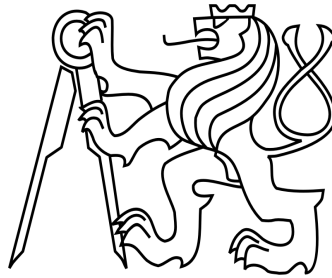


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



MODELOVÁNÍ POŽÁRNÍ ZKOUŠKY V PECI

MODELLING OF FIRE TEST IN THE FURNACE

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Vedoucí práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

Bc. Petra Novotná

Praha 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novotná Jméno: Petra Osobní číslo: 396647
Zadávací katedra: K134 Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požární zkoušky v peci

Název diplomové práce anglicky: Modelling of fire test in the furnace

Pokyny pro vypracování:

- shrnutí problematiky zkoušení konstrukcí v peci
- numerické modely vodorovné pece (bez konstrukce, s konstrukcí)
- validace modelů pomocí dat ze zkoušek
- analýza teplotního pole
- shrnutí a závěrečná doporučení

Seznam doporučené literatury:

Drysdale, D.: An introduction to fire dynamics, Third Edition, 2011, ISBN 978-0-470-31903-1.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph. D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

12/10/2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a s použitím literatury a dalších zdrojů, které jsou citovány v práci. Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8. ledna 2017

Bc. Novotná Petra

Poděkování:

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D., za cenné rady, připomínky a čas, který mi při zpracování této práce věnovala. Dále bych chtěla poděkovat všem svým přátelům, kteří mě po dobu studia podporovali a v poslední řadě patří poděkování celé mé rodině, zejména rodičům, kteří mi dali možnost studovat, byli mi oporou a tím vším mi tak zajistili skvělé podmínky ke studiu.

V Praze dne 8. ledna 2017

Bc. Novotná Petra

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na modelování požární zkoušky v peci. Součástí práce je úvod do problematiky zkoušení požární odolnosti, požadavky normy, které musí být při těchto zkouškách splněny. Stručně je zde zmíněna také historie zkoušení požární odolnosti. Dalším bodem této práce je úvod do problematiky CFD modelování, kde je popsána teorie a kde jsou uvedeny doposud známé pokusy o vytvoření virtuální pece. Hlavním cílem této práce bylo vytvořit fungující model virtuální pece, která bude simulovat reálnou pec. Závěrem této práce je validace výsledků numerického modelu pomocí experimentu.

Klíčová slova

Normová požární zkouška; modelování; FDS, normová teplotní křivka, virtuální pec, CFD, nosník, termočlánky, deskové snímače teploty, validace numerického modelu

Abstract

This thesis is focused on a modelling of virtual furnace for fire resistance tests. The work includes an introduction to the problematics of fire resistance testing, standard requirements which must be met for the standard fire tests. There is also mentioned the history of fire resistance testing. Another point of this paper is an introduction to the topic of Computational Fluid Dynamics. Here are listed the known attempts about virtual furnace models. The main subject of this paper is to create a working model of virtual furnace that will simulate a real furnace. The conclusion of this paper is the validation of the results from numerical model by experiment.

Keywords

Standard Fire test; modelling; FDS; The standard time- temperature curve, virtual furnace, CFD, beam, thermocouples, plate thermometers, Validation of numerical model

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
T	Teplota	°C
t	Čas	minuty

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
SMV	Smokeview (software)
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály
CEN	The European Committee for Standardization
DST	Deskové snímače teploty
PT	Platethermometers
TC	Thermocouple (plášťové termočlánky)
HRR	Rychlost uvolňování tepla
HRRPUA	Rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy

Obsah

Prohlášení:	.....	II
Poděkování:	.....	III
Abstrakt	.....	IV
Abstract	.....	IV
Seznam použitých symbolů a zkratk	.....	V
1 Úvod	.....	3
1.1 Motivace.....	.....	3
1.2 Struktura práce .....	.....	3
1.3 Cíle práce .....	.....	4
2 Současný stav poznání	.....	5
2.1 Význam zkoušení.....	.....	5
2.2 Historie požárních zkoušek.....	.....	5
2.2.1 Standardní požární zkoušky vs. reálný požár.....	.....	6
2.2.2 Chování požáru .....	.....	7
2.3 Legislativa.....	.....	7
2.3.1 Stavební výrobky .....	.....	7
2.3.2 Klasifikace stavebních výrobků z hlediska požární odolnosti.....	.....	8
2.4 Zkušební zařízení .....	.....	9
2.4.1 Obecně .....	.....	9
2.4.2 Zatížení a zařízení pro zatěžování.....	.....	10
2.5 Zkušební podmínky.....	.....	10
2.5.1 Teplota v peci.....	.....	10
2.5.2 Křivka ohřívání .....	.....	11
2.5.3 Měření teploty .....	.....	11
2.5.4 Tlak v peci.....	.....	13
2.6 Vyhodnocování zkoušek .....	.....	13
2.6.1 Zahájení zkoušky .....	.....	13
2.6.2 Měření a pozorování teploty, tlaku a deformací .....	.....	13
2.6.3 Kritéria dosažení mezních stavů .....	.....	13
2.6.4 Protokol o zkoušce .....	.....	14
2.7 CFD modelování .....	.....	15
2.8 FDS software.....	.....	15
2.9 Modely virtuální pece .....	.....	16
2.9.1 Cranfield University UK, 1995 a 1997 .....	.....	16
2.9.2 Efectis laboratoire, Francie .....	.....	19
3 Experimentální zkoušky	.....	23
3.1 Experiment – prázdná pec .....	.....	24
3.2 Experiment– ocelový nosník.....	.....	29
4 Numerické modely v FDS	.....	34
4.1 Hlavní charakteristiky modelů pece.....	.....	34
4.1.1 Materiálové vlastnosti .....	.....	36

4.1.2	Software	37
4.2	Numerický model – prázdná pec	37
	.....	38
4.2.1	Vytápění pece.....	39
4.2.2	Tlak v peci a ventilace	40
4.2.3	Měření teploty v peci, nastavení a rozmístění termočlánků.....	41
4.3	Numerický model – ocelový nosník	44
4.3.1	Vytápění pece.....	44
	.....	45
4.3.2	Měření teploty v peci, nastavení a rozmístění termočlánků.....	46
5	Validace výsledků.....	52
5.1	Experiment vs. numerický model – prázdná pec	52
5.2	Experiment vs. numerický model – ocelový nosník.....	55
5.3	Teplotní analýza numerického modelu pece s konstrukcí a bez konstrukce	59
6	Závěr	61
Literatura	.....	62
Seznam obrázků	.....	64
Seznam grafů	.....	65
Seznam tabulek	.....	66

1 Úvod

1.1 Motivace

Při vytvoření nového výrobku, který má být použitelný pro zvýšení ochrany obyvatelstva i majetku v případě požáru, je nutné splnit všechny předepsané požadavky, jež jsou pro takový výrobek stanoveny. Stěžejní a nezbytnou zkouškou, která je požadována, je zkouška požární odolnosti. [1]

Požární odolnost jakýchkoliv konstrukčních prvků záleží na mnoha faktorech, zahrnuje tak:

- intenzitu požáru
- materiál konstrukčního prvku
- geometrie prvku nebo soustavy
- podmínky podepření
- zatížení v době požáru

Testování standardní požární zkouškou je běžná metoda pro hodnocení požární odolnosti konstrukčních prvků, která se používá již mnoho let. V současné době, kdy se s rozvojem počítačové techniky a rozvojem vědomostí o metodě CFD (z angl. Computational Fluid Dynamics) stává běžnější použití počítačových kódů, lze teplotu plynu během požáru předpovědět pomocí numerického modelování. Aplikace numerického modelování k předpovědi teploty plynu v požárním úseku je v současnosti velice častou záležitostí a lze je nalézt ve velkém množství literatury [3-5]. Se znalostmi v oblasti numerického modelování a dnes již pokročilým počítačovým výkonem je tedy možné zkoušet požární odolnosti v peci zcela inovativním způsobem - pomocí tzv. virtuální pece.

Při požárních zkouškách je pec vyhřívána tak, aby teplota uvnitř pece následovala normovou teplotní křivku [3]. Ideálně by teplota plynu v každém bodě uvnitř pece měla být shodná, tzn. rovnoměrně rozložená. Ve skutečnosti je při požárních zkouškách rozložení teploty plynů přes objem pece nerovnoměrné. Dynamika horkých plynů a také rozložení teploty je ovlivněno přítomností testovaného vzorku [4]. Přesné modelování metodou CFD, které je využito při vytvoření virtuální pece, dokáže tyto nerovnoměrnosti v teplotě uvnitř pece odhalit. Je tudíž možné doporučit, jak při reálném zkoušení postupovat, aby byla teplota v peci co nejbližší ideálnímu případu, tedy maximálně rovnoměrná přes objem pece.

Vzhledem k vysokému počtu existujících výrobků, které musí být podrobeny požární zkoušce, je vytvoření virtuální pece ekonomicky výhodnou alternativou. Vede ke snížení počtu nákladných požárních zkoušek.

1.2 Struktura práce

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První dvě kapitoly se zabývají úvodem do problematiky požární odolnosti, motivací pro tuto práci a dále současným stavem poznání o požárních zkouškách a jejich

normovými požadavky. Třetí a čtvrtá kapitola je věnována experimentálním zkouškám, které proběhly v roce 2016 a matematickému modelu virtuální pece, vytvořeného a řešeného v softwaru FDS. Předposlední kapitola pak shrnuje výsledky z experimentů a z FDS modelů, které jsou zde validovány. Poslední kapitolou je závěr celé práce a doporučení, které z ní vyplývají.

1.3 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je vytvořit virtuální model pece pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí, pomocí kterého bude zhodnocena míra rovnoměrnosti teploty plynu v této peci. V případě nedostatků bude doporučeno, jakým způsobem lze teplotní pole uvnitř pece zdokonalit. Vytyčeného cíle je dosaženo díky následujícímu postupu:

1. shrnutí současného stavu poznání požárních zkoušek
2. popis experimentální zkoušky
3. sestavení FDS modelu
4. validace výsledků numerického modelu s experimentem
5. shrnutí

2 Současný stav poznání

2.1 Význam zkoušení

Cílem stanovení požární odolnosti je posouzení chování vzorku stavební konstrukce, který je vystavený definovaným podmínkám ohřívání a tlaku. Tato metoda určuje schopnosti zkoušeného prvku odolat působení vysokým teplotám, což se zjišťuje tak, že se stanoví kritéria, která se sledují a pomocí nich lze vyhodnotit mimo jiných vlastností také nosnost zkoušeného prvku, zabránění průniku ohně (celistvost prvku) a prostup tepla (izolační schopnost), [5].

Zkušební vzorek se vystaví stanovenému ohřívání a chování vzorku se monitoruje na podkladě kritérií, které jsou popsány v normě ČSN EN 1363-1. Jedná se o:

- Nosnost (R)
- Celistvost (E)
- Izolační schopnost (I)

Požární odolnost zkušebního prvku je vyjádřena dobou, po níž jsou splněna příslušná kritéria. Tato získaná doba je pak měřítkem pro vyhodnocení, zda je konstrukce vyhovující při požáru, avšak nemají přímý vztah k trvání skutečného požáru.

Při běžném zkoušení požární zkouškou, existuje mnoho faktorů, které mohou ovlivnit výsledek požární zkoušky. Jedná se zejména o faktory variability vzorku, materiálu, uložení, geometrie, zatížení aj. [5]

2.2 Historie požárních zkoušek

Za téměř posledních šest desetiletí byla požární odolnost konstrukcí budov založena na stanovisku americké společnosti pro testování a materiály [6]. I když byly provedeny nepatrné změny, časová teplotní křivka, základní zkušební zařízení a některé z kritérií zůstaly nezměněny.

Konstrukce budov pozemních staveb vyžaduje pozornost vůči mnoha různým typům zatížení a kombinací těchto zatížení (např. vítr, zemětřesení atd.). V současné době je chování konstrukce založeno na určitém zjednodušení, a to na základě výsledků ze standardních požárních zkoušek jednoduchých stavebních prvků nebo samostatné konstrukce ve zkušební peci, které jsou zatíženy standardní teplotní křivkou. Výsledkem těchto zkoušek je doba do selhání konstrukce při standardním požáru - to se nazývá požární odolnost. Současný systém hodnocení požární odolnosti stavebních prvků existuje již od přelomu minulého století a zbylý vývoj zůstal od počátku nezměněn a to i přes významný pokrok nauky o požární bezpečnosti a modelování konstrukcí na účinky požáru [7].

Počátky stavebních zkoušek pramení z raných pokusů při provádění požárních srovnání různých stavebních materiálů a systémů k posouzení tvrzení o „nehořlavosti“ konstrukcí a prvků na konci

19. století. [8] Principy požární odolnosti, které původně studoval Ira Woolson, nebyly zamýšleny jako konečné řešení konstrukčního požárního návrhu a regulačních řešení, které se vyskytly na přelomu 20. století, spíše sloužily jako oprava praxe v té době a to konkrétně v návaznosti na požáry v San Franciscu a v Baltimoru [9]. V té době ještě nebyly zcela rozlišovány rozdíly mezi požární odolností a nehořlavým výrobkem. Zpočátku byly tyto dva termíny předpokládány za synonyma, to znamenalo, že časná historie požární odolnosti budov byla založena na úsilí k nalezení užitečných nehořlavých materiálů [7].

Nejstarší zmínky o standardních zkouškách požární odolnosti se nalézají v New Yorku, městě, které procházelo během konce 18. století rychlou inovací v konstrukcích a přinášelo řešení nových lehkých konstrukcí (např. vznik vlnitého plechu a kompozitních betonových stropních systémů). Konstrukční uspořádání a materiály se tak rychle měnily ve snaze ušetřit místo a stavět výše [10].

Požární předpisy městských budov začaly s omezením týkající se určitých konstrukčních materiálů, které byly při požáru problematické. Následně vyzývaly k srovnání vlastností materiálů stropů a příček při požáru po ochlazení. Stěny a stropy byly rozhodující pro zastavení šíření požáru. Původní zkouška stropní konstrukce (ačkoliv v té době nestandardní) měla následující průběh: trvalý průměrný teplotní ekvivalent plynné fáze až do teploty 927°C po dobu 4 hodin (s vrcholy až 1093°C), následovalo zchlazení proudem z hadice a zbytkové testování na vyšší zatížení po dobu dalších 24 hodin. Pokud po této zkoušce průhyb stropu nepřesáhl 1,4% jeho rozpětí, předpokládalo se, že prvek vyhověl [7].

Změny ve standardní požární křivce byly provedeny v průběhu let v různých iteracích společností ASTM a později roku 1920 byla požární zkouška rozšířena o sloupy a další konstrukční prvky [11]. V té době bylo známo, že normový požár nebyl v žádném případě reprezentativní skutečností a někteří vědci se usilovně začali zajímat o vzájemnou souvislost intenzity požáru, kdy byl použit reálný test vyhoření úseku. V současné době je požárně bezpečnostní návrh stále založen převážně na konceptech ekvivalentní požární odolnosti a je založen na značném zjednodušení chování skutečného požáru a konstrukčního chování [7].

2.2.1 Standardní požární zkoušky vs. reálný požár

V mnoha případech se zkoušení nezabývalo použitím reálného požáru, přesto bylo rozhodnuto k vytvoření kopie standardní teplotní křivky a to spalováním požárního zatížení (např. dřevěných hranic, plynových hořáků atd.) přes předem vypočtené ventilační podmínky. Zajímavostí je, že zatím co většina stavebních inženýrů pochopila důležité rozdíly mezi testováním materiálu, části konstrukce nebo testováním celé konstrukce z hlediska odezvy konstrukce, velmi málo z nich je dostatečně způsobilých v oblasti požární vědy pochopit důležité rozdíly mezi rovnoměrným zahříváním, standardním požárem, zónovým požárem, CFD modelem nebo skutečným požárem. Důsledkem toho je, že většina velkokapacitních požárních zkoušek konstrukcí, které byly provedeny v průběhu let, se snaží spíše vytvořit standardní požár a ne simulaci skutečného požáru [7].

2.2.2 Chování požáru

Výzkum spalování hořlavých látek a působení ventilačních podmínek na chování skutečného požáru začalo již ke konci roku 1700 [12]. V té době bylo dobře známo, že větrání, množství paliva a další faktory mohou mít vliv na chování požáru v budově [13]. Normová teplotní křivka není reprezentativní při skutečném požáru v reálném objektu. Aby bylo možné opravdu pochopit odezvu reálných staveb při skutečném požáru, jsou vyžadovány zkoušky konstrukcí a konstrukčních prvků na základě nejméně pravděpodobných a nejhorších přirozených požárů. Zjednodušení složitěho skutečného chování požáru pokračuje i v dosavadní praxi. Nynější Eurokódy s parametrickými požáry vyhledávají empirický ohled na různé faktory, jako je množství paliva, typ paliva, větrání, tepelné vlastnosti hranic, sálavého vytápění do stěn, velikost prostoru atd. Tyto požáry představují nejvíce pokročilé požární modely, které by mohly být obvykle použity pro analýzu konstrukcí při požáru u většiny staveb.

Parametrické požáry byly vyvinuty na základě požárů v malých prostorech, které nejsou reprezentativní pro mnoho moderních otevřených konstrukčních systémů. Je dobře známo, že požár se nechová v prostoru rovnoměrně a že teploty převyšují ty, které jsou považovány za průměrné [7].

2.3 Legislativa

2.3.1 Stavební výrobky

Stavební výrobky jsou v ČR regulovány zákonem č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. Jsou to tedy tzv. stanovené výrobky, jejichž uvádění na trh se řídí výše uvedeným zákonem a na něj navazujícími nařízeními vlády.

Pro stavební výrobky označované CE je v ČR platný přímo aplikovatelný předpis EU - nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 305/2011 (nařízení CPR), která je základním legislativním dokumentem pro oblast stavebních výrobků v Evropské unii.

Nařízení vymezují základní požadavky kladené na výrobek (resp. stavbu) z hlediska bezpečnosti. Stavební výrobky musí mít takové vlastnosti a splňovat takové požadavky, aby byla stavba bezpečná jako celek. Před uvedením stanoveného výrobku na trh musí být provedeno tzv. posouzení shody, resp. posouzení a ověření stálosti vlastností. Posouzení je procedura, při níž se hodnotí shoda výrobku s požadavky na něj kladenými. Způsob, jakým má být provedeno posouzení, kdo se na něm podílí a další náležitosti stanovuje nařízení vlády. [14]

Pro stavební výrobky v ČR (výrobky bez CE) - národní systém posuzování platí nařízení vlády: nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. Oblast není pokryta harmonizovanými normami, proces posuzování shody využívá tzv. určených norem a systému stavebních technických osvědčení. Výsledkem je certifikát výrobku nebo certifikát systému řízení výroby.

2.3.2 Klasifikace stavebních výrobků z hlediska požární odolnosti

Klasifikace je výsledkem procesu (zahrnujícího aplikaci stanovených pravidel, která mohou obsahovat výpočetní postupy), který předurčuje pro varianty vlastnosti výrobku nebo aplikací jeho určeného konečného použití výsledek zkoušky na základě jednoho nebo více výsledků zkoušky podle stejné zkušební normy [15].

Pro klasifikaci stavebních výrobků podle požární odolnosti platí ČSN EN 13501-2+A1:2010 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení.

Mezi další důležité dokumenty pro stanovení požární odolnosti je třeba zahrnout:

- ČSN EN 13501-3+A1:2010 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 3: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti prvků běžných provozních instalací: požárně odolná potrubí a požární klapky
- ČSN EN 13501-4+A1:2010 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 4: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti prvků systémů pro usměrnění pohybu kouře

Ověřování požární odolnosti se provádí buď na základě zkoušek nebo výpočtu, extrapolace a porovnání podle norem citovaných v ČSN EN 13501-2+A1 a dále zpracovaných nebo připravovaných v CEN/TC 127 [16]. Pro zkoušení požární bezpečnosti patří mezi hlavní normy:

- ČSN EN 1363 – 1:2013 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky
- ČSN EN 1363 – 2:2000 Zkoušení požární odolnosti – Část 2: Alternativní a doplňkové postupy
- ČSN EN 1363 – 3:1999 Zkoušení požární odolnosti – Část 3: Ověřování charakteristik pec

2.4 Zkušební zařízení

2.4.1 Obecně

Zařízení pro provádění zkoušek se skládá z:

- a) speciálně konstruované pece, kde se vystavuje zkušební vzorek určitým zkušebními podmínkám
- b) řídicího zařízení, které umožňuje řízení teploty v peci dle daných požadavků
- c) zařízení, které monitoruje tlak horkých plynů v peci dle daných požadavků
- d) rámu, do kterého se osazuje zkušební vzorek, který může být připevněn tak, aby bylo možné vytvořit v peci vhodné podmínky ohřívání, tlaku a podepření zkoušeného vzorku
- e) zařízení pro příslušné zatížení zkušebního vzorku a to včetně řízení a sledování zatížení
- f) zařízení pro měření teploty v peci
- g) zařízení pro měření deformací
- h) zařízení pro hodnocení celistvosti a pro zajištění shod s kritérii chování dle požadavků
- i) zařízení pro měření času
- j) zařízení pro měření koncentrace kyslíku v plynech v peci

Pece pro zkoušky požární odolnosti byly vyvinuty především pro potřebu autorizovaných zkušeben pro ověřování, zkoušení a prokazování požární odolnosti zejména

- plochých stavebních dílců a výplní
- stavebních konstrukčních prvků
- tabulového skla

Pece musí být navrženy v souladu s požadavky evropské normy EN 1363-1:2013, která definuje podmínky zkoušek požární odolnosti, a evropské normy EN 1363-3:1999, týkající se charakteristik zkušebních pecí a postupů jejich ověřování.

Zkušební pec se konstruuje na kapalná nebo plynná paliva. Dále musí být schopna ohřívat svislé nebo vodorovné dělící prvky z jedné strany, ohřívat sloupy ze všech stran, nosníky ze tří nebo čtyř stran [5].

- Pece pro svislé prvky

Vertikální pec poskytuje způsob kvantifikace schopnosti výrobků a materiálů, ve svislé poloze tak, aby vydržely vystavení vysokým teplotám. Pec může být použita k posouzení požární odolnosti výrobků, jako jsou stěny, dveře, těsnění prostupů aj. [5].

- Pece pro vodorovné prvky

Horizontální pec je zařízení potřebné pro posouzení požární odolnosti vodorovné konstrukční sestavy, sloupů nebo nosníků a poskytuje způsob kvantifikace schopnosti výrobků a materiálů ve vodorovné poloze tak, aby vydržely vystavení vysokým teplotám [5].

2.4.2 Zatížení a zařízení pro zatěžování

Zatížení, které se aplikuje během požární zkoušky na zkušební vzorek, má velký vliv na jeho chování a současně má také velký význam při další aplikaci zkušebních výsledků spolu s údaji z jiných zkoušek. Metoda, která byla použita pro stanovení zatížení, se musí vztahovat ke konečnému stavu zatížení zkušebního prvku před ohříváním. Podklady pro stanovení zatížení by měly být uvedeny v protokolu o zkoušce spolu s dalšími případnými údaji, kterými jsou např. materiálové vlastnosti a stavy napětí [5].

Zkušební zatížení je odvozeno z materiálových vlastností. Objednatel zkoušky musí zajistit podklady pro zkušební zatížení včetně všech výpočtů, musí určit vztah mezi zkušebním zatížením a zatížením použitým v praxi. Zkušebna by měla, pokud možno, ověřit vlastnosti materiálů, které objednatel zkoušky použil při výpočtu zkušebního zatížení [5].

Zatěžovací zařízení musí být schopné vystavit zkušební vzorek zkušebnímu zatížení. Lze ho aplikovat hydraulicky, mechanicky nebo pomocí závaží. Zařízení musí být schopné napodobit podmínky rovnoměrného zatížení, bodového, soustředného, osového nebo excentrického a to podle konkrétní zkušební konstrukce. Zařízení musí udržovat konstantní hodnotu zkušebního zatížení beze změny jeho rozdělení a dodržet největší deformace a rychlost deformace zkušebního vzorku až do porušení nosnosti nebo po dobu trvání zkoušky [5].

2.5 Zkušební podmínky

2.5.1 Teplota v peci

Stanovení rozložení teploty plynů v peci je jedním z klíčových úkolů při vyhodnocování odolnosti konstrukce za požáru. Hlavním cílem zkoušek je porovnat požární odolnost konstrukčních sestav, které jsou podrobeny stejné teplotě. Pec je vyhřívána tak, aby teplota plynů uvnitř pece následovala normovou teplotní křivku [3]. Nicméně, ve skutečnosti je teplota plynu velmi nerovnoměrná přes objem pece. Dynamika horkých plynů a také rozložení teploty je ovlivněno přítomností testovaných vzorků [4]. Větší překážkou uvnitř pece je turbulentní proudění, které může zastavit horký plyn před prvkem.

