

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T013 Stavba výrobních strojů a zařízení

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Konstrukce pece pro tepelné zpracování s ohledem na úsporu hmotnosti

Autor: **Martin MAŠEK**

Vedoucí práce: **Ing. Václav Kubec, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MAŠEK**  
Osobní číslo: **S14N0054P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**  
Název tématu: **Konstrukce pece pro tepelné zpracování s ohledem na úsporu hmotnosti**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Analýza stávajícího stavu konstrukčního řešení vozové pece s ohledem na provozní podmínky koncového uživatele. Konstrukční návrh nosného rámu s ohledem na úsporu hmotnosti při zatížení od teploty a hmotnosti přídatných zařízení (dveře, hořáky, odtah spalin, přívod chladicího vzduchu, atd.).

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Analýza stávajícího stavu
2. Definice kritických konstrukčních uzlů a zátěžných stavů
3. Virtuální model pece
4. Návrh nové konstrukce pece
5. Závěr, zpracování výkresové dokumentace

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**STANĚK, J.** *Základy stavby výrobních strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001v, 120 s. ISBN 80-7082-738-6

**ZACHAROV, P.** *Konstrukce kovárenských pecí a mechanisace jejich provozu*. 1. vyd. Praha: Práce, 1956, 71 s. Knižnice Domu techniků, dělnických vynálezců a zlepšovatelů.

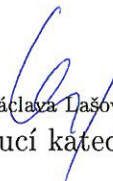
*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Kubec, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Danuše Jánská**  
COMTES FHT a.s.

Datum zadání diplomové práce: **21. září 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. září 2015

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Mašek	Jméno Martin		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2302T019 „Stavba výrobních strojů a zařízení“			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukce pece pro tepelné zpracování s ohledem na úsporu hmotnosti			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	58	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	31	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	27
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Hlavním cílem diplomové práce je úspora hmotnosti konstrukce existující průmyslové vozové pece určené pro ohřev vsázky na teplotu 900°C. Prověření možnosti úspory hmotnosti nosné konstrukce bylo provedeno pomocí metody konečných prvků a skladba vyzdívky byla hodnocena na základě tepelně izolačních vlastností jednotlivých materiálů. Byla provedena analýza stávající konstrukce pece a na základě rozložení napjatosti byly navrženy konstrukční úpravy. Součástí zadání bylo prověření nosnosti pecního vozu dle předem definovaného zatížení. V navržených úpravách byla zohledněna jednoduchost montáže.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Vozová ohřívací pec, snížení hmotnosti, rám pece, teplotní simulace, statická simulace, vyzdívka.</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Mašek	Name Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2302T019 “Design of Manufacturing Machines and Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubec, Ph.D.	Name Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of bottom forging furnace with a regard to weight saving		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	58	<b>TEXT PART</b>	31	<b>GRAPHICAL PART</b>	27
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The main aim of this thesis is reduction of weight of bottom forging furnace used for heating batch to 900°C. Analysis of possible weight saving was done using finite element method and isolation lining materials were evaluated based on the thermal insulating properties. Existing furnace designs was analysed and the design modification were proposed based on the distribution of stress. The proposed amendments take into account the ease of assembly.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>bottom forging furnace, weight saving, furnace construction, thermal analysis, static analysis</p>

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Miroslavu Urbánkovi Ph.D. za cenné rady a konzultace poskytnuté při řešení této práce a též vedoucímu mé diplomové práce Ing. Václavu Kubci, Ph.D. za odborné vedení a poskytnuté konzultace.

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Úvod do problematiky konstrukce pecí .....	2
2.1	Rozdělení dle manipulace se vsázkou .....	3
2.1.1	Vozové pece .....	3
2.1.2	Komorové pece .....	4
2.1.3	Šachtové pece .....	5
2.1.4	Pokloповé pece .....	5
2.1.5	Válečkové pece .....	6
2.1.6	Průběžné pece pro tepelné zpracování pásu z neželezných kovů .....	6
2.1.7	Krokové pece.....	7
2.1.8	Karuselové pece .....	7
2.2	Rozdělení dle způsobu ohřevu.....	8
2.2.1	Hořáky s nuceným přívodem vzduchu.....	8
2.2.2	Injektorové hořáky .....	8
2.2.3	Sálavé trubky.....	8
2.2.4	Impulzní hořáky .....	9
2.2.5	Rekuperační hořáky.....	9
2.2.6	Regenerační hořáky.....	9
2.3	Požadavky kladené na průmyslové pece .....	10
3	Analýza současného stavu.....	11
3.1	Základní rozměry řešené pece .....	12
3.2	Popis konstrukčních uzlů řešené pece .....	13
3.2.1	Popis rámu pece .....	14
3.2.2	Popis vyzdívky pece.....	15
3.2.3	Popis rámu pecního vozu .....	16
3.2.4	Popis vyzdívky pecního vozu.....	17
3.3	Zátěžové stavy pece a vozu .....	18
3.3.1	Pec .....	18
3.3.2	Pecní vůz .....	18
3.4	Materiálové vlastnosti oceli.....	19
3.5	Materiálové vlastnosti vyzdívek.....	20



4	Numerická analýza pece.....	21
4.1	Předběžná 2D analýza pece .....	21
4.2	Zjednodušení modelu pece pro numerickou simulaci .....	22
4.3	Nasíťování modelu .....	23
4.4	Okrajové podmínky teplotní analýzy .....	24
4.5	Výsledky teplotní analýzy pece .....	28
4.6	Okrajové podmínky statické analýzy pece .....	29
4.7	Výsledky statické analýzy pece .....	32
4.8	Výsledky statické analýzy pece při konstantní teplotě (20°C).....	33
4.9	Návrh úprav ke snížení hmotnosti rámu pece .....	34
4.10	Úprava konstrukce pece .....	34
4.11	Výsledky teplotní analýzy upravené pece.....	35
4.12	Výsledky statické analýzy upravené pece.....	36
4.13	Zhodnocení úpravy rámu pece.....	37
5	Numerická analýza pecního vozu .....	38
5.1	Zjednodušení modelu vozu pro numerickou simulaci.....	38
5.2	Okrajové podmínky teplotní analýzy .....	39
5.3	Výsledky teplotní analýzy pecního vozu.....	41
5.4	Okrajové podmínky statické analýzy pecního vozu .....	42
5.5	Výsledky statické analýzy pecního vozu.....	44
5.6	Výsledky statické analýzy pecního vozu při konstantní teplotě (20°C).....	45
5.7	Zhodnocení výsledků analýzy pecního vozu.....	46
6	Analýza materiálů vyzdívek.....	47
6.1	Izolační modul .....	47
6.2	Izolační rohož .....	48
6.3	Izolační desky .....	49
6.4	Nosné materiály .....	50
7	Závěr.....	51
8	Seznam použitých zdrojů .....	52
9	seznam obrázků .....	53
10	seznam tabulek .....	55

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	jednotka
Re	Mez kluzu materiálu	MPa
k	Koeficient bezpečnosti	-
T <sub>1</sub>	Teplota pecní atmosféry	°C
T <sub>2</sub>	Teplota atmosféry okolí	°C
q	Tepelný tok	W·m <sup>-2</sup>
α <sub>1</sub>	Součinitel přestupu tepla z pecní atmosféry	W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
α <sub>1</sub>	Součinitel přestupu tepla z vnější atmosféry	W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
α <sub>k</sub>	Kontaktní tepelná vodivost	W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>
λ <sub>p</sub>	Součinitel tepelné vodivosti plechu	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
λ <sub>d</sub>	Součinitel tepelné vodivosti desky	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
λ <sub>m</sub>	Součinitel tepelné vodivosti modulu	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
δ <sub>p</sub>	Tloušťka stěny plechu	m
δ <sub>d</sub>	Tloušťka stěny desky	m
δ <sub>m</sub>	Tloušťka stěny modulu	m

# 1 Úvod

V hutním a strojírenským průmyslu v oblastech tváření a tepelného zpracování materiálu jsou průmyslové pece nedílnou součástí ve výrobním procesu. Průmyslové pece slouží k ohřevu ingotů nebo polotovarů před procesem tváření, nebo k tepelnému zpracování hotových produktů. Dále jsou také používány k tepelnému zpracování odlitků a svařenců. Vzhledem k rostoucím nárokům jak na výrobní náklady, tak na životnost a spolehlivost, je potřeba stále zdokonalovat konstrukční řešení tohoto technického systému.

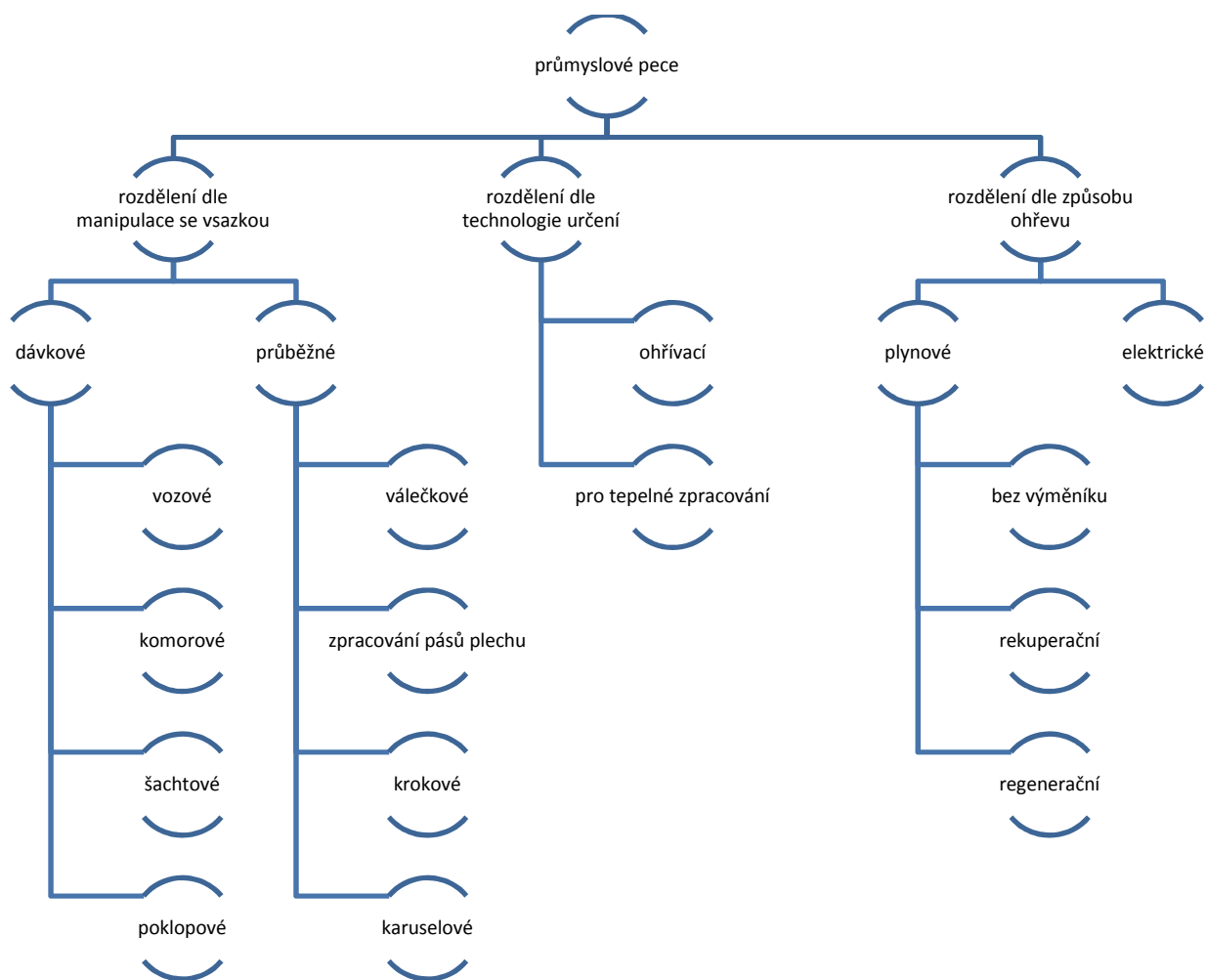
Průmyslové pece jsou vysoce energeticky náročná zařízení, proto je třeba dbát na co nejefektivnější omezení ztrát v systému. Z toho důvodu nalezneme na trhu velké množství různých technických řešení za účelem nabídnout ideální pracovní podmínky pro danou aplikaci. Od toho se odvíjí fakt, že dnešní průmyslové pece neslouží pouze k ohřátí polotovarů, ale díky inteligentnímu řízení mohou i ochlazovat nebo kalit materiál dle přesných požadavků. Jiné pece mohou pracovat s ochrannou dusíkovou atmosférou, nebo i 100% vodíkovou. Dalšími doplňky mohou být výkonné ventilátory zajišťující intenzivní řízenou cirkulaci pecní atmosféry, která udržuje rovnoměrnost teploty v toleranci  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Hlavním cílem mé diplomové práce je úspora hmotnosti konstrukce existující průmyslové vozové pece určené pro ohřev vsázky na teplotu  $900^{\circ}\text{C}$ . Prověření možnosti úspory hmotnosti nosné konstrukce bylo provedeno pomocí metody konečných prvků a skladba vyzdívky byla hodnocena na základě tepelně izolačních vlastností jednotlivých materiálů. Nejprve byla provedena analýza stávající konstrukce pece a na základě rozložení napjatosti byly navrženy konstrukční úpravy. Nosná konstrukce je zatížena teplotně, vlastní hmotností a hmotností příslušenství. Součástí zadání bylo prověření nosnosti pecního vozu dle předem definovaného zatížení. V navržených úpravách byla zohledněna jednoduchost montáže s ohledem na robustní rozměry celého zařízení.

## 2 Úvod do problematiky konstrukce pecí

V současné době existuje mnoho druhů průmyslových pecí určených pro různé aplikace. Obecně se průmyslová pec skládá z nosné konstrukce, izolace, topných těles a případně dalších zařízení. V mé diplomové práci se budu zabývat nosnou konstrukcí průmyslových pecí a skladbou vyzdívky. Pro lepší pochopení dané problematiky jsem nejprve zpracoval rešerši současných technických řešení.

V rozdělení na *obr. 1.* je vycházeno jednak z literatury a jednak nabídky sortimentu tuzemské inženýrsko-dodavatelské společnosti E-therm TZ s.r.o. Toto rozdělení se zabývá pouze technologickým určením ohřev a tepelné zpracování. V průmyslu se setkáme i s dalšími druhy pecí, jako jsou vysoké pece pro zpracování železa, nebo pece pro vypalování keramiky.



*obr. 1- rozdělení průmyslových pecí*

## 2.1 Rozdělení dle manipulace se vsázkou

Informace a obrázky v této kapitole byly čerpány z webu ethermtz.cz [1]

### 2.1.1 Vozové pece

Vozové ohřívací pece jsou nejčastěji používaným typem pecí pro ohřev ingotů a polotovarů v kovárnách. V pracovním prostoru vozových ohřívacích pecí se může dosahovat teploty až 1350 °C. Jejich výhodou je snadná přístupnost pro zakládání a vyjímání vsázky, možnost použití mostového jeřábu v hale a nezávislost na dalším manipulačním zařízení. Vozové pece jsou vhodné zejména při kování velmi rozměrných výkovků, jako jsou rotory parních turbín, hřídele větrných elektráren, zalomené hřídele lodních motorů a obdobné součásti velkých energetických a strojírenských zařízení.



obr. 2- ohřívací pec



obr. 3 - ohřívací pec

V porovnání s žhacími vozovými peci jsou ohřívací pece osazeny menším počtem výkonnějších hořáků, čímž se dosahuje vyšší rychlosti ohřevu a tím snížení nákladů. U žhacích pecí jsou naopak použity hořáky menšího výkonu ve větším množství, aby bylo dosaženo co možná nejrovnoměrnějšího rozložení teploty.



obr. 4 - žhací pec



obr. 5 - hořáky žhací pece



obr. 6 - el. žhací pec

Vozové žhací pece se uplatňují při tepelném zpracování hotových kovárenských produktů, ale také pro tepelné zpracování odlitků nebo svařenců. Rozměrné díly se žhají uložené na žhacích podložkách na pecním vozu, drobné výrobky se na podložky zavážejí uložené v koších nebo na roštích. Rozsah teplot: 250°C - 1150°C. Tepelná zpracování prováděná v žhacích pecích:

- Normalizační žhání
- Rekrytalizační žhání
- Ohřev pro kalení
- Ohřev pro austenitizaci
- Popouštění
- Žhání na odstranění vnitřního pnutí
- Řízené chlazení (pece vybavené chladícím systémem - bez potřeby otevírání dveří)

V opodstatněných případech jsou vozové žhací pece místo plynového topného systému vybaveny elektrickým odporovým topením a v případě potřeby zařízením pro nucenou cirkulaci vzduchu, zajišťujícím rovnoměrnost teplotního pole a zintenzívnění konvekčního přenosu tepla na vsázku.

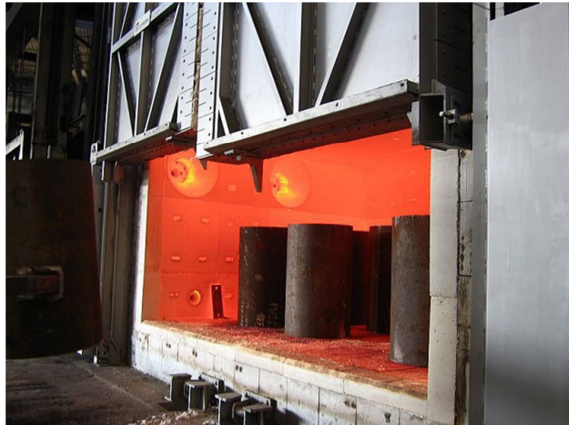
### 2.1.2 Komorové pece

Komorové pece pro ohřev oceli se používají v kovárnách středně těžkých a drobných výkovků. Typické pracovní teploty jsou do 1300 °C a rychlosti ohřevu jsou zpravidla do 100 °C za hodinu. Oproti vozovým pecím potřebují komorové pece zařízení pro manipulaci se vsázkou při jejím zakládání a vyjímání.

S ohledem na téměř trvalý provoz při vysokých teplotách jsou komorové ohřívací pece přednostně vybavovány topnými systémy s regeneračními hořáky, které přinášejí maximální úspory paliva a podstatně snižují množství oxidu uhličitého odcházejícího do ovzduší.

U komorových pecí se můžeme setkat s úpravou topného a řídicího systému, která umožní využít dočasně zdvojnásobeného maximálního výkonu topného systému. Tato funkce je využívána pro urychlení ohřevu např. při náběhu pece na teplotu s plnou vsázkou nebo pro co nejrychlejší dohřev na kovací teplotu z důvodu omezení zokujení.

Komorové pece se používají též pro tepelné zpracování a jejich vlastnosti jsou obdobné vozovým pecím. Výhodou v tomto případě je nepohyblivá nístěj, která tak zaručuje stabilitu vsázky, a to i v případě složitější skladby dílů ve sloupcích nebo vrstvách.



*obr. 7 - komorová ohřívací pec*



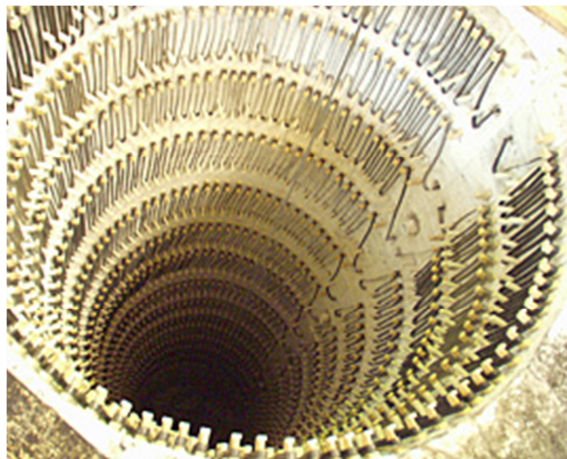
*obr. 8 - komorová ohřívací pec*



*obr. 9 - komorová ohřívací pec*

### 2.1.3 Šachtové pece

Tyto pece se používají pro tepelné zpracování ocelových výkovků typu hřídele a rotory, rozměrných osově symetrických výrobků jako prstence nádob jaderných reaktorů, drobných dílů v koších, nebo pro žíhání svitků plechu nebo drátu z ocelí a neželezných kovů, zejména mědi a mosazi. Šachtové pece se dodávají s plynovým nebo elektrickým topením, v případě potřeby v provedení s ochrannou atmosférou. Pracovní teploty jsou podle účelu použití až do 1100 °C. Pro nižší teploty a při elektrickém topení nebo při nepřímém plynovém topení se pro zintenzívnění přenosu tepla a dosažení požadované rovnoměrnosti teploty používá cirkulační ventilátor a zařízení pro usměrnění proudění atmosféry v peci.



obr. 10 - šachtová elektrická pec

Při omezené výšce haly a obsluhujícího mostového jeřábu mohou být v některých případech šachtové pece použity místo pecí pokloповých.

Alternativu pro tepelné zpracování hřídelí a rotorů ve svislé poloze tvoří vertikální věžové pece. Jsou umístěny nad úrovní podlahy haly a vsázka ve svislé poloze se zakládá bočně.

### 2.1.4 Pokloповé pece

Pokloповé žíhací pece se používají pro nejnáročnější žíhání svitků drátu a plechu, ale také drobných výkovků a výlisků z oceli i neželezných kovů. Konstrukce pece umožňuje provádění tepelného zpracování v širokém rozsahu teplotních křivek běžně do teploty vsázky 850 °C.

Výhodou těchto pecí je možnost lesklého žíhání širokého sortimentu materiálů díky použití ochranných atmosfér. Kromě standardní dusíkové ochranné atmosféry je konstrukce pecí připravena rovněž pro provoz se 100% vodíkovou atmosférou.



obr. 11 - pokloповá pec

Jedna pecní jednotka zpravidla obsahuje:

- Dva podstavce - v podstavci je zabudován vysoce výkonný cirkulační ventilátor
- Dva ochranné poklopy - uzavírají prostor se vsázkou a ochrannou atmosférou a oddělují tento prostor od topného prostoru
- Jeden topný poklop s plynovým nebo elektrickým topným systémem
- Jeden chladicí poklop umožňující intenzivní chlazení vsázky po žíhání

### 2.1.5 Válečkové pece

Válečkové pece jsou průběžné pece pro tepelné zpracování především profilového materiálu (kruhové tyče, plochá ocel, profily, trubky), ocelových plechů nebo i svitků drátu na podnosech, případně drobných součástí v koších. Jsou dodávány s přímým topením nebo s nepřímým ohřevem vsázky za použití ochranné atmosféry.

Pece jsou konstruovány pro teploty do 1150°C, případně pro zvláštní účely (např. pec pro výpal feritů) až do 1450°C. Válečkový dopravní systém je dimenzován podle teploty v peci a podle druhu a hmotnosti vsázky.

U těchto linek mohou být uplatněny i technologie se 100% vodíkovou atmosférou. Tato technologie byla například použita pro lesklé žhánění trubek z austenitických a duplexních ocelí, určených pro výrobu podmorských trubkových svazků používaných při těžbě ropy z mořského dna.



obr. 12 - válečková pec



obr. 13 - válečková pec

### 2.1.6 Průběžné pece pro tepelné zpracování pásu z neželezných kovů

Průběžné pece jsou určeny především k instalaci do mořících linek a výrobních linek s konečnou povrchovou úpravou plechu. Dodávány jsou v horizontálním i ve vertikálním provedení. Vertikální pece jsou pro prodloužení doby průchodu pásu pecí a pro vyšší výkon řešeny s výhodou jako vícesmyčkové.

Vzhledem k požadavkům na technologii tepelného zpracování a výslednou kvalitu povrchu materiálu jsou tyto pece konstruovány především pro tepelné zpracování v ochranné atmosféře dusíku nebo dusíku s 4% vodíku (nevýbušná atmosféra). Vybaveny jsou elektrickým odporovým topením nebo sálavými trubkami s plynovými hořáky.



obr. 14 - tepelné zprac. pásu plechu



### 2.1.7 Krokové pece

Krokové pece se používají k ohřevu sochorů a bram ve válcovnách i k tepelnému zpracování. Jedná se o obdobu průběžné pece, v tomto případě pracující v krocích.

