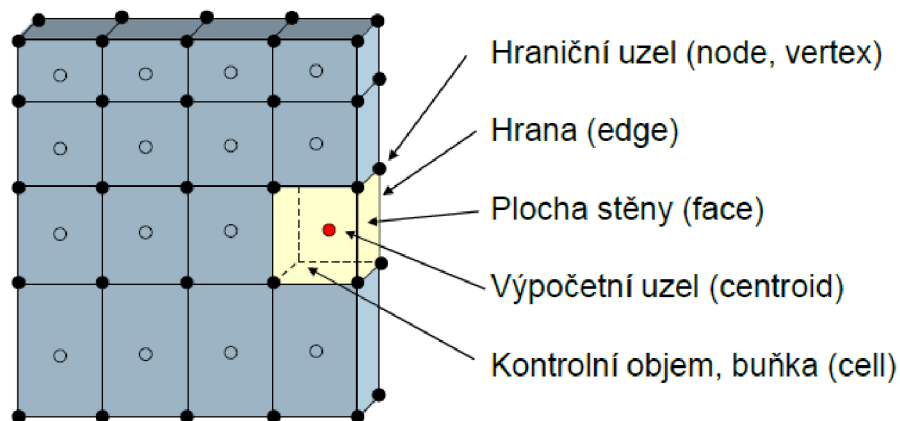
Je nastaven tlak prostředí (environment pressure) se základním nastavením tlaku a teploty na vstupu a výstupu. V základním nastavení je také zohledněna pravděpodobnost výskytu turbulentního proudění. Simulace využívá modelu I-L (Intensity, Length).

1.4.2 Metoda konečných objemů (MKO)

Metoda konečných objemů (Finite Volume Method) pracuje na principu rozdělení řešené oblasti na konečný počet malých kontrolních objemů pomocí sítě (grid, mesh). K tomu využívá základní rovnice (kontinuity, pohybové, energie, transportní, ...), které popisují spojité prostředí, ty jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic. Kontrolní objemy se nepřekrývají. Hodnoty složek rychlosti a skalárních veličin jsou v geometrických středech kontrolních objemů, hodnoty na hranicích objemu se získávají interpolací. Tato metoda je využívána u 80 % řešitelů. V současné době se začíná prosazovat v řešení proudění také metoda konečných prvků. [10]

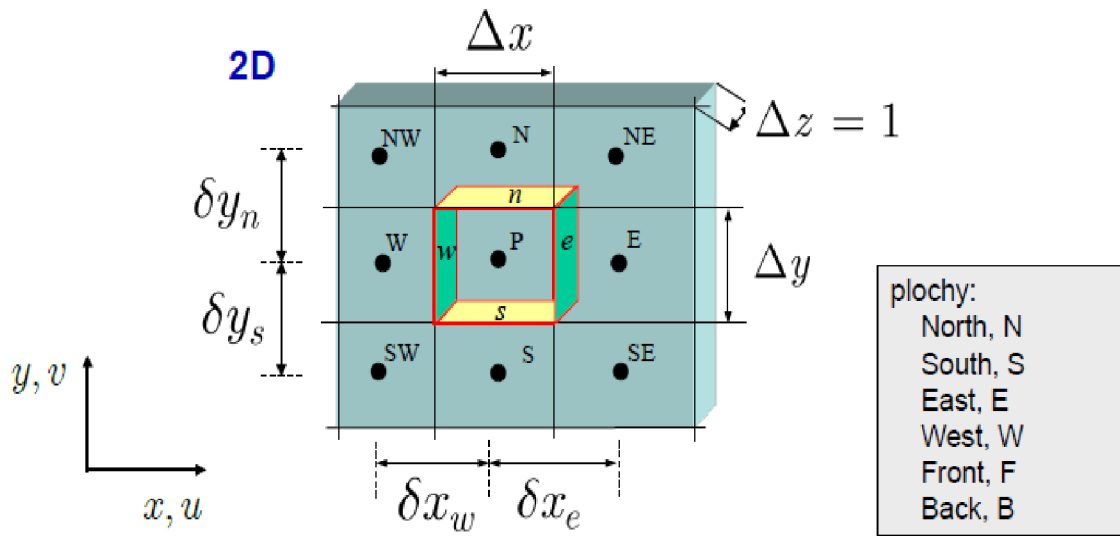
MKO spočívá stručně řečeno ve třech základních bodech:

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic.



Obr. 11: Výpočetní síť [10]

Tok přes hranice kontrolního objemu je integrálním součtem přes čtyři (2D) nebo šest (3D) ploch kontrolního objemu.



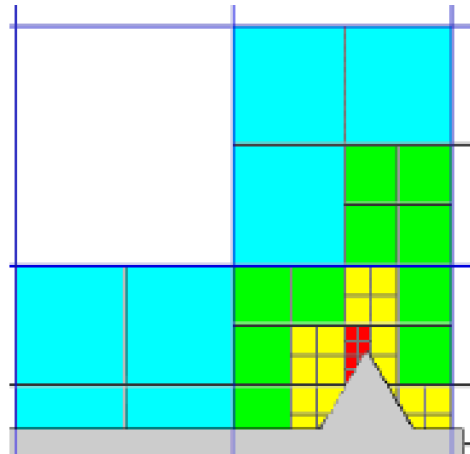
Obr. 12: Výpočetní síť- kontrolní objem

Tvorba sítě

Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třidimenzionálním prostoru. Samotný matematický model je pouze pasivním nástrojem dokud se neaplikuje na konkrétní problém (výpočtová oblast pokryta sítí). Pokud se hovoří o matematických modelech, které jsou založeny na numerickém řešení systému parciálních diferenciálních rovnic a vyžadují takto i zadání okrajových podmínek, lze konstatovat, že možnosti realizování úlohy jsou silně limitovány výkonem počítačové techniky. Platí zde několik zásad:

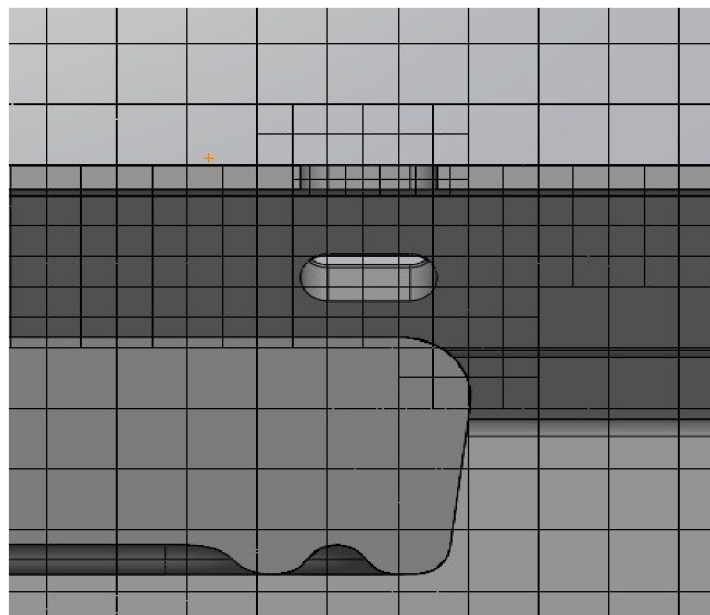
- výpočet je o to náročnější (pomalejší), čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto (podle náročnosti a komplexnosti modelu),
- výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buněk,
- výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti.

V zájmu přesnosti matematické simulace je nutné provést tomu odpovídající nastavení matematického modelu. Do různých modelovaných fyzikálních jevů mohou svým vlivem zasahovat mnohé jevy další. Toto všechno je třeba v nastavení zohlednit. Ovšem každým dalším vlivem vstupujícím do výpočtu přibývají také další rovnice, které matematický model musí řešit. Proto se mohou časy výpočtů při stejně definovaných výpočtových oblastí a sítí značně lišit. [9]



Obr. 13: Obecná výpočetní síť

Obrázek popisuje automaticky vymodelovanou síť. Tam kde je struktura stejná se používá jednoduchá výpočtová síť, tam kde je složitější struktura je síť jemnější. Každé zjemnění se provádí rozdělením krychle na osm menších částí. Maximálně lze základní krychli rozdělit sedmkrát.



Obr. 14: Vymodelovaná síť v blízkosti zářičů

2 PŘETAVOVACÍ PEC

2.1 Dima SMRO 0180

Analýza byla provedena na přetavovací peci DIMA SMRO 0180. Jedná se o malou, laboratorní pec. Pec obsahuje dvě zóny. První zóna slouží k předehřevu, v druhé zóně dochází k pájení přetavením DPS. Předehřev představují tři keramické infrazářiče, každý o výkonu 250 W. Zóna pájení obsahuje také tři infrazářiče, každý o výkonu 200 W, působící shora. Druhá zóna obsahuje navíc nepřímý odporový ohřev. Pohyb DPS je tvořen z levé strany přes zóny pásovým dopravníkem z tenkých pružin. Chlazení je realizováno ventilátorem na konci pece. Přetavovací pec obsahuje navíc ventilátor nad infrazářiči, za hliníkovým plechem. Rychlost dopravníku lze regulovat. Maximální teploty a další technické parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

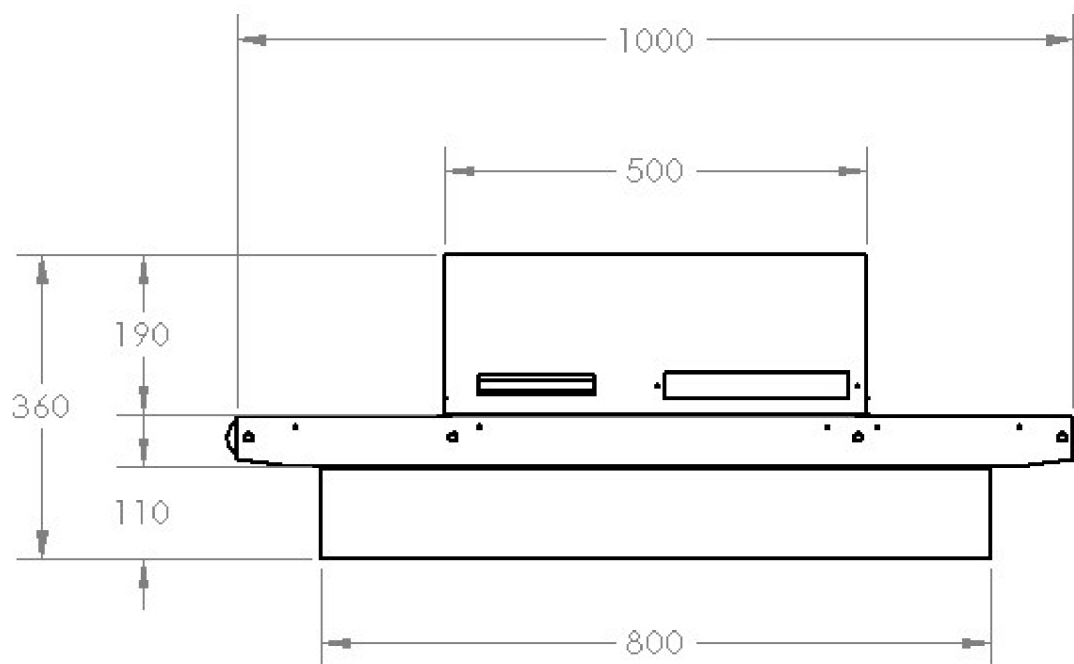


Obr. 15: Přetavovací pec DIMA Smro 0180 (3D model vpravo)

Tab. 4: Technické parametry přetavovací pece DIMA SMRO 0180

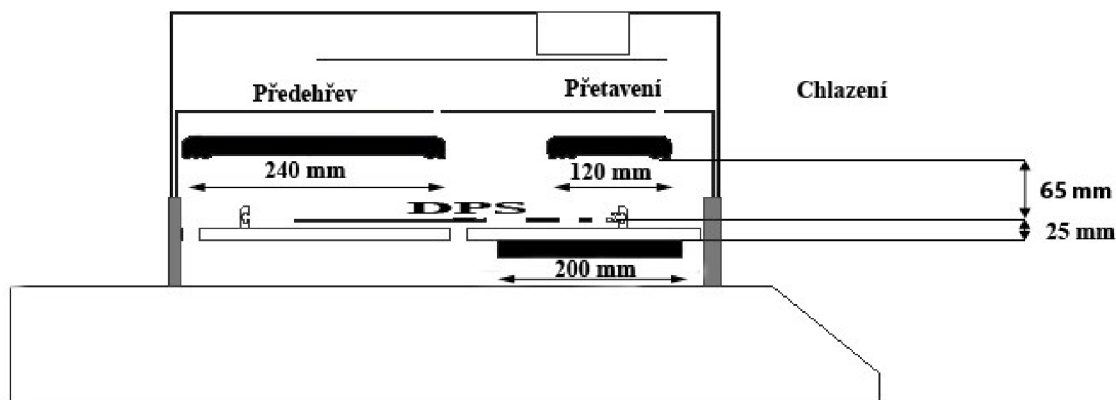
Technické parametry	
Rozměry:	1000 mm x 300 mm x 360 mm (délka x šířka x výška)
Hmotnost:	27 kg
Topné zóny:	zóna předehřevu – horní infračervený ohřev, max. teplota 300 °C
	zóna pájení – spodní odporový ohřev, max. teplota 300 °C
	zóna pájení – horní infračervený ohřev, max. teplota 400 °C
Rozměry desky:	max. 220 mm x 150 mm, max. 25 mm výška
Chladicí zóna:	Ventilátor
Rychlost dopravníku:	1-85 mm s ⁻¹

Přetavovací pec je složena ze tří základních částí. První z nich je horní část pece, kde dochází k předehřevu a následně k přetavení. Druhou částí jsou nosníky, na kterém jsou připevněny rolery a ocelová deska k pohybu DPS. Třetí část obsahuje tři displeje pro nastavení teplot na zářičích a ventilátor pro ochlazení DPS. Na obrázku vidíme, že proces pájení probíhá v 50 cm části pece.



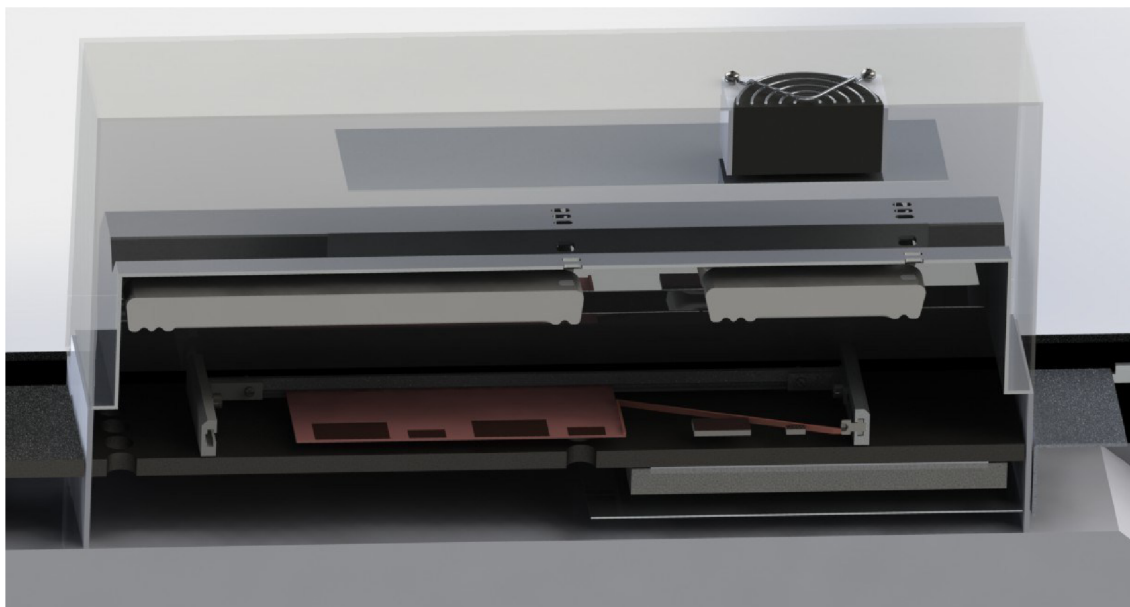
Obr. 16: Rozměry přetavovací pece DIMA SMRO

Tento obrázek popisuje rozložení zářičů v peci a jejich vzdálenost od DPS. Vzdálenost od IR zářičů by měla být taková, aby nedošlo k poškození DPS. Odporový zářič šíří energii přes otvory v desce dopravníku uprostřed a na začátku přetavovací pece.



