



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

# SIMULACE NESTACIONÁRNÍHO RADIČNÍHO OHŘEVU SKOŘEPINOVÝCH FOREM

## Autoreferát disertační práce

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





## 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 výrobcům 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 řídicích 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	6
1.1. Oblast řešené problematiky	6
1.2. Cíl disertační práce	7
1.3. Pozice řešené problematiky v inženýrské praxi	7
2. Radiační technologie výroby umělé kůže	8
2.1. Proces výroby umělé kůže	8
2.2. Proces regulace teploty	8
3. Proces technické přípravy radiačního ohřevu	10
3.1. Virtuální ohřev	11
3.1.1. Původní metoda simulace	11
3.1.2. Inovovaná metoda simulace	12
3.2. Ohřev ve výrobní lince	14
4. Ukázka praktického využití nástrojů IREview	14
5. Přehled možností dostupných softwarů	16
5.1. Vývoj simulační metody	16
5.2. Zhodnocení získaných simulačních metod	17
6. Měření charakteristik infračervených zářičů	19
7. Nástroje IREview	20
7.1. Simulace ozáření povrchu formy	20
7.2. IREview nástroje pro práci s modelem a zálohu výsledků	22
8. Výpočty teplotních polí skořepinových forem	23
8.1. Teplotní výpočty v CAE	24
8.2. Teplotní výpočty nástrojem IREview	25
8.2.1. Princip řešení teplotní úlohy v IREview	26
8.2.2. Akumulace tepla v IREview	26
8.2.3. Vedení tepla v IREview	27
8.2.4. Velikost elementu IREview sítě	28
8.3. Ukázka řešení teplotní úlohy nástroji IREview	29
9. Ověření nástrojů IREview v praxi	32
9.1. Simulovaná fáze výroby umělé kůže	32
9.2. Implementace regulace teploty	32
9.3. Porovnání simulace s měřením a zhodnocení výsledků	33
9.4. Budoucí vývoj simulační metody a prostředí IREview	36
10. Závěr	36
Seznam citovaných publikací	38
Seznam publikací autora	39

# 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 médiiem 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 řídicích 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 řídicích 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.

## **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 přehřívána 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.

### **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.

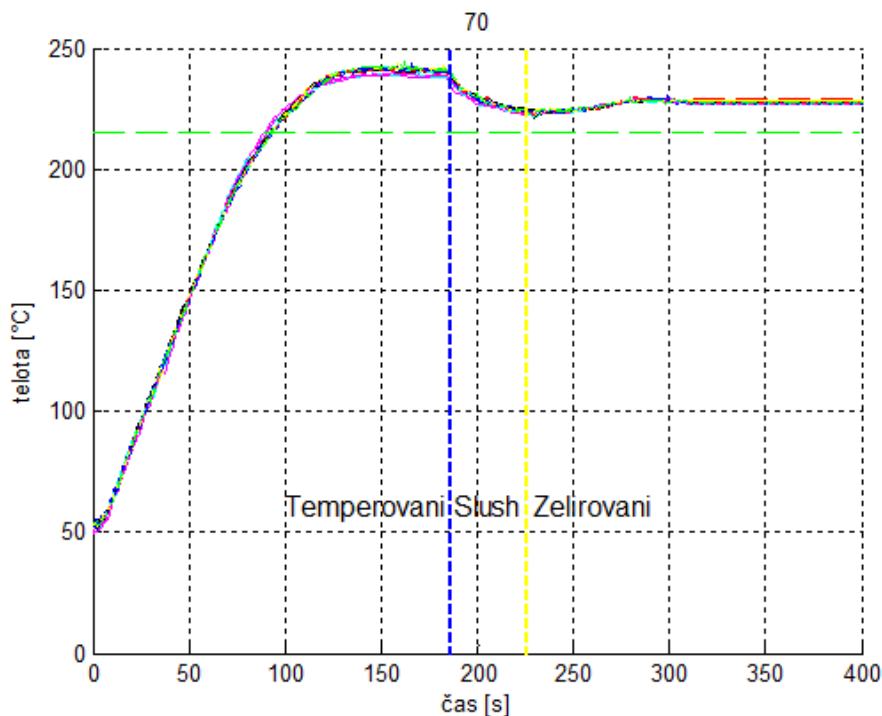
Během výroby umělé kůže je však často požadováno dosáhnout různých teplot v různých místech formy. Z tohoto hlediska je radiační ohřev velmi vhodným nástrojem. Regulačním zásahem je možné ovlivnit distribuci teplotního pole a tím i lokálně např. změnit tloušťku výsledné kůže.

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. Detailní popis měření teplot na povrchu výrobní formy je uveden v práci [8].

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 zářičích.

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.

Obr. 1 představuje průběh teploty na jednom termočlánci 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 slinutí umělé kůže prostřednictvím horkého vzduchu.



