



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# SIMULACE NESTACIONÁRNÍHO RADIČNÍHO OHŘEVU SKOŘEPINOVÝCH FOREM

## Disertační práce

<i>Studijní program:</i>	P3901 Aplikované vědy v inženýrství
<i>Studijní obor:</i>	3901V055 Aplikované vědy v inženýrství
<i>Autor práce:</i>	Ing. Martin Hušek
<i>Vedoucí práce:</i>	doc. Ing. Antonín Potěšil, CSc.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## Poděkování

Tato práce byla řešena ve spolupráci s firmou LENAM, s.r.o. (dále jen LENAM). Proto bych zde rád poděkoval členům jejího vedení doc. Ing. Antonínu Potěšilovi, CSc., který je zároveň mým školitelem, Ing. Marku Babuškovi, CSc. a Ing. Radku Jelínkovi za poskytnuté zázemí, cenné rady a připomínky při řešení této disertační práce. Mé poděkování patří i Ing. Miloši Müllerovi, Ph.D. za odborné konzultace. Největší poděkování však patří mé ženě za obrovskou trpělivost a za poskytnutí skvělých podmínek pro vytvoření této disertační práce.

## Abstrakt

Technologie na výrobu měkčených automobilových doplňků, využívaná ve firmě Magna Exteriors Bohemia s.r.o [dále jen Magna] se nazývá Slush moulding. Technologie je především vhodná na výrobu umělých kůží používaných na měkčené interiérové části vozidel, např. na palubní desky automobilů, výplně dveří apod. Jedná se o metodu radiačního ohřevu skořepinových forem, dodávajících výslednému produktu vhodný tvar, tloušťku a designový reliéf. Polohování infračervených zářičů kolem výrobní formy se provádí s podporou simulací.

Původní metoda simulace, založená na komerčních CAD a CAE systémech byla již nevyhovující. CAD softwary nebyly svými funkcemi vhodné pro manipulaci se zářiči a radiační simulace v CAE softwarech nerespektovala reálné vyzařovací vlastnosti používaných typů infračervených zářičů. Teplotní simulace v komerčním CAE také nebyla vhodná pro implementaci regulace teploty, která je nezbytná během ohřevu skořepinové formy. Původní metoda simulace byla zdlouhavá a neumožňovala návrh více variant radiačního ohřevu.

Cílem disertační práce bylo zpřesnit a zrychlit technickou přípravu radiačního ohřevu výrobních forem návrhem nové simulační metody. Nutnou součástí disertační práce bylo též naprogramování nového simulačního prostředí, umožňujícího výrobcí umělých kůží zefektivnit výrobu umělých kůží.

Pro vývoj nového simulačního prostředí bylo nutné vhodnou experimentální metodou identifikovat vyzařovací charakteristiky používaných typů infračervených zářičů. Tato měření se stala základem simulace teplotní okrajové podmínky, představující rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy. Pro výpočet nestacionárního teplotního pole, měnícího se i v důsledku zásahů regulace, bylo nutné navrhnout algoritmus pro rychlý výpočet výsledné teploty povrchu formy. V rámci optimalizačních smyček může uživatel vyvinutého softwarového prostředí optimalizovat konfiguraci pozic zářičů a jejich řídících termočlánků a současně hledat vhodné parametry regulace teploty.

Simulace nestacionárního teplotního pole povrchu formy bylo též nutné ověřit měřeními skutečných teplot ve výrobní lince.

**Klíčová slova:** Umělá kůže, skořepinová forma, infračervený zářič, měření teploty, simulace, hustota tepelného toku

## Abstract

The technology of softened car interior accessories manufacturing used in the company Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. [hereafter Magna] is called „slush moulding“. The technology is particularly suitable for production of artificial leathers utilized for softened interior parts of vehicles, such as dash-boards, door panels etc. The technology is based on infra-red heating of the shell moulds providing the final product with the suitable shape, thickness and embossment. Positioning of infra-red emitters around the mould is realised with the support of simulations.

The previous method of simulations based on commercial CAD and CAE systems was no longer convenient. CAD software with its functions was not suitable for manipulation with the emitters, and radiation simulation using CAE software did not respect real emissive properties of the applied types of infra-red emitters. Temperature simulation by commercial CAE was also inconvenient for implementation of temperature regulation which is essential during the shell mould heating. The original simulation method was lengthy and did not enable projection of multiple variants of infra-red heating.

The aim of the thesis was to design a new simulation method in order to make the adjustment of the infra-red heating of the moulds more accurate and rapid. The integral part of the thesis was development of new simulation software that makes the manufacture of artificial leathers more effective.

In order to develop the new simulation software, it was necessary to identify radiation characteristics of the applied types of infra-red emitters, using a suitable experimental method. The measurement of the characteristics constituted the base of the simulation of the thermal boundary conditions representing distribution of the heat flux density on the mould surface. For the calculation of non-stationary temperature field, changing as a result of the regulation, it was necessary to design an algorithm for rapid calculation of the resulting temperature of the mould surface. Users of the developed software can thus optimize configuration of the emitter positions and their control thermocouples within the optimisation loops and at the same time they can look for suitable parameters of the temperature regulation.

The simulation of the non-stationary thermal field of the mould surface was verified by measuring the real temperatures on the production line.

**Keywords:** Artificial leather, shell mould, infra-red emitter, temperature measurement, simulation, heat flux

# Obsah

1.	Úvod	12
1.1.	Oblast řešené problematiky	12
1.2.	Cíl disertační práce	13
1.3.	Pozice řešené problematiky v inženýrské praxi	13
2.	Radiační technologie výroby umělé kůže	15
2.1.	Proces výroby umělé kůže	15
2.2.	Proces regulace teploty	16
3.	Proces technické přípravy radiačního ohřevu	20
3.1.	Virtuální ohřev	21
3.1.1.	Původní metoda simulace	21
3.1.2.	Inovovaná metoda simulace	22
3.2.	Ohřev ve výrobní lince	24
4.	Ukázka praktického využití nástrojů IREview	24
5.	Přehled možností dostupných softwarů	27
5.1.	Vývoj simulační metody	27
5.2.	Zhodnocení získaných simulačních metod	28
6.	Měření charakteristik infračervených zářičů	30
7.	Nástroje IREview	32
7.1.	Simulace ozáření povrchu formy	32
7.1.1.	Pěti-rozměrná lineární interpolace	33
7.1.2.	Paralelní výpočet teplotní okrajové podmínky IREview	37
7.2.	IREview nástroje pro práci s modelem	37
7.3.	Databáze zářičů	39
7.4.	Objektová struktura prostředí IREview	40
7.5.	Záloha dat a struktura IREview souboru	43
8.	Výpočty teplotních polí skořepinových forem	44
8.1.	Teplotní výpočty v CAE	45
8.1.1.	Rovnice vedení tepla	46
8.1.2.	Počáteční a okrajové podmínky	47
8.1.3.	Radiační výpočet	48
8.1.4.	Metoda simulace č. 2	49
8.2.	Teplotní výpočty nástrojem IREview	50
8.2.1.	Princip řešení teplotní úlohy v IREview	51
8.2.2.	Akumulace tepla v IREview	52
8.2.3.	Vedení tepla v IREview	55



8.2.4.	Výpočet velikosti elementu IREview sítě o rozměru 1 x N	59
8.2.5.	Výpočet velikosti elementu IREview sítě o rozměru M x N	60
8.2.6.	Shrnutí principu fungování teplotního nástroje IREview	61
8.3.	Testovací úlohy teplotního nástroje IREview	62
8.3.1.	Test č. 1 na čtvercové síti o rozměrech 1 x N	63
8.3.2.	Test č. 2 na čtvercové síti o rozměrech M x N	64
8.3.3.	Test č. 3 na reálné síti	67
8.4.	Možnost zobecnění teplotního nástroje IREview	72
9.	Ověření nástrojů IREview v praxi	73
9.1.	Simulovaná fáze výroby umělé kůže	73
9.2.	Optimalizace pozic zářičů a řídicích termočlánků	73
9.3.	Implementace regulace teploty	74
9.4.	Porovnání simulace s měřením	75
9.4.1.	Záznam teploty z výrobní linky	75
9.4.2.	Nastavení teplotního výpočtu	77
9.4.3.	Volba koeficientu přestupu tepla	77
9.4.4.	Zhodnocení dosažených výsledků simulace	78
9.5.	Budoucí vývoj simulační metody a prostředí IREview	81
10.	Závěr	82
	Seznam citovaných publikací	84
	Seznam publikací autora	85
	Obsah příloženého CD	86

## Seznam použitých zkratek

CAD	computer - aided design
CAE	computer - aided engineering
FEM	finite element method = metoda konečných prvků
IRE	infra-red emitters = infračervený zářič
MIMO	multi-input multi-output
MKP	metoda konečných prvků
TC	thermocouple = termoelektrický článek

## Seznam použitých symbolů

$A \text{ [m}^2\text{]}$	obsah plochy
$c \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$	měrná tepelná kapacita
$d \text{ [mm]}$	tloušťka skořepinové formy
$F \text{ [-]}$	pohledový faktor
$J \text{ [J]}$	teplo
$L \text{ [mm]}$	délka hrany elementu
$m \text{ [kg]}$	hmotnost
$Q \text{ [W]}$	výkon
$q \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$	hustota tepelného toku
$T \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	teplota
$t \text{ [s]}$	čas
$T_a \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	teplota okolí
$V \text{ [m}^3\text{]}$	objem
$\alpha \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}$	koeficient přestupu tepla
$\varepsilon \text{ [-]}$	emisivita
$\lambda \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$	součinitel tepelné vodivosti
$\rho \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	hustota
$\sigma \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-4}\text{]}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\chi \text{ [m}^2\text{.s}^{-1}\text{]}$	součinitel vedení teploty

# 1. Úvod

## 1.1. Oblast řešené problematiky

V dnešní době rychle se rozvíjející výpočetní techniky rostou na významu numerické simulace, zasahující do mnoha vědních a studijních oborů. Jejich využití se stále více uplatňuje v průmyslu při řešení nejrůznějších technických problémů. Mezi často průmyslově prováděné numerické analýzy patří např. teplotní výpočty, které představují i zaměření předložené disertační práce.

Stavba výpočetních modelů se především provádí při vývoji nových produktů či zavádění nových technologických postupů. K rozvoji výpočetních metod významnou měrou přispívá např. automobilový průmysl. Nasazení numerických modelů usnadňuje, zrychluje a zlevňuje jak vývoj prototypových, tak i sériových produktů. Úspora vzniká např. nahrazením doposud prováděných fyzických zkoušek právě numerickými simulacemi.

Předložená disertační práce se zabývá aplikovaným výzkumem v oblasti výroby plastových automobilových doplňků. Konkrétně se jedná o výrobu umělých kůží, využívaných především jako designové a ozdobné prvky v interiérech automobilů.

Při výrobě umělých kůží se ve světě používá celá řada technologických postupů. Jedná se o technologie známé pod názvem Slush moulding. Společným prvkem těchto technologií je forma, dodávající umělé kůži výsledný tvar a jemný designový reliéf. Na počátku procesu výroby umělé kůže musí být povrch formy pokryt materiálem na bázi termoplastického polymeru. Současně musí být forma ohřátá na požadovanou teplotu, aby nanesený polymer mohl tát a slinovat do tenké kompaktní vrstvy. Po ochlazení formy je kůže vyjmuta.

Využívaným topným médiem je např. horký olej, horký písek či proud horkého vzduchu. Zmíněné způsoby ohřevu mají celou řadu nedostatků. Společným avšak velmi významným nedostatkem je, že není možné měnit teplotu povrchu formy lokálně, a tudíž lokálně měnit např. tloušťku kůže. Proto se společnost Magna vydala cestou ohřevu forem pomocí infračervených zářičů. Radiace je ve srovnání s ostatními způsoby ohřevu energeticky úspornější a také celá výrobní linka zaujímá menší rozlohu.

Z celé technologie výroby umělé kůže ve společnosti Magna se disertační práce zabývá právě radiačním ohřevem výrobních forem.

Téma disertační práce vzniklo během řešení MPO projektu FR-TI1/266 "**Inovace technologie výroby umělých kůží**". Na tomto inovačním projektu se podílela společnost Magna, firma LENAM a Technická univerzita v Liberci.

## **1.2. Cíl disertační práce**

Cílem disertační práce je zefektivnit technickou přípravu radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží ve společnosti Magna.

Zefektivnění spočívá ve využití nových simulací, řešících rozmístění infračervených zářičů nad tvarově složitým 3D objektem výrobní formy. S touto problematikou úzce souvisí i návrh pozic řídících termočlánků. Cílem nových simulací je zpřesnit prediktivní výpočet nestacionárního teplotního pole výrobní formy a zrychlit technickou přípravu radiačního ohřevu. Cílem disertační práce je navrhnout, vyvinout a programově realizovat nové simulační prostředky, umožňující výrobním technologům společnosti Magna efektivně zvládat všechny výrobní fáze prototypových a sériových umělých kůží.

## **1.3. Pozice řešené problematiky v inženýrské praxi**

Používaná radiační technologie ohřevu forem na výrobu umělých kůží je unikátní. Z toho důvodu i její simulace vyžaduje specifický přístup, který efektivně komerční simulační prostředí neumožňují.

Vývoj simulační metody a volba simulačních prostředků se odvíjeli od řešení dílčích úkolů. Řešená problematika byla poměrně rozsáhlá a vyžadovala seznámit se komplexně s výrobní technologií. Následující body stručně shrnují okruhy témat, kterými bylo nutné se zabývat:

- Identifikace vyzařovacích vlastností používaných typů infračervených zářičů.
- Práce s CAD daty, stavba modelu z relevantních dílů ohřevu.
- Úprava modelu pro simulační účely.
- Volba simulačních prostředků a programování specializovanějších sw nástrojů.
- Polohování zářičů kolem modelu výrobní formy.
- Posouzení a ohodnocení kvality ozáření povrchu formy - rozložení hustoty tepelného toku i teplotního pole.
- Zohlednění vlivu regulace teploty i pozic řídících termočlánků na kvalitu ohřevu.

- Zohlednění požadavků technologů výroby společnosti Magna jako uživatele simulačního nástroje.
- Návrh datových výstupů ze simulace, umožňujících technologům výroby nastavení výrobní linky.
- Porovnání predikovaných výsledků ohřevu forem s reálnými daty změřenými ve výrobní lince.

Shora uvedená témata jsou podrobněji rozvedená v dalším textu disertační práce.

Poznamenejme, že rozložení hustoty tepelného toku a teplotního pole na povrchu formy je v disertační práci prezentováno na demonstračních CAD datech. Sériová či prototypová CAD data by mohla obsahovat chráněné designové či konstrukční prvky. Zvolený způsob prezentace nijak nesnižuje kvalitu disertační práce, neboť cílem není představit výsledky řešených projektů, ale ozřejmit inovativní přínosy simulace radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží. Poznamenejme, že vyvinuté metody a metodiky virtuálního radiačního ohřevu lze aplikovat i v jiných technologických postupech využívajících ohřevu prostřednictvím infrazářičů, např. lepení, kašírování apod.

## **2. Radiační technologie výroby umělé kůže**

Jak již bylo zmíněno, topným médiem pro ohřev výrobní formy byl ve společnosti Magna zvolen infračervený zářič. Celý proces výroby umělé kůže zajišťuje automatická linka. Automatizace výroby umělé kůže je nezbytná pro sériovou výrobu např. přístrojových desek automobilů.

### **2.1. Proces výroby umělé kůže**

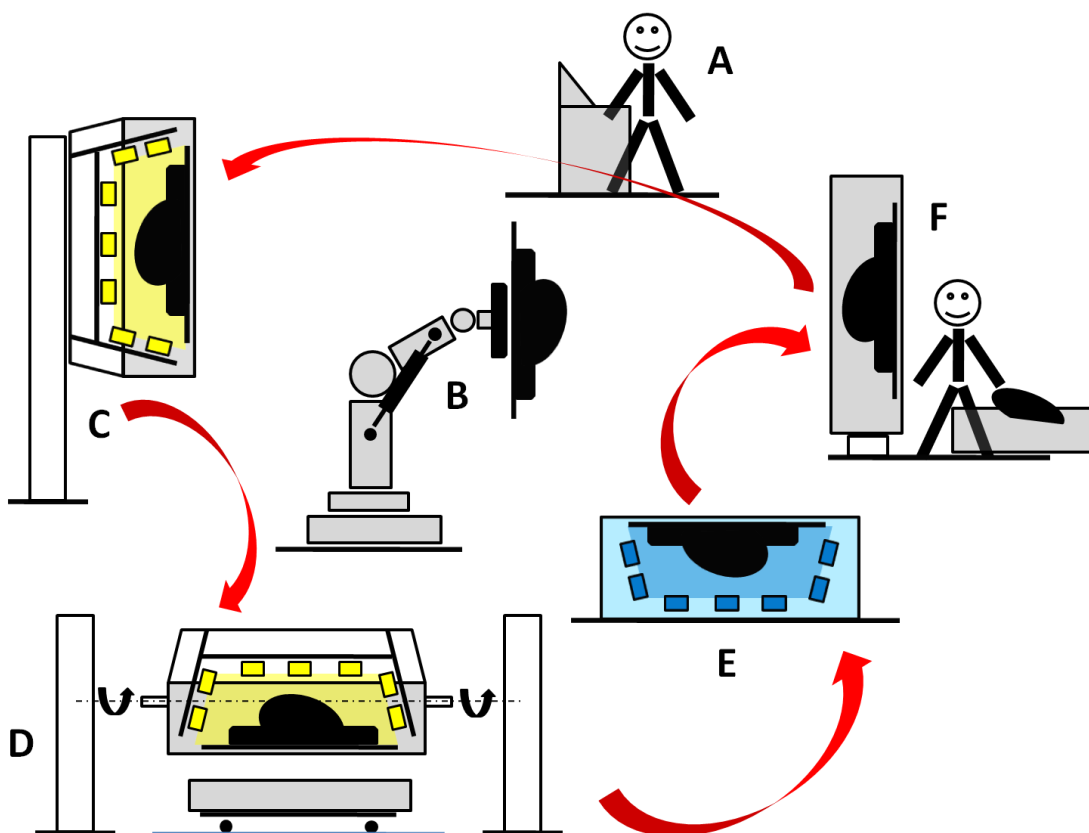
Základem technologie výroby umělé kůže patentované firmou Magna je niklová skořepinová forma o tloušťce cca 4 mm. Forma je radiačně předehřátá přibližně na teplotu 220 °C. Objem formy se vysype jemným práškem na bázi PU či PVC. Vlivem teploty jemný prášek na vnitřním povrchu formy ulpí a začne tát. Rovnoměrnost nanesené práškové vrstvy je současně řízená rotací a vibracemi výrobní formy umístěné ve speciálním rámu. Zbytek nevyužitého prášku se po té vysype. Forma je pak dohřívána na teplotu 220 °C pomocí infračervených zářičů. Celý proces ohřevu je řízený regulátorem, jenž snímá teploty z termočlánků umístěných na vnějším povrchu formy. Nejdříve jsou aktivní všechny zářiče, postupem času začíná do procesu ohřevu zasahovat regulace, jejíž cílem je dosažení uspokojivě distribuovaného teplotního pole výrobní formy. Proces kvalitního slinování prášku na pracovním povrchu formy v určité fázi výrobního cyklu podporuje horký vzduch vháněný do oblasti kůže. Výrobní cyklus je zakončen ochlazením formy ve vodní sprše a ručním vyjmutím kůže. Následně je kůže podrobena přísné kvalitativní kontrole.

Příložený obr. 1 znázorňuje proces výroby umělé kůže. Následující body vysvětlují význam jednotlivých výrobních stanic:

- A. Kontrolní či řídicí pult s obsluhou. Provoz linky je však automatický.
- B. Přenášení výrobní formy mezi stanicemi zajišťuje robot. Forma je upnutá ve speciálním rámu.
- C. Ve výrobním cyklu se mohou nacházet např. dvě výrobní formy. Jedna z nich je umístěna do stacionárního ohřevu (do tzv. předehřevu formy). V této stanici se forma pouze radiačně ohřeje na požadovanou teplotu. Forma je pak temperována do té doby, dokud se neuvolní místo ve výrobní stanici.
- D. Druhá forma, předehřátá z předchozího kroku, se nachází ve výrobní stanici (ohřev v předchozí stanici urychluje výrobní cyklus umělé kůže).

Pro vytvoření umělé kůže je nezbytné formu opět temperovat infračervenými zářiči. Výrobní stanice umožňuje nasypání výrobního prášku společně s vibracemi a rotacemi skořepinové formy. Stanice také zajišťuje přívod horkého vzduchu do oblasti umělé kůže a odsávání škodlivých výparů.

- E. Stanice na ochlazení výrobní formy pomocí vodní sprchy.
- F. Stanice pro vyjmutí umělé kůže operátorem výroby. Kůže je zde ihned podrobena kvalitativní kontrole a označena výrobním kódem.



obr. 1: Schéma cyklu výroby umělé kůže.

## 2.2. Proces regulace teploty

Cílem regulace teploty v radiačním ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží je zajistit požadovanou teplotu na povrchu formy v jednotlivých etapách výroby umělé kůže. Teplotní pole na povrchu formy je zpravidla požadováno jako rovnoměrné. Tento požadavek však představuje ideál, který nelze dosáhnout díky složitému tvaru výrobní formy a technickým možnostem infračervených zářičů. Cílem



regulace je tedy rovnoměrnému ohřevu se co nejvíce přiblížit. Bez regulace teploty by nebylo možné umělou kůži vyrobit vůbec.

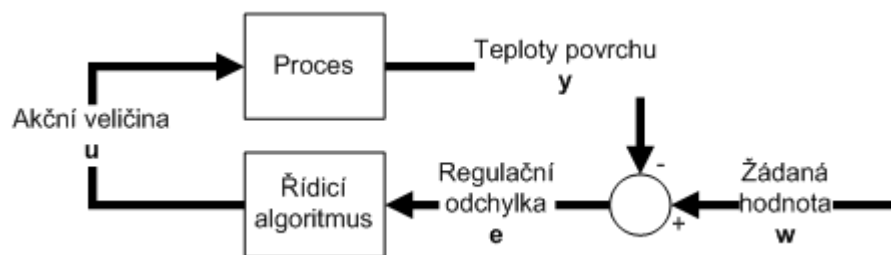
Během výroby umělé kůže je však často požadováno dosáhnout různých teplot v různých místech formy. Z tohoto hlediska je radiální ohřev velmi vhodným nástrojem. Regulačním zásahem je možné ovlivnit distribuci teplotního pole a tím i lokálně např. změnit tloušťku výsledné kůže.

Každý zářič má na vnějším povrchu formy umístěn „svůj“ termočlánek. Další termočlánky plní funkci kontrolní. Termočlánek je realizován jako jedno-vodičový snímač, kde druhý vodič je společný pro všechna čidla a je tvořen niklovou výrobní formou, viz obr. 2. Detailní popis měření teplot na povrchu výrobní formy je uveden v práci [8].



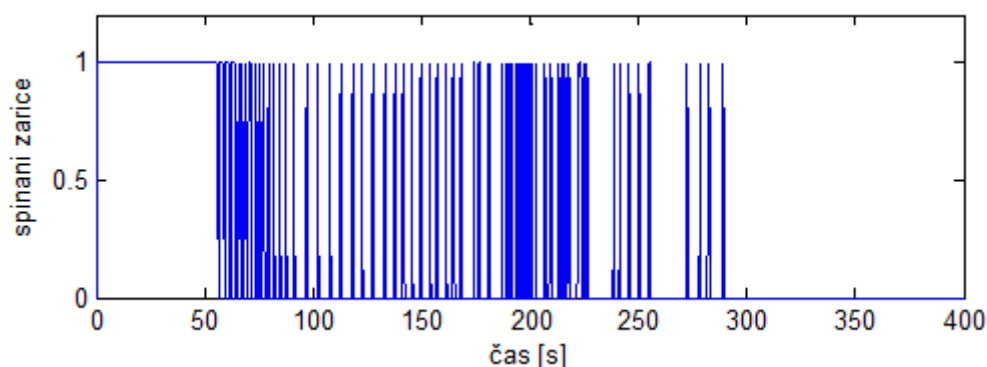
obr. 2: Forma s jedno-vodičovými termočlánky [1].

Regulace ohřevu skořepinových forem je značně rozsáhlý systém označovaný jako MIMO (Multi Input Multi-Output). V systému regulace vystupuje až 200 ks zářičů a odpovídající počet termočlánků. Vstupem do regulace jsou regulační odchylky. Ty jsou dány požadovanými teplotami a skutečnými teplotami na termočláncích v daném kroku regulace. Výstupy z regulace představují akční zásahy na zářících, viz obr. 3.



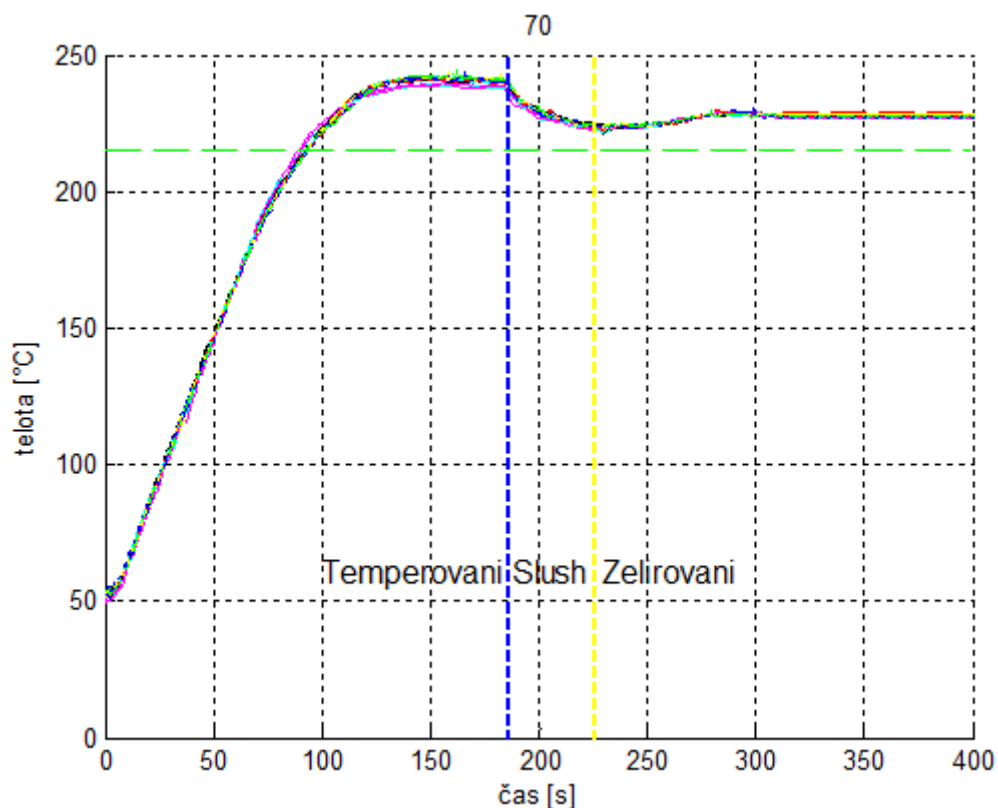
obr. 3: Schéma regulace [1].