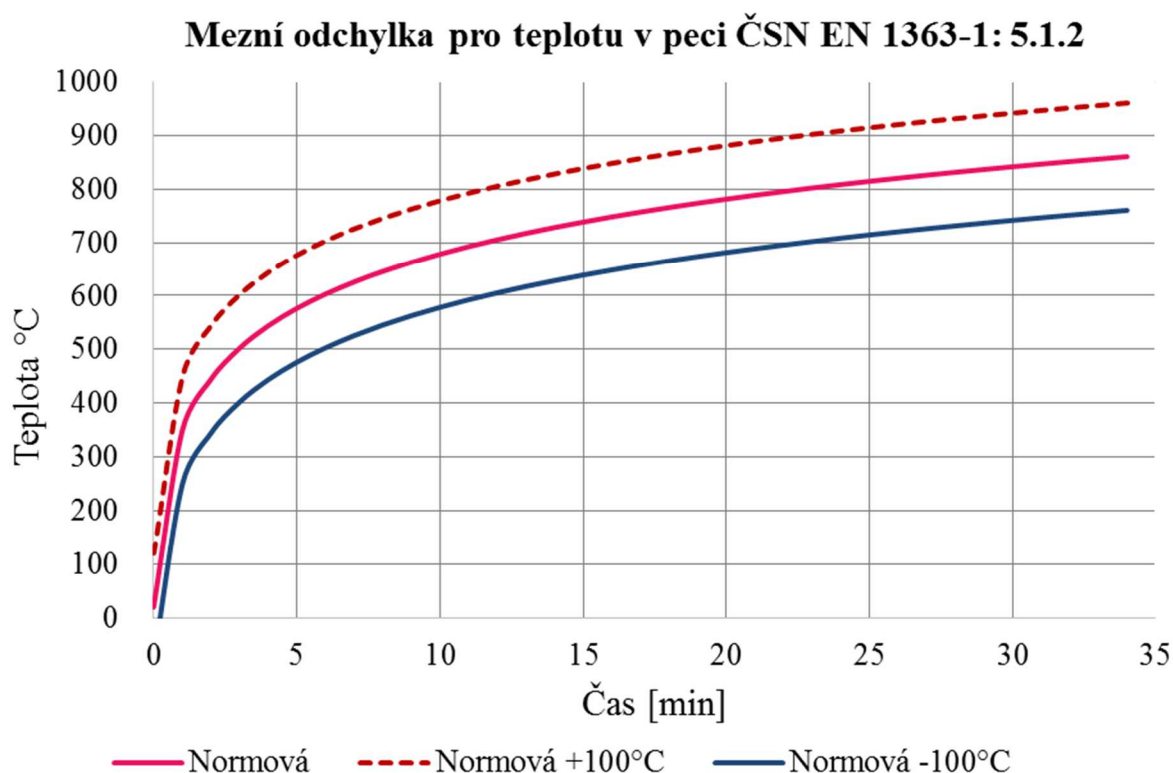
2.5.2 Křivka ohřívání

Průměrná teplota v peci z měření jednotlivých termoelektrických článků se sleduje a řídí tak, aby následovala vztah:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$$

kde T je průměrná teplota v peci uvedená v °C, t je čas v minutách.

Dále je v ČSN EN 1363-1: 2013 kapitola 5.1.2 Odchyly, stanovena mezní odchylka pro průběhu teploty v peci, kdy je dovoleno lišit se o $\pm 100^\circ\text{C}$ od průběhu normové teplotní křivky, aby zkouška byla považována za platnou, (viz Graf 1).



Graf 1 Mezní odchylka pro teplotu v peci dle ČSN EN 1363-1 :5.1.2

2.5.3 Měření teploty

Norma ČSN EN 1363 - 1 rozlišuje termoelektrické články:

- Termoelektrické články v peci – deskové snímače teploty
- Termoelektrické články na neohřívaném povrchu
- Mobilní termoelektrické články
- Vnitřní termoelektrické články

– Termoelektrické články pro teplotu okolí – plášťové termočlánky

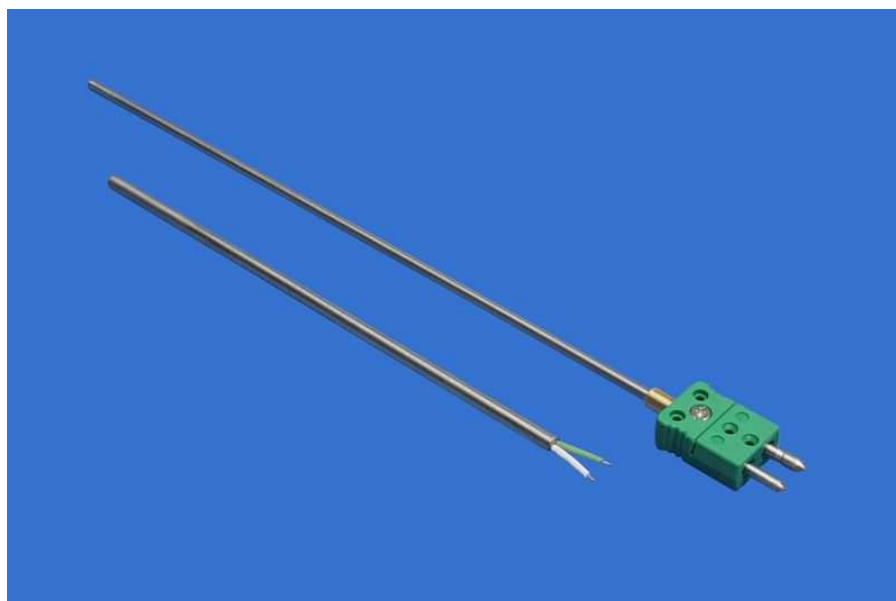
Mezi nejpoužívanější termoelektrické články při požárních zkouškách patří plášťové termočlánky a deskové snímače teploty.

Plášťové termočlánky Obr. 2, jsou schopné při zkoušce v požární peci měřit celkovou teplotu okolí (plynů). Nicméně k šíření tepelné energie z jednoho místa na druhé dochází prouděním (konvekcí), sáláním (radiací) a vedením (kondukcí). Pro správné pochopení chování konstrukce za požáru jsou důležité první dvě složky tepelného toku: proudění a sálání. Konstrukce deskového snímače teploty umožňuje tyto dvě složky tepelného toku zaznamenat a vypočítat množství tepelného namáhání, které přijala konstrukce prouděním a sáláním.

Obecně se deskové snímače teploty (Obr. 1) používají k řízení teploty v peci a umísťují se v blízkosti povrchu vzorku. Umístění, údržba a další specifikace týkající se termoelektrických článků je podrobně řešeno v normě ČSN 1363 – 1.



Obr. 1 Deskový snímač teploty (DST).



Obr. 2 Plášťový termočlánek MTC10, průměr 2 mm (TC)

2.5.4 Tlak v peci

Rozložení tlaku po výšce pece je ovlivněno hlavně účinkem přirozené těkavosti plynů. Systém měření tlaku musí být takový, aby vyloučil rychlé změny tlaku spojené s turbulencí apod. Tlak v peci by měl být stanoven relativně k tlaku vně pece v téže výšce. Tlak v peci se musí trvale sledovat a řídit. Senzor tlaku se umísťuje do míst, kde nebude vystaven přímému vlivu konvekčního proudění tepla od plamenů, ani kde nebude v trase odcházejících plynů. Trubice musí být vodorovné jak v peci, tak i při svém průchodu stěnou pece a to proto, aby tlak zevnitř pece ven byl vztažený k téže vnější výšce. Tlak v peci by neměl překročit hodnotu 20 Pa [5].

2.6 Vyhodnocování zkoušek

2.6.1 Zahájení zkoušky

Před počátkem zkoušky se u nosných prvků musí vyvodit zkušební zatížení takovou rychlostí, aby nebyly vyvolány žádné dynamické účinky. Musí se změřit všechny výsledné deformace. V průběhu zkoušky je pak nutné udržovat konstantní zatížení, a pokud nastane deformace zkušební vzorku, musí zatěžovací systém rychle reagovat a udržet tak konstantní hodnotu. Dále se musí před zahájením zkoušky zkontrolovat počáteční teplota, která je zaznamenávána všemi termočlánky a to kvůli ověření jejich shody a pro stanovení počátečních hodnot měřených veličin. Před zahájením musí být teplota v peci menší jak 50°C. Za začátek zkoušky je považován okamžik, kdy program začne sledovat teplotní křivku (při zapálení hořáků).

2.6.2 Měření a pozorování teploty, tlaku a deformací

Od počátku zkoušky se musí provádět dále uvedená měření a pozorování:

- Teplota – měří se po celou dobu ohřívání v intervalech menších než 1 minutu
- Tlak v peci – měří se a zaznamenává průběžně
- Deformace – měří se a zaznamenávají v celém průběhu zkoušky
- Celkové chování zkušební vzorku

2.6.3 Kritéria dosažení mezních stavů

Po dobu průběhu zkoušky se také sledují některá kritéria mezních stavů. Jedná se o:

- Celistvost – kde se sleduje vznícení bavlněného polštářku, který se přikládá v rámečku, v němž je osazen, k povrchu zkušební vzorku po dobu max. 30 s, nebo pokud nedojde k jeho vznícení. Dalším bodem pro hodnocení celistvosti je umožnění průchodu měřky spár a pozorování souvislého plamenného hoření. Kritériem celistvosti je tak doba

uběhnutého času, po kterou zkušební prvek zachovává při zkoušce svou dělicí funkci, aniž by došlo k následujícím okolnostem, viz výše. [5]

- Nosnost- u nosných vzorků se zaznamenává čas, v němž zkušební prvek již není schopen nést zkušební zatížení. Schopnost se stanoví velikostí a rychlostí deformace. Za porušení nosnosti se dle normy ČSN EN 1363 – 1 považuje překročení jedné z následujících podmínek:

a) u ohýbaných zatížených prvků

$$\text{mezní průhyb } D = \frac{L^2}{400 d} \text{ [mm] nebo}$$

$$\text{mezní rychlost průhybu } \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 d} \text{ [mm / min]}$$

kde:

L je světlé rozpětí zkušební vzorku v mm;

d je vzdálenost krajních vláken tlačené zóny ke krajním vláknům tažené zóny posuzovaného průřezu v mm;

b) u svisle zatížených prvků

$$\text{mezní svislé smrštění } C = \frac{h}{100} \text{ [mm] nebo}$$

$$\text{mezní rychlost svislého smrštění } \frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \text{ [mm / min]}$$

kde:

h je původní výška zkušební vzorku v mm

- Izolace – kritériem izolace je doba uběhnutého času, po kterou zkušební vzorek zachovává při zkoušce svou dělicí funkci, aniž by na neohřívané straně byly dosaženy teploty, které způsobí:
 - a) vzrůst průměrné teploty nad počáteční průměrnou teplotou od více než 140 K; nebo
 - b) vzrůst teploty v kterémkoliv místě nad počáteční průměrnou teplotu o více než 180 K.

2.6.4 Protokol o zkoušce

Výstupem zkoušky je „protokol o zkoušce“, který musí obsahovat následující údaje:

- a) název a adresa zkušební laboratoře
- b) jméno a adresa objednatele zkoušky
- c) datum zkoušky

- d) identifikační číslo zkoušky
- e) jméno výrobce zkušební vzorku
- f) ... a mnoho dalších údajů, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 1363 – 1.

2.7 CFD modelování

CFD je anglická zkratka pro Computational Fluid Dynamics, do češtiny přeloženo jako „počítačová dynamika tekutin“. Jedná se o moderní metodu, který se zabývá prouděním tekutin, přestupem tepla a hmoty, průběhem chemických reakcí a dalšími jevy. Tekutinu v případě požáru představuje dynamicky proudící směs kouře, vzduchu a zplodin hoření v plynném stavu, jejichž pohyb je vyvolán tepelným účinkem požáru.

Pro CFD modely je nutné vytvořit trojrozměrnou výpočetní síť. To znamená, že objem místnosti nebo počítaného prostoru se rozdělí na velký počet trojrozměrných objemů tzv. buněk, jejichž rozměry se dle požárního scénáře pohybují v rozsahu milimetrů až metrů [17].

CFD modelování je založeno na základních fyzikálních rovnicích, jako je rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice. Pro řešení těchto rovnic jsou využity diskretizační přístupy a to metoda konečných objemů.

Výpočty pomocí metody CFD jsou výhodné pro snížení nákladů zejména při zjišťování základních inženýrských dat, pro které je nutné užití experimentů. Vzhledem k rostoucímu výkonu počítačů se bude dále snižovat i výpočetní čas [18]. Získané výsledky je možné okamžitě využít při návrhu nebo úpravě daného zařízení. Při modelování je obtížné některé vlastnosti získat pomocí experimentu (požáry, výbuchy), pomocí CFD můžeme teoreticky namodelovat kterékoliv fyzikální podmínky. Nevýhodou programů závislých na CFD modelování je vysoká uživatelská náročnost, obtížná dostupnost vstupních dat, dále to jsou požadavky na hardware. Výsledky CFD simulací je vhodné ověřit experimentem. [19]

2.8 FDS software

Ačkoliv vývoj softwaru FDS (Fire Dynamics Simulator) trvá už asi 25 let a to pod záštitou NIST (National Institute of Standards and Technology), zpřístupněn veřejnosti byl až od roku 2000. Součástí instalačního balíčku tohoto softwaru je program Smokeview, který umožňuje animaci daného modelu z FDS. Program je nekomerční, volně dostupný a bezplatný. V současnosti je dostupná šestá verze programu (FDS 6), která nalézá široké uplatnění při návrhu požární bezpečnostních zařízení (např. kouřové detektory, sprinklery), tak i při zjišťování a předpovědi šíření požáru a samotného hoření.

Program FDS je často používaným nástrojem numerického modelování metodou CFD v oboru požární bezpečnosti. Pracuje se základními rovnicemi, jako je rovnice zachování hmoty, rovnice

zachování hybnosti a rovnice zachování energie. Pro práci v programu FDS je vytvořena podrobná příručka, která vysvětluje základní funkce práce se zdrojovým kódem, nastavení různých funkcí jako je ventilace, zdroje hoření, hašení vodní mlhou nebo sprinklery aj., které uživatel potřebuje pro daný příklad modelu [20].

Vstupní data zahrnují konstrukční řešení daného prostoru, místnosti atd. Data jsou zadávány pomocí textového editoru. Jedná se zpravidla o údaje, které se týkají geometrie, požárního scénáře, velikosti výpočtové oblasti, charakteristiku vnějšího prostředí, paliva aj. Ke každému bloku konstrukce je nutné přiřadit jeho materiálové vlastnosti (hustotu, měrné teplo, tepelná vodivost).

V každém modelu jsou zahrnuty příkazové řádky, které charakterizují velikost oblasti a její rozdělení na buňky, pro které se uskutečňuje samotný výpočet. Tyto buňky vytvářejí síť, označovanou ve zdrojovém kódu jako mesh. Je proto zapotřebí, aby předměty, které se nacházejí ve výpočtové oblasti, byly této síti přizpůsobeny. Nejvhodnějším způsobem při vytváření modelu je, že se nejprve nastaví hrubá síť, která se postupně zjemňuje, tím lze dosáhnout přesnějších výsledků, zmenšením chyb a odchylek výpočtu, ale na úkor zjemnění sítě narůstá čas simulace a zvyšují se i nároky na výkon počítače. Pro jednu simulaci je možné vytvořit i více sítí [20].

Výstupní data se odvíjí od použití požárního scénáře. Obvykle mezi ně patří data o změně teploty, hodnoty tlaku, hustota plynů, množství uvolněné energie, rychlost proudění aj. Výstupní hodnoty jsou po výpočtu uloženy v tabulkovém editoru (MS Excel). K vizualizaci průběhu požáru se používá program Smokeview [21].

2.9 Modely virtuální pece

Jak již bylo zmíněno v úvodu, vytvoření simulace virtuální pece je zásadní alternativou, díky které je možné snížit vysoké náklady při testování stavebních výrobků pomocí požárních zkoušek. Vzniká také spousta nových stavebních výrobků z nových materiálů a různých rozměrů. Pomocí numerického modelu by tak mohlo dojít k zjednodušení průběhu zkoušení požární odolnosti. Doposud se však touto problematikou zabývalo jen málo studií. Shrnutí těchto studií je uvedeno níže.

2.9.1 Cranfield University UK, 1995 a 1997

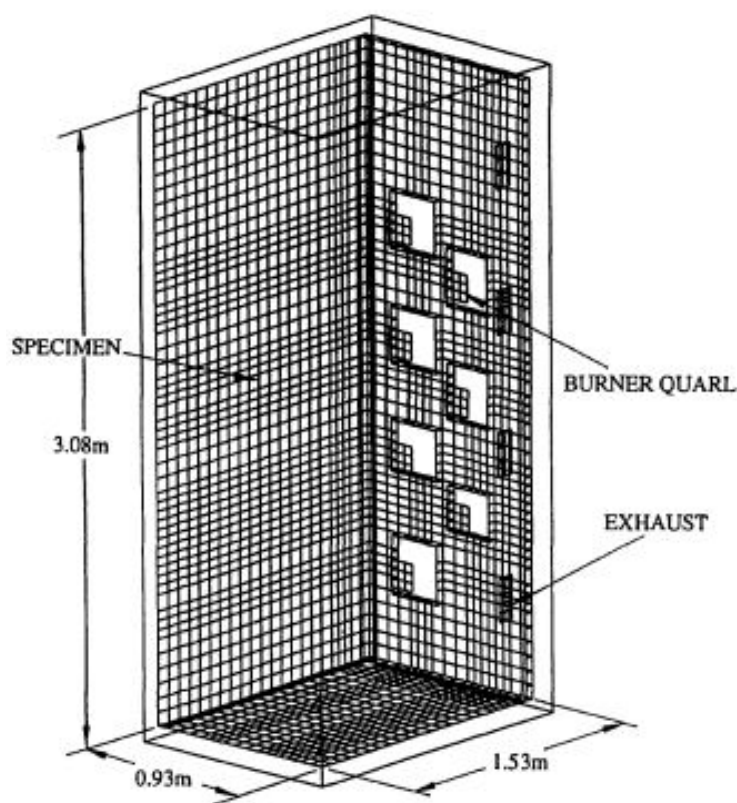
Jedná se o jeden z prvních záznamů o vytvoření numerického modelu virtuální pece. Byl vytvořen model svislé pece o rozměrech 1,0 m x 1,0 m x 1,0 m. Stěny byly betonové o tloušťce cca 10 mm. Jako zkušební vzorek byl použit ocelový plech o tloušťce 10 mm, který představoval jednu celou stěnu pece. Pec byla vyhřívána dvěma plynovými hořáky. Palivo v modelu bylo simulováno jako čistý metan.

Pec byla namodelována za použití výpočtové sítě 17 x 27 x 11 uzlů. Díky jednoosé symetrii byla simulována pouze polovina pece souměrná kolem osy uprostřed mezi hořáky. Doba simulace byla nastavena na 40 minut v časovém kroku 15 sekund. Teplotní křivka byla simulována změnou průtoku paliva.

Numerické předpovědi ukázaly dobrou shodu s daty dostupnými z experimentů. Vypočítaná teplota plynu poblíž zkušebního vzorku velmi těsně sledovala normovou teplotní křivku. Simulace ukázala, že i když je teplotní křivka dobře vystižena, zkušební vzorek je i přesto vystaven různým tepelným tokům. Ačkoliv byly nalezeny jisté nesrovnalosti, s přihlédnutím na vysokou míru dynamiku plynů a přestup tepla model prokázal dostatečnou schopnost simulovat přechodné jevy po značně dlouhou dobu. [22]

V roce 1997 byl na této univerzitě proveden další z podobných experimentů. Byla vyzkoušena první aplikace CFD modelu k simulaci reálné pece pro zkoušení požární odolnosti. Model byl vytvořen pomocí softwaru SOFIE (Simulation Of Fires In Enclosures), který pracuje na stejném principu jako program FDS.

Požární pec měla rozměry 3,08 m x 3,06 m x 1,53 m (Obr. 3) byla vybavena 14-ti plynovými hořáky (7 na každé straně pece proti sobě), kde palivem byla směs vzduchu a metanu. Zkušebním prvkem v této peci byla stěna tvořená ocelovým plechem o tloušťce 50 mm. [23]

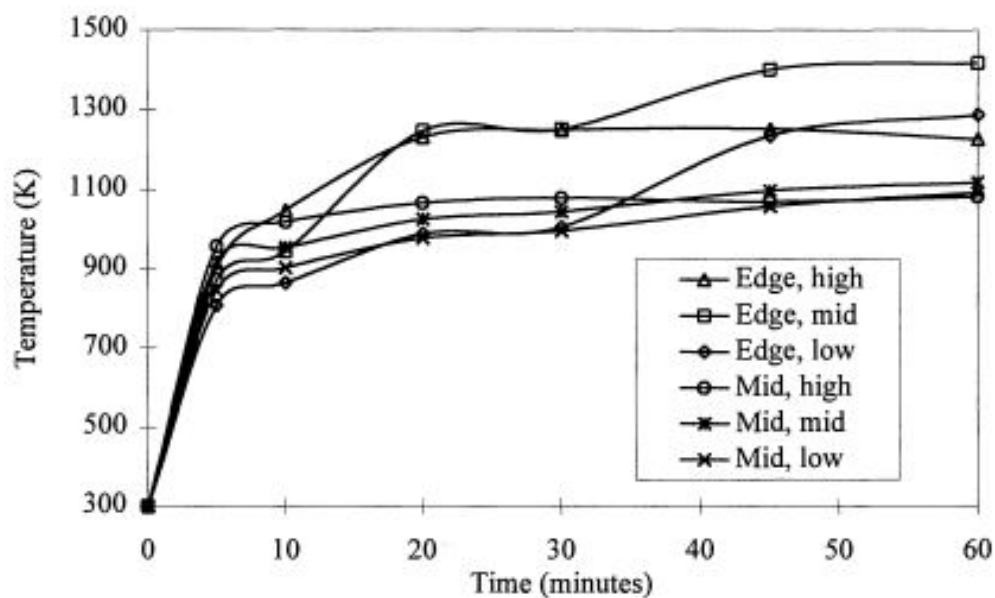


Obr. 3 Model pece Cranfield University 1997. Zdroj [23]

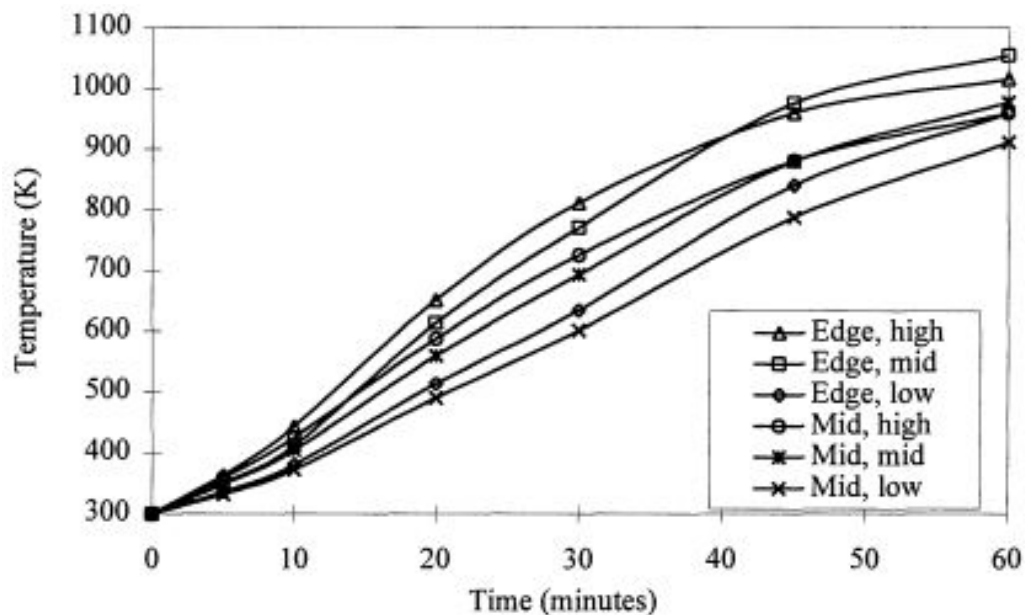
Stěny pece byly tvořeny z keramického zdiva tl. 150 mm. V peci bylo osazeno 18 termočlánků. Tři ve středu pece, tři na každé straně 0,7 m od hořáků ve výškách 0,52 m, 1,43 m a 2,34 m od podlahy. Další 9 TC bylo umístěno na stranu zkoušeného prvku vystavenou požáru.

Pro symetrickou polovinu pece byla použita výpočtová síť 21 x 24 x 54 uzlů, což dává výsledný počet 27216 buněk. Zrcadlení bylo použito z důvodu snížení vysokých požadavků na paměť a výpočetní čas simulace.

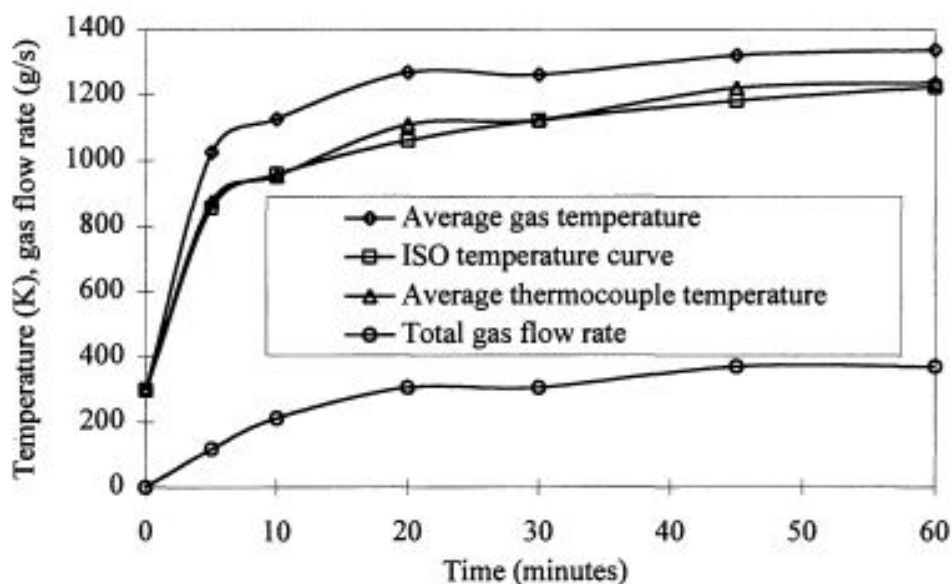
Z modelu byl zjištěn odražený a dopadající tepelný tok a jejich rozdíly. Dále byly vypočítány teploty na termočláncích na stěně zkušebního prvku (Graf 3) a teploty termočlánců umístěných v prostoru pece (Graf 2), specifikovaných ještě po výšce a poloze vůči zkušebnímu prvku. Na grafu 4 je vidět změna průtoku plynu a výsledné teplotní křivky, které splňují maximální odchylku 50 K. Jak je vidět, teplota plynu v peci je vyšší než teplota z termočlánců.