Použití krokových pecí:

- Krokové pece pro ohřev hutních polotovarů a kontislitků před tvářením
- Krokové pece pro linky tepelného zpracování



*obr. 15 - kroková pec*

### 2.1.8 Karuselové pece

Karuselové pece jsou průběžné pece používané pro ohřev polotovarů pro válcování, kování, lisování a protlačování v sériové výrobě. Nejčastěji se uplatňují ve válcovnách trub a pece menších výkonů zejména při ohřevu přířezů pro zápuskové kování, kování kroužků a podobné technologie. Pece zpravidla pro menší rozměry ohřívané vsázky a menší výkony lze řešit jako pece talířové, které mohou být v kontinuální výrobě vhodnou náhradou komorových ohřívacích pecí.



*obr. 16 - karuselová pec*

Výhody karuselových pecí:

- Univerzálnost pro velký sortiment materiálů a různé následné technologické procesy
- Vsazení do pece i vyjímání vsázky lze zabezpečit z jednoho prostoru
- Široké rozmezí řízení rychlosti průchodu vsázky pecí
- Vysoká ekonomie provozu s využitím odpadního tepla spalin

## 2.2 Rozdělení dle způsobu ohřevu

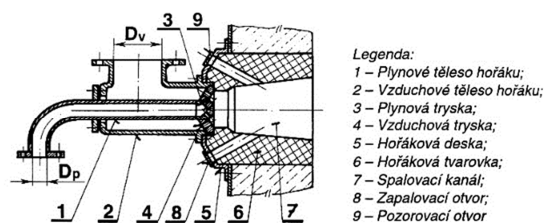
Dle způsobu ohřevu se pece dělí na elektrické a plynové. Pro menší pece se ale používá ohřev elektrický, vzhledem k nákladům na přívodní potrubí plynu, přívodního vzduchu, a také nákladům na odtahový systém. Vyšší efektivitu ohřevu získáme s hořáky plynovými.

Plynové hořáky jsou zařízení, ve kterých se chemická energie plynného paliva přeměňuje spalováním na energii tepelnou a slouží jako zdroj tepla pro plynové spotřebiče.

Popis základních představitelů plynových hořáků [2]:

### 2.2.1 Hořáky s nuceným přívodem vzduchu

Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu se používají převážně pro technologické ohřevy. Tyto hořáky pracují obvykle s nízkým přetlakem plynného paliva a spalovacího vzduchu. Zdrojem spalovacího vzduchu je obvykle radiální ventilátor.

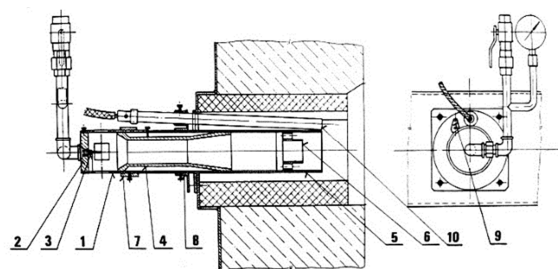


obr. 17- hořák s nuceným přívodem vzduchu<sup>2</sup>

### 2.2.2 Injektorové hořáky

Středotlaké injektorové hořáky se používají výhradně pro průmyslové ohřevy. Oproti hořákům s nuceným přívodem spalovacího vzduchu mají řadu předností:

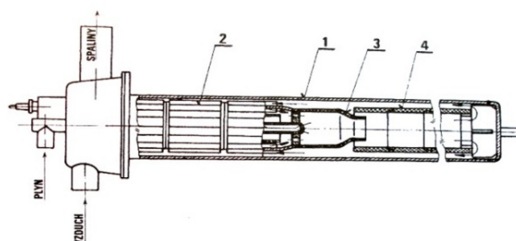
Spalovací vzduch se do hořáku nasává ejekčním účinkem plynného paliva, takže odpadá nutnost instalace ventilátorů spalovacího vzduchu, vzduchového potrubí a jeho armatur. Současně vzniká úspora energie pro pohon ventilátorů ve výši přibližně 2 % tepelného příkonu pece. Injektorové hořáky mají autoregulační schopnost, která umožňuje udržovat stálý spalovací poměr při změně výkonu hořáků



obr. 18- injektorový hořák<sup>2</sup>

### 2.2.3 Sálavé trubky

Sálavé trubky jsou nízkotlaké plynové hořáky s nuceným přívodem vzduchu, se spalováním plynovzdušné směsi v uzavřené kovové, nebo keramické trubce a s odvodem spalin mimo vytápěný prostor. Nejrozšířenějším typem je plášťová sálavá trubka s vestavěným kovovým rekuperátorem, ve kterém se ohřívá spalovací vzduch spalinami odcházejícími z trubky. Spalovací trubice plášťových sálavých trubek jsou zhotoveny z keramických segmentů nebo z rekrystalizovaného karbidu křemíku. Sálavé trubky se používají pro otop s nepřímým ohřevem při tepelném zpracování ocelí a neželezných kovů v prostředí řízených atmosfér, kdy je styk vsázky se spalinami nežádoucí.

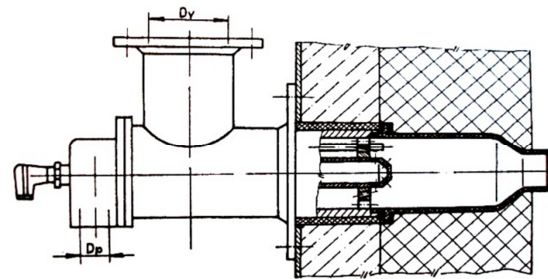


Legenda: 1 - Plášť sálavé trubky; 2 - Rekuperátor; 3 - Tvarovka hořáku SiC; 4 - Spalovací trubice

obr. 19- sálavá trubka<sup>2</sup>

### 2.2.4 Impulzní hořáky

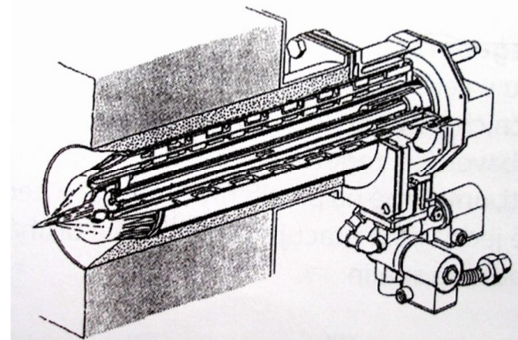
Impulzní hořáky pracují s vysokými výstupními rychlostmi spalin z ústí spalovacího kanálu (80 až  $120 \text{ ms}^{-1}$ ) jejichž dynamickým účinkem vzniká v pracovním prostoru teplotně a tlakově homogenní prostředí. Hořáky s tvarovkou zhotovenou z rekrystalizovaného karbidu křemíku mohou spalovat zemní plyn se vzduchem přehřátým až na teplotu  $600^\circ\text{C}$  při teplotě ve spalovacím kanálu až  $2000^\circ\text{C}$ .



obr. 20- impulzivní hořák<sup>2</sup>

### 2.2.5 Rekuperační hořáky

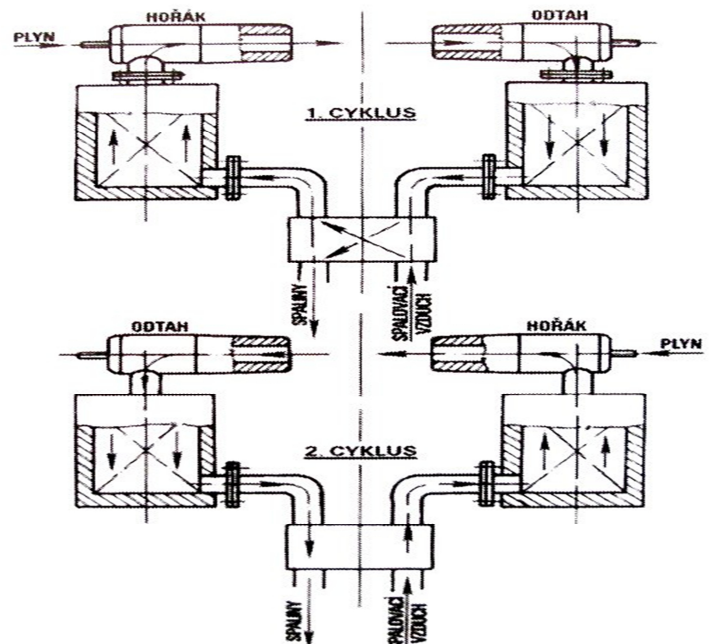
Rekuperační hořáky jsou hořáky s rekuperátory pro ohřev spalovacího vzduchu, vestavěnými v tělese hořáku. Princip jejich funkce spočívá v tom, že ohřev spalovacího vzduchu teplem spalin odcházejících z pracovního prostoru pece je na rozdíl od klasických rekuperátorů, které ohřívají spalovací vzduch centrálně pro všechny hořáky pece, decentralizován do většího počtu malých vysoce účinných rekuperátorů.



obr. 21- rekuperační hořák<sup>2</sup>

### 2.2.6 Regenerační hořáky

Regenerační hořáky na rozdíl od rekuperačních hořáků, které ohřívají spalovací vzduch kontinuálně, s přibližně konstantními teplotními parametry, pracují diskontinuálně. Topný a odtahový systém pecí vybavených regeneračními hořáky je rozdělen na dvě části, umístěné na protilehlých stěnách pece, z nichž střídavě jedna část pracuje jako topná a druhá část plní funkci odtahu spalin. V časově regulovaných intervalech proběhne tzv. reverzace, při níž se změni směr proudění spalin do druhé soustavy regeneračních hořáků. Přes první (pracovní) soustavu proudí spalovací vzduch, který se ohřívá na vysokou teplotu ( $800^\circ\text{C}$  až  $1000^\circ\text{C}$ ) a stejně jako v případě rekuperace zvyšuje účinnost pece a snižuje spotřebu plynného paliva.



obr. 22- regenerační hořák<sup>2</sup>

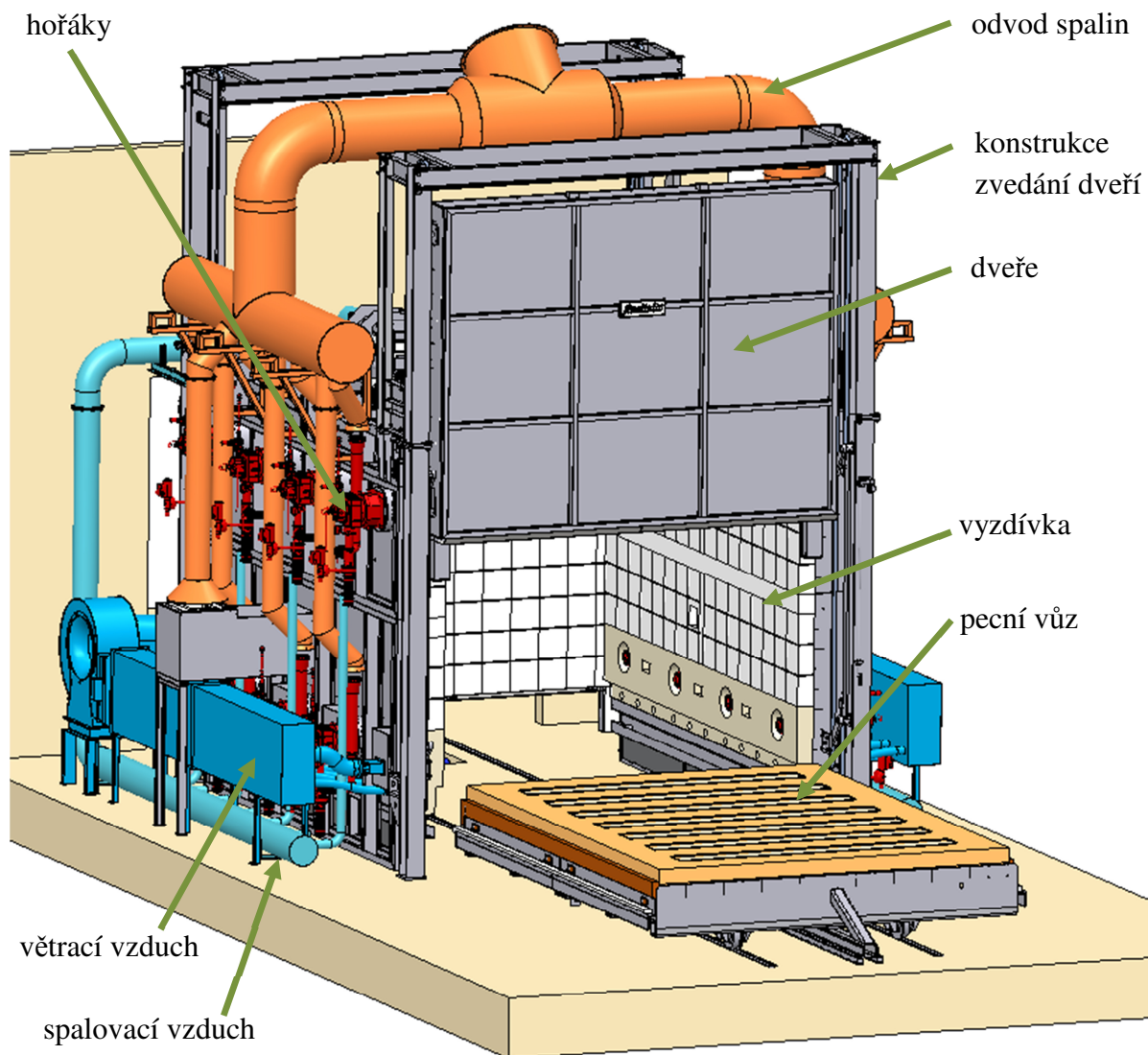
## 2.3 Požadavky kladené na průmyslové pece

Při konstrukci průmyslových pecí je dbáno na následující požadavky:

- Dostatečná izolace pecního prostoru.
  - Zamezit vzniků tepelných ztrát nad tolerovanou hodnotou.
  - Zamezit překročení maximální dovolené teploty součástí.
  - Zamezit překročení hygienické hranice teploty u součástí, se kterými pracuje obsluha
- Tepelně-mechanická stabilita rámu.
  - Nedovolit překročení dovoleného napětí v rámu.
  - Nedovolit vzniku plastických deformací v rámu.
- Hmotnost.
  - Snížit hmotnost rámu na minimum.
  - Snížit hmotnost vyzdívky na minimum.
- Jednoduchost montáže.
  - Volit takové konstrukční řešení, které umožňuje jednoduchost montáže rámu s ohledem na rozměry celé konstrukce.
  - Umožnit co nejjednodušší montáž vyzdívky k rámu.
- Rovnoměrnost a výkon ohřevu
  - Volit výkon a počet hořáku dle požadavku na rovnoměrnost teplotního pole.
- Udržení přetlaku v peci generovaného hořáky.
  - Dostatečná těsnost dveří.
  - Mechanismus přitlačující dveře k peci.
- Ekonomičnost a ekologičnost provozu.
  - Využití rekuperace.
  - Využití regeneračních hořáků.
- Řízené ochlazování pece.
  - Vybavení měřícím a ventilačním systémem.
- Použití ochranných atmosfér.
  - Umožnit provoz s dusíkovou atmosférou
  - Umožnit provoz s vodíkovou atmosférou
- Automatizace linky
  - Automatizace pro sériový provoz.
  - Automatizace pro linkový provoz.

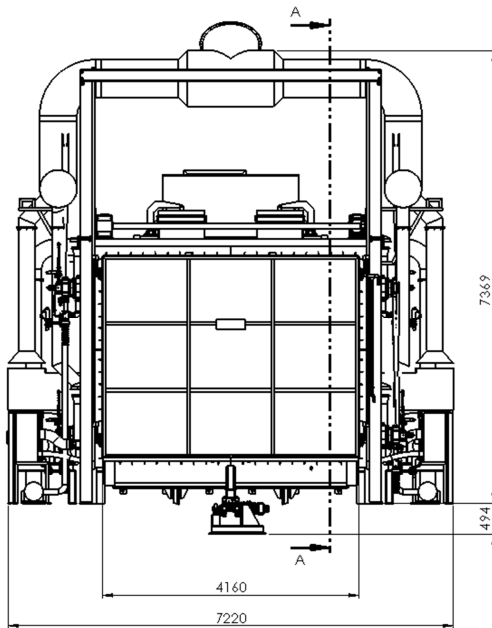
### 3 Analýza současného stavu

Řešená pec je typu vozová (viz. kapitola 2.1.1) a je určena pro ohřev vsázky do 20 t. Pro manipulaci se vsázkou je uvažováno použití jeřábu a pro snazší manipulaci se vsázkou je pec vybavena dveřmi na obou stranách. Zvedání dveří je zajištěno pomocí mechanismu s nekonečným řetězem. Pecním vozem je pohybováno pomocí mechanismu s ozubeným hřebenem. K otopu pece je použito 14 hořáků typu „sálavá trubka“ (viz. kapitola 2.2.3) a pec je také vybavena ventilačními dmychadly, která společně s odklopnými víky umožňují řízené ochlazování pecní atmosféry.

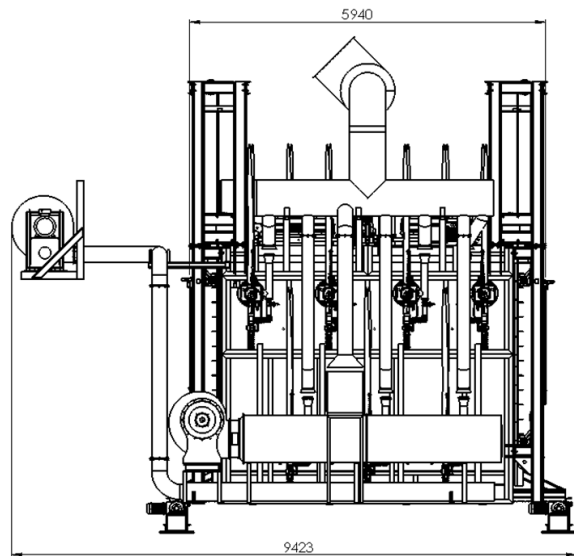


obr. 23 - popis základních částí pece

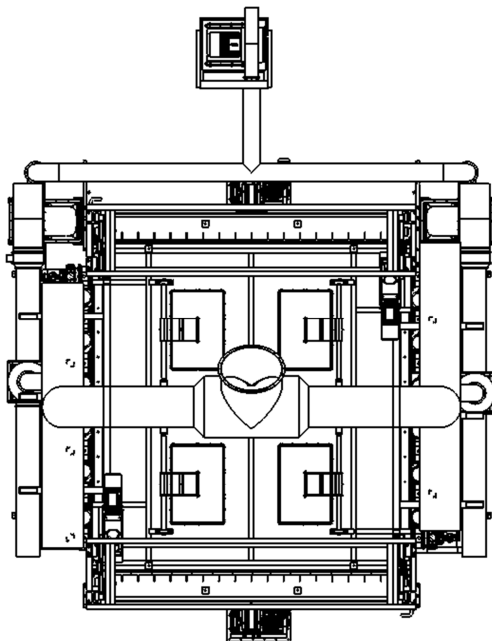
### 3.1 Základní rozměry řešené pece



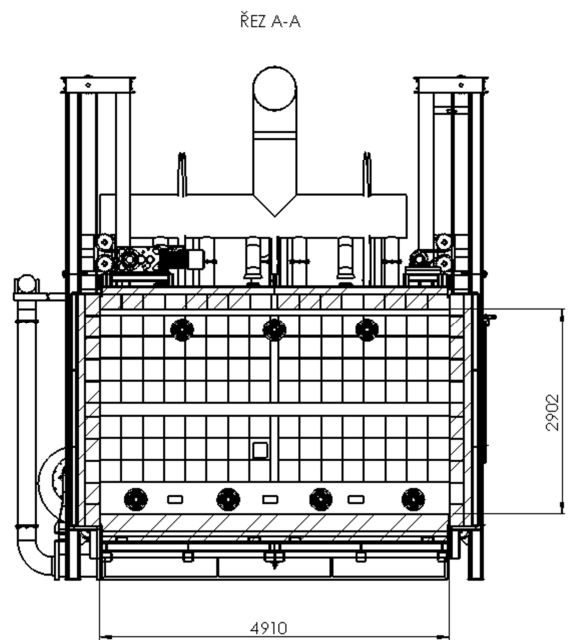
obr. 24 - základní rozměry - pohled zepředu



obr. 25 - vnější rozměry - pohled z boku



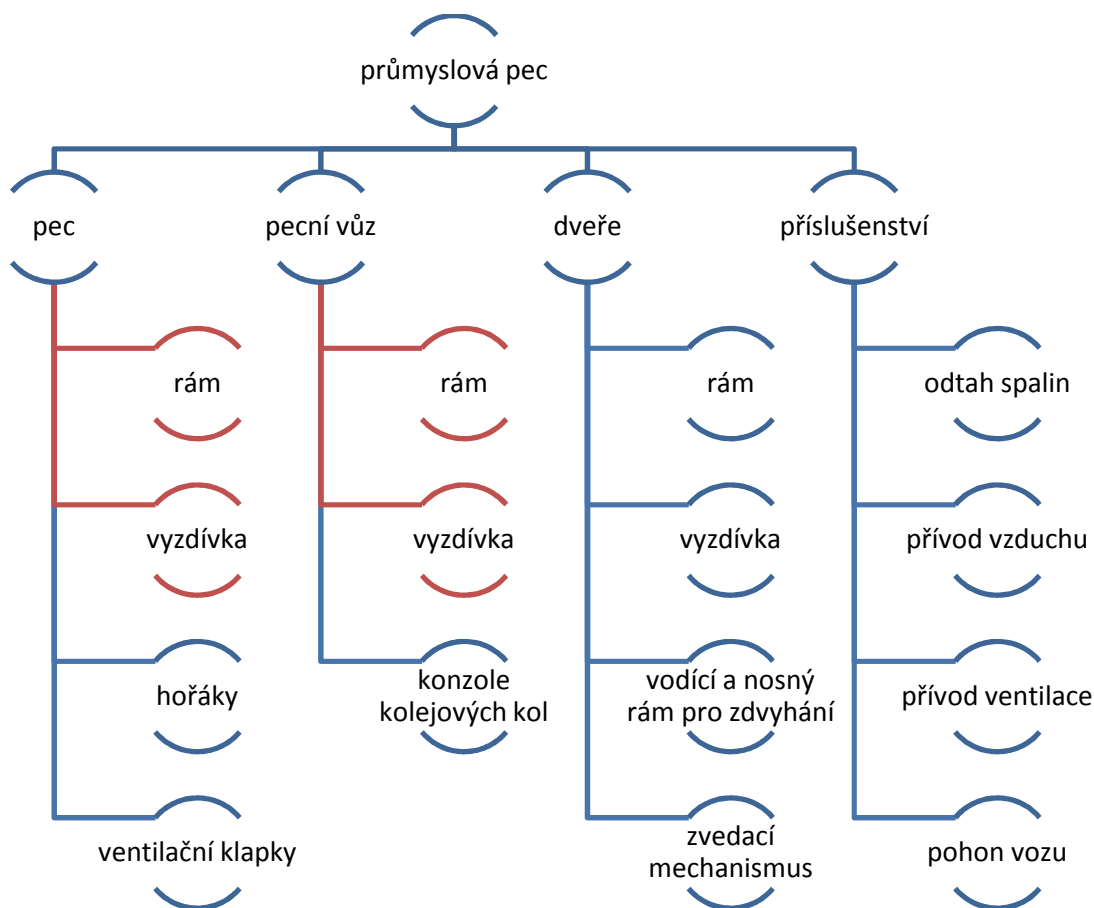
obr. 26 - pohled svrchu



obr. 27 - zvnitřní rozměry - řez pecí

### 3.2 Popis konstrukčních uzlů řešení pece

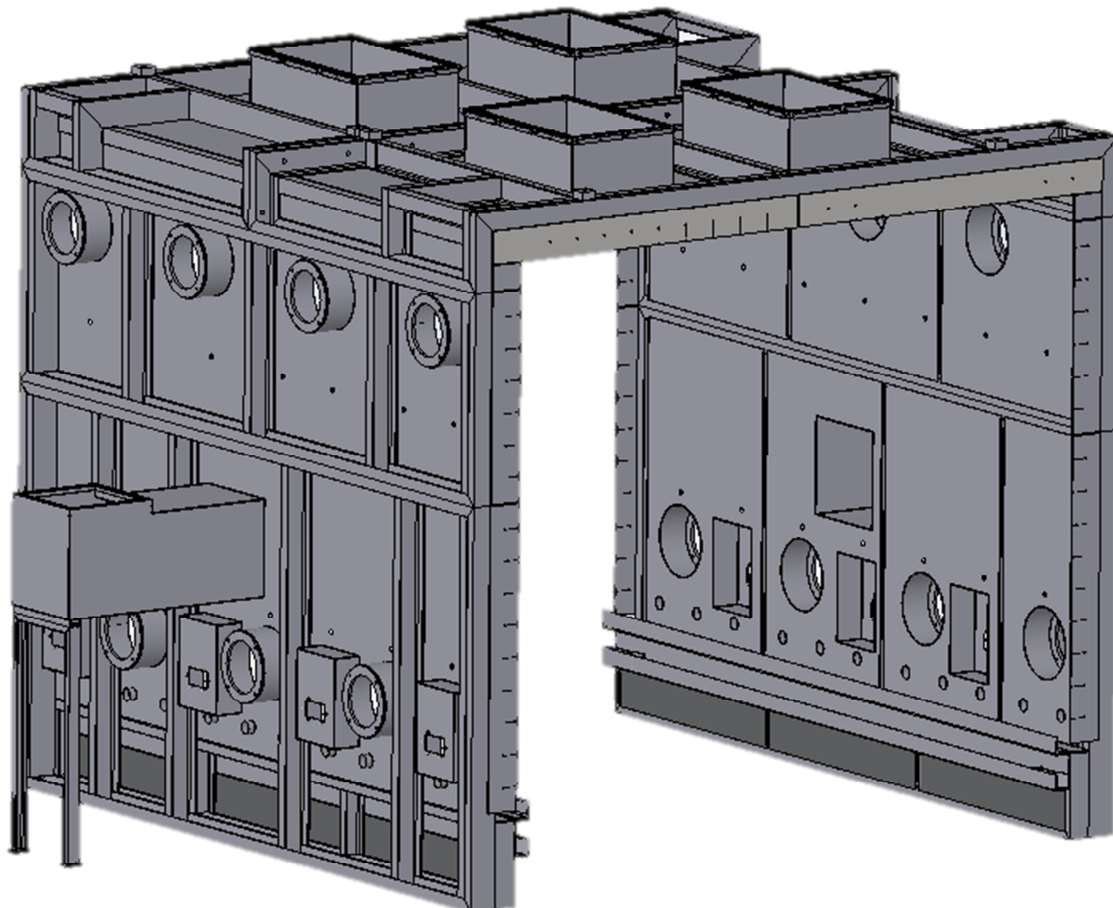
Řešenou pec můžeme rozdělit na konstrukční uzly znázorněné na *obr. 28*. Tato práce je zaměřena převážně na optimalizaci rámu pece a rámu pecního vozu. Dále se zabývá vyzdívkami pece a pecního vozu. Jelikož úpravy dveří pece jsou ekvivalentní k úpravám samotné pece, není pro zadavatele samostatná optimalizace dveří podstatná, a proto optimalizace dveří není součástí této práce.