Obr. 17: Rozměry zářičů a vzdálenost od DPS

Každý zářič má jiné rozměry. Levý, horní IR zářič je 240 mm dlouhý, pravý IR zářič je poloviční 120 mm a velikost třetího odporového zářiče je 200 mm. DPS je uprostřed pece. Vzdálenost horních zářičů od DPS je 65 mm. Od spodního zářiče je to jen 25 mm. Nad IR zářiči je několik otvorů, které jsou důležité ke vzniku proudění vzduchu. Na pravé straně obr. 18 je umístěn ventilátor, pod ním je malá hliníková deska o tloušťce 1 mm, která má za úkol rozvést vzduch do stran.



Obr. 18: Průřez pece

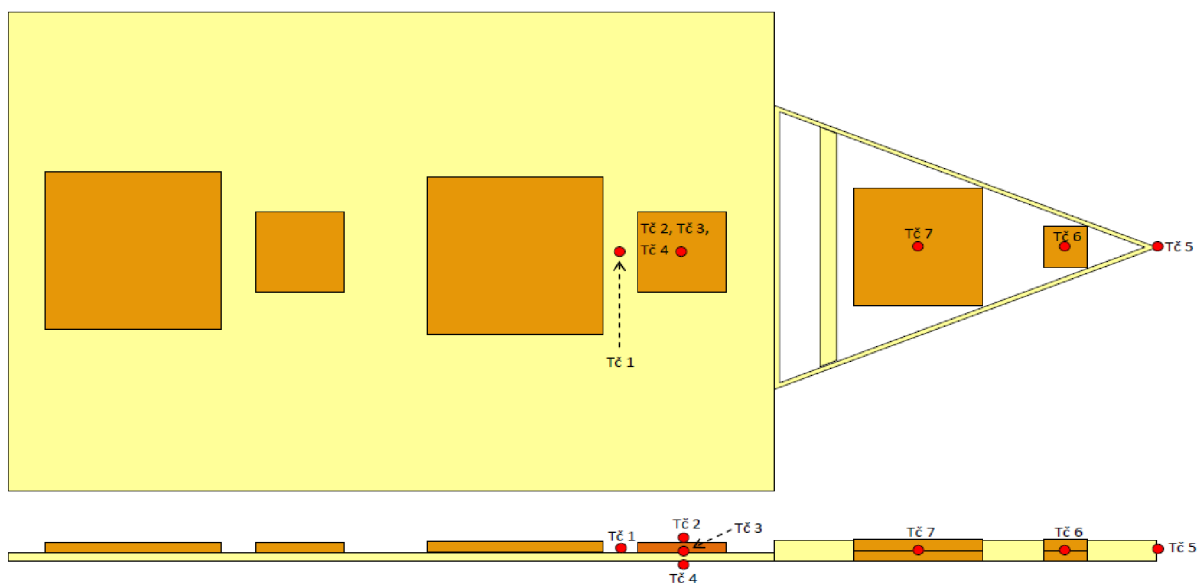
2.2 Testovací DPS

K měření teplot bylo použito DPS vyrobené za účelem simulace SMD pouzder z předchozí práce viz. úvod s termočlánky typu K. Jejich vlastnosti najdeme v teoretické části. Termočlánky jsou připojeny k profiloměru se softwarem Slim KIC 2000. K zařízení je možno připojit až 9 termočlánků. Jako základní materiál je použit FR4 o tloušťce 1,5 mm. Na něm je měděná fólie o tloušťce 35 μm . Testovací deska obsahuje 7 termočlánků rozmístěných na obrázku níže.

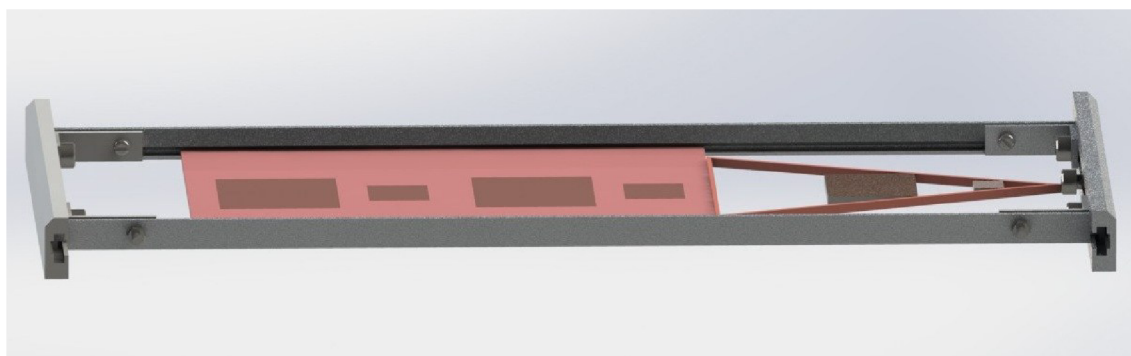
Termočlánky jsou na DPS umístěny v následujícím pořadí od levé strany. Tč. 1, Tč. 2, Tč. 3, Tč. 4, Tč. 7, Tč. 6, Tč. 5. Jejich funkce je následující:

- Tč. 1 snímá teplotu levého IR zářiče,
- Tč. 2, 3, 4 jsou nad sebou a jsou umístěny za levým IR zářičem, mezi nimi je 1,5 mm tlustá vrstva FR4 a leží nad otvory desky dopravníku,
- Tč. 7. leží mezi IR zářiči kde očekáváme nejvyšší změny teplot způsobené ventilátorem,
- Tč. 6 snímá teplotu pravého IR zářiče a odporového zářiče (zóna přetavení),
- Tč. 5 snímá teplotu na konci pravého IR zářiče. Neleží však mezi FR4, ale je na něm pouze malá vrstva epoxidového lepidla. Navíc leží v blízkosti rámečku, na který působí nepřímý spodní zářič.

Celá DPS je uložena v hliníkovém rámečku. Ten byl opatřen bílým nátěrem z důvodu menší vodivosti a větší odrazivosti záření z IR zářičů tak, aby neovlivňoval změřené hodnoty na termočláncích. Před každým měřením se kladl důraz na to, aby byla pec před vložením DPS důkladně prohřátá. Tomu odpovídala doba pájení 600 s. Dále je volen maximální čas DPS v peci $t = 650$ s. To hlavně kvůli tomu, že nanesená vrstva pryskyřičného lepidla na některých termočláncích postupem času osychá. Tím by mohla vzniknout vyšší nepřesnost měření. Při kratší době DPS v peci se FR4 nestačí dostatečně prohřát. Toho je možné si všimnout na obr. 21, 22.



Obr. 19: Umístění termočlánků na testovací desce



Obr. 20: Model DPS s rámečkem

2.3 Naměřené hodnoty

V tab.: 5 jsou uvedeny aritmetické průměry teplot s jejich střední kvadratickou chybou změřené na profiloměru Slim KIC 2000. Jednotlivé výsledky měření jsou uvedeny v seznamu příloh.

Tab. 5: Aritmetický průměr se střední kvadratickou chybou

Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
	[°C]						
100, 100, 100 [°C]	71,80 ± 0,90	73,55 ± 0,94	73,20 ± 1,88	73,10 ± 0,90	68,30 ± 0,80	74,83 ± 2,07	68,95 ± 0,61
150, 150, 150 [°C]	102,98 ± 0,71	103,55 ± 0,58	103,58 ± 0,66	103,10 ± 0,68	98,25 ± 1,86	104,75 ± 3,90	100,53 ± 3,17
200, 200, 200 [°C]	136,25 ± 1,63	135,88 ± 1,27	135,80 ± 1,35	134,85 ± 1,45	131,58 ± 2,31	139,73 ± 4,90	136,5 ± 4,86
250, 250, 250 [°C]	172,78 ± 0,39	169,33 ± 0,54	168,73 ± 0,71	167,08 ± 0,84	168,15 ± 2,65	188,08 ± 2,45	165,93 ± 0,53

Aritmetický průměr pro 100 °C a pro termočlánek Tč.1 činní:

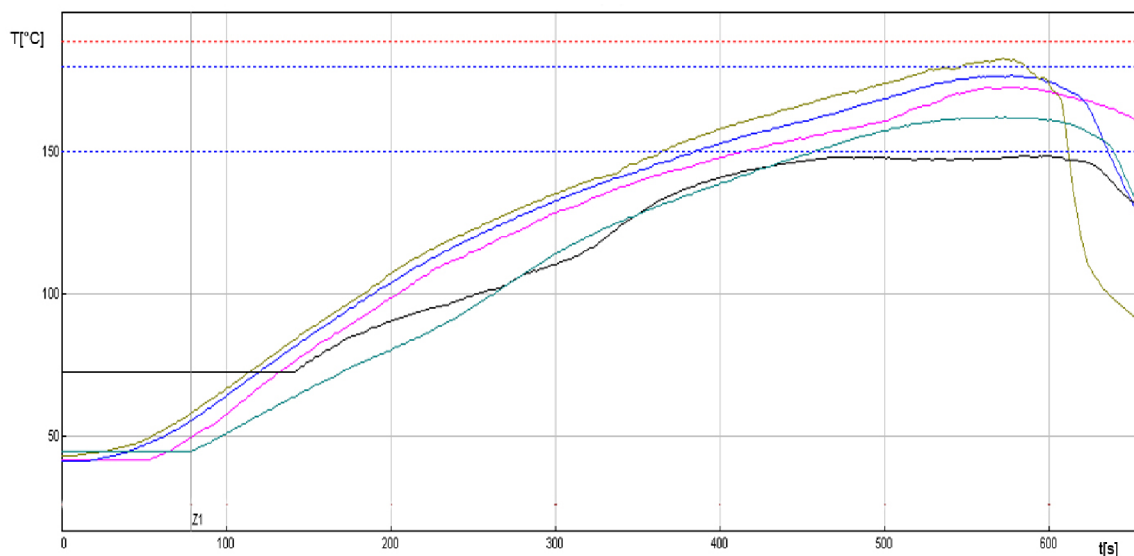
$$\bar{T} = \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n T_i = \frac{72,1 + 74,2 + 70,1 + 70,8}{4} = 71,8 \text{ °C} \quad (2.1)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru pro 100 °C se vypočítá:

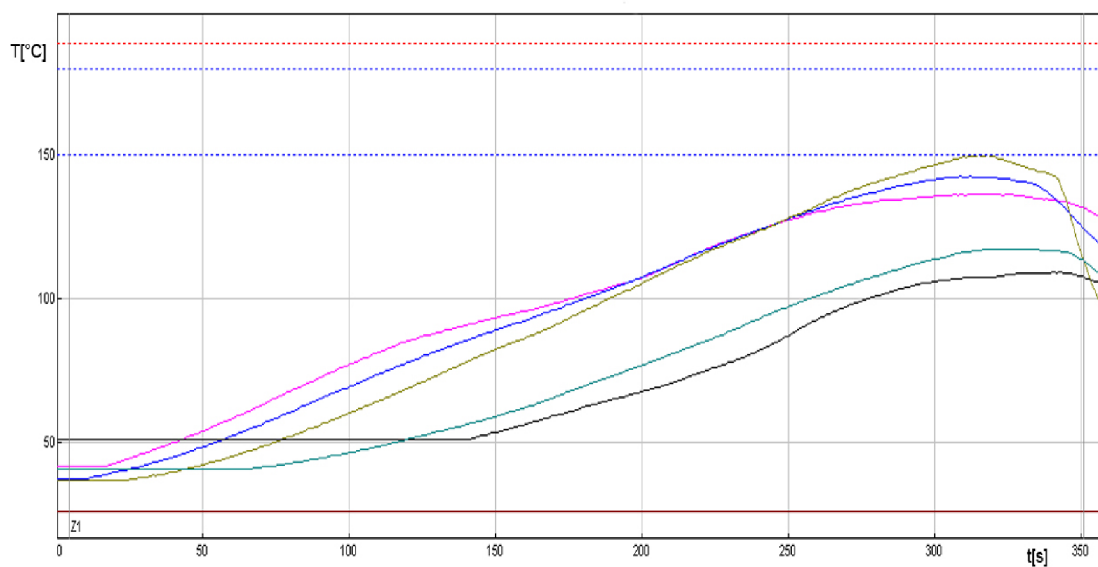
$$\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}} \quad (2.2)$$

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{(72,1 - 71,80)^2 + (74,20 - 71,80)^2 + (70,12 - 71,80)^2 + (70,80 - 71,80)^2}{4(4-1)}} \\ \sigma_o = 0,90 \text{ °C}$$

U těchto dvou grafů jsou nastaveny stejné teploty zářičů při zapnutém dopravníku a to 250 °C na každém z nich. Jediná změna je v čase, který DPS stráví uvnitř pece. Obr. 21 je pro čas 650 s, jeho maximum v přetavovací části je 174 °C. Na obr. 22 je stejný případ, ovšem pouze pro čas 350 s. Maximum je pouze v teplotě 150° C.



Obr. 21: Průběh teploty v čase $t = 650$ s



Obr. 22: Průběh teploty v čase $t = 350$ s

3 TEPLOTNÍ ANALÝZA

3.1 Simulace

Pomocí programu Solidworks byl vytvořen trojrozměrný model pece a DPS s rámečkem. DPS je umístěna v peci stejným způsobem jako při měření. Byla zvolena interní analýza (Analysis type-internal). Výpočet probíhá v uzavřeném prostoru s nastavenými vstupy a výstupy. V případě pece se jedná o záslepky. Omezením je nezahrnutí ventilátoru do výpočtu, jelikož ten leží na pravé straně, ve venkovní části pece. Pro každé objemové těleso se nastavil vhodný materiál, okrajové podmínky, teploty zářičů a oblast výpočtu.



Obr. 23: Render Dima SMRO 0180

Vstupní podmínky (Boundary Conditions)

Základní vstupní podmínky se zadávají především na vstup a výstup, tedy na záslepky z vnitřní strany. Na stěnách je nastaven tlak okolí (101325 Pa) a teplota okolí (20,05°C). Ostatní hodnoty zůstanou v základním nastavení.

Přiřazení materiálu (Solid materials)

Všechny materiály jsou vybírány z knihovny Flow Simulation. Jako základní materiál je použita ocel (steel mild) o tepelné vodivosti $51,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Ocel je přiřazena všem objemovým tělesům. Změna konkrétních materiálu lze provést později. Přiřazení materiálů pro pájecí pec DIMA SMRO 0180 je v následující tabulce:

Tab. 6: Materiály použité v simulaci

Materiál	Přiřazený materiál	Měrné teplo	Tepelná vodivost
		$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
FR4	FR4	880	0.3
Rámeček DPS	Hliník	1000	230
Zářiče IR	Korund	850	30
Zářič odporový	Železo	574	55
Reflektor	Hliník	921	160
Měďá vrstva	Měď	416.7	379
Deska dopravníku	Nerezová ocel	550	19.8

Oblast výpočtů (Computational domain)

Pokud je objemové těleso plně uzavřeno, program automaticky nastaví základní oblast výpočtů. Čím větší tato oblast je, tím delší bude doba výpočtu. Pokud se jedná o symetrické těleso, je možná počítat pouze část modelu.