Graf 2 Teploty z termočlánců v prostoru pece. [23]



Graf 3 Teploty z termočlánců na stěně zkušebního prvku. [23]



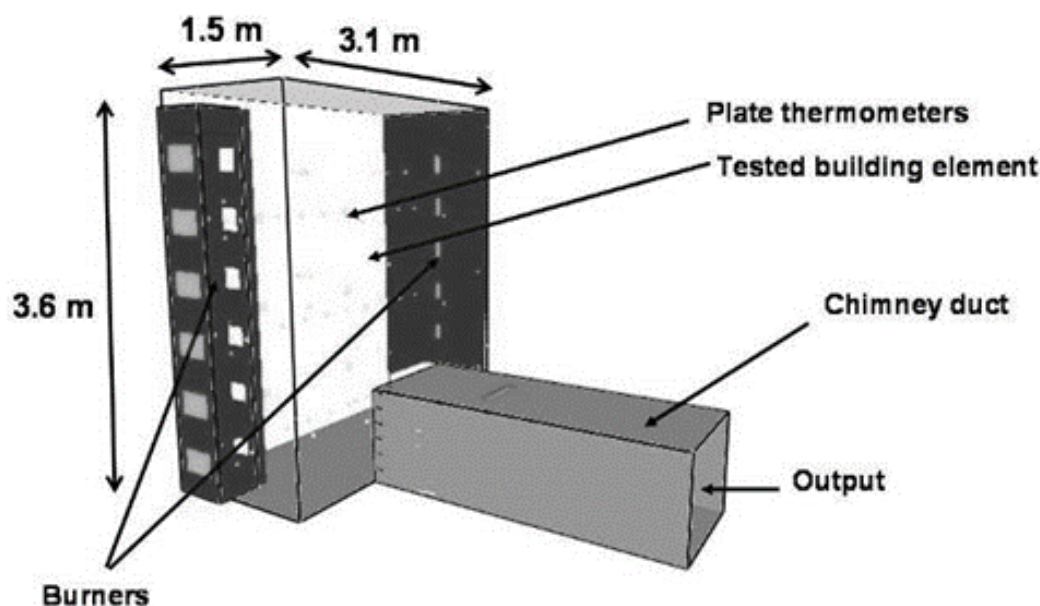
Graf 4 Teplotní křivky a změna průtoku plynu.

2.9.2 Efectis laboratoire, Francie

Mezi nejnovější pokusy o vytvoření virtuální pece patří experimenty z laboratoří ve Francii, které proběhly v roce 2012. Jednalo se o experimenty, kde zkoušeným prvkem byla např. betonová stěna tl. 200 mm, dřevěný poklop v pórobetonové desce tl. 200 mm, SDK deska nebo sendvičové panely.

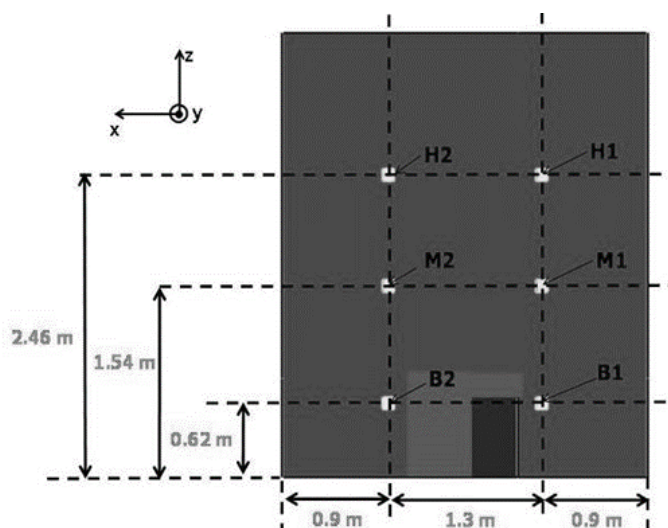
- SDK deska

Pec o rozměrech 3,1 m x 1,5 m x 3,6 m je vytápěna 12 plynovými hořáky (Obr. 4), kde palivem je zemní plyn. Testovaným prvkem je deska ze sádkartonu, která je umístěna po výšce pece. Rozmístění DST viz Obr. 5.



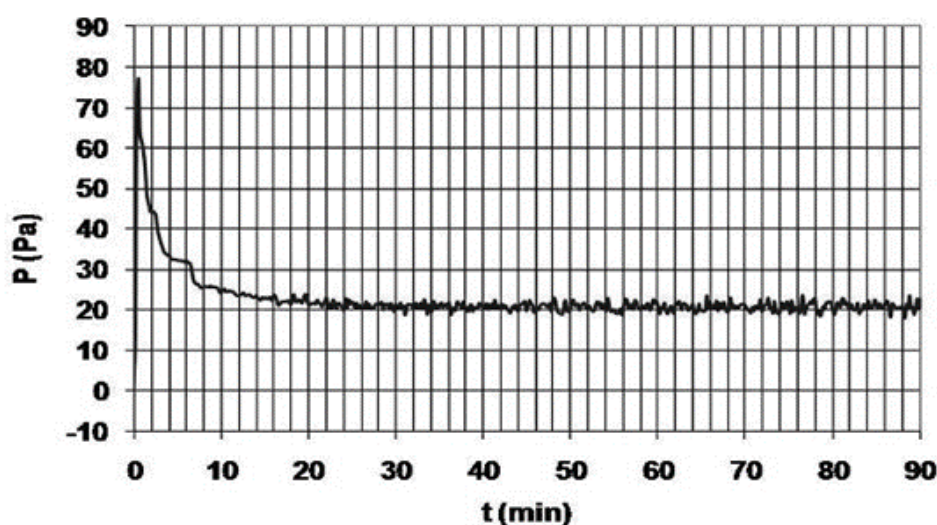
Obr. 4 Model vertikální pece v laboratoři Efectis ve Francii. [24]

Numerický model byl vytvořen pomocí programu FDS 5. Každý plynový hořák je modelován jako blok, ze kterého je při vytápění pece vstřikovávána směs zemního plynu a vzduchu, jejíž složení, je vyhodnoceno na základě experimentálních měření při kalibrační zkoušce pece v laboratoři. Vývoj teploty v peci je řízen 6-ti namodelovanými deskovými snímači teploty, které jsou navrženy v souladu s EN 1363 – 1. Deskové snímače teploty (DST) jsou umístěny 10 cm od povrchu zkoušeného prvku a jsou orientovány směrem do pece [24].

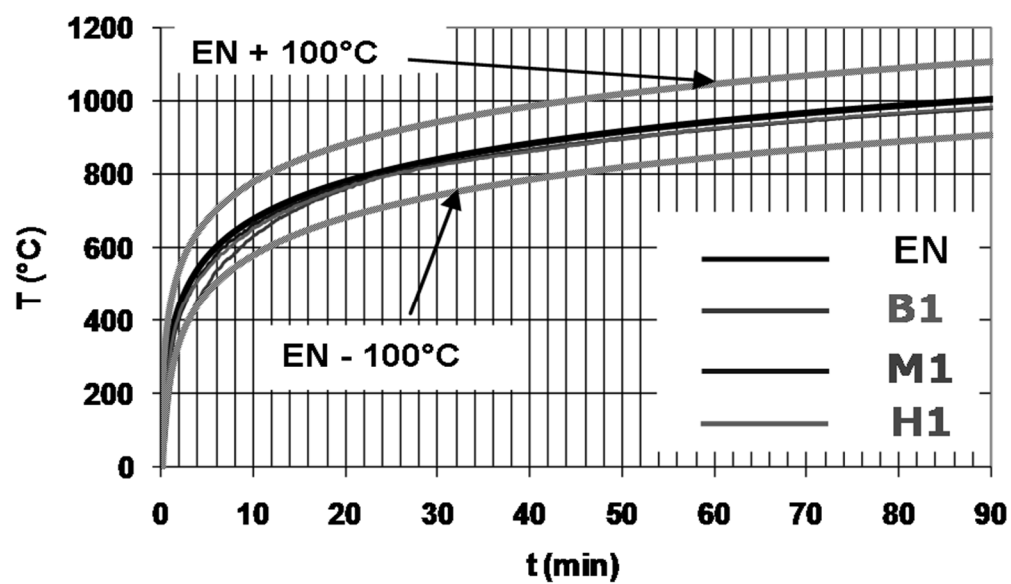


Obr. 5 Pozice deskových snímačů teploty. [24]

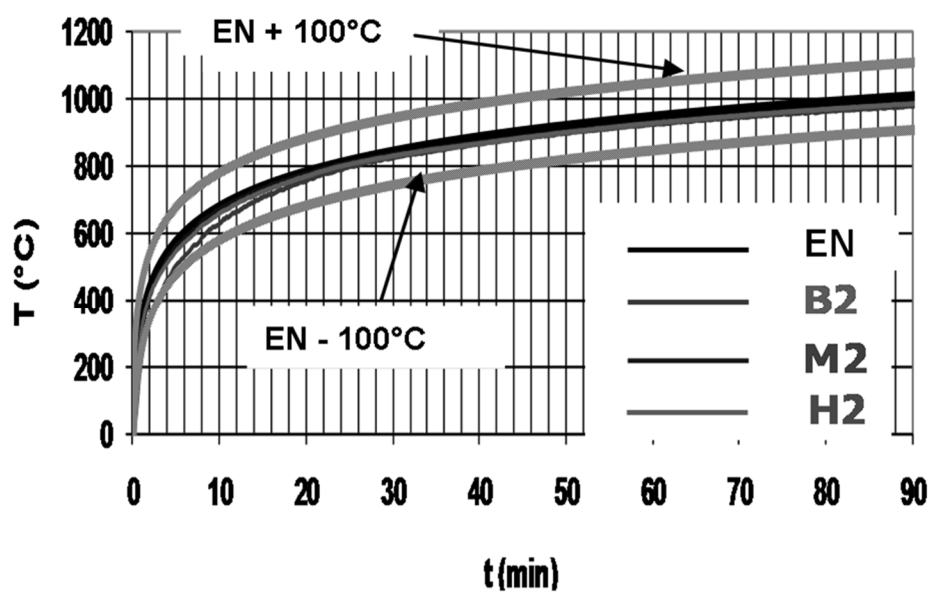
Z výsledků simulace lze například zjistit tlak v peci v průběhu zkušební doby, který se udržoval kolem 20 Pa, což splňuje předpisy normy (Graf 5). Na grafu 6 a 7 jsou zobrazeny teplotní křivky vypočtené na DST, normová teplotní křivka a její přijatelné tolerance. Zde je vidět, že simulace virtuální pece, dokáže následovat normovou teplotní křivku po 10 minutách simulace. Do 10 minut po zahájení simulace je viditelné, že teploty bodů M1 a M2 nejsou v linii s normovou teplotní křivkou dle EN 1363 – 1 a to z toho důvodu, že stěny pece jsou stále chladnější než plyn uvnitř pece.



Graf 5 Tlak v horní části pece v závislosti na čase. [24]



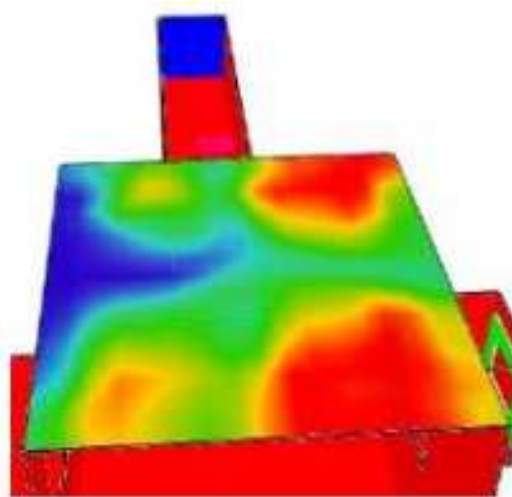
Graf 6 Normová teplotní křivka, povolené odchylky a teploty naměřené DST. [24]



Graf 7 Normová teplotní křivka, povolené odchylky a teploty naměřené DST. [24]

- Sendvičové panely

Zkouška proběhla v horizontální peci o rozměrech 1,7 m x 1,5 m x 1,3 m, která je vyhřívána dvěma plynovými hořáky. Při této zkoušce byla zjišťována pyrolýza zkoušeného prvku a zajištění regulace i přes degradaci materiálu (Obr. 6 a 7).



Obr. 6 Teplotní pole v místě zkoušeného prvku. [25]



Obr. 7 Pohled do pece a model horizontální pece v laboratoři Efectis ve Francii. [25]

3 Experimentální zkoušky

V rámci diplomové práce byly naplánovány dvě experimentální zkoušky a to v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Zkušebna disponuje novou vodorovnou zkušební pecí o rozměrech 3 m x 4 m a výšce 2,2 m (Obr. 8), kterou lze navýšit dle požadavků zákazníka. Zkoušky byly naplánovány na léto a podzim loňského roku. Před prvním experimentem proběhla návštěva zkušebny, kde se uskutečnilo přeměření rozměrů pece, podrobné zjištění materiálů vyzdívky pece, stěn, stropu, informace jak je pec vytápěna (Obr. 9) a jak zde funguje odvětrání. Tyto informace byly poté podkladem pro vytvoření prvního modelu virtuální pece.



Obr. 8 Vodorovná požární pec ve zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí.



Obr. 9 Pohled na hořáky v peci.

3.1 Experiment – prázdná pec

První experiment se konal 29. 7. 2016, kdy se jednalo o zkušební zahřátí prázdné pece a to ve dvou variantách. Před zahájením proběhla kontrola rozmístění plášťových termočlánků (TC) a deskových snímačů teploty (DST či z angl. Plate Thermometer - PT) (Obr. 10) a přeměření vzdáleností dle plánu, který byl předem navržen. V tento den byly naplánovány dvě zkoušky v peci. Napoprvé byla pec zahřívána dle normové teplotní křivky a po částečném zchladnutí pece následovala druhá zkouška, kde byl nastaven konstantní výkon hořáků. Zkouška s konstantním výkonem hořáků byla provedena z důvodu správného nastavení funkce hořáků v modelu a stanovení hodnoty maximálního výkonu hořáků v kW. Zkušební čas pro obě zkoušky byl 30 minut.

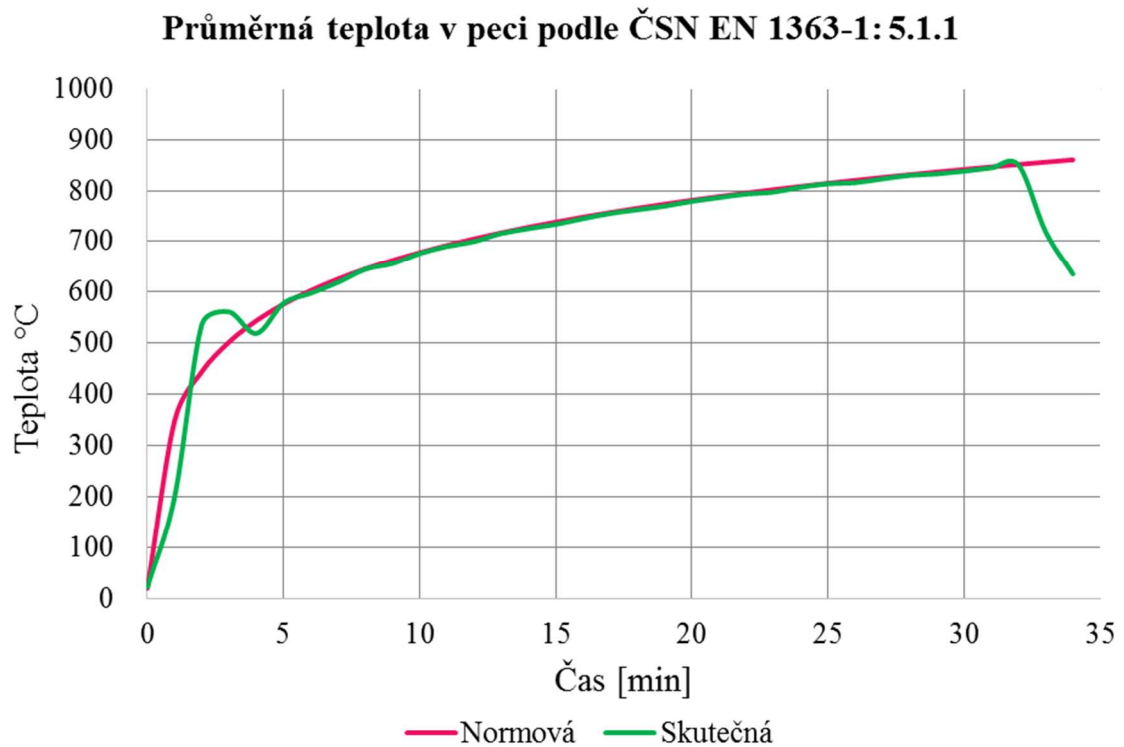


Obr. 10 Rozmístění plášťových termočlánků a deskových snímačů teploty v prázdné peci



Obr. 11 Detail deskového snímače teploty a plášťového termočlánku

Z obou experimentů byla vyhodnocena naměřená data. Ta obsahovala výkony hořáků, teploty TC a PT v časové závislosti. Některá data jsou uvedena na grafech 8 – 11. Záznamy byly využity pro tvorbu numerického modelu a následně jeho validaci. Na Graf 8 je průměrná teplota v peci, kterou udávají DST umístěné 10 cm pod stropem pece tak, aby následovala normovou teplotní křivku.

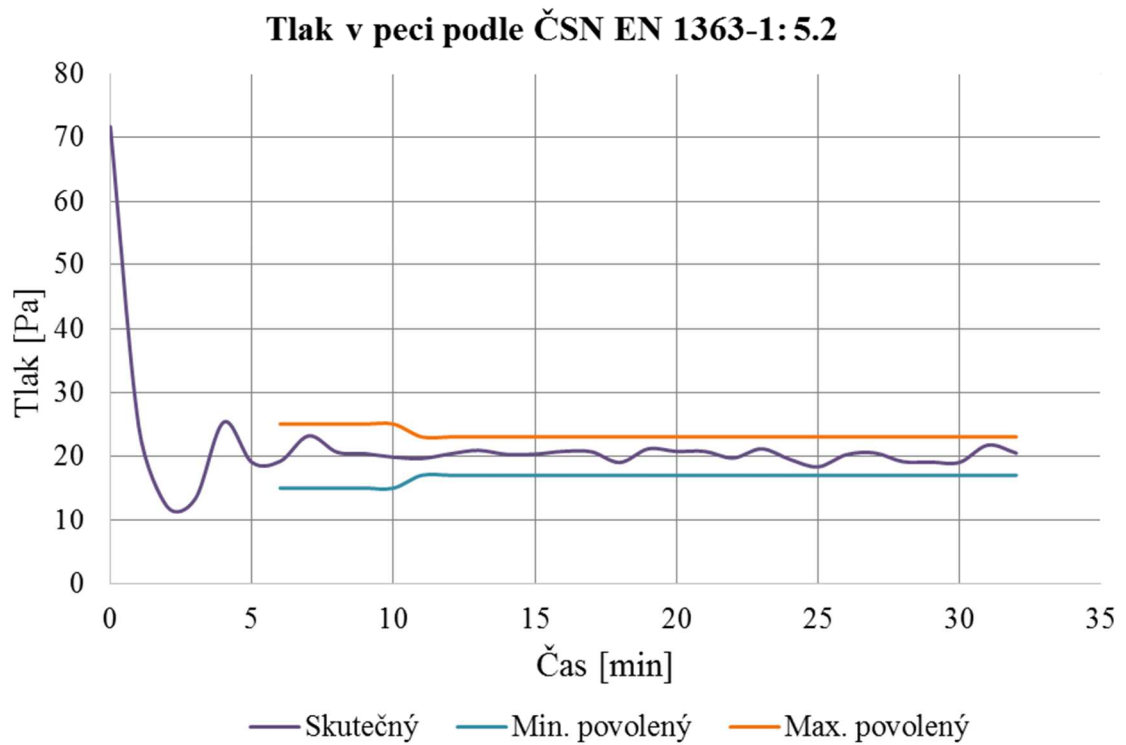


Graf 8 Průměrná teplota v peci.

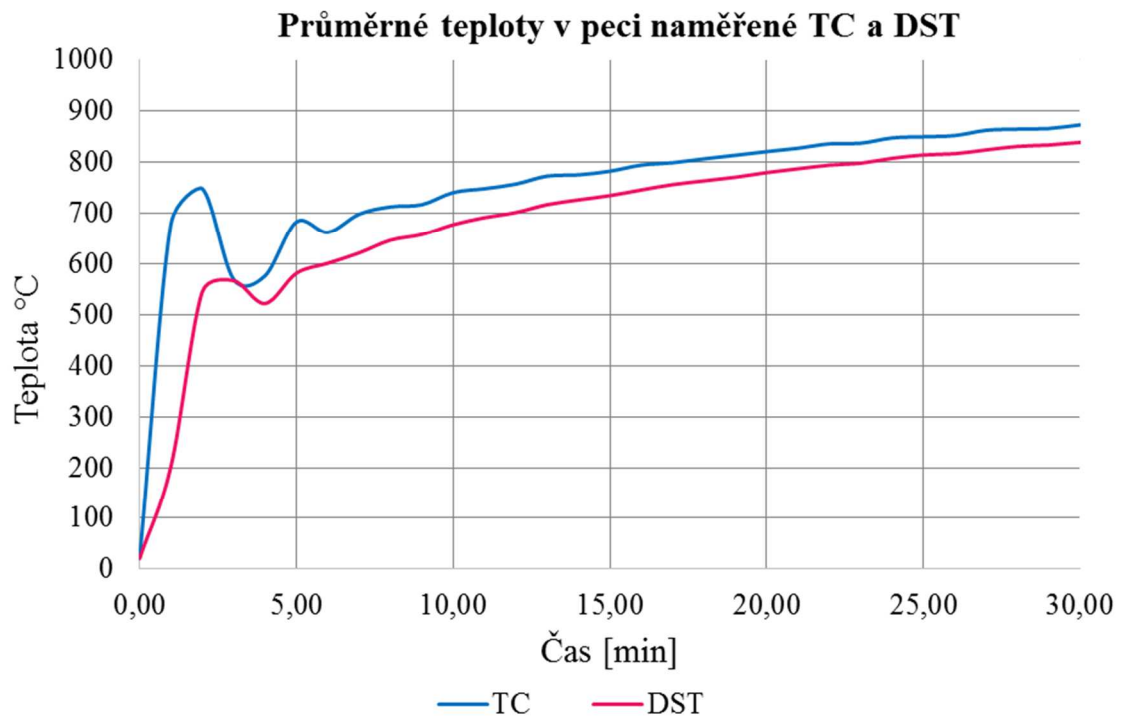
Tlak v peci je zaznamenán na Graf 9, kde je vidět jeho průběh po dobu experimentu a dále povolené odchylky dle normy. Průměrné hodnoty teplot v peci během experimentu jsou zobrazeny na Graf 10. Z druhého zahřátí prázdné pece je pak na Graf 11 zaznamenán konstantní výkon hořáků.

Tabulka 1 Teploty pod stropem naměřené z experimentu v prázdné peci.

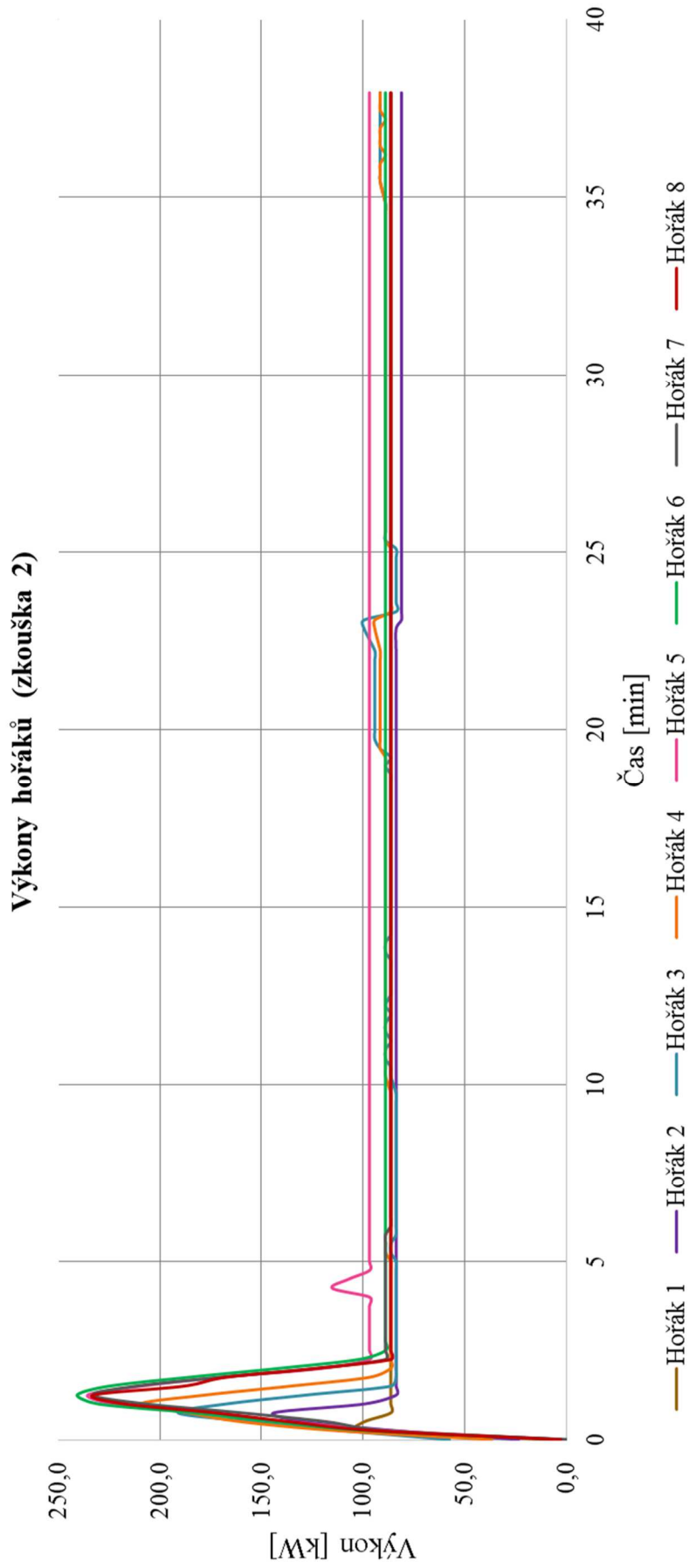
Průměrné teploty z TC a DST pod stropem experiment - prázdná pec [°C]				
Čas [min]	TC 100 mm	TC 750 mm	TC 1250 mm	DST 100 mm
0,0	21,4	21,4	21,3	21,5
5,0	661,4	697,7	742,1	578,1
10,0	723,8	751,7	783,7	676,5
15,0	773,0	787,9	813,4	734,1
20,0	814,4	823,1	850,7	779,1
25,0	843,5	852,3	875,6	813,5
30,0	866,5	875,3	899,2	838,2



Graf 9 Rozložení tlaku v peci během experimentu.