*obr. 28 - konstrukční uzly řešené pece*

### 3.2.1 Popis rámu pece

Rám pece (na *obr. 29*) je smontován z šesti svařovaných celků. Tyto svařené celky jsou navzájem spojeny pomocí šrouby předepjatého spoje. Jako nosné prvky jsou použity U profily o rozměrech 180x70x8 mm a materiálu ČSN 11 375. U profily jsou použity z důvodu snadné smontovatelnosti rámu při zachování jednoduchosti konstrukce. Použité plechy mají tloušťku 5mm a jsou vyrobeny z materiálu ČSN 11 375.

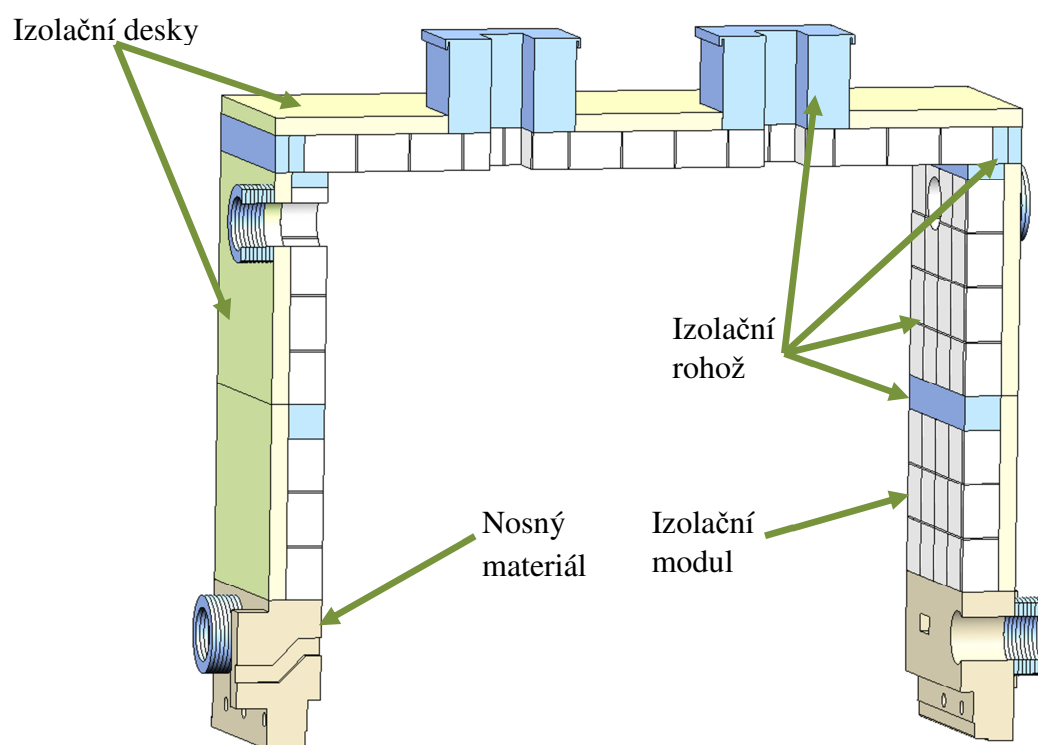


*obr. 29 - rám pece*



### 3.2.2 Popis vyzdívky pece

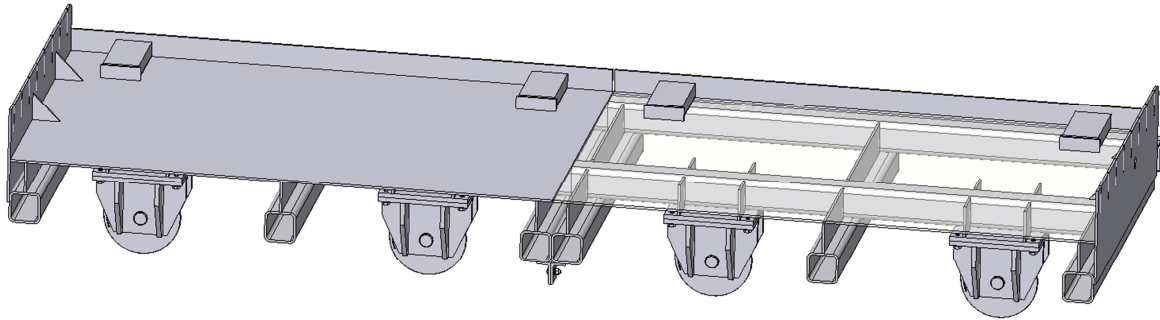
Na obr. 30 je zobrazena pouze vyzdívka. Izolační moduly (Sibral) jsou pomocí šroubů jdoucích skrz izolační desky (Promasil) přimontovány k rámu pece. Rozměry jednotlivých modulů jsou: 450x300x200 mm. mezi moduly je vměstnána izolační rohož (Sibral). Vysoká poddajnost izolační rohože umožní modulům roztažení, ke kterému dochází vlivem teplotní roztažnosti materiálu. Díky této konstrukci je izolační rohož zmáčknuta mezi moduly a nedochází tak k únikům tepla na okrajích modulů a zároveň je eliminován nárůst napětí v konstrukci vlivem tepelné roztažnosti vyzdívky. Spodní část pece, která je méně teplotně zatížena je tvořena vyzdívkou z lehčených cihel (HBU7). Ty jsou zde použity z důvodu snadného tvarování této vyzdívky v porovnání se izolačními moduly. Lehčené cihly HBU7 jsou kategorizovány jako nosný materiál. V tomto případě ale jejich nosnost není využita.



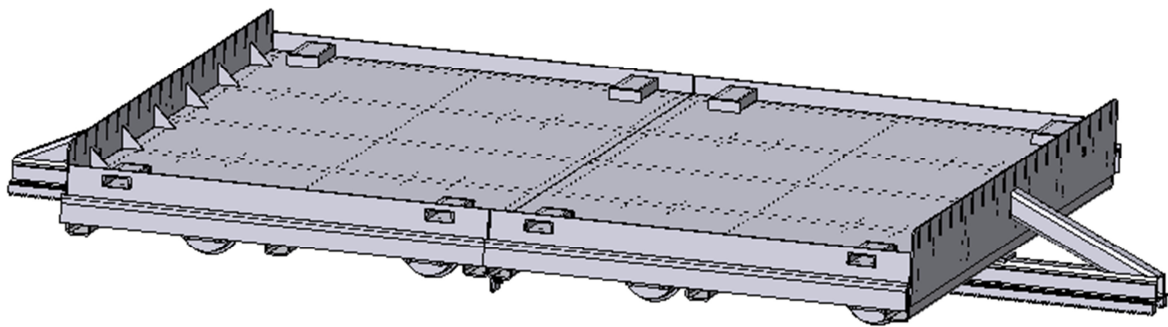
obr. 30 - řez vyzdívkou pece

### 3.2.3 Popis rámu pecního vozu

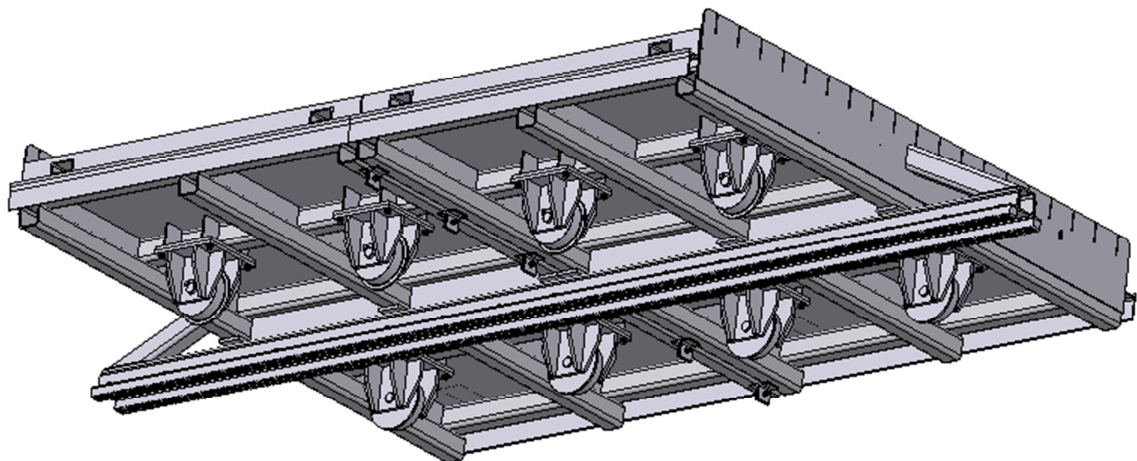
Na *obr. 31* je znázorněn řez rámem pecního vozu. Rám je tvořen dutými čtvercovými profily tzv. jekly o profilu 140x140x10 mm a páskovinami průřezu 140x10 mm. podlaha vozu je tvořena plechy o tloušťce 10 mm. Rám je rozdělen v polovině na dvě samostatné smontovatelné části. Profily a plechy jsou z oceli ČSN 11 375.



*obr. 31 - řez rámem pecního vozu*



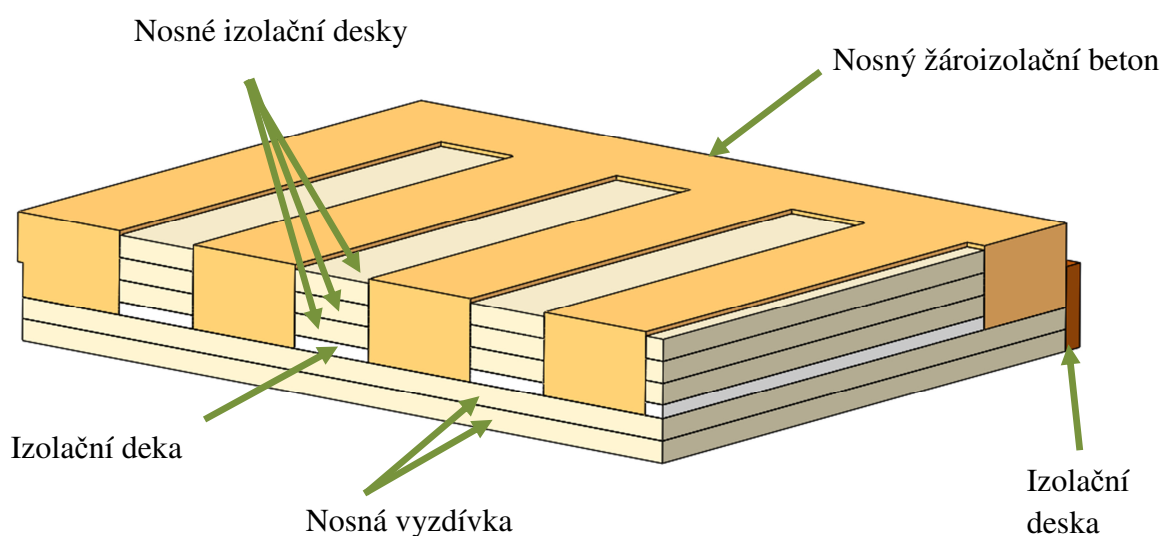
*obr. 32 - rám pecního vozu*



*obr. 33 - rám pecního vozu*

### 3.2.4 Popis vyzdívky pecního vozu

Na rámu vozu je položena vyzdívka (obr. 34). Hlavní část vyzdívky je tvořena segmenty z žároizolačního betonu Calde Cast LX50 s mezí pevnosti v tlaku 110MPa, který slouží jako nosný člen, na něj jsou pokládány žihací podložky. Do mezer v žároizolačním betonu jsou vyskládány izolační desky o rozměrech 270x65x2940 mm. Z bezpečnostních důvodů jsou na vrchu použity nosné izolační desky z materiálu Calce Cast Strong Lite s mezí pevnosti v tlaku 10MPa, ačkoli by v běžném provozu neměly být mechanicky zatíženy. Tyto desky, včetně desky z Promasilu disponují lepšími izolačními vlastnostmi než Calde Cast LX50. Vše je položeno na nosnou vyzdívku z cihel HBU7 (rozměr cihly: 250x123x65 mm), které jsou běžným nosným a izolačním prvkem v průmyslových pecích.



obr. 34 - čtvrtinový řez vyzdívkou vozu

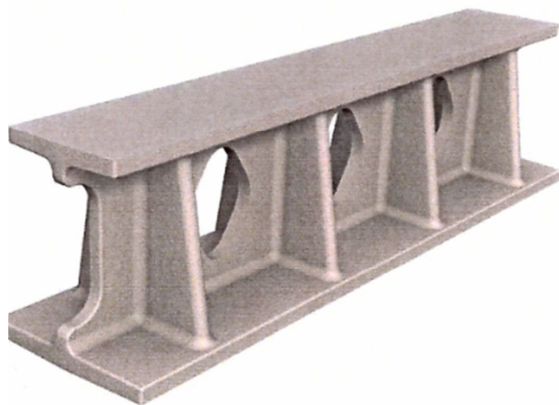
### 3.3 Zátěžové stavy pece a vozu

#### 3.3.1 Pec

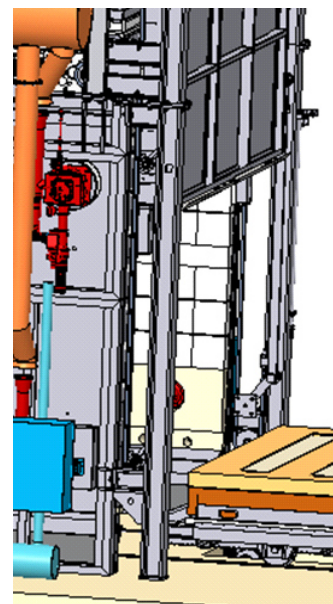
- Teplotní zatížení (deformace)
  - Povrch vyzdívky je zahříván pecní atmosférou. Součinitelé přestupu tepla byly optimalizované během simulace s ohledem na skutečně naměřené hodnoty teplot na řešené peci. Bylo vycházeno z teplot prostředí, které odpovídají pro pecní atmosféru 1000°C a pro halu 30°C. Způsob proudění je pro pec uvažováno jako nucená konvence s mírnou až střední rychlostí proudění média. Proudění vzduchu v okolí pece je uvažováno jako volná konvence.
- Mechanické zatížení
  - Rám pece je zatížen vlastní vahou (6,8 t), hmotností vyzdívky (4,1 t) a hmotností příslušenství (Spalinové potrubí (1,7 t) je přes konzole uchyceno do rámu pece). Dále je rám zatížen od hmotnosti dveří. Hmotnosti dveří (2,2 t) je přenášena jednak vlastním rámem do podlahy a jednak do rámu pece (*obr. 36*). Je zde tedy uvažováno čtvrtinové zatížení od hmotnosti vzhledem k tomu, že je řešena pouze polovina pece a zároveň polovina hmotnosti dveří spočívá na jejich vlastním rámu.

#### 3.3.2 Pecní vůz

- Teplotní zatížení
  - Teplotní zatížení vozu je totožné s teplotním zatížením pece.
- Mechanické zatížení
  - Pecní vůz je mechanicky zatížen vlastní hmotností (16 t) a hmotností vsázky. Pro nejhorší zátěžový stav byla vybrána situace, kdy je do pece pokládána vsázka o hmotnosti 20 t na pouhé dvě tzv. žíhací podložky (*obr. 35*). Tím je redukována plocha kontaktu žíhacích podložek s vyzdívkou na minimum a lokální zatížení vyzdívky je maximální. Vsázka je pokládána na okraj vozu a dochází tak k nesymetrickému zatížení.



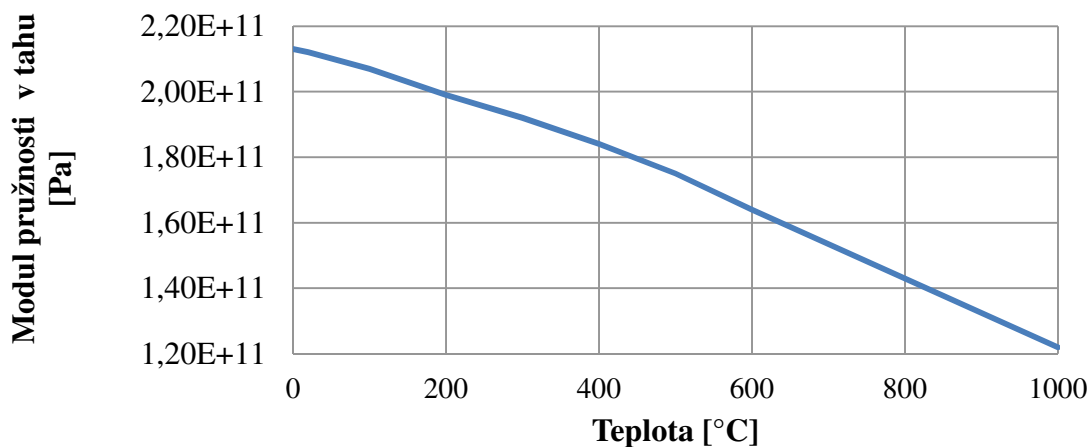
*obr. 35 - žíhací podložka [3]*



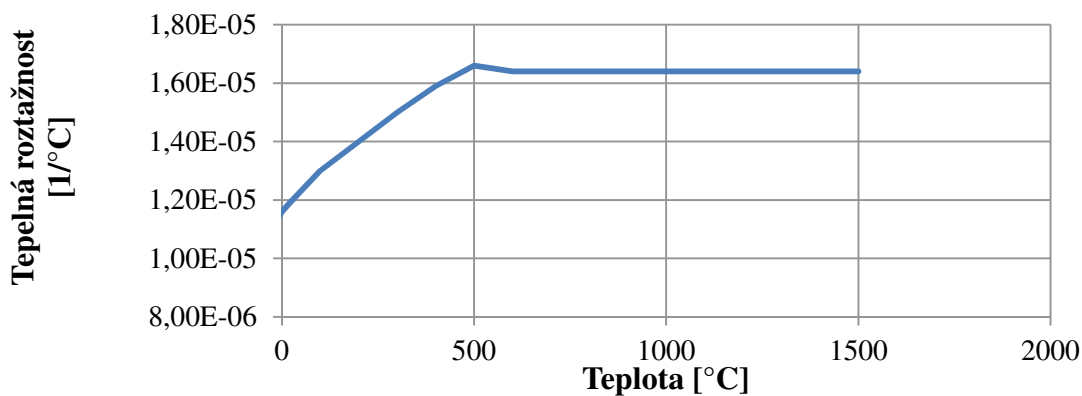
*obr. 36 - uchycení dveří*

### 3.4 Materi $\acute{a}$ lov $\acute{e}$ vlastnosti oceli

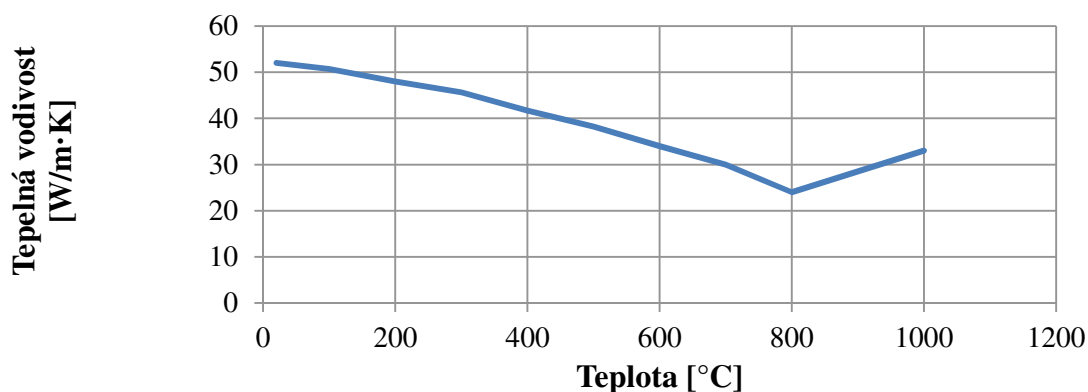
Vzhledem k teplotn $\acute{ı}$ mu zat $\acute{ı}$ žení pece, byly materi $\acute{a}$ lov $\acute{e}$  vlastnosti oceli vztaženy k teplot $\acute{e}$ .



obr. 37 - modul pružnosti oceli v tahu [4]