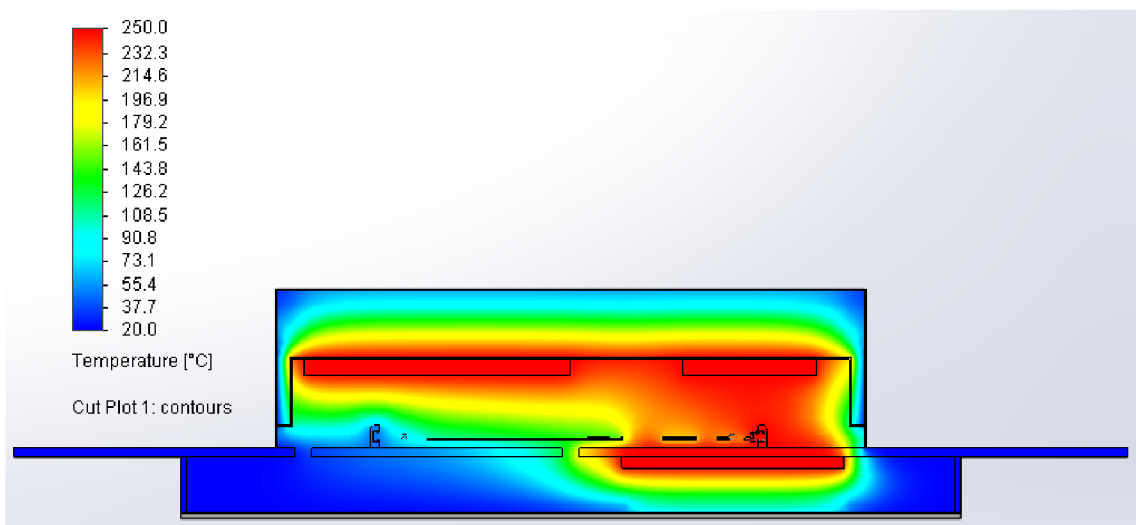
Nastavení zářičů a dalších vlastností

V další části se přiřadí zářičům druh sdílení tepla a požadovaná teplota. V případě radiace se nastaví také oblast reflektoru. Tedy plochy, která má za úkol v co nejvyšší míře odrážet vlnové působení zpět do prostoru. Také je třeba zahrnout působení ventilátoru. Všechny tyto oblasti budou podrobněji popsány v následující kapitole.

Často stačí orientační rozložení teplot, někdy je třeba zohlednit co nejvíce vlivů, aby výsledky byly uspokojivé. Následující kapitola popisuje vývoj od jednoduchého modelu ke složitějšímu.

Simulace byla provedena za těchto zjednodušených podmínek:

- zářiče jsou připevněny v bezprostřední blízkosti jiných materiálů,
- působení ventilátoru není zahrnuto,
- tvar zářičů není zohledněn,
- IR zářiče představují jeden zdroj záření,
- obecně zjednodušený tvar přetavovací pece,
- sdílení tepla radiací není zahrnuto.

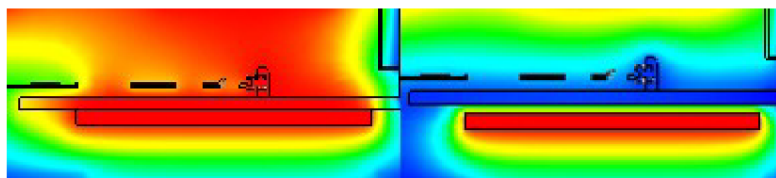


Obr. 24: Zjednodušená teplotní simulace přetavovací pece

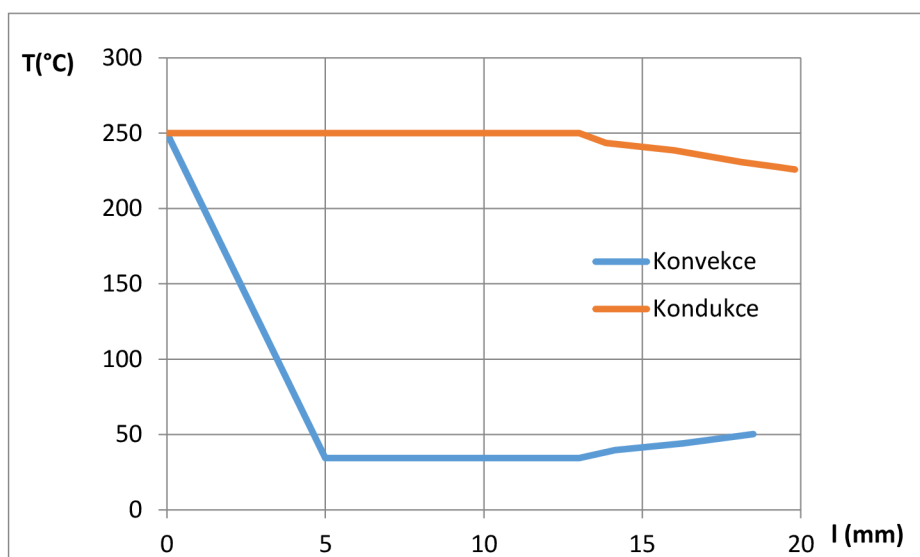
Zářič v bezprostřední blízkosti jiného tělesa

Vzniká jiný typ sdílení tepla (kondukcí) než ve skutečnosti (konvekce). To znamená, že přenos tepla mezi IR zářiči a plechem je menší. Tento leštěný plech představuje reflektor. To znamená, že se jeho vlastnosti blíží bílému tělesu (odráží veškeré záření). V tomto případě je zářič příliš blízko a teplo prostupuje skrze leštěný plech. Mezi odporovým zářičem a deskou dopravníku probíhá sdílení tepla kondukcí, avšak mezi těmito materiály je vložen nevodivý materiál.

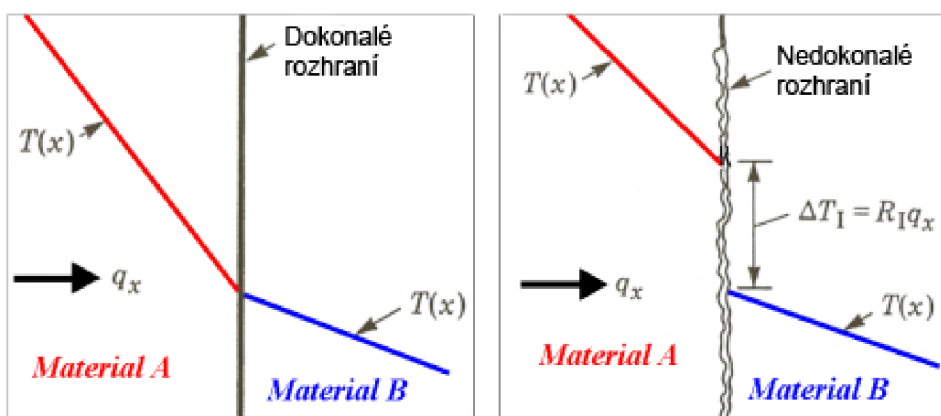
Příklad odlišných typů sdílení tepla je zobrazen na následujících obrázcích. První obrázek představuje sdílení tepla kondukcí. Veškerá energie zářiče je předána desce dopravníku, ta pak působí na DPS. V druhém případě je odsazení zářiče od desky dopravníku 5 mm. Zjemněním sítě by byl přestup tepla mezi vzduchem a deskou vyšší.



Obr. 25: Rozdíl mezi kondukcí a konvekcí



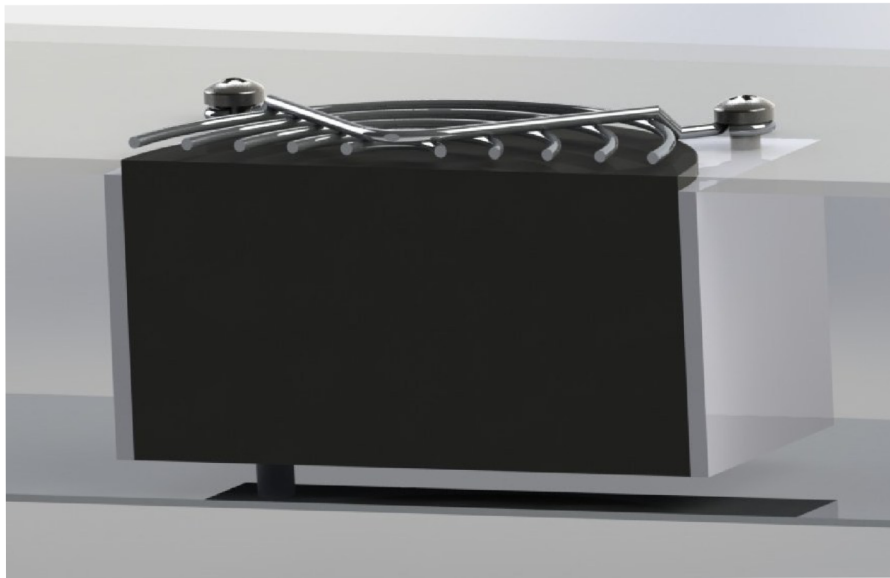
Obr. 26: Změna teploty směrem k DPS



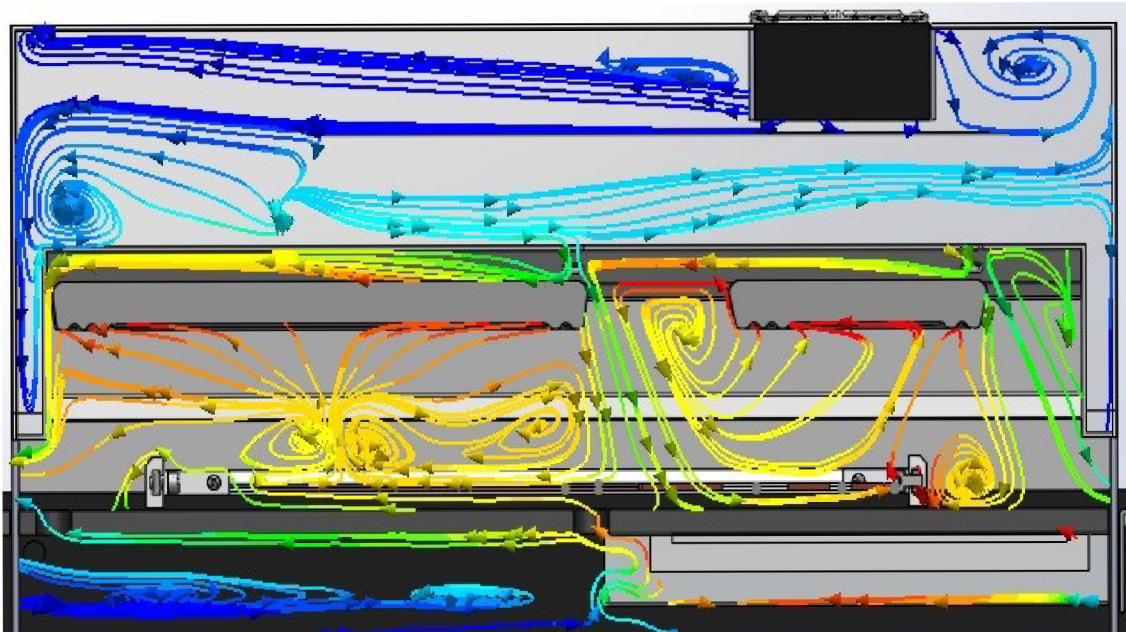
Obr. 27: Dokonale a nedokonale přilnutý materiál

Působení ventilátoru

Ventilátor rozvádí přivedený vzduch shora pece do stran, přičemž se do oblasti pájení přivádí dvěma řadami otvorů v reflektoru. Jedná se o ventilátor CROUZET, model 70546297, 220/24 VAC 50/60 Hz, 0,06 A. První řada otvorů se nachází mezi IR zářiči, druhá řada je za IR zářičem v zóně přetavení. Ventilátor se ve skutečnosti nemodeluje. Vytvoří se pouze objemové těleso s rozměrem shodným s rozměrem ventilátoru. V knihovně lze nalézt desítky typů ventilátorů s jejich charakteristickými vlastnostmi. Pokud žádný ventilátor není vhodný, je možné namodelovat vlastní PQ křivku.



Obr. 28: Detail ventilátoru

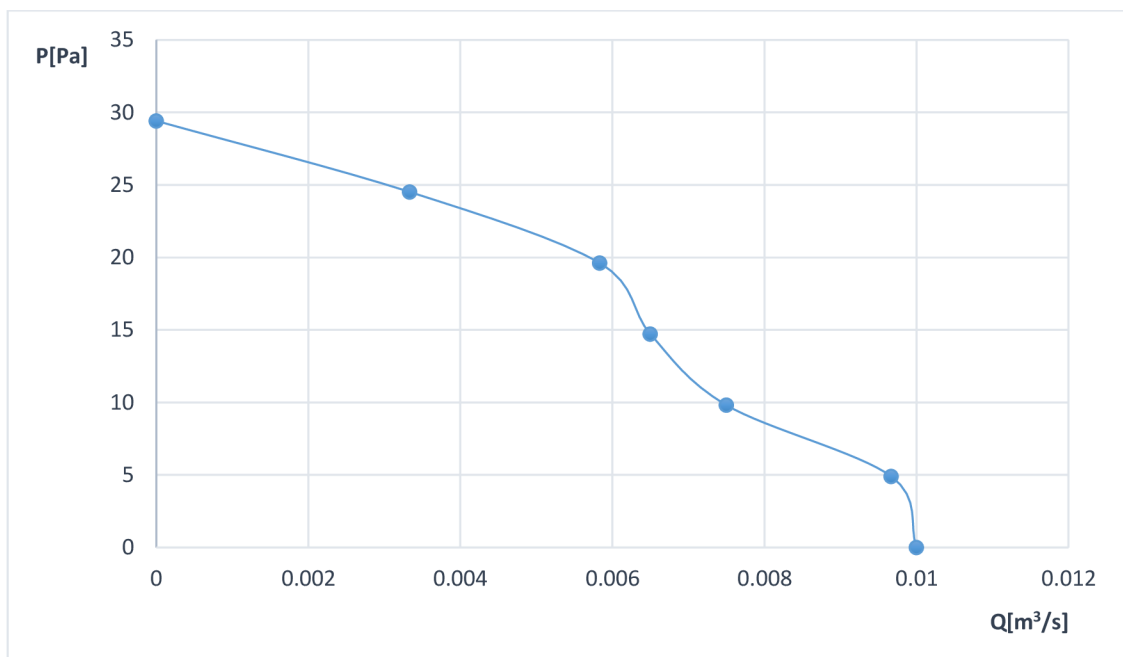


Obr. 29: Proudění vzduchu pájecí peči

Průtok vzduchu Q - hodnota množství vzduchu, který je přesunut rotorem ventilátoru za určitou časovou jednotku. Používané jednotky l/s, m^3/h , CFM (kubické stopy).

Statický tlak P - je síla proudu vzduchu přeneseného ventilátorem v uzavřeném prostoru. Používané jednotky inch H_2O (Palce vody), mm H_2O (mm vody).