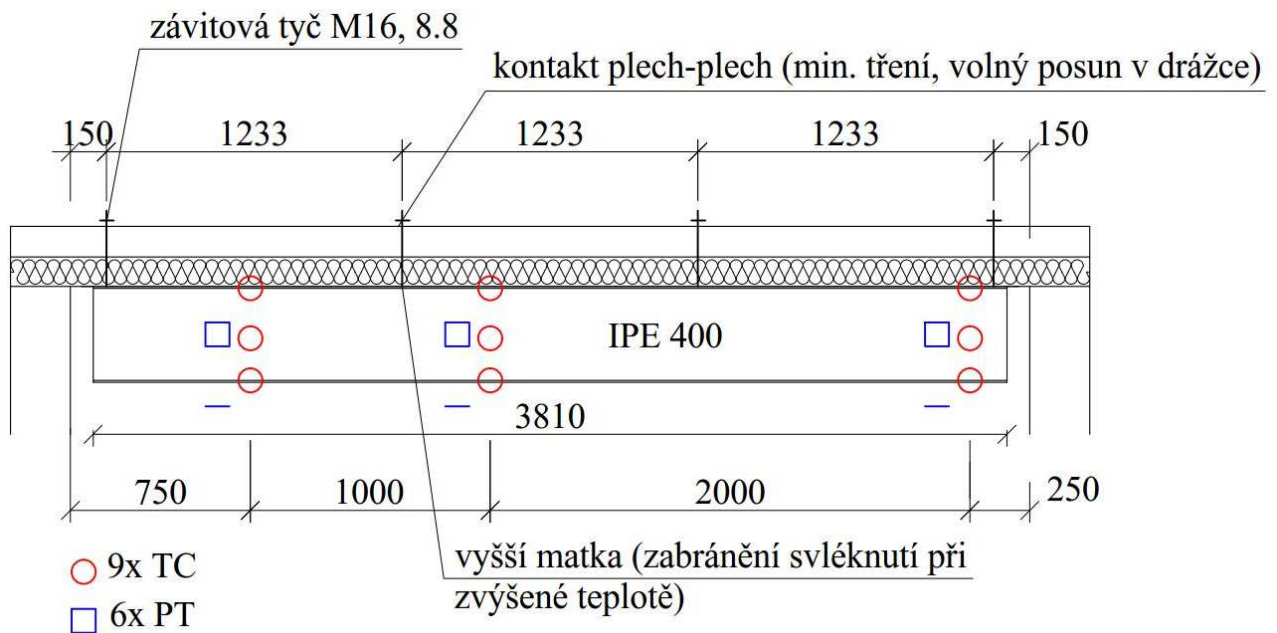
Graf 10 Průměrné teploty v peci naměřené TC a DST.



Graf 11 Zahřátí pece konstantním výkonem hořáků

3.2 Experiment– ocelový nosník

Druhou zkouškou, která se konala dne 2. 11. 2016, byla zkouška pece s válcovaným ocelovým nosníkem IPE 400. Nosník byl zavěšen na čtyřech závitových tyčích pod konstrukcí stropu pece (Obr 12 a 14). Před zahájením opět proběhla kontrola rozmístění TC a PT , přeměření vzdáleností a uložení nosníku v peci. Rozmístění TC a PT na nosníku je možné vidět na Obr. 12 a 15. Pec byla zahřívána dle normové teplotní křivky a zkušební doba byla nastavena na 30 minut. Následně byla prodloužena na 62 minut, a to z důvodu pozorování chování nosníku za zvýšené teploty (Obr. 17).



Obr. 12 Zavěšení nosníku pomocí závitových tyčí a osazení TC a DST.

TC byly napojeny na nosník tak, že na něj byl vytvořen návarek (Obr. 16), do kterého byla umístěna poté špička termočlánu. Takto by TC měl snímat teplotu ocelového nosníku během experimentu. DST byly umístěny kolem nosníku a nasměrovány do prostoru pece, kde měří teploty dopadající na ocelový nosník (Obr. 13).



Obr. 13 Detail DST a napojení TC na ocelový nosník.



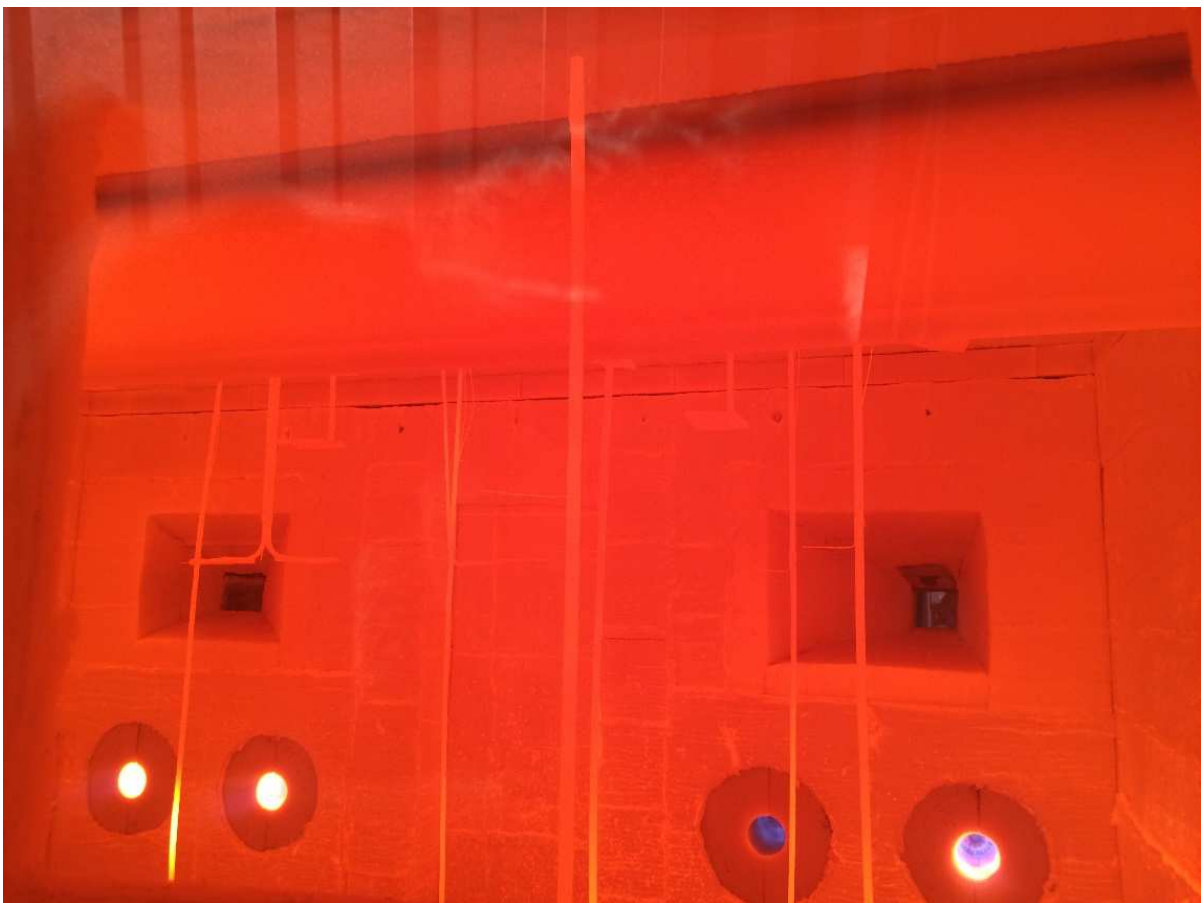
Obr. 14 Zavěšení nosníku pomocí závitových tyčí.



Obr. 15 Osazení TC a PT na nosník a kolem nosníku

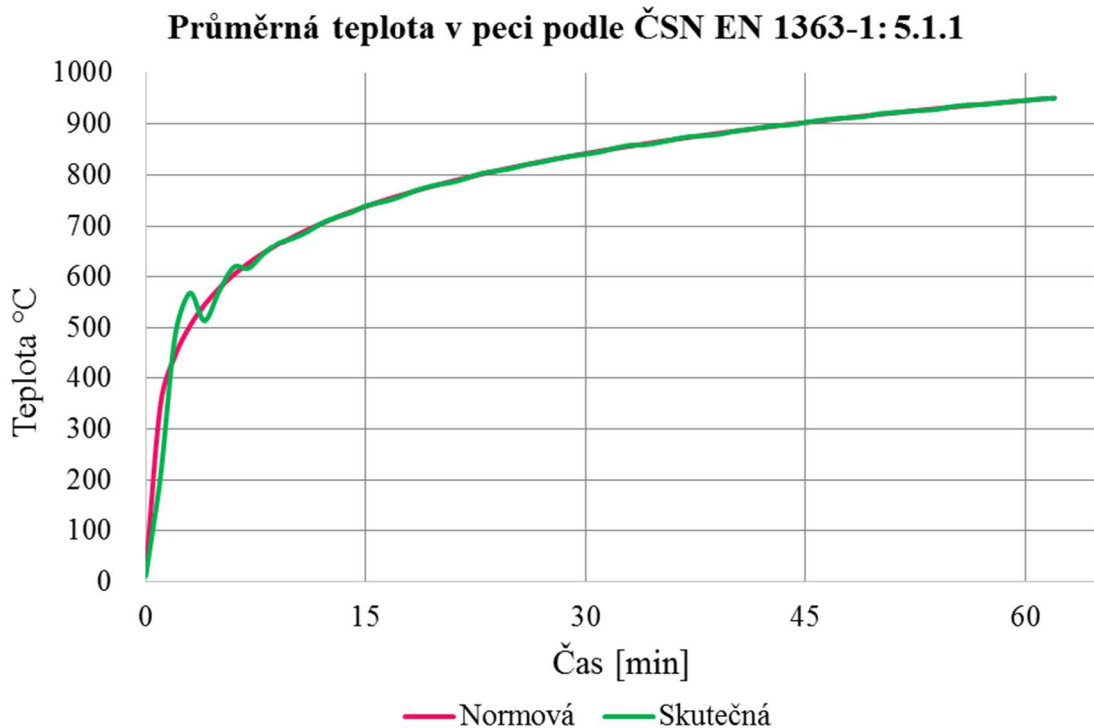


Obr. 16 Detail napojení TC na nosník.



Obr. 17 Pohled do pece v průběhu experimentu.

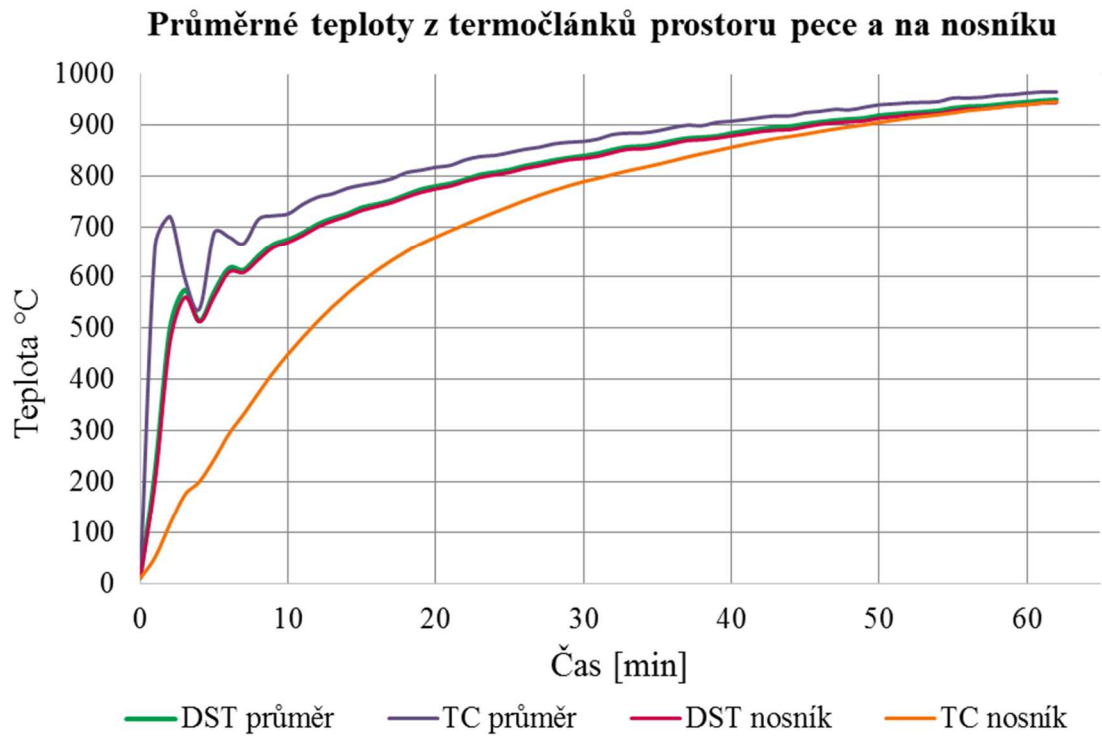
Z tohoto experimentu byla opět vyhodnocena naměřená data. Ta obsahovala výkony hořáků, záznam tlaku v průběhu experimentu, teploty TC a PT v časové závislosti. Data byla použita k validace numerického modelu. Na grafu 12 je průměrná teplota v peci, kterou udávají DST umístěné 10 cm pod stropem, které jsou nastaveny tak aby následovali normovou teplotní křivku. Na grafu 14 je vidět průběh tlaku po dobu experimentu jeho povolené odchylky dle normy. Průměrné hodnoty teplot v prostoru pece a ocelového nosníku během experimentu jsou zobrazeny na Graf 13.



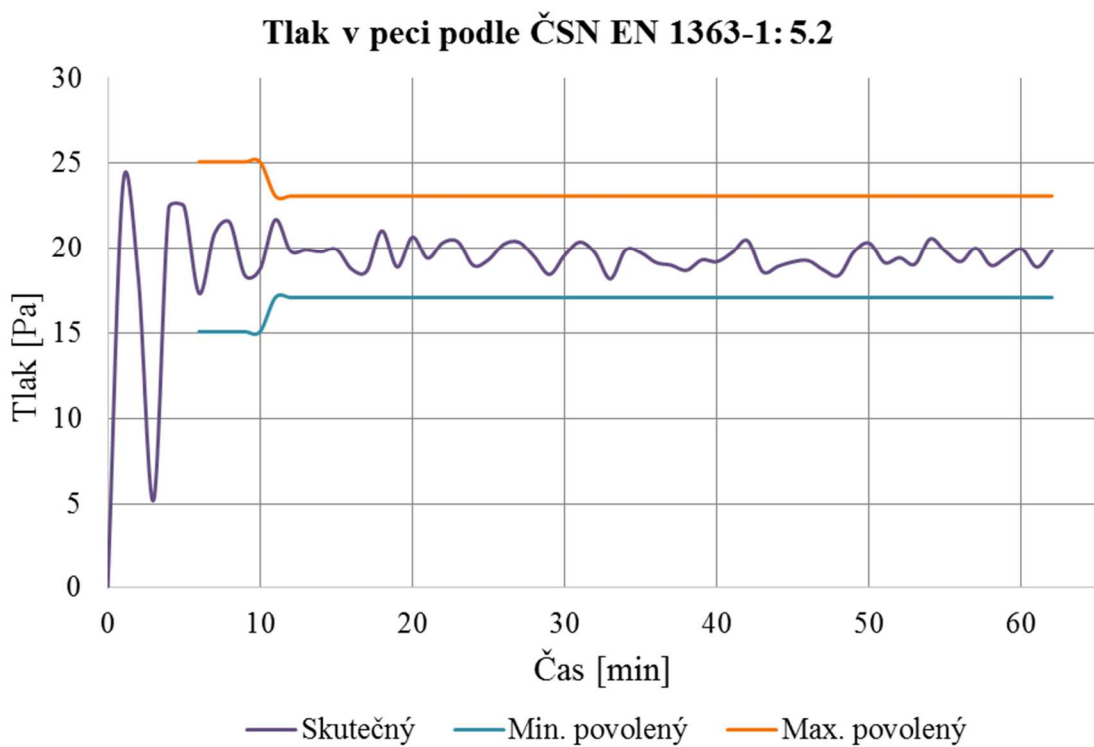
Graf 12 Průměrná teplota v peci - experiment s nosníkem

Tabulka 2 Teploty naměřené pod stropem v daných výškách z experimentu s ocelovým

Průměrné teploty z TC a DST pod stropem experiment - ocelový nosník [°C]				
Čas [min]	TC 100 mm	TC 750 mm	TC 1250 mm	DST 100 mm
0,0	12,5	12,4	12,1	11,4
5,0	668,0	709,4	697,0	570,7
10,0	708,7	742,5	734,4	675,7
15,0	769,2	796,5	784,7	739,6
20,0	805,2	828,4	824,3	781,3
25,0	835,9	854,9	853,9	812,9
30,0	858,2	876,8	873,4	840,3



Graf 13 Průměrné teploty v peci a ocelového nosníku – experiment s ocelovým nosníkem

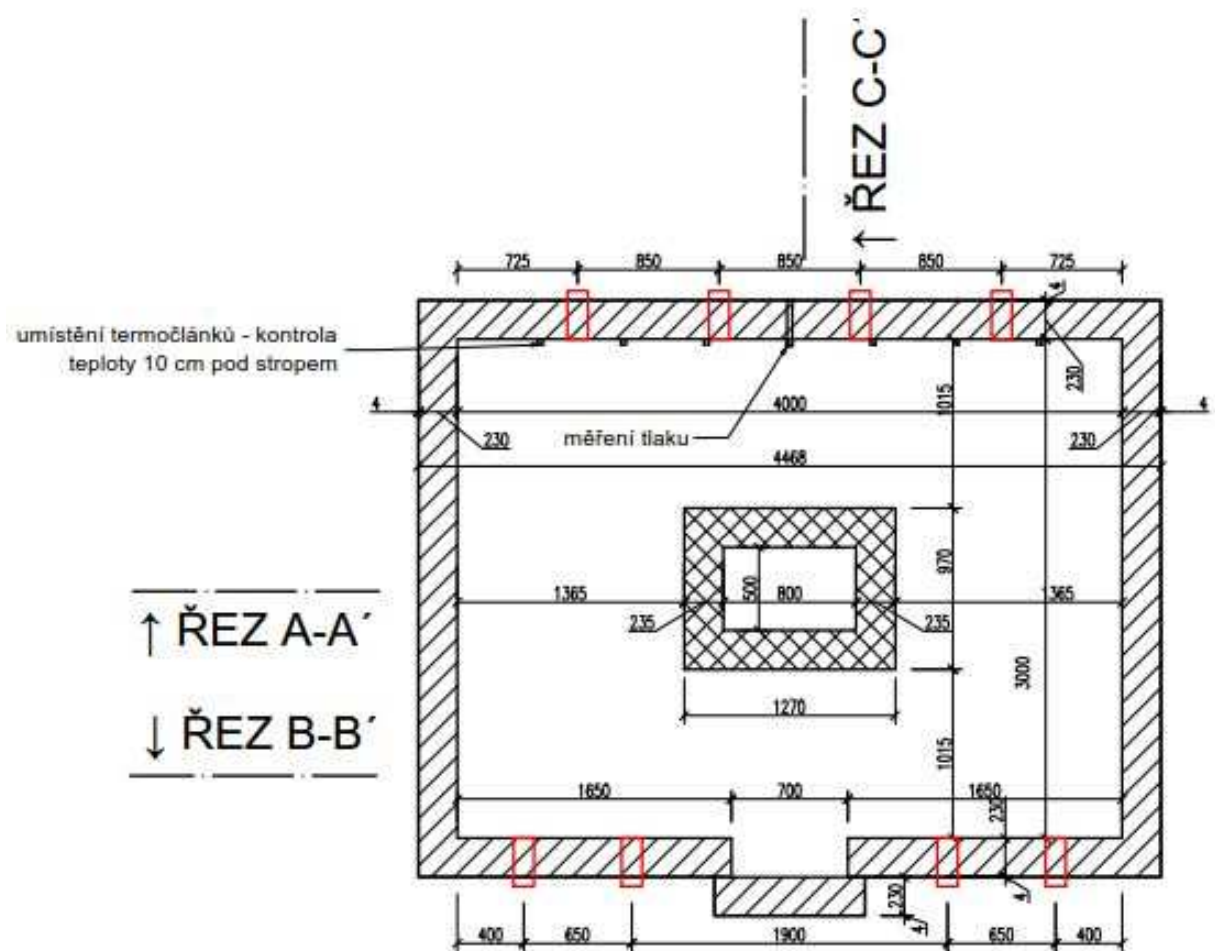


Graf 14 Tlak v peci během zkoušky - experiment s ocelovým nosníkem

4 Numerické modely v FDS

4.1 Hlavní charakteristiky modelů pece

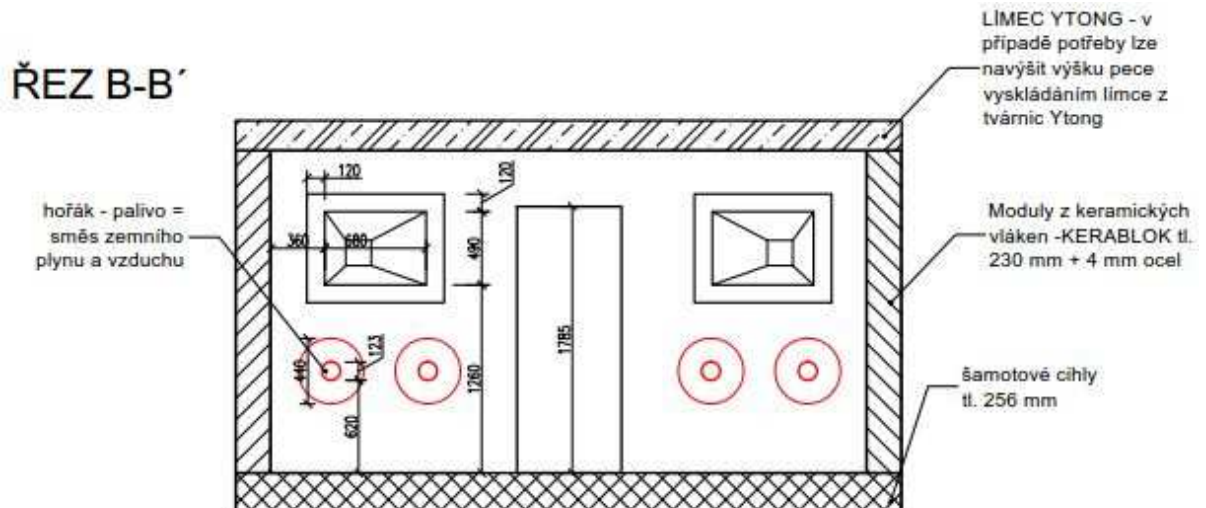
Modelování skutečné situace vyžaduje simulaci dynamiky plynů v peci a také její interakci s testovaným stavebním prvkem. Model je řešen pro horizontální pec o rozměrech 3,0 m x 4,0 m (Obr. 18), výška pece je variabilní pro různé typy zkoušek. Strop je řešen dle toho, jaká požární zkouška se bude v peci provádět. Pro déle trvající zkoušky je strop tvořen železobetonovými panely a pro kratší doby zkoušení je strop tvořen keramickým vložkovým stropem. Rozměry modelu odpovídají plynové peci v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Schéma této pece je uvedeno na Obr. 18-20.



Obr. 18 Rozměry pece – půdorys



Obr. 19 Řez pecí A-A'



Obr. 20 Řez pecí B-B'

Palivem v peci je směs zemního plynu a vzduchu. Pec je vytápěna osmi plynovými hořáky, vždy čtyři na delší straně pece. V prostoru pece se nachází čidlo na měření tlaku (viz obrázky výše). Dále jsou zde umístěny deskové snímače teploty, které kontrolují teplotu 10 cm pod stropem. Stěny pece jsou z modulových bloků z keramických vláken tl. 230 mm (Příloha 3) z vnější strany opláštěné ocelovým plechem tl. 4 mm. Dno pece je vyskládáno z šamotových cihel tl. 256 mm. V podlaze pece je jeden odťah, kterým jsou zplodiny hoření odsávány ventilátorem, který je řízený frekvenčním měničem, čímž se řídí přetlak v peci vůči okolí. V delších stěnách se ještě nachází průhledová okénka a dveře do pece.