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

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

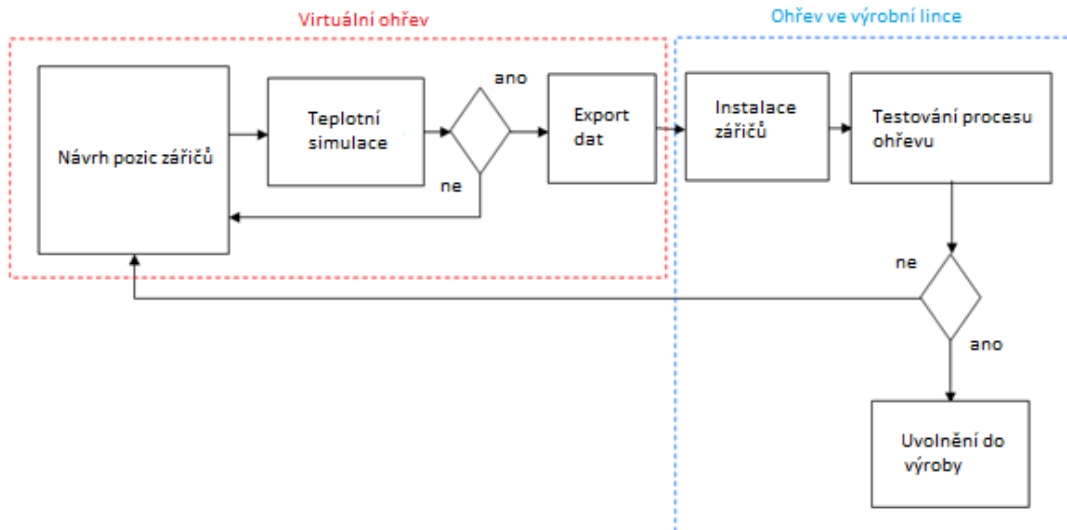
Řídicí termočlánek infračervených zářičů jsou umístěny na vnějším povrchu formy. Důležitá je však teplota na vnitřním povrchu formy, kde vzniká výsledná kůže. Proto výsledné nastavení parametrů regulace ještě obnáší nastavení cílových teplot (cílová teplota pro regulaci) pro konkrétní místa formy. Toto nastavení se provádí na základě kvality vyrobených umělých kůží.

Proces regulace je velmi složitý a ovlivňuje jej mnoho faktorů.

### 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. 2.



obr. 2: 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. 3. Tato zjednodušení vnášela do simulace celou řadu nejistot.



obr. 3: 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**

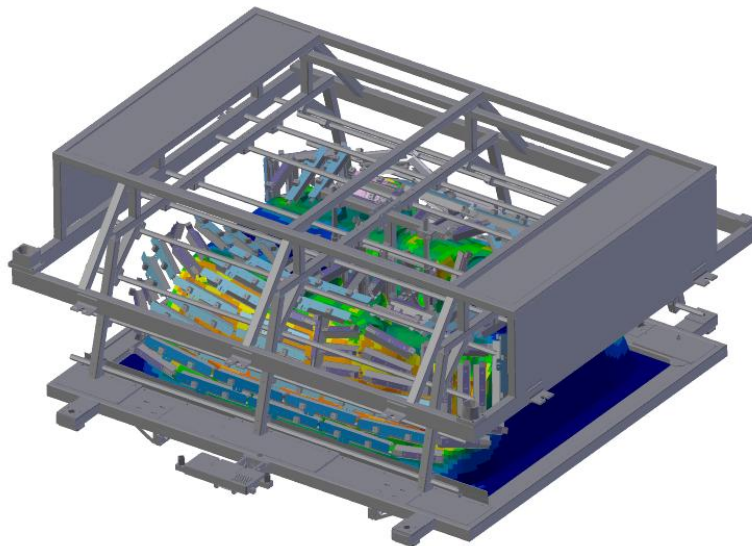
Aby byly eliminovány shora uvedené nevýhody a zefektivnila se technická příprava radiačního ohřevu, bylo rozhodnuto navrhnout a realizovat efektivnější metodu simulace, což se stalo nosným tématem disertační práce.

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) radičního ohřevu a vizualizaci výsledků (postprocessor), viz obr. 4.



obr. 4: Ukázka kompletního modelu ohřevu využívající nástrojů IREview [2].

Příprava modelu souvisí s importem důležitých konstrukcí, vystupujících v radičním 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 je v tomto případě 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 radiačního 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 její další provoz.

Inovovaná metoda simulace radiačního 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**

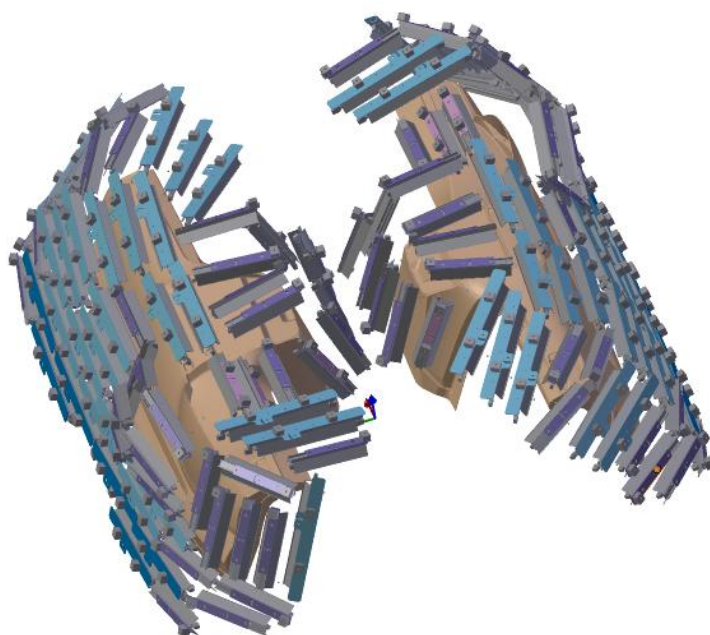
Pokud výsledná simulace odpovídá požadavkům výroby, dojde k exportu potřebných datových či obrazových podkladů pro fyzické rozmístění infračervených zářičů a jejich řídicích termočlánků.

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. 5. 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.