Akční zásah na zářiči je realizován pomocí dvoupolohového relé. Zářič buď svítí nebo nesvítí. Regulace teploty s dvoupolohovým relé však v tomto případě plní funkci PID regulace. Regulace teploty je odkázaná na samovolné chlazení formy, neboť v průběhu výroby umělé kůže není možné formu chladit. Na obr. 4 je zobrazen příklad akčních zásahů na infračerveném zářiči (spínání zářiče).



obr. 4: Akční zásahy na zářiči [1].

obr. 5 představuje průběh teploty na jednom termočlánku z více výrobních cyklů, kde výrobní cyklus je rozdělen do tří částí. První část se nazývá "Temperování". Ta představuje ohřev formy na předepsanou teplotu pro nasypání výrobního termoplastického prášku. Výrobní fáze po nasypání prášku se nazývá "Slush". Prášek taje a lepí se na vnitřní strany výrobní formy. Tato fáze rozhoduje o množství prášku, který ulpí na povrchu formy a rozhoduje o tloušťce výsledné kůže. Také dochází k rotaci formy tak, aby se prášek dostal na určená místa. Pomocí vibrátoru se přebytečný nenatavený prášek sklepe zpět z formy do zásobníku. Tato fáze je charakteristická mírným poklesem teplot, neboť teplo z formy přejde do chladnějšího prášku. Třetí fáze se nazývá "Želírování". V této fázi dochází k dokončení slnutí umělé kůže prostřednictvím horkého vzduchu.



obr. 5: Průběhy teplot na termočlánek z více výrobních cyklů [1].

Proces regulace komplikují tzv. křížové vazby. To znamená, že termočlánek může být ovlivňován více zářiči. Již ve fázi návrhu radičního ohřevu pomocí simulací lze optimalizací pozic zářičů a jejich řídicích termočláneků počet křížových vazeb snížit.

O vhodné přiřazení termočláneků k zářiči a o nastavení parametrů regulace se v lince stará automatický systém. Během prováděné diagnostiky na systému ohřevu se rozsvěčují zářiče na více místech formy tak, aby se měření navzájem neovlivňovala. Během prováděné diagnostiky může forma chladnout pouze samovolně, což zpomaluje proces nastavení linky.

Řídicí termočlánek infračervených zářičů jsou umístěny na vnějším povrchu formy. Důležitá je však teplota na vnitřním povrchu formy, kde vzniká výsledná kůže. Proto výsledné nastavení parametrů regulace ještě obnáší nastavení cílových teplot (cílová teplota pro regulaci) pro konkrétní místa formy. Toto nastavení se provádí na základě kvality vyrobených umělých kůží. Proces regulace je velmi složitý a ovlivňuje jej mnoho faktorů. Parametry reálné regulace ovlivňují:

- Typ a množství výrobního prášku.
- Samotný výrobek. Cílové teploty se kalibrují podle kvality výsledné kůže.

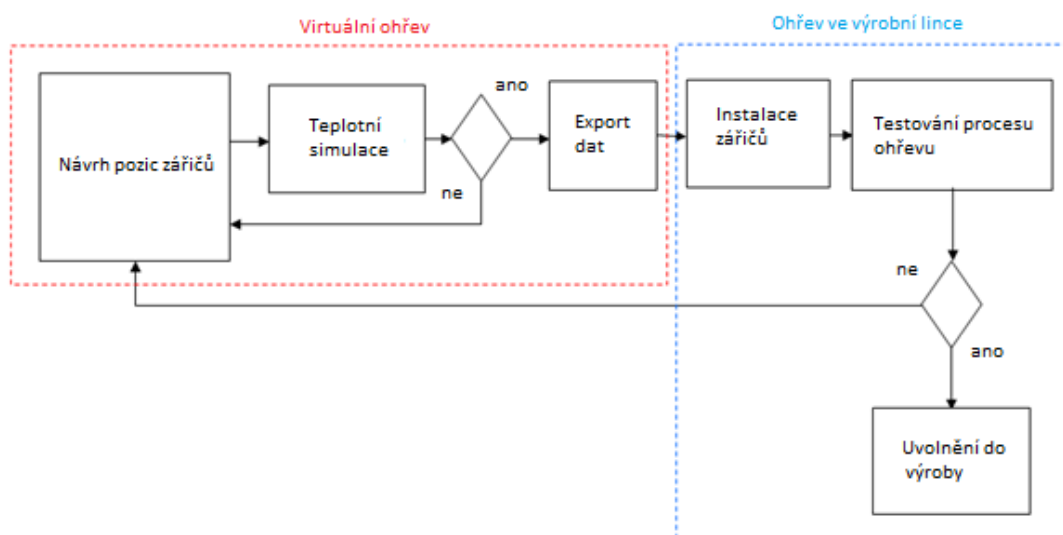
- Výrobní forma. I formy stejného typu se liší svými fyzikálními vlastnostmi a průběhy jejich ohřevů nejsou totožné.
- Počet výrobních cyklů. Podmínky v lince nejsou v průběhu výroby stálé.
- Nerovnoměrná počáteční teplota formy na začátku výrobního cyklu.
- Horký vzduch vháněný do formy.

Každá výrobní forma má přiřazenou tzv. recepturu. Jedná se o specifika nastavení výrobního procesu. Tyto údaje jsou uloženy v databázi výrobní linky.

### 3. Proces technické přípravy radiačního ohřevu

Na počátku vývoje technologie radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží se infračervené zářiče ve výrobní lince rozmísťovaly ručně metodou pokus-omyl. Pro zefektivnění návrhu radiačního ohřevu bylo nutné začít využívat sw prostředků. Se zavedením simulací radiačního ohřevu se tedy změnila metodika technické přípravy ohřevu.

Proces návrhu pozic infračervených zářičů nad tvarově složitou formou je rozdělen do dvou základních kroků. Jedná se o virtuální ohřev a skutečný ohřev ve výrobní lince, viz obr. 6.



obr. 6: Schéma přípravy radiačního ohřevu forem.

### 3.1. Virtuální ohřev

Fáze virtuálního ohřevu začíná návrhem pozic infračervených zářičů a termočlánků. Pozice jsou získané na základě řešení nestacionárních úloh vedení tepla na sestaveném modelu reálného ohřevu.

#### 3.1.1. Původní metoda simulace

Původní metoda simulace se opírala o komerčně využívané softwary. Objekty připomínající infračervené zářiče se modelovaly pomocí CAD softwaru. Následně byl objekt zářiče nahrazen jednoduchou ploškou, která v simulaci představovala zdroj tepelného záření. Teplota na povrchu formy se dopočítala v komerčním CAE softwaru radiační metodou.

Nevýhodou tohoto přístupu byla nutnost geometricky zjednodušit jednotlivé komponenty infračerveného zářiče a zároveň odhadnout jejich fyzikální vlastnosti, viz obr. 7. Tato zjednodušení vnášela do simulace celou řadu nejistot.



obr. 7: Ukázka použitých zářičů [2].

Kombinace CAD a CAE softwarů neumožňovala uživateli rychlé a pohodlné polohování zářičů nad modelem formy. To je způsobeno tím, že ve výrobní lince se vyskytuje až 200 ks infračervených zářičů a během jejich polohování je nutné:

- Vyhnout se kolizím s formou.
- Kopírovat složitý tvar formy.

- Vyhnout se kolizím s ostatními zářiči a dalšími konstrukcemi (rám formy, rám pro upevnění zářičů, atd.).
- Respektovat polohovací schopnosti upínacích mechanismů zářičů.
- Dodržování zásad a zvyklostí technologů.
- Dosáhnout dostatečného ozáření povrchu formy.

Původní metoda simulace též nebyla vhodná pro implementaci regulace teploty. Simulace by se stala časově náročnou a těžko by umožňovala optimalizaci pozice zářičů i řídicích termočlánků i případnou optimalizaci parametrů regulace.

### 3.1.2. Inovovaná metoda simulace

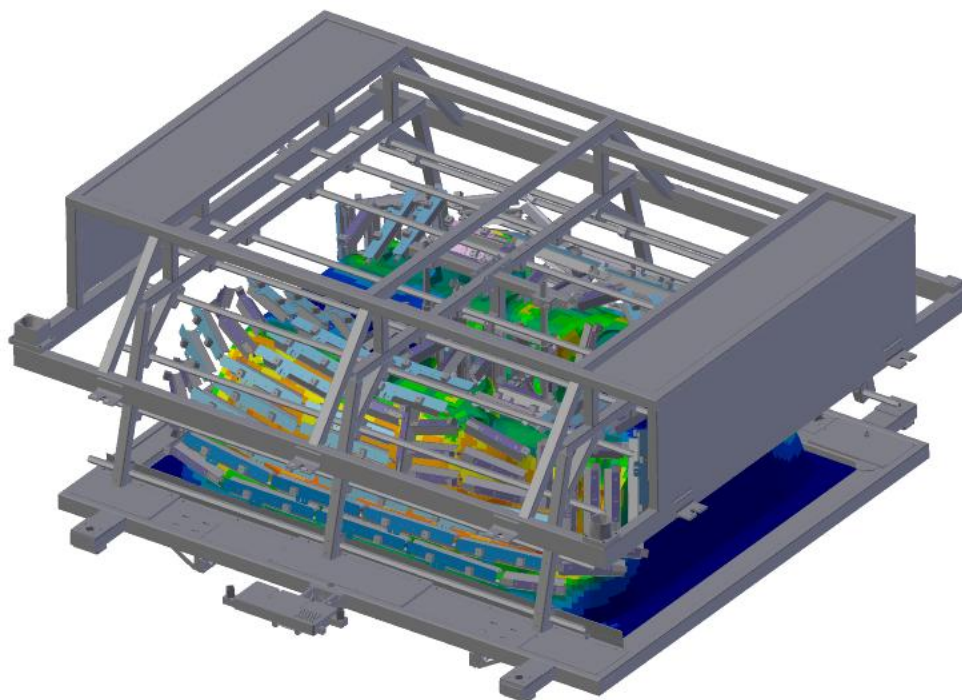
Aby byly eliminovány shora uvedené nevýhody a zefektivnila se technická příprava radiačního ohřevu, bylo rozhodnuto navrhnout a realizovat efektivnější metodu simulace, což se stalo nosným tématem disertační práce.

Pomocí identifikace vyzařovacích vlastností používaných typů infračervených zářičů, se úloha stala nezávislou na způsobu modelování zářiče. Pomocí experimentálního měření byla získána jednoznačná informace o množství a rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy pod objektem zářiče, a to bez znalosti fyzikálních vlastností jeho jednotlivých komponent.

Pro měření výkonových charakteristik infračervených zářičů bylo využito experimentální zařízení navržené a realizované ve firmě LENAM v rámci řešení MPO projektu FR-TI1/266 **"Inovace technologie výroby umělých kůží"**. Pro účely disertační práce bylo zařízení využito na identifikaci výkonových charakteristik používaných typů infračervených zářičů v technologii „Slush“. Naměřená data hustot tepelných toků se stala vstupem do simulace ohřevů skořepinových forem. Simulace distribuce hustoty tepelného toku na povrchu formy slouží jako simulace okrajové podmínky pro teplotní výpočet.

Disertační práce se též zabývá návrhem pozic infračervených zářičů ve vhodnějším softwaru. Nový informační prostředek byl realizován na základech softwaru Blender. Zdrojový kód sw Blender je dostupný i mimo jeho vývojovou komunitu. Proto bylo možné do něho implementovat vlastní algoritmy nazvané IREview vhodné pro stavbu modelu (preprocessor) radiačního ohřevu a vizualizaci výsledků (postprocessor), viz obr. 8.





obr. 8: Ukázka kompletního modelu ohřevu využívající nástrojů IREview [2].

Příprava modelu souvisí s importem důležitých konstrukcí, vystupujících v radiálním ohřevu a snadným návrhem pozic infračervených zářičů a termočlánků. Na formě, na jejímž povrchu je vygenerována síť, se nasimuluje okrajová podmínka pro teplotní výpočty. Okrajová podmínka v tomto případě je realizována distribucí hustoty tepelného toku. Ta se vypočítá z příspěvků hustot tepelných toků od jednotlivých zářičů na základě laboratorně změřených výkonových charakteristik infračervených zářičů.

Připravený model je určen pro následnou teplotní analýzu v komerčním CAE softwaru nebo za pomoci nového teplotního nástroje IREview. Oproti komerčnímu CAE softwaru je teplotní nástroj IREview vhodnější pro výpočet teplotního pole s regulací teploty a zároveň pro případné optimalizace pozic zářičů a termočlánků.

Vyvinuté a implementované nástroje IREview tak zpřesnily a zjednodušily predikci teplotního pole výrobní formy a zároveň zrychlily technickou přípravu radiálního ohřevu galvanoforem. Výsledkem efektivnějšího modelování se též stala možnost vybírat mezi více variantami navržených pozic zářičů i řídicích termočlánků. Kromě dosažení požadovaného teplotního pole výrobní formy je důležitým kritériem i počet použitých zářičů. Redukce počtu zářičů tak snižuje náklady na realizaci výrobní linky a na další její provoz.

Inovovaná metoda simulace radiálního ohřevu skořepinových forem, reprezentována nástroji IREview, je určená pro práci technologů přímo ve výrobě.

Technolog z výroby tak nemusí disponovat drahým komerčním softwarem ani hlubšími fyzikálními a softwarovými znalostmi.

### **3.2. Ohřev ve výrobní lince**

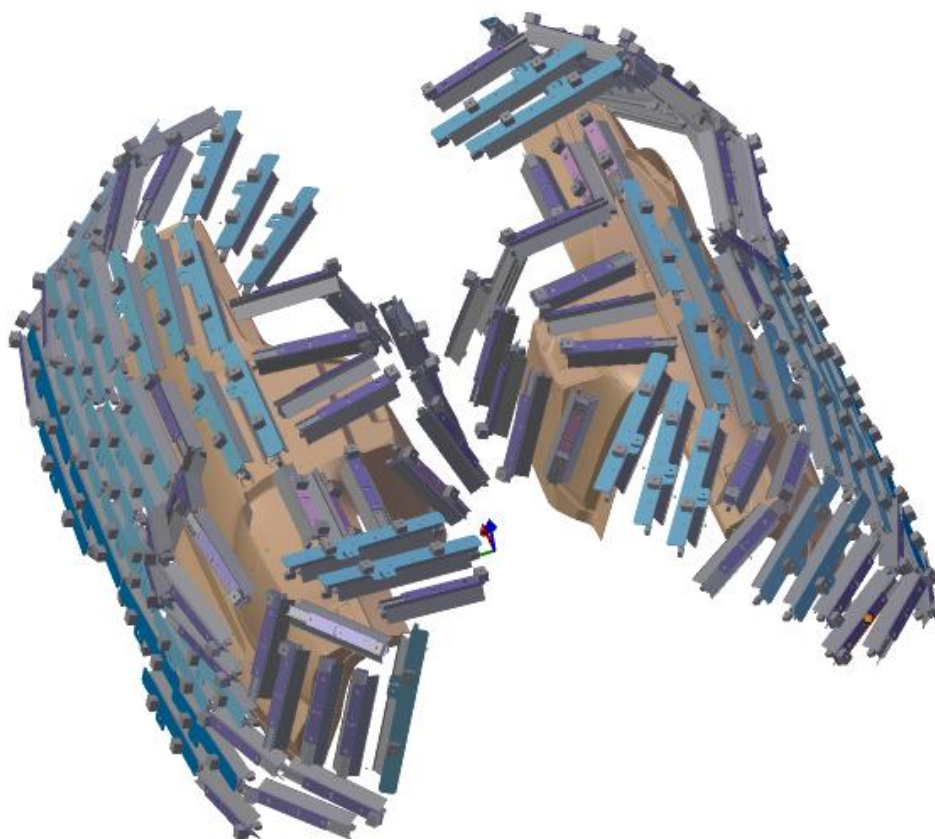
Pokud výsledná simulace odpovídá požadavkům výroby, dojde k exportu potřebných datových či obrazových podkladů pro fyzické rozmístění infračervených zářičů a jejich řídicích termočlánků.

V této fázi procesu návrhu ohřevu je ukazatelem kvality ohřevu výsledná kůže. Tu technologové pečlivě prohlížejí a podle ní na formě identifikují místa, která byla přehřátá či naopak nedostatečně ohřátá. Podle zmetkové kůže se tak provedou korekce na pozicích zářičů přímo ve výrobní lince nebo se upraví parametry regulace teploty pro konkrétní zářiče.

## **4. Ukázka praktického využití nástrojů IREview**

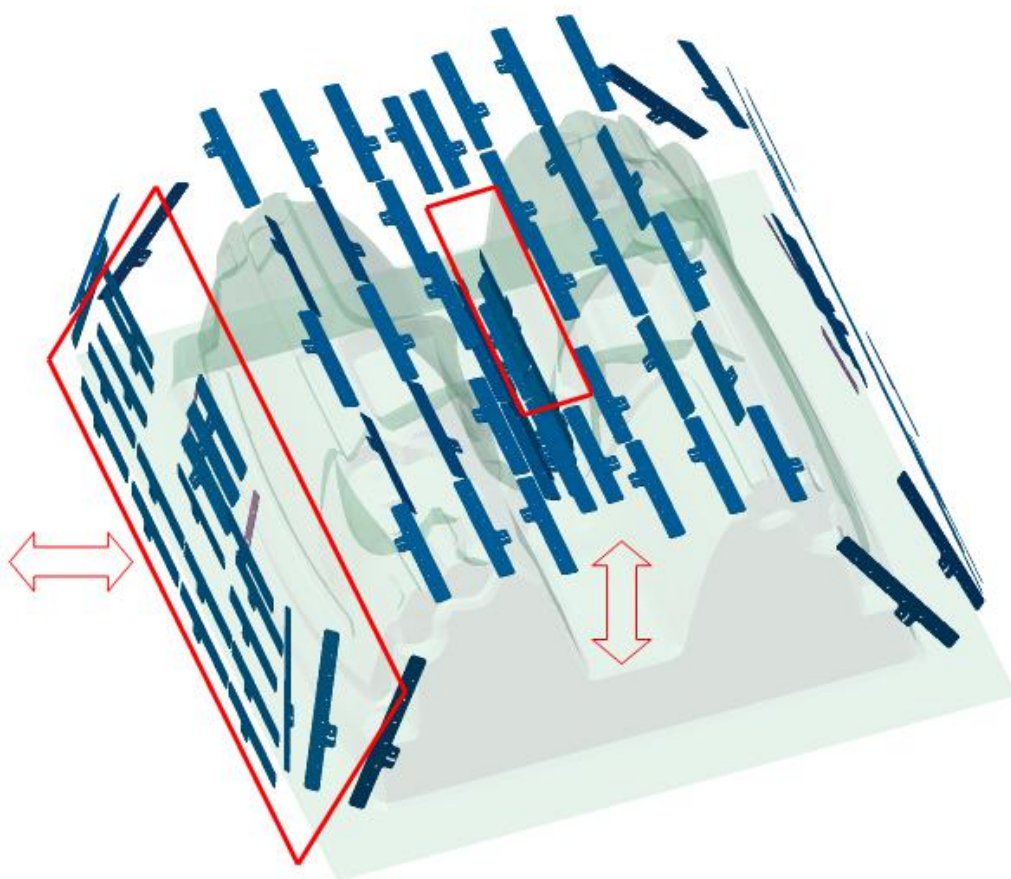
Nástroje IREview jsou navrženy za účelem návrhu pozic zářičů a řídicích termočlánků. Kvalita navrženého ohřevu se hodnotí na základě prováděných teplotních analýz. Simulace ohřevu skořepinových forem se provádí především na začátku vývoje a zavádění do výrobního procesu nových typů umělých kůží. Se simulacemi radiačního ohřevu se může začínat již v nejranější fázi řešeného projektu výroby umělé kůže. Simulace tak může začínat ve fázi, kdy existuje pouze model umělé kůže. Cílem těchto simulací je především návrh uspořádání umělých kůží v tzv. kavitách výrobní formy, viz obr. 9. Kavita představuje aktivní část formy pro výrobu umělé kůže a její tvar i odpovídá tvaru umělé kůže. Uspořádání kavit musí zářičům poskytovat dostatek prostoru a zároveň předurčuje tvar výsledné formy. Ta je konstruktéry ještě doplněna o další technologické plochy. Výsledná forma s návrhem pozic zářičů musí splňovat kritéria technologie výroby umělé kůže.





obr. 9: Uspořádání umělé kůže se zářiči v IREview.

Pro dosažení ideálního ohřevu musí infračervené zářiče maximálně kopírovat tvar aktivní části výrobní formy. V aplikacích radiačního ohřevu, kde nejsou kladeny tak vysoké nároky na kvalitu ohřevu, se přistupuje k návrhu pozic zářičů pro ohřev více typů výrobních forem, viz obr. 10. Jedná se o tzv. univerzální ohřev, kde je např. možné počítat i s posuvy určitých skupin zářičů. Rozložení zářičů v lince se tak dokáže přizpůsobit tvaru konkrétního typu výrobní formy. Tvar formy je ovlivněn jak tvarem umělé kůže, tak počtem výrobních kavit.



obr. 10: Řízené posunování držáků zářičů pro ohřev více typů forem [2].

Polohování zářičů se provádí na základě datových podkladů exportovaných z prostředí IREview. Konkrétně se jedná o transformační matice s pozicemi zářičů, resp. jejich držáků, viz obr. 11. Textový soubor s transformačními maticemi je určen pro robota, s jehož pomocí se přesně umístí držák zářiče do předepsaného místa ve zvoleném souřadném systému.

```

#Robtarget_4@P20R_P
-0.973727 -0.225007 0.035024 804.245117
-0.097634 0.551470 0.828461 1441.165894
-0.205725 0.803276 -0.558950 -215.400055
#Robtarget_5@P16R_H
-0.917862 -0.396433 0.019234 512.316223
-0.245684 0.605555 0.756929 1399.395386
-0.311719 0.690031 -0.653214 -307.164307
#Robtarget_6@P20R_P
-0.941009 -0.336141 0.038880 632.766846
-0.162720 0.550254 0.818989 1353.405762
-0.296689 0.764350 -0.572490 -306.833862
#Robtarget_7@P16R_H
-0.984138 -0.177262 -0.007114 938.190918
-0.111821 0.588684 0.800592 1405.283081
-0.137727 0.788688 -0.599168 -245.673203
#Robtarget_8@P16R_H
-0.999998 -0.001871 0.000413 1182.636230
-0.000875 0.637753 0.770240 1413.700195
-0.001704 0.770238 -0.637754 -235.774002

```

obr. 11: Transformační matice s pozicemi zářičů.

## 5. Přehled možností dostupných softwarů

Při snaze zlepšit simulační metodu ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží bylo důležité vyzkoušet více softwarových prostředků. Vybrané softwary se využily při řešení dílčích úkolů a zároveň posloužily jako podpora a inspirace při vývoji nástrojů IREview.

Ve firmách, zabývajících se především technickými výpočty, je běžné kombinovat více typů softwarů. To si však může dovolit takto zaměřená firma. Systémy CAD a CAE jsou poměrně drahé a vyžadují specializovanou obsluhu. Proto cílem disertační práce bylo vybudovat vlastní simulační prostředí, maximálně nezávislé na komerčních softwarech.

### 5.1. Vývoj simulační metody

Následující body popisují kombinace použitých softwarů v simulacích radiačního ohřevu skořepinových forem v jednotlivých obdobích vývoje, viz Tabulka 1. Kombinace použitých softwarů v jednotlivých obdobích představovala simulační metodu schopnou řešit reálné projekty.

1. Původní metoda simulace využívající CAD software pro manipulaci se zářiči. Výsledná teplota byla dopočítána klasickou radiační metodou v CAE softwaru.

2. Metoda simulace využívající IREview nástroje pro manipulaci se zářiči. Výsledná teplota je dopočítána klasickou radiační metodou v CAE softwaru.
3. Metoda simulace využívající IREview nástroje pro manipulaci se zářiči. Výsledná teplota je dopočítána v CAE softwaru pomocí okrajové podmínky z IREview. Tato podmínka představuje distribuci hustoty tepelného toku na povrchu formy od okolních zářičů.
4. Metoda simulace využívající IREview nástroje pro manipulaci se zářiči. Výsledná teplota je dopočítána teplotním nástrojem IREview. Vstupem teplotního nástroje je okrajová podmínka z IREview. Tato podmínka představuje distribuci hustoty tepelného toku na povrchu formy od okolních zářičů.

Tabulka 1

číslo metody simulace	CAD pozice zářičů	CAE radiační výpočet	CAE výpočet teploty z OKP	IREview pozice zářičů	IREview simulace OKP	IREview výpočet teploty z OKP
1	•	•				
2		•		•		
3			•	•	•	
4				•	•	•

Použité CAD softwary: ProEngineer (Creo), CATIA

Použité CAE softwary: ANSYS apdl, ANSYS workbench, Abaqus, MCS Marc, ANSA, META

Přístup k uvedeným softwarům umožnila firma LENAM.