4.1.1 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti v modelu byly nastaveny podle hodnot z technických listů od výrobců. Jedná se zejména o vlastnosti, jako je:

- Hustota materiálu ρ [kg/m^3]
- Měrná tepelná kapacita c [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
- Tepelná vodivost materiálu λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]

Pro použité materiály je to:

ŠAMOTOVÉ CIHLY

- $\rho = 1300 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $c = 1,0 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
- $\lambda = 0,34 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$

MODULOVÉ BLOKY Z KERAMICKÝCH ŽÁRUVZDORNÝCH VLÁKEN

- $\rho = 160\text{-}240 \text{ (}200\text{)} \text{ kg}/\text{m}^3$
- $c = 1,13 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
- $\lambda = 0,13 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$

BETON

- $\rho = 2500 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $c = 1,02 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
- $\lambda = 1,74 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$

OCEL

- $\rho = 7850 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $c = 0,46 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
- $\lambda = 45,8 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$

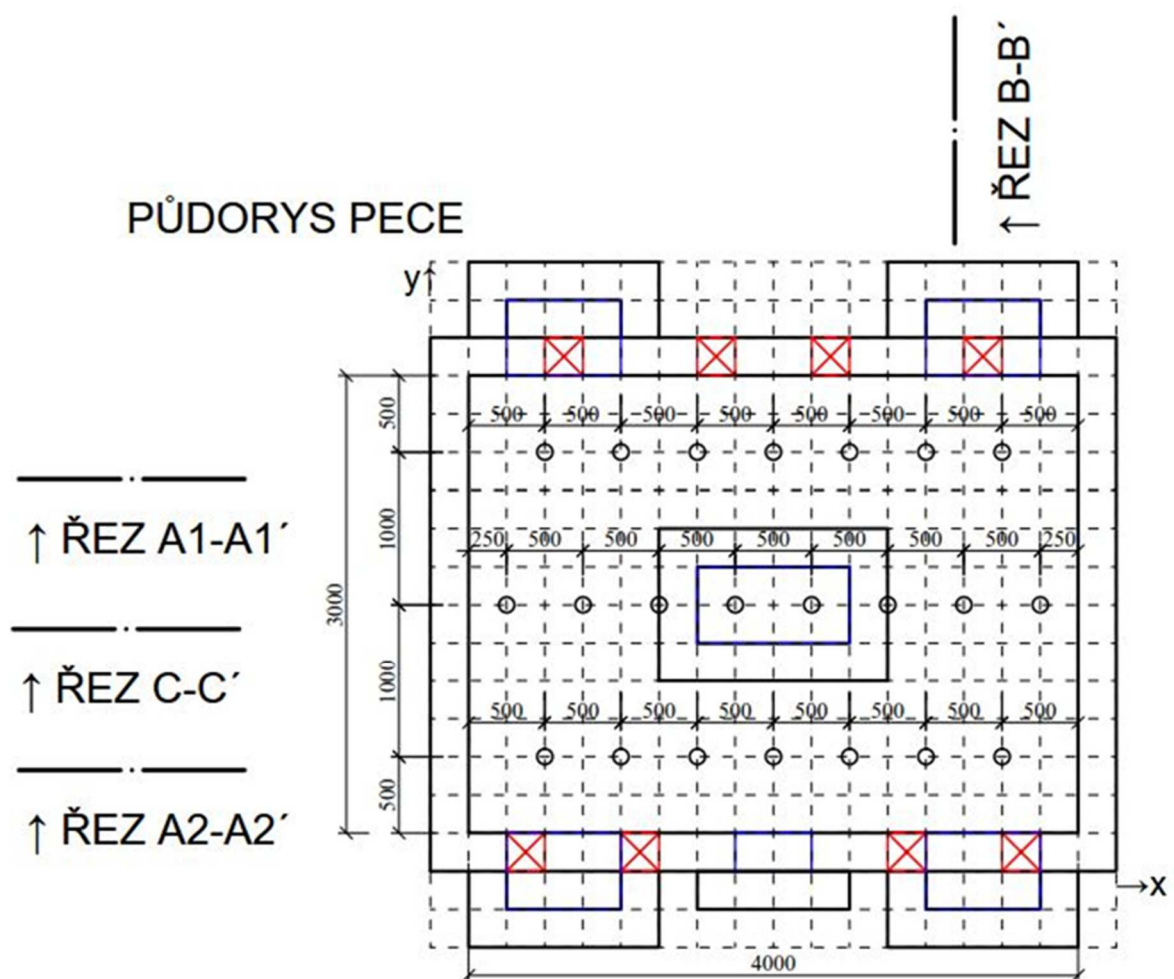
V dalším bodě projektu, pod kterým je tato diplomová práce zpracována, jsou v plánu také laboratorní zkoušky materiálových vlastností vyzdívek a modulových bloků, tím dojde k zpřesnění materiálových vlastností, které jsou prozatím převzaty pouze z technických listů výrobců.

4.1.2 Software

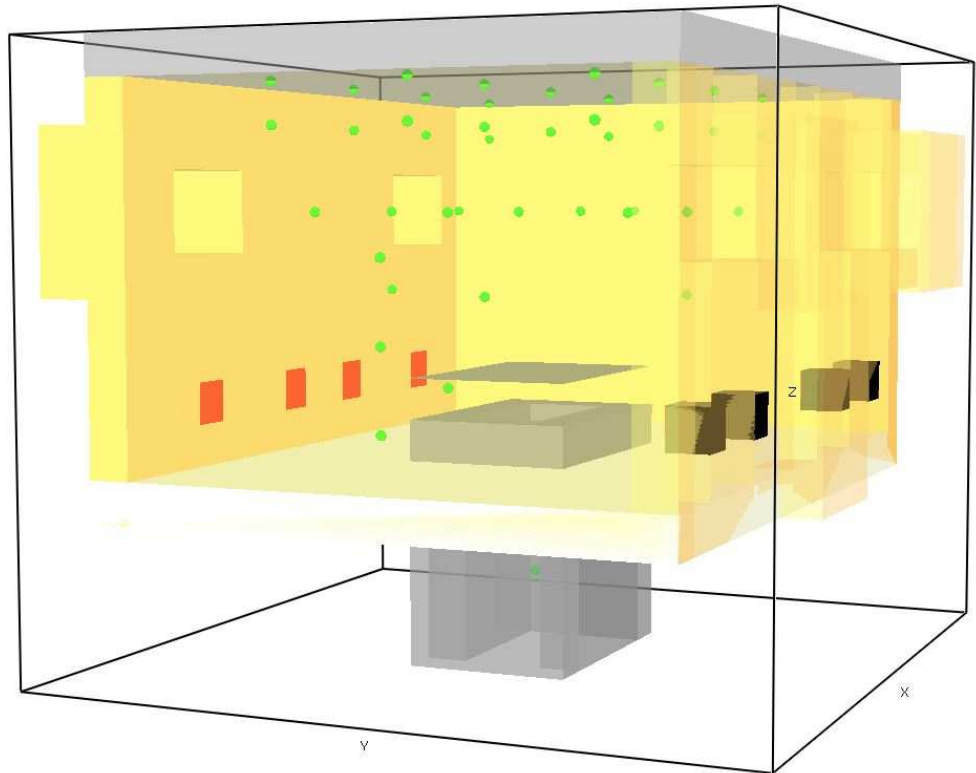
Modely pece byly vytvořeny pomocí zápisu vstupních dat do zdrojového kódu (viz Příloha 1 a Příloha 2), výpočet byl proveden v softwaru FDS 6.4.0. [20] a pro vizualizaci modelu pece byl použit program SMV 6.3.6. [21].

4.2 Numerický model – prázdná pec

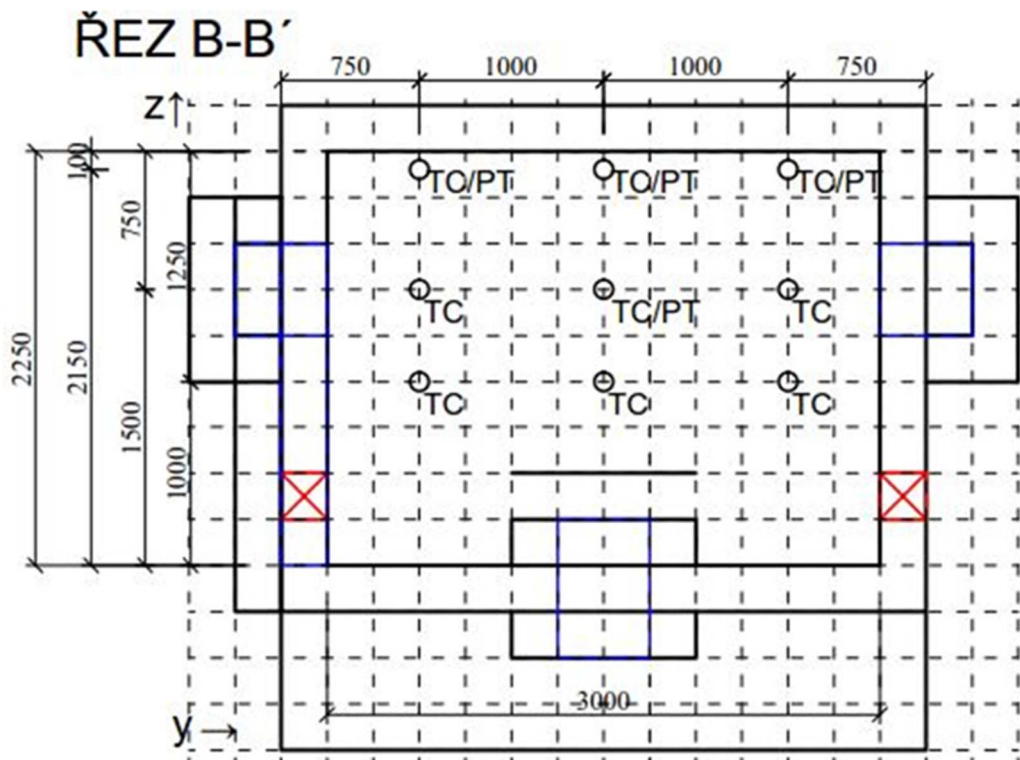
První simulací je model prázdné pece. Výpočetní síť pro tento případ je nastavena na 250 mm x 250 mm a rozměry pece byly proto pro tuto výpočetní síť přizpůsobeny (Obr. 21 a 23). Na obr. 22 je vidět vizualizace modelu pece v softwaru Smokeview.



Obr. 21 Půdorys virtuální pece se znázorněním sítě 250 mm x 250 mm.



Obr. 22 Numerický model prázdnej pece v programu SMV.



Obr. 23 Řez B-B' a znázornění sítě 250mm x 250mm.

4.2.1 Vytápění pece

Hořáky v peci jsou namodelovány jako plochy pomocí příkazu VENT o rozměrech 0,25 m x 0,25 m. Teplota v peci by měla následovat normovou teplotní křivku. To bylo vyřešeno tak, že z experimentálních dat, které byly poskytnuty po 1. experimentu ve zkušebně PAVUS a.s. (viz Tabulka 3), byly z hodnot výkonů hořáků nastaveny hodnoty pro hoření v modelu.

Tabulka 3 Výkony hořáků dle experimentu ve zkušebně PAVUS a.s.

Čas			Výkon dvojice: pilotní hořák a hořák č. j =							
PLC	t	Δt	1	2	3	4	5	6	7	8
(h:m:s)	(min)	(min)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
09:58:42	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0
09:58:57	0,25	0,25	105	92	105	110	92	97	94	100
09:59:12	0,50	0,25	139	113	137	139	121	131	100	118
09:59:27	0,75	0,25	187	155	181	179	168	176	150	166
09:59:42	1,00	0,25	224	195	218	213	208	216	189	203
09:59:57	1,25	0,25	263	237	266	258	255	258	237	250
10:00:12	1,50	0,25	258	255	263	250	258	261	258	258

Zdroj hoření je tak definován rychlostí uvolňování tepla HRR. Pro tento případ je maximální výkon všech hořáků přepočítán na výkon požáru vztaženého na m² plochy zdroje (HRRPUA), v našem případě plochy hořáku (S).

$$\text{HRRPUA} = \frac{\text{HRR}}{S} \left[\text{kW} / \text{m}^2 \right]$$

Maximální výkon ze všech hořáků dle dat z experimentu HRR= 257,7 kW a plocha hořáku S = 0,25 x 0,25 = 0,0625 m²

$$\text{HRRPUA} = \frac{257,7}{0,0625} = 4122,4 \left[\text{kW} / \text{m}^2 \right]$$

Zahřívání pece je poté nastaveno tímto zápisem, kde T je čas [s], ve kterém je konkrétní hodnota výkonu a F [-] je poměr nastavené a maximální hodnoty výkonu.

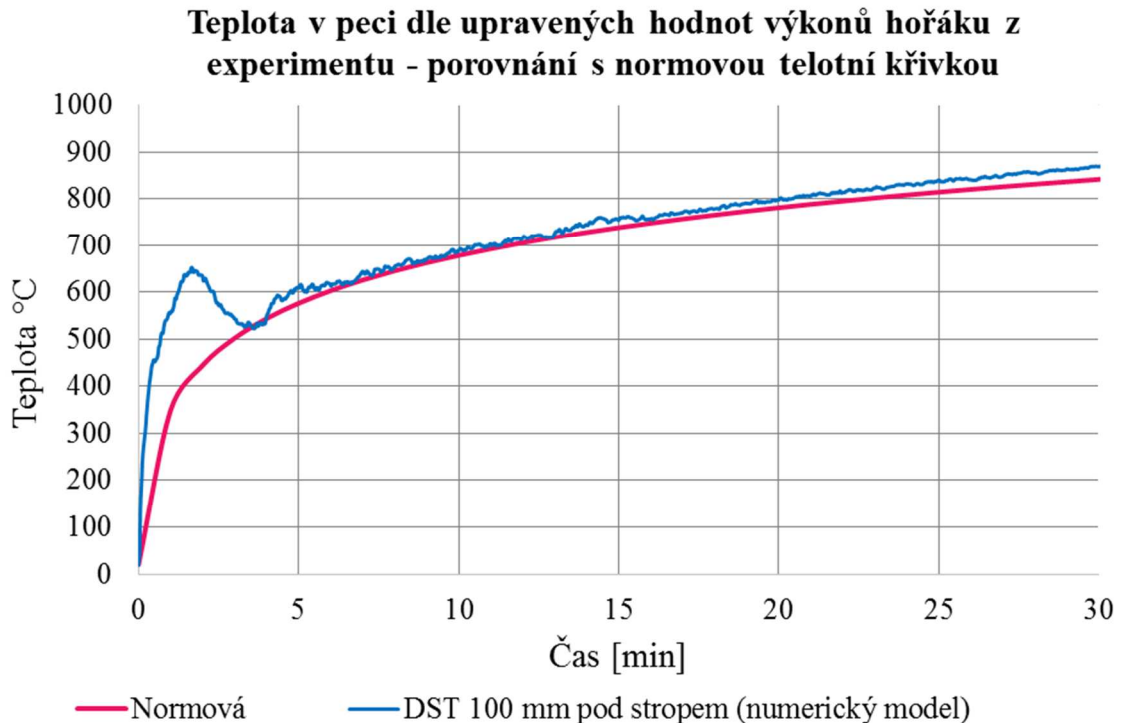
```
&SURF ID='BURNER', COLOR='RED', HRRPUA=4122, RAMP_Q='NORMOVA'....
```

```
&RAMP ID='NORMOVA', T=0.0, F=0.00/
```

```
&RAMP ID='NORMOVA', T=15.0, F=0.483/
```

```
&RAMP ID='NORMOVA', T=30.0, F=0.660/
```

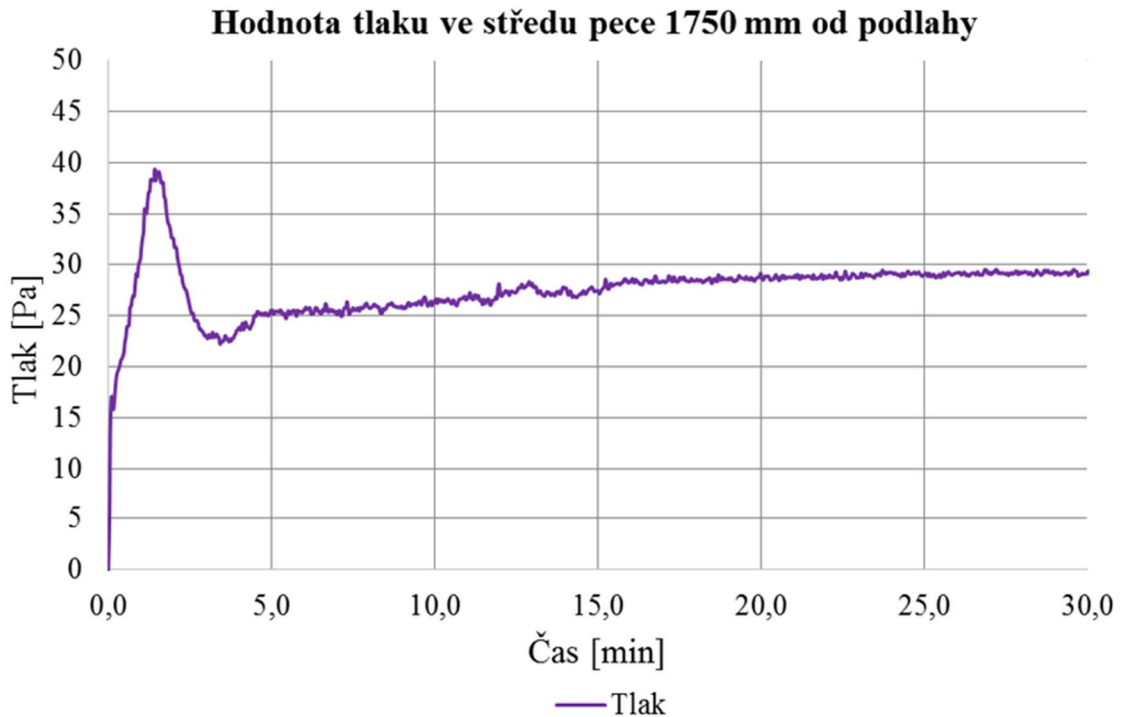
Z výstupních dat simulace byly vybrány teploty vypočítané na deskových snímačích teploty (DST), které jsou umístěny 10 cm pod stropem a jsou porovnány s normovou teplotní křivkou dle EN 1363 – 1. Porovnání výsledků z modelu a experimentu je vidět na následujícím grafu.



Graf 15 Zahřívání pece v numerickém modelu – prázdná pec.

4.2.2 Tlak v peci a ventilace

Měření tlaku v peci, je v numerickém modelu nastaveno použitím příkazu DEVC s funkcí QUANTITY='PRESSURE'. Těchto měřidel je v modelu nastaveno hned několik a to v prostoru pece a v prostoru odtahu. Ventilace pece funguje zatím na přirozeném odtahu otvorem na dně pece. Do této práce se zatím nepodařilo namodelovat ventilátor do odtahu, který by tak simuloval reálnou pec ve zkušebně ve Veselí nad Lužnicí. Hodnoty tlaku se z tohoto důvodu pohybují ve vyšších hodnotách (Graf 16), ale vytvořením ventilátoru, který bude udržovat požadovaný tlak v peci dle experimentu a normy, se tyto hodnoty jistě sníží. Toto řešení zatím není součástí této diplomové práce.



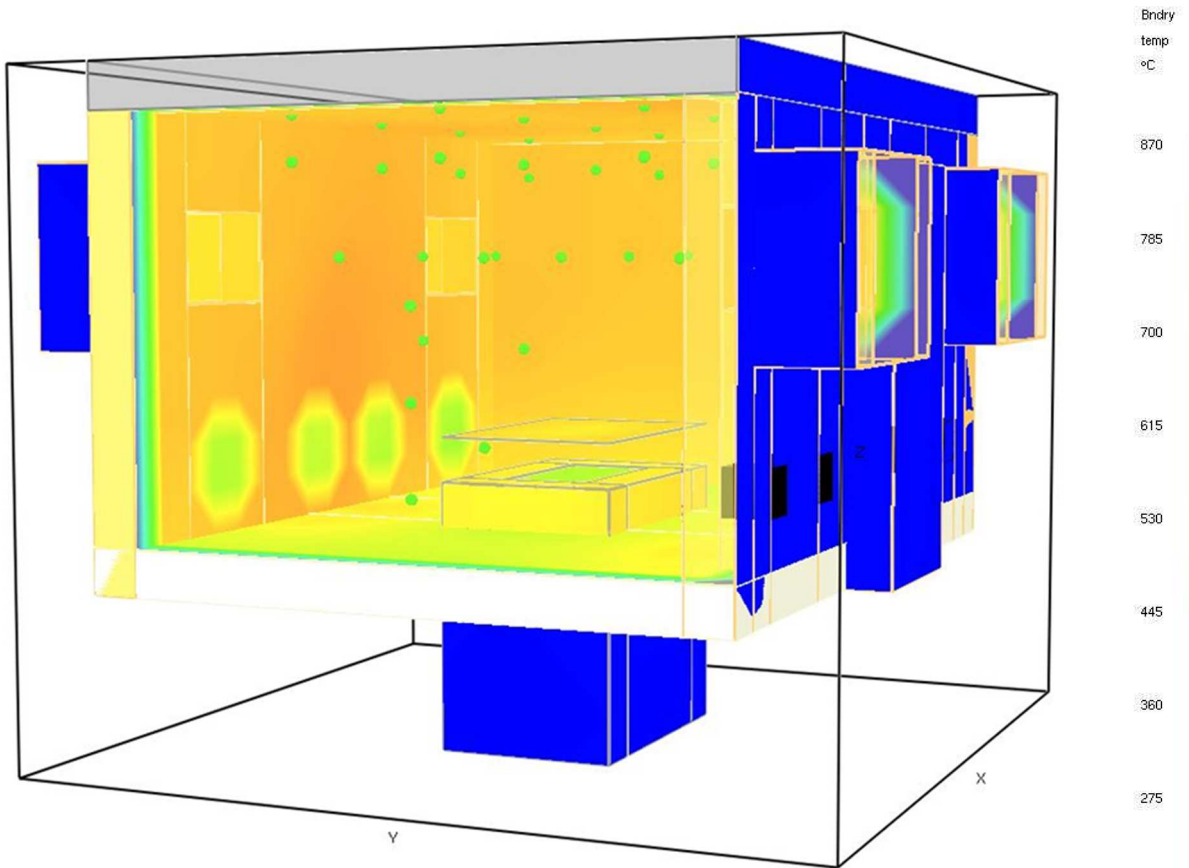
Graf 16 Průběh tlaku v peci během simulace numerického modelu prázdné pece.

4.2.3 Měření teploty v peci, nastavení a rozmístění termočlánků

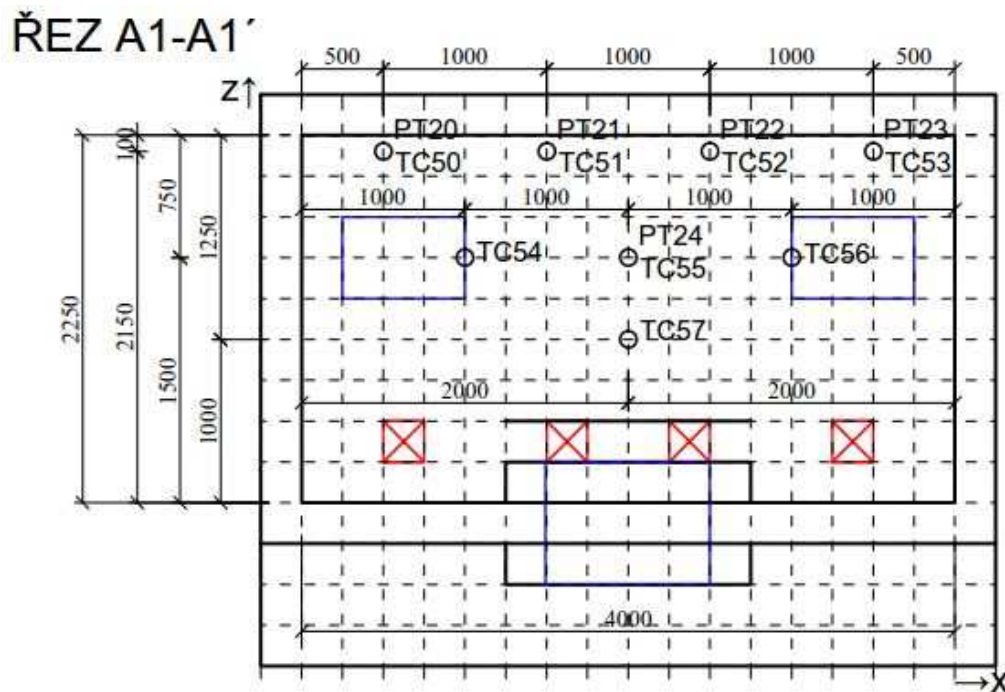
Pro měření teplot v peci je v modelu nastavena síť termočlánků a deskových snímačů teploty (Obr. 21, Obr. 23, Obr. 25 a Obr. 26). Dle tohoto nákresu byly nastaveny termočlánky (TC) a deskové snímače teploty (DST či PT) pro 1. experiment. Dodrženo poté bylo i číslování termočlánků, pro lepší kontrolu numerického modelu s experimentem. Neměřené průměrné hodnoty TC ve 3 výškových úrovních viz Graf 17 a Tabulka 4. Na obr. 24 je vidět vizualizace modelu prázdné pece se zobrazenou teplotou povrchů v 15. min.

Tabulka 4 Teploty pod stropem v numerickém modelu prázdné pece.