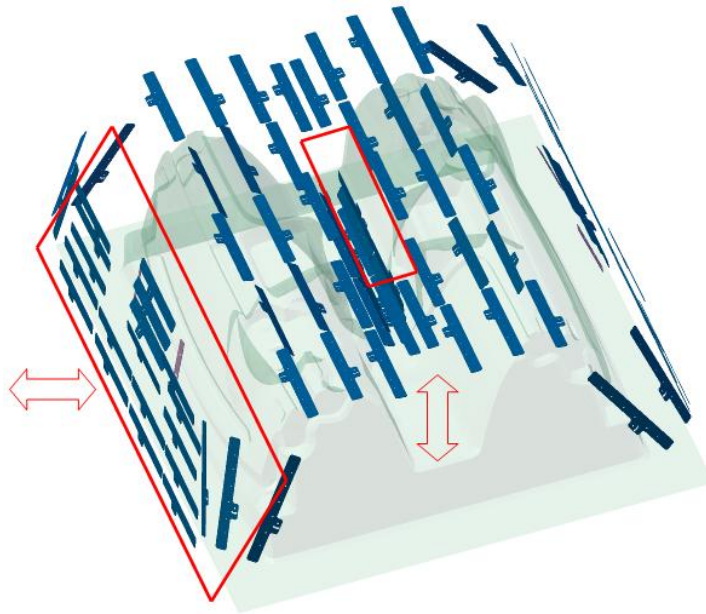


obr. 5: Uspořádání umělé kůže se zářiči v IREview.

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

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. 6. 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. 6: Řízené posunování držáků zářičů pro ohřev více typů forem [2].

## 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 software: ProEngineer (Creo), CATIA

Použité CAE software: 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 měly 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 pociťované 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:

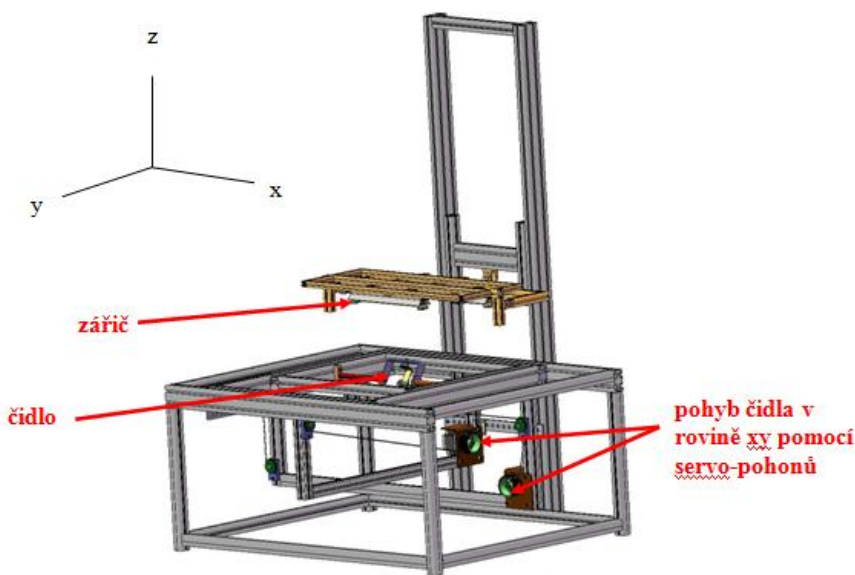
- Pozicemi zářičů a termočlánků získaných nástroji IREview v programu Blender.
- Vypočítanou teplotní okrajovou podmínkou nástroji IREview v programu Blender nebo jiným způsobem respektovat experimentálně změřené výkonové charakteristiky infračervených zářičů.
- Algoritmy umožňujícími regulaci teploty.

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

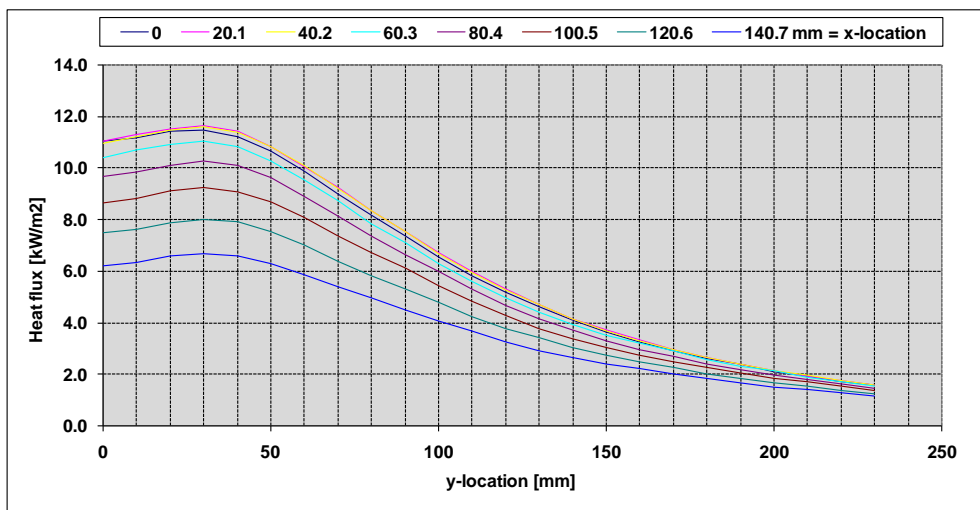
K získání výkonových charakteristik infračervených zářičů se využilo laboratorního zařízení vyvinutého v rámci řešení MPO projektu FR-TI1/266 "**Inovace technologie výroby umělých kůží**" konstruktéry firmy LENAM, viz obr. 7. Pro nástroje IREview, umožňující simulaci teplotní okrajové podmínky, bylo důležité naměřit celou databázi výkonových charakteristik.



obr. 7: 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. Na obr. 8 je graf představující zpracovaný záznam z čidla pohybujícího se ve směru  $y$  pro konkrétní vzdálenosti  $x$ . Všechna měření byla zpracována do datové podoby pro potřeby nástrojů IREview.