## 5.2. Zhodnocení získaných simulačních metod

Základní funkce simulace, které by měli být společné pro všechny uvedené metody, je možné zjednodušeně ohodnotit znaménky plus či minus, viz Tabulka 2. Toto hodnocení charakterizuje, zda uvedené funkce jsou vhodně realizovatelné nebo zda jejich používání je dostatečně efektivní v dané metodě simulace.

Tabulka 2

číslo metody simulace	manipulace se zářiči	radiační vlastnosti objektu zářiče	jednoduchost prováděných simulací	regulace teploty	optimalizace pozic zářičů a termočlánků
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	+	+	-	-	-
4	+	+	+	+	+

V problematice simulací ohřevu skořepinových forem jsou omezení komerčních CAE softwarů nejvíce pocíťované v případě provádění optimalizačních úloh. V nich se jedná o optimalizace pozic zářičů a jejich řídicích termočlánků. Simulace s využitím komerčního CAE prostředí by se tak stala časově náročnou a pro řešení reálných projektů neefektivní, neboť by též musela pracovat s:

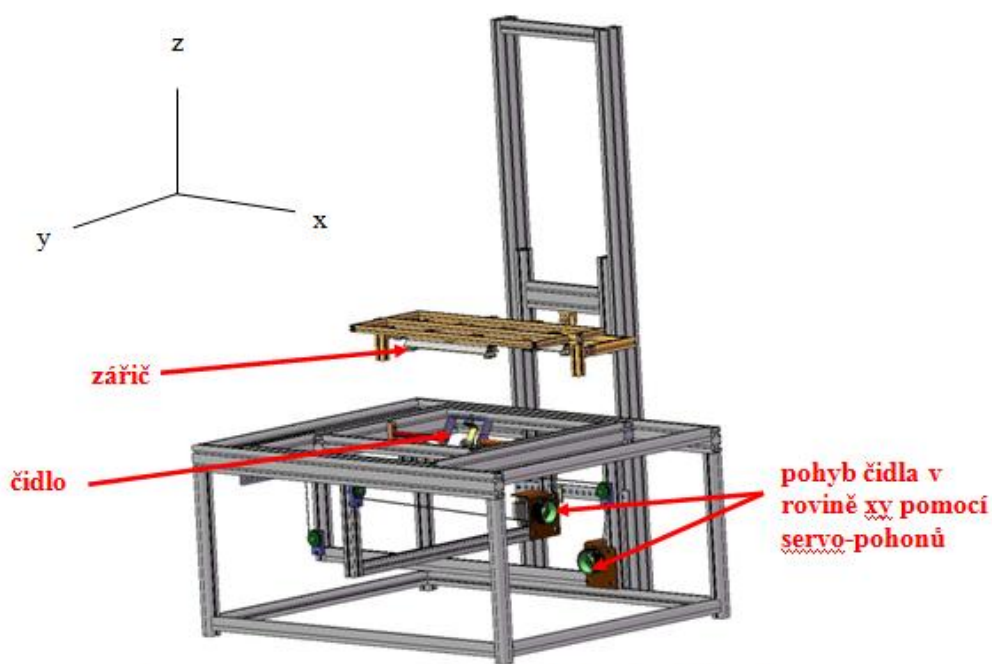
- Pozicemi zářičů a termočlánků získaných nástroji IREview v programu Blender.
- Vypočítanou teplotní okrajovou podmínkou nástroji IREview v programu Blender nebo jiným způsobem respektovat experimentálně změřené výkonové charakteristiky infračervených zářičů.
- Algoritmy umožňujícími regulaci teploty.

V následujících bodech jsou uvedeny konkrétní příčiny zpomalení optimalizační úlohy při využití komerčního CAE prostředí:

- Vytvoření optimalizační smyčky mezi nástroji IREview a CAE teplotním řešičem by bylo komplikované a pomalé.
- Doba výpočtu jednoho časového kroku teplotní simulace, resp. kroku regulace, trvá v komerčním CAE řešiči déle v porovnání s teplotním nástrojem IREview.
- Výměna teplotní okrajové podmínky, resp. restart úlohy s novým rozložením hustoty tepelného toku od aktivních zářičů, trvá v komerčním CAE prostředí příliš dlouho.

## 6. Měření charakteristik infračervených zářičů

K získání výkonových charakteristik infračervených zářičů se využilo laboratorního zařízení vyvinutého v rámci řešení MPO projektu FR-TI1/266 "**Inovace technologie výroby umělých kůží**" konstruktéry firmy LENAM, viz obr. 12. Pro nástroje IREview, umožňující simulaci teplotní okrajové podmínky, bylo důležité naměřit celou databázi výkonových charakteristik.



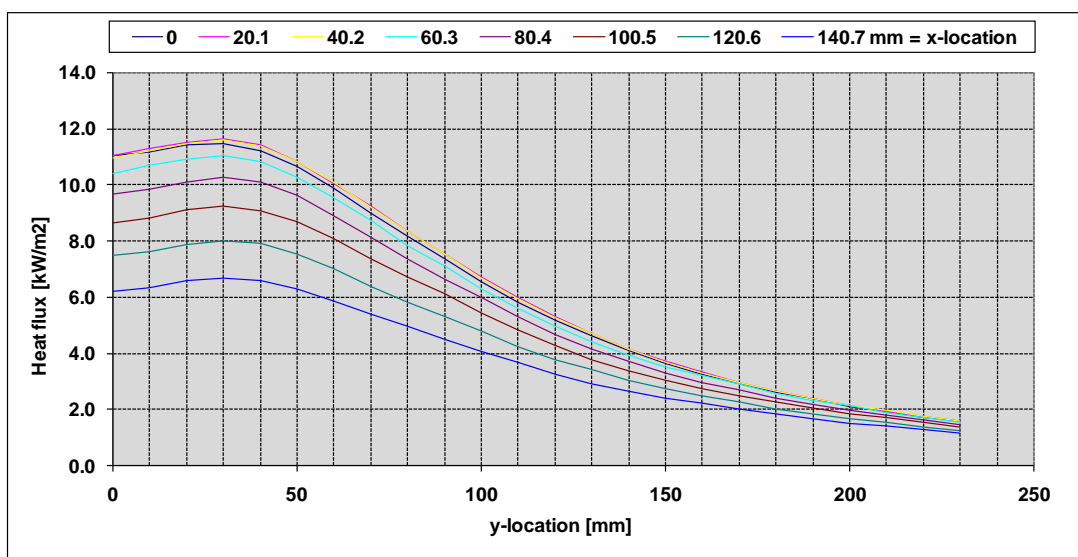
obr. 12: Zařízení na měření výkonových charakteristik zářičů.

Do měřicího zařízení se umístil infračervený zářič, pod nímž se pohybovalo čidlo snímající hustotu tepelného toku. Tímto způsobem se proměřil jeden kvadrant pod zářičem (zářič je symetrický podle osy  $x$  i  $y$ ) v rovině  $xy$  při zvolené vzdálenosti  $z$  mezi čidlem a zářičem. Čidlo se současně natáčelo v ose  $x$  a  $y$  ve speciálním upínacím mechanismu, viz obr. 13.



obr. 13: Mechanismus pro upnutí a natáčení čidla.

Na obr. 14 je graf představující zpracovaný záznam z čidla pohybujícího se ve směru y pro konkrétní vzdálenosti x.



obr. 14: Příklad změřené charakteristiky.

Všechna naměřená data byla zpracována do vhodné struktury umožňující nástrojům IREview čtení z textového souboru, viz obr. 15.

Pro simulace reálných ohřevů skořepinových forem bylo nutné změřit a zpracovat výkonové charakteristiky více typů zářičů. Ty se lišily např. výkonem, počtem zářících trubic nebo tím, zda mají či nemají přídavný reflektor.



```

***** popis sestavy *****
delka: 220
sirka: 54
trubice_drzak: 30.3

vyrobce: Philips
vykon: 1600
pocet_trubic: 1
natoceni_trubice: 0
reflektor: ano

***** zmerene charakteristiky IRE *****
uhel_x: 0
uhel_y: 0
y_x: 0.0 20.1 40.2 60.3 80.4 100.5 120.6 140.7 160.8 180.9 201.0 221.1 241.2
0.0 18.0 18.1 17.1 15.1 13.0 9.4 7.6 5.6 4.1 3.0 2.1 1.5 1.1
10.0 18.6 19.2 17.4 15.9 13.9 9.7 8.0 5.8 4.4 3.3 2.2 1.7 1.3
20.0 20.2 20.9 18.9 17.4 15.0 10.6 8.9 6.3 4.9 3.8 2.5 1.9 1.4
30.0 21.0 20.7 20.0 17.8 14.7 11.5 9.4 7.1 5.4 4.0 2.9 2.1 1.6
40.0 19.3 18.5 19.0 16.3 13.1 11.1 8.7 7.2 5.3 3.8 2.9 2.1 1.5
50.0 16.7 15.8 16.6 14.1 11.3 9.9 7.7 6.6 4.8 3.4 2.7 1.9 1.4
60.0 14.3 13.6 14.2 12.2 9.9 8.5 6.7 5.8 4.3 3.1 2.5 1.8 1.3
70.0 12.4 11.8 12.3 10.6 8.7 7.5 6.0 5.1 3.8 2.8 2.3 1.6 1.2
80.0 10.6 10.1 10.7 9.1 7.5 6.6 5.3 4.6 3.5 2.6 2.1 1.5 1.1
90.0 8.9 8.5 9.1 7.8 6.4 5.8 4.6 4.1 3.1 2.4 1.9 1.4 1.1
100.0 7.5 7.3 7.6 6.7 5.6 5.0 4.1 3.7 2.8 2.1 1.7 1.3 1.0
110.0 6.6 6.4 6.7 5.9 5.0 4.4 3.7 3.3 2.6 2.0 1.6 1.2 0.9
120.0 5.7 5.5 5.8 5.1 4.3 3.9 3.3 3.0 2.3 1.8 1.5 1.1 0.9
130.0 5.0 4.8 5.1 4.5 3.8 3.4 2.9 2.7 2.1 1.7 1.4 1.1 0.8
140.0 4.3 4.1 4.4 3.9 3.4 3.1 2.6 2.4 1.9 1.5 1.3 1.0 0.8
150.0 3.7 3.6 3.8 3.4 3.0 2.7 2.3 2.2 1.8 1.4 1.2 0.9 0.7
160.0 3.2 3.1 3.3 3.0 2.6 2.4 2.1 1.9 1.6 1.3 1.1 0.9 0.7
170.0 2.8 2.8 2.9 2.6 2.3 2.2 1.8 1.8 1.4 1.2 1.0 0.8 0.7
180.0 2.5 2.4 2.5 2.3 2.0 1.9 1.6 1.6 1.3 1.1 0.9 0.8 0.6
190.0 2.1 2.1 2.2 2.0 1.8 1.7 1.5 1.4 1.2 1.0 0.9 0.7 0.6
200.0 1.9 1.9 1.9 1.8 1.6 1.5 1.3 1.3 1.1 0.9 0.8 0.7 0.5
210.0 1.7 1.7 1.7 1.6 1.4 1.4 1.2 1.1 1.0 0.8 0.7 0.6 0.5
220.0 1.5 1.5 1.6 1.4 1.3 1.2 1.1 1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5
230.0 1.3 1.4 1.4 1.3 1.2 1.1 1.0 1.0 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4
konec
uhel_x: 0
uhel_y: 30
y_x: 0.0 20.1 40.2 60.3 80.4 100.5 120.6 140.7 160.8 180.9 201.0 221.1 241.2
0.0 15.8 15.2 13.1 10.7 8.2 5.6 3.9 2.3 1.2 0.5 0.1 0.0 0.0
10.0 16.9 16.5 13.7 11.5 8.9 5.8 4.1 2.4 1.3 0.6 0.1 0.0 0.0
20.0 18.3 17.4 14.8 12.3 9.3 6.4 4.5 2.6 1.5 0.7 0.2 0.0 0.0

```

obr. 15: Příklad zpracování dat pro účely simulace.

## 7. Nástroje IREview

Pro stavbu, výpočet i vyhodnocení modelu radiačního ohřevu skořepinových forem vznikly nástroje IREview. Algoritmy nástrojů IREview, vycházející z nové metodiky simulace ohřevu, byly implementovány objektovým jazykem Python do programu Blender. Prostředí programu Blender umožňuje základní manipulaci s 3D objekty a nabízí celou řadu grafických výstupů pro tvorbu technické dokumentace, jež je nezbytná při přípravě ohřevu.

### 7.1. Simulace ozáření povrchu formy

Geometrie modelu formy je tvořena elementárními skořepinovými ploškami. Výsledné rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy se určí z jednotlivých příspěvků tepelných toků infračervených zářičů na jednotlivé elementární plošky formy. Přiřazení hustoty tepelného toku konkrétnímu elementu je možné díky naměřeným výkonovým charakteristikám. Naměřených výkonových charakteristik však existuje pouze určité konečné množství.



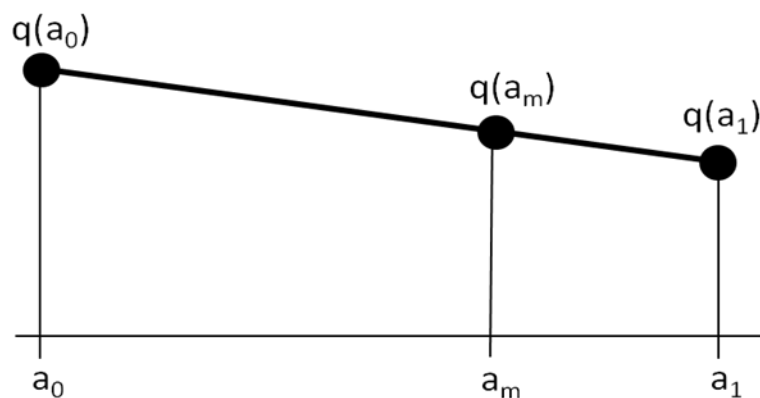
Aby bylo možné postihnout jakoukoliv vzájemnou pozici infračerveného zářiče a elementární plošky formy, byla do výpočtu distribuce tepelného toku zahrnuta lineární interpolace změřených hodnot.

Základní přístup k tomu, jak využít a realizovat vícenásobnou lineární interpolaci na datech naměřených hustot tepelných toků pochází z práce [3]. Algoritmus výpočtu uvedený v [3] byl modifikován o metodu vyhledávání a třídění vhodných dat vstupujících do interpolace.

#### **7.1.1. Pěti-rozměrná lineární interpolace**

Při načítání textového souboru se záznamem změřených hustot tepelných toků  $q$  je pro simulaci distribuce tepelného toku s využitím lineární interpolace výhodnější přepočítat náklony čidla z kartézského souřadného systému do systému sférického. Poloha čidla a konkrétní hodnota hustoty tepelného toku je vůči zářiči popsatelná pěti souřadnicemi, a to polohou  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a úhly  $\varphi$  a  $\theta$ . Tyto stejné souřadnice je možné získat z modelu ze vzájemné polohy elementární plošky formy a zářiče. Pro určení hustoty tepelného toku na elementární plošce formy s využitím lineární interpolace by v případě jednorozměrné úlohy stačily  $2^1$  hodnot. Zde je však souřadnic pět, proto je potřeba získat hodnot  $2^5$ . Těchto 32 hustot tepelných toků, představujících pro lineární interpolaci krajní hodnoty, je možné získat vzájemným porovnáváním jejich souřadnic z měření se souřadnicemi z modelu [3].

Nejdříve je nutné soubor všech změřených hustot tepelných toků rozlišit podle typu zářiče. Následně se takto získaný soubor hustot tepelných toků roztrídí postupně podle všech souřadnic. Průběžnou eliminací nehodících se položek se nakonec získá 32 krajních bodů pro lineární interpolaci. Ke každé souřadnici obecně označené písmenem  $a$  se v případě měření přidává index 0 nebo 1 podle toho, zda se jedná o levou či pravou krajní hodnotu z pohledu modelové souřadnice označené indexem  $m$ , viz obr. 16.



obr. 16: Lineární interpolace.

Získané krajní hodnoty hustot tepelných toků se podle přiložené pěti-bitové informace seřadí podle velikosti, viz Tabulka 3.

Tabulka 3

hustota tepelného toku	souřadnice					index x	index y	index z	index $\varphi$	index $\theta$
	$x_1$	$y_1$	$z_1$	$\varphi_1$	$\theta_1$					
$q_1$	$x_1$	$y_1$	$z_1$	$\varphi_1$	$\theta_1$	0	0	0	0	0
$q_2$	$x_2$	$y_2$	$z_2$	$\varphi_2$	$\theta_2$	0	0	0	0	1
$q_3$	$x_3$	$y_3$	$z_3$	$\varphi_3$	$\theta_3$	0	0	0	1	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$q_{32}$	$x_{32}$	$y_{32}$	$z_{32}$	$\varphi_{32}$	$\theta_{32}$	1	1	1	1	1

Do interpolace vstupují sousední  $n$ -tice prvků hustot tepelných toků, lišící se pouze na pozici bitu odpovídající konkrétní souřadnici. S interpolací hustot tepelných toků se začíná u sousedních dvojic prvků, které se liší pouze na pozici nejnižšího bitu (z Tabulka 3 je to souřadnice  $\theta$ ). Takto interpolované sousední hustoty tepelných toků se opět liší pouze na pozici následujícího bitu (z Tabulka 3 je to souřadnice  $\varphi$ ). Proto na nových dvojicích hustot tepelných toků (vzniklých již ze čtyř položek Tabulka 3) se opět provádí lineární interpolace vzhledem k nové souřadnici. Tímto způsobem se Tabulka 3 prochází dál, až se získá výsledná hodnota hustoty tepelného toku pro konkrétní elementární plošku formy. Pro operace lineární interpolace se využilo následujících vztahů získaných z [3].

$$s = \frac{a_m - a_0}{a_1 - a_0}, \quad (1)$$

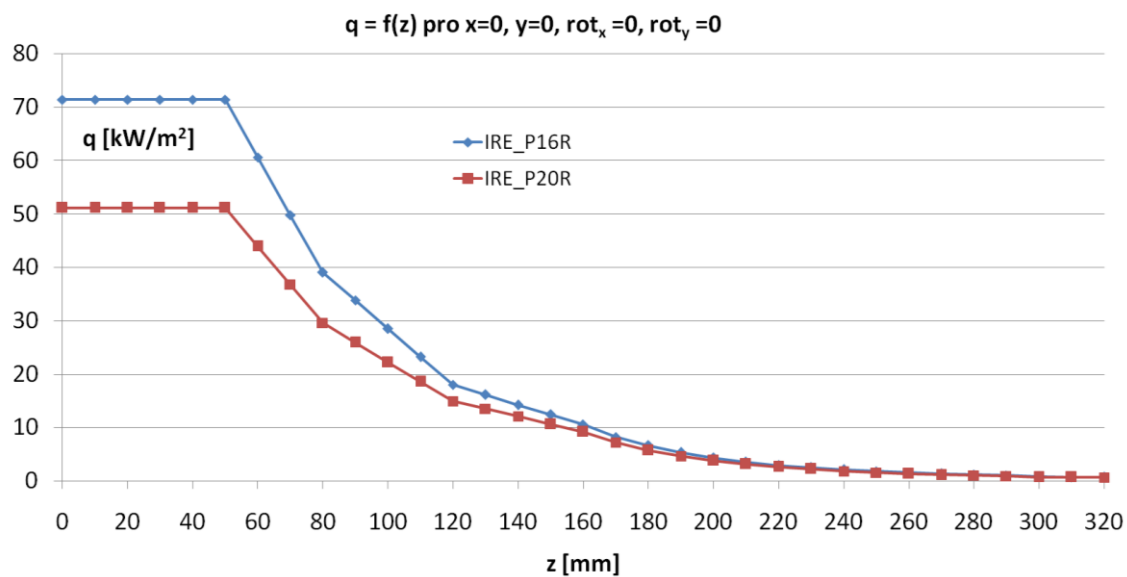
$$q(a_m) = (1 - s)q(a_0) + sq(a_1). \quad (2)$$

Jelikož se změřené hustoty tepelných toků nachází pouze v jednom kvadrantu prostoru pod zářičem (zářič je symetrický podle dvou os), je nutné před vlastní operací interpolace transformovat obecné modelové souřadnice konkrétní elementární plošky právě do tohoto proměřeného kvadrantu souřadného systému zářiče [3].

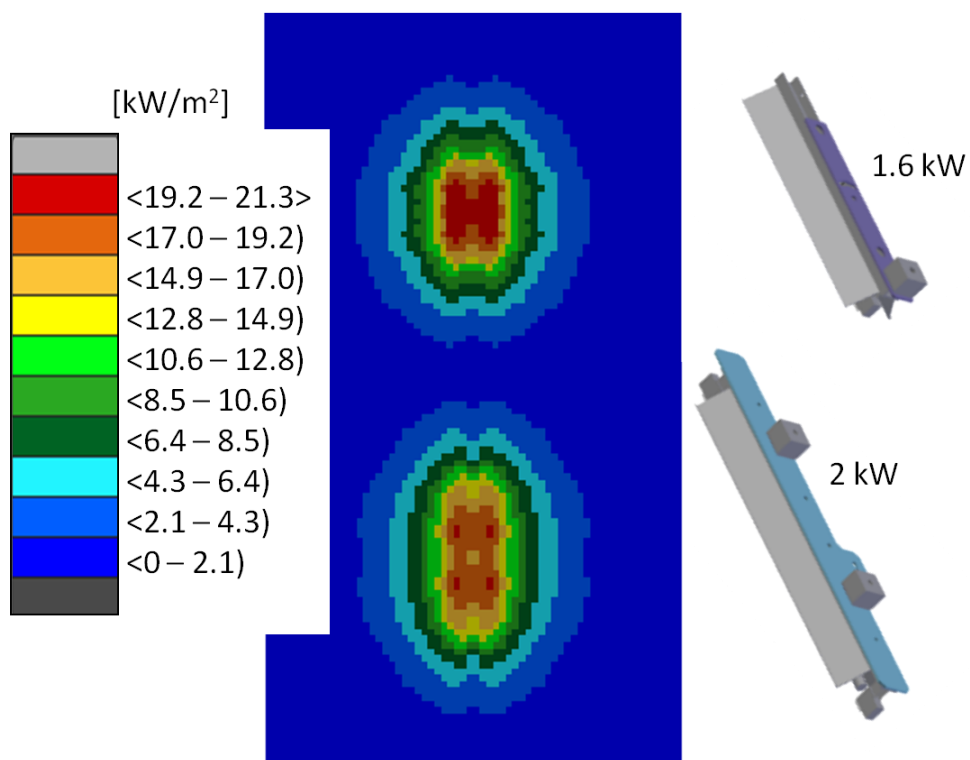
Vzhledem k vysokému počtu elementárních plošek modelu formy (desítky až stovky tisíc elementů) a značnému počtu zářičů (až 200 ks), se před operací výpočtu rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy provede tzv. předvýběr elementů pro každý zářič. To znamená, že každý zářič před spuštěním výpočtu okrajové podmínky pro teplotní analýzu zná indexy elementů, na které ještě reálně dozáhí.

Jedná se především o elementy, které jsou v rozsahu proměřené oblasti (výkonové charakteristiky) a zároveň pro zářič ještě "viditelné" (nejsou ukryty např. za hranou nebo stěnou formy). Operace předvýběru elementů významně urychluje proces interpolace.

Jak bylo již zmíněno, tak velikost hustoty tepelného toku je závislá na typu použitého zářiče. Na obr. 17 je uvedena závislost hustoty tepelného toku  $q$  na vzdálenosti  $z$  s využitím lineární interpolace na změřených datech. Rozměr  $z$  představuje vzdálenost elementární plošky  $z$  modelu formy od zářiče. Modrý průběh náleží zářiči o výkonu 1,6 kW a červený zářiči o výkonu 2 kW. V uvedeném případě je názorně vidět, že slabší zářič může lokálně působit vyšší hustotou tepelného toku. To je dané charakterem vyzařovacích vlastností jednotlivých typů infračervených zářičů, které by se v klasické radiační metodě těžko zohlednili. Z obr. 17 je též patrné, že data byla změřena v bodech 50, 80, 120 a 160 mm vzhledem ke vzdálenosti  $z$ . Spodní část průběhu pak limitně směřuje k hodnotě 0 kW/m<sup>2</sup> a horní končí na maximální hodnotě hustoty tepelného toku změřené už v těsné blízkosti zářiče. Rozdíl výkonových charakteristik různých typů zářičů dokládá i přiložený obr. 18.



obr. 17: Lineární interpolace hustoty tepelného toku.



obr. 18: Rozložení hustoty tepelného toku  $q$  [kW/m²] pro dva typy zářičů.

### 7.1.2. Paralelní výpočet teplotní okrajové podmínky IREview

Před následnou teplotní analýzou stačí provést simulaci teplotní okrajové podmínky pouze jednou. Pro optimalizaci pozic řídících termočlánků, a tedy pro výpočet teplotního pole, je teplotní nástroj IREview opakovaně spouštěn již se stejnou sadou okrajových podmínek.

V případě návrhu pozic infračervených zářičů se však operace výpočtu okrajové podmínky spouští častěji. Vzhledem k tomu, že tato operace patří při návrhu ohřevu k těm časově nejnáročnějším, bylo nutné ji zrychlit pomocí paralelních algoritmů.

Současná verze implementovaného paralelního algoritmu předpokládá, že zvolený počet jader procesoru napočítá okrajovou podmínku pro příslušný počet zářičů. Zároveň však musí být splněna následující podmínka, že

$$\text{počet použitých jader procesoru} \leq \text{počtu zářičů.} \quad (3)$$

To znamená, že v současnosti více jader procesoru zatím neumí urychlit výpočet okrajové podmínky např. pouze pro jeden zářič. Výpočet okrajové podmínky, zahrnující lineární interpolaci, však umožňuje algoritmus paralelního výpočtu více zobecnit a tak ještě více zkrátit dobu simulace. Současná doba paralelního výpočtu  $t_p$  [s] se dá přibližně určit vztahem

$$t_p \approx \frac{t}{\text{počet jader}}, \quad (4)$$

kde  $t$  [s] je doba výpočtu okrajové podmínky s využitím pouze jednoho jádra procesoru.