Průměrné teploty z TC a DST pod stropem numerický - model prázdná pec [°C]				
Čas [min]	TC 1250 mm	TC 750 mm	TC 100 mm	DST 100 mm
0,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5,0	657,2	647,8	659,6	609,3
10,0	729,1	714,9	717,9	688,7
15,0	784,0	771,8	775,6	755,0
20,0	802,2	809,0	807,0	797,6
25,0	854,2	846,3	846,1	838,2
30,0	874,8	874,7	874,8	869,1

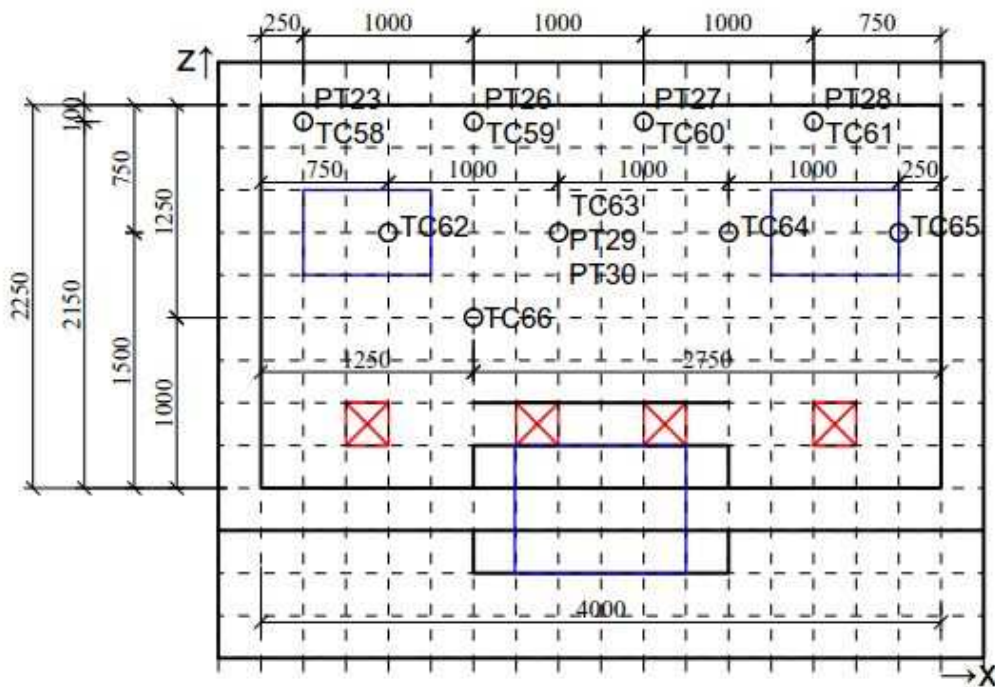


Obr. 24 Teploty povrchů pece v 15. minutě simulace

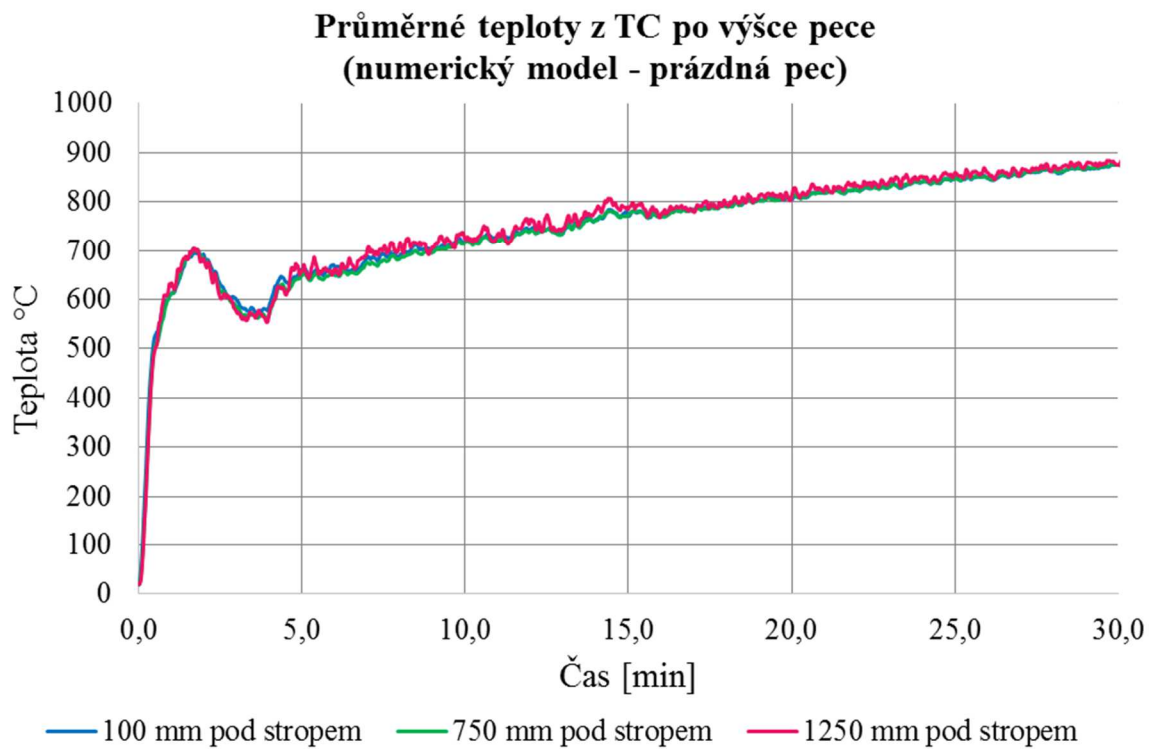


Obr. 25. Řez A1-A1' s rozmístěním TC a DST v FDS modelu

ŘEZ C-C'



Obr. 26 Řez C – C' s rozmístěním TC a DST v FDS modelu.



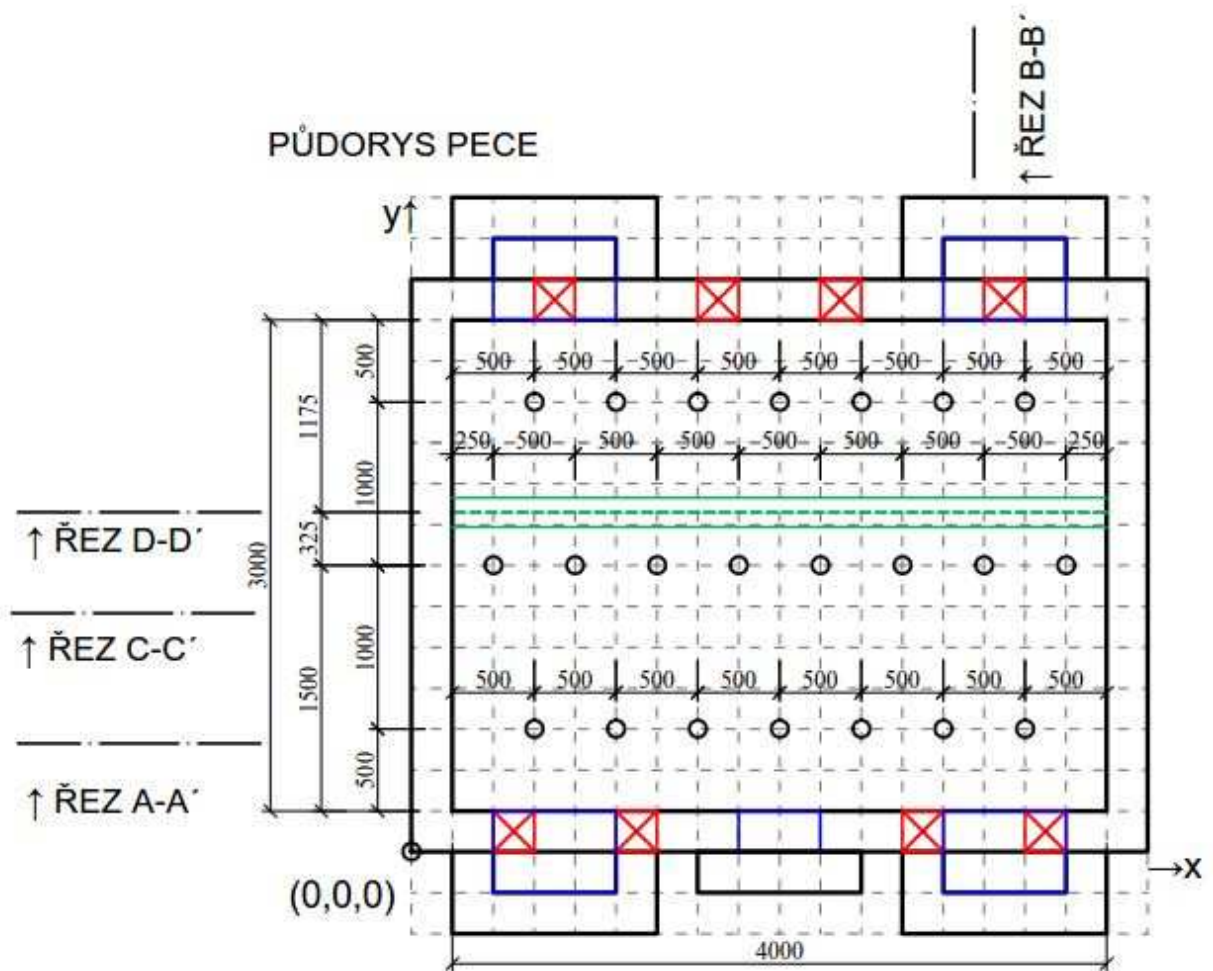
Graf 17. Teploty z termočlánků v daných výškách pod stropem.

4.3 Numerický model – ocelový nosník

Druhým modelem v této práci je numerický model pece se stropním ocelovým nosníkem, zavěšeným na 4 závitových tyčích viz kapitola 3.2. Výpočetní síť je nastavena jako v modelu prázdné pece 250 mm x 250 mm a v oblasti nosníku je zjemněna na síť 50 mm x 50 mm (Obr. 27). Na obr. 28 je vidět vizualizace modelu pece s nosníkem v softwaru Smokeview.

4.3.1 Vytápění pece

Výkony hořáků jsou nastaveny dle dat z experimentu viz Tabulka 5. Oproti prvnímu numerickému modelu prázdné pece se liší pouze v maximálním výkonu hořáku, který je pak vztažen a přepočítán na m^2 zdroje (hořáku). Na obr. 28 jsou plochy hořáků vyznačeny červenou barvou.



Obr. 27 Půdorys virtuální pece se stropním ocelovým nosníkem.

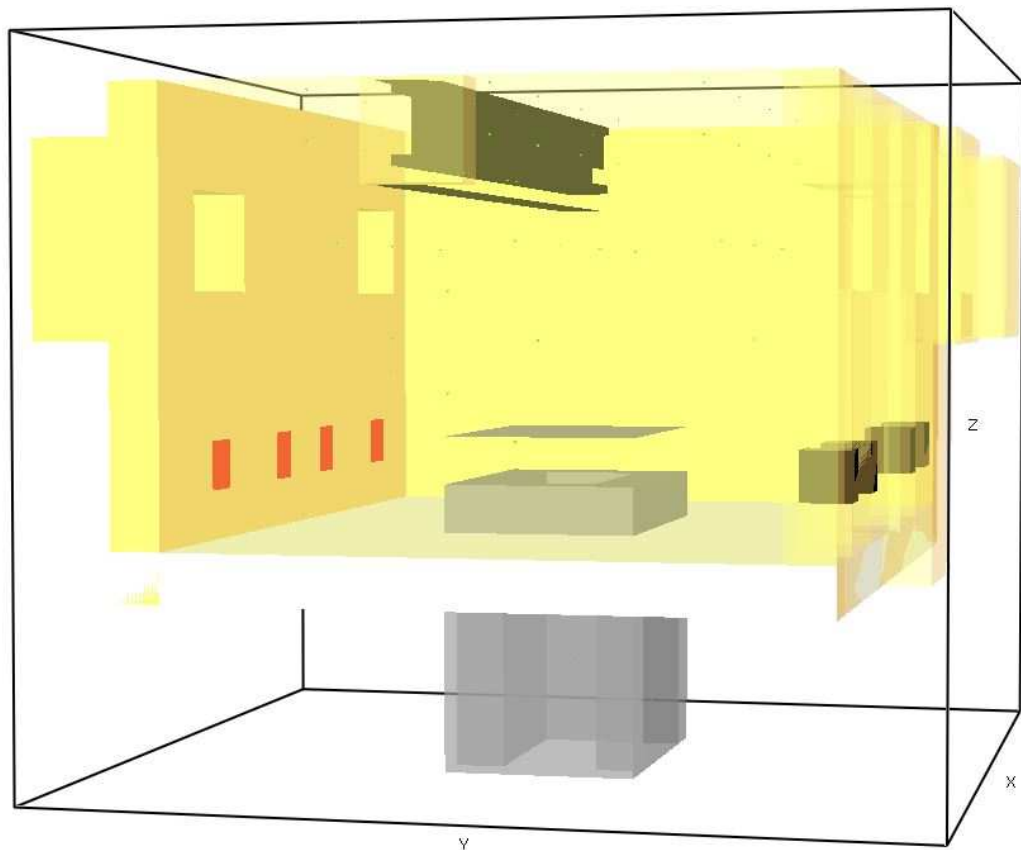
Tabulka 5 Výkony hořáků dle experimentu v peci s ocelovým nosníkem ve zkušebně PAVUS a.s.

Čas			Výkon dvojic: pilotní hořák a hořák č. $j =$							
PLC	t	Δt	1	2	3	4	5	6	7	8
(h:m:s)	(min)	(min)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
11:41:17	0,00		0	0	0	0	0	0	0	0
11:41:32	0,25	0,25	266	266	266	266	94	100	187	263
11:41:47	0,50	0,25	266	266	266	266	266	266	263	266
11:42:02	0,75	0,25	266	266	266	266	266	266	263	266
11:42:17	1,00	0,25	266	266	266	266	266	266	263	266

Maximální výkon ze všech hořáků dle dat z experimentu $HRR = 265,57 \text{ kW}$ a plocha hořáku $S = 0,25 \times 0,25 = 0,0625 \text{ m}^2$

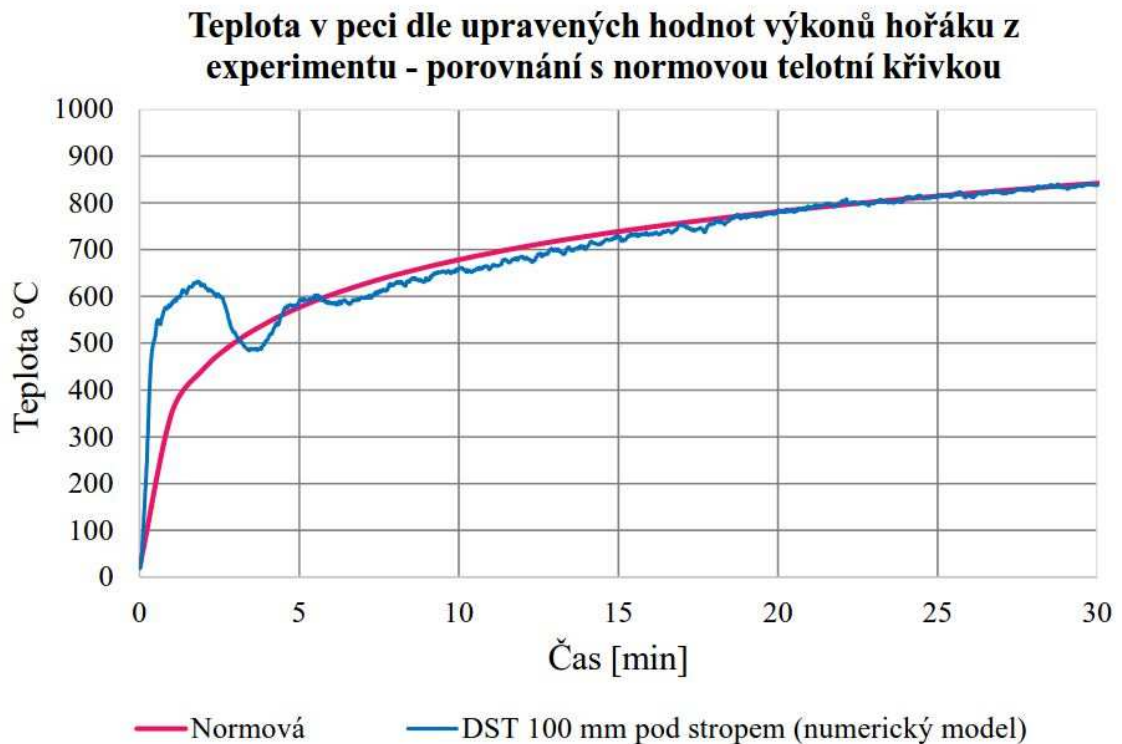
$$HRRPUA = \frac{265,57}{0,0625} = 4249,12 \text{ [kW / m}^2\text{]}$$

Zahřívání pece je pak nastaveno stejným zápisem, jako v numerickém modelu prázdné pece viz kap. 4.2.1.



Obr. 28 Numerický model pece s ocelovým stropním nosníkem.

Z výstupních dat výpočtu numerického modelu pece s ocelovým stropním nosníkem, byly hodnoty teplot z DST umístěných pod stropem porovnány s normovou teplotní křivkou. Jak je vidět z grafu 18, teploty v peci z numerického modelu následují normovou teplotní křivku. Na počátku teploty v modelu rychle rostou a překračují hodnoty normové křivky. Kolem 2,5 min. se však ustálí a jsou již blíže. Od 5. minuty jsou mírně nižší než průběh normové teplotní křivky. Nižší hodnoty teplot v numerickém modelu mohou být způsobeny ventilací, která není v modelu simulována dle skutečnosti a způsobuje tak vyšší hodnoty tlaku uvnitř pece.



Graf 18 Zahřívání pece s ocelovým stropním nosníkem dle DST v numerickém modelu.

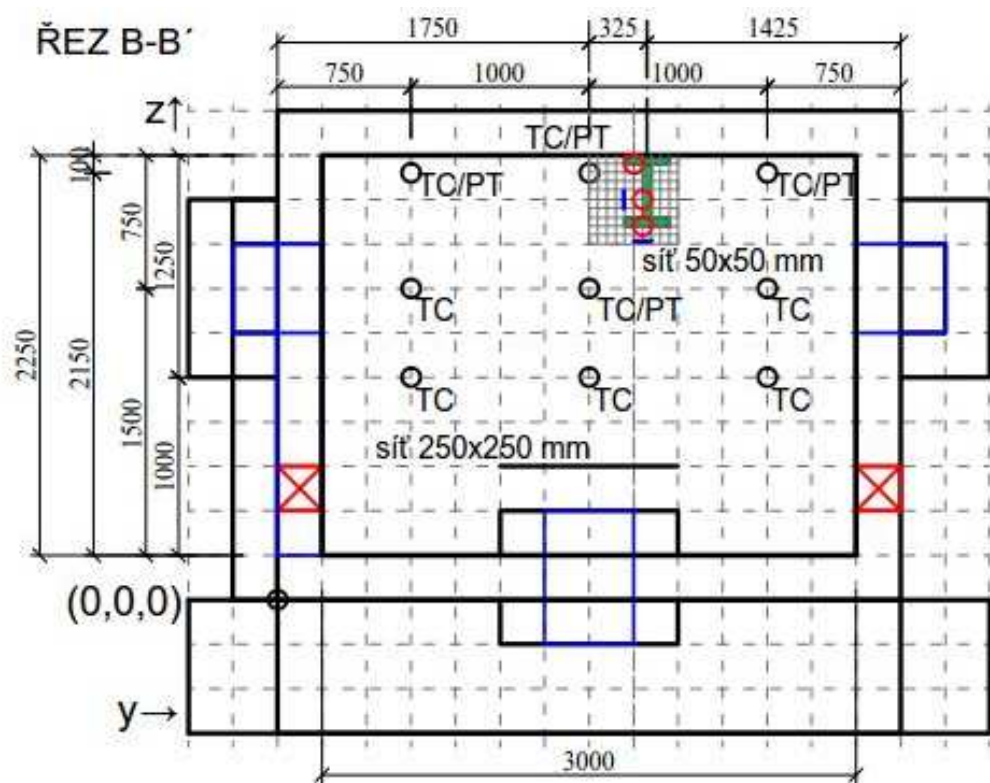
4.3.2 Měření teploty v peci, nastavení a rozmístění termočlánků

V modelu byla nastavena síť termočlánků a deskových snímačů teploty. Rozmístění zůstalo stejné jako v modelu prázdné pece. Navíc do modelu přibyly TC a DST na ocelovém nosníku (Obr. 29 a 30), kde z jedné strany nosníku bylo umístěno 9 TC a 6 DST (Obr. 15).

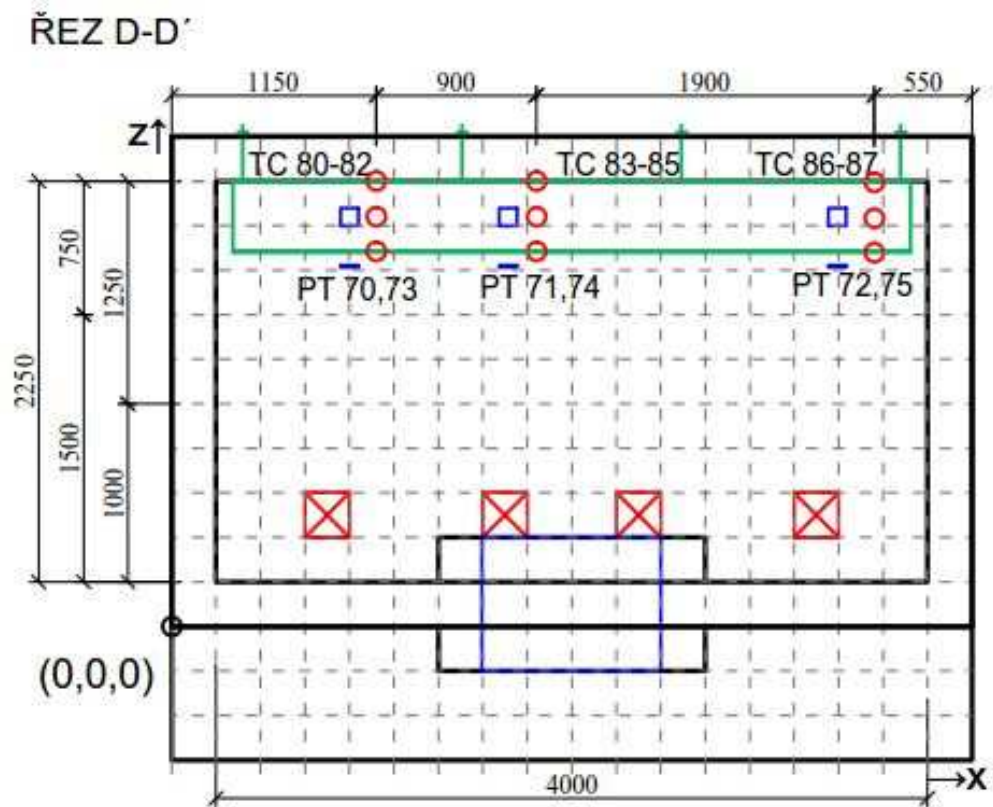
Termočlánky a DST byly v modelu umístěny do stejných bodů jako při experimentu. TC na nosníku byly nastaveny s vlastností QUANTITY='WALL TEMPERATURE', aby měřily teplotu přímo na povrchu nosníku (Graf 20). Průměrné teploty vypočítané ze simulace numerického modelu v různých výškových úrovních viz Tabulka 7. Na grafu 19 je vidět průběh těchto teplot. V různých výškách lze zaznamenat nepatrný rozdíl průměrných teplot.

Tabulka 6 Teploty pod stropem, numerický model – ocelový nosník.