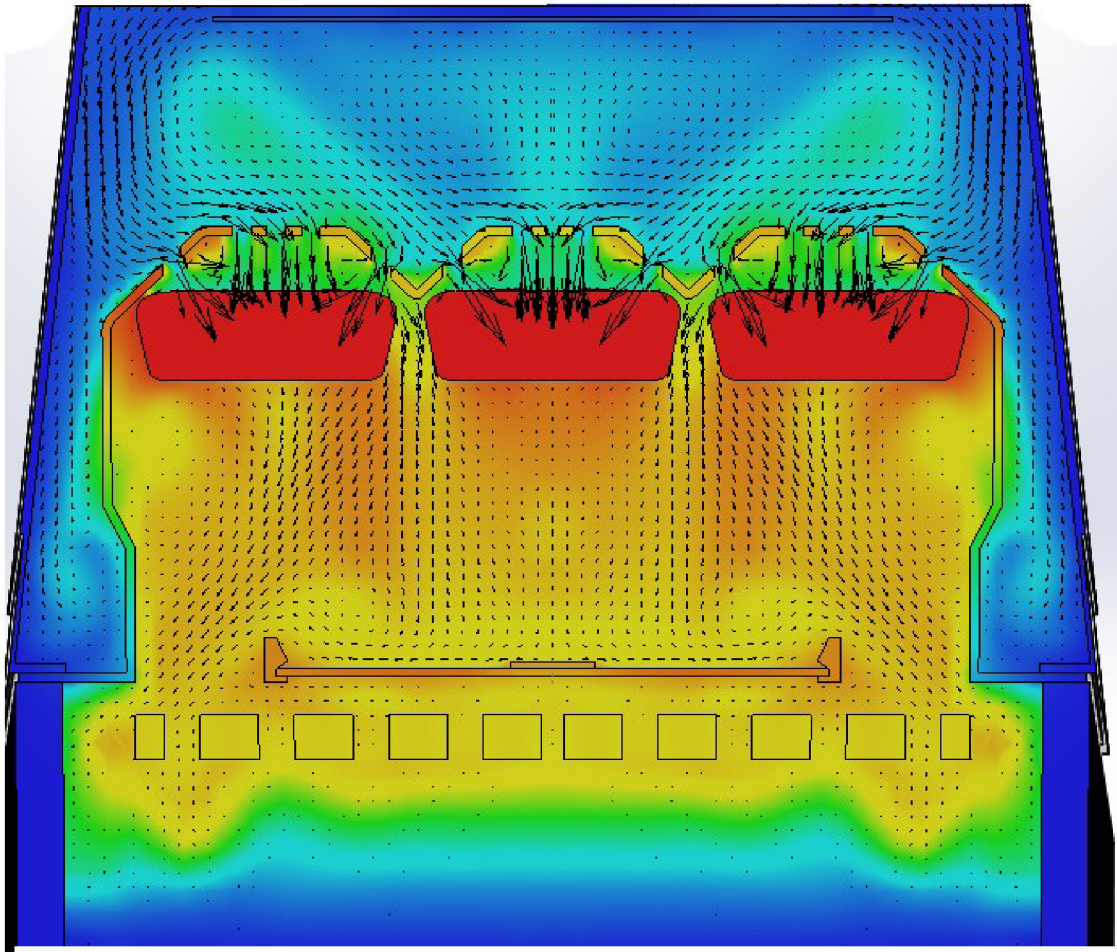
Podobný model, jako je CROUZET nebyl nalezen. Níže je uvedena PQ křivka pro náš případ. Výrobce ventilátoru uvádí pouze závislost mm. H_2O na mm^2/min . Proto je třeba převést hodnoty na Pa na m^3s^{-1} .



Obr. 30: PQ křivka ventilátoru po přepočtu

IR zářiče představují jeden zdroj záření

Základní funkcí ventilátoru je pomoci lopatek přivádět vzduch do pece a tím docílit vyššího proudění. V základní simulaci bylo uvažováno s jedním prostorovým tělesem (zářič), avšak všechny vzduch obtékal kolem stěn pece. Rozdělením zářiče lze získat přesnější teploty na termočláncích.



Obr. 31: Proudění vzduchu podél zářičů

Tvar zářičů není zohledněn

Přetavovací pec DIMA disponuje dvěma typy IR zářičů od firmy Elstein. HTS/1 je použit v zóně přehřevu, HTS/2 v zóně přetavení. Tyto zářiče patří mezi středně-vlnné s vlnovou délkou 1,5 – 3 μm . Zářiče jsou vymodelovány podle dostupné technické dokumentace. Upravený tvar zářiče umožňuje dosahovat lepších výsledků.



Obr. 32: Rozložení zářičů v peci

3.2 Sdílení tepla radiací

Doposud nebyla zohledněna radiace. Jedná se o poslední nevyřešenou podmínku stanovenou na začátku této kapitoly. I když existuje literatura, která vyvrací možnosti použití radiace u teplot nižších než je 800 °C. *Záření se rozhodujícím způsobem podílí na vnějším sdílení v tepelných zářeních s teplotou nad 800 °C [7]*, uvádí literatura Sdílení tepla a proudění viz. literatura. Po konzultaci ve firmě SolidVision se dospělo k závěru, že se radiace uplatňuje i při nižších teplotách než je 800 °C. V tabulkách uvedených níže jsou uvedeny výsledky naměřených teplot pomocí profiloměru a hodnot vypočtených pomocí modulu Flow Simulation a jejich srovnání v podobě absolutních a relativních chyb. Následující stránky obsahují grafické znázornění rozložení teplot v přetavovací peci.

Tab. 7: Výsledné teploty na termočláncích (Flow Simulation)

Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
	[°C]						
100, 100, 100 [°C]	70,00	68,70	68,50	68,40	74,50	69,11	66,10
150, 150, 150 [°C]	106,30	105,30	104,80	104,23	104,50	104,55	99,90
200, 200, 200 [°C]	146,40	141,40	140,20	139,10	143,00	143,60	139,00
250, 250, 250 [°C]	183,00	176,60	174,90	174,50	175,00	189,00	181,00

Tab. 8: Průměrná změřená teplota na termočláncích

Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
	[°C]						
100, 100, 100 [°C]	71,80	73,55	73,20	73,10	68,30	74,83	67,95
150, 150, 150 [°C]	102,98	103,55	103,58	103,10	98,25	104,75	100,53
200, 200, 200 [°C]	136,25	135,88	135,80	134,85	131,58	139,73	136,50
250, 250, 250 [°C]	172,78	169,33	168,73	167,08	168,15	188,08	165,93

Tab. 9: Absolutní chyby měření

Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
	[°C]						
100, 100, 100 [°C]	1,80	4,85	4,70	4,70	6,20	5,72	1,85
150, 150, 150 [°C]	3,32	1,75	1,22	1,13	6,25	0,20	0,63
200, 200, 200 [°C]	10,15	5,53	4,40	4,25	11,43	3,88	2,50
250, 250, 250 [°C]	10,23	7,28	6,18	7,43	6,85	0,93	15,08

Tab. 10: Relativní chyby měření

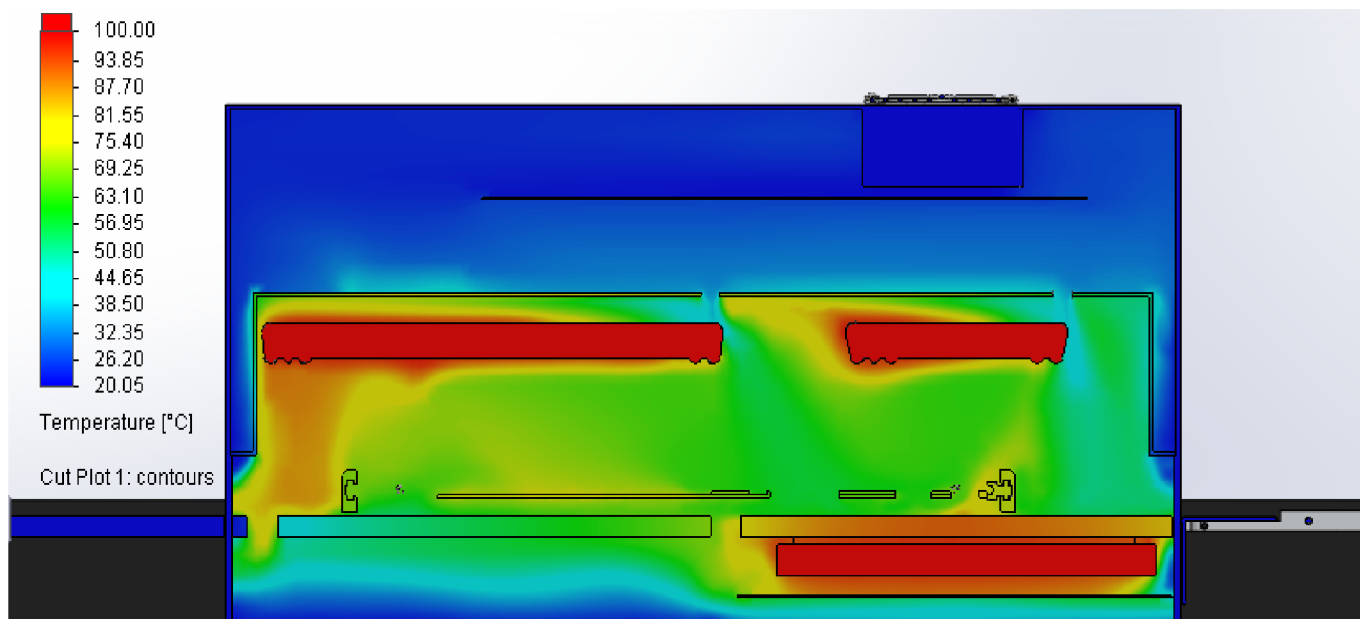
Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Tč1	Tč2	Tč3	Tč4	Tč5	Tč6	Tč7
	[-]						
100, 100, 100 [°C]	2,51	6,59	6,42	6,43	9,08	7,64	2,72
150, 150, 150 [°C]	3,23	1,69	1,18	1,10	6,36	0,19	0,62
200, 200, 200 [°C]	7,45	4,07	3,24	3,15	8,68	2,77	1,83
250, 250, 250 [°C]	5,92	4,30	3,66	4,44	4,07	0,49	9,09

Absolutní chyba pro Tč.1 při 100 °C:

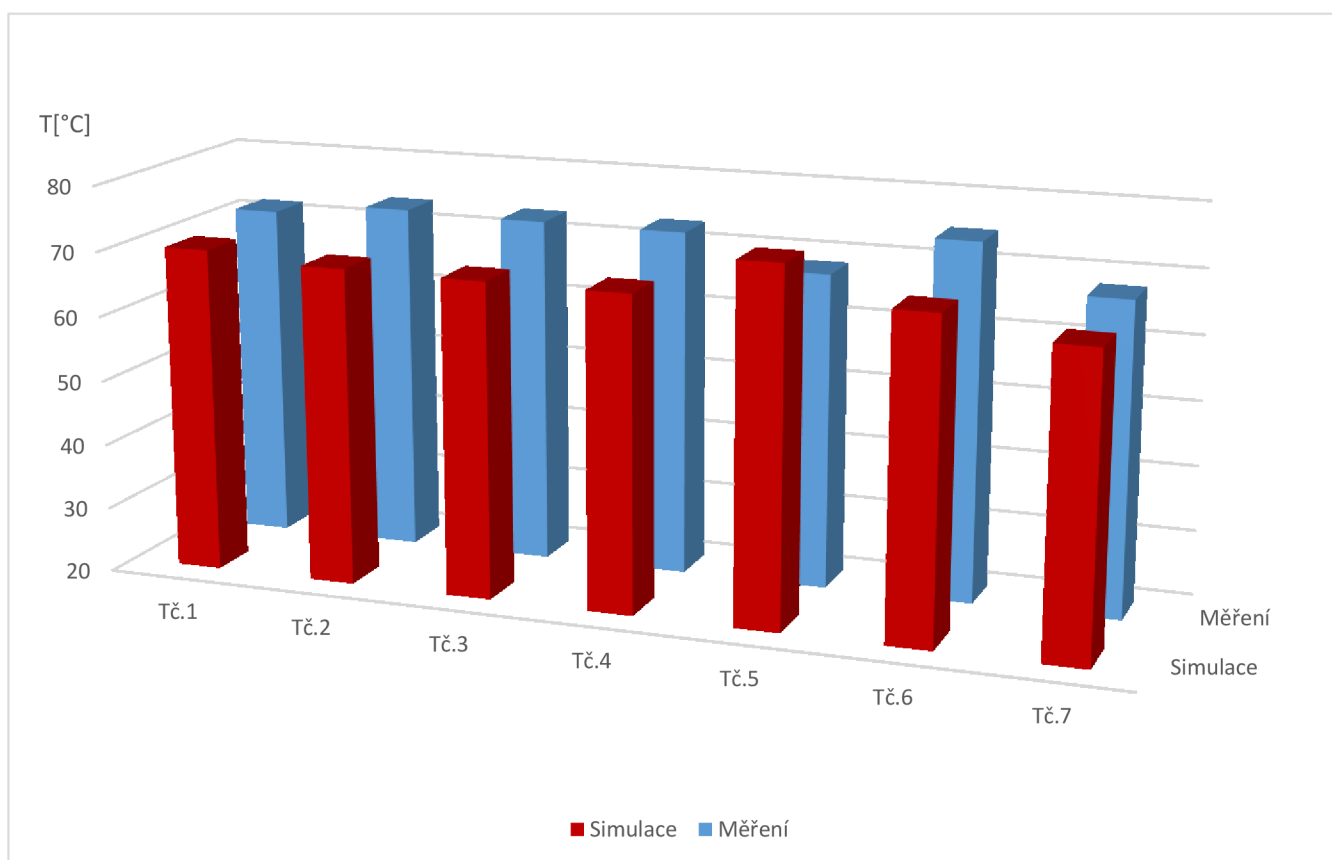
$$|\Delta T|_{100^{\circ}\text{C}} = T_{\text{měření}} - T_{\text{simulace}} = 71,80 - 70 = 1,80^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

Relativní chyba:

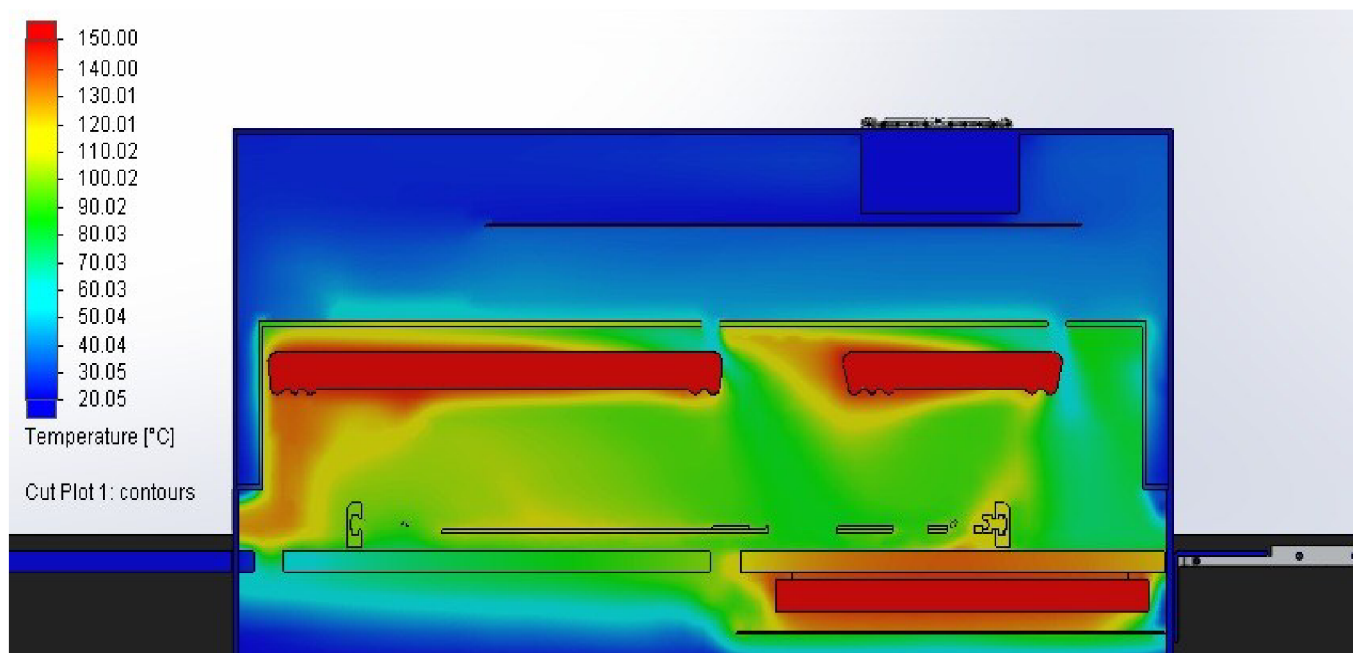
$$\delta_{250^{\circ}\text{C}} = \frac{|\Delta T|_{100^{\circ}\text{C}}}{T_{\text{měření}}} \cdot 100 = \frac{1,8}{71,80} \cdot 100 = 2,51\% \quad (3.2)$$



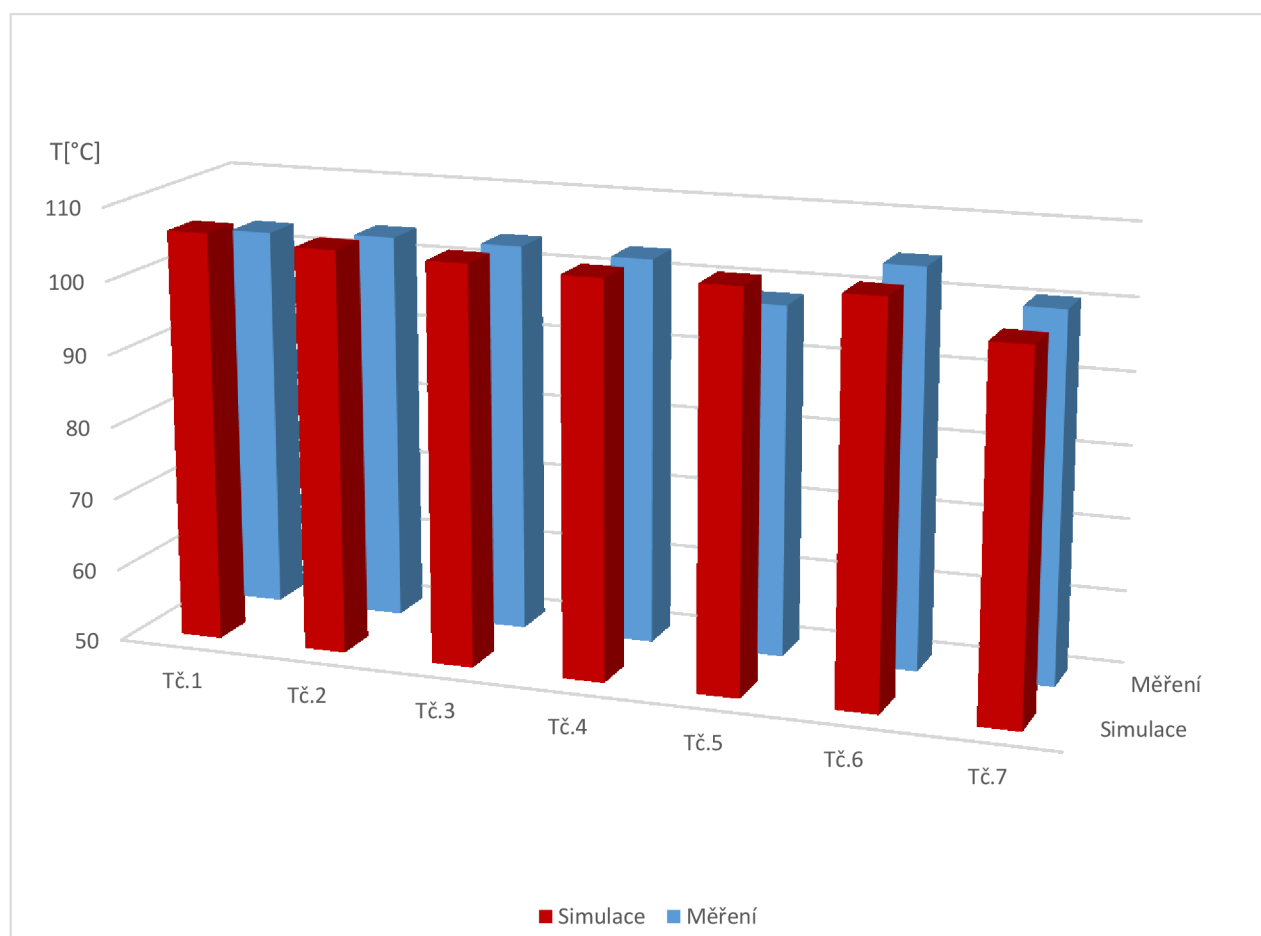
Obr. 33: Rozložení teplot pro 100 °C



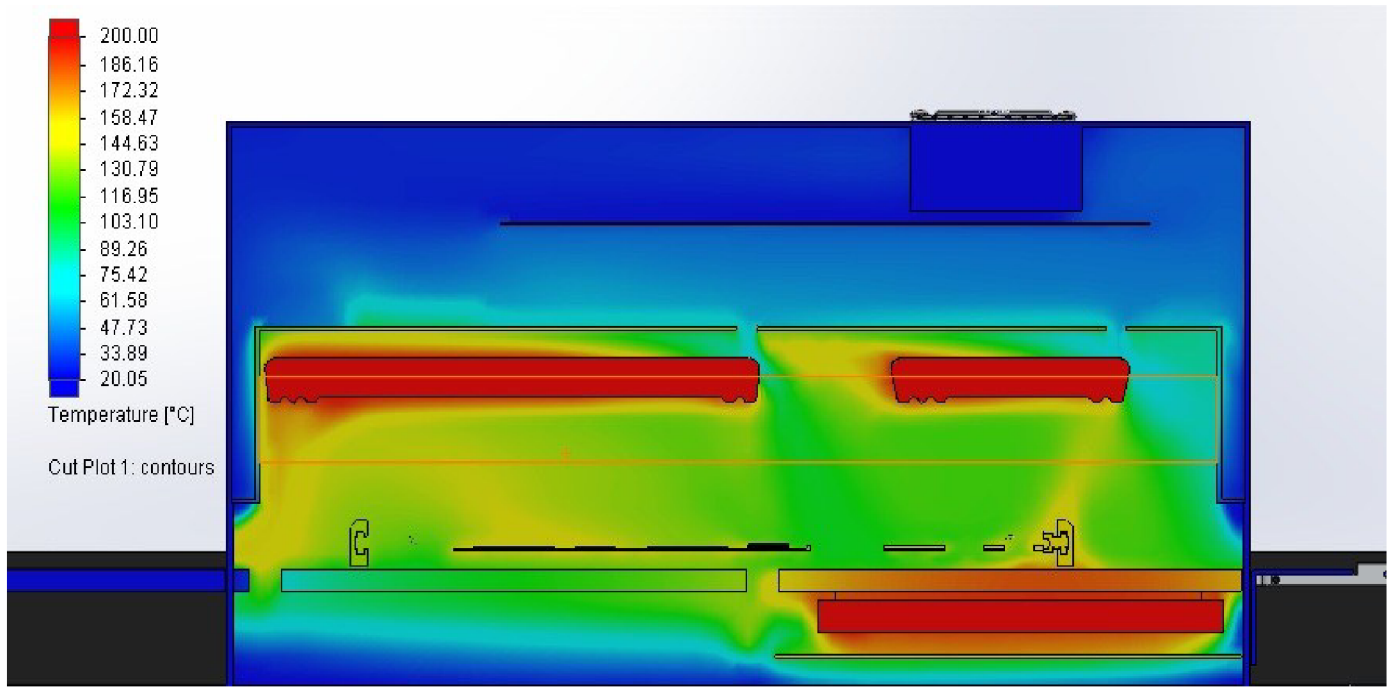
Obr. 34: Srovnání měření a simulace pro 100 °C



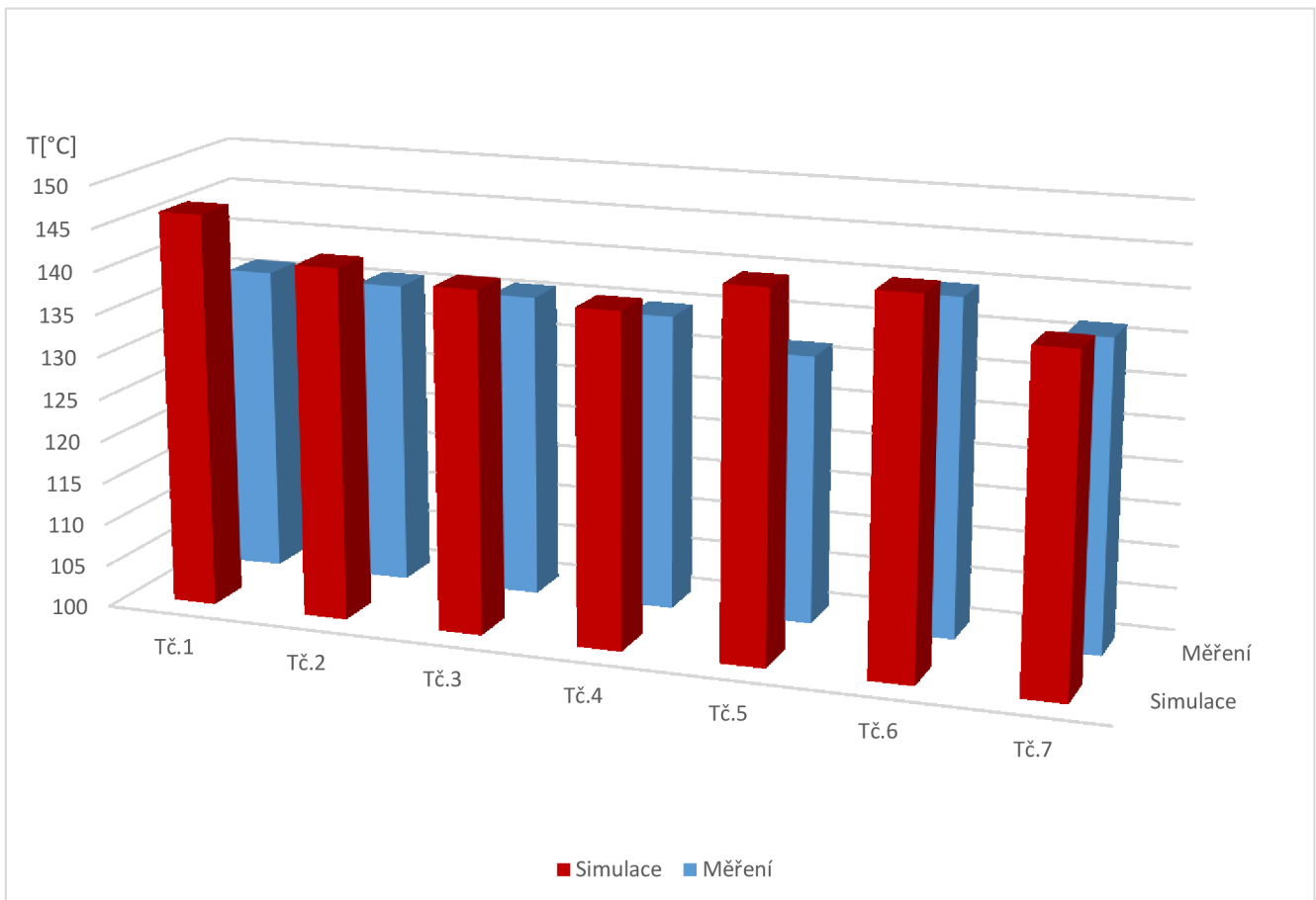
Obr. 35: Rozložení teplot pro 150 °C



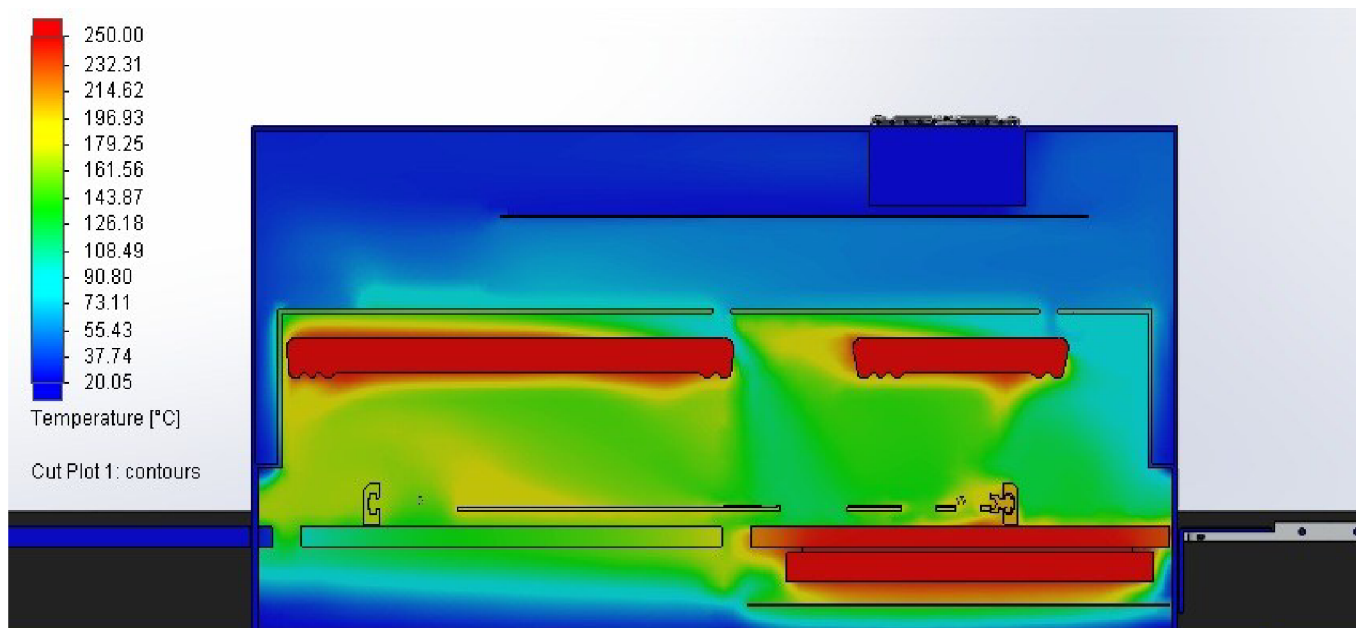
Obr. 36: Srovnání měření a simulace pro 150 °C