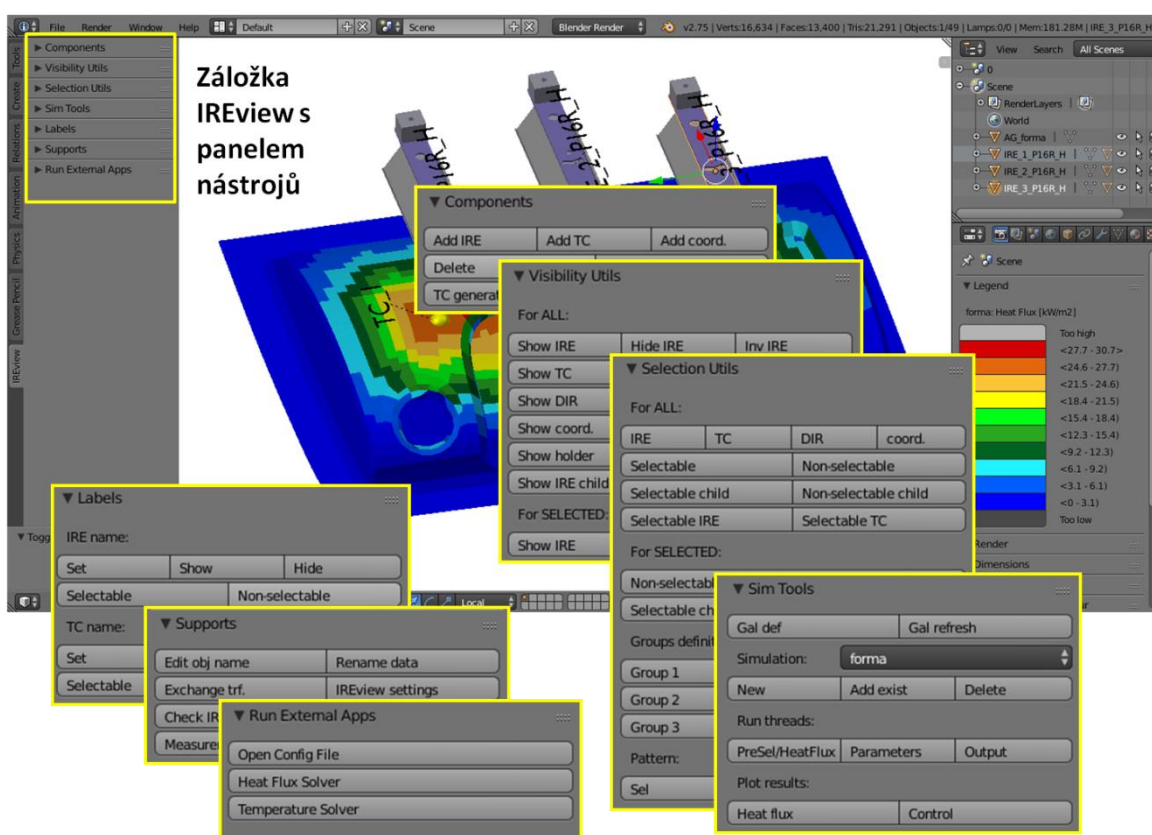
## 7.2. IREview nástroje pro práci s modelem

Pro stavbu a vyhodnocování modelu bylo nutné naprogramovat řadu dalších funkcí a přidat je do standardního panelu nástrojů prostředí Blender, viz obr. 19. Naprogramované třídy nových funkcí tak rozšířily standardní třídy programu Blender. Vše bylo realizováno s vědomím, že funkce musí být dostatečně uživatelsky intuitivní a zároveň ošetřené z hlediska vzniku chybových stavů.

Stručný přehled přidáných funkcí:

- Import/Export konečně-prvkové sítě formátu NASTRAN.
- Import/Export transformačních matic s pozicemi zářičů pro robotické polohování zářičů v lince.

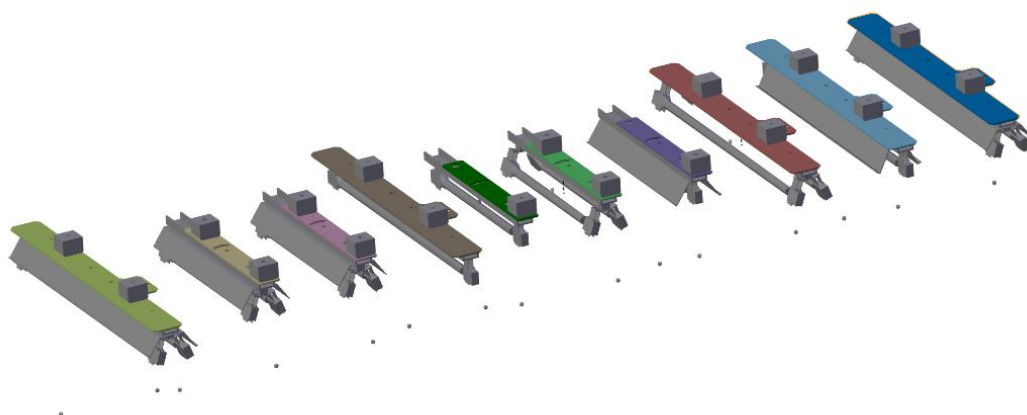
- Import/Export dat teplotního nástroje IREview.
- Export seznamu použitých zářičů a všech jejich komponent.
- Import databáze změřených výkonových charakteristik zářičů.
- Export dat pro FEM teplotní výpočty - ANSYS, MSC Marc.
- Funkce na vkládání zářičů a termočlánků do scény.
- Celá řada uživatelských funkcí pro rychlou manipulaci se zářiči a termočlánky.
- Funkce pro určení pozic termočlánků na povrchu formy.
- Automatický generátor pozic termočlánků.
- Funkce pro zobrazení a zpracování dosažených výsledků hustot tepelných toků a výsledných teplot.
- Funkce na kontrolu číslování zářičů a jejich termočlánků.
- Funkce pro práci s popisky zářičů a termočlánků.
- Funkce pro různé režimy měření na modelu.
- Funkce pro uživatelské nastavení simulačního prostředí.



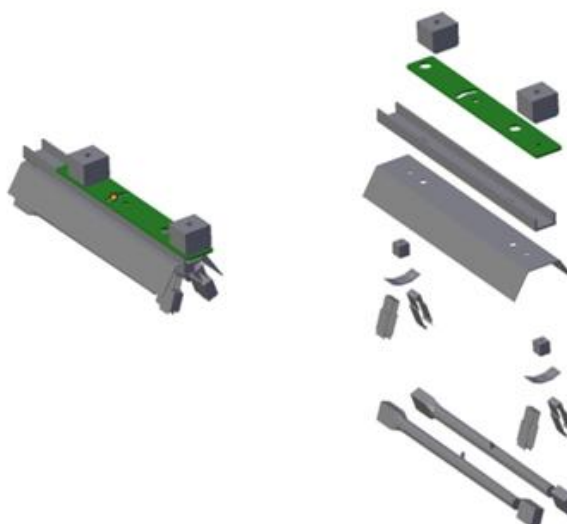
obr. 19: Panel nástrojů IREview v programu Blender.

### 7.3. Databáze zářičů

Jedna pracovní scéna programu Blender se využívá jako databáze přesných geometrií zářičů, viz obr. 20. Z té si uživatel pomocí speciálních funkcí přidává požadované typy zářičů do své pracovní scény. Zářič je pak současně automaticky spřažen se svojí databází výkonových charakteristik. Uživatel si také může každý zářič rozložit na jednotlivé komponenty, viz obr. 21.



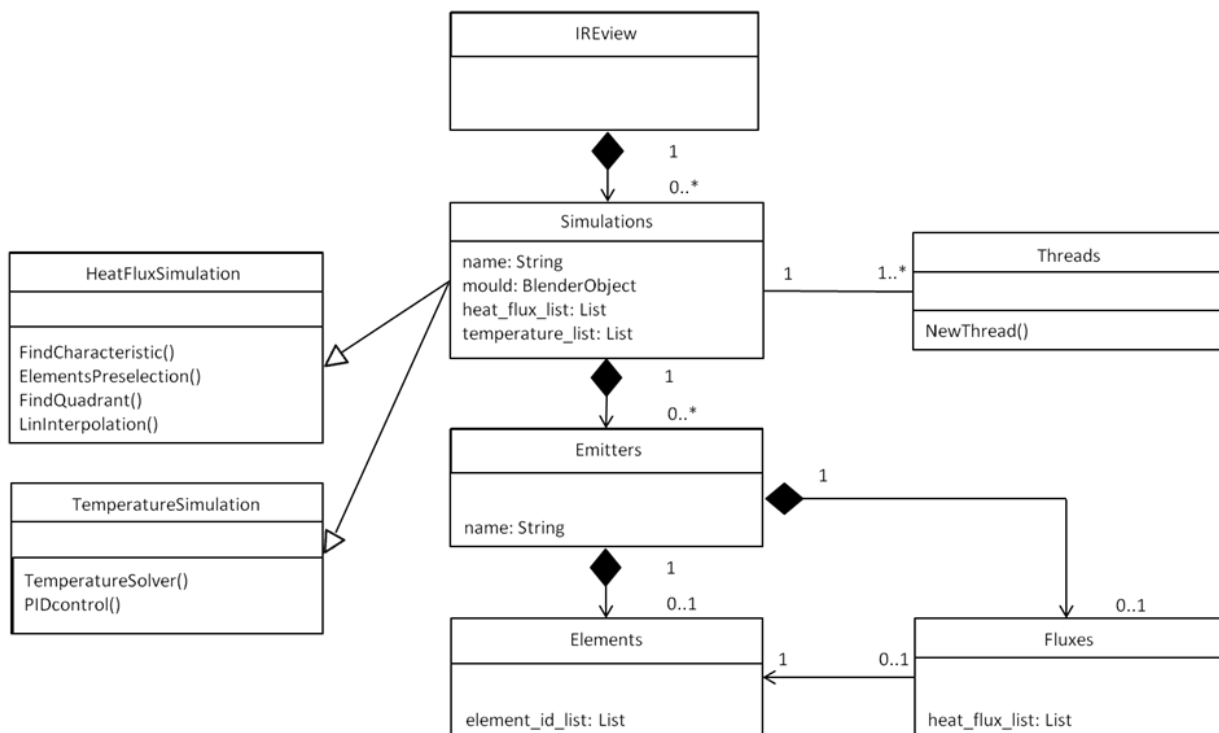
obr. 20: Databáze modelů zářičů.



obr. 21: Rozpad modelu zářiče.

## 7.4. Objektová struktura prostředí IREview

Struktura simulačního prostředí IREview byla navržena objektově, viz obr. 22.



obr. 22: Diagram tříd prostředí IREview.

Hlavním objektem je instance třídy IREview. Ta reprezentuje simulační prostředí, a tedy existuje pouze jednou. Instanci třídy IREview náleží instance třídy Simulations. Ty z hlediska uživatele představují řešené úlohy. Jejimi hlavními atributy jsou např. název úlohy, objekt reprezentující ohřívanou formu či dosažené výsledky na modelu. Děděním získávají instance třídy Simulations následující vlastnosti:

- Děděním třídy HeatFluxSimulation získávají schopnost simulovat rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy. Získávají tak metody pro načtení změřených výkonových charakteristik zářičů, předvýběr elementů z povrchu formy, transformaci polohy elementární plošky do referenčního kvadrantu souřadného systému zářiče a metodu pro lineární interpolaci.
- Děděním třídy TemperatureSimulation získávají schopnost simulovat vývoj teplotního pole na povrchu formy s využitím teplotní regulace.



Výpočet se provádí v samostatném vlákně pomocí instance třídy `Threads`. Díky tomu je možné během zrovna prováděného výpočtu dále pokračovat v práci v prostředí programu Blender (tzn. prostředí “nezamrzne”), danou úlohu řešit paralelně nebo řešit více úloh současně. Dále instanci třídy `Simulations` náleží použité zářiče. Těmi jsou instance třídy `Emitters`. Každému objektu zářiče zase náleží množina elementárních plošek z povrchu formy zasažených jeho tepelným tokem. Množinu těchto elementů reprezentuje instance třídy `Elements`. S touto množinou elementů zase úzce souvisí instance třídy `Fluxes`. Jedná se o objekt zářiče reprezentující jeho příspěvky hustot tepelných toků na vybrané elementy.

Objekt zářiče nemůže patřit více simulacím současně, neboť každá simulace se vztahuje ke konkrétnímu objektu formy. Zářič si potom v sobě uchovává výsledky hustot tepelných toků vztahujících se právě k tomuto objektu formy. Pokud nedojde ke změně polohy zářiče vůči formě nebo ke změně modelu formy, bude pro zářič dosahováno stále stejných rozložení hustot tepelných toků na povrchu formy. Proto objektu zářiče náleží maximálně jedna instance třídy `Elements` a `Fluxes`. Také není možné aby instance třídy `Elements` a `Fluxes` patřily více zářičům. Znamenalo by to, že více zářičů dosahuje stejných výsledků, a že by poloha těchto zářičů byla shodná. V realitě by to znamenalo kolizi zářičů.

Pokud zanikne instance třídy `IREview`, zanikne i instance třídy `Simulations`. Pokud zanikne instance třídy `Simulations`, zanikne i instance třídy `Emitters`. Pokud zanikne instance třídy `Emitters`, zanikají i instance tříd `Elements` a `HeatFluxes`.

Následující příkazy ukazují jakým způsobem se dá v příkazovém řádku dostat k indexu předvybraného elementu z povrchu formy pro konkrétní zářič a jakou hustotou tepelného toku tento zářič na element působí.

```
elem_id= ireview.simulations[id1].emitters[id2].elements.element_id_list[id3]
```

```
heat_flux= ireview.simulations[id1].emitters[id2].fluxes.heat_flux_list[id3]
```

*id1* je index položky z listu simulací

*id2* je index položky z listu zářičů

*id3* je index položky z listu indexů elementů či hustot tepelných toků (rozměr těchto listů je stejný a pořadí položek si odpovídá)

Dosažené výsledky jsou v prostředí IREview dvojího typu:

- Výsledky ze simulace okrajové podmínky. Jedná se o příspěvky hustot tepelných toků od jednotlivých zářičů.
- Výsledky z teplotního nástroje IREview. Ten poskytuje výsledky v každém kroku simulace, resp. v každém kroku regulace teploty. Jedná se o teplotní výsledky a nasčítané hustoty tepelných toků od jednotlivých zářičů v daném kroku simulace.

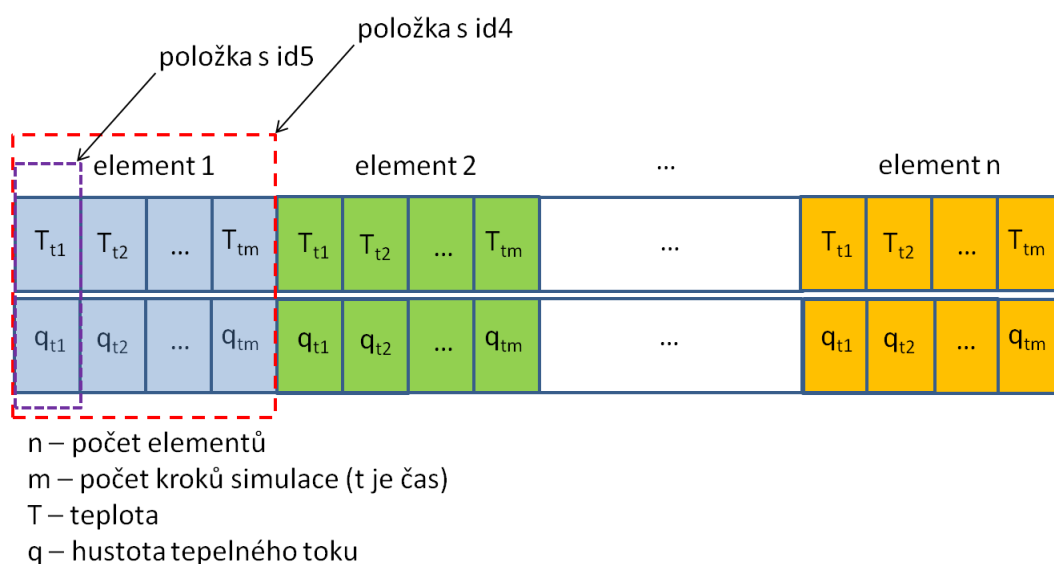
Následující příkazy ukazují, jaký způsobem se dá v příkazovém řádku dostat k jednotlivým položkám výsledků z teplotního nástroje IREview, viz obr. 23.

*heat\_flux= ireview.simulations[id1].heat\_flux\_list[id4][id5]*

*temperature= ireview.simulations[id1].temperature\_list[id4][id5]*

*id4* je index položky z listu výsledků pro jednotlivé elementy

*id5* je index položky z listu výsledků pro konkrétní element a určuje krok simulace



obr. 23: Struktura výsledků teplotního nástroje IREview.

## 7.5. Záloha dat a struktura IREview souboru

Pro zálohu výsledků simulace z prostředí IREview byla navržena struktura textového souboru s příponou \*.res. V jednom textovém souboru je tak možné uchovávat jak výsledky ze simulace okrajové podmínky, tak výsledky z regulovaného teplotního výpočtu. Výsledkový soubor je i současně vstupem do prováděných simulací v IREview. Získané výsledky tak rozšíří či přepíší vstupní soubor. Následující body shrnují význam jednotlivých bloků textového souboru vymezených klíčovými slovy START a END, viz obr. 24:

- Heat flux - zde jsou uvedené výsledky ze simulace teplotní okrajové podmínky pro jednotlivé infračervené zářiče. Pro každý zářič je uveden jeho název, název a parametry jeho řídicího termočlánku a výčet hustot tepelných toků jakými přispívá na jednotlivé elementy. Pro každý ozářený element je zde i uložena informace o jeho poloze vůči zářiči (souřadnice  $x, y, z, \varphi, \theta$  viz Tabulka 3).
- Neighbours - pro teplotní nástroj IREview je nutné znát čísla sousedních elementů pro každý element. Sousední elementy mají společnou hranu.
- ControlFlux - pro každý element je v každém kroku simulace uložena jeho hodnota hustoty tepelného toku. Hustota tepelného toku zde představuje součet jednotlivých příspěvků hustot tepelných toků od více zářičů, které jsou zrovna aktivní v daném kroku simulace resp. v daném kroku regulace teploty.
- Temperatures - pro každý element je v každém kroku simulace uložena jeho teplota.
- Parameters - zde jsou uloženy parametry pro teplotní nástroj IREview.



- Do vnitřního prostoru formy je současně vháněn horký vzduch upravující průběh vzniku umělé kůže.
- Skořepinová forma je galvanickou metodou zhotovena z niklu. Technologie výroby formy může způsobovat různé nehomogenity materiálu v objemu formy.
- Samotné zářiče jsou vystavené vysokým teplotám okolí. Musí odolávat silným otřesům a časem dochází i k jejich znečištění od výrobního prášku. Zářiče tedy časem mění své původní vyzařovací schopnosti.
- Povrchová úprava formy může mít na svědomí schopnost formy teplo odrážet či pohlcovat. Zde rozhoduje, zda je forma lesklá či matná, nebo zda je světlá či tmavá. V tomto případě je také nutné upozornit na skutečnost, že povrch formy se v procesu výroby postupně opaluje.
- Do nového cyklu výroby umělé kůže vstupuje forma nerovnoměrně zchlazená.

## 8.1. Teplotní výpočty v CAE

Při stavbě modelu se dbá na to, aby model co nejvěrohodněji odpovídal simulované skutečnosti. Ale jak už bývá zvykem v CAE výpočtech, model nikdy nemůže na 100% odpovídat realitě. Simulace radiačního ohřevu skořepinových forem tomu také není výjimkou. V simulaci není možné zohledňovat všechny vlivy na průběh ohřevu formy. To je způsobeno tím, že mnohé vlivy se v procesu výroby těžko identifikují. Následující body shrnují předpoklady při kterých byla provedena simulace:

- Teplota okolí formy je zadána na všech místech stejně a to grafem nebo funkcí.
- Materiálový model je považován za homogenní a isotropní.
- Materiálové vlastnosti nejsou závislé na teplotě.
- Zanedbává se přestup tepla z formy do prášku.
- Vyzařovací vlastnosti zářičů jsou teplotně i časově stálé.
- Počáteční teplota formy je na všech místech stejná.
- Předpokládají se ztráty vlivem radiace a konvekce do okolí.
- Radiační vliv dalších konstrukcí se zanedbává.
- Pokud se simuluje ohřev prototypové formy (forma existuje pouze v CAD datech) je tloušťka formy všude stejná.

Skořepinovou formu je nejvhodnější modelovat pomocí skořepinových SHELL prvků. SHELL prvek má standardně stranu TOP a stranu BOTTOM představující stranu ohřevu a stranu vzniku umělé kůže. Tyto strany se především využívají pro aplikaci okrajových podmínek. Interpolací výsledků je možné sledovat průběh teplot ve více vrstvách elementu. Ohřev se při tom řeší buď radiační metodou či teplotní podmínkou z programu IREview.

Vzhledem k již diskutovaným nevýhodám simulace ohřevu v CAE softwaru, se takto simuluje pouze fáze počátečního "nakopnutí" formy tepelnou energií a to od všech zářičů najednou. Simulace tedy končí prvním dosažením požadované teploty někde na povrchu formy. Simulace delšího času ohřevu by tak ztrácela smysl, neboť ohřev bez regulace teploty by probíhal velmi nerovnoměrně a nesplňoval by podmínky ohřevu. Kvalita navrženého ohřevu se také na nerovnoměrně ohřáté formě těžko posuzuje.

### 8.1.1. Rovnice vedení tepla

Následující kapitola vznikla na základě studia díla [4].

Vlivem teplotních gradientů v objemu formy vznikají tepelné toky. V určitém okamžiku je možné v libovolném bodě formy stanovit tepelný tok  $Q$  [W]. Vztáhne-li se tepelný tok k ploše kolmé ke směru toku, získá se vektor hustoty tepelného toku  $\vec{q}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. Vztah mezi hustotou tepelného toku a teplotou  $T$  [K] v homogenním isotropním prostředí formy popisuje Fourierova rovnice

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T, \quad (5)$$

kde  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je součinitel tepelné vodivosti.

V případě simulace ohřevu skořepinové formy se uplatňuje rovnice vedení tepla ve tvaru

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T. \quad (6)$$

Jedná se o parciální diferenciální rovnici nestacionárního vedení tepla (výsledná teplota je funkcí polohy i času), kde levá strana rovnice představuje akumulací člen a pravá vodivostní člen. Symbol  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je hustota a  $c$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita materiálu, z něhož je forma zhotovena. Pro úplný popis řešené úlohy musí být rovnice vedení tepla doplněna o počáteční a okrajové podmínky.

### 8.1.2. Počáteční a okrajové podmínky

Následující kapitola vznikla na základě studia díla [4].

Každá forma cykluje ve výrobním procesu. To znamená, že do nového výrobního procesu se forma dostane již trochu přehřátá z předchozího výrobního cyklu. Teplotní pole na povrchu formy však na začátku výroby není možné predikovat. Proto se v simulaci zadává všude stejná počáteční teplota

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (7)$$

Všechny fyzikální vlivy působící na proces ohřevu formy se v simulaci zadávají pomocí okrajových podmínek. Okrajová podmínka prvního druhu (Dirichletova podmínka) se v simulaci ohřevu skořepinových forem uplatňuje především v souvislosti s radiačním ohřevem, kde se na plošku představující zářící objekt zadává konkrétní teplota

$$T = \text{const}. \quad (8)$$

Povrch formy se od přilehlých zářičů ohřívá pomocí druhé okrajové podmínky (Neumannova podmínka) získané nástroji IREview. Ta představuje aplikaci hustoty tepelného toku na vnějším povrchu formy, který je označený jako hranice  $\Gamma_1$  a kde platí, že

$$q(x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x), \quad (9)$$

kde  $x \in \Gamma_1$ .

Ohřívání nebo ochlazování formy vlivem okolního prostředí se realizuje pomocí třetí okrajové podmínky (Newtonova podmínka) ve tvaru

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x) = \alpha(T_a - T(x)). \quad (10)$$

Uvedený tvar okrajové podmínky je charakteristický pro přenos tepla vlivem konvekce, kde  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je koeficient přestupu tepla a  $T_a$  [K] je teplota okolí. Dále platí, že  $x \in \Gamma_2$ , kde hranice  $\Gamma_2$  je vnitřní plocha formy na níž se aplikuje koeficient přestupu tepla. Takovéto uspořádání okrajových podmínek vychází z předpokladu, že na stranu ohřevu není možné aplikovat jak hustotu tepelného toku, tak současně koeficient přestupu tepla. Pokud se simuluje chlazení formy, nikoliv její ohřev, je možné

koeficient přestupu tepla aplikovat na obě strany formy, tedy na hranici  $\Gamma$ , pro kterou platí, že

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2. \quad (11)$$

Pokud se povrch formy ohřívá či ochlazuje vlivem radiace (myšleno jako přestup tepla z okolí či do okolí), získává třetí okrajová podmínka tvar

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x) = \varepsilon \sigma (T_a^4 - T(x)^4), \quad (12)$$

kde  $\varepsilon$  [-] je emisivita povrchu formy,  $\sigma$  [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ] je Stefan-Boltzmannova konstanta. Konvekci a radiaci lze spolu kombinovat a tudíž je lze aplikovat na stejnou hranici.