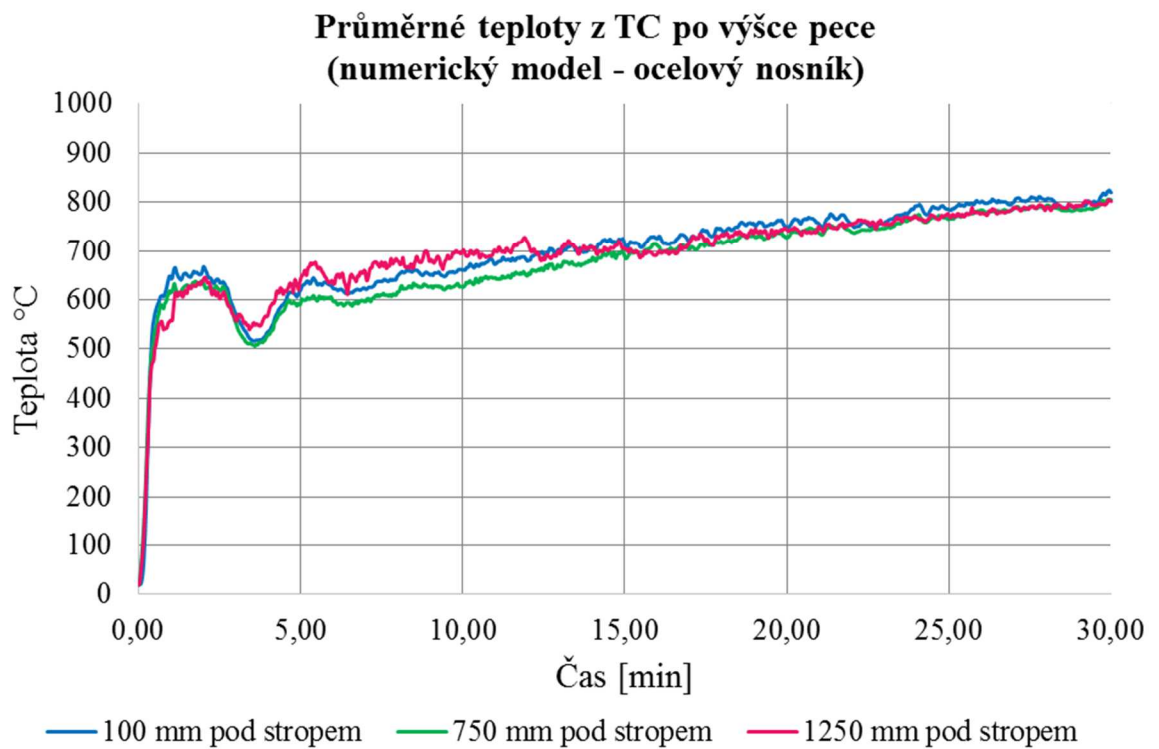
Průměrné teploty z TC a DST pod stropem numerický model - ocelový nosník [°C]				
Čas [min]	TC 100 mm	TC 750 mm	TC 1250 mm	DST 100 mm
0,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5,0	620,5	593,5	643,9	583,7
10,0	661,3	626,5	698,3	629,8
15,0	714,4	688,2	705,4	677,6
20,0	747,9	727,4	743,2	723,6
25,0	784,6	766,3	769,8	762,6
30,0	819,6	805,1	801,7	799,3



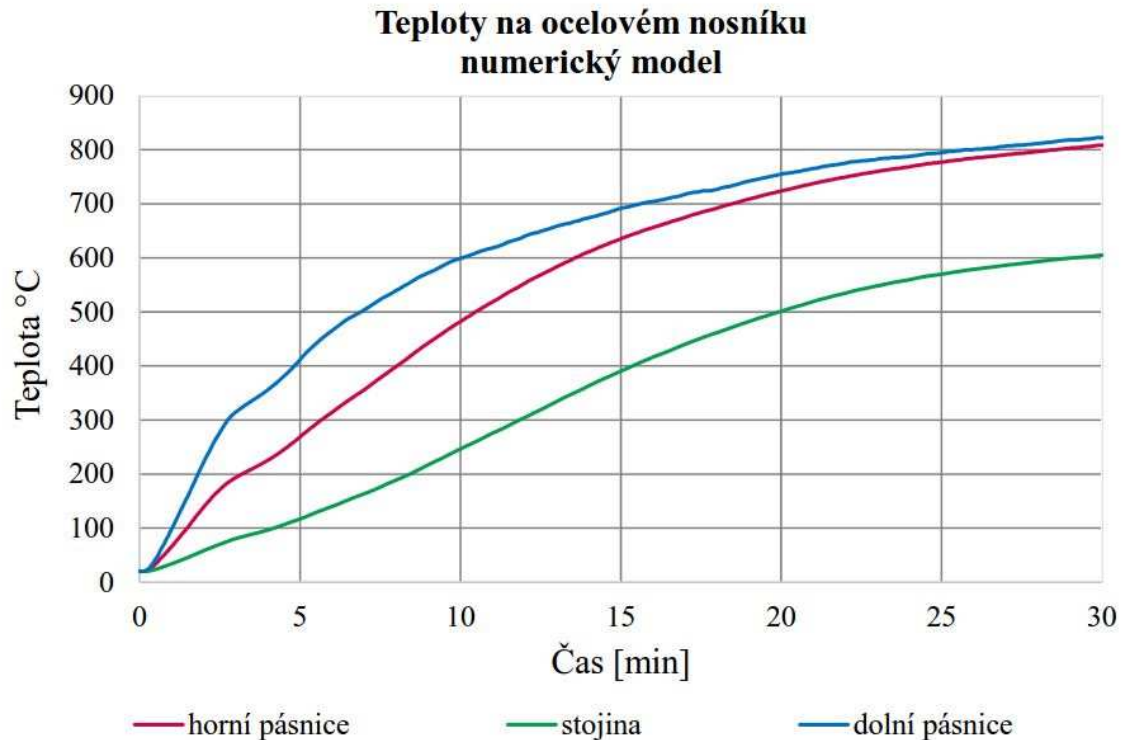
Obr. 29 Řez B-B' se znázorněním výpočetní sítě zjemněné v prostoru kolem nosníku na 50 mm x50 mm a znázorněnými TC a DST



Obr. 30 Řez D-D' se znázorněním TC a DST.



Graf 19 Průměrné teploty z TC v daných výškách v peci s ocelovým stropním nosníkem.

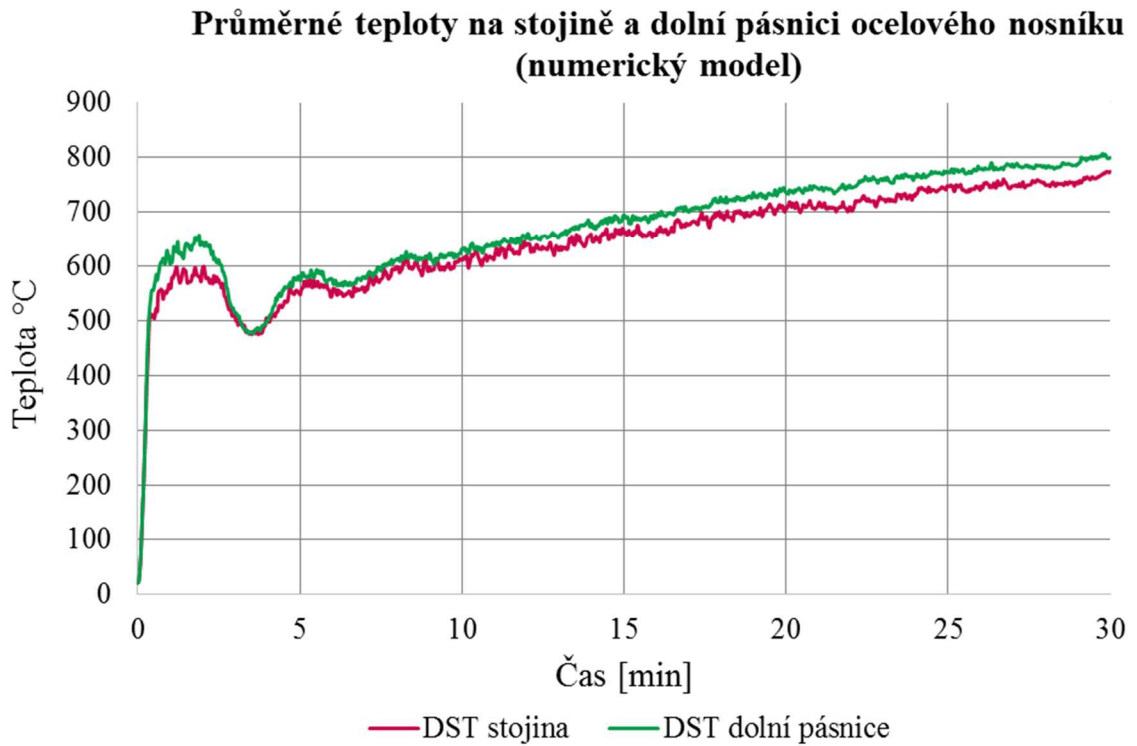


Graf 20 Teploty na ocelovém nosníku.

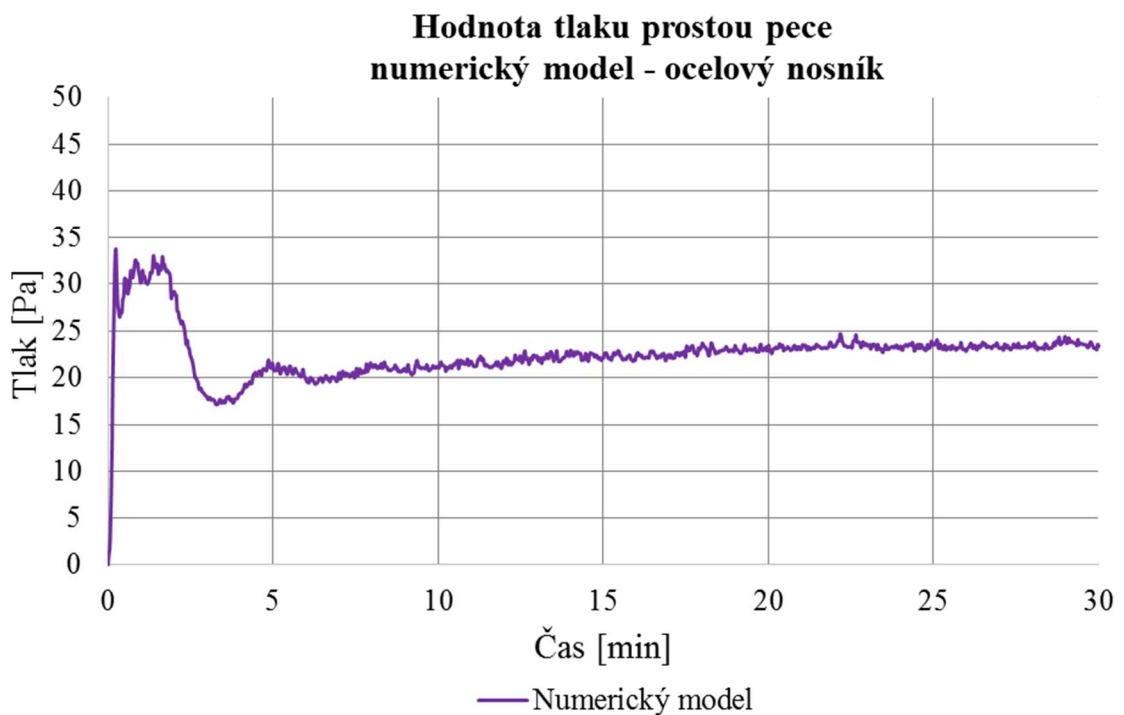
Teploty na nosníku v numerickém modelu jsou uvedeny v Tabulka 7. Teploty jsou brány jako průměrné z TC umístěných na horní a dolní pásnice a na stojině. Hodnoty se přibližují k hodnotám teplot v experimentu (viz kapitola 5) Vyšší teploty lze pozorovat na dolní pásnici nosníku naopak nejnižší teploty na stojině nosníku. Na grafu 22 je možné vidět průběh tlaku v peci z numerického modelu, který je vyšší oproti naměřeným hodnotám z experimentu. Teploty povrchů z numerického modelu v 15. a 30. min výpočtu jsou zobrazeny na obr. 31 a 32.

Tabulka 7 Teploty na ocelovém nosníku – numerický model

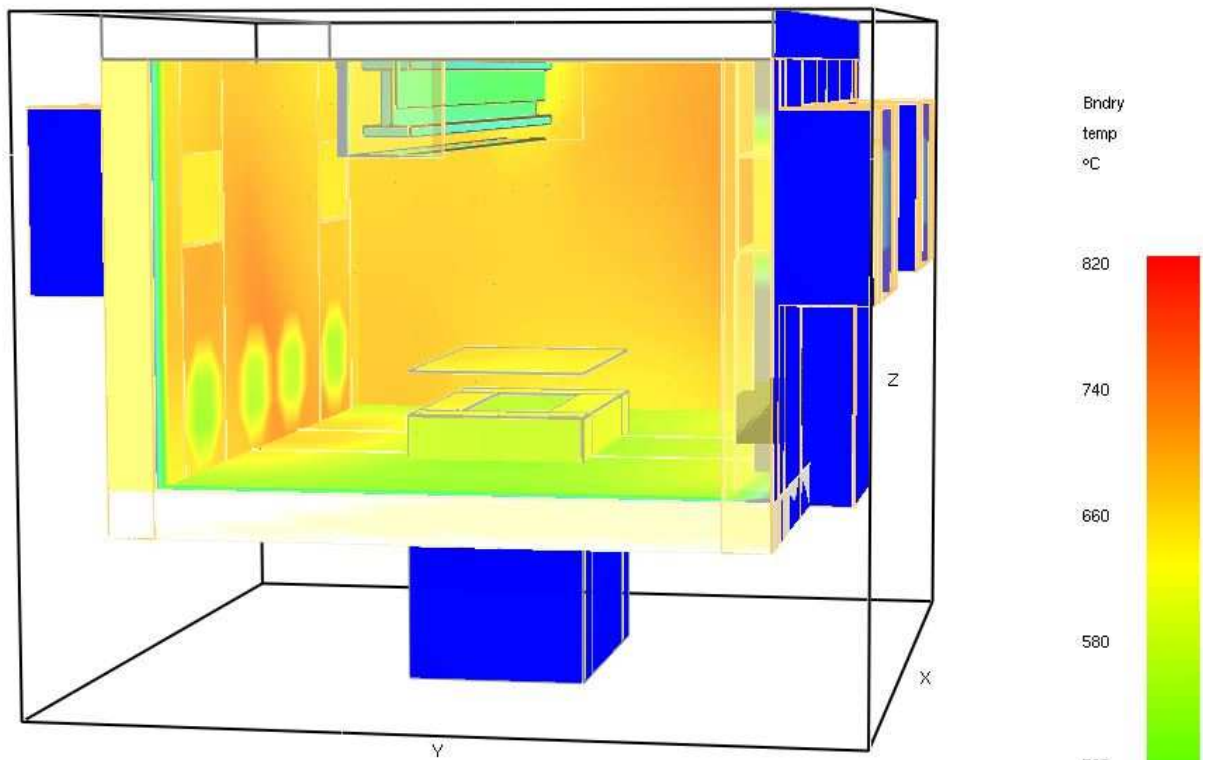
Průměrné teploty na ocelovém nosníku numerický model [°C]			
<i>Čas [min]</i>	<i>WT horní pásnice</i>	<i>WT stojina</i>	<i>WT dolní pásnice</i>
0,0	20,0	20,0	20,0
5,0	269,3	117,1	412,2
10,0	481,7	246,3	598,6
15,0	635,0	390,4	691,4
20,0	723,8	501,4	755,1
25,0	777,1	570,0	794,8
30,0	808,5	605,0	822,4



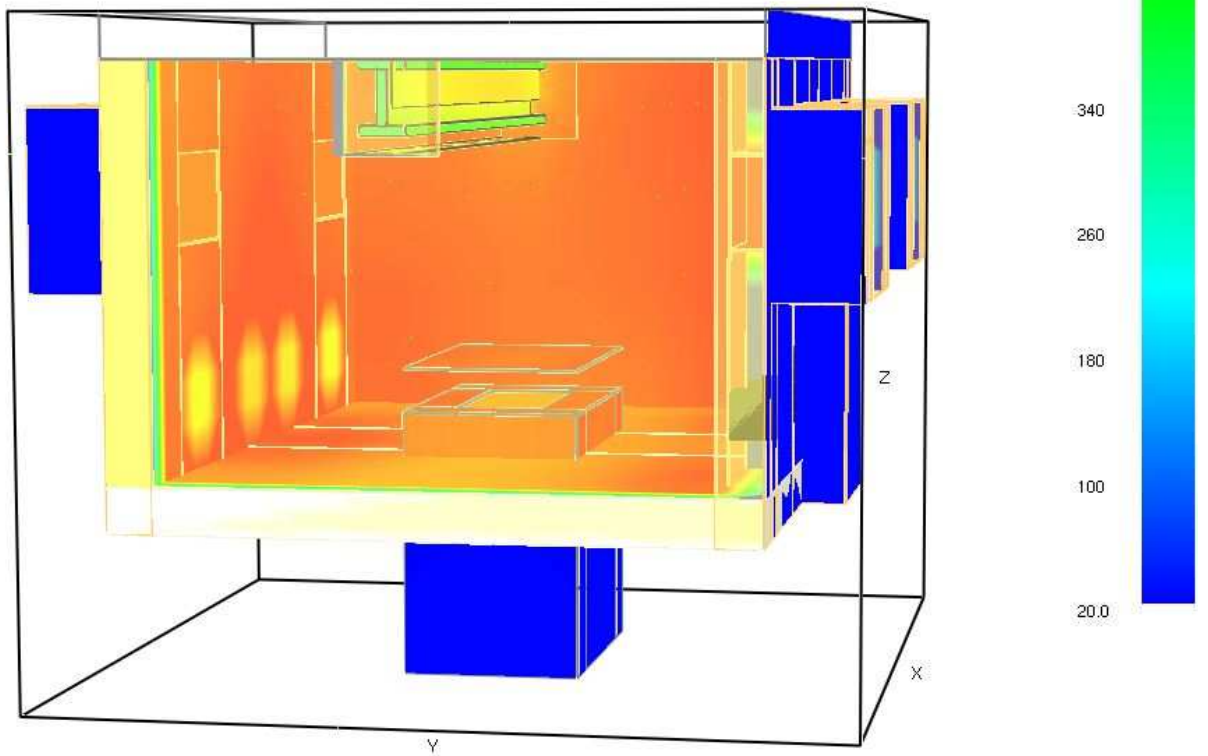
Graf 21 Teploty na stojině a dolní pásnici ocelového nosníku – numerický model.



Graf 22 Hodnota tlaku peci během simulace.



Obr. 31 Teploty povrchu pece a ocelového nosníku v 15. minutě simulace.



Obr. 32 Teploty povrchu pece a ocelového nosníku ve 30. minutě simulace.

5 Validace výsledků

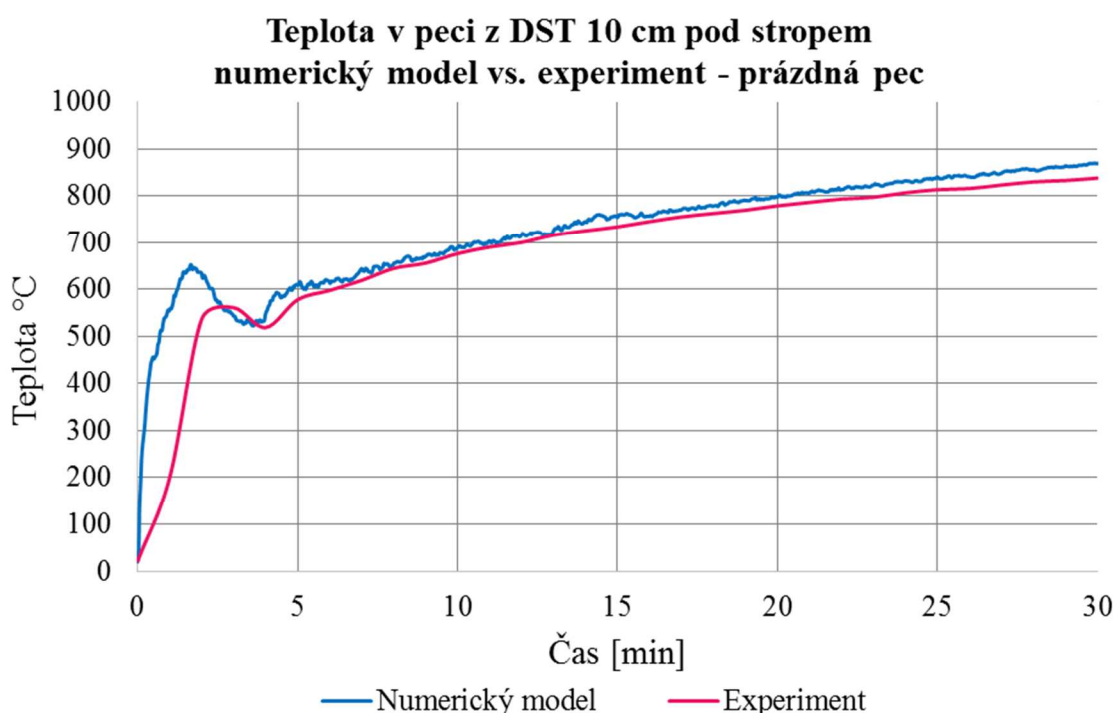
Experimentální údaje jsou nezbytné pro validaci stávající a nově vznikající výpočetní techniky k modelování simulace odezvy konstrukcí a konstrukčních prvků při požáru. Jsou zapotřebí vysokoteplotní modely základních materiálů k vytvoření spolehlivých vstupních údajů pro modely a pro lepší porozumění reakce soustavy na požár a možné způsoby selhání.

Z důvodu validace numerických modelů v této diplomové práci, proběhly dva experimenty. Jeden se konal 29. 7. 2016, kde byla zahřívána prázdná pec a druhý, který se konal 2. 11. 2016, ve kterém byl zavěšen ocelový stropní nosník IPE 400. K validaci těchto modelů byla použita data z experimentů a porovnána s výsledky ze simulace numerických modelů virtuální pece.

5.1 Experiment vs. numerický model – prázdná pec

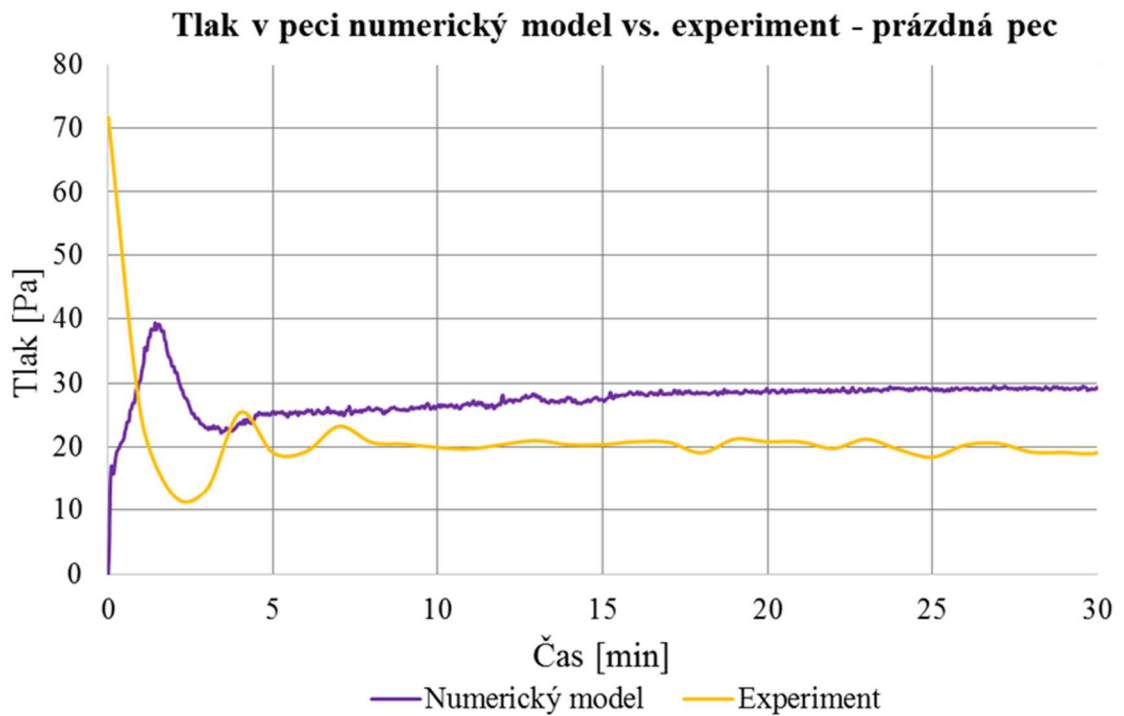
Na následujících grafech je možno vidět porovnání experimentu s numerickým modelem prázdné pece. Graf 23 zobrazuje nárůst teploty v peci během experimentu a simulace numerického modelu. Teploty udávají DST umístěné 10 cm pod stropem pece. Porovnány byly dále teploty v prostoru pece a to ve výškových plochách, které byly naměřeny termočlánky (Graf 25-27). Tyto teploty následují ty experimentální pouze s malými rozdíly. Tlak v peci pro oba případy je porovnán na grafu 24.

Všechny teploty, které jsou zpracovány z výstupních dat numerického modelu, se téměř blíží k hodnotám z výsledných dat experimentu. Nárůst teploty v numerickém modelu je opět rychlý, kde v 2,5 min převyšuje hodnoty experimentu, ale v 5. minutě se ustálí a teploty se drží lehce nad hodnotou z výsledků zkoušky.

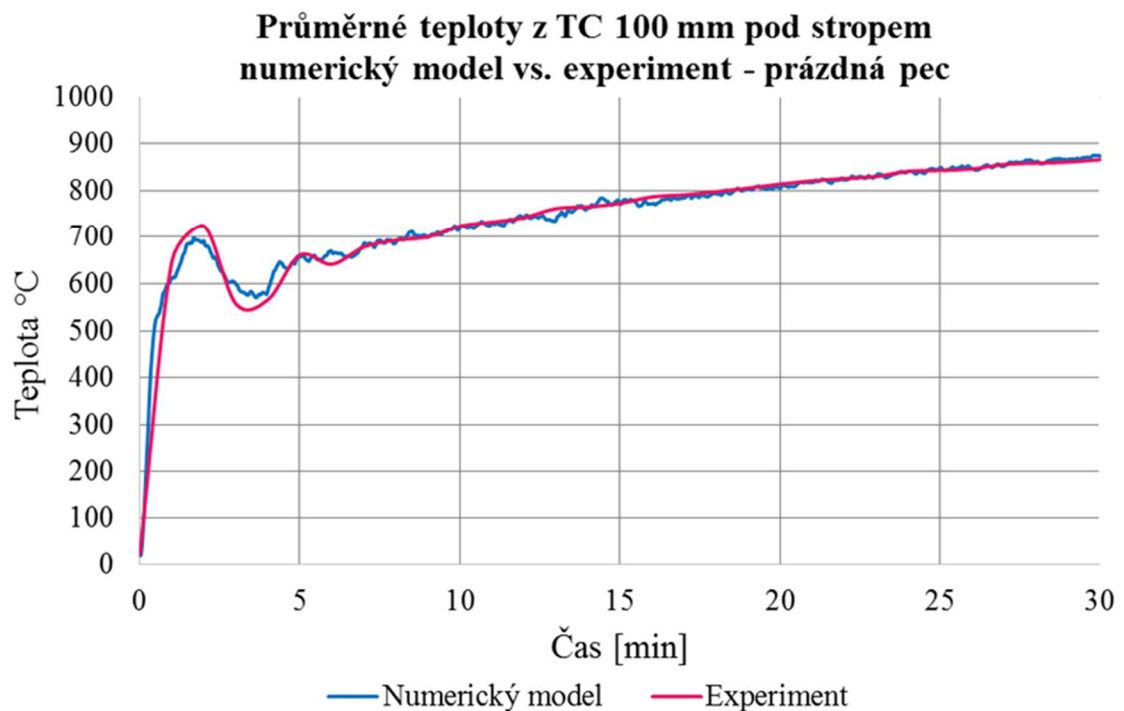


Graf 23 Nárůst teploty v peci dle DST.