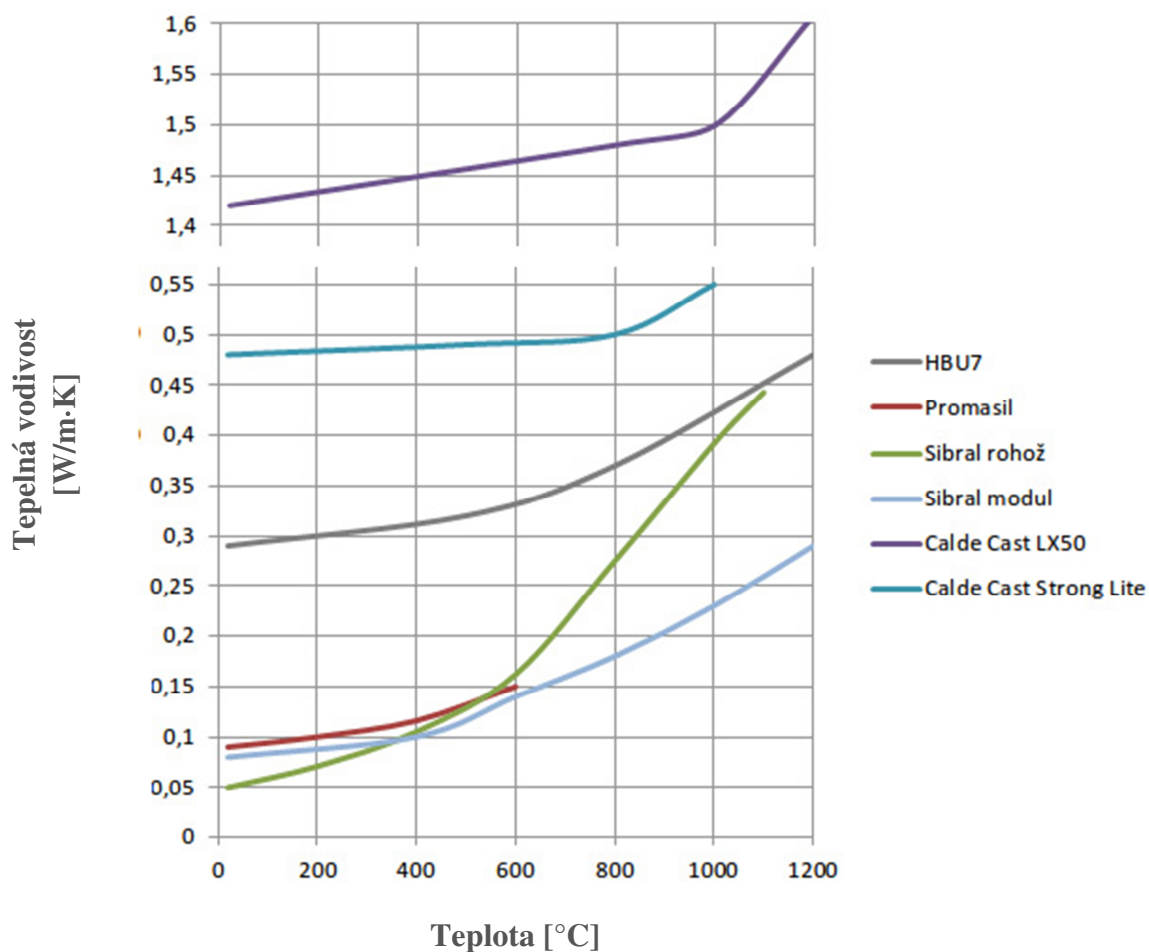


obr. 38 - tepelná roztažnost oceli [4]



obr. 39 - tepelná vodivost oceli [4]

### 3.5 Materiálové vlastnosti vyzdívek



obr. 40 - tepelná vodivost vyzdívek v závislosti na teplotě

tab. 1 - materiálové vlastnosti vyzdívků

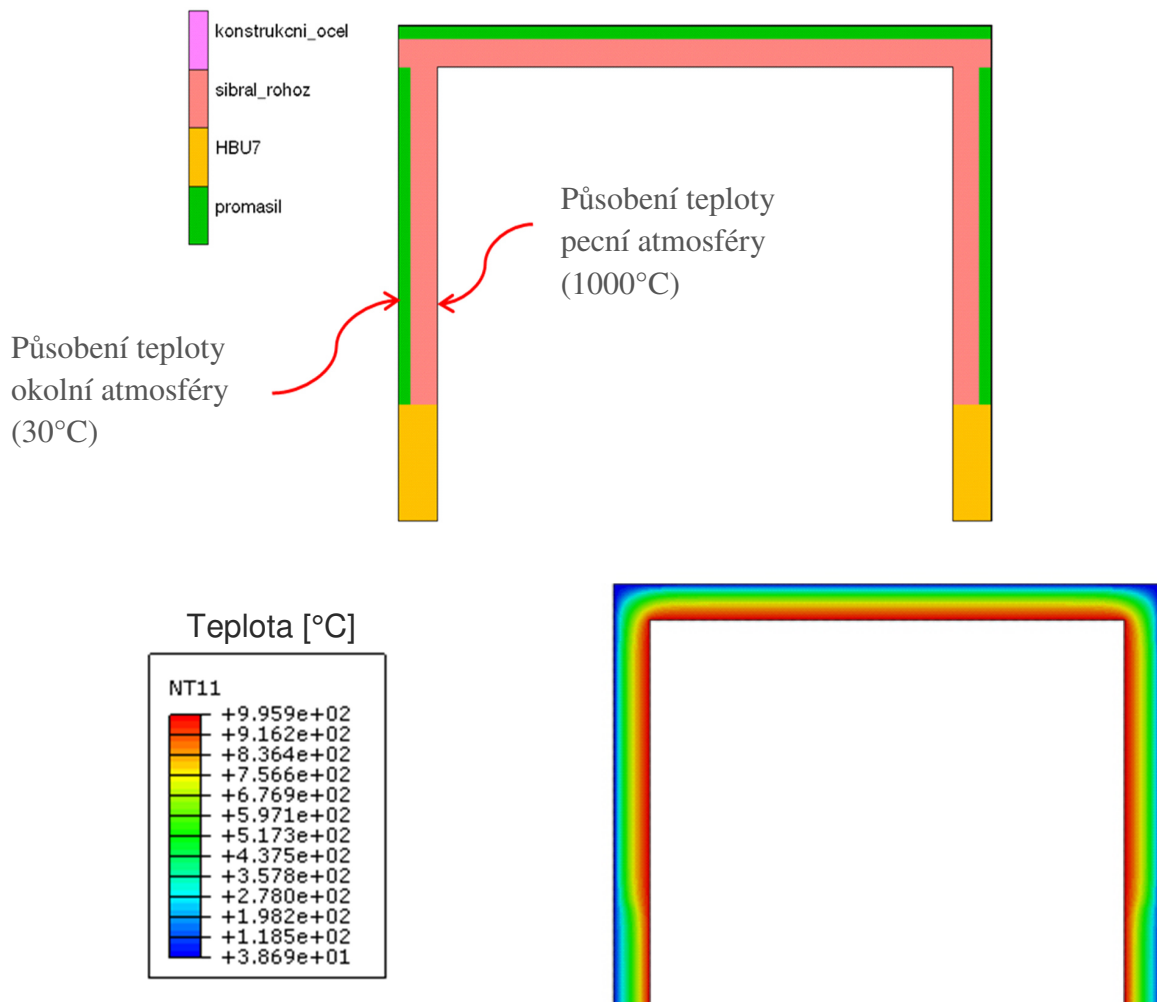
Materiál:	HBU7 [5]	Promasil [6]	Sibrál rohož [7]	Sibrál modul [7]	Calde Cast LX50 [8]	Calde Cast Strong Lite [8]
měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	700	245	130	200	2380	1440
specifické teplo [J/kg·K]	800	880	969	969	800	800
Elasticita [Pa]	1,00E+10	1,00E+08	1,00E+08	1,00E+08	1,00E+10	1,00E+10

## 4 Numerická analýza pece

Před návrhem úprav pece byla provedena analýza současného stavu. Výsledky teplotní analýzy byly porovnány s naměřenými hodnotami na skutečné peci pro ověření správnosti výsledků.

### 4.1 Předběžná 2D analýza pece

Pro kontrolu správnosti okrajových podmínek byla provedena předběžná 2D transientní úloha. Díky jednoduchosti této simulace mohl být čas průběhu transientní úlohy nastaven na 5 dní a i přes to byl výpočetní čas zanedbatelný. Výsledkem této analýzy byl čas do ustálení teplotního toku, kterého bylo dosaženo po 20 hodinách ohřevu. Tato hodnota koresponduje se skutečnou dobou ohřevu řešené pece. K nejvyššímu rozdílu teplot v rámu dochází až při nejvyšším prohřátí konstrukce, neboť vnější díly jsou okolní atmosférou ochlazovány téměř na teplotu vnějšího okolí, proto nemusí být numerická simulace počítána jako transientní úloha. Pro výpočet stačí úloha ustáleného stavu, čímž se razantně ušetří na výpočetním čase.



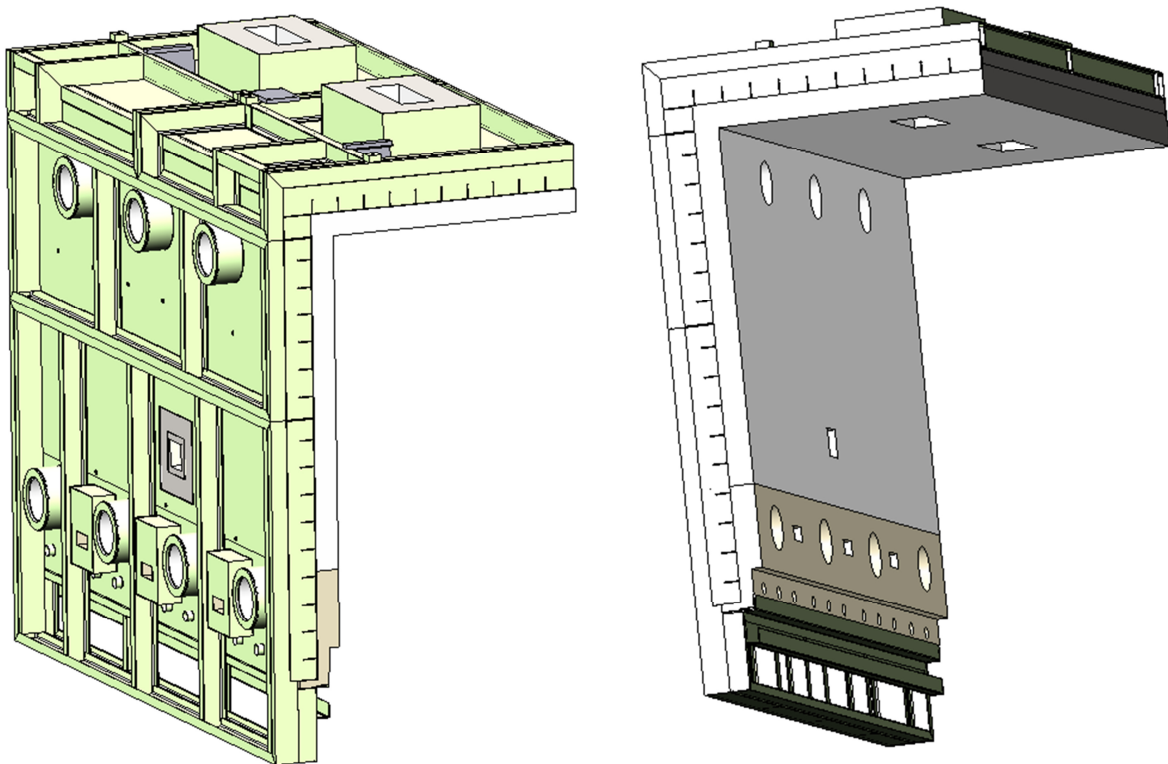
obr. 41 - 2D transientní teplotní analýza

Na obr. 41 je zobrazen ustálený stav rozložení teploty. Tohoto stavu bylo dosaženo po 20 hodinách simulovaného času a po zbytek výpočtu se rozložení teploty neměnilo.

## 4.2 Zjednodušení modelu pece pro numerickou simulaci

Vzhledem k velikosti prvků sítě byly mnohé prvky modelu pro simulaci nadbytečné a komplikovali by výpočet. Z toho důvodu byly provedeny následující úpravy:

- Odstranění drobných otvorů v rámu, které nejsou z hlediska simulace důležité.
- Odstranění zaoblení nemající vliv na tuhost konstrukce.
- Odstranění bočních výdechů, jejichž jediný vliv na výpočet spočívá v odvodu tepla svou vnější plochou do od atmosféry. Tato skutečnost je simulována přidáním podmínky přestupu tepla ve spoji.
- Sibalové izolační moduly a rohož byly nahrazeny fiktivním monolitním materiálem o zprůměrovaných materiálových vlastnostech. Šrouby pomocí kterých jsou moduly přichyceny, nejsou v simulaci uvažovány.
- Vzhledem k symetrii pece a k symetrii jejího zatížení je simulace řešena pouze jako jedna polovina pece.

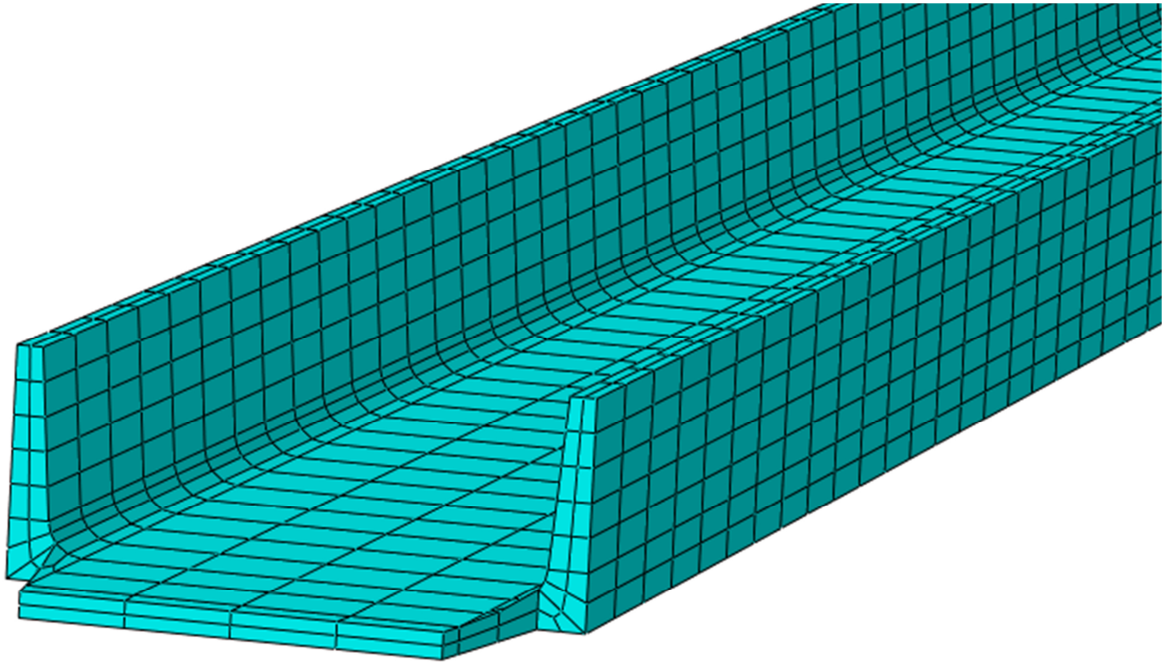


obr. 42 - zjednodušený model pece



### 4.3 Nasítování modelu

Pro výpočet statické analýzy byla použita rovnoměrná bricková síť o elementech typu C3D20R (kvadratický element s meziuzlem). U plechů a profilů byl kladen požadavek na alespoň dva elementy na tloušťku součásti. Průměrná velikost elementu byla nastavována v hodnotách od 10 do 30 mm u plechů a profilů. Velikost elementů na vyzdívce byla nastavena v rozmezí od 50 do 70 mm. Pro výpočet teplotní analýzy byla použita totožná síť z důvodu kompatibility sítí. Typ elementu pro teplotní analýzu byl zvolen DC3D8 (lineární element bez meziuzlu).

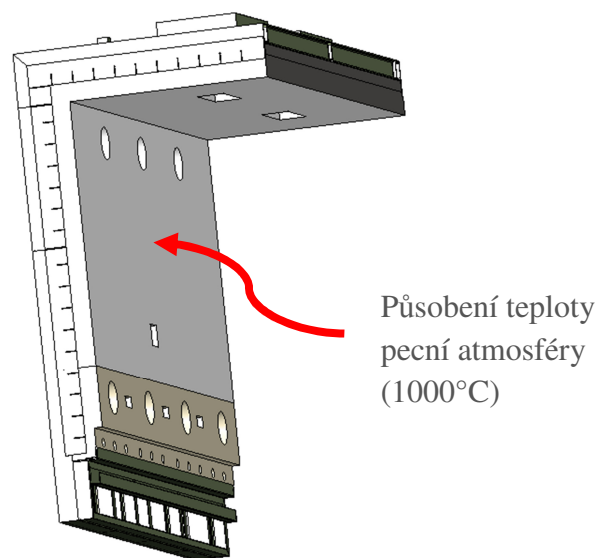


*obr. 43 - příklad nasítování U-profilu*

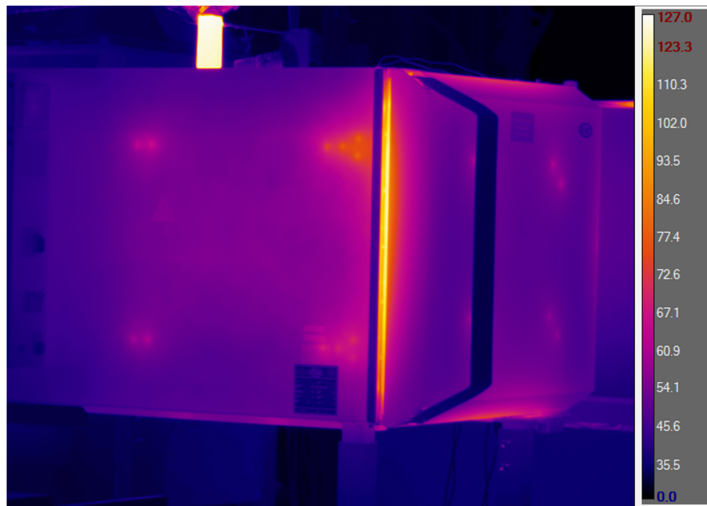
#### 4.4 Okrajové podmínky teplotní analýzy

Okrajové podmínky vycházejí ze zátěžového stavu popsaného v kapitole 3.2.

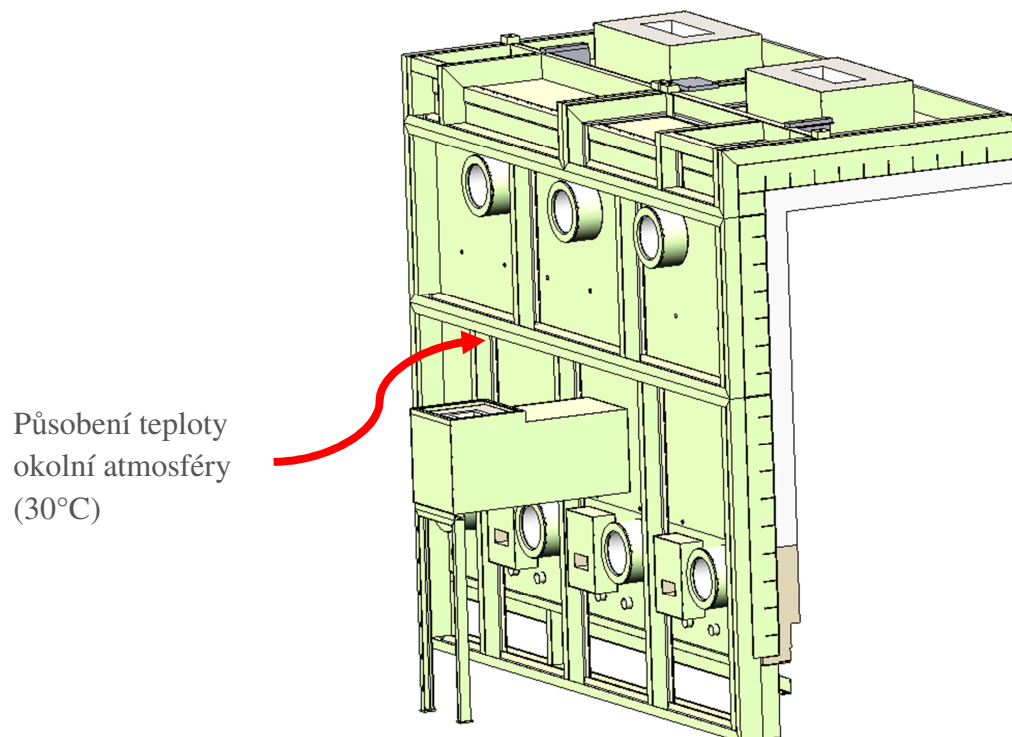
Koeficient přestupu tepla je obecně závislý na teplotě. Vzhledem k tomu, že se v tomto případě jedná o úlohu ustáleného stavu, byly pro koeficienty přestupu tepla použity pouze konstanty. Pro přestup tepla mezi pecní atmosférou a vyzdívkou byl koeficient zvolen o hodnotě  $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ , která odpovídá nucené konvenci při malé až střední rychlosti proudění media kolem povrchu rovinné plochy [10]. Pro přestup tepla z rámu do haly (*obr. 44.*) byl zvolen koeficient o velikost  $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ , který odpovídá volné konvenci<sup>10</sup>. Směrodatnou hodnotou pro správnost výsledků a vůči které byly tyto koeficienty upravovány, je vypočtená teplota na vnějším plášti pece, která dosahuje maxima  $70^\circ\text{C}$ . Tato teplota koresponduje s naměřenými hodnotami na existující peci. Na *obr. 45* je pro ilustraci záznam z termokamery ohřívací laboratorní pece, na jejímž povrchu je odečtena maximální teplota též  $70^\circ\text{C}$ .



*obr. 44 - tepelný vliv pecní atmosféry na povrch vyzdívkky*



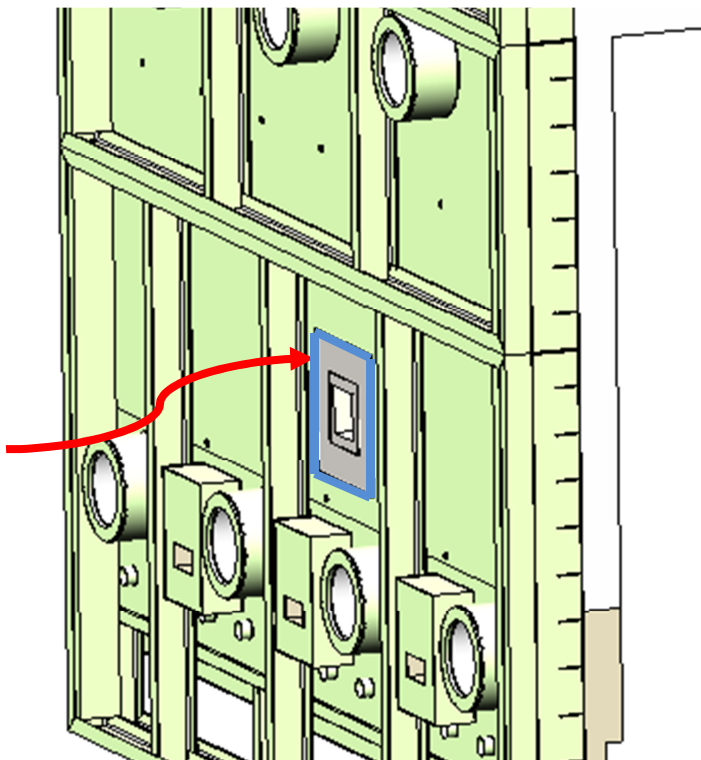
obr. 45 - záznam z termokamery laboratorní ohřívací pece [9]



obr. 46 - tepelný vliv vnější atmosféry na rám pece

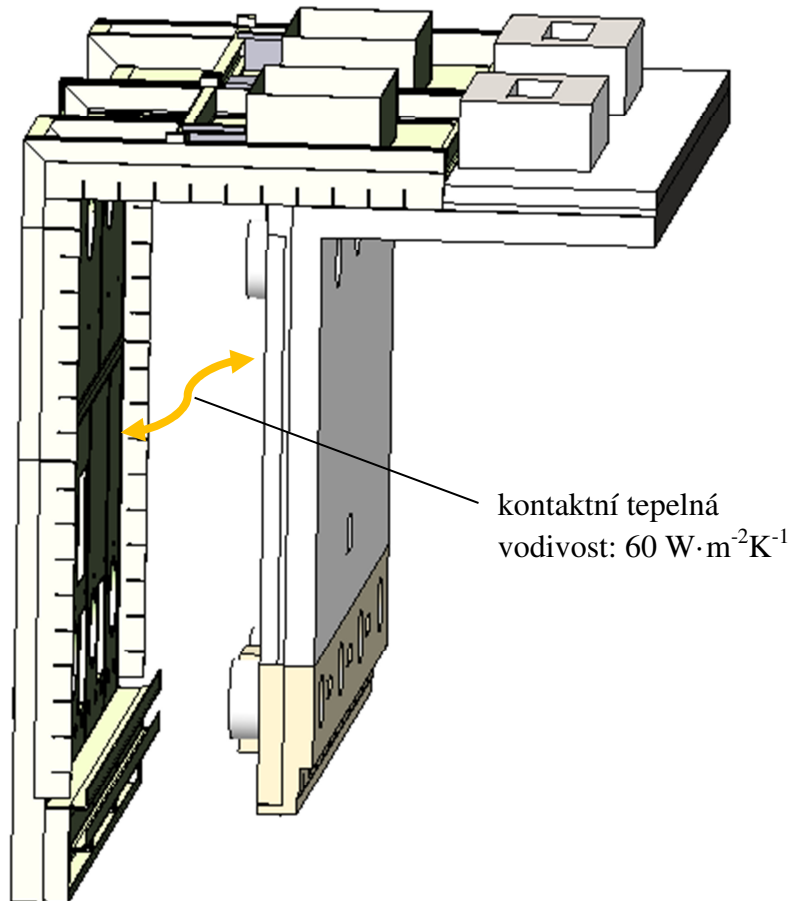
Na obr. 47 je znázorněna okrajová podmínka zabraňující kumulaci tepla na hranách plechu, kde je ve skutečnosti napojen plechový plášť výdechu, kterým je teplo odváděno.