### 8.1.3. Radiační výpočet

Pokud se simuluje ohřev povrchu formy klasickou radiační metodou, je třeba získat rozložení tepelného toku na povrchu formy od přilehlých zářičů. Pokud je uvažovaný zářič jednoduchá plocha (s číslem 1) a ozařovanou plochou je elementární ploška z modelu formy (s číslem 2), bude aplikovaný tepelný tok na elementu roven

$$Q_2 = A_1 F_{12} \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - A_2 F_{21} \varepsilon_2 \sigma T_2^4, \quad (13)$$

kde  $\varepsilon_1$  a  $T_1$  jsou emisivita a teplota plochy 1 (zářiče),  $\varepsilon_2$  a  $T_2$  jsou emisivita a teplota plošky 2 (elementu)  $A$  [ $\text{m}^2$ ] jsou obsahy plochy a plošky. Pohledový faktor  $F$  [-] představuje míru viditelnosti plochy 1 na plošku 2 a naopak. Určí se výrazem

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j, \quad (14)$$

kde  $i=1$  nebo  $2$ ,  $j=1$  nebo  $2$ ,  $i \neq j$ ,  $r$  [m] je přímá vzdálenost mezi středy plochy a plošky,  $\beta$  [ $^\circ$ ] jsou úhly odklonu normály plochy a plošky od spojnice  $r$ .

Pokud zářič “vidí” na všechny elementy (nebo na definovanou množinu elementů) a pokud se předpokládá, že jeho veškerý uvolněný tepelný tok dopadne na všechny tyto uvažované elementy (tedy s různou měrou “viditelnosti”) hovoří se o uzavřeném modelu a musí platit že,

$$F_{12} + F_{13} + F_{14} + \dots + F_{1n} = 1. \quad (15)$$

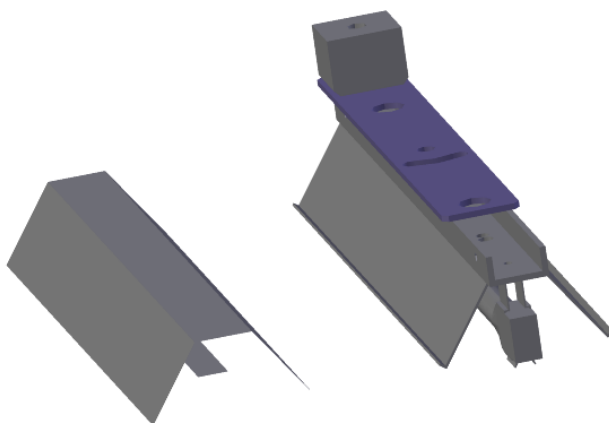
Pokud model není uzavřený, je nutné zvážit ještě vliv okolní teploty  $T_a$ .



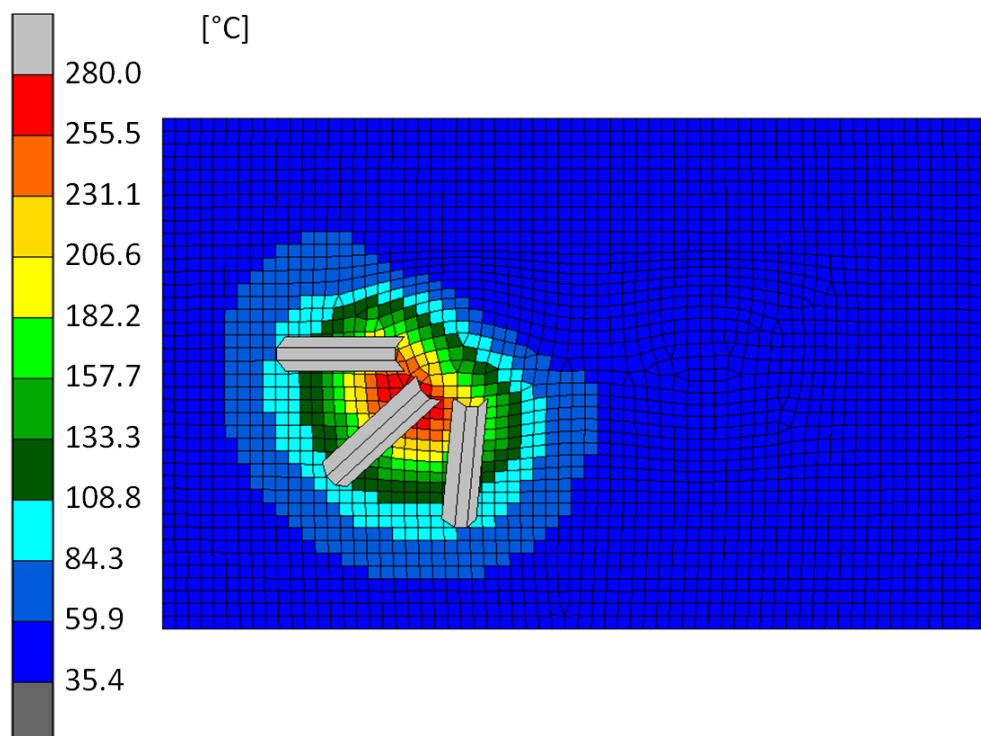
#### 8.1.4. Metoda simulace č. 2

Metoda simulace č. 2 je podobná metodě č. 1, viz Tabulka 1. V obou metodách se jedná o výpočet teplotního pole klasickou radiační metodou. V metodě č. 2 je však pro návrh pozic zářičů využit nástroj IREview. Pomocí IREview je též možné převést reálný tvar zářiče do tvaru daného jednoduchými plochami, viz obr. 25, a celý model vyexportovat do CAE softwaru pro výpočet radiační teplotní úlohy, viz obr. 26. Následující body shrnují vlastnosti úlohy představující danou metodu:

- Pro výpočet teplotního pole použít konečně-prvkový software MSC Marc.
- Ohřev radiační metodou po dobu 150 s.
- Vliv okolí - konvekce a radiace.
- Teplota okolí roste s časem.



obr. 25: Nahrazení zářiče jednoduchými plochami.



obr. 26: MSC Marc - teplotní pole [°C] spočtené radiační metodou.

## 8.2. Teplotní výpočty nástrojem IREview

Hlavní požadavky na nový teplotní nástroj IREview byly:

- Schopnost simulovat radiační ohřev formy i s regulací teploty s ohledem na možnost optimalizovat pozice zářičů a řídicích termočlánků.
- Vysoká rychlost řešení nestacionárního vedení tepla, zahrnující vedení tepla v objemu formy, radiaci a konvekci.
- Schopnost často a rychle vyměňovat okrajovou podmínku v průběhu simulace ohřevu. Okrajová podmínka je aplikovaná na povrchu formy od přilehlých zářičů a představuje rozložení hustoty tepelného toku. Ta vychází ze simulace okrajové podmínky IREview a respektuje reálné vyzařovací schopnosti daných typů infračervených zářičů.
- Možnost nasazení paralelních výpočtů pro vyšší rychlost prováděných simulací a řešení optimalizačních úloh.

Následující body shrnují výpočtové podmínky, pro které je teplotní nástroj IREview navržen:

- Forma je tvořena řádově desítkami až stovkami tisíc elementů.

- Pro ohřev jedné formy může být potřeba až 200 ks zářičů.
- Každý zářič má na povrchu formy umístěn termočlánek. Každá dvojice zářič-thermočlánek je propojena s regulátorem, jehož spínací frekvence je 1Hz. To znamená, že každou 1s z doby ohřevu je nutné znovu napočítat hustotu tepelného toku od aktivních zářičů na všech elementech sítě.
- Simuluje se především do okamžiku dosažení požadovaného teplotního pole na povrchu formy. V praxi tento dosažený stav odpovídá okamžiku, kdy dochází k vysypání formy výrobním práškem. To trvá řádově desítky sekund až jednotky minut.

### 8.2.1. Princip řešení teplotní úlohy v IReview

Následující body shrnují způsob řešení úlohy nestacionárního ohřevu formy:

- Výrobní forma je tenkostěnná. Její tloušťka je cca 4 mm. Z toho plyne významný zjednodušující princip teplotního nástroje. Ten předpokládá, že rozdíl teplot vespod a na povrchu formy je zanedbatelný a tudíž vedení tepla po tloušťce formy je také zanedbatelné.
- Forma se ohřívá aplikací hustoty tepelného toku od přilehlých zářičů. Také dochází k přenosu tepla mezi formou a okolím vlivem konvekce a radiace.
- Všechny zdroje i ztráty tepla jsou vztaženy k objemu elementu.
- V každém novém kroku simulace se vyřeší tepelná bilance mezi sousedními elementy a jejich okolím.
- Nejdříve se původní teplota elementu změní v důsledku jeho tepelné změny (vliv zářičů, konvekce a radiace). Tento děj představuje proces akumulace tepelné energie.
- Následuje proces vedení tepla. Ten je realizován váženým průměrem teplot sousedních elementů.
- Úloha je vzhledem k použitému mechanismu pro vedení tepla závislá na třech atributech modelu. Těmi jsou velikost časového kroku simulace, kvalita sítě, jenž je vygenerovaná na povrchu formy a materiálové vlastnosti formy.

### 8.2.2. Akumulace tepla v IREview

Výsledný výkon na každém elementu formy s indexem  $e$  je  $P^e$  [W.m<sup>-3</sup>] a je daný vztahem

$$P^e = Q^e - Z^e, \quad (16)$$

kde  $Q^e$  [W.m<sup>-3</sup>] je výkon dodaný elementu od zářičů a  $Z^e$  [W.m<sup>-3</sup>] je výkon dodaný či ztracený vlivem okolí. Výsledný výkon na elementu se též spočítá

$$P^e = \frac{J^e}{V^e \Delta t}, \quad (17)$$

kde  $J^e$  [J] je výsledná bilance tepla na elementu,  $V^e$  [m<sup>3</sup>] je objem elementu a  $\Delta t$  [s] je časový krok simulace. Výsledné teplo na elementu je teplo potřebné na změnu teploty elementu z  $T_{t_1}^e$  [K] na teplotu  $T_{t_2}^e$  [K], kde  $t_2 = t_1 + \Delta t$ , kde  $t_2$  [s] je čas konce kroku simulace a  $t_1$  [s] je čas počátku kroku simulace.

Teplo potřebné na změnu teploty elementu se určí z kalorimetrické rovnice

$$J^e = m^e c (T_{t_2}^e - T_{t_1}^e) = \rho V^e c (T_{t_2}^e - T_{t_1}^e), \quad (18)$$

kde  $m^e$  [kg] je hmotnost elementu,  $c$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita a  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] je hustota.

Výkon dodaný elementu od zářičů se určí vztahem

$$Q^e = \frac{q^e}{d^e}, \quad (19)$$

kde  $q^e$  [W.m<sup>-2</sup>] je hustota tepelného toku na povrchu elementu formy a  $d^e$  [m] je tloušťka elementu.

Vliv okolí  $Z^e$  [W.m<sup>-3</sup>] představuje vliv současně konvekce i radiace mezi elementem a okolím. Určí se ze vztahem

$$Z^e = \frac{\alpha(T_{t_2}^e - T_a)}{d^e} + \frac{\delta \varepsilon (T_{t_2}^{e^4} - T_a^4)}{d^e}, \quad (20)$$

kde  $\alpha$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] je koeficient přestupu tepla,  $T_a$  [K] je teplota okolí,  $\delta$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>] je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $\varepsilon$  [-] je emisivita povrchu formy. Teplota okolí může být konstanta, ale i jako libovolná funkce především času.

Výslednou bilanci výkonu na elementu pak je možné zapsat rovnicí

$$\frac{\rho c(T_{t_2}^e - T_{t_1}^e)}{\Delta t} = \frac{q^e}{d^e} - \frac{\alpha(T_{t_2}^e - T_a)}{d^e} - \frac{\delta \varepsilon(T_{t_2}^{e^4} - T_a^4)}{d^e}. \quad (21)$$

Pokud z předchozí rovnice vyjme radiční člen, pak výsledná teplota bude mít tvar

$$T_{t_2}^e = \frac{\Delta t(q^e + \alpha T_a) + d^e \rho c T_{t_1}^e}{d^e \rho c + \alpha \Delta t}. \quad (22)$$

Pokud však výsledná bilance bude zahrnovat i radiaci, musí se řešit následující rovnice čtvrtého řádu

$$\frac{\delta \varepsilon T_{t_2}^{e^4}}{d^e} + \frac{\rho c T_{t_2}^e}{\Delta t} + \frac{\alpha T_{t_2}^e}{d^e} - \frac{\rho c T_{t_1}^e}{\Delta t} - \frac{q^e}{d^e} - \frac{\alpha T_a}{d^e} - \frac{\delta \varepsilon T_a^4}{d^e} = 0. \quad (23)$$

Tato rovnice odpovídá obecné rovnici čtvrtého řádu

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0, a \neq 0, \quad (24)$$

kde

$$a = \frac{\delta \varepsilon}{d^e}, \quad (25)$$

$$b = 0,$$

$$c = 0,$$

$$d = \frac{\rho c}{\Delta t} + \frac{\alpha}{d^e},$$

$$e = -\frac{\rho c T_{t_1}^e}{\Delta t} - \frac{q^e}{d^e} - \frac{\alpha T_a}{d^e} - \frac{\delta \varepsilon T_a^4}{d^e}.$$

Rovnice čtvrtého řádu se pak řeší podle [5] pomocí metody Ferrari.

Zavede se substituce do obecné rovnice čtvrtého řádu

$$x = y - \frac{b}{4a}. \quad (26)$$

Dostaneme redukovanou rovnici

$$y^4 + py^2 + qy + r = 0, \quad (27)$$

kde

$$p = \frac{8ac - 3b^2}{8a^2} = 0, \quad (28)$$

$$q = \frac{8a^2d + b^3 - 4abc}{8a^3} = \frac{d}{a},$$

$$r = \frac{16ab^2c - 64a^2bd - 3b^4 + 256a^3e}{256a^4} = \frac{e}{a}.$$

Pokud  $q \neq 0$  musí se řešit pomocná kubická rovnice

$$z^3 + pz^2 + \frac{(p^2 - 4r)z}{4} - \frac{q^2}{8} = 0. \quad (29)$$

Po dosazení  $z$  (28) se rovnice (29) zjednoduší na tvar

$$z^3 - \frac{ez}{a} - \frac{d^2}{8a^2} = 0. \quad (30)$$

Pokud  $q \neq 0$  má pomocná kubická rovnice kladný kořen  $z_0$ .

Rovnice (30) odpovídá obecné kubické rovnici

$$\bar{a}\bar{x}^3 + \bar{b}\bar{x}^2 + \bar{c}\bar{x} + \bar{d} = 0, \bar{a} \neq 0, \quad (31)$$

kde

$$\bar{a} = 1, \quad (32)$$

$$\bar{b} = 0,$$

$$\bar{c} = -\frac{e}{a},$$

$$\bar{d} = -\frac{d^2}{8a^2}.$$

Rovnice třetího řádu se pak řeší podle [6] pomocí Cardových vzorců.

Po vydělení obecné rovnice třetího řádu číslem  $\bar{a}$  se zavede substituce

$$\bar{x} = \bar{y} - \frac{\bar{b}}{3\bar{a}} \quad (33)$$

dostaneme redukovanou kubickou rovnici

$$\bar{y}^3 + \bar{p}\bar{y} + \bar{q} = 0, \quad (34)$$

kde

$$\bar{p} = -\frac{\bar{b}^2}{3\bar{a}^2} + \frac{\bar{c}}{\bar{a}} = -\frac{e}{a} \quad (35)$$

$$\bar{q} = \frac{2\bar{b}^3}{27\bar{a}^3} - \frac{\bar{b}\bar{c}}{3\bar{a}^2} + \frac{\bar{d}}{\bar{a}} = -\frac{d^2}{8a^2}.$$

Diskriminant kubické rovnice je

$$D = \left(\frac{\bar{p}}{3}\right)^3 + \left(\frac{\bar{q}}{2}\right)^2. \quad (36)$$

Potom hledaný reálný kořen kubické rovnice

$$z_0 = \bar{x} = \bar{y} = A + B, \quad (37)$$

kde

$$A = \sqrt[3]{-\frac{\bar{q}}{2} + \sqrt{D}}, \quad (38)$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{\bar{q}}{2} - \sqrt{D}}.$$

Potom výsledná hledaná teplota z rovnice (23) obsahující radiační člen je

$$T_{t_2}^e = x = y = \frac{-\sqrt{2z_0} + \sqrt{2z_0 - 4\left(\frac{p}{2} + z_0 - \frac{q}{2\sqrt{2z_0}}\right)}}{2}. \quad (39)$$

### 8.2.3. Vedení tepla v IREview

Pokud teplotní nástroj IREview má splňovat stanovené požadavky, bylo nutné najít nejefektivnější mechanismus výpočtu řešící přenos tepla mezi sousedními elementy.

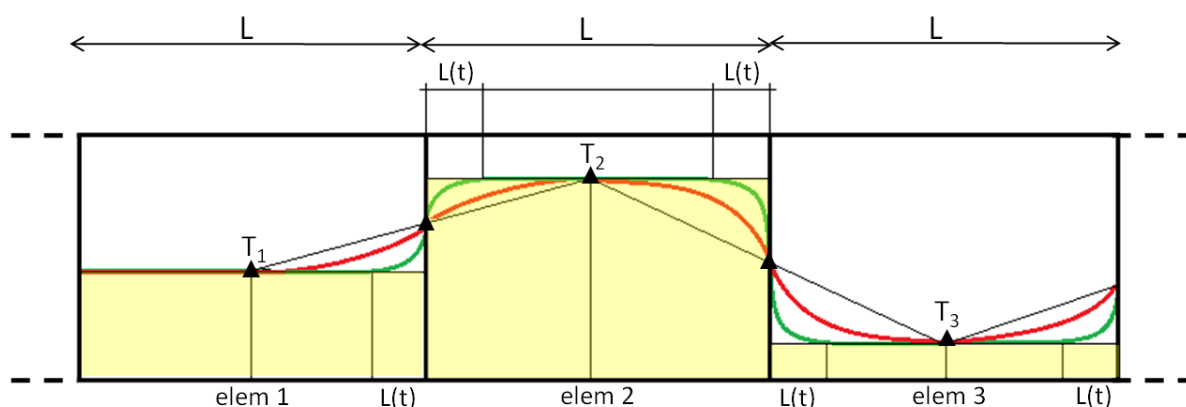
Proces akumulace a vedení tepla probíhají v realitě samozřejmě současně. Protože však rychlost šíření tepla v materiálu je závislá podle [7] na čase a materiálovém koeficientu nazývaném součinitel vedení teploty  $\chi$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ], kde

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (40)$$

je možné proces akumulace a vedení tepla za dodržení určitých podmínek rozdělit.

První otázkou tedy bylo, co se stane po provedení operace akumulace, když přiložíme k sobě dva elementy o různé počáteční teplotě.

Pokud se pro vedení tepla uvažuje bezztrátový systém, lze odpovědět, že na počátku existuje skoková změna teploty na hranici mezi elementy. Postupem času se však teploty mezi sousedními elementy vyrovnávají. Teplo z teplejšího elementu teče přes hranici do chladnějšího elementu. Proces vedení tepla po přiložení k sobě více 1D elementů o různé počáteční teplotě ilustruje obr. 27.



obr. 27: Vedení tepla v 1D elementech.

Teplota mezi elementy se vyrovnává jak je patrné z průběhu zelené a následně červené křivky. Platí, že sousední elementy jsou z téhož materiálu a stejného průřezu. Pak teplotní změna v elementu sahá do hloubky  $L(t)$ . Hloubka (délka) oblasti elementu zasážené teplotní změnou závisí tedy na čase  $t$  a zvoleném materiálu, nikoliv na množství tepelného toku. Pokud každý element má délku  $L$  a pokud teplotní změna zasáhne nejdále do vzdálenosti odpovídající polovině délky elementu,

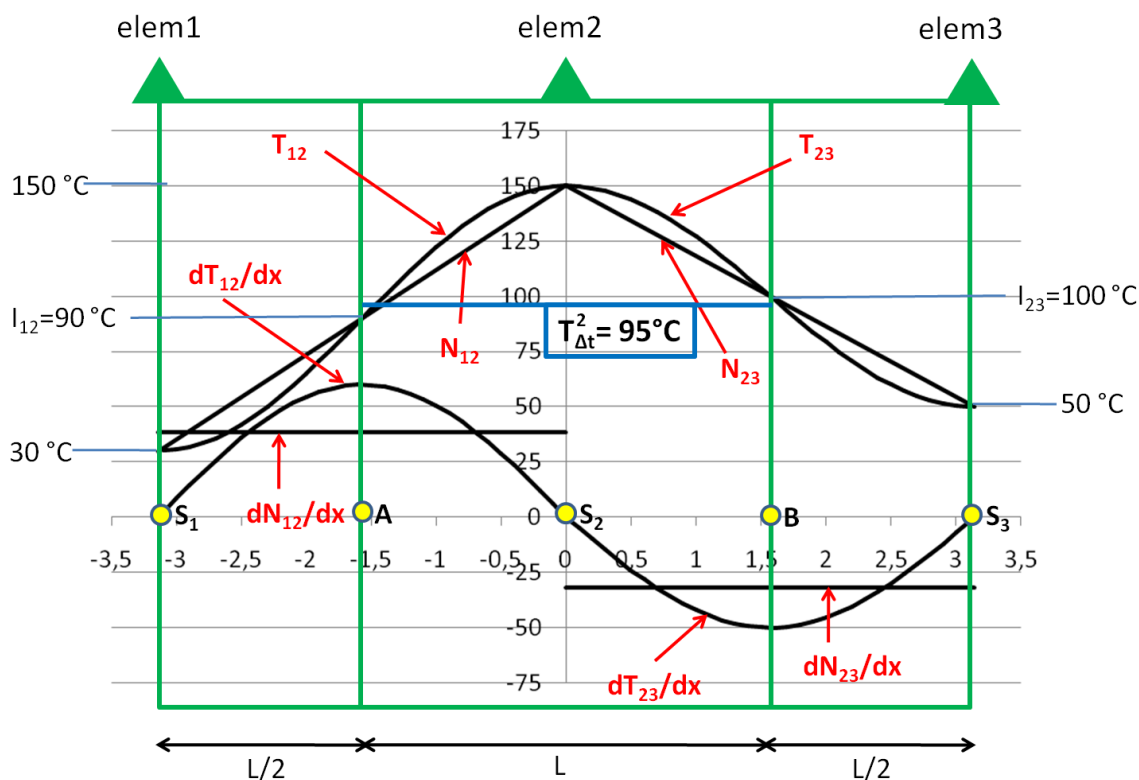
$$L(t) = \frac{L}{2}, \quad (41)$$

pak elementy, které spolu přímo nesousedí (viz elem1 a elem3) se v daném časovém kroku navzájem neovlivňují. Délka elementu  $L$  tedy závisí na zvoleném časovém kroku simulace  $\Delta t$ . Dále platí, že teplotní křivky jsou přes hranice elementů středově symetrické.

V uvedeném 1D příkladu je cílem řešení úlohy vedení tepla získat teplotu na elem2 na konci kroku simulace. Před provedením operace vedení tepla má elem2 teplotu  $T_{akum}^2$ , viz řešení rovnice (39), kde 2 je index elementu. Tato teplota vznikla po



dokončení operace akumulace tepla. Následující obr. 28 představuje příklad, kdy se teplo vlivem vedení dostalo právě ke středu sousedního elementu, viz průběhy teplot  $T_{12}$  a  $T_{23}$ .



obr. 28: Příklad teplotního průběhu na 1D oblasti.

Výsledná teplota elem2 je vzhledem k daným rozlišovacím schopnostem teplotního pole (velikost sítě - rozměr  $L$ ) dána krajními uzly A a B. V těchto uzlech se nalézají inflexní body  $I_{12}$  a  $I_{23}$ . Výsledná teplota elem2 na konci časového kroku  $\Delta t$  se určí aritmetickým průměrem teplot v inflexních bodech

$$T_{\Delta t}^2 = \frac{I_{12} + I_{23}}{2}. \quad (42)$$

V obr. 28 jsou současně zobrazeny průběhy gradientů obou teplot, viz průběhy  $dT_{12}/dx$  a  $dT_{23}/dx$ . Jak je vidět, tak na hranici elem2 dosahují své maximální hodnoty. Integrály teplotních gradientů na intervalech A až  $S_2$  a  $S_2$  až B určují celkový teplotní spád na elem2 v daném okamžiku  $\Delta t$ . V průběhu  $\Delta t$  se však teploty i jejich gradienty na úseku  $L$  mění. Proto je vhodné nahradit proměnné teplotní gradienty takovými gradienty, které budou po dobu  $\Delta t$  na úseku  $L$  konstantní. Velikosti takových gradientů

odpovídají střední hodnotě proměnných gradientů, viz průběhy  $dN_{12}/dx$  a  $dN_{23}/dx$  v libovolném čase  $t$ , kde  $t \in (0; \Delta t)$  a jejich velikost se určí vztahy

$$\frac{dN_{12}}{dx} = \frac{\int_A^{S_2} \frac{dT_{12}}{dx} dx}{L/2} = \frac{[T_{12}]_A^{S_2}}{L/2} = \frac{\Delta T_{12}}{L/2} = konst_{12}. \quad (43)$$

$$\frac{dN_{23}}{dx} = \frac{\int_{S_2}^B \frac{dT_{23}}{dx} dx}{L/2} = \frac{[T_{23}]_{S_2}^B}{L/2} = \frac{\Delta T_{23}}{L/2} = konst_{23} \quad (44)$$

Platí, že plocha pod proměnným a konstantním gradientem je na daném intervalu stejná a tudíž i jejich integrál představuje na daném intervalu stejný teplotní úbytek. Výsledný teplotní úbytek na elem2 je dán aritmetickým průměrem obou teplotních úbytků

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{12} + \Delta T_{23}}{2}. \quad (45)$$

Pak výsledná teplota na elem2 v čase  $\Delta t$  je dána vztahem

$$T_{\Delta t}^2 = T_{akum}^2 - \Delta T. \quad (46)$$

Integrál konstantních gradientů odpovídá přímkovým teplotním průběhům, viz průběhy  $N_{12}$  a  $N_{23}$ . Tyto přímky spojují středy sousedních elementů na jejich teplotách po provedené akumulaci tepla. Pomocí těchto přímek je možné najít zmíněné inflexní body, tedy teploty v uzlech A a B, které se vlivem symetrie na úseku  $L$  nachází v jejich středech. Pak je možné určit konečnou teplotu elem2 v čase  $\Delta t$ , viz rovnice (42).