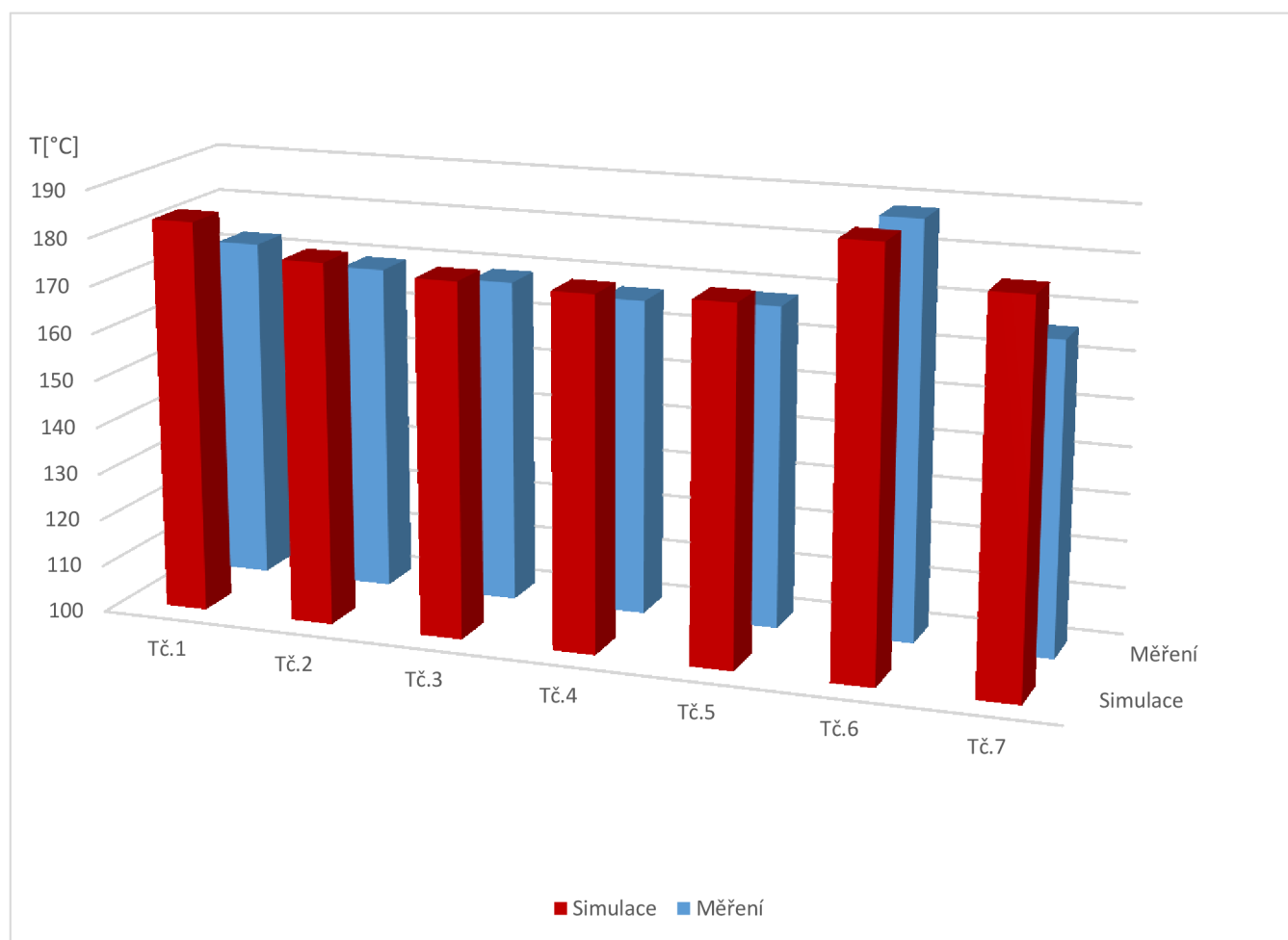
Obr. 37: Rozložení teplot pro 200 °C



Obr. 38: Srovnání měření a simulace pro 200 °C



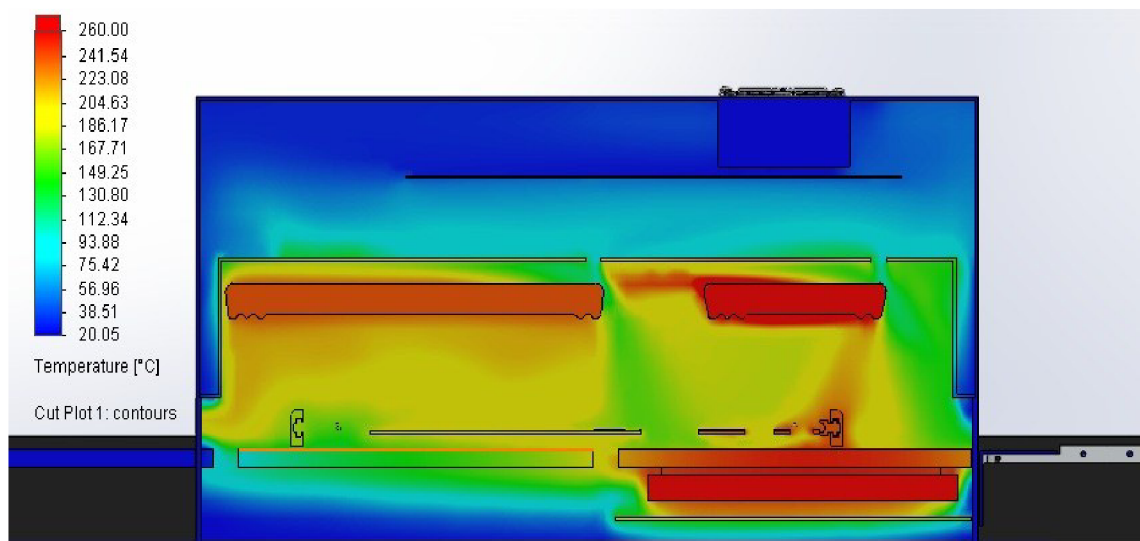
Obr. 39: Rozložení teplot pro 250 °C



Obr. 40: Srovnání měření a simulace pro 250 °C

3.3 Teplotní profil

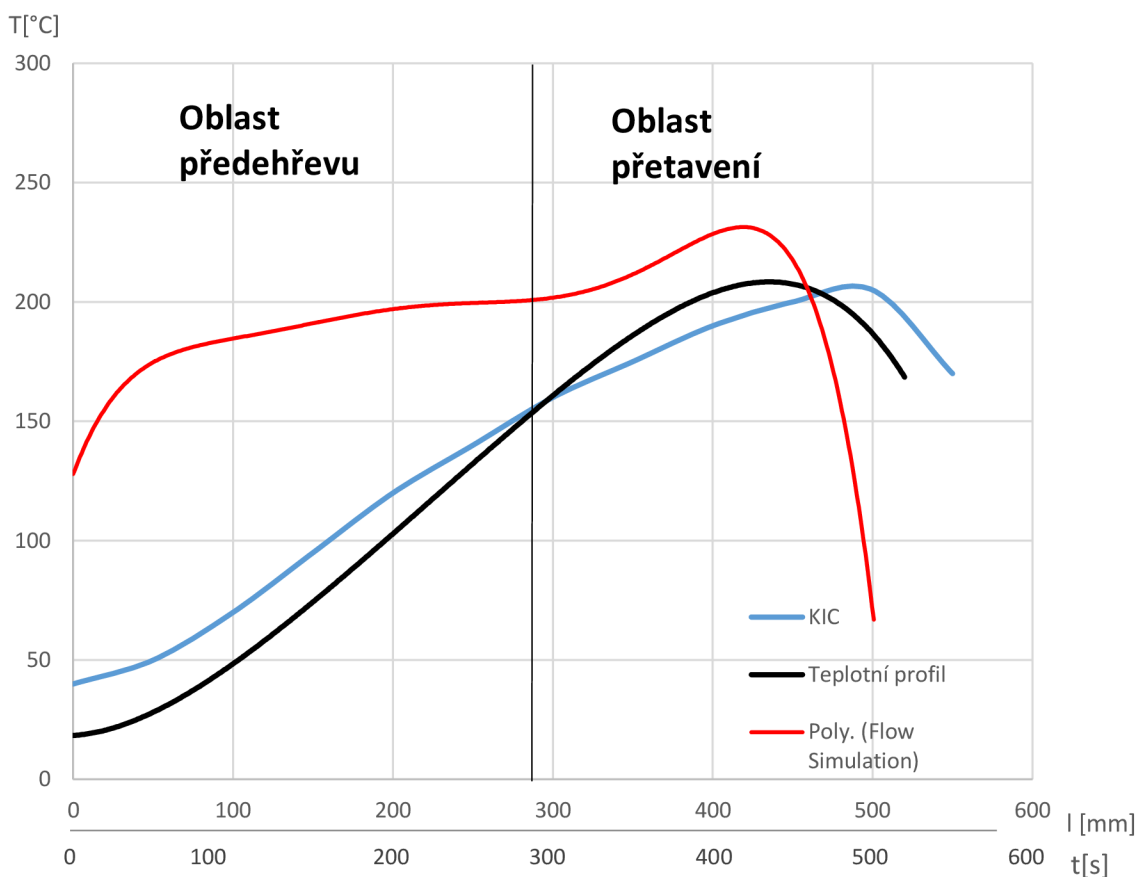
Dle technické dokumentace jsou nastaveny hodnoty teplotního profilu. Teploty jsou nastavovány následovně: zóna předehřevu 260 °C, zóna přetavení – IR zářič 360 °C, zóna přetavení – odporový zářič 240 °C. Většina moderních pecí disponuje sudým počtem zářičů tak, aby se v peci vytvořilo homogenní prostředí.



Obr. 41: Rozložení teploty pro 260, 240, 360 °C

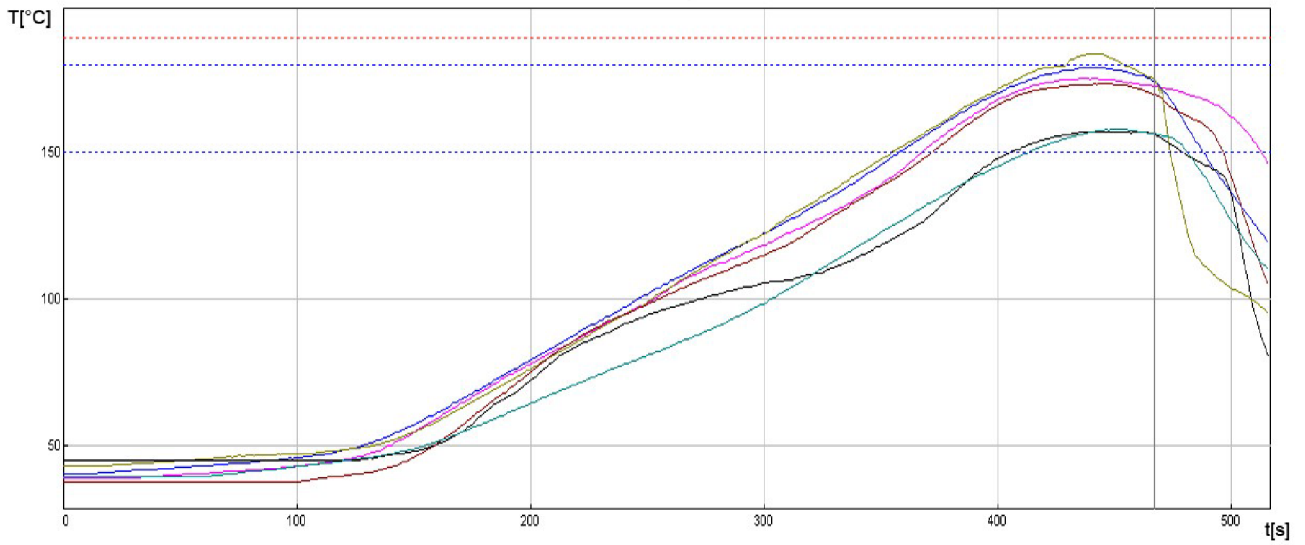
Srovnání teplotních profilů:

- naměřený profil pomocí profiloměru Slim KIC 2000 (modře). Jedná se funkci $T=f(t)$,
- profil z technické dokumentace přetavovací pece DIMA SMRO 0180. (černě). Jedná se o závislost $T=f(t)$,
- teplotní profil vytvořen pomocí funkce xy plot v programu SolidWorks, Flow Simulation (červeně). Závislost $T=f(l)$.

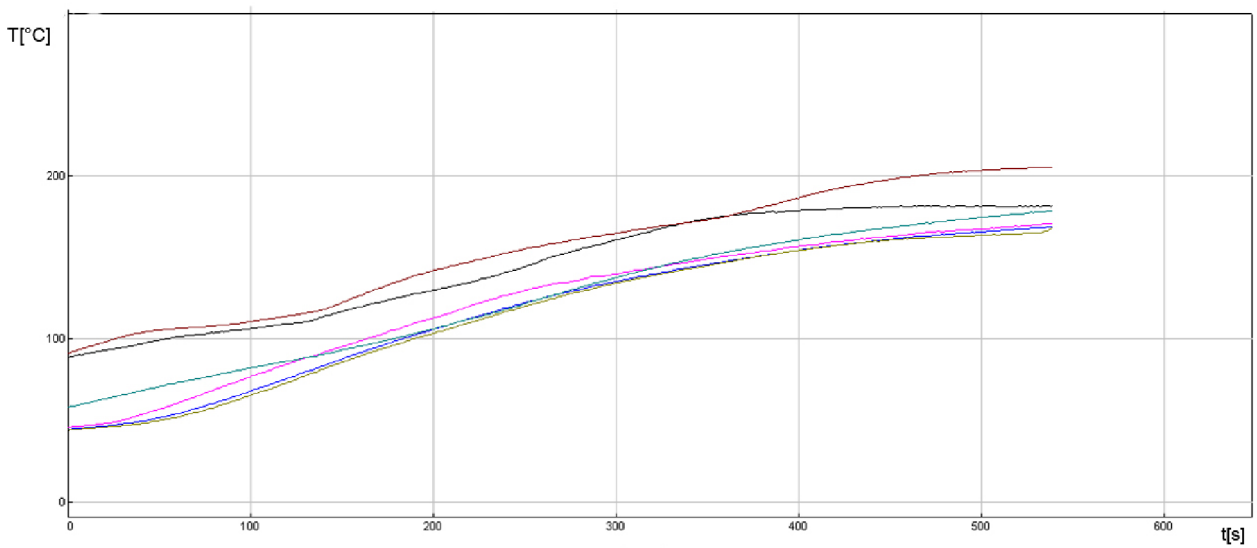


Obr. 42: Porovnání teplotních profilů s výsledky simulace

Nastavení hodnot podle technické dokumentace pro pájecí profil 260, 240, 360 °C. Při zapnutém dopravníku se nedokáže DPS prohřát natolik, aby teploty na termočláncích dosáhly hranice 200 °C. Přitom jde o nejpomalejší rychlost dopravníku. Při lépe simulovaném výsledku byla DPS uprostřed pece, bez zapnutého dopravníku. Tím se vytvořily podmínky bližší simulaci. Výsledek je zobrazen na obr. 44, 45.



Obr. 43: Teplotní profil v čase $t = 600$ s, při zapnutém dopravníku



Obr. 44: Nastavení teplot 260, 240, 360 °C při vypnutém dopravníku

4 ZÁVĚR

Předpokládaná diplomová práce se zabývá analýzou teplotního profilu v laboratorní, přetavovací (reflow) peci DIMA SMRO 0180. Cílem této práce bylo nastudovat problematiku pájení přetavením a seznámit se s nastavením teplotního profilu a jeho vlivu na vlastní pájecí proces. Stěžejní částí této práce bylo vytvoření matematicko fyzikálního modelu přetavovací pece v systému SolidWorks Flow Simulation.