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.



obr. 8: Příklad změřené charakteristiky.

## 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, jenž je nezbytná při přípravě ohřevu.

Struktura simulačního prostředí IREview byla navržena objektově. Objektový návrh umožnil provádět dané operace simulace v samostatném vláknu programu Blender, či využít nových procesů pro paralelní výpočty.

### 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 pěti-rozměrná lineární interpolace změřených hodnot. Poloha elementární plošky formy

(poloha měřicího čidla) je vůči zářiči popsatelná právě pěti souřadnicemi, a to polohou  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a úhly  $\varphi$  a  $\theta$  [3].

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.

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 dozáhří. 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.

Simulace teplotní okrajové podmínky, představující rozložení hustoty tepelného toku na povrchu formy od aktivních zářičů, využívá paralelních výpočtů. Podmínkou paralelního výpočtu je, že

$$\text{počet použitých jader procesoru} \leq \text{počtu zářičů.} \quad (1)$$

Doba paralelního výpočtu  $t_p$  [s] se dá přibližně určit vztahem

$$t_p \approx \frac{t}{\text{počet jader}}, \quad (2)$$

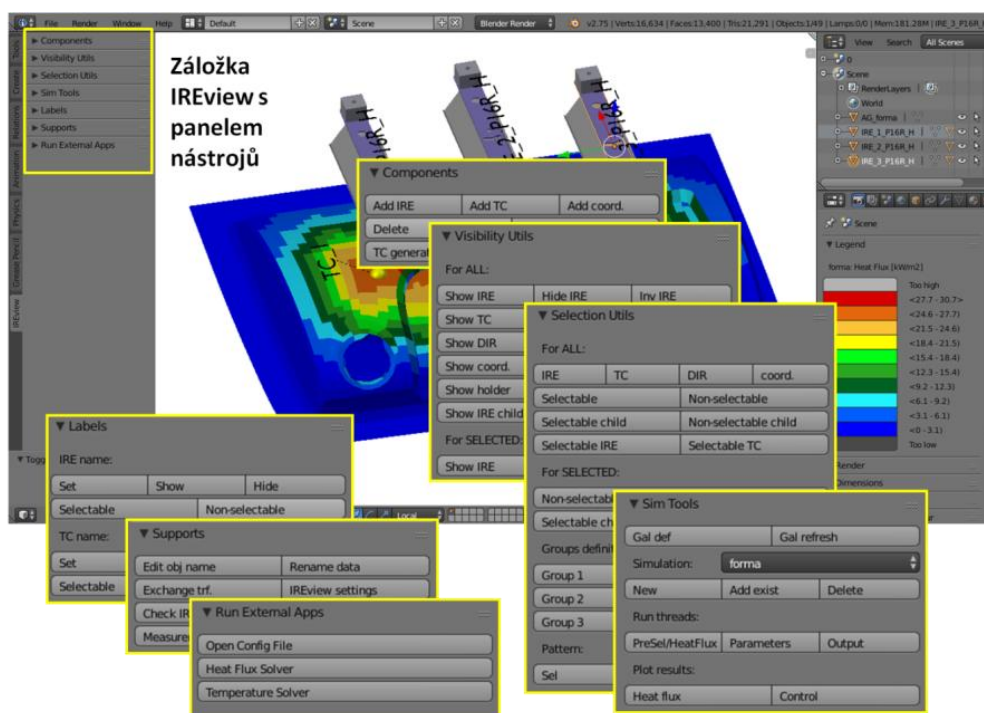
kde  $t$  [s] je doba výpočtu okrajové podmínky s využitím pouze jednoho jádra procesoru.

## 7.2. IREview nástroje pro práci s modelem a zálohu výsledků

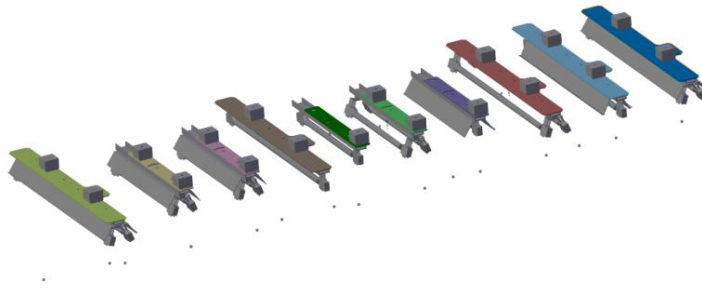
Pro stavbu modelu a vyhodnocení výsledků simulace bylo nutné naprogramovat řadu funkcí a přidat je do standardního panelu nástrojů prostředí Blender, viz obr. 9. Naprogramované třídy nových funkcí tak rozšířily standardní třídy programu Blender. Vše bylo realizováno s vědomím, že funkce musí být dostatečně uživatelsky intuitivní a zároveň ošetřené z hlediska vzniku chybových stavů.

Pro zálohu dat ze simulace v prostředí IREview byla navržena struktura textového souboru. V jednom textovém souboru je tak možné uchovávat parametry simulace (parametry teplotního výpočtu a regulace), výsledky ze simulace teplotní okrajové podmínky i výsledky z regulovaného teplotního výpočtu.

Důležitou součástí prostředí IREview je databáze přesných geometrií zářičů, viz obr. 10. Každý zářič je "propojen" se svojí databází změřených a zpracovaných výkonových charakteristik.



obr. 9: Panel nástrojů IREview v programu Blender.



obr. 10: Databáze modelů zářičů.