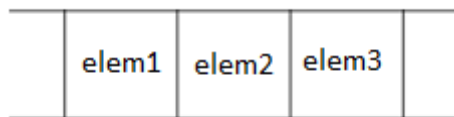
Protože výsledná teplota elem2 odpovídá střední hodnotě teplotních průběhů na intervalu  $S_1$  až  $S_3$ , je možné získat nejjednodušší výpočetní mechanismus pro určení výsledné teploty elem2. Tato operace spočívá v provedení váženého průměru sousedních teplot tak, že teplota na elem2 má po provedené akumulaci dvojnásobnou váhu oproti sousedním teplotám. Výsledná teplota na elem2 se tedy určí vztahem

$$T_{\Delta t}^2 = \frac{T_{akum}^1 + 2 \cdot T_{akum}^2 + T_{akum}^3}{4}. \quad (47)$$

Aby bylo možné použít zmíněný mechanismus pro výpočet vedení tepla mezi sousedními elementy v simulacích nestacionárního ohřevu, je nutné přizpůsobit dělení síť, tedy rozměr  $L$ , použitému materiálu a velikosti časového kroku  $\Delta t$ .

#### 8.2.4. Výpočet velikosti elementu IREview sítě o rozměru 1 x N

Zmíněný příklad vedení tepla v 1D je možné překreslit do obr. 29, představující síť o rozměru 1 x N.



obr. 29: Půdorys sítě o rozměru 1 x N čtverců.

Následující vztah vystihuje tepelnou bilanci mezi elem2 a jeho okolními elementy. Cílem je určit velikost hrany elementu čtvercové sítě, tedy rozměr  $L$ .

$$\frac{m^{e_2} c (T_{akum}^2 - T_{\Delta t}^2)}{\Delta t} = \frac{\lambda S (T_{akum}^2 - T_{akum}^1)}{L} + \frac{\lambda S (T_{akum}^2 - T_{akum}^3)}{L} \quad (48)$$

Význam jednotlivých položek bilanční rovnice je následující:

- Výraz na levé straně bilanční rovnice vystihuje ztrátový výkon, tedy tepelnou ztrátu na elem2. Ta odpovídá množství tepla, které se vlivem vedení ztratí z elem2 do sousedních elem1 a elem3 za čas  $\Delta t$ . Tepelná ztráta na elem2 tak vyvolá teplotní spád z teploty po provedené akumulaci (člen  $T_{akum}^2$ ) na teplotu výslednou (člen  $T_{\Delta t}^2$ ). Výsledná teplota je dána rovnicí (47).
- Výraz na pravé straně rovnice představuje sumu ztrátových výkonů. Tento výkon představuje teplo, které vlivem konstantního teplotního gradientu přeteče přes hranici elem2 za dobu  $\Delta t$ . Konstantní teplotní gradient má po dobu  $\Delta t$  na intervalu  $L$  tvar

$$\frac{T_{akum}^2 - T_{akum}^i}{L}, kde i = 1, 3. \quad (49)$$

- Symbol  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je tepelná vodivost.
- Symbol  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha z elementu kolmá na směr šíření tepelného toku. Je to průřez elementu po jeho hraně.

Výsledná délka hrany čtvercového elementu je

$$L = \sqrt{\frac{4\lambda\Delta t}{\rho c}}, \quad (50)$$

kde podíl  $\frac{\lambda}{\rho c}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je materiálový koeficient nazývaný součinitel vedení teploty.

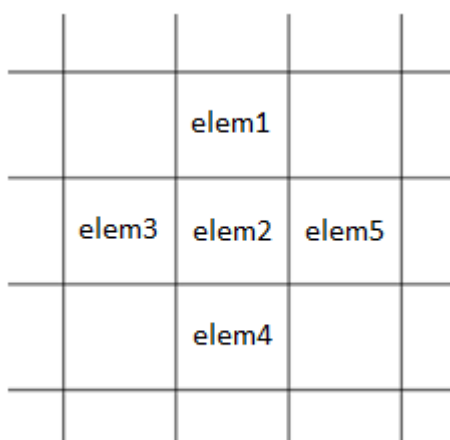
Materiál na výrobu skořepinové formy je nikl. Pro tento materiál je v následující Tabulka 4 uvedena velikost elementu sítě o rozměru 1 x N.

Tabulka 4

materiál	nikl
délka hrany elementu [mm]	9.54
krok simulace [s]	1
měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	444
vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	90
hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	8900
rozměr sítě	1 x N

### 8.2.5. Výpočet velikosti elementu IReview sítě o rozměru M x N

Zmíněný princip šíření tepla v 1D lze aplikovat i na plošnou síť, která pak představuje plochu ohříváné formy, viz obr. 30.



obr. 30: Půdorys sítě o rozměru M x N čtverců.

Tepelné toky pak v této síti směřují kolmo na hrany elementů. Pravá strana výkonové bilanční rovnice (48) bude pouze rozšířena o další dva členy a člen  $T_{\Delta t}^2$  na levé straně rovnice (48) získá nový tvar

$$T_{\Delta t}^2 = \frac{T_{akum}^1 + 2 \cdot T_{akum}^2 + T_{akum}^3 + T_{akum}^4 + T_{akum}^5}{6}. \quad (51)$$

Pak výsledná délka hrany čtvercového elementu sítě o rozměru M x N elementů je

$$L = \sqrt{\frac{6\lambda\Delta t}{\rho c}}. \quad (52)$$

Velikost hrany elementu plošné sítě je uvedena v následující Tabulka 5.

Tabulka 5

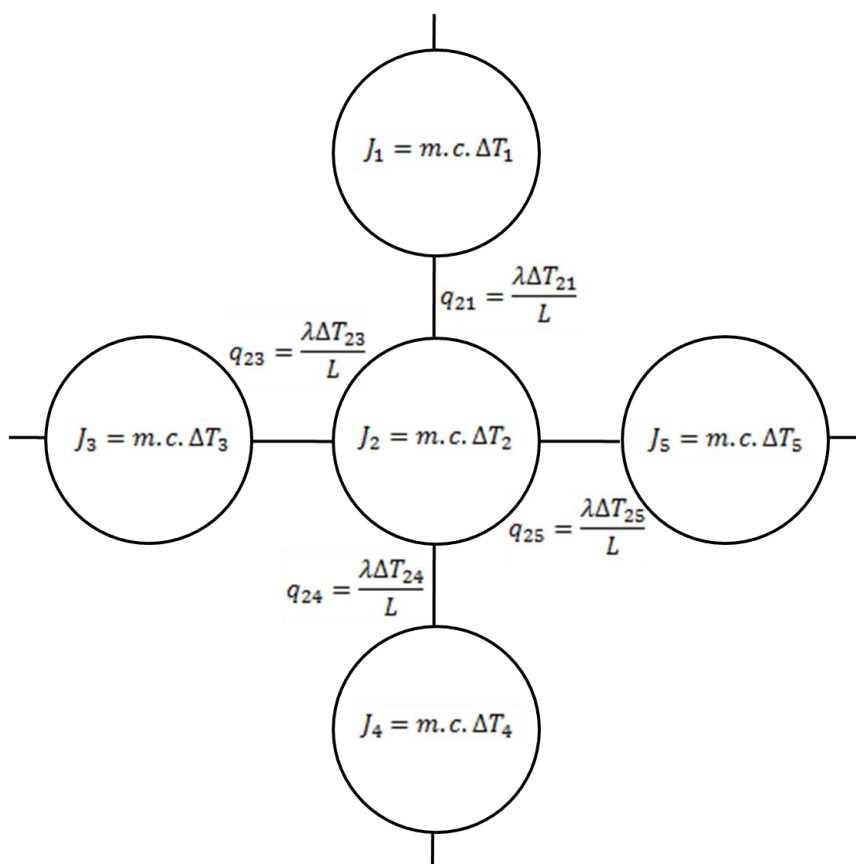
materiál	nikl
délka hrany elementu [mm]	11.69
krok simulace [s]	1
měrná tepelná kapacita [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	444
vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	90
hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	8900
rozměr sítě	M x N

### 8.2.6. Shrnutí principu fungování teplotního nástroje IREview

IREview teplotní nástroj je navržen za účelem výpočtu nestacionárního teplotního pole skořepinových forem. Společně s nástroji IREview pro manipulaci s objekty (zářiče, termočlánky, atd.) a pro simulaci ozáření povrchu formy (simulace teplotní okrajové podmínky) uceluje balík softwarových prostředků IREview pro návrh radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží.

Teplotní nástroj IREview je rychlý a jednoduchý. Není založen na řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla ani na žádném numerickém schématu a nemusí řešit žádnou soustavu rovnic. Princip řešení je založen pouze na tepelné výměně mezi sousedními elementy sítě, která je přizpůsobena časovému kroku simulace a použitému materiálu. Metoda výpočtu nestacionárního teplotního pole umožňuje jednoduchou paralelizaci a tak ještě rychleji provádět výpočty v optimalizačních smyčkách. Je navržen pro častou výměnu okrajových podmínek, simulujících "problíkávání" infračervených zářičů v průběhu regulovaného ohřevu.

Metoda výpočtu teplotního pole zde ve stručnosti vysvětlit na následujícím obr. 31. Elementární část výrobní formy představuje hmotu, jejíž energie je dána zářiči, konvekcí a radiací s okolím. Tepelný stav této hmoty určuje kalorimetrická rovnice a vazbu mezi hmotami tvoří Fourierův zákon. Charakteristický rozměr  $L$  je určen tak, aby odpovídal vzdálenosti, kterou tepelný tok urazí v daném materiálu formy za daný časový krok simulace. Po provedené operaci akumulace tepla, se výsledná teplota elementární hmoty získá váženým průměrem sousedních teplot.



obr. 31: Schéma teplotního nástroje IREview.

### 8.3. Testovací úlohy teplotního nástroje IREview

Následující kapitola ověřuje praktické využití teplotního nástroje IREview při řešení nestacionárních teplotních polí v případě radičního ohřevu skořepinových forem. Výpočty teplotního nástroje IREview budou porovnávány s výpočtem v konečně-prvkovém teplotním řešiči komerčního softwaru MSC Marc.

Teplotní nástroj IREview nepředstavuje klasický numerický řešič. Při dodržení předepsaných kritérií není teplotní nástroj IREview zatížen chybou řešení, neboť funguje pouze na principu tepelné bilance mezi elementy. Při dodržení předepsaných kritérií se jedná o přesný teplotní nástroj, jenž je "ušitý" na míru řešeného problému. Tím je myšlena volba velikosti elementu pro daný typ materiálu a velikost časového kroku. Z toho důvodu je teplotní nástroj IREview i současně kontrolou vhodnosti konečně-prvkového výpočtu. Cílem testů je tedy ověřit, že použití obou typů výpočetních metod poskytuje z praktického hlediska shodné výsledky.

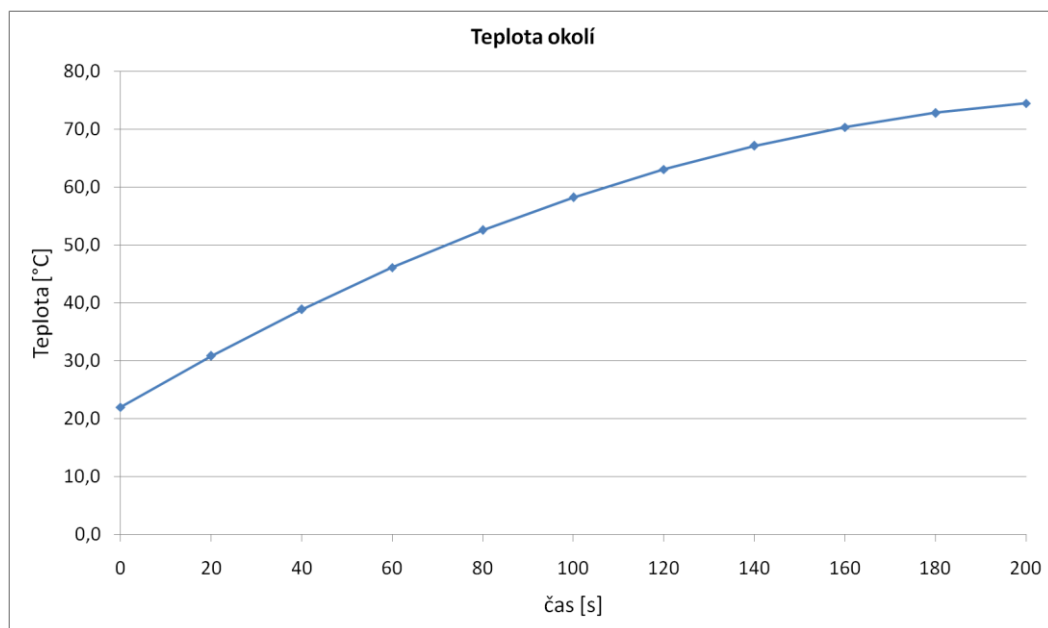
### 8.3.1. Test č. 1 na čtvercové síti o rozměrech 1 x N

Podmínky simulace:

- Zdroj hustoty tepelného toku  $80 \text{ kW/m}^2$ , viz obr. 32.
- Tloušťka elementu 4 mm.
- Vliv radiace s okolím  $\varepsilon = 0.8$ .
- Vliv konvekce s okolím  $\alpha = 0.015 \text{ kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .
- Použitý materiál, volba časového kroku a velikost elementu, viz Tabulka 4.
- Teplota okolí, viz obr. 33.
- Doba simulace 180 s.
- Počáteční teplota  $22^\circ\text{C}$ .



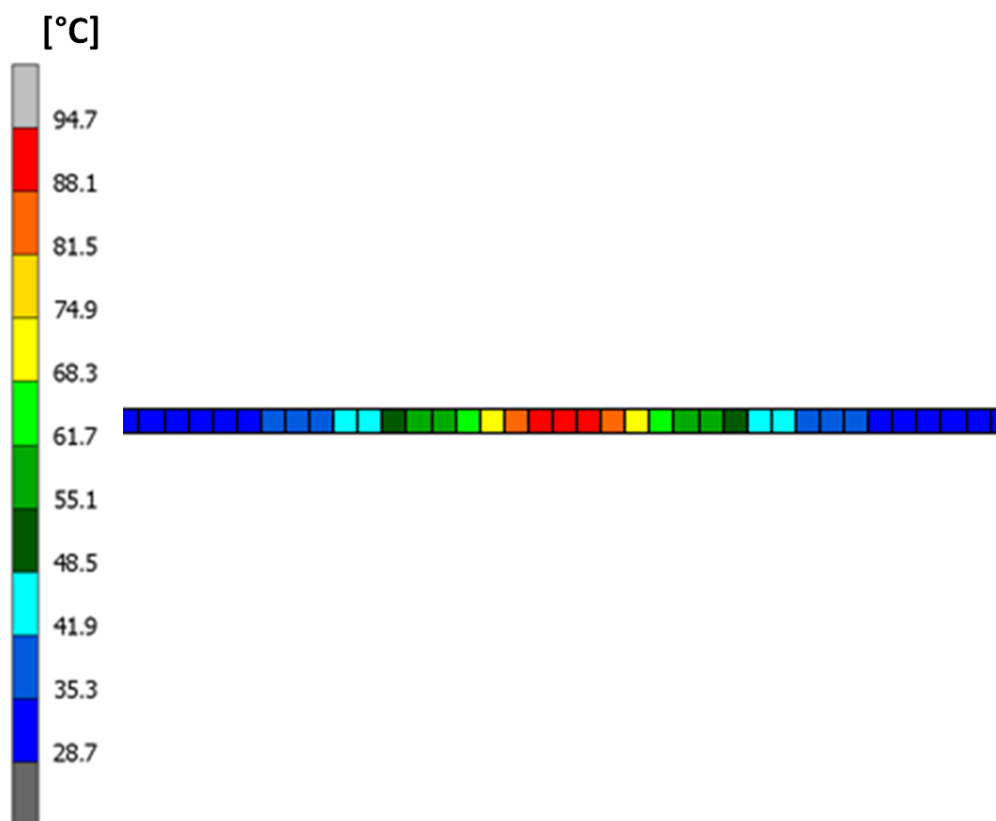
obr. 32: Bodový zdroj tepla.



obr. 33: Průběh teploty okolí.



obr. 34: Teplotní pole v IREview na konci simulace.



obr. 35: Teplotní pole v MSC Marc na konci simulace.

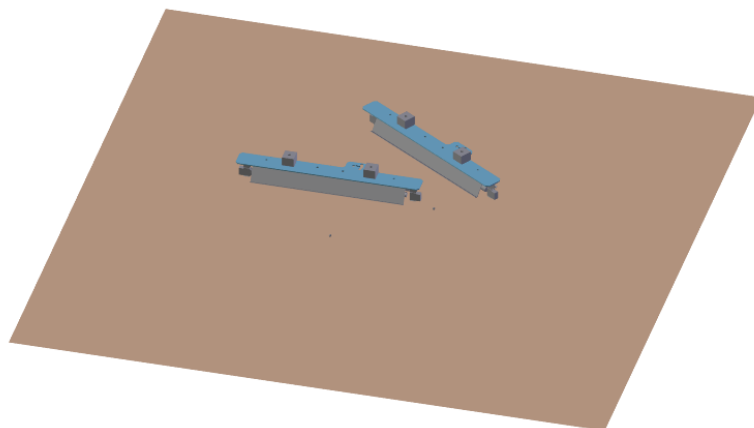
### 8.3.2. Test č. 2 na čtvercové síti o rozměrech M x N

Podmínky simulace:

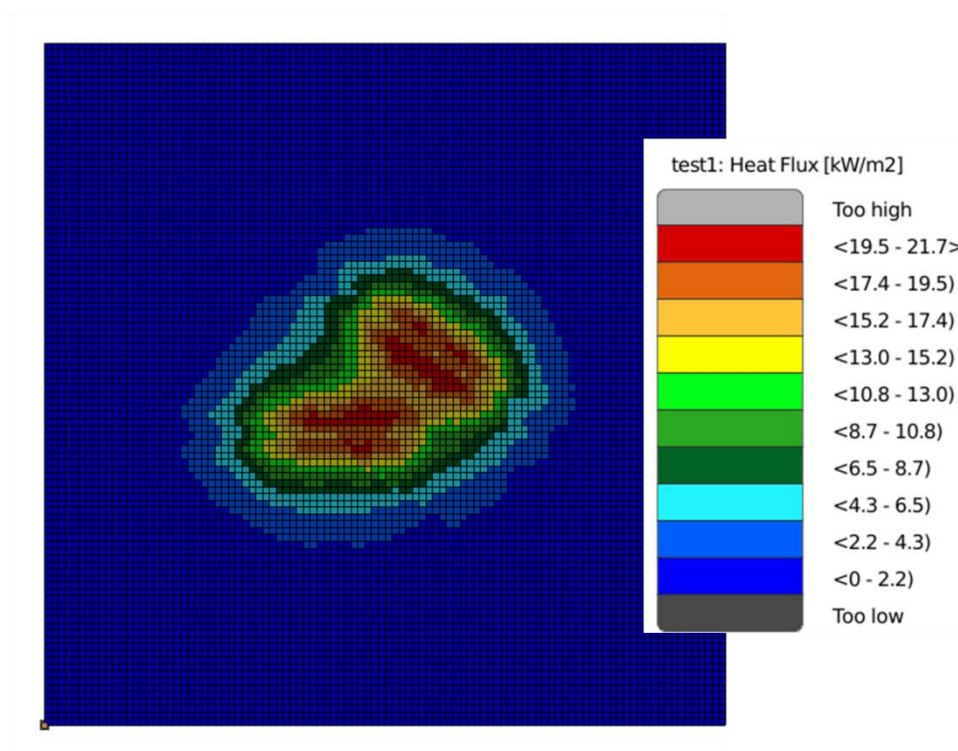
- Nesymetrické umístění dvou zářičů o výkonu 2kW, viz obr. 36.
- Tloušťka elementu 4 mm.



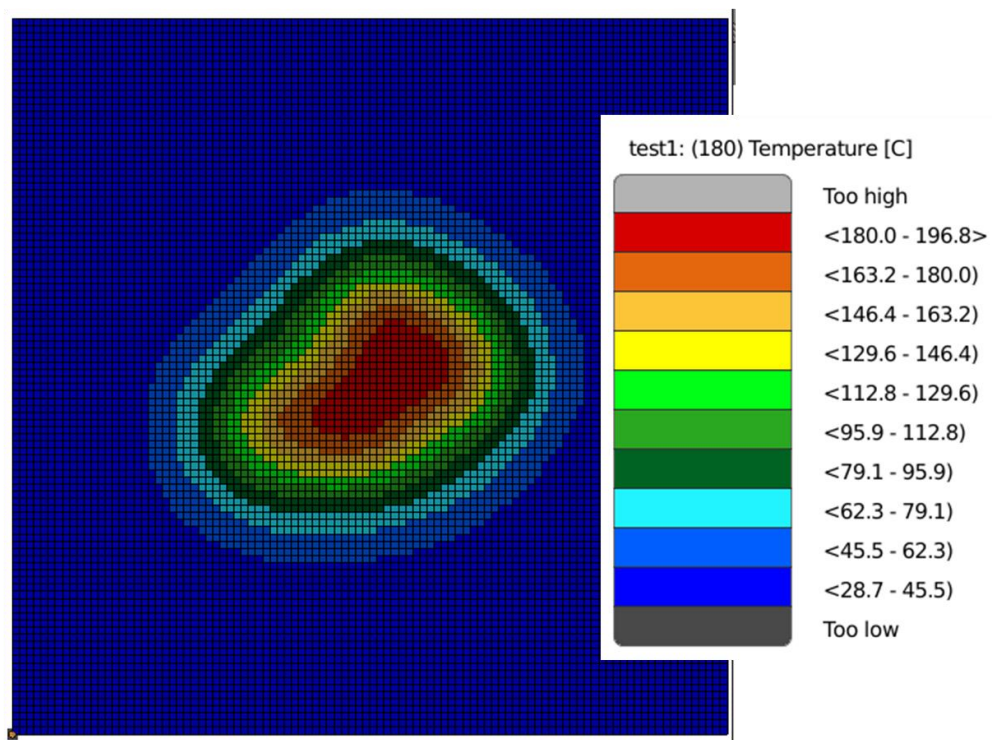
- Vliv radiace s okolím  $\varepsilon = 0.8$ .
- Vliv konvekce s okolím  $\alpha = 0.015 \text{ kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .
- Použitý materiál, volba časového kroku a velikost elementu, viz Tabulka 5.
- Teplota okolí, viz obr. 33.
- Doba simulace 180 s.
- Počáteční teplota 22 °C.



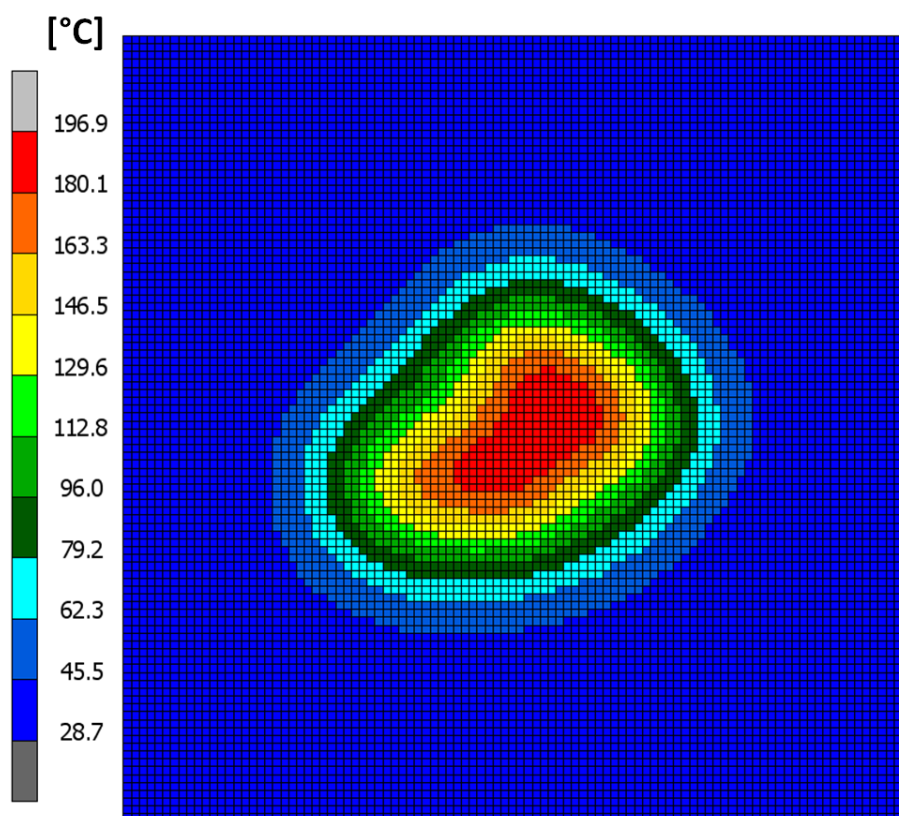
obr. 36: Nesymetrická poloha zářičů o výkonu 2kW.



obr. 37: Hustota tepelného toku v IREview.