Nezbytnou součástí bylo studium problematiky proudění vzduchu s přestupem tepla. Hlavním přínosem této práce je použití radiačního modulu pro přestup tepla sáláním. Výsledky simulace byly porovnány s reálně naměřenými hodnotami a vyneseny do grafických závislostí.

Práci lze rozdělit na tři části:

- Měření teplot profiloměrem Slim KIC 2000.

V prostoru pece se nachází tři zářiče. Pro každý z nich byly nastaveny tyto teploty 100, 150, 200, 250 °C. Dostatečně přesné výsledky jsou docíleny opakovaným měřením. Pro teplotní profil byly nastaveny teploty podle technické dokumentace. IR zářič v zóně předehřevu (260 °C), IR zářič v zóně přetavení (360 °C), odporový zářič v zóně přetavení (240 °C).

- Simulace teplot pomocí Flow Simulation.

Pro simulaci byl vytvořen 3D model přetavovací pece DIMA SMRO 0180. Nastavování teplot proběhlo totožně jako v předchozím bodě.

- Srovnání hodnot.

Srovnání výsledků jsou uvedeny v kapitole Teplotní analýza. Predikce teplot za působení ventilátoru jsou velice obtížné. Celkové chyby měření pro 250 °C se pohybují v rozmezí 2,32 % až 6,46 % z naměřené hodnoty. Grafické porovnání teplotního profilu získané z technické dokumentace, naměřeného profilu z profiloměru a závislosti $T=f(l)$ jsou znázorněny v podkapitole Teplotní profil. V simulaci není zohledněn čas, k porovnání výsledků bylo třeba zvolit alternativní závislosti teploty na podélné délce přímky uvnitř pece.

Chyby měření:

- Standardní odchylka termočláčku typu K.

Tato hodnota činí 0.75 % z měřené hodnoty. Pro 250 °C chyba činí 1,875 °C.

- Zprůměrování hodnot naměřených profiloměrem Slim KIC 2000.

Nejmenší aritmetická odchylka průměru pro 250 °C byla vypočtena na $\pm 0,39$ °C pro Tč. 1. Nejvyšší odchylka byla u termočláčku Tč. 5 a činila $\pm 2,65$ °C.

- Nezhlednění detailů modelu.

V místě, kde proudí vzduch nejrychleji, v blízkosti ventilátoru není vymodelována elektronika pájecí pece. Rychlost proudění by se snížila. Avšak z důvodu složitosti výpočtu modelu tato okolnost nebyla zahrnuta.

- Uzavřením prostoru pece.

Pro interní simulaci je třeba uzavřít model. Na vstup a výstup jsou vloženy zásepky. V místě mezi nosníkem a horním krytem je obdélníkový otvor o rozměrech 10 x 400 mm podél přední i zadní strany pece. Ve 3D modelu není tento otvor vymodelován.

- Použití materiálů z knihovny.

Z důvodu neexistující technické dokumentace pájecí pece DIMA SMRO 0180 se materiály nastavovaly pouze orientačně z knihovny Flow Simulation.

Jednotlivě mají všechny výše popsané chyby minimální vliv na výsledek, ovšem v součtu ho mohou ovlivňovat. Tato práce může být použita jako podklad pro podobné simulace teplotní analýzy nebo jako pomůcka studentům zajímající se o problematiku přestupu tepla a proudění.

LITERATURA

- [1] J. Starý, M. Zatloukal, P. Stejskal, *Montážní a propojovací technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 262 stran
- [2] M. Jurásek, *Elektrické a tepelné vlastnosti bezolovnatých pájek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. 55 stran.
- [3] M. Hlinovsky, *Povrchova montaz*. Praha: Vysoké učení technické v Praze, [cit. 10.5.2013]. Dostupné zWWW: <https://moodle.dce.fel.cvut.cz>.
- [4] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. *Pájení v elektrotechnické výrobě*
Kontrola jakosti spojů [online]. Brno [cit. 2013-05-27]. Dostupné z WWW:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_pajeni_a_kontrola.pdf
- [5] Sdílení tepla a proudění [online]. 2012 [cit. 2013-05-27]. ISBN 978-80-248-2576-2. Dostupné z WWW:
http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf
- [6] Sdílení tepla a proudění. Ostrava: VŠB - Technická universita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [7] DASSAULT SYSTEMES. *Nápověda SolidWorks* [online]. 2011 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z WWW: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>
- [8] SOLIDVISION. *Solidworks* [online]. 2010 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/>
- [9] Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX [online]. 2008 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [10] VSCHT. *Počítačová dynamika tekutin (CFD)* [online]. 2010 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z WWW:
http://www.vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda_konecných_objemu.pdf
- [11] *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-2142029-4.
- [12] Directindustry. *Belt conveyor reflow soldering ovens* [online]. 2013 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z WWW: <http://www.directindustry.com/prod/fritsch/belt-conveyor-reflow-soldering-ovens-13801-132522.html>
- [13] *Pájení vlnou ETS 250*. PBT Rožnov p.R, s.r.o. [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z WWW: <http://www.pbt.cz/dodavatele/ersa/7/66/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Název	Značka	Jednotka
součinitel teplotní vodivosti	α	$\text{m}^2 \cdot \text{s}$
měrná tepelná kapacita	c	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná kapacita	C	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
součinitel vyzařování dokonale černého tělesa	C_0	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
součinitel difúze	D	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
energie	E	J
intenzita vyzařování	E	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
měrná entalpie	i	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
směrová intenzita vyzařování	I	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
součinitel přestupu tepla	k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
plošná zářivost	L	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
tlak, měrný tlak	p	Pa
statický tlak	p_s	Pa
tepelný tok, tepelný výkon, výkon	P	W
hustota tepelného toku	q	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
teplo	Q	J
odrazivost	R	l
Celsiova teplota	t	$^{\circ}\text{C}$
teplotní rozdíl	$\Delta t, \Delta T$	K
termodynamická teplota	T	K
vnitřní energie	U	J
součinitel přestupu tepla	α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
součinitel přestupu tepla konvekcí	α_k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
součinitel přestupu tepla zářením	α_z	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
teplotní objemová roztažnost	Υ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
adiabatický exponent	κ	l
součinitel tepelné vodivosti	λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
vlnová délka	λ	m
hustota	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
čas, doba	τ	s

SEZNAM PŘÍLOH

Tab. 11: Teploty na termočláncích, měření 1.

Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Termočláanky [°C]						
	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
100, 100, 100 [°C]	72,1	73,8	78,8	72,9	70,4	78	66,2
150, 150, 150 [°C]	104,2	103,5	103,6	102,7	100,7	113,6	93,9
200, 200, 200 [°C]	138,9	138,5	138,6	138	137,1	149	125,8
250, 250, 250 [°C]	173,7	170,6	170,5	168,5	172,9	194,7	164,5

Tab. 12: Teploty na termočláncích, měření 2.

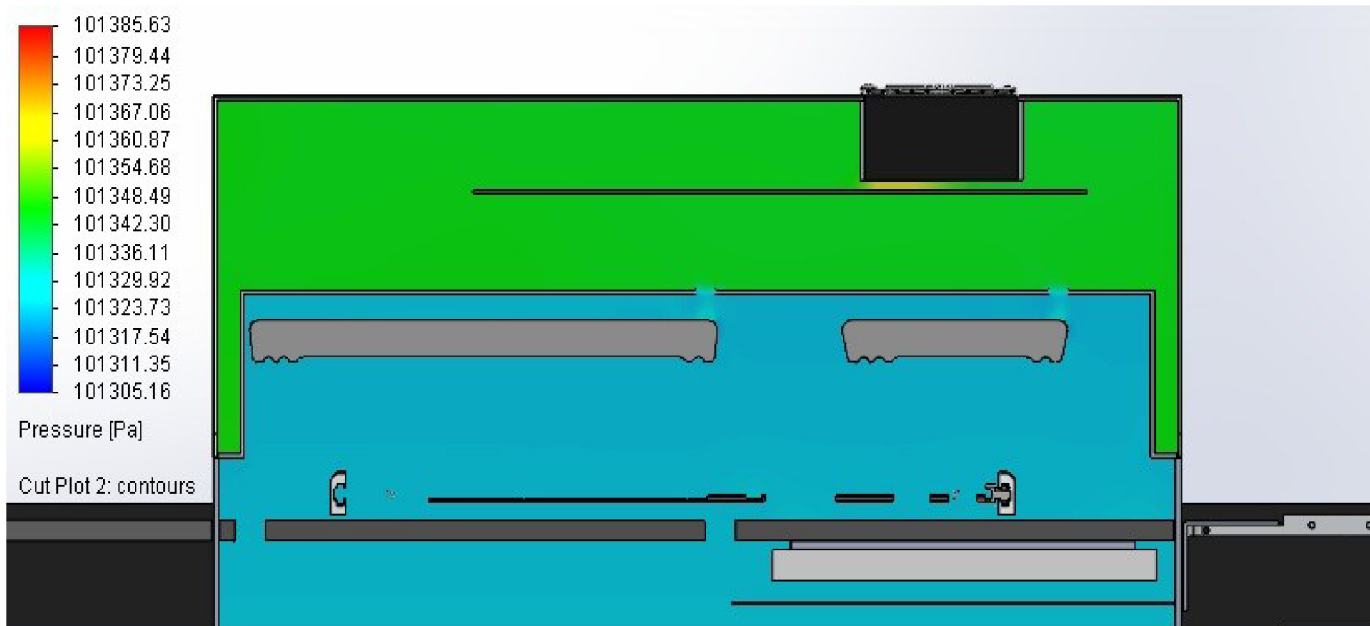
Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Termočláanky [°C]						
	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
100, 100, 100 [°C]	74,2	76,1	76,3	75,7	66,5	78,8	69
150, 150, 150 [°C]	104,2	105,2	105,4	105,1	92,7	109,2	96,3
200, 200, 200 [°C]	138,7	137,6	137,6	136,6	125,8	146,7	130,9
250, 250, 250 [°C]	173,1	169,7	169,2	168,5	160,6	186,6	166,4

Tab. 13: Teploty na termočláncích, měření 3.

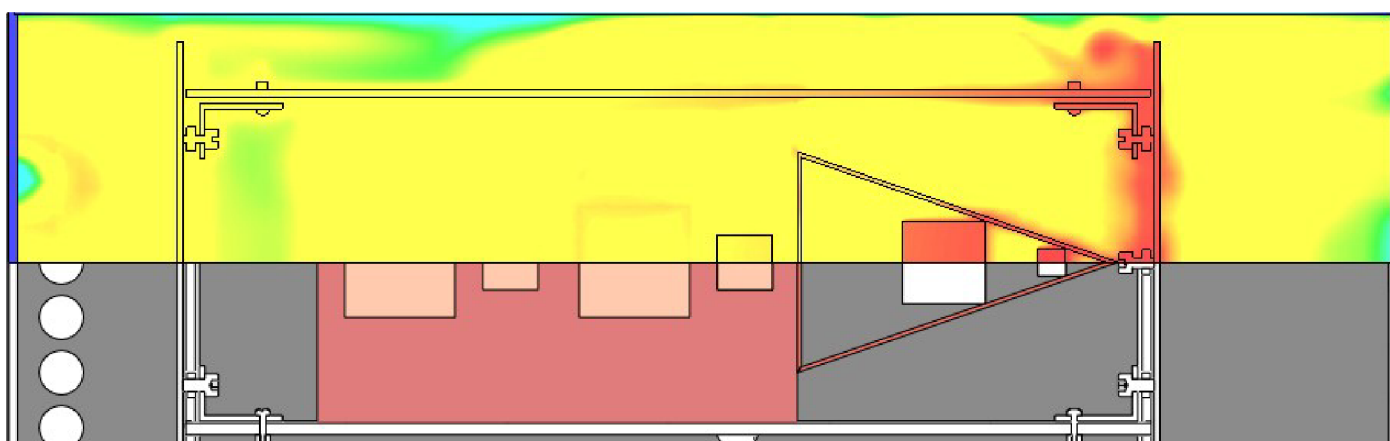
Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Termočláanky [°C]						
	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
100, 100, 100 [°C]	70,1	72	72,3	71,9	68,2	71,5	68,4
150, 150, 150 [°C]	101,8	102,7	102,3	102	100	98,2	106,1
200, 200, 200 [°C]	132	133,8	133,2	132,2	131,7	135,2	146,2
250, 250, 250 [°C]	172,4	168,9	167,9	166,1	170,1	183	167

Tab. 14: Teploty na termočláncích, měření 4.

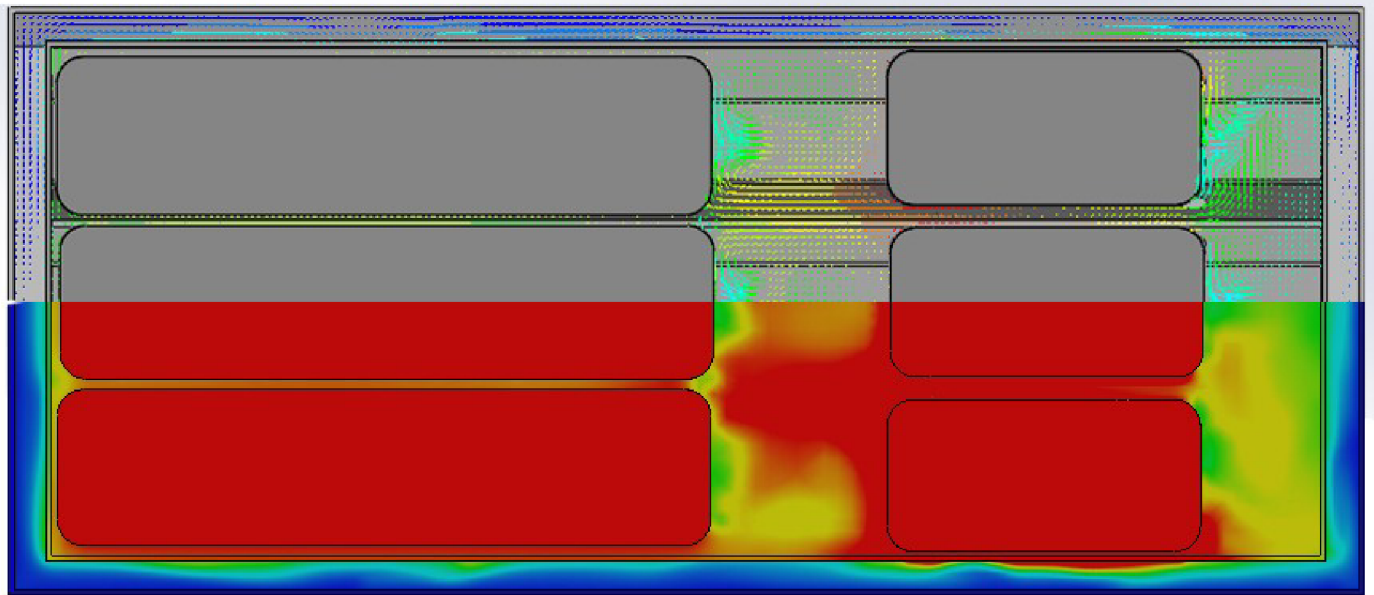
Teplota na zářičích (levý, pravý, spodní)	Termočláanky [°C]						
	Tč.1	Tč.2	Tč.3	Tč.4	Tč.5	Tč.6	Tč.7
100, 100, 100 [°C]	70,8	72,3	72,4	71,9	68,1	71	68,2
150, 150, 150 [°C]	101,7	102,8	103	102,6	99,6	98	105,8
200, 200, 200 [°C]	135,4	133,6	133,8	132,6	131,7	128	143,1
250, 250, 250 [°C]	171,9	168,1	167,3	165,2	169	188	165,8