Okrajová podmínka  
nahrazující odvod  
tepla plechovým  
plášťem výdechu.



*obr. 47 - náhrada plechového pláště výdechu okrajovou podmínkou*

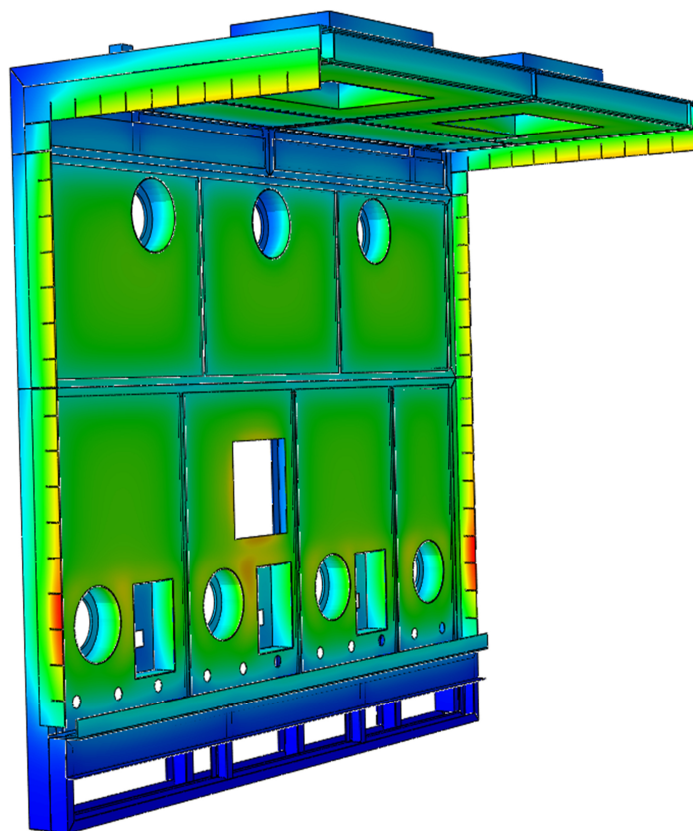
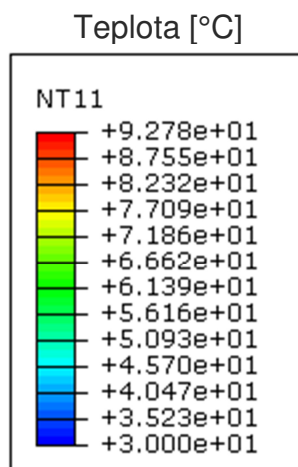
Mezi vyzdívkou a rámem je nadefinovaná kontaktní tepelná vodivost (Thermal Contact Conductance [11]). Tento koeficient obecně vychází z drsnosti kontaktních povrchů, druhů materiálů a přítláčeného tlaku na spoj. V případě kontaktu vyzdívky s ocelí se drsnost povrchu vyzdívky pohybuje mimo oblast teorie kontaktní tepelné vodivosti<sup>11</sup> a stejně tak přítláčný tlak. Z těchto důvodů je hodnota koeficientu stanovena na základě experimentálního měření a výsledků zjednodušeného 2D výpočtu.



obr. 48 - přestup tepla kontaktem mezi vyzdívkou a rámem

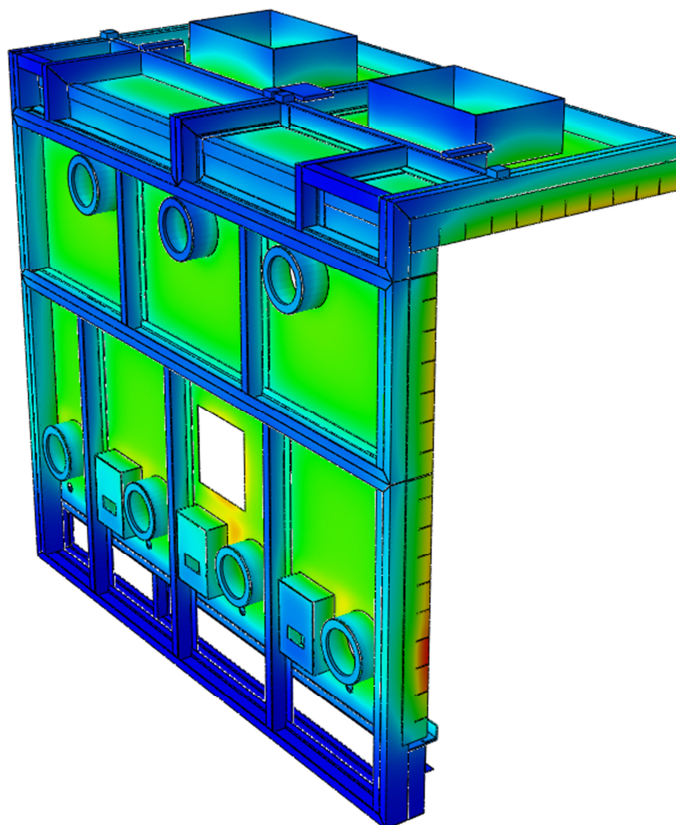
Při zavření pece dojde k přimáčknutí vyzdívky dveří na vyzdívku kostry. Tím vznikne mezera mezi bočnicemi (plechy s dilatačními vybráními) a vyzdívkou, což zapříčiní výrazné snížení tepelné kontaktní vodivosti mezi těmito částmi. Dále, jelikož je plech bočnice zakryt vyzdívkou dveří, neuvažuje se u něj přestup tepla do okolní atmosféry. Hodnota tepelné kontaktní vodivosti ( $7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ) je upravena tak, aby teplota plechu odpovídala skutečně naměřené hodnotě  $85^\circ\text{C}$ .

## 4.5 Výsledky teplotní analýzy pece



obr. 49 - rozložení teploty na rámu pece

Ze simulace je zřejmý rozdíl teplot na vnějším povrchu plechů (teplota až 70°C), neboť ty jsou v kontaktu s vyzdívkou a teplot na povrchu profilů, které jsou ochlazovány vnější atmosférou (30°C). Následkem různého nárůstu rozměrů vlivem tepelné roztažnosti je v rámu generováno napětí. Dále je na výsledcích pozorovatelný rozdíl teplot na plechách, které jsou izolované Sibralovými bloky v porovnání s plechy izolovanými vyzdívkou HBU7, u kterých je nárůst teploty o cca 10°C.



obr. 50 - rozložení teploty na rámu pece

## 4.6 Okrajové podmínky statické analýzy pece

Teplotní pole z tepelné analýzy bylo naimportováno do statické analýzy, pro výpočet teplotní deformace. Skutečnost, že vyzdívka je tvořena samostatnými bloky, které jsou připevněny šrouby k rámu a mezi nimiž jsou dilatační spáry vyplněné Sibrálovou rohoží vede k závěru, že není možné použít monolitní zjednodušený model vyzdívky s danou roztažností náležící materiálu. Tepelná roztažnost vyzdívky musí být vzhledem k dilatačním mezerám zanedbána.

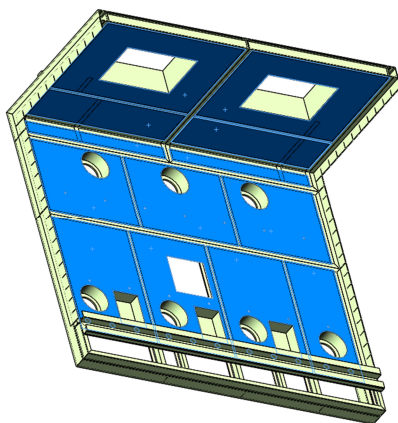
Možné způsoby řešení problému:

- Svázání sítí rámu a vyzdívky
  - Dochází k nepřiměřenému nárůstu tuhosti pece vlivem dokonale pevného spoje rámu s vyzdívkou a takováto simulace by vykazovala chybné výsledky.
- Nadefinovat kontakt mezi rámem a vyzdívkou
  - V tomto případě by celková hmotnost vyzdívky spočívala na opěrné ploše rámu pro cihly HBU7. To by způsobilo nárůst napětí ve spodní části rámu a zanedbání zatížení od hmotnosti v horní části rámu.
- Předefinovat hustotu plechů rámu, ke kterým je vyzdívka přišroubována tak, aby její hmotnost byla započtena v hmotnosti plechů
  - Zatížení od hmotnosti je vneseno do rámu a tuhost rámu není ovlivněna.
  - Snížení výpočtového času zanedbáním kontaktní úlohy a odebráním vyzdívky.

Bylo použito řešení s předefinováním hustoty plechů. V následující tabulce jsou uvedeny přepočtené hodnoty hustot jednotlivých plechů

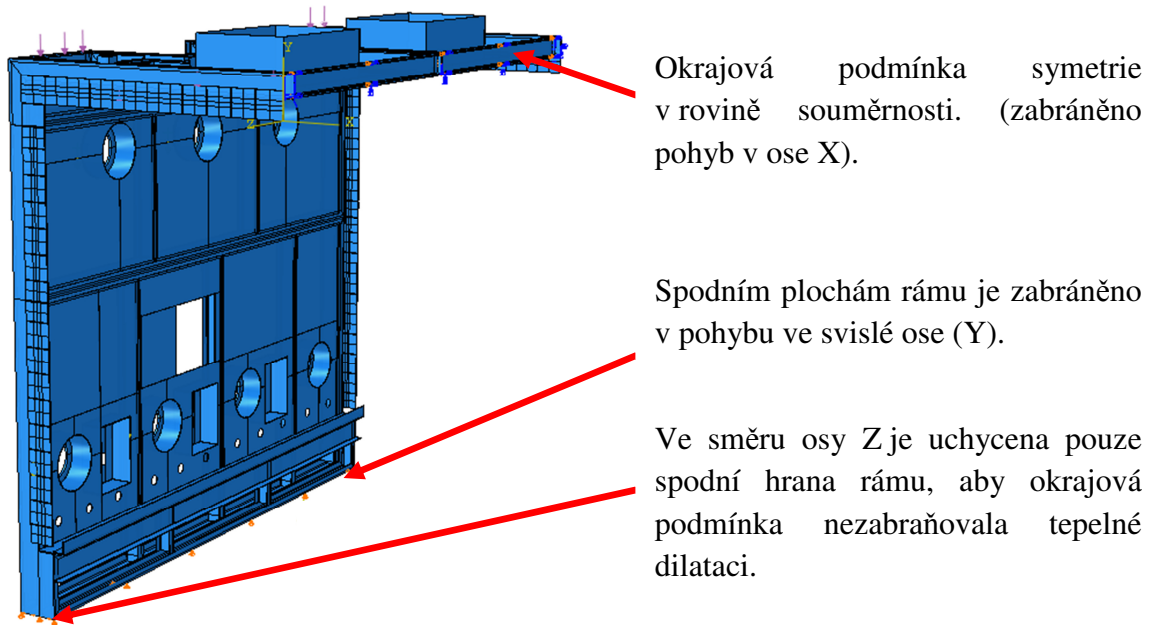
tab. 2 - přepočet hustoty plechů pro zahrnutí hmotnosti vyzdívky

	materiál	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost [kg]
Vyzdívka	Sibral	5,62	130,00	730,60
	Promasil	2,02	245,00	493,68
	HBU7	1,20	700,00	840,00
	Plechý - původní	0,1024	7850,00	804,19
	Plechý - změna	0,1024	28000,28	2868,46



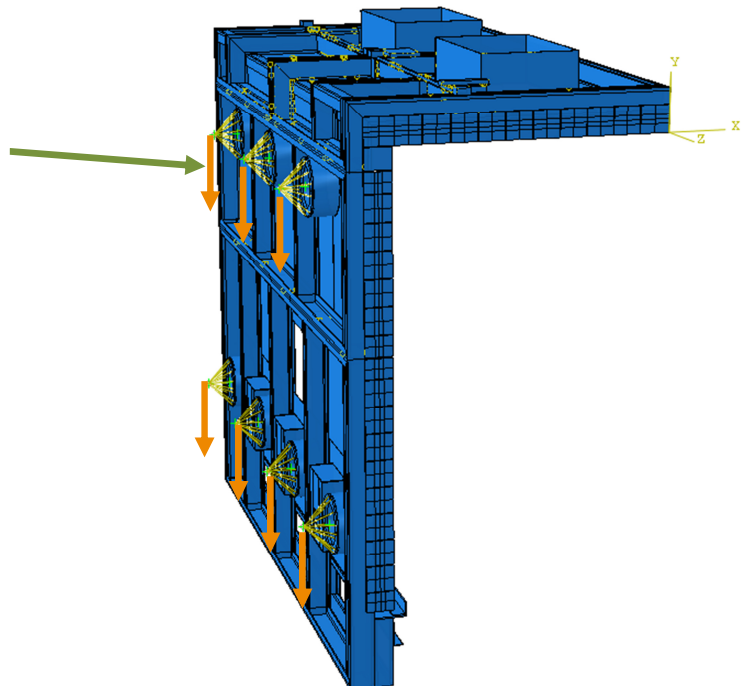
obr. 51 - plechy použité pro zahrnutí hmotnosti vyzdívky (modře)

Pro statickou analýzu musí být model uchycen v prostoru. Z čehož vyplývá zamezení pohybu v osách X, Y a Z. Pec je volně položena na podlaze. Z toho vyplývá, že podlaha nebrání tepelné dilataci pece.



obr. 52 - uchycení pece v prostoru

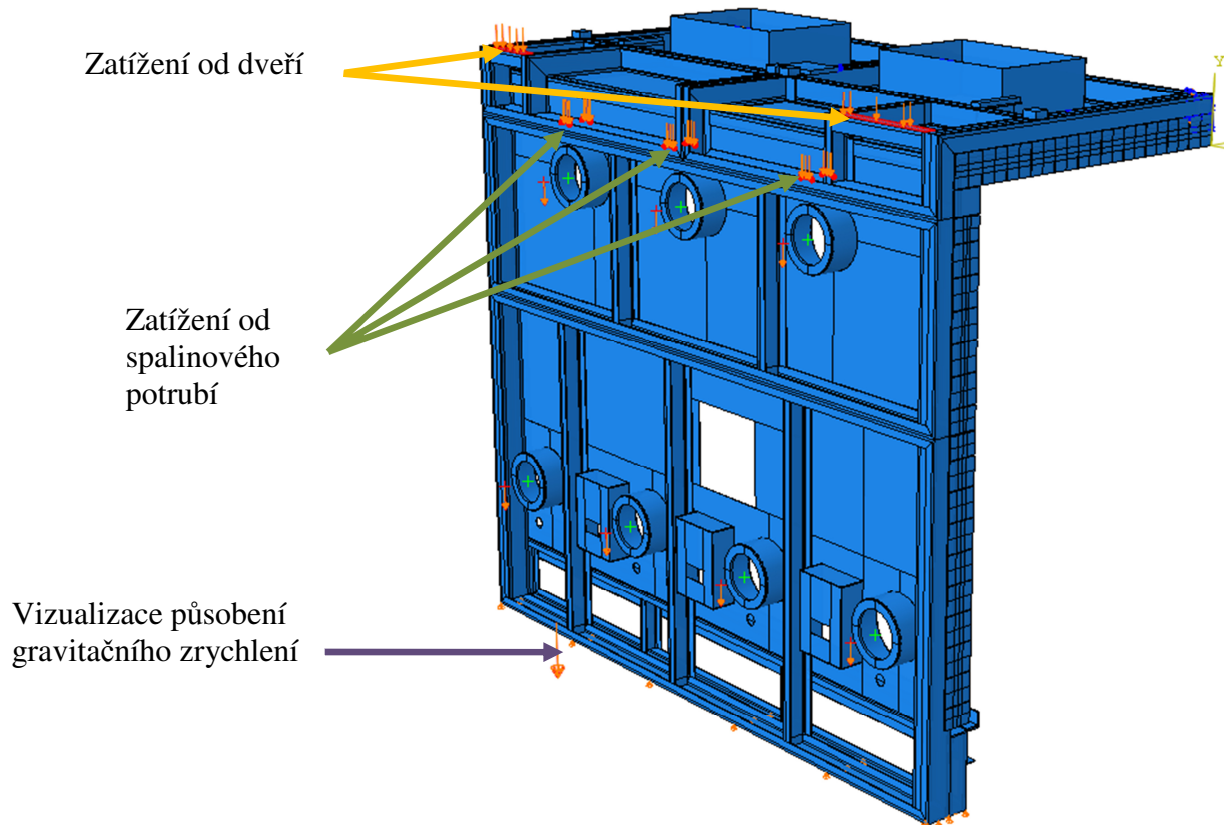
Hmotnost hořáku (100 kg) je nahrazena samostatnou silou situovanou do těžiště hořáku. Silové působíště je spojeno s rámem v místě přišroubování hořáku k přírubě a zatížení je přeneseno pomocí distribuce sil.



obr. 53 - náhrada zatížení od hmotnosti hořáků



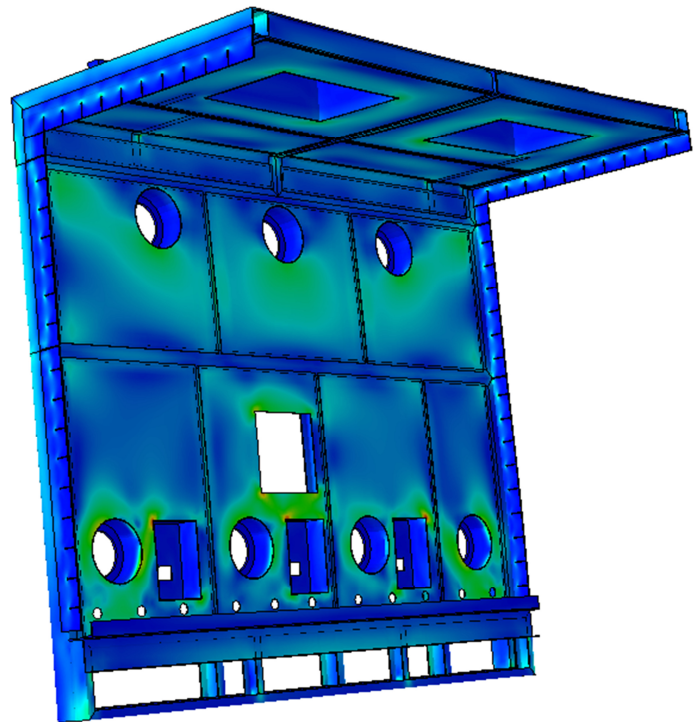
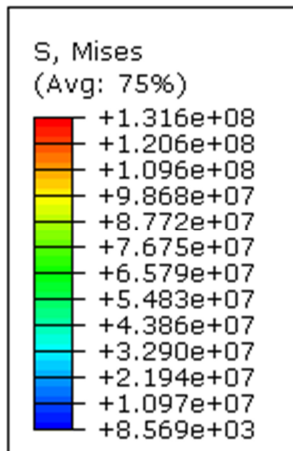
Zatížení do hmotnosti dveří je do rámu přenášeno přes plochy, do kterých se opírá nosný rám dveří. Přenášená síla (5 397 N) je čtvrtinová oproti síle vyvozené hmotností dveří z důvodu, že je pracováno s polovičním modelem a polovina síly je zachycena nosným rámem dveří. Zatížení od spalínového potrubí je zachyceno přes konzole do rámu. Síla (8 340 N) je promítnuta do šesti ploch na rámu, ve kterých jsou konzole přivařeny k rámu.



obr. 54 - zatížení od vlastní hmotnosti a od hmotnosti příslušenství

## 4.7 Výsledky statické analýzy pece

Napětí von Mises [Pa]

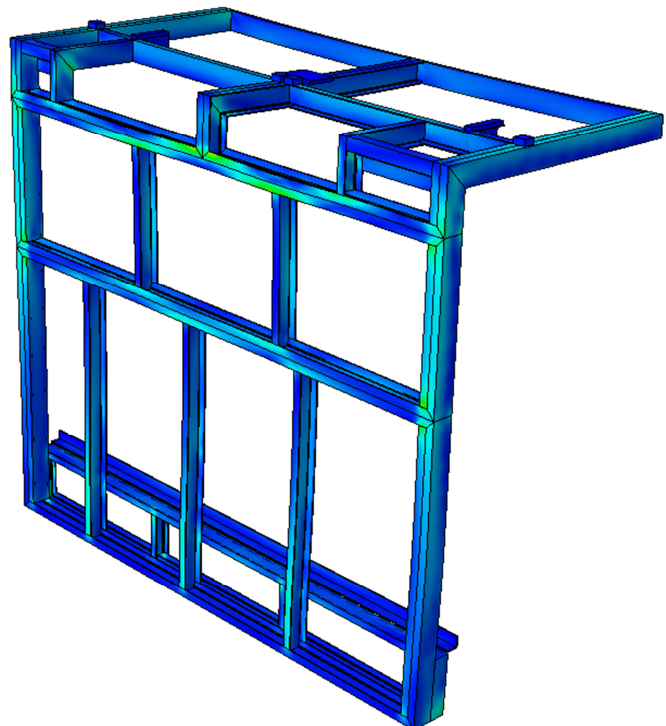


obr. 55 - rozložení napětí na rámu pece

(zdroj: [www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli](http://www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli))

Současné řešení je konstruováno z materiálu ČSN 11 375 (nejmenší mez kluzu  $Re = 196$  MPa [12]). Nejvyšší redukované napětí na nosných profilech je 97 MPa. Z toho výsledný koeficient bezpečnosti vůči mezi kluzu vychází 2,1.