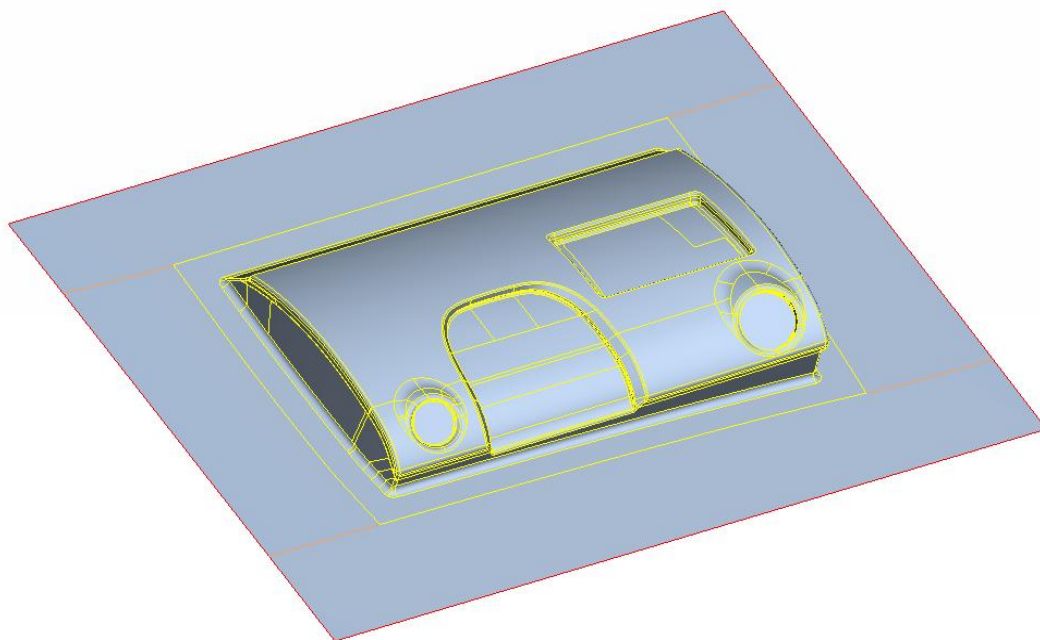
obr. 38: Teplotní pole v IREview na konci simulace.



obr. 39: Teplotní pole v MSC Marc na konci simulace.

### 8.3.3. Test č. 3 na reálné síti

Cílem teplotního nástroje IREview je samozřejmě počítat teplotní pole na reálné výrobní formě, viz obr. 40. Následující test současně popisuje metodiku generování sítě na povrchu výrobní formy pro správnou funkci teplotního nástroje IREview. Z fyzikálního popisu principu fungování teplotního nástroje IREview vyplývá, že cílem je vygenerovat čtyřhrany o předepsané délce hrany (čtverce, kosočtverce), viz Tabulka 5.

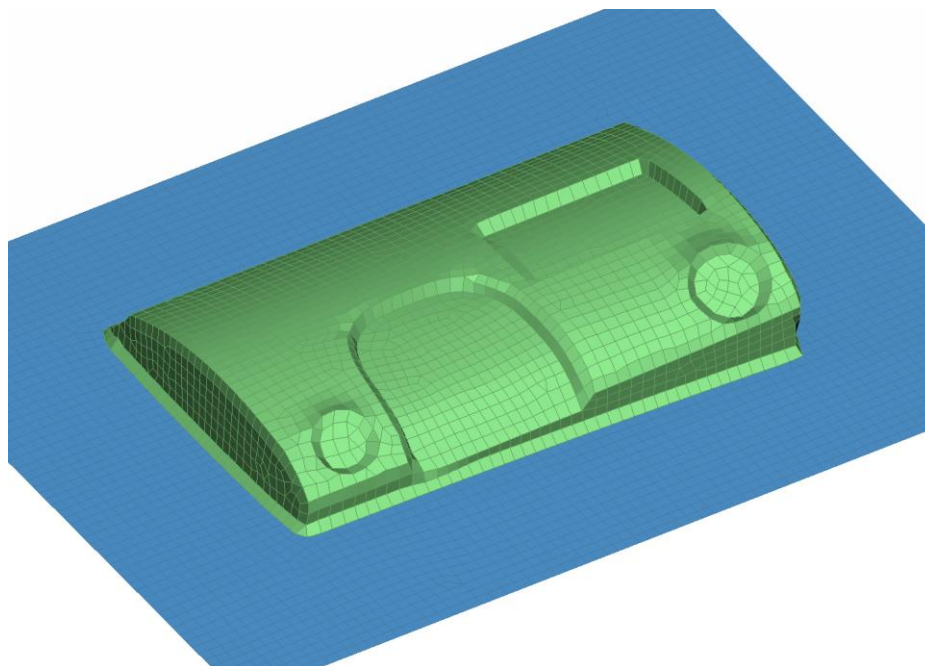


obr. 40: CAD data zkušební výrobní formy.

Takto ideálně však není možné vygenerovat síť na povrchu reálné formy. Následující body shrnují podmínky, za kterých byla vygenerována síť na povrchu výrobní formy, viz obr. 41:

- Čtyřhrany byly generovány s předepsanou délkou hrany s odchylkou  $\pm 3$  mm.
- Snaha byla minimalizovat počet trojúhelníků.
- Příruba výrobní formy je důležitý konstrukční prvek pro možnost upevnění formy do výrobní linky (modrá část povrchu modelu formy, viz obr. 41). Z technologických důvodů je snaha na plochu příruby již nezářít.
- Příruba je též důležitá pro teplotní nástroj IREview. Ten předpokládá, že po dobu ohřevu představuje výrobní forma neomezenou oblast z hlediska vedení tepla materiálem. Z praktické zkušenosti je velikost příruby vždy dostatečná.

Tudíž okraj formy má zanedbatelný vliv na výslednou tepelnou bilanci mezi elementy a to především v aktivní části formy, kde vzniká umělá kůže.

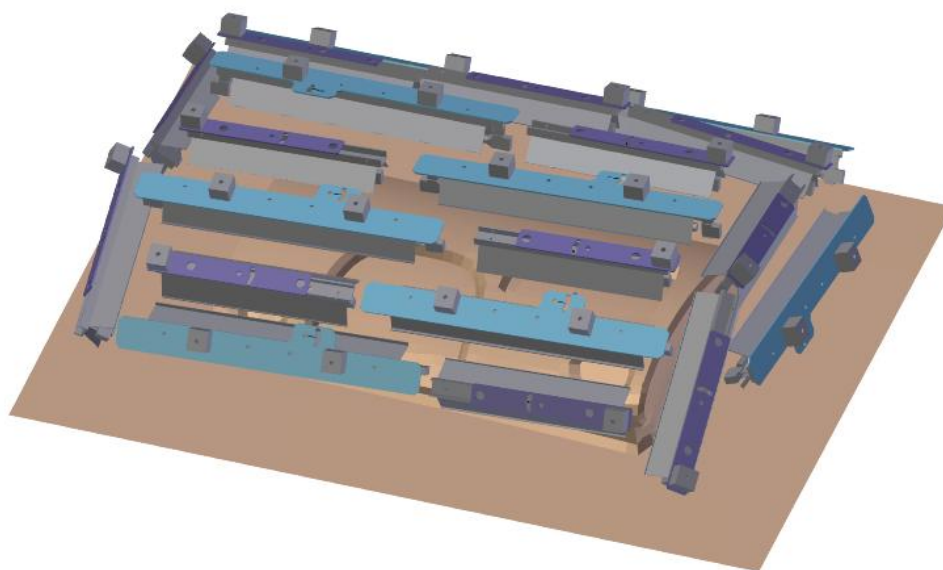


obr. 41: Vygenerovaná síť na povrchu zkušební výrobní formy.

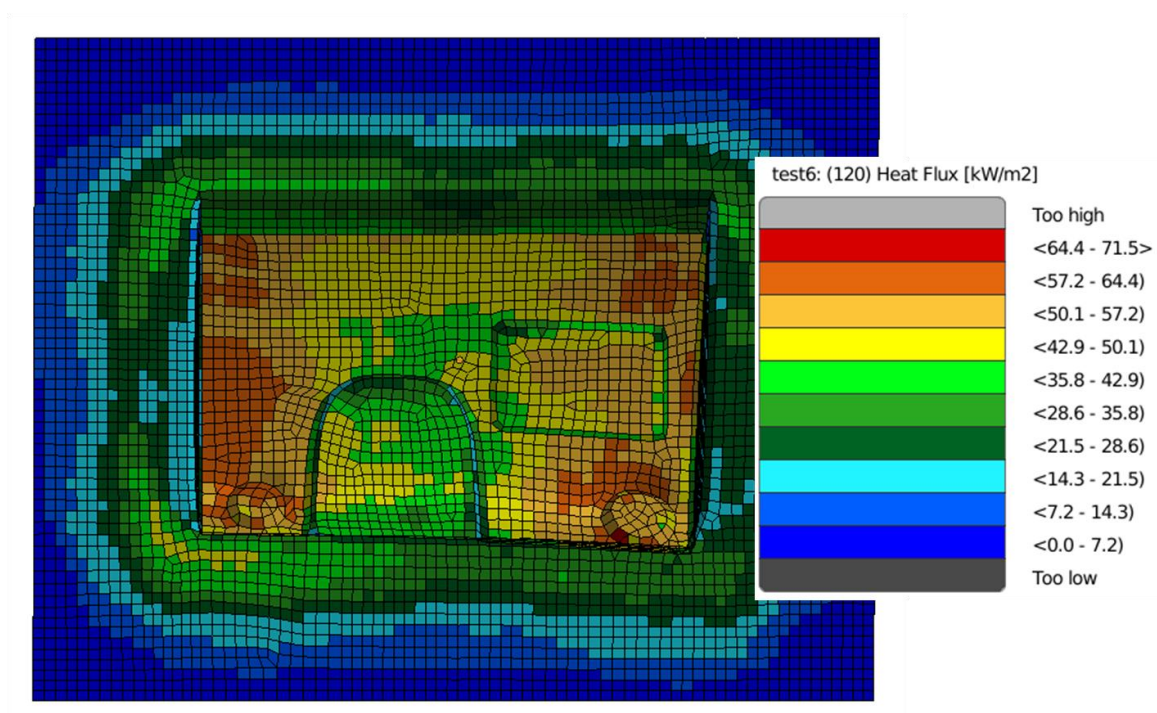
Podmínky simulace:

- Forma ohřívána zářiči o výkonu 2kW a 1.6 kW, viz obr. 42.
- Tloušťka formy 4 mm.
- Vliv radiace s okolím  $\varepsilon = 0.8$ .
- Vliv konvekce s okolím  $\alpha = 0.015 \text{ kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .
- Použitý materiál, volba časového kroku a cílová velikost elementu, viz Tabulka 5.
- Teplota okolí, viz obr. 33.
- Doba ohřevu 120 s.
- Počáteční teplota formy 22 °C.

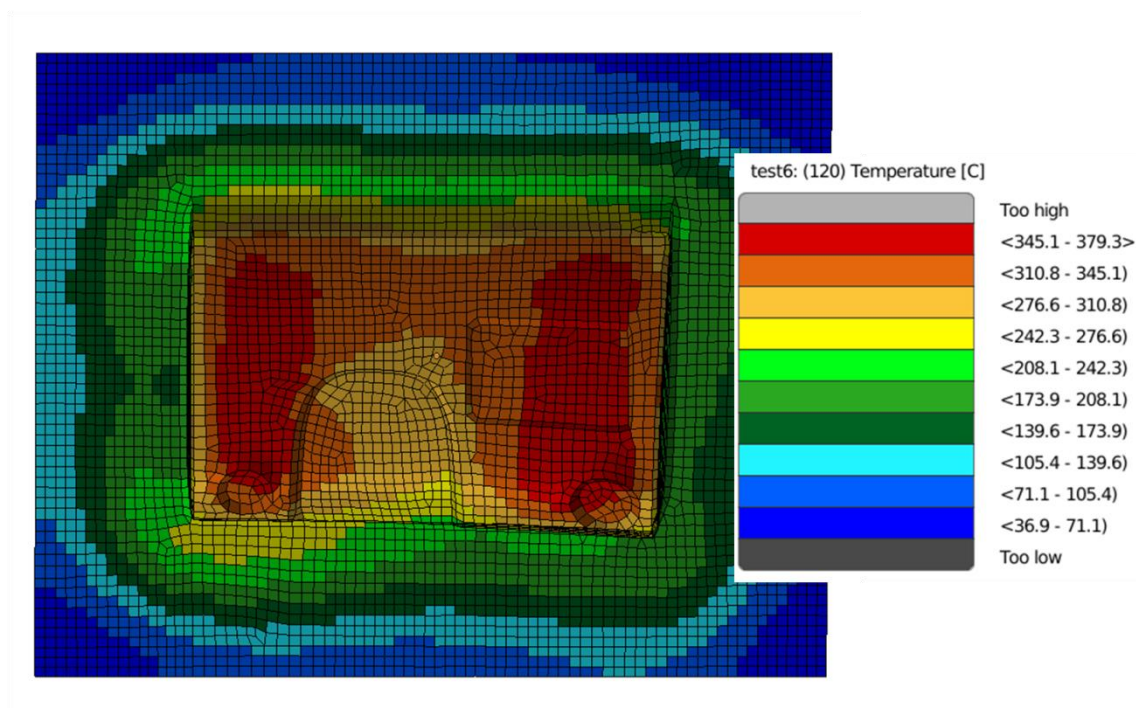




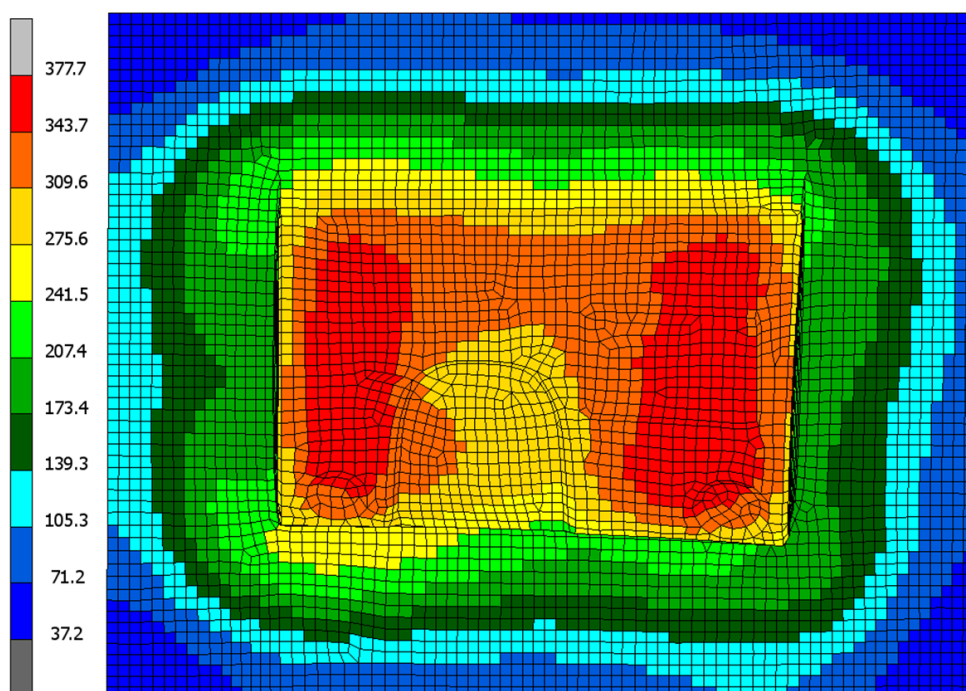
obr. 42: Rozmístění zářičů kolem zkušební výrobní formy.



obr. 43: Hustota tepelného toku v IREview.

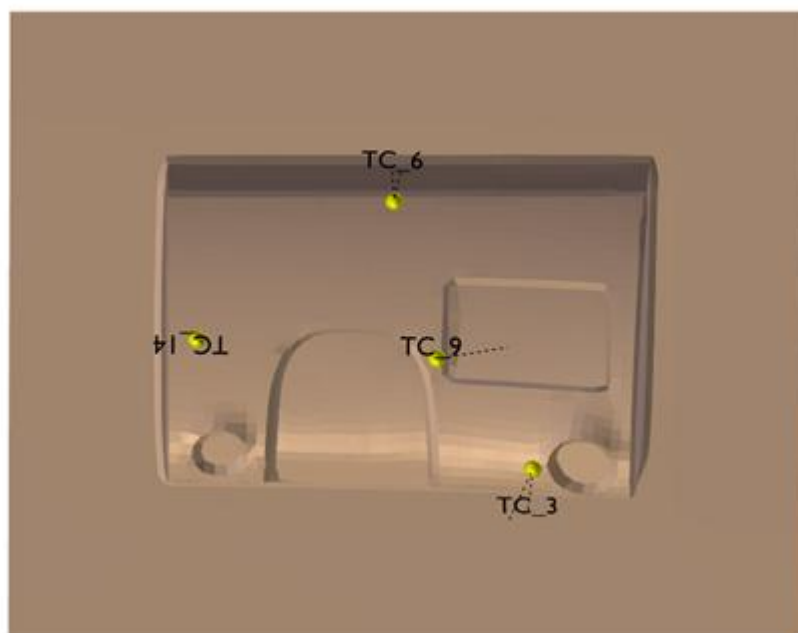


obr. 44: Teplotní pole v IREview na konci simulace.

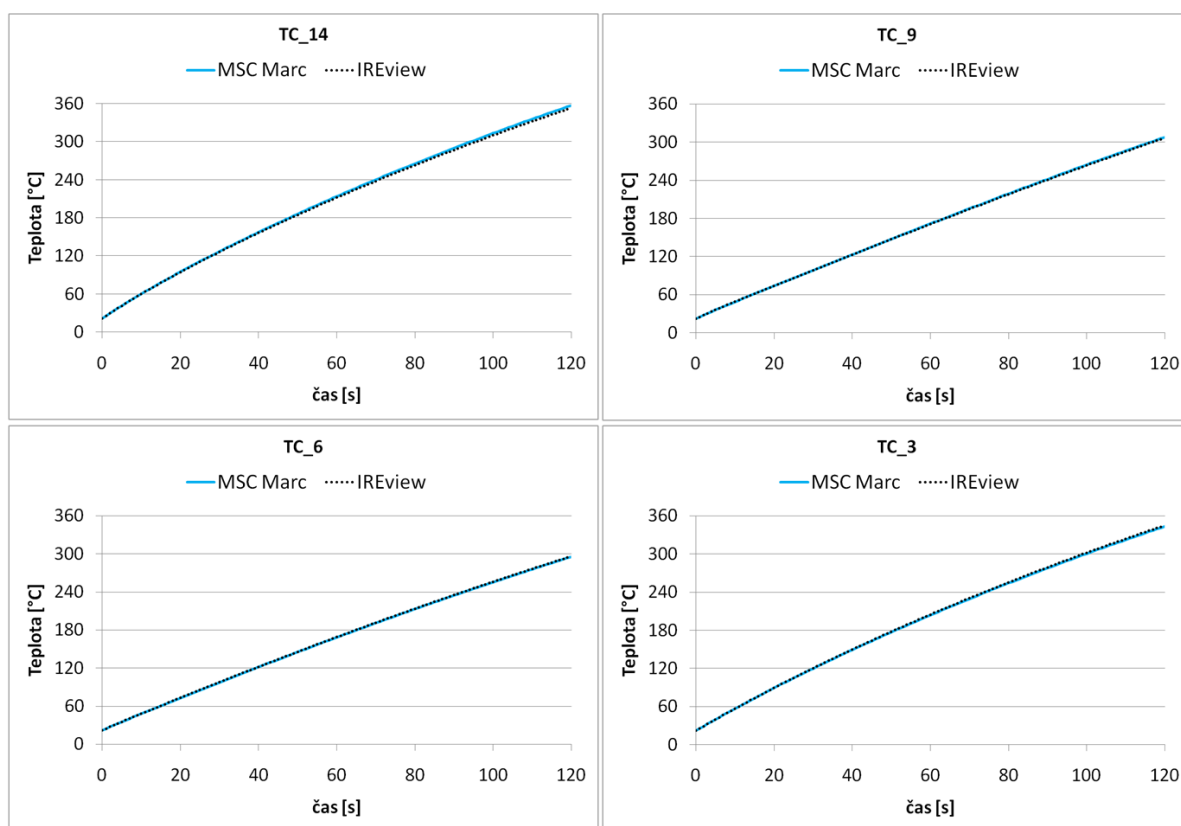


obr. 45: Teplotní pole v MSC Marc na konci simulace.

Podle výsledných teplotních polí je patrné, že obě výpočetní metody poskytují z praktického hlediska shodné výsledky. Pro lepší porovnání byly náhodně vybrány čtyři termočlánky z povrchu výrobní formy (čtyři kontrolní body), viz obr. 46, a následně byly porovnány průběhy teplot z obou výpočetních metod, viz obr. 47.



obr. 46: Pozice kontrolních termočlánků.



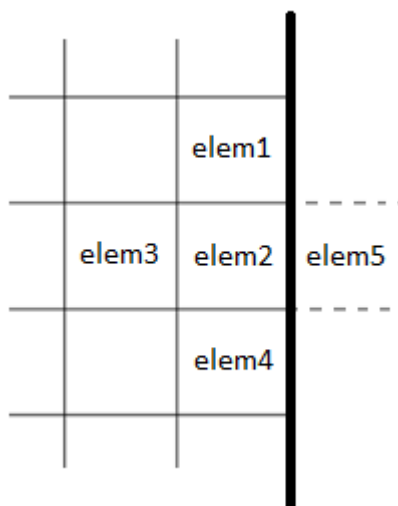
obr. 47: Průběh teplot v IREview a MCS Marc.

## 8.4. Možnost zobecnění teplotního nástroje IREview

Výhodou teplotního nástroje IREview je jeho jednoduchost a tedy rychlost výpočtu nestacionárního teplotního pole v případě ohřevu skořepinových forem. Proto není cílem teplotní nástroj IREview zobecňovat, pokud to nemá mít vliv na vypovídající hodnotu výsledků během návrhu ohřevu.

Jedním takovým zobecněním by mohla být např. detekce hrany formy. Jak bylo již zmíněno v kapitole 8.3.3, tak současná verze výpočtu teplotního pole využívá přírubu formy z hlediska vedení tepla materiálem jako neomezenou oblast po dobu ohřevu. Pokud by tento konstrukční prvek z formy zmizel, bylo by nutné z hlediska vedení tepla zohledňovat hranu formy.

Algoritmu výpočtu teplotního pole by pouze stačilo dát vědět, že dotyčný element je hranový. Pak do výsledné tepelné bilance, resp. do teplotního váženého průměru rovnice (51), by si uvažovaný element pouze doplnil chybějící sousední elementy a přiřadil by jim stejnou teplotu jako má on sám, viz obr. 48. Ve výsledku to znamená, že když doplněný "chybějící" sousední element má stejnou teplotu, tak v tom směru nemůže téct tepelný tok, protože neexistuje teplotní gradient.



obr. 48: Detekce hrany formy. Doplnění chybějících elementů.



## 9. Ověření nástrojů IREview v praxi

Nasazení simulačních nástrojů v praxi ovlivnilo vývoj metodiky návrhu radiačního ohřevu. Jedná se především o způsob regulace teploty v simulacích ohřevu a o způsob optimalizace návrhu radiačního ohřevu v optimalizačních smyčkách. Při řešení reálných projektů bylo nutné ověřit a porovnat průběhy teplot ze simulací se skutečnými teplotami ve výrobní lince. Z praxe též vyplynula celá řada námětů pro další vývoj simulační metody.

### 9.1. Simulovaná fáze výroby umělé kůže

V simulacích radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží se především jedná o simulaci výrobní fáze nazývané "Temperování". Jedná se o fázi, kde je nutné formu ohřát na požadovanou teplotu pro možnost nasypání výrobního prášku. Až na speciální případy se především vyžaduje rovnoměrný ohřev formy na teplotu cca 210 až 230 °C. Z hlediska návrhu radiačního ohřevu je simulace fáze nazývaná "Temperování" dostatečná. Simulace radiačního ohřevu by teoreticky mohla pokračovat i fází "Slush" a "Želírování". Z praktického hlediska by však taková simulace byla velmi obtížná. Důvodem je to, že v těchto fázích výroby umělé kůže se jen těžko identifikují podmínky panující ve výrobní lince. Následující body shrnují těžko předvídatelné děje ovlivňující proces "Slush" a "Želírování":

- Množství a rozložení výrobního prášku ve formě.
- Fyzikální vlastnosti konkrétního typu výrobního prášku.
- Přizpůsobení výrobních fází samotnému výrobku technology výroby.
- Vliv regulace teploty. Průběh regulace teploty je ovlivněn mnoha faktory, viz kapitola 2.2.

### 9.2. Optimalizace pozic zářičů a řídících termočlánků

Už na začátku vývoje metodiky návrhu radiačního ohřevu skořepinových forem se nabízela teoretická možnost vzniku algoritmu pro automatický návrh radiačního ohřevu. Mělo se jednat o automatický optimalizační algoritmus návrhu pozic zářičů, termočlánků a případně i parametrů regulace. V průběhu vývoje metodiky se však možnost praktické realizace takového automatického algoritmu ukázala jako velmi složitá. V problematice návrhu radiačního ohřevu je totiž nutné dodržet mnoho kritérií spojených s řešením konkrétního projektu. Proto se od myšlenky automatického návrhu

v rámci disertační práce upustilo. Cílem disertační práce bylo především splnit požadavky výrobce umělých kůží. Cílem bylo tedy navrhnout metodiku návrhu radičního ohřevu a realizovat simulační prostředí. V současné době umožňují nástroje IREview technologům výroby rychle navrhnout radiční ohřev na základě konkrétních požadavků a vlastních zkušeností. Nástroje IREview tak uživateli umožňují rychle zřetěžit jednotlivé operace návrhu a tak dosáhnout požadovaného ohřevu.

### 9.3. Implementace regulace teploty

Regulace teploty je velmi komplikovaný proces ovlivňovaný mnoha faktory, viz kapitola 2.2. V návrhu radičního ohřevu se ale simulace bez regulace teploty neobejde. Komplikovaný tvar formy a technické možnosti infračervených zářičů neumožňují rovnoměrné ozáření povrchu formy. Regulace teploty proto hlídá požadovanou teplotu a zároveň zajišťuje rovnoměrnost ohřevu formy.

Cílem bylo ke způsobu simulace teplotního pole s regulací teploty přistoupit co nejefektivněji. To znamená, že bylo nutné respektovat podmínky reálné regulace a též zvážit její praktické možnosti v simulacích ohřevu. Proto současná metoda návrhu radičního ohřevu využívá jednoduché dvoupolohové regulace teploty. To znamená, že se sleduje teplota na termočlánu a zářič je pak zapnutý či vypnutý podle toho, zda nebyla či byla překročena regulovaná teplota (nikoliv požadovaná teplota). V simulaci to znamená, že zářič působí či nepůsobí svým tepelným tokem na povrch formy.