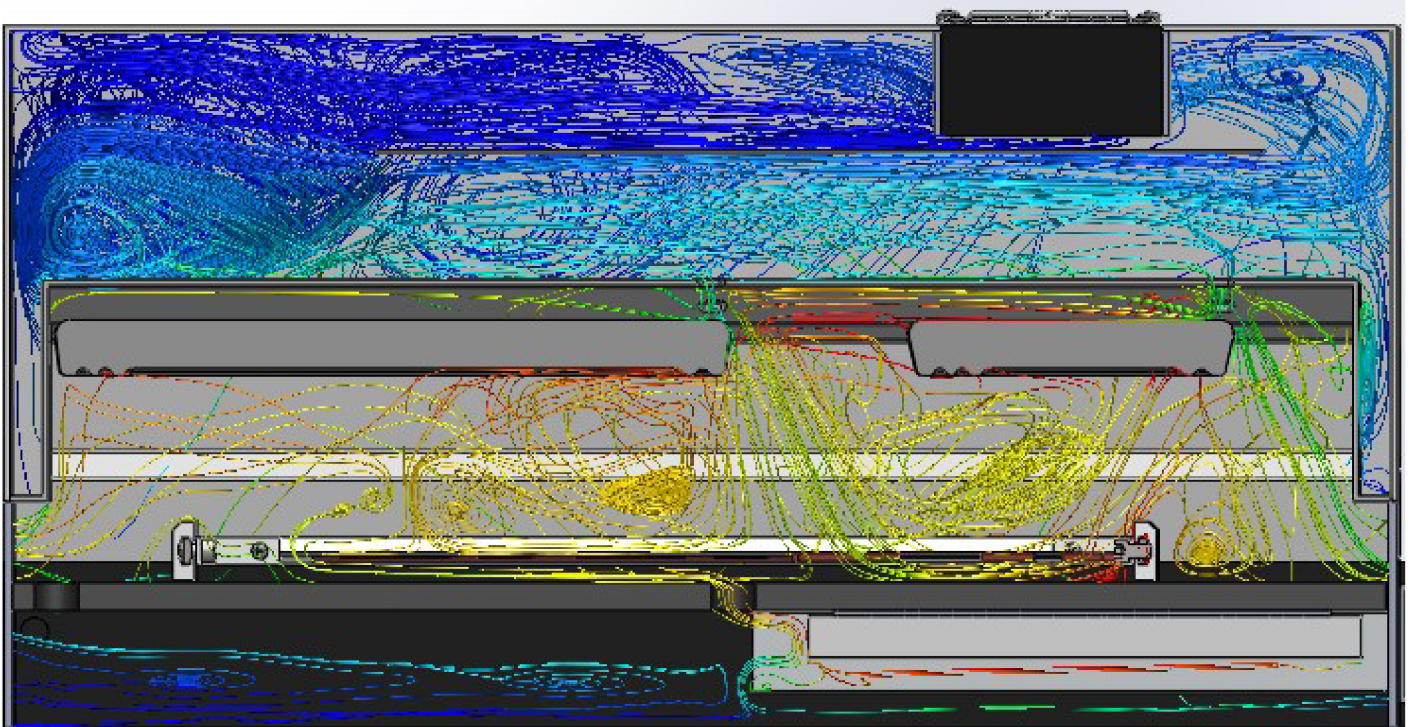
Obr. 45: Tlak v peci



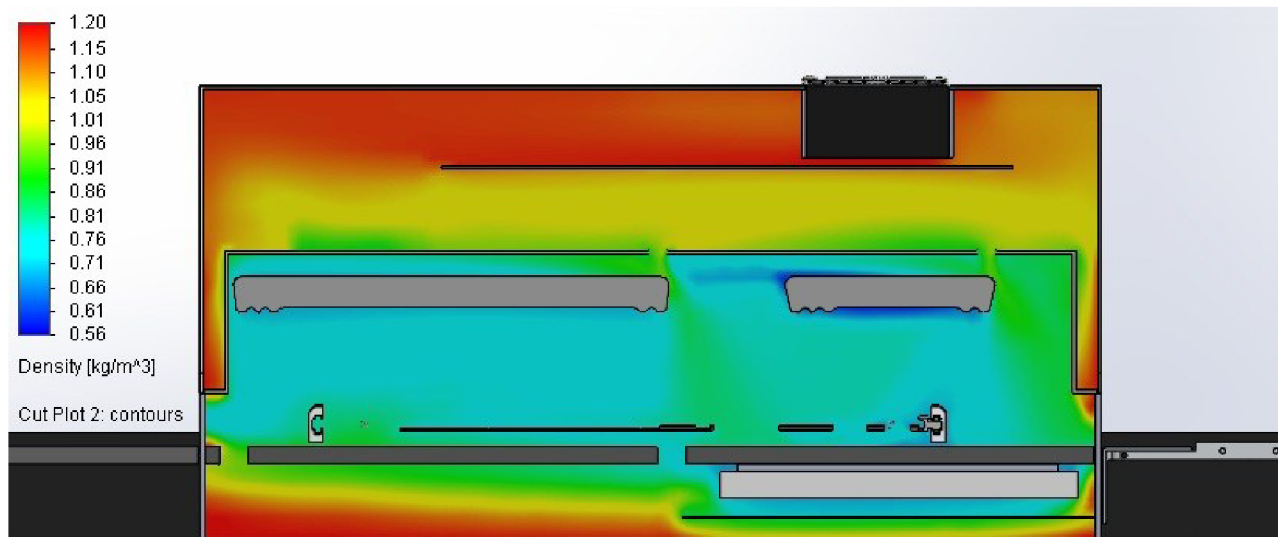
Obr. 46: Rozložení teplot na DPS



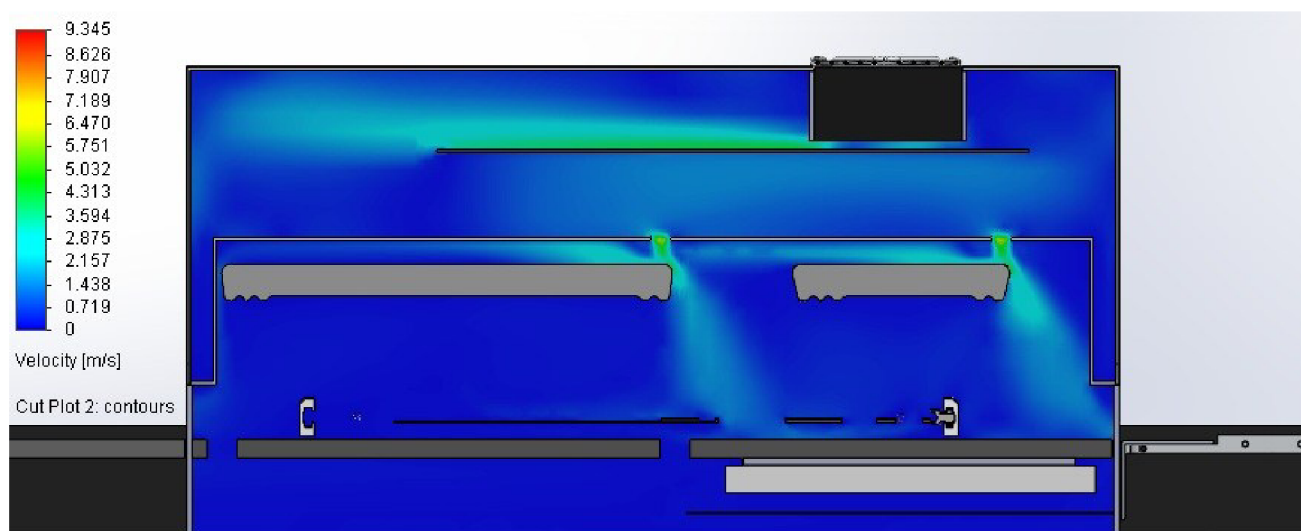
Obr. 47: Rozložení teplot kolem zářičů



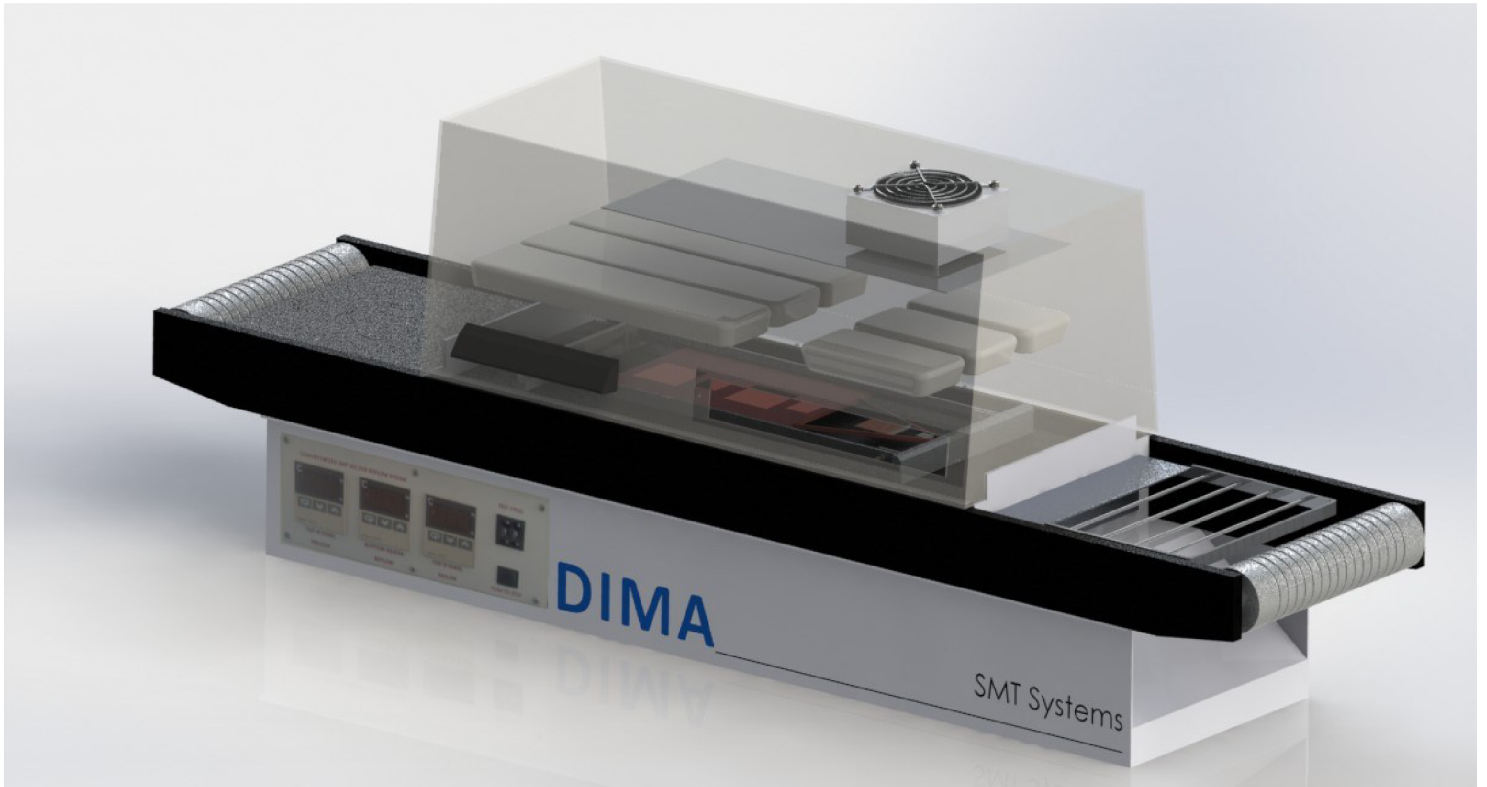
Obr. 48: Proudění v peci spojitě



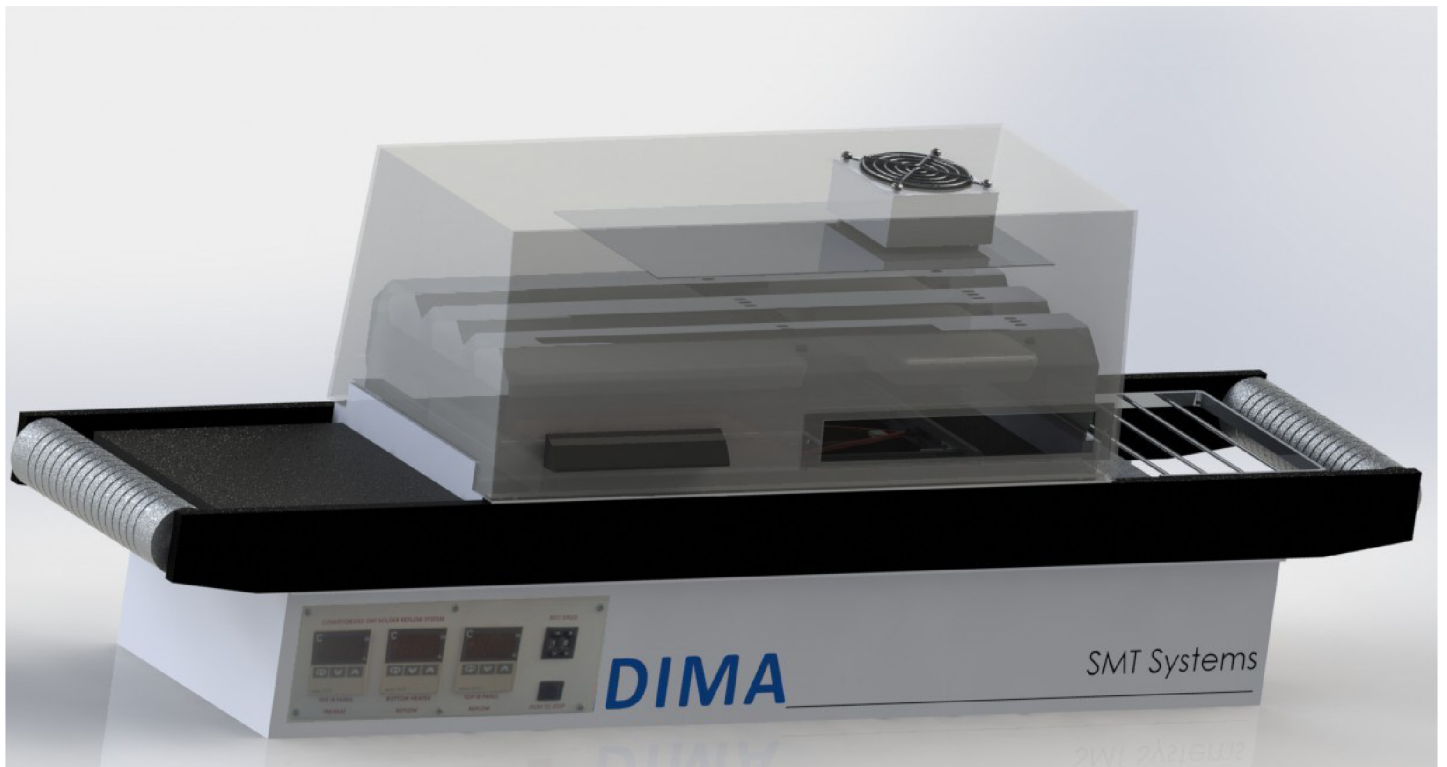
Obr. 49: Rozložení hustoty v peci



Obr. 50: Rychlost proudění v peci



Obr. 51: Vnitřní uspořádání pece DIMA



Obr. 52: Zprůhledněný horní kryt pece DIMA