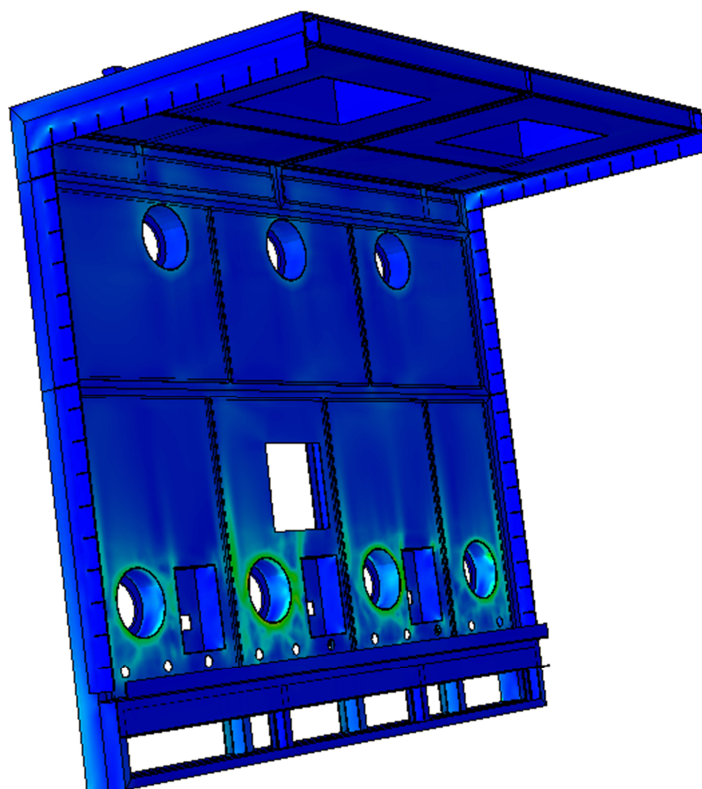
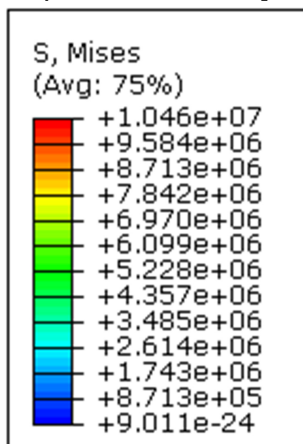
Zadavatelem požadovaná bezpečnost nosné konstrukce vůči mezi kluzu je 1,5. Může být tedy přistoupeno ke změnám za účelem snížení hmotnosti rámu. Úpravy nesmí mít za následek překročení meze kluzu u zbývajících částí rámu.



obr. 56 - rozložení napětí na rámu pece

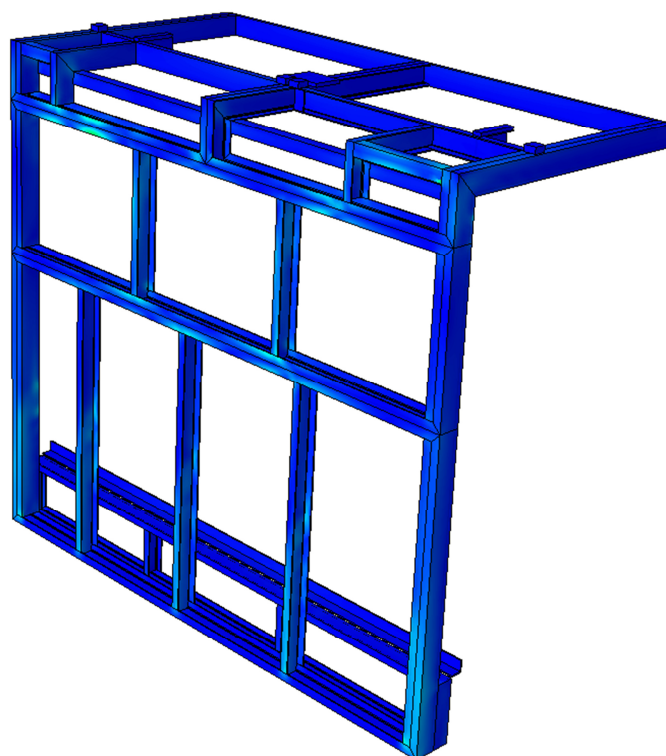
#### 4.8 Výsledky statické analýzy pece při konstantní teplotě (20°C)

Napětí von Mises [Pa]



obr. 57 - rozložení napětí na rámu pece

Pro získání přesnějšího náhledu na vliv teplotního zatížení, byla provedena simulace s konstantním rozložením teploty. Z výsledků je patrné, že mechanické zatížení nemá majoritní vliv na napětí v konstrukci. Maximální redukované napětí dosahuje 11 MPa. To je v porovnání s tepelně zatíženým rámem méně jak desetinová hodnota.



obr. 58 - rozložení napětí na rámu pece

## 4.9 Návrh úprav ke snížení hmotnosti rámu pece

Za účelem snížení hmotnosti rámu se nabízí možnosti:

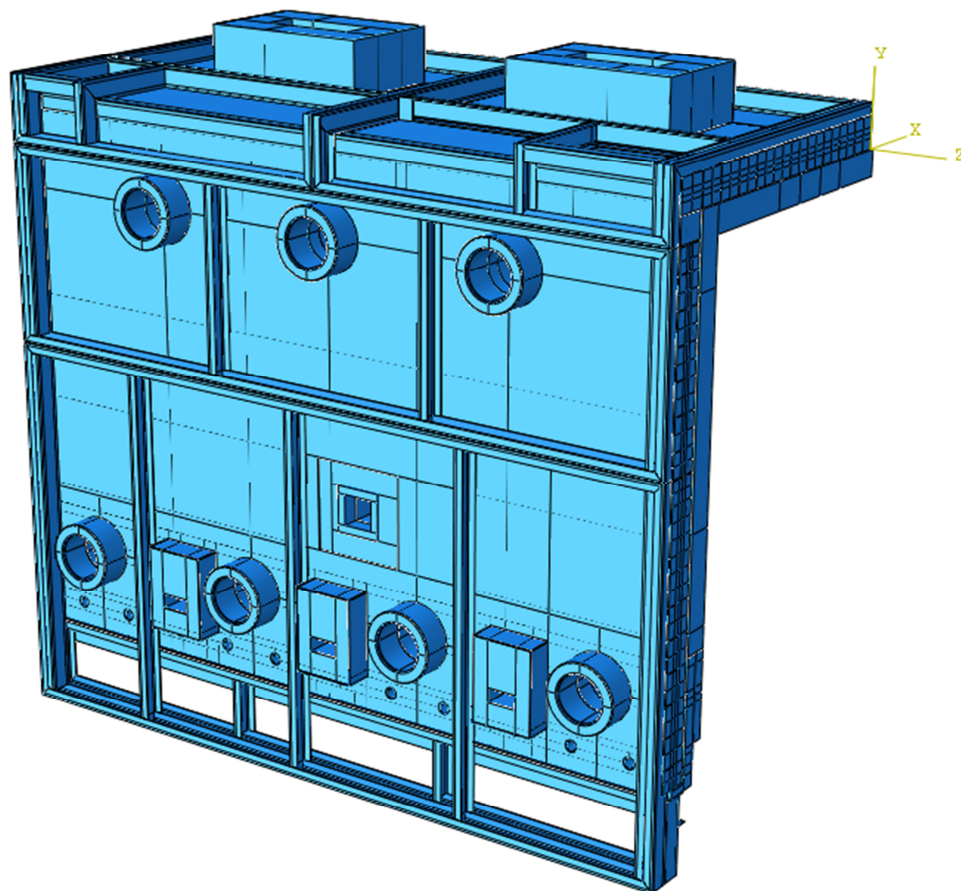
- Zmenšit rozměr U profilů
- Zmenšit tloušťku plechů

Z výsledků simulace je možné vyčíst, že plechy na rámu pece jsou namáhané více než profily. Z toho důvodu bylo navrženo zachovat tloušťku plechů a nahradit stávající U profily o rozměrech 180x70x8 za U profily o rozměrech 140x60x7. Tento rozměr profilu byl vybrán s ohledem na přání zadavatele, neboť zadavatel tyto profily používá ke stavbě jiné pece, a tak je tento tah pro zadavatele výhodný z hlediska unifikace výroby.

## 4.10 Úprava konstrukce pece

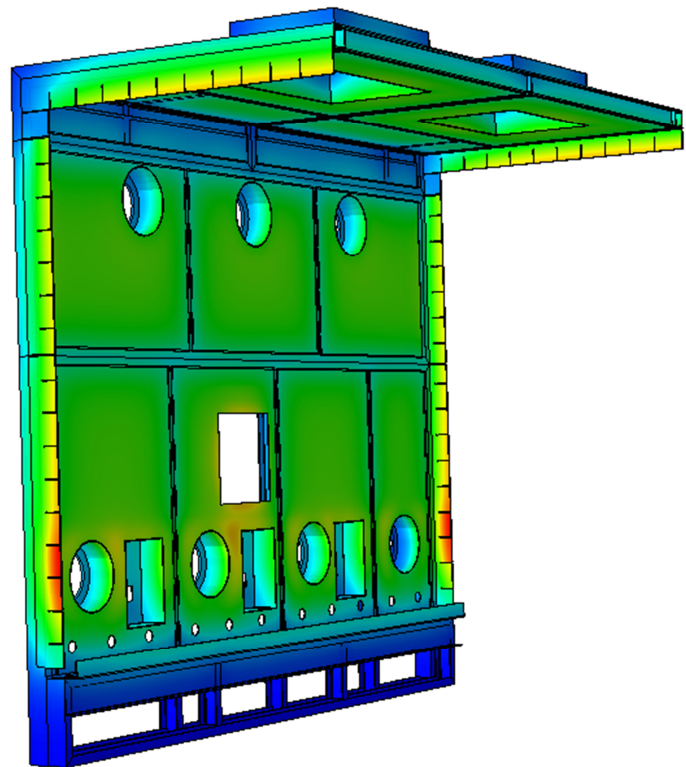
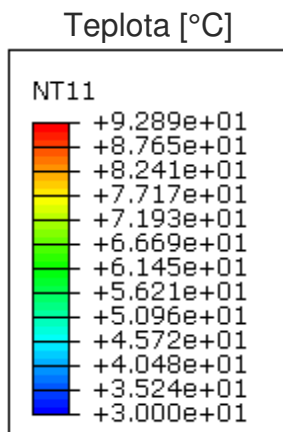
Při návrhu úprav pece bylo cílem zasahovat do konstrukce pece co nejméně a zachovat tak know-how výrobce. Dále aby byla zaručena jednoduchá smontovatelnost, byl zachován způsob montáže původní konstrukce.

Konstrukce pece byla upravena pro použití menších profilů a numerická analýza upravené pece byla provedena identickým způsobem popsaným v kapitolách 5.2 až 5.4.



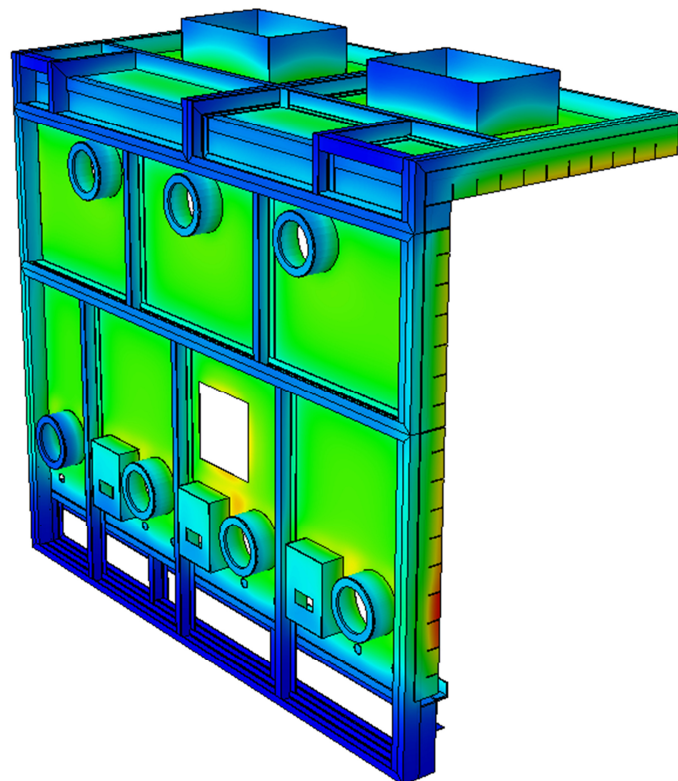
obr. 59 - upravený rám pece

## 4.11 Výsledky teplotní analýzy upravené pece



obr. 60 - rozložení teploty na rámu pece

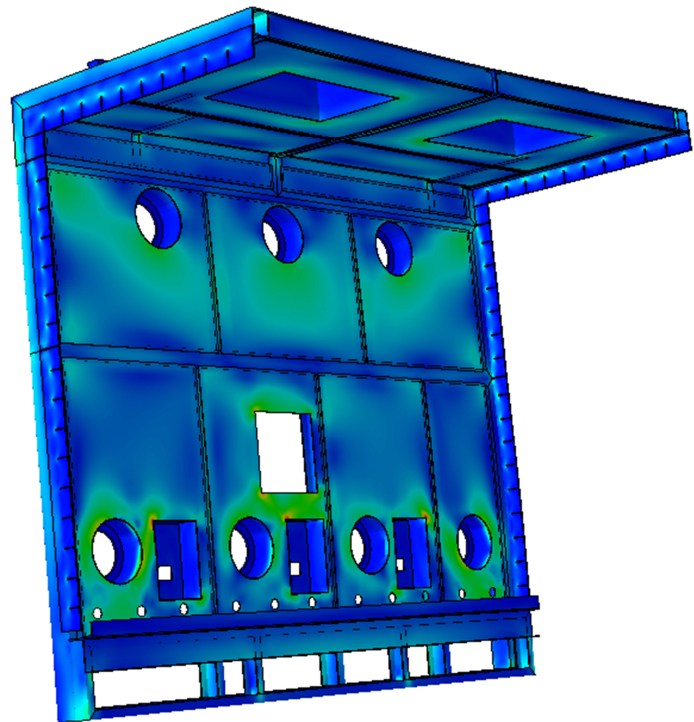
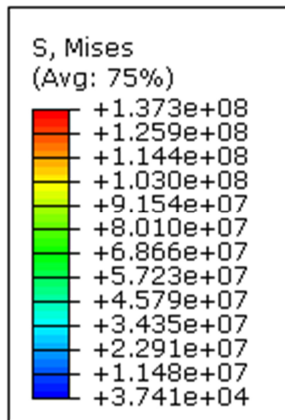
Jelikož byl změněn model pece, musela být provedena nová teplotní simulace, neboť výsledné teplotní rozložení vstupuje do statické analýzy jako okrajová podmínka.



obr. 61 - rozložení teploty na rámu pece

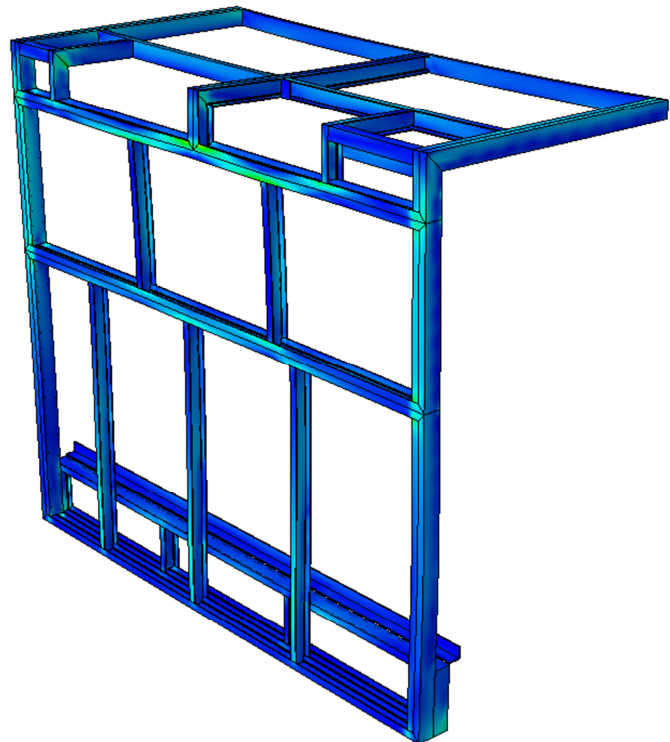
## 4.12 Výsledky statické analýzy upravené pece

Napětí von Mises [Pa]



obr. 62 - rozložení napětí na rámu pece

Oproti původnímu rámu pece narostlo maximální redukované napětí na upraveném rámu o 5 MPa. Ve výsledcích můžeme pozorovat napět'ové špičky vznikající na rozích spojů mezi bočními plechy a krycími plechy vstupních ventilačních boků. Na nosných profílech napětí narostlo o 13 MPa.



obr. 63 - rozložení napětí na rámu pece

### 4.13 Zhodnocení úpravy rámu pece

Úpravami bylo ušetřeno 25,5% hmotnosti U-profilů na rámu pece. Pro výpočet ceny bylo vycházeno z ceny za kilogram (22,16Kč bez DPH) v katalogu tenkostěnných U profilů společnosti Feron a. s. [13]

tab. 3 - porovnávací tabulka původní a upravené pece

	Původní rám pece	Upravený rám pece	Rozdíl
Redukované napětí	132 MPa	137 MPa	5 MPa
Red. napětí na profilech	97 MPa	110 MPa	13 MPa
Bezpečnost vůči Re	2,1	1,8	0,3
Hmotnost profilů	3 631 kg	2 705 kg	926 kg
Poměr hmotnosti profilů	100 %	74,5 %	25,5 %
Cena za profily	80 455 Kč	59 939 Kč	20 516 Kč

Ušetřené množství financí za materiál není markantní. Nicméně snížení celkové hmotnosti o 926 kg se výrazně projeví do manipulovatelnosti s rámem pece při jeho výrobě nebo montáži. Pozitivním výsledkem je fakt, že tato úprava se téměř neprojevila do pevnosti rámu a jak již bylo zmíněno v kapitole 4.9: nové profily jsou pro zadavatele výhodné z hlediska unifikace.

## 5 Numerická analýza pecního vozu

Dle přání zákazníka byla provedena numerická simulace pecního vozu dle daného zátěžového stavu. Cílem simulace bylo zjistit, zda při tomto krajně nepříznivém zatížení nenarůstá napětí nad dovolenou mez. Obdobně jako u rámu pece byla numerická simulace teplotního pole optimalizována tak, aby hodnoty korespondovaly se skutečně naměřenými hodnotami.

### 5.1 Zjednodušení modelu vozu pro numerickou simulaci

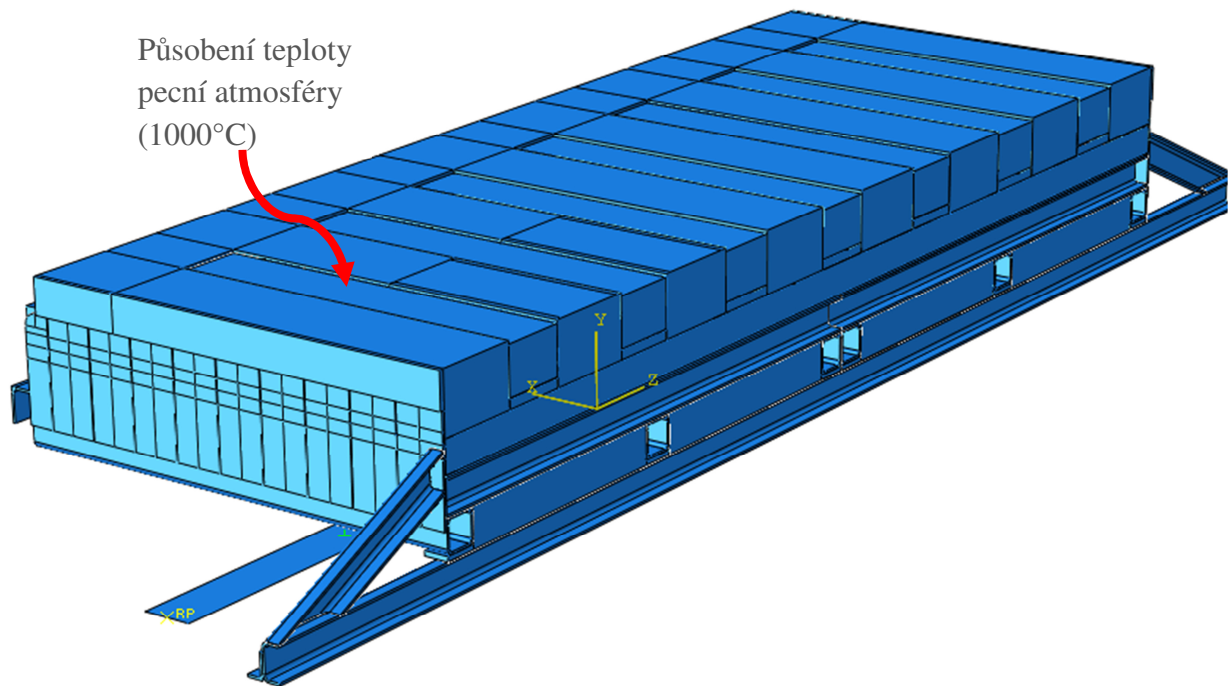
Vzhledem k velikosti prvků sítě byly mnohé prvky modelu pro simulaci nadbytečné a komplikovali by výpočet. Z toho důvodu byly provedeny následující úpravy:

- Odstranění otvorů v profilech rámu, které nejsou z hlediska simulace důležité.
- Odstranění zaoblení nemající vliv na tuhost konstrukce.
- Odstranění manipulačních prvků nemajících vliv na tuhost konstrukce.
- Odstranění kolejových kol a jejich konzol. Náhrada pomocí distribuce sil.
- Vzhledem k symetrii vozu by bylo možné vůz řešit jako jednu čtvrtinu modelu, ale zatížení vozu je požadováno simulovat jako nesymetrické v jedné rovině a proto je řešen jako jedna polovina modelu.
- Vyzdívka na pecním vozu je pro simulaci uvažována jako monolitní. Ve skutečnosti jsou ve vyzdívce dilatační mezery, a abychom dostali relevantní výsledky deformace vyzdívky, nemohli bychom ji uvažovat jako izotropní materiál. Cílem této simulace ale není výpočet deformace vyzdívky, ale deformace rámu pecního vozu vzniklé následkem tepelného zatížení a vlivem sil přenesených vyzdívkou na rám.

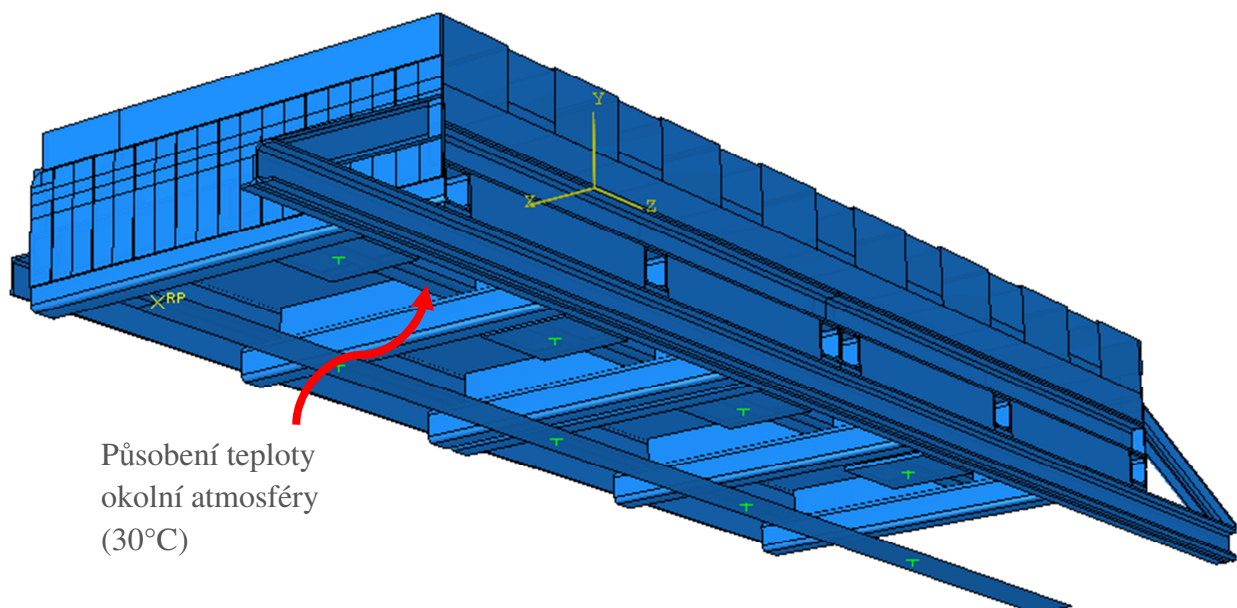


## 5.2 Okrajové podmínky teplotní analýzy

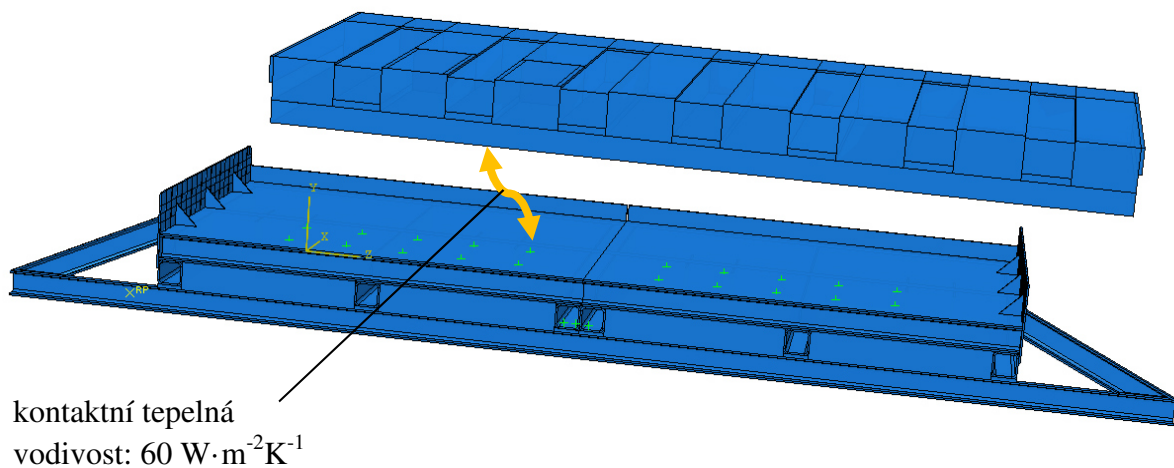
Okrajové podmínky vycházejí ze zátěžového stavu popsaného v kapitole 3.2. Přístup volby koeficientů vychází ze stejných postupů a stejných hodnot teplot, jako při teplotní analýze pece (viz kapitola 5.2). Pro přestup tepla mezi pecní atmosférou a vyzdívkou byl koeficient zvolen o hodnotě  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , která odpovídá nucené konvenci při malé až střední rychlosti proudění media kolem povrchu rovinné plochy. Pro přestup tepla z rámu do haly byl zvolen koeficient o velikost  $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , který odpovídá volné konvenci.



obr. 64 - tepelný vliv pecní atmosféry na povrch vyzdívky



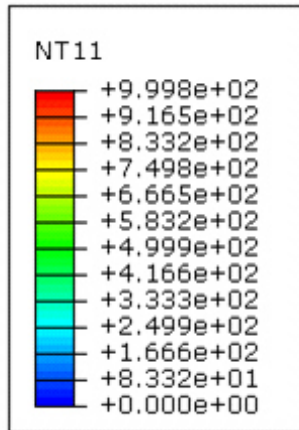
obr. 65 - tepelný vliv vnější atmosféry na rám vozíku



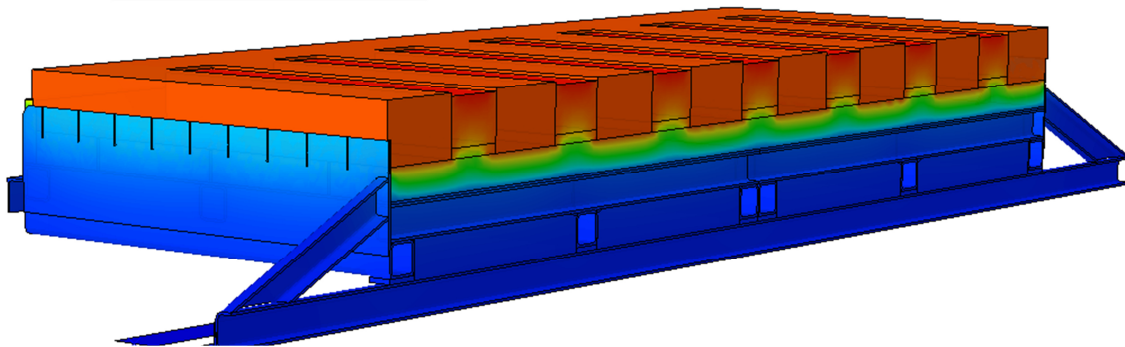
*obr. 66 - přestup tepla kontaktem mezi vyzdívkou a rámem*

Stejně jako u pece, dojde u vozu při zavření dveří k přimáčknutí vyzdívky dveří na vyzdívkou vozu. Tím vznikne mezera mezi bočnicemi a vyzdívkou a to zapříčiní výrazné snížení tepelné kontaktní vodivosti mezi těmito částmi. Jelikož je plech bočnice zakryt vyzdívkou dveří, neuvažuje se u něj přestup tepla do okolní atmosféry. Hodnota tepelné kontaktní vodivosti ( $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ) je upravena tak, aby teplota plechu odpovídala skutečně naměřené hodnotě  $180^\circ\text{C}$ .