Jak již bylo řečeno, ozáření povrchu formy není rovnoměrné. Aby bylo zajištěno rovnoměrného ohřevu, musí být též zářiči (resp. jeho regulátoru) umožněno regulovat na jinou než na požadovanou teplotu (na teplotu důležitou pro fázi "Slush" a "Želírování"). To znamená, že regulovaná teplota (pro konkrétní termočlánek, konkrétní místo formy) se může lišit od požadované teploty. Rozdíl požadované a regulované teploty pro konkrétní zářič představuje regulační odchylku, kterou je též možné simulací predikovat.

$$T_R = T_P + \Delta T \quad (53)$$

$$T_{TC} \leq T_R \quad \text{ON}$$

$$T_{TC} > T_R \quad \text{OFF,}$$

kde  $T_R$  je regulovaná teplota,  $T_P$  je požadovaná teplota,  $\Delta T$  je regulační odchylka,  $T_{TC}$  je konkrétní teplota na termočlásku.

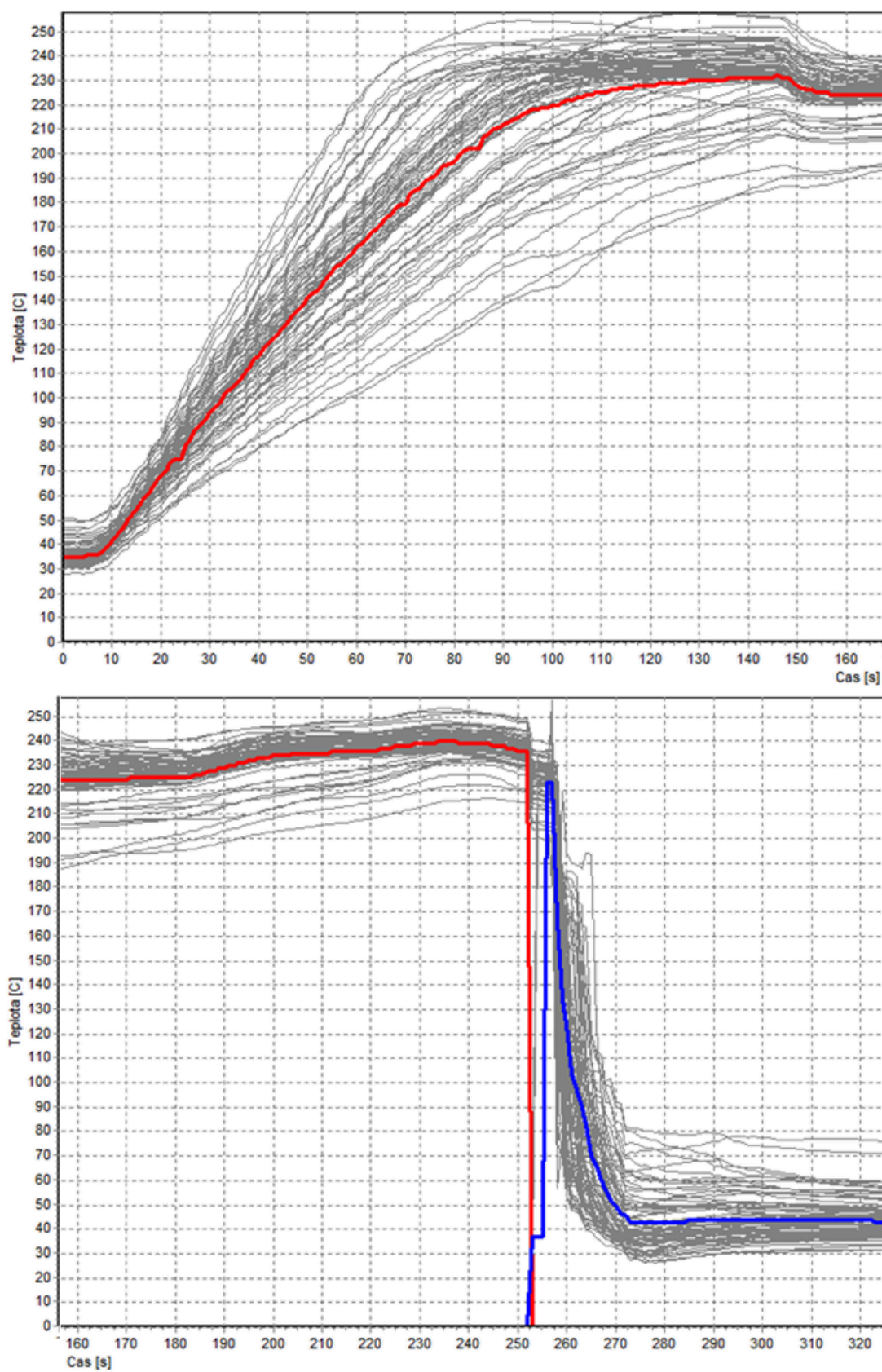
Výsledný návrh radiačního ohřevu, který je pak realizován ve výrobní lince, je kompromis mezi pozicemi zářičů, termočlásků a velikostmi zmíněných regulačních odchylek.

Pro simulaci teplotního pole i s regulací teploty byl navržen teplotní nástroj IREview, viz kapitola 8.2. Cílem bylo maximálně urychlit proces výpočtu teplotního pole i s regulací teploty.

## **9.4. Porovnání simulace s měřením**

### **9.4.1. Záznam teploty z výrobní linky**

Porovnání průběhů teplot ze simulací a reálného provozu bylo provedeno na datech týkajících se výroby umělé kůže pro vůz značky BMW. Jednalo se o výrobu umělé kůže na formě obsahující jednu výrobní kavitu. Forma byla ozářena 74 ks zářičů a osazena stejným počtem termočlásků. Cca dalších 30 termočlásků bylo použito jako kontrolních. Následující obr. 49 představuje záznam teploty z výrobního cyklu. Z obrázku je patná fáze "Temperování" v čase cca 10 - 150 s, fáze "Slush" v čase cca 150 - 200 s a fáze "Želírování" v čase cca 200 - 250 s. Výrobní cyklus končí ochlazením formy ve vodní sprše. Silně červená křivka představuje průměrnou teplotu během ohřevu. Výrobní forma vstupovala do výrobního cyklu s nerovnoměrnou počáteční teplotou. Její hodnota je však v průměru cca 35 °C.



obr. 49: Záznam teploty z výrobního cyklu.

### 9.4.2. Nastavení teplotního výpočtu

Pro porovnatelnost byl teplotní výpočet pouze přepočítán pro průměrnou počáteční teplotu 35 °C. Ostatní parametry výpočtu, včetně regulačních odchylek pro cílové teploty, byly zachovány z původního návrhu.

Podmínky simulace:

- Tloušťka elementu 4 mm.
- Vliv radiace s okolím  $\varepsilon = 0.8$ .
- Vliv konvekce s okolím  $\alpha = 0.125 \text{ kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .
- Použitý materiál, volba časového kroku a cílová velikost elementu, viz Tabulka 5.
- Teplota okolí, viz obr. 33.
- Doba simulace 180 s.
- Počáteční teplota 35 °C.
- Regulovaný ohřev.

Přesné parametry pro teplotní výpočet je v procesu výroby obtížné získat. Proto jejich hodnoty byly odhadnuty na základě zkušeností a dostupných údajů. Ze všech parametrů má však na průběh teploty na termočláncích nejvýznamnější vliv koeficient přestupu tepla  $\alpha$ .

### 9.4.3. Volba koeficientu přestupu tepla

Velikost koeficientu přestupu tepla byla stanovena na základě termočláncových teplot z předchozích projektů. Byla též stanovena s ohledem na předpokládanou teplotu okolí formy. Teplota okolí roste s časem a její velikost ve fázi "Temperování" představuje řádově desítky stupňů Celsia, lokálně může dosáhnout cca 150 °C. Koeficient přestupu tepla byl stanoven tak, aby teplota v simulaci rostla s podobnou směrnici jako teplota na reálném termočláncu. V tomto případě se jednalo o dobu ohřevu cca 50 s, kdy do procesu ohřevu ještě nezasahovala regulace teploty. Velikost koeficientu přestupu tepla byla stanovena na  $\alpha = 0.125 \text{ kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . V případě takto stanovené velikosti koeficientu tepla je pravděpodobné, že její vyšší hodnota též zahrnuje i další ztráty v procesu ohřevu, které jsou však jen velmi těžko identifikovatelné.

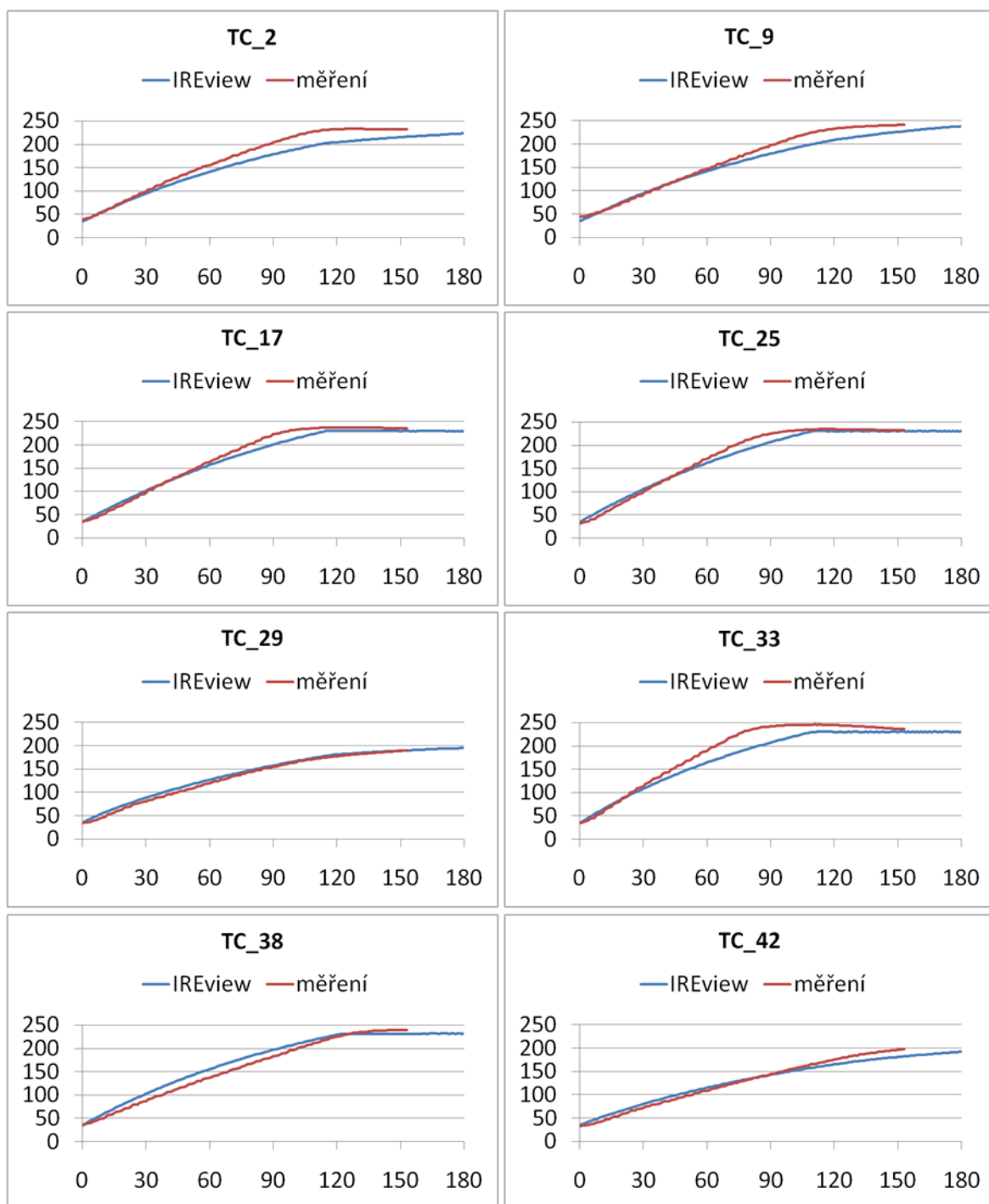
#### 9.4.4. Zhodnocení dosažených výsledků simulace

Následující obrázky představují porovnání teplot z výrobní linky a ze simulace. Jedná se o průběhy teplot z náhodně vybraných 16 termočlánků. Pro porovnání průběhů teplot byla zvolena fáze "Temperování". Analýzou výsledků byly zjištěny následující skutečnosti:

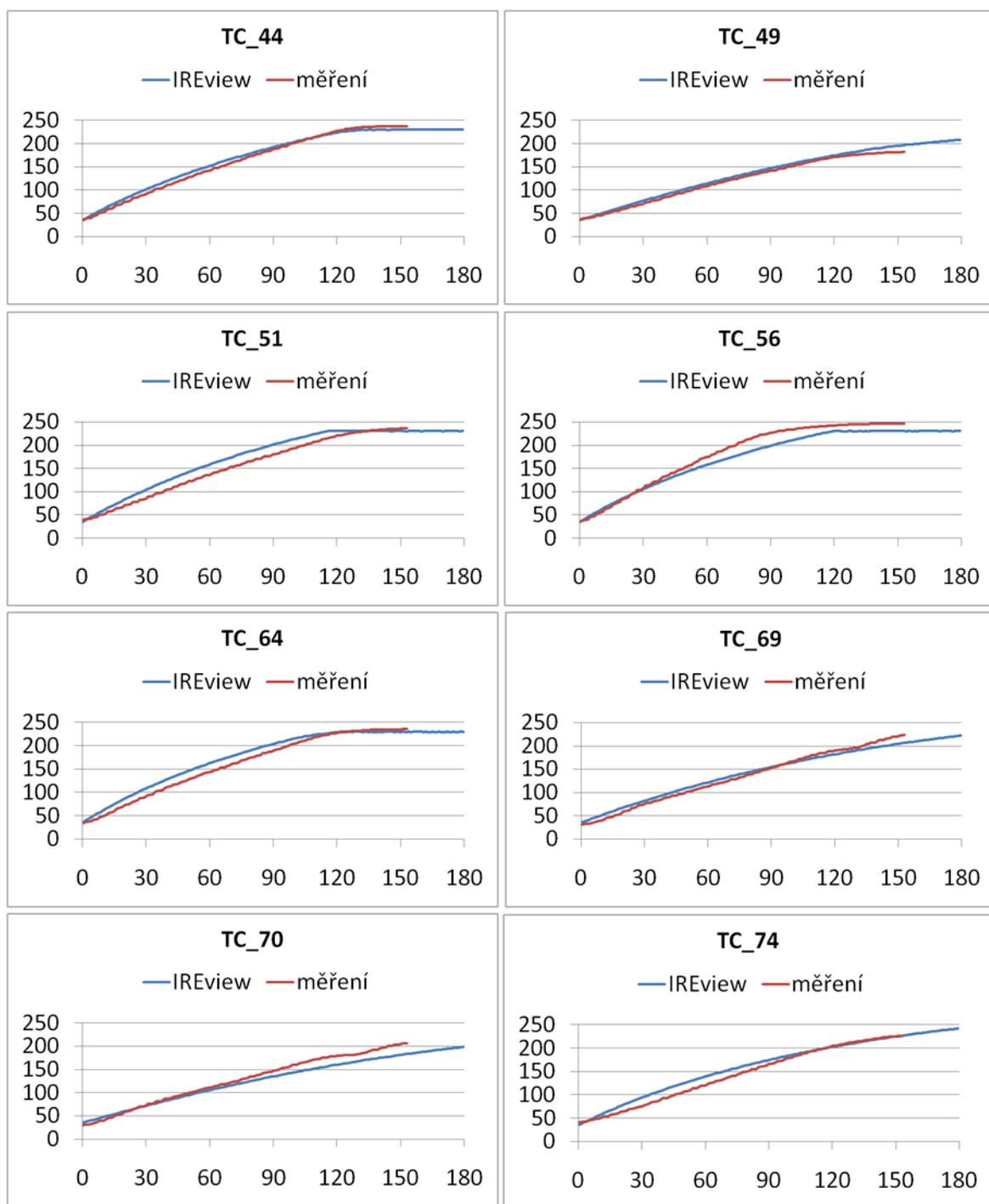
- Simulace je v průměru teplejší v první půlce fáze "Temperování". Je to způsobeno tím, že zářiče v simulaci působí svým maximálním tepelným tokem okamžitě, zatímco v reálné lince dochází k ohřevu se zpožděním (samy zářiče se musí nejdříve ohřát).
- V druhé půlce "Temperování" je simulace v průměru chladnější a k ustálení na požadovanou teplotu dochází později. To je způsobeno nižší teplotou okolí oproti realitě a v modelu tak dochází k větším tepelným ztrátám. Cílem modelu je být konzervativní a zajistit tak reálnému ohřevu dostatek energie především pro úspěšnou regulaci teploty.
- Porovnávaná data vykazují odchylku cca do 10%. S touto hodnotou je vhodné počítat při návrhu radiačního ohřevu současnou metodou.

Další odchylky modelu od reality mohou být způsobeny z následujících důvodů:

- Pozice reálného zářiče či termočlánku nemusí přesně odpovídat pozici v modelu.
- Reálná forma nemá konstantní tloušťku a obsahuje přidaná zpevňovací žebra. V modelu je k dispozici pouze ideální tvar formy s konstantní tloušťkou.
- Vliv povrchové úpravy reálné formy.
- Obtížně předvídatelné podmínky v lince.



obr. 50: Porovnání simulace s měřením teploty ve výrobní lince,  $T(t)$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  [s].



obr. 51: Porovnání simulace s měřením teploty ve výrobní lince,  $T(t)$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  [s].



## 9.5. Budoucí vývoj simulační metody a prostředí IREview

V případě simulace teplotní okrajové podmínky (rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy) se již využívá paralelních výpočtů. To významně urychluje proces simulace ozáření povrchu formy. Teplotní nástroj IREview pro výpočet nestacionárního teplotního pole i s regulací teploty by též bylo možné zrychlit paralelními výpočty.

Pro zrychlení i zkvalitnění navrhovaného radiačního ohřevu by též bylo možné navrhnout algoritmus pro optimalizaci parametrů regulace a pozic řídících termočlánků. Současná verze nástrojů IREview již obsahuje nástroj pro automatické rozmístění termočlánků. Termočlánky jsou však pouze automaticky umístěny tam, kam od příslušných zářičů dopadá nejvíce tepelného toku. Tímto způsobem termočlánky nejlépe chrání formu před lokálním přehřátím, ale jejich pozice nemusí být nejvhodnější z hlediska dosažení rovnoměrného teplotního pole a zabránění vzniku tzv. křížových vazeb. Proto je vhodné termočlánky též rozmísťovat i s ohledem na regulaci teplotního pole. Již při návrhu teplotního nástroje IREview se předpokládala taková budoucí optimalizační úloha a pro tyto účely byl také teplotní nástroj navržen.

## 10. Závěr

Disertační práce směřuje do oblasti aplikovaného výzkumu. Z odborného hlediska je zařaditelná do informatiky (softwarové inženýrství, modelování) a strojírenství (mechanika kontinua, termomechanika), s důrazem na teplotní simulace.

V rámci disertační práce byla navržena metodika simulace radiačního ohřevu skořepinových forem na výrobu umělých kůží. Současně s návrhem metodiky byla naprogramována sada simulačních nástrojů nazvaných IREview. Simulační prostředí IREview představuje ucelený soubor nástrojů umožňujících technologům výroby navrhnout radiační ohřev skořepinových forem pro výrobu nových typů umělých kůží. Návrh radiačního ohřevu začíná stavbou modelu z důležitých dílů vystupujících v ohřevu. Následně se přistupuje k simulaci teplotní okrajové podmínky. Ta představuje hustotu tepelného toku aplikovaného na povrchu výrobní formy vlivem záření infračervených zářičů. Přesné vyzařovací charakteristiky používaných typů infračervených zářičů byly získány experimentálním měřením. Výsledná kvalita navrženého ohřevu se prokáže simulací nestacionárního teplotního pole. Simulaci teplotního pole lze provést i s regulací teploty, jenž je nezbytná v procesu výroby umělé kůže. Pro fyzickou montáž infračervených zářičů a jejich řídicích termočlánků se využívá datových podkladů též generovaných nástroji IREview.

Simulační prostředí IREview je výsledkem postupného vývoje metodiky návrhu radiačního ohřevu. Původní simulační metoda byla závislá na komerčních softwarech a z hlediska návrhu radiačního ohřevu byla nepřesná a zdlouhavá. CAD softwary nebyly svými funkcemi vhodné pro manipulaci se zářiči a radiační simulace v CAE zase nerespektovala reálné vyzařovací vlastnosti používaných typů infračervených zářičů. Teplotní simulace v komerčním CAE také nebyla vhodná pro implementaci regulace teploty.

Nástroje IREview zpřesnily a zrychlily technickou přípravu radiačního ohřevu výrobních galvanoforem. Pomocí nástrojů IREview může uživatel testovat různé varianty pozic zářičů a jejich řídicích termočlánků a současně se věnovat i kalibraci cílových teplot pro regulaci. Výsledného návrhu radiačního ohřevu příslušné galvanofory, určené pro sériovou výrobu umělých kůží, je tak možné dosáhnout za velice krátkou dobu (např. za 2 až 3 týdny podle složitosti formy). Původní metoda návrhu trvala déle a to ještě s nejistým výsledkem. Se současnou metodou simulace se

po fyzické montáži zářičů (s podporou robota) a termočlánků rychle přistupuje k výrobě umělých kůží bez závažných nedostatků v navrženém ohřevu.

Více než 5-ti leté využívání navržených simulací při řešení reálných projektů prověřilo jejich funkčnost a zároveň jejich nezbytnost při zavádění do výroby nových typů umělých kůží. Výsledky disertační práce byly prakticky využity již při řešení cca 15 projektů ve spolupráci firem LENAM, Magna a AURA - engineering Hranice s.r.o. Se současnou metodou návrhu radiačního ohřevu se úspěšně vyrábí umělé kůže pro vozy značek ŠKODA, VW, BMW a SEAT.

## Seznam citovaných publikací

1. ŠKOLNÍK, P. Fakulta mechatroniky TUL. *Řízení teplotních polí pomocí ohřevu infračervenými zářiči*. [Disertační práce]. Liberec: 2010.
2. KOLEKTIV. *Ohřevy radiací, teorie a průmyslová praxe*. [Kniha]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-884-7.
3. MLÝNEK, J. *Interpolace naměřených hodnot tepelných toků infrazářiče*. [Zpráva TUL FR-TI1/266-002]. Liberec: 2009.
4. ŠESTÁK, J. RIEGER, F. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. [Skriptu]. Praha: ČVUT, 1998.
5. INTEMODINO GROUP. *Řešení rovnice čtvrtého stupně*. [online]. [cit. 2014-Červen]. Dostupné z: <http://equationsolver.intemodino.com/cz/rovnice-ctvrteho-stupne.html>.
6. INTEMODINO GROUP. *Řešení rovnice třetího stupně*. [online]. [cit. 2014-Leden]. Dostupné z: <http://equationsolver.intemodino.com/cz/resitel-kubickych-rovnic.html>.
7. ERHART, J. *Demonstrujeme teplotní vodivost*. In: *Matematika, fyzika, informatika*. [online]. [cit. 2015-Únor]. Dostupné z: [http://mfi.upol.cz/files/2204/mfi\\_2204\\_281\\_287.pdf](http://mfi.upol.cz/files/2204/mfi_2204_281_287.pdf). Praha: Prometheus, 2013, s. 281-87.
8. MARTINEC, T. Fakulta mechatroniky TUL. *Měření teplotních polí pomocí kontaktních metod měření*. [Disertační práce]. Liberec: 2009.

## Seznam publikací autora

1. HUŠEK, M., POTĚŠIL, A.: Simulace infra-ohřevu skořepinových forem ve firmě Magna Bohemia. In: *Konference Výpočty konstrukcí metodou konečných prvků*. Plzeň: ZČU, 2011, s. 86-89. ISBN 978-80-261-0059-1.
2. HUŠEK, M., POTĚŠIL, A.: Software Prediction of Non-stationary Heating of Shell Moulds for Manufacture of Artificial Leathers. In: *Proceedings of 18th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2012*. Svratka, 2012, s. 477-482. ISBN 978-80-86246-40-6.
3. POTĚŠIL, A., HORNÍK, P., HUŠEK, M.: Analysis of a Dynamic Response of a Car Door Impact into the Lock. In: *Proceedings of 51th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2013*. Litoměřice: Jan Evangelista Purkyně University, 2013. ISBN 978-80-741-4579-7.
4. POTĚŠIL, A., HORNÍK, P., HUŠEK, M.: Analysis of a Dynamic Response of a Car Door Impact into the Lock. In: *Applied Mechanics and Materials Vol. 486 in 2014 with the title Experimental Stress Analysis 51*. Trans Tech Publications Ltd., 2014. ISSN: 1662-7482.
5. KOLEKTIV AUTORŮ: Ohřevy radiací, teorie a průmyslová praxe. [Kniha]. Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-884-7.
6. HUŠEK, M.: Model of radiation of slush moulding technology. In: *Proceedings of 20th SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2012*, Přerov: SVS FEM, 2012. ISBN 978-80-260-2722-5.
7. HUŠEK, M., LOUFEK, J.: Simulation of infrared heating for industrial practice. In: *Proceedings of 19th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2013*, Svratka, 2013, s. 63-64. ISBN 978-80-87012-46-8.
8. POTĚŠIL, A., HUŠEK, M.: Criterion of optimal infra-heating of moulds in production of artificial leathers. In: *Proceedings of 50th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2012*. Tábor: Hotel Dvořák, 2012. ISBN 978-80-01-05060-6.

## **Obsah přiloženého CD**

Disertační práce

- disertacni\_prace\_2016\_Martin\_Husek.docx
- disertacni\_prace\_2016\_Martin\_Husek.pdf