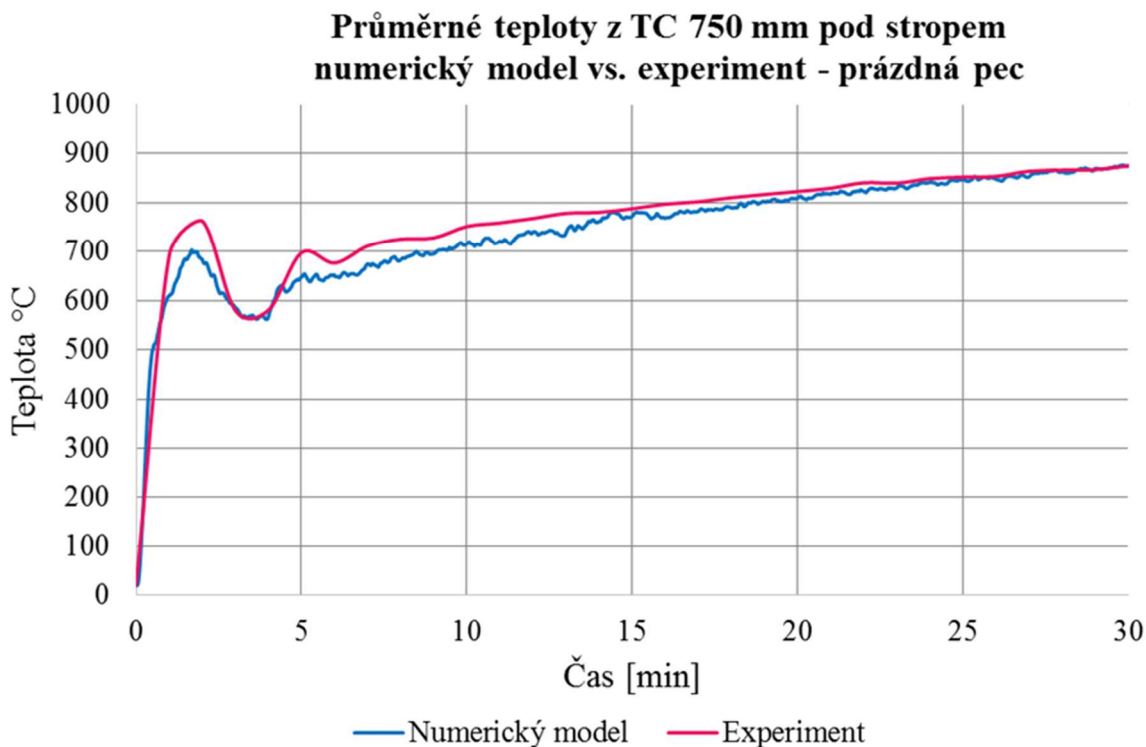
Tlak v peci je z důvodu absence ventilace vyšší než tlak ze zkoušky, ale je možné, že dořešením ventilace a snížením tlaku ve virtuální peci, se budou teploty v peci z numerického modelu více shodovat s těmi experimentálními.



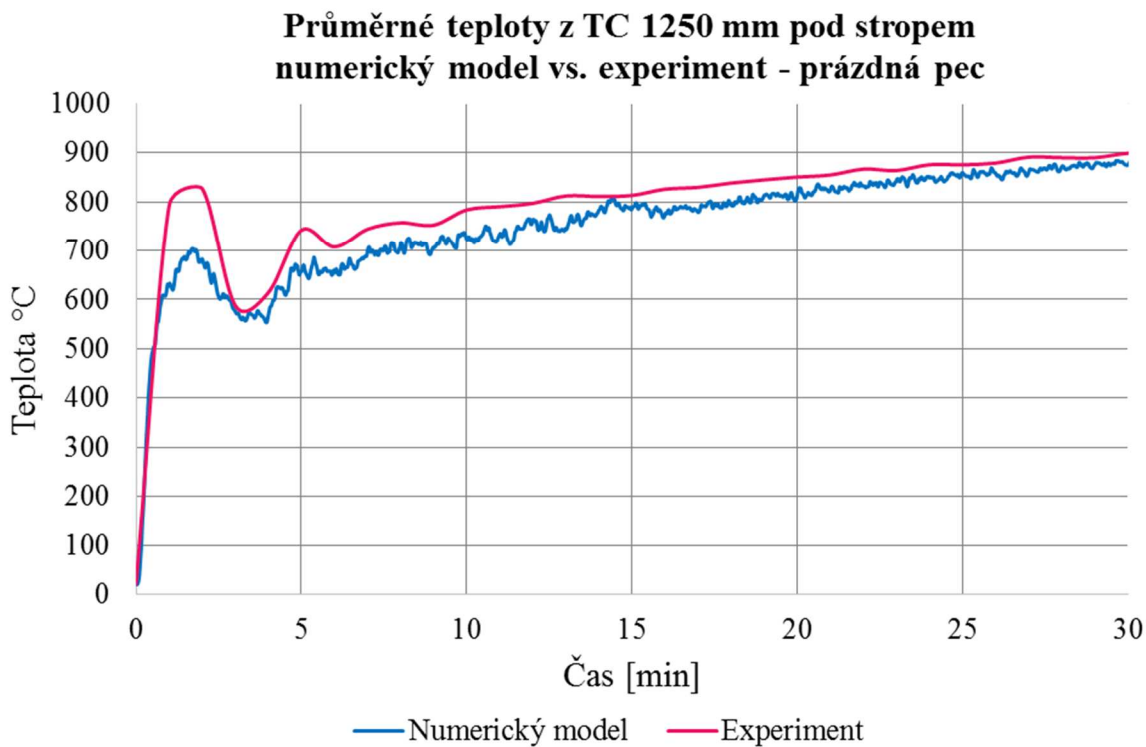
Graf 24 Porovnání hodnot tlaku v prostoru pece.



Graf 25 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.



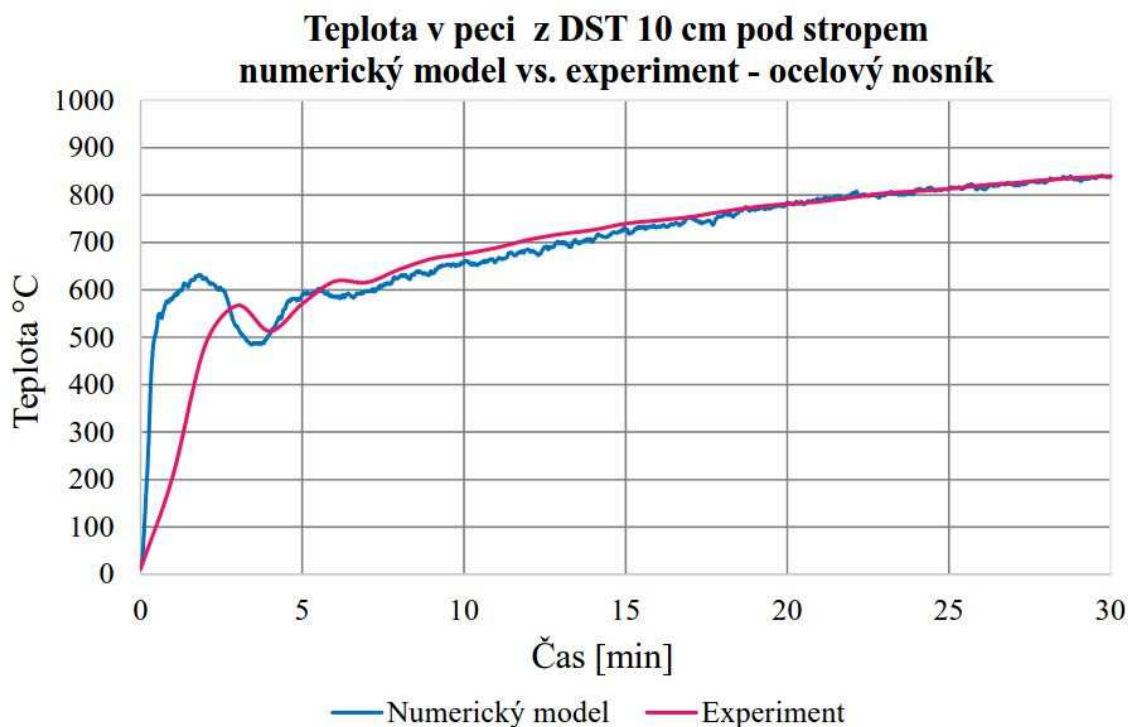
Graf 26 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.



Graf 27 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.

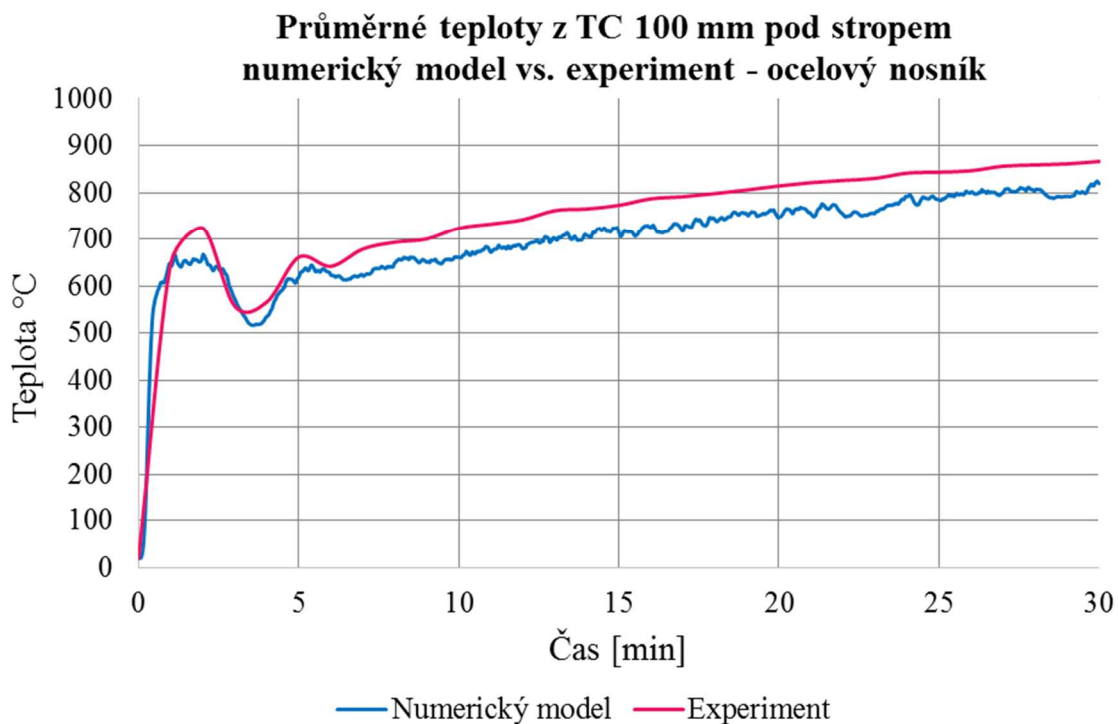
5.2 Experiment vs. numerický model – ocelový nosník

Porovnání hodnot experimentu a numerického modelu pece s ocelovým nosníkem je uvedeno na následujících grafech. Graf 28 zobrazuje nárůst teploty v peci dle DST umístěných 10 cm pod stropem.

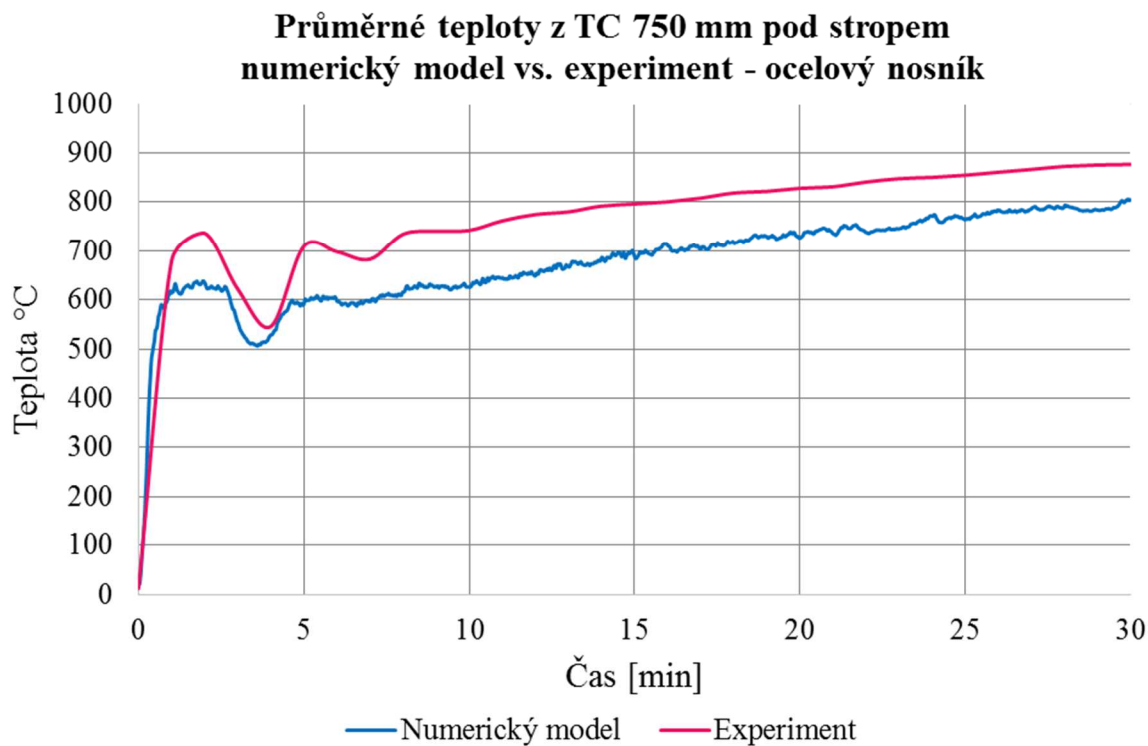


Graf 28 Nárůst teploty v peci dle DST umístěných pod stropem.

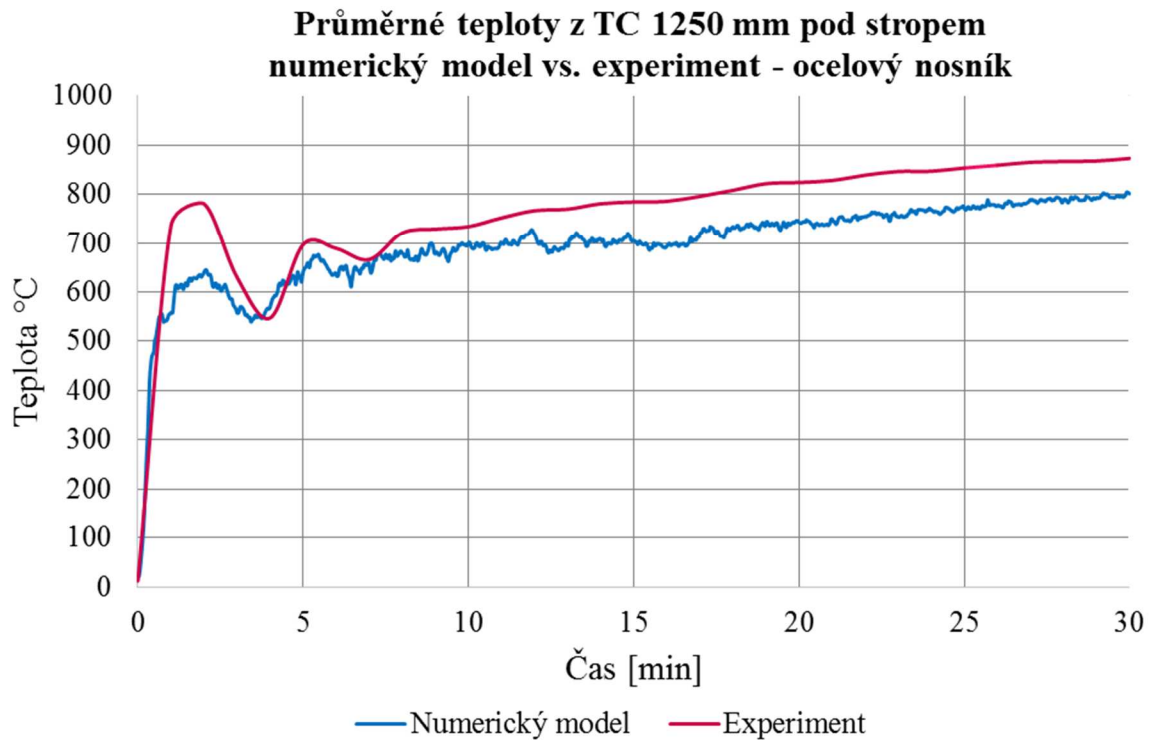
Teploty v peci v jednotlivých výškových polohách jsou zobrazeny na grafu 29-31. Tyto teploty jsou nižší než teploty z experimentu, ale opět je to nejspíše z důvodu ventilace a tlaku v peci, která zatím není dořešena. Dalším bodem ve validaci výsledků experimentu a modelu virtuální pece, jsou teploty ocelového nosníku (Graf 32). Hodnoty TC, které byly v numerickém modelu zadány s funkcí WALL TEMPERATURE mají přibližně podobný průběh, jako hodnoty z experimentu. Vyskytují se zde ale určité nesrovnalosti. Např. teplota dolní pásnice z dat numerického modelu, je vyšší než teplota dolní pásnice dle experimentu. Naopak je tomu u teploty stojiny, kde experimentální teplota je vyšší, než hodnota z dat numerického modelu. Důvodů proč je tomu tak může být hned několik a to již zmíněná absence ventilace a tím vysoký tlak v peci, dalším problémem může být, že program FDS není vhodný k výpočtu teploty konstrukcí, která je v tomto případě počítána pouze 1 D přestupem tepla. Tyto rozdíly ale nejsou veliké a je možné, že dalším zpřesněním modelu se hodnoty teplot zas o něco přiblíží k hodnotám experimentálním. Teploty DST na ocelovém nosníku jsou porovnány na grafu 33. Hodnoty tlaku v peci dle numerického modelu jsou opět vyšší než hodnoty z experimentu (Graf 34).



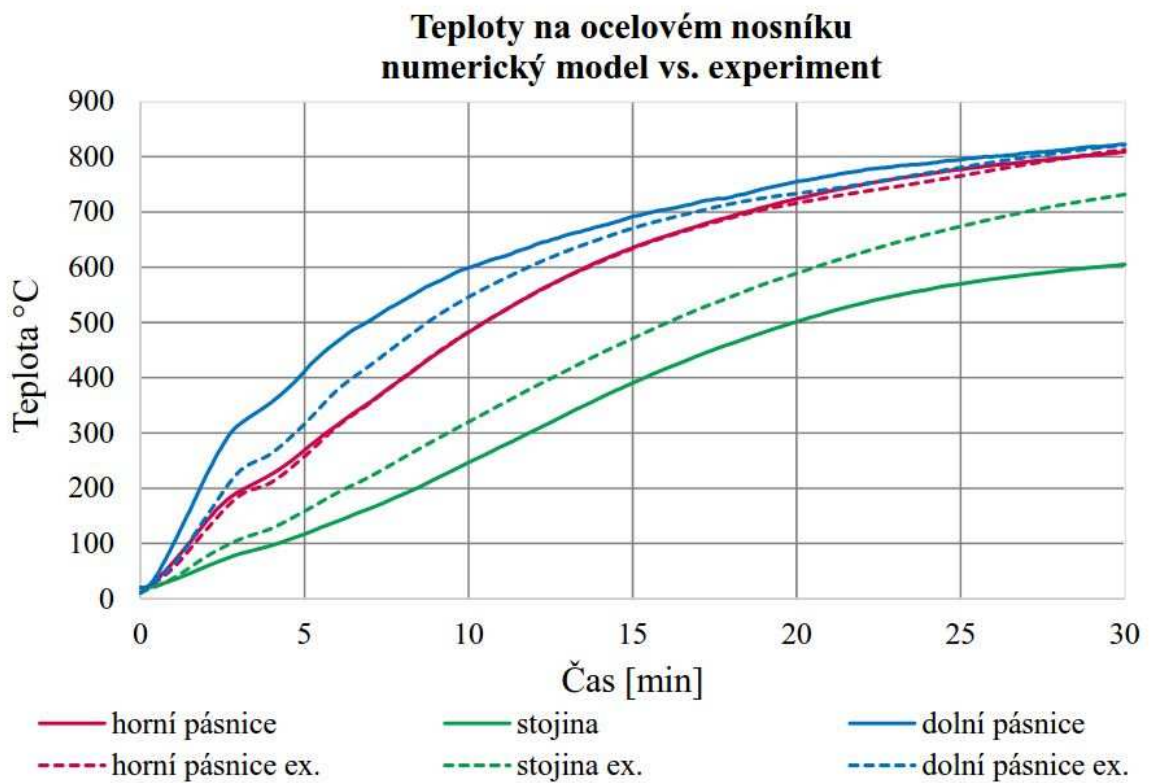
Graf 29 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze.



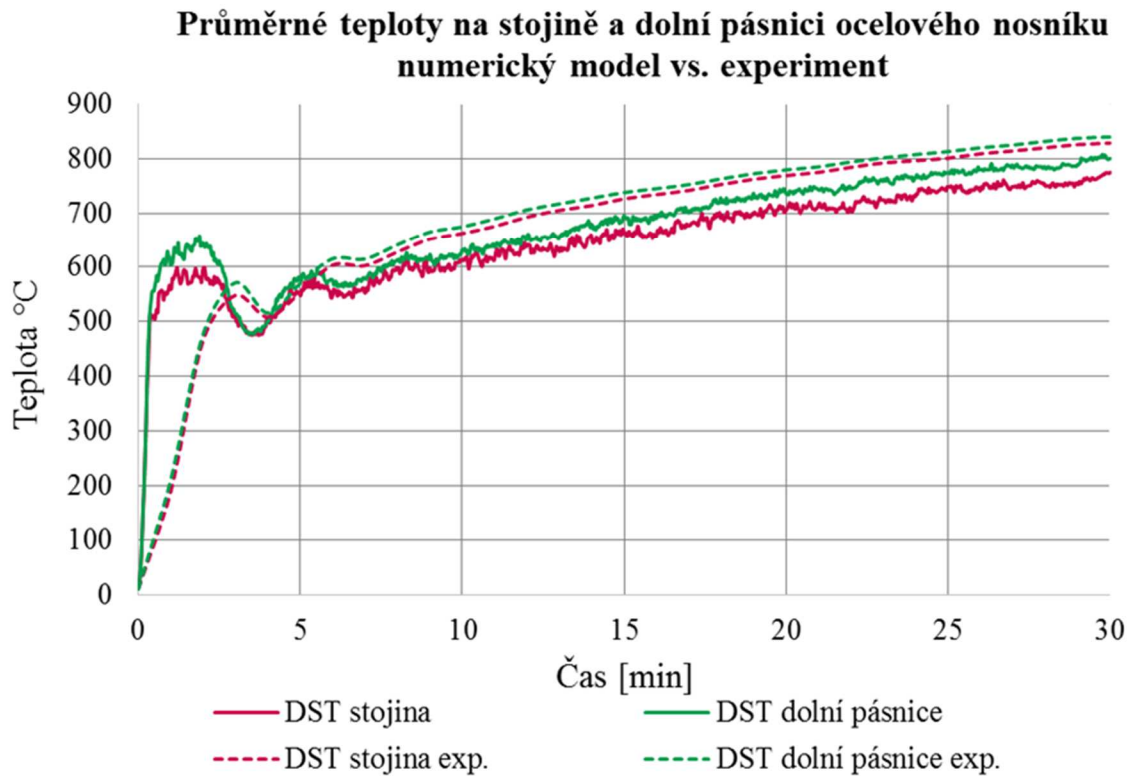
Graf 30 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze.



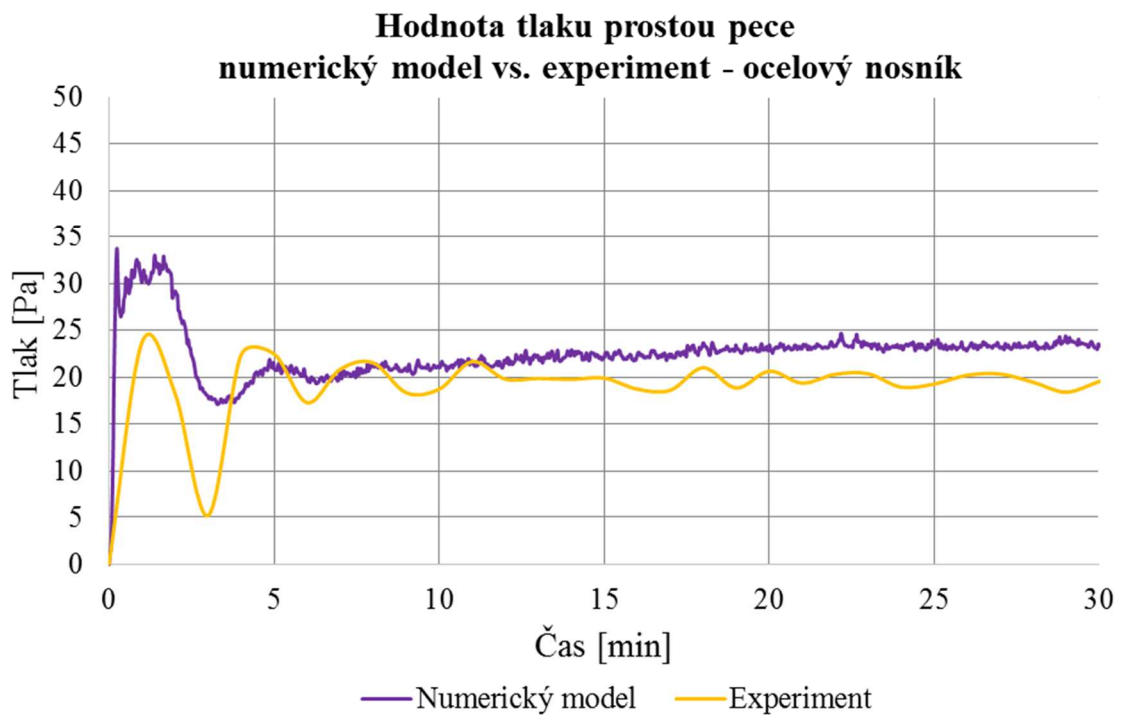
Graf 31 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze



Graf 32 Teplota horní pásnice ocelového nosníku.