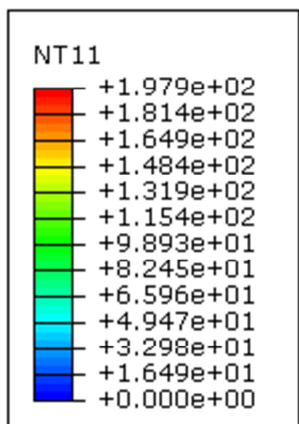
### 5.3 Výsledky teplotní analýzy pecního vozu



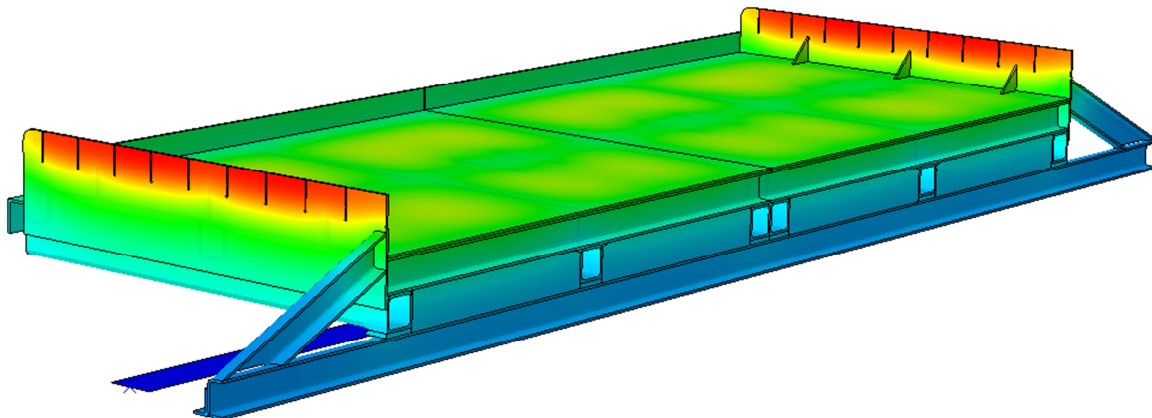
Na obr. 67 můžeme pozorovat rozdílnou efektivitu mezi žároizolačním betonem Calde Cast LX50 a deskami z materiálů Calde Cast Strong Lite a Promasil.



obr. 67 - rozložení teploty na pecním voze

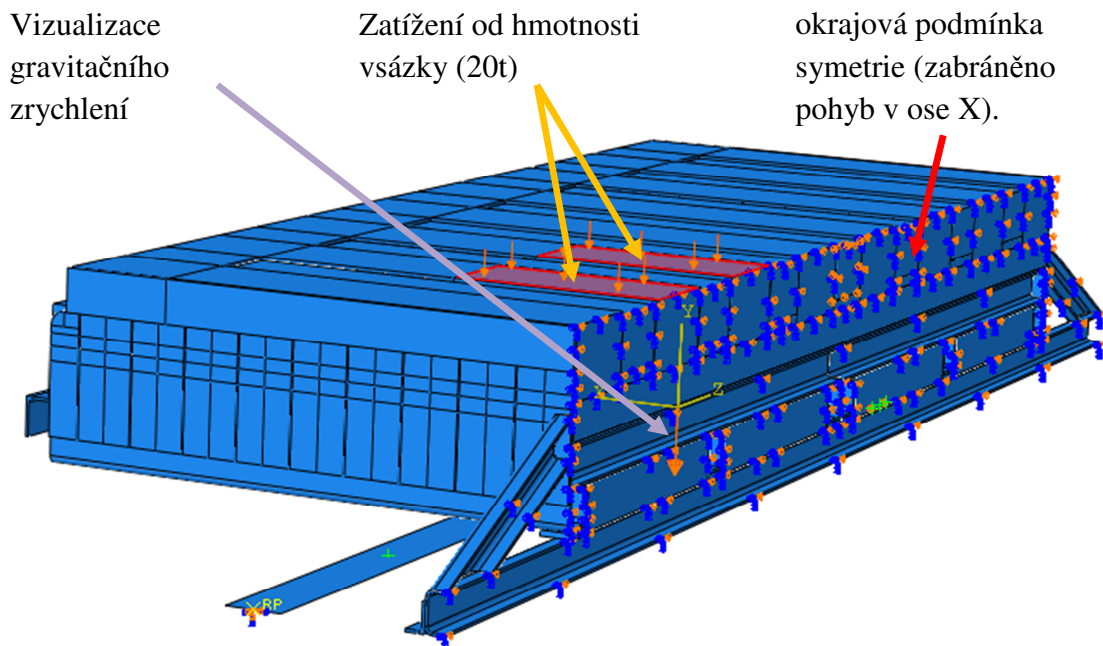


Na plechu pod vyzdívkou jsou ztelná místa, ze kterých je teplo odebíráno přes jakly do atmosféry. Tyto rozdíly teplot mají za následek nárůst napětí v rámu vlivem rozdílného nárůstu rozměrů tepelnou dilatací.



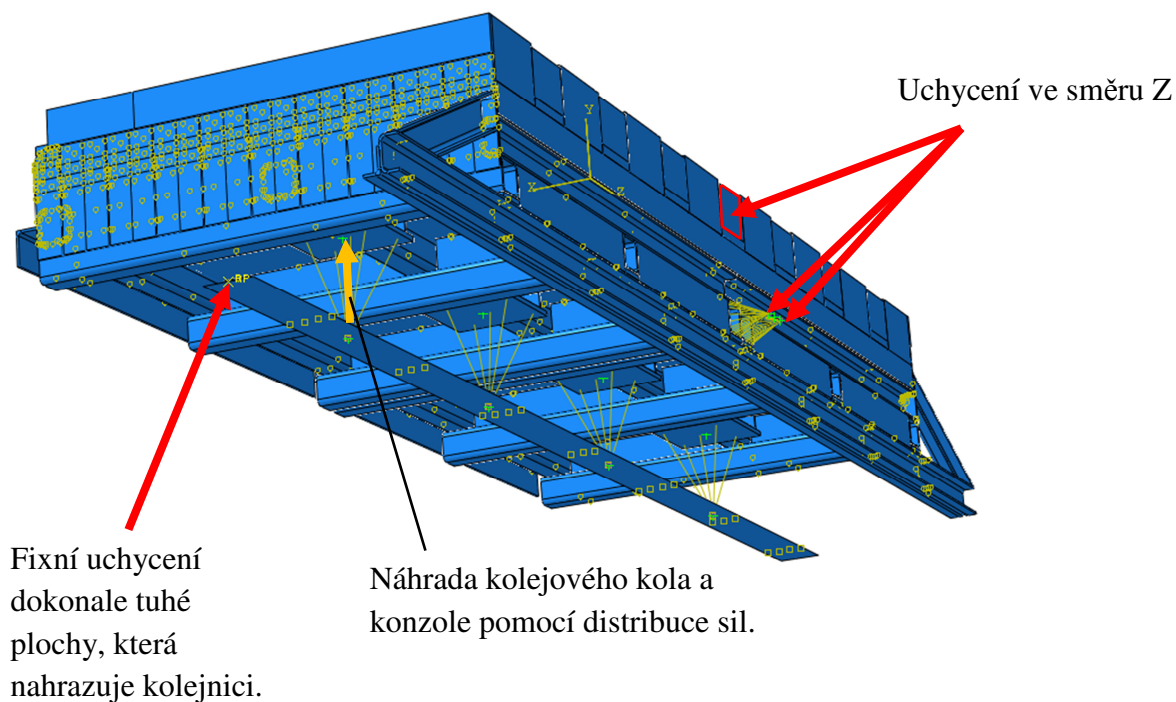
obr. 68 - rozložení teploty na rámu pecního vozu

## 5.4 Okrajové podmínky statické analýzy pecního vozu



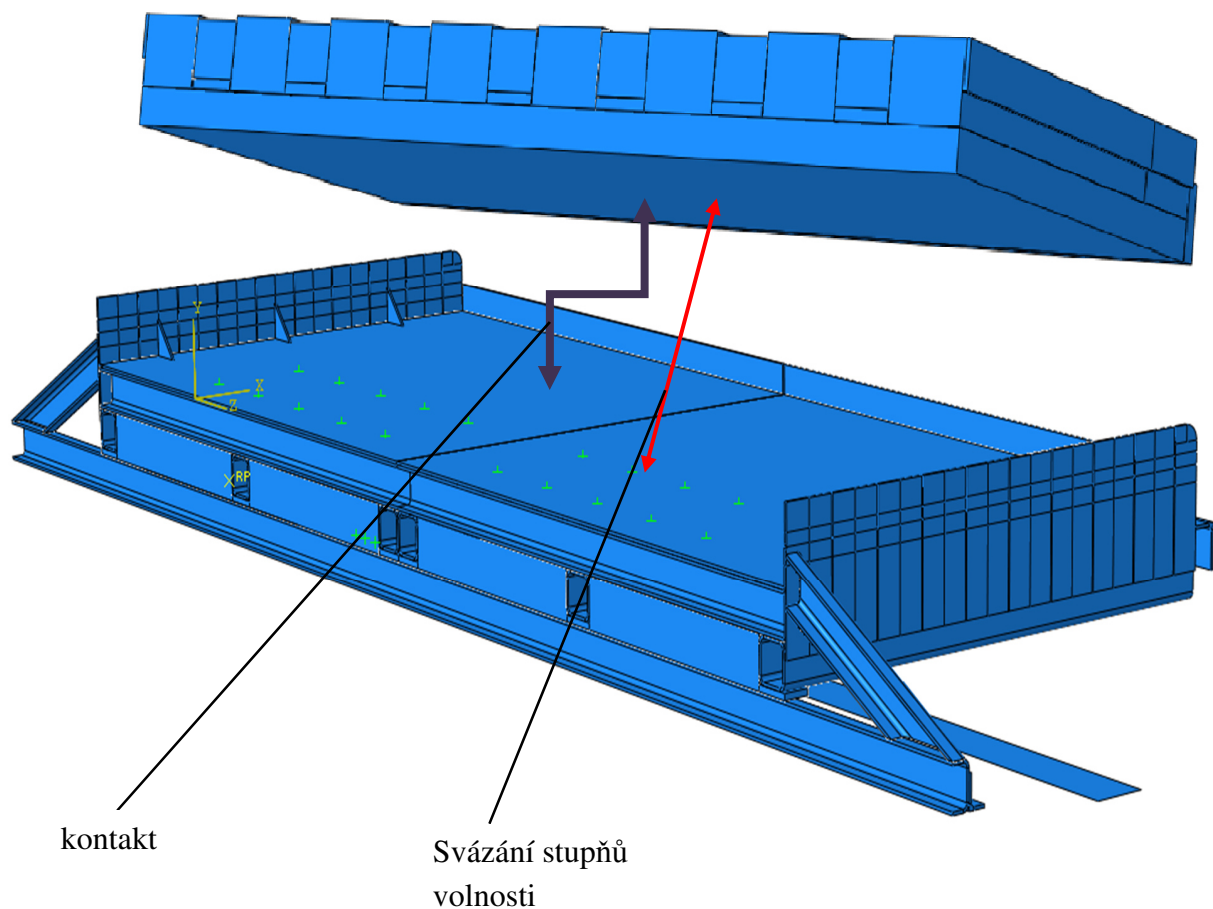
obr. 69 - uchycení pece v prostoru a zatížení

Ve svislé ose (Y) se vůz opírá přes konzole s kolejovými koly o kolejnice. Vzhledem k deformacím vznikajícím vlivem teplotní dilatace, nemohly být konzole uchyceny v ose Y pevně. Konzole s kolejnicovými koly byly nahrazeny pomocí distribuce lis, jejichž referenčnímu bodu byl nastaven kontakt s dokonale tuhovou plochou, která představuje kolejnici. Tímto způsobem je umožněno zmíněným referenčním bodům odlehnut od plochy.



obr. 70 - náhrada kolejových kol a kolejnice

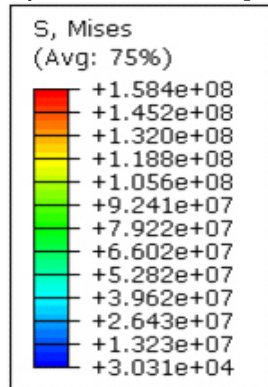
Mezi vyzdívkou a rámem vozu byl nadefinován kontakt s koeficientem tření  $f=0,4$  a mezi ostatními plochami se kterými je vyzdívka ve styku, není kontakt nadefinován, neboť přes ně není přenášeno zatížení. Aby bylo zabráněno divergenci ve výpočtu, byla ve styčné ploše vyzdívky a rámu vybrána pole uzlů, ve kterých byly svázány stupně volnosti rámu a vyzdívky. Umístění těchto uzlů bylo vybíráno s ohledem na co nejmenší zasažení do výpočtu. Svázané uzly byly definovány jako uzly v plochách nacházející se do 28 mm od definovaného bodu.



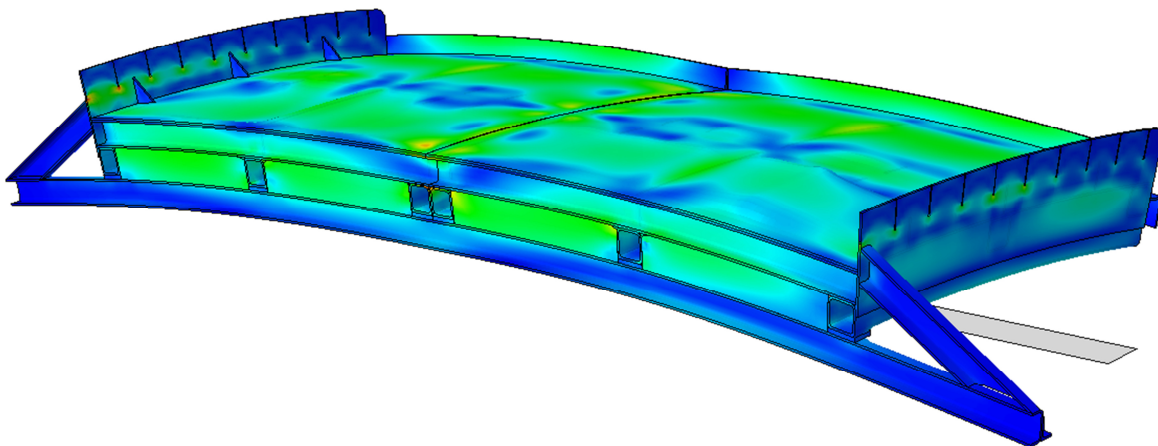
obr. 71 - řešení kontaktu mezi vyzdívkou a rámem vozu

## 5.5 Výsledky statické analýzy pecního vozu

Napětí von Mises [Pa]

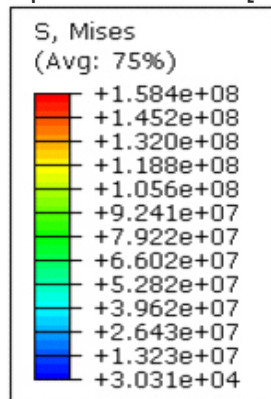


Nejvyšší špičky napětí vznikají na bočnicovém plechu v místě ukončení dilatační spáry. Napětí v tomto místě je způsobeno pouze teplotním zatížením. Z toho vyplývá, že na součást nepůsobí silové zatížení, ale namáhání od teplotní deformace. V případě překročení meze plasticity v tomto místě by pouze došlo k drobné plastické deformaci a následně k poklesu napětí.

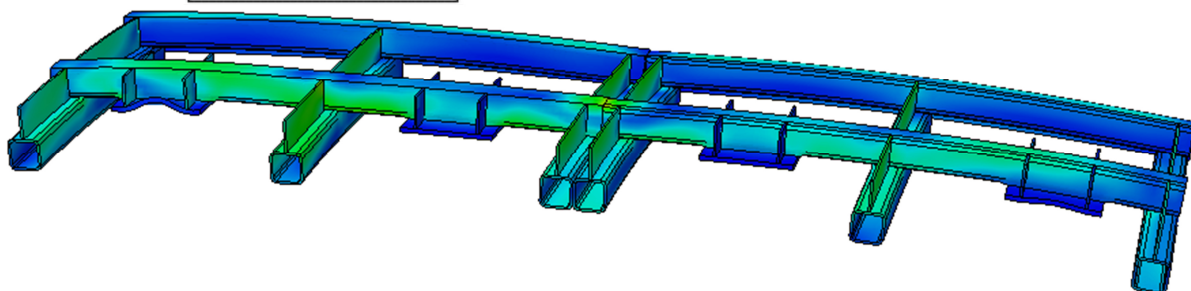


obr. 72 - rozložení napětí na rámu pecního vozu

Napětí von Mises [Pa]



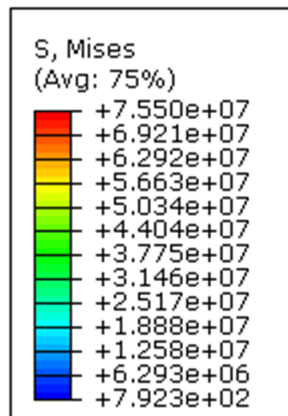
Na jeklech rámu, které by mohly být potenciálně nahrazeny menšími z důvodu úspory materiálu, bylo odečteno maximální napětí 132 MPa.



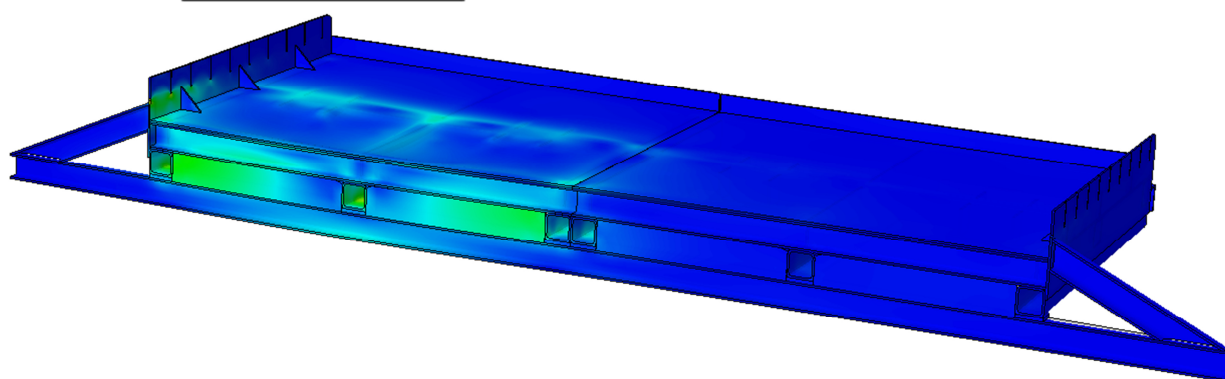
obr. 73 - rozložení napětí na rámu pecního vozu

## 5.6 Výsledky statické analýzy pecního vozu při konstantní teplotě (20°C)

Napětí von Mises [Pa]

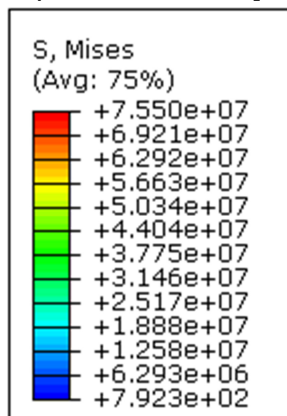


Pro získání přesnějšího náhledu na vliv teplotního zatížení, byla provedena simulace s konstantním rozložením teploty. Jelikož maximální redukované napětí dosáhlo 76 MPa, nejedná se o zanedbatelnou hodnotu. Nicméně je toto napětí přibližně poloviční oproti úloze tepelně zatížené.

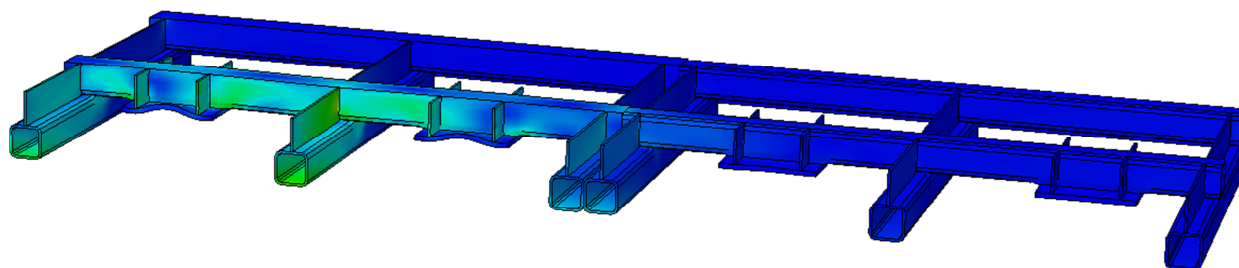


obr. 74 - rozložení napětí na rámu pecního vozu

Napětí von Mises [Pa]



Na jeklech rámu bylo odečteno maximální napětí 53 MPa, tedy výrazně nižší hodnota v porovnání s teplotně zatíženou konstrukcí.



obr. 75 - rozložení napětí na rámu pecního vozu

## **5.7 Zhodnocení výsledků analýzy pecního vozu**

U nosných prvků rámu pecního vozu bylo odečteno maximální redukované napětí 132 MPa. Z toho vyplývá koeficient bezpečnosti vůči mezi kluzu ( $R_e = 196 \text{ MPa}$ )  $k = 1,5$ , který přímo odpovídá zadavatelem požadované bezpečnosti.

Jelikož je současný pecní vůz na hranicích požadované únosnosti, nemůže být přistoupeno ke snížení rozměrů nosných prvků. Konstrukce rámu je proto zachována původní.