## 8. Výpočty teplotních polí skořepinových forem

Skořepinová forma na výrobu umělé kůže je ohřívána radiačně přilehlými zářiči. V problematice ohřevu se však uplatňují i další fyzikální jevy jako jsou vedení tepla v materiálu formy či přestupy tepla do okolí (radiace, konvekce). Vzhledem k tomu, že v prostoru ohřevu formy se nachází mnoho různých konstrukcí, tak se tyto jevy navzájem kombinují a různou měrou ovlivňují průběh ohřevu formy. V následujících bodech jsou uvedeny další děje, které mohou mít vliv na průběh ohřevu:

- Výrobní prostor je v lince částečně uzavřený. Tím se projevují různé komínové efekty, tedy proudění, způsobující nehomogenitu teploty okolního vzduchu.
- K vedení tepla dochází v objemu tenkostěnné formy. Rozdíl teplot na povrchu a vespod formy je malý (řádově v desetinách stupně). Pokud je však forma místy silnější (např. u výztuh povrchu formy), může být rozdíl teplot větší (až jednotky stupňů).
- K vedení tepla dochází též při přestupu tepla z formy do prášku termoplastického polymeru. Prášek z počátku taje a odebírá teplo.
- 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 ovlivňovat schopnost formy teplo odrážet či pohlcovat.
- 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 nejdříve odpovídal simulované skutečnosti. Ale jak už bývá zvykem v CAE výpočtech, model nikdy nemůže na 100% odpovídat realitě. Simulace radiálního 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 roste s časem. Ve fázi "Temperování" představuje řádově desítky stupňů Celsia, lokálně může dosáhnout cca 150 °C.
- Materiálový model je považován za homogenní, isotropní a teplotně nezávislý.
- 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.
- Radiální vliv dalších konstrukcí se zanedbává.
- Pokud se simuluje ohřev prototypové formy (forma existuje pouze v CAD datech) je tloušťka formy všude stejná.

Využívané komerční CAE softwary řeší úlohu nestacionárního vedení tepla metodou konečných prvků. Skořepinovou formu je nejjvhodnější 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 (Dirichletova, Neumannova, Newtonova) na základě studia díla [4].

Interpolací výsledků je možné sledovat průběh teplot ve více vrstvách elementu. Ohřev se při tom řeší buď radiální 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.

## 8.2. 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-termočlánek 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 vztažené 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 attributech 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  $P^e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a je daný vztahem

$$P^e = Q^e - Z^e, \quad (3)$$

kde  $Q^e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je výkon dodaný elementu od zářičů a  $Z^e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je výkon dodaný či ztracený vlivem okolí (vliv konvekce a radiace). Podrobnějším rozepsáním obecné rovnice bilance (3) je možné získat rovnici popisující výkon na elementu s indexem  $e$  na konci časového kroku  $\Delta t$  [s]

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

kde  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je hustota,  $c$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita,  $q^e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je hustota tepelného toku,  $d^e$  [m] je tloušťka elementární plošky,  $\alpha$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je

koeficient přestupu tepla,  $T_a$  [K] je teplota okolí,  $\delta$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ] je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\varepsilon$  [-] je emisivita povrchu formy.

Pak cílem řešení rovnice čtvrtého řádu (4) je získat  $T_{t_2}^e$  (dle [5] a [6]), tedy teplotu elementu v čase  $t_2$  po provedené operaci akumulace tepla, kde  $t_2 = t_1 + \Delta t$ .

### 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  $\chi$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]

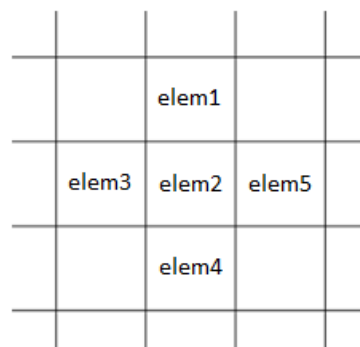
$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (5)$$

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

V disertační práci byl navržen princip určení konečné teploty elementu pomocí váženého průměru sousedních teplot

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

kde teplota uvažovaného elementu (element s indexem 2) má po provedené operaci akumulace tepla dvojnásobnou váhu oproti jeho sousedním teplotám (elementy s indexem 1, 3, 4 a 5), viz obr. 11. Teplota  $T_{\Delta t}^2$  je výsledná teplota elementu s indexem 2 na konci časového kroku simulace  $\Delta t$ .



obr. 11: Půdorys sítě o rozměru M x N elementů.

Aby bylo možné použít uvedený mechanismus pro výpočet vedení tepla mezi sousedními elementy v simulacích nestacionárního ohřevu, je nutné přizpůsobit dělení sítě (velikost elementárních plošek formy) použitému materiálu a velikosti časového kroku  $\Delta t$ .

#### 8.2.4. Velikost elementu IREview sítě

V disertační práci byl stanoven vztah (7) pro tepelnou bilanci mezi sousedními elementy sítě o rozměrech  $M \times N$  elementů, viz obr. 11. Tato síť představuje plochu ohřivané formy. Vztah (7) vznikl za účelem stanovení délky hrany elementu  $L$  [m].

$$\frac{m^{e_2} c (T_{akum}^2 - T_{\Delta t}^2)}{\Delta t} = \sum_{i=1,3,4,5} \frac{\lambda S (T_{akum}^2 - T_{akum}^i)}{L} \quad (7)$$

V uvedené tepelné bilanci je  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] tepelná vodivost,  $m^{e_2}$  je hmotnost elementu s indexem 2 a  $S$  [ $m^2$ ] je plocha z elementu kolmá na směr šíření tepelného toku. Výsledná délka hrany elementu pak odpovídá vztahu

$$L = \sqrt{\frac{6\lambda\Delta t}{\rho c}}, \quad (8)$$

kde podíl  $\frac{\lambda}{\rho c}$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] je materiálový koeficient nazývaný součinitel vedení teploty  $\chi$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]. Materiál na výrobu skořepinové formy je nikl. Následující tabulka shrnuje základní atributy teplotního výpočtu v IREview.

Tabulka 3

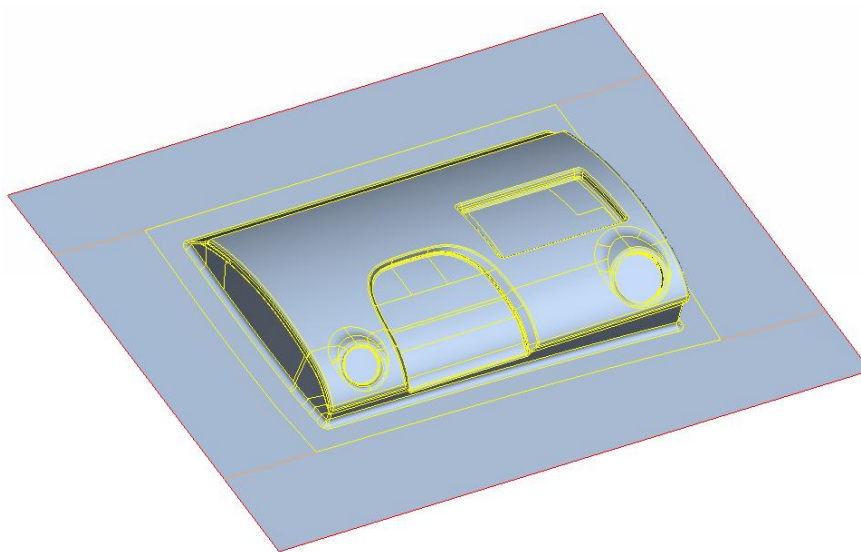
materiál	nikl
délka hrany elementu [mm]	11.69
krok simulace [s]	1
měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	444
vodivost [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	90
hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	8900
rozměr sítě	$M \times N$

### 8.3. Ukázka řešení teplotní úlohy nástroji IREview

Následující kapitola demonstruje praktické využití teplotního nástroje IREview při řešení nestacionárních teplotních polí v případě radiačního ohřevu skořepinových forem. Výpočty teplotního nástroje IREview byly 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 (obě výpočetní metody musí poskytnout prakticky totožné výsledky).

Cílem teplotního nástroje IREview je počítat teplotní pole na reálné výrobní formě, viz obr. 12.

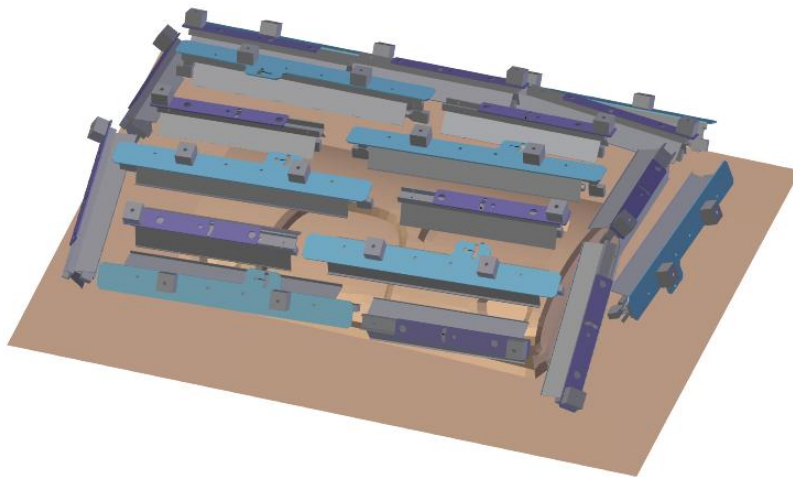


obr. 12: CAD data zkušební výrobní formy.

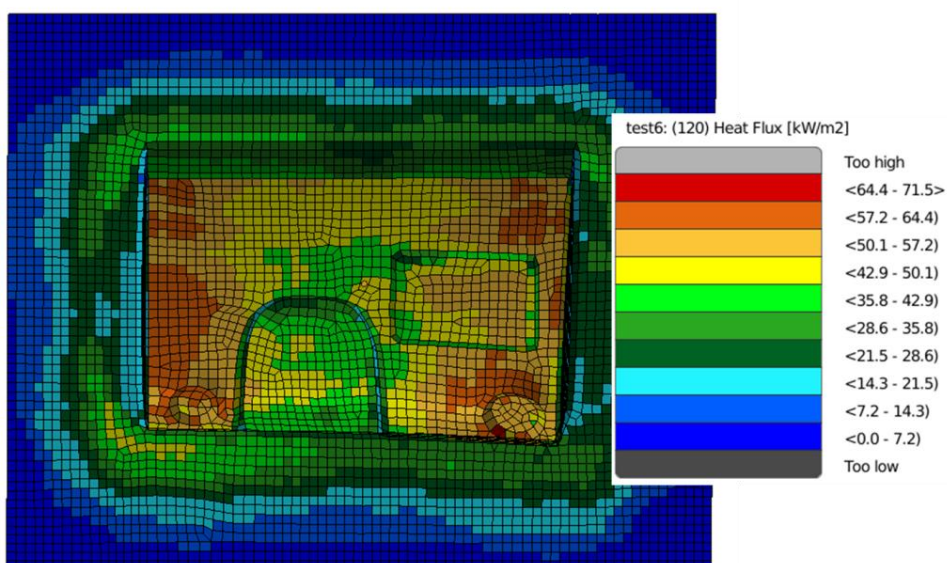
Z fyzikálního popisu principu fungování teplotního nástroje IREview vyplývá, že cílem je vygenerovat na povrchu formy elementy o předepsané délce hrany, viz Tabulka 3. Takto ideálně však není možné vygenerovat síť na povrchu reálné formy. Proto čtyřhrany byly generovány s předepsanou délkou hrany s odchylkou  $\pm 3$  mm a snaha byla i minimalizovat počet trojúhelníků.

Podmínky simulace:

- Forma ohřívána zářiči o výkonu 2kW a 1.6 kW, viz obr. 13.
- Simulace teplotní okrajové podmínky, viz obr. 14.
- Tloušťka formy 4 mm.
- Vliv radiace s okolím  $\varepsilon = 0.8$ .
- Vliv konvekce s okolím  $\alpha = 0.015 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .
- Materiál, volba časového kroku a cílová velikost elementu, viz Tabulka 3.
- Teplota okolí formy roste s časem.
- Doba ohřevu 120 s.
- Počáteční teplota formy 22 °C.

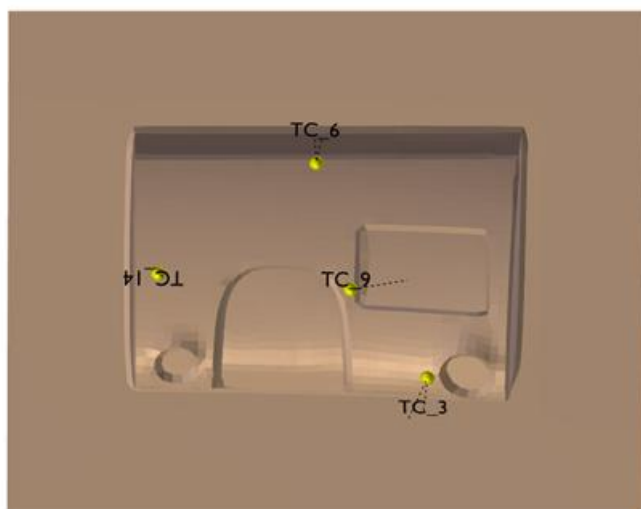


obr. 13: Rozmístění zářičů kolem zkušební výrobní formy.

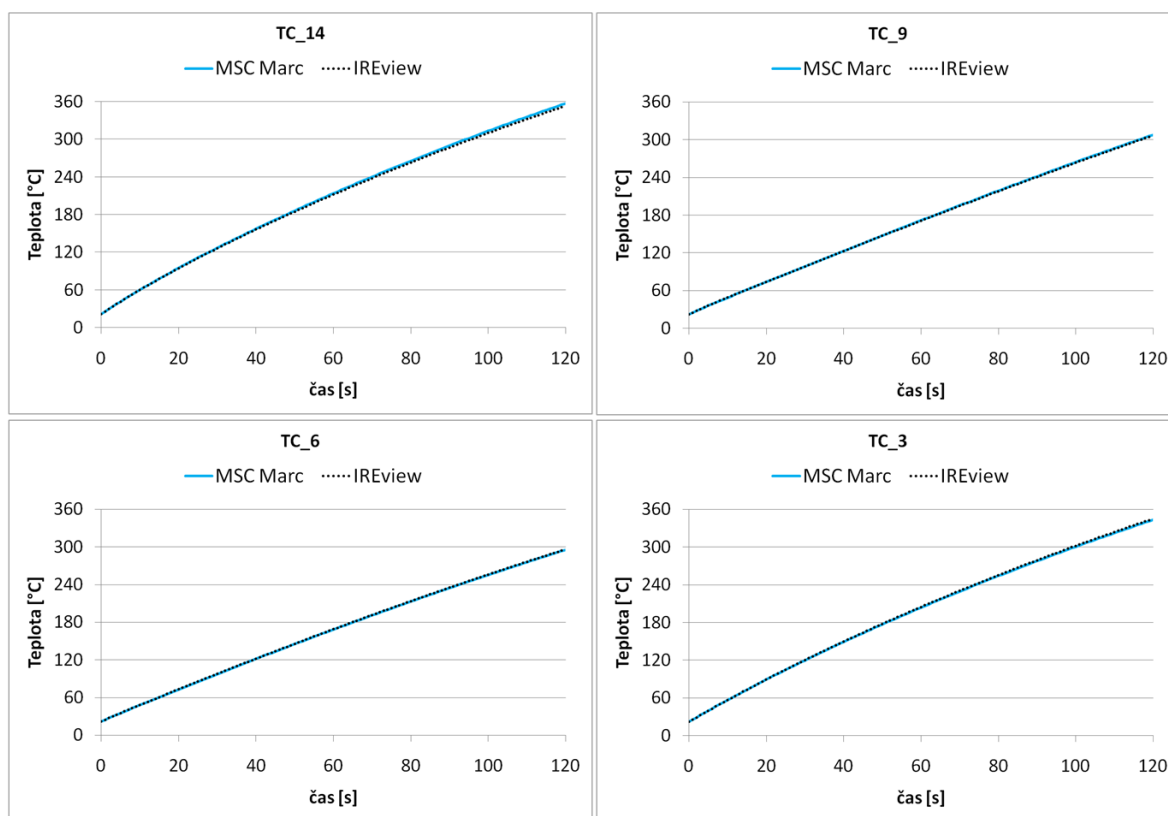


obr. 14: Simulace teplotní okrajové podmínky v IREview (hustota tepelného toku).

Pro porovnání průběhů teplot z obou výpočetních metod byly náhodně vybrány čtyři termočlánky z povrchu výrobní formy (čtyři kontrolní body), viz obr. 15. Z grafů obr. 16 je zřejmé, že obě výpočetní metody poskytují z praktického hlediska totožné výsledky. Křivky obou teplotních průběhů se překrývají (MSC Marc - modrá plná křivka, IREview - černá tečkovaná křivka).



obr. 15: Pozice kontrolních termočlánků.



obr. 16: Průběh teplot v IREview a MCS Marc.

## 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.

### 9.2. Implementace regulace teploty

Regulace teploty je velmi komplikovaný proces ovlivňovaný mnoha faktory. V návrhu radiačního 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 možnosti regulace v simulaci. Proto současná metoda návrhu radiačního ohřevu



využívá jednoduché dvoupolohové regulace teploty. To znamená, že se sleduje teplota na termočlánek 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.

$$T_R = T_P + \Delta T \quad (9)$$

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

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

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

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

### 9.3. Porovnání simulace s měřením a zhodnocení výsledků

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 termočláneků. Cca dalších 30 termočláneků bylo použito jako kontrolních. Výrobní forma vstupovala do porovnávaného výrobního cyklu s nerovnoměrnou počáteční teplotou. Její hodnota byla však v průměru 35 °C.

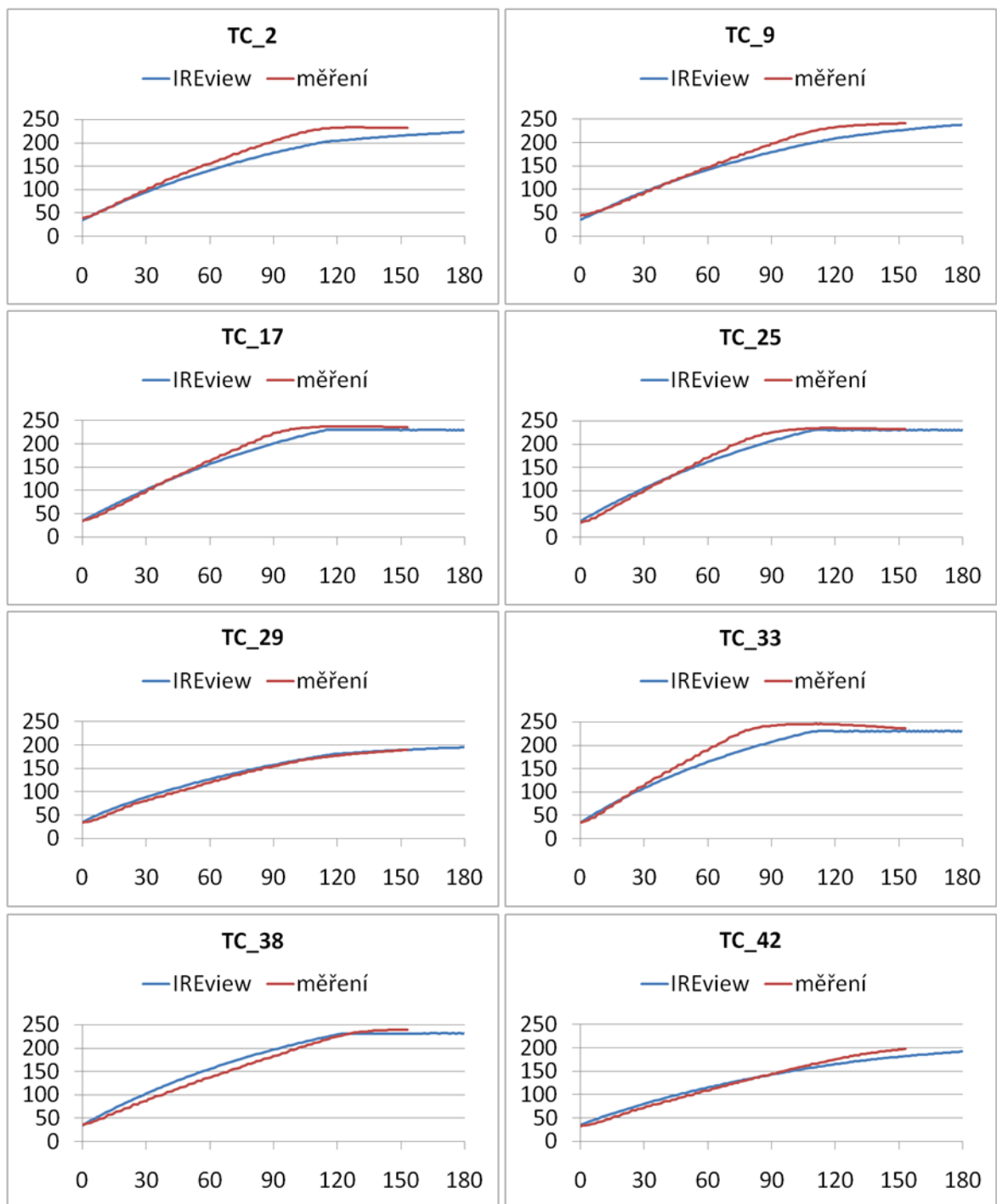
Pro porovnatelnost byl teplotní model pouze přepočítán pro průměrnou počáteční teplotu 35 °C. Ostatní parametry výpočtu, včetně regulačních odchylek pro regulovanou teplotu, byly zachovány z původního návrhu radičního ohřevu.

Následující obrázky představují ukázkou porovnání termočlánekových teplot z výrobní linky a ze simulace. 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 termočlátku 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 (vliv okolí, přizpůsobení linky konkrétnímu výrobku).



obr. 17: Porovnání simulace s měřením teploty ve výrobní lince,  $T(t)$  [°C],  $t$  [s].

## 9.4. 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 řídicích 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 vyzářovací 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 galvanoforny, 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 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*. [Skriptum]. 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-kubicky-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*. Svatka, 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 Libereci, 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*, Svatka, 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.