Napětí na rámu je z největší části způsobeno teplotním zatížením, které vniká rozdílem teplot plechů ( $134 \pm 10^\circ\text{C}$ ) a jeklů ( $46 \pm 5^\circ\text{C}$ ). Hlavním důvodem vysoké teploty je nízká tepelná izolace žároizolačního betonu Calde Cast LX50.



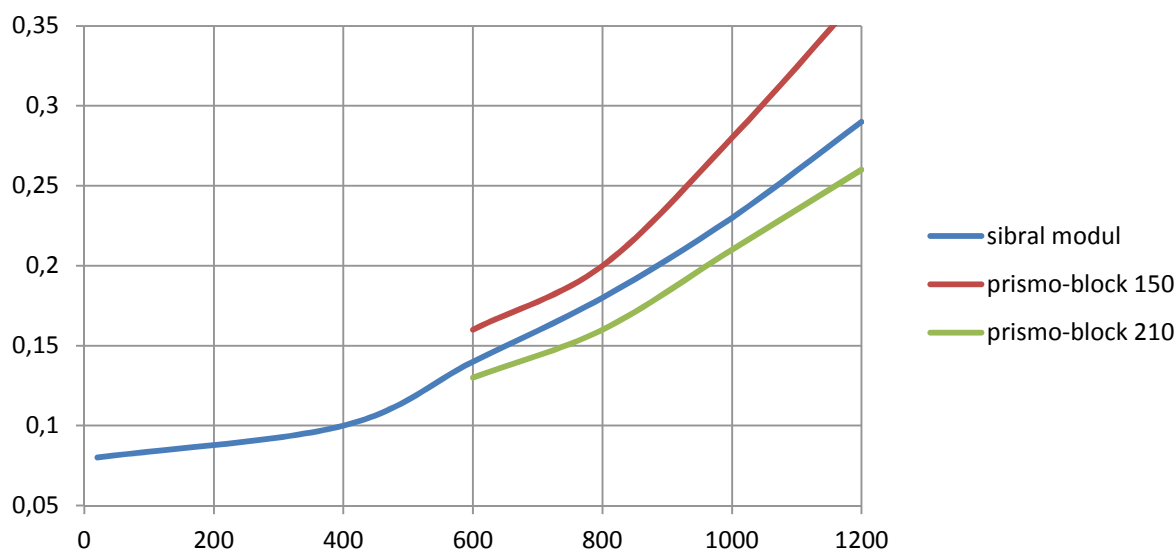
## 6 Analýza materiálů vyzdívek

Pro izolaci průmyslové pece se používá několik různých vyzdívek současně z následujících důvodů:

- smontovatelnost
- vyplnění dilatačních spár
- splnění požadavků na mechanické vlastnosti
- možnosti tvarování

### 6.1 Izolační modul

Základním izolačním prvkem pece je izolační modul. Jedná se o blok izolační látky, která je v přímém styku s pecní atmosférou. Izolace je rozdělena do bloků připevněných k rámu, mezi nimiž jsou dilatační spáry vyplněné izolační rohoží. Tím se zabrání namáhání rámu vlivem tepelné roztažnosti izolace. Pro izolační modul se hledá vhodná kombinace tepelné vodivosti, hmotnosti a ceny.



obr. 76 - tepelná vodivost materiálů modulů

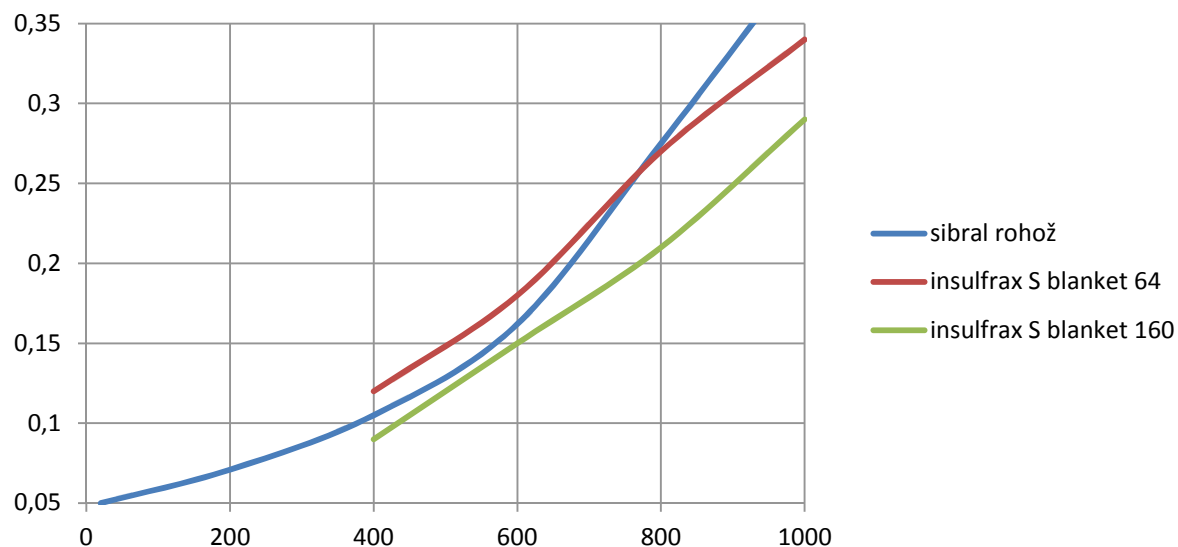
tab. 4 - porovnávané hodnoty materiálů modulů [7] – červeně současně používaný

název	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Celková hmotnost [kg]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Celková cena [Kč]
<b>Sibal - modul</b>	<b>200</b>	<b>2510</b>	<b>17 300</b>	<b>217 080</b>
Prismo-block 150	150	1882	17 400	218 335
Prismo-block 210	210	2635	24 300	304 916

Porovnávané alternativní materiály Prismo-bloky nenabízí výhodnější řešení. V oblasti izolačních modulů se nevyplatí dělat jakékoli změny od původních Sibalových modulů.

## 6.2 Izolační rohož

Izolační rohož má vysokou poddajnost a slouží k vyplnění dilatačních spár mezi izolačními moduly. V porovnání s modulem má nižší hmotnost a vyšší tepelnou vodivost.



obr. 77 - tepelná vodivost materiálů rohoží

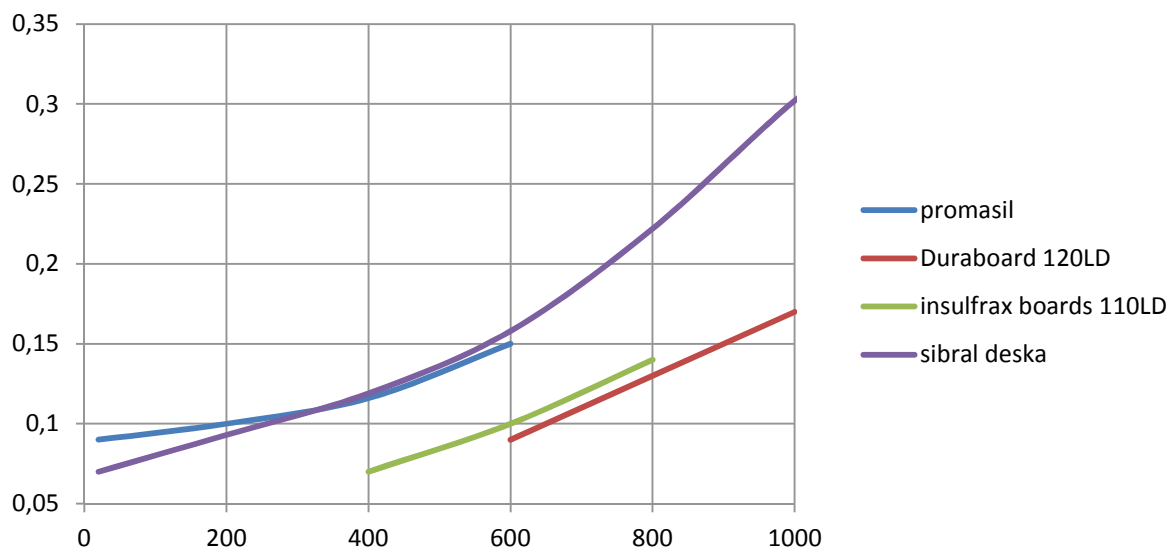
tab. 5 - porovnávané hodnoty materiálů rohoží [7] – červeně současně používaný

název	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Celková hmotnost [kg]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Celková cena [Kč]
<b>Sibral - rohož</b>	<b>120</b>	<b>622</b>	<b>7 100</b>	<b>36 778</b>
insulfrax S blanket 64	64	332	11 630	60 243
insulfrax S blanket 160	160	829	18 530	95 985

Sibralová rohož při podobných vlastnostech jako porovnávané materiály nabízí mnohem nižší cenu. Ani zde se nevyplatí provádět změnu.

### 6.3 Izolační desky

Izolační desky jsou použity pro oblasti s nižšími teploty, jelikož již neobsahují dilatační spáry. Jejich účelem je redukovat nehomogenitu teplotního pole, které vzniklo rozdílnou tepelnou vodivostí izolačních modulů a rohože. Vyznačují se mírně vyšší hmotností a tuhostí v porovnání s izolačními moduly.



obr. 78 - tepelná vodivost materiálů desek

tab. 6 - porovnávané hodnoty materiálů desek [6, 7]– červeně současně používaný

název	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Celková hmotnost [kg]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Celková cena [Kč]
Promasil	245	1719	22 720	159 381
Duraboard 120LD	300	1263	82 500	347 243
insulfrax boards 110LD	270	1136	81 800	344 296
sibrál deska	300	2105	26 800	188 002

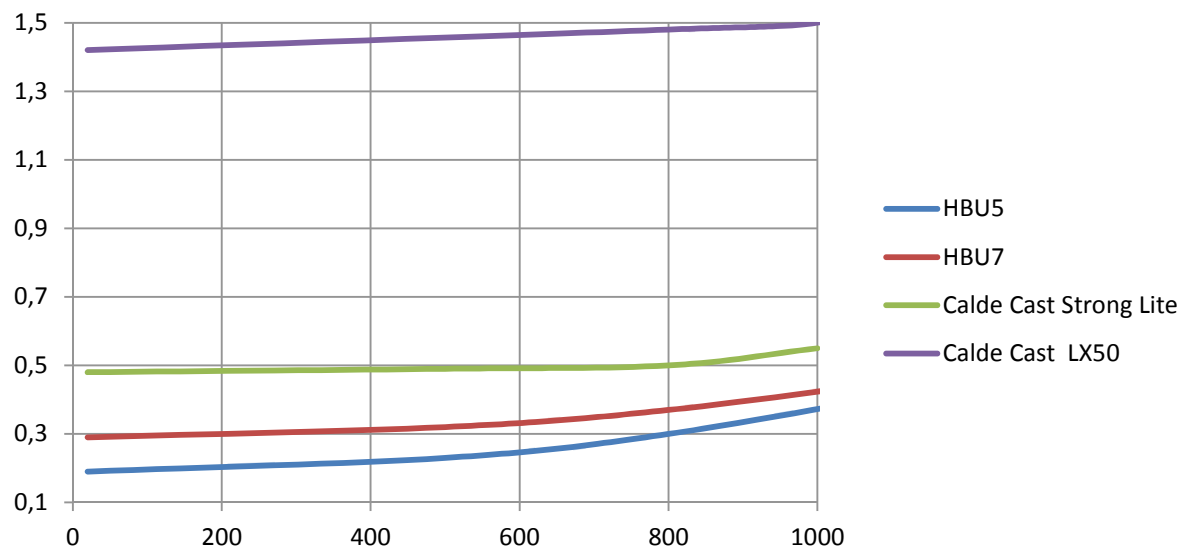
Byl proveden výpočet ekvivalentní tloušťky izolační desky (původní rozměr 100 mm) při použití desek Duraboard 120LD a Insulfrax boards 110LD. Pro výpočet bylo vycházeno z rovnice pro tepelný tok složenou rovinnou stěnou [14] (1), ale jelikož jediná proměnná vstupující do rovnice je součinitel tepelné vodivosti desky  $\lambda_d$ , může být výpočet ekvivalentní tloušťky vyjádřen zjednodušeným výrazem (2). Na základě výpočtu byla tloušťka desek snížena na 60 mm a tím i snížena celková hmotnost desek. Vzhledem k vysoké ceně těchto materiálů je ale stále výhodnější použít stávající řešení s deskami z Promasilu.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1)$$

$$\delta_{d110LD} = \delta_{dPromasil} \cdot \frac{\lambda_{d110LD}}{\lambda_{dPromasil}} \quad (2)$$

## 6.4 Nosné materiály

Pokud je kladen požadavek na nosnost vyzdívky, musí být použit nosný materiál. Tyto materiály se dále využívají vzhledem k jejich soudržnosti a tuhosti v místech, kde je z vyzdívky potřeba vytvarovat potřebný tvar.



obr. 79 - tepelná vodivost nosných materiálů

tab. 7 - porovnávané hodnoty nosných materiálů – červeně současně používaný

název	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Celková hmot. [kg]	Pevnost v tlaku [MPa]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Celková cena [Kč]
HBU5 [5]	500	2344	1,2	23 675	110 988
HBU7 [5]	700	3282	1,8	27 545	129 130
Calde Cast Strong Lite [8]	1440	6009	10	32 322	134 878
Calde Cast LX50 [8]	2380	9932	110	58 374	243 593

Nosný materiál HBU7 je použit ve spodní části pece pouze z důvodu jednodušší tvarovatelnosti. Z toho důvodu je možné materiál nahradit levnějším lehčím a lépe izolujícím materiálem HBU5.

Při numerické simulaci pecního vozu byla vyzdívka uvažována jako monolitní blok. Tento model, ale nekoresponduje dostatečně s realitou a proto z výsledků analýzy není možné stanovit doporučení pro náhradu materiálů, nebo případnou úpravu skladby vyzdívky.

## 7 Závěr

Úvodní část diplomové práce je zaměřena na seznámení s problematikou průmyslových pecí. Bylo popsáno základní rozdělení a pro jednotlivé představitele byl popsán jejich princip a využití v průmyslu. Dále byla sepsána charakteristika jednotlivých způsobů ohřevu průmyslových pecí. Vozová ohřívací pec, která je v této práci řešena, patří k nejpoužívanějším řešením určeným k ohřevu ingotů a rozměrnějších polotovary pro volné kování. Důvodem je jednak umožnění zakládání a vykládání vsázky pomocí jeřábu, a také že konstrukční řešení neomezuje stavět vozové pece libovolného délkového rozměru, čímž se vozová pec stává jediným vhodným řešením pro dlouhé a hmotné polotovary.

V této práci je řešena optimalizace již stávající pece za účelem snížení hmotnosti. Bylo popsáno konstrukční řešení dané pece a stanoven zátěžový stav, pro který byly řešeny numerické simulace. Nejprve byla řešena teplotní analýza, jejíž okrajové podmínky byly určeny na základě naměřených hodnot na existující peci. Vypočtené teplotní pole vstupuje jako okrajová podmínka do statické analýzy. Na základě výsledků ze statické analýzy byla navržena úprava profilů rámu pece a touto úpravou bylo ušetřeno 926kg oceli (odpovídá úspoře 25,5% hmotnosti původních nosných profilů) za minimálního nárůstu napětí v rámu.

Součástí optimalizace byl též pecní vůz, u něhož byla provedena analýza obdobným způsobem. Z výsledků bylo patrné, že pecní vůz je navržen na hranici požadované bezpečnosti a proto již nelze snižovat jeho únosnost za účelem snížení hmotnosti.

Možnost úspory hmotnosti a financí se nabízí při použití alternativních materiálů vyzdívky. K současně použitým materiálům vyzdívky byly nalezeny alternativy, a jejich technické parametry zaneseny do tabulek a grafů. Po následném přezkoumání byla navržena náhrada materiálu HBU7 používaný ve spodní části pece za materiál HBU5. Ostatní alternativní materiály nenabízely výhodnější řešení, než jaká jsou použita v současnosti. Pro vyzdívku na pecním voze nemohlo být stanoveno doporučení alternativního materiálu vzhledem k nedostatečné korespondenci modelu s realitou.

## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] Průmyslové pece E-therm TZ. *Ethermtz.cz* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.ethermtz.cz>
- [2] Tepelná zařízení FÍK, s.r.o. *Prumyslovepece.eu* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://www.prumyslovepece.eu/uspory-energii.htm>
- [3] *Interní výkresová dokumentace*. REALISTIC, a. s., Závodu míru 4, Karlovy Vary., 2015.
- [4] *Materiálová databáze MSC Marc*. COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany, 2015.
- [5] Výrobky, izolační tvárnice. *REFRASIL s.r.o.* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.refrasil.cz/vyrobky/izolacni-tvarnice>
- [6] Promasil 950 KS - Izolační desky. *Centrum Vytápění.cz* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.centrumvytapani.cz/promasil-950-ks---izolacni-desky>
- [7] Fiberfrax ~ Sibal. *EKOMIRELON* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.ekomirelon.cz/Sortiment/Sibal>
- [8] Castable Refractory : CALDE™ Range. *Calderys.com* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.calderys.com/refractory-focus/castable-refractory.html>
- [9] *Interní fotodokumentace*. COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany, 2015.
- [10] Convective Heat Transfer Coefficients. *Engineers Edge* [online]. [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: [http://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/convective\\_heat\\_transfer\\_coefficients\\_\\_13378.htm](http://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm)
- [11] HASSELSTRÖM, ALBIN K J. a U. ESKIL NILSSON. *Thermal Contact Conductance in Bolted Joints* [online]. Gothenburg, 2012 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/159027.pdf>
- [12] Mechanické vlastnosti. *T-PROM s.r.o* [online]. [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: [www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli](http://www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli)
- [13] Tenkostěnné profily U. *FERONA a.s. - E-shop* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://eshop.ferona.cz/vyhledavani/14>
- [14] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.

## 9 seznam obrázků

<i>obr. 1- rozdělení průmyslových pecí .....</i>	2
<i>obr. 2- ohřívací pec .....</i>	3
<i>obr. 3 - ohřívací pec .....</i>	3
<i>obr. 4 - žíhací pec .....</i>	3
<i>obr. 5 - hořáky žíhací pece .....</i>	3
<i>obr. 6 - el. žíhací pec .....</i>	3
<i>obr. 7 - komorová ohřívací pec .....</i>	4
<i>obr. 8 - komorová ohřívací pec .....</i>	4
<i>obr. 9 - komorová ohřívací pec .....</i>	4
<i>obr. 10 - šachtová elektrická pec .....</i>	5
<i>obr. 11 - pokloповá pec .....</i>	5
<i>obr. 12 - válečková pec .....</i>	6
<i>obr. 13 - válečková pec .....</i>	6
<i>obr. 14 - tepelné zprac. pásu plechu .....</i>	6
<i>obr. 15 - kroková pec.....</i>	7
<i>obr. 16 - karuselová pec .....</i>	7
<i>obr. 17- hořák s nuceným přívodem vzduchu.....</i>	8
<i>obr. 18- injektorový hořák.....</i>	8
<i>obr. 19- sálavá trubka .....</i>	8
<i>obr. 20- impulzivní hořák .....</i>	9
<i>obr. 21- rekuperační hořák .....</i>	9
<i>obr. 22- regenerační hořák .....</i>	9
<i>obr. 23 - popis základních částí pece .....</i>	11
<i>obr. 24 - základní rozměry - pohled zřepředu .....</i>	12
<i>obr. 25 - vnější rozměry - pohled z boku .....</i>	12
<i>obr. 26 - pohled svrchu .....</i>	12
<i>obr. 27 - vnitřní rozměry - řez pecí.....</i>	12
<i>obr. 28 - konstrukční uzly řešené pece .....</i>	13
<i>obr. 29 - rám pece .....</i>	14
<i>obr. 30 - řez vyzdívkou pece .....</i>	15
<i>obr. 31 - řez rámem pecního vozu .....</i>	16
<i>obr. 32 - rám pecního vozu.....</i>	16
<i>obr. 33 - rám pecního vozu.....</i>	16
<i>obr. 34 - čtvrtinový řez vyzdívkou vozu .....</i>	17
<i>obr. 35 - žíhací podložka .....</i>	18
<i>obr. 36 - uchycení dveří.....</i>	18
<i>obr. 37 - modul pružnosti oceli v tahu .....</i>	19
<i>obr. 38 - tepelná roztažnost oceli .....</i>	19
<i>obr. 39 - tepelná vodivost oceli .....</i>	19
<i>obr. 40 - tepelná vodivost vyzdívek v závislosti na teplotě.....</i>	20
<i>obr. 41 - 2D transientní teplotní analýza .....</i>	21

<i>obr. 42 - zjednodušený model pece</i> .....	22
<i>obr. 43 - příklad nasíťování U-profilu</i> .....	23
<i>obr. 44 - tepelný vliv pecní atmosféry na povrch vyzdívky</i> .....	24
<i>obr. 45 - záznam z termokamery laboratorní ohřívací pece</i> .....	25
<i>obr. 46 - tepelný vliv vnější atmosféry na rám pece</i> .....	25
<i>obr. 47 - náhrada plechového pláště výdechu okrajovou podmínkou</i> .....	26
<i>obr. 48 - přestup tepla kontaktem mezi vyzdívkou a rámem</i> .....	27
<i>obr. 49 - rozložení teploty na rámu pece</i> .....	28
<i>obr. 50 - rozložení teploty na rámu pece</i> .....	28
<i>obr. 51 - plechy použité pro zahrnutí hmotnosti vyzdívky (modře)</i> .....	29
<i>obr. 52 - uchycení pece v prostoru</i> .....	30
<i>obr. 53 - náhrada zatížení od hmotnosti hořáků</i> .....	30
<i>obr. 54 - zatížení od vlastní hmotnosti a od hmotnosti příslušenství</i> .....	31
<i>obr. 55 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	32
<i>obr. 56 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	32
<i>obr. 57 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	33
<i>obr. 58 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	33
<i>obr. 59 - upravený rám pece</i> .....	34
<i>obr. 60 - rozložení teploty na rámu pece</i> .....	35
<i>obr. 61 - rozložení teploty na rámu pece</i> .....	35
<i>obr. 62 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	36
<i>obr. 63 - rozložení napětí na rámu pece</i> .....	36
<i>obr. 64 - tepelný vliv pecní atmosféry na povrch vyzdívky</i> .....	39
<i>obr. 65 - tepelný vliv vnější atmosféry na rám vozíku</i> .....	39
<i>obr. 66 - přestup tepla kontaktem mezi vyzdívkou a rámem</i> .....	40
<i>obr. 67 - rozložení teploty na pecním voze</i> .....	41
<i>obr. 68 - rozložení teploty na rámu pecního vozu</i> .....	41
<i>obr. 69 - uchycení pece v prostoru a zatížení</i> .....	42
<i>obr. 70 - náhrada kolejových kol a kolejnice</i> .....	42
<i>obr. 71 - řešení kontaktu mezi vyzdívkou a rámem vozu</i> .....	43
<i>obr. 72 - rozložení napětí na rámu pecního vozu</i> .....	44
<i>obr. 73 - rozložení napětí na rámu pecního vozu</i> .....	44
<i>obr. 74 - rozložení napětí na rámu pecního vozu</i> .....	45
<i>obr. 75 - rozložení napětí na rámu pecního vozu</i> .....	45
<i>obr. 76 - tepelná vodivost materiálů modulů</i> .....	47
<i>obr. 77 - tepelná vodivost materiálů rohoží</i> .....	48
<i>obr. 78 - tepelná vodivost materiálů desek</i> .....	49
<i>obr. 79 - tepelná vodivost nosných materiálů</i> .....	50



## 10 seznam tabulek

<i>tab. 1 - materiálové vlastnosti vyzdívky .....</i>	20
<i>tab. 2 - přepočet hustoty plechů pro zahrnutí hmotnosti vyzdívky .....</i>	29
<i>tab. 3 - porovnávací tabulka původní a upravené pece .....</i>	37
<i>tab. 4 - porovnávané hodnoty materiálů modulů – červeně současně používaný.....</i>	47
<i>tab. 5 - porovnávané hodnoty materiálů rohoží – červeně současně používaný.....</i>	48
<i>tab. 6 - porovnávané hodnoty materiálů desek – červeně současně používaný.....</i>	49
<i>tab. 7 - porovnávané hodnoty nosných materiálů – červeně současně používaný.....</i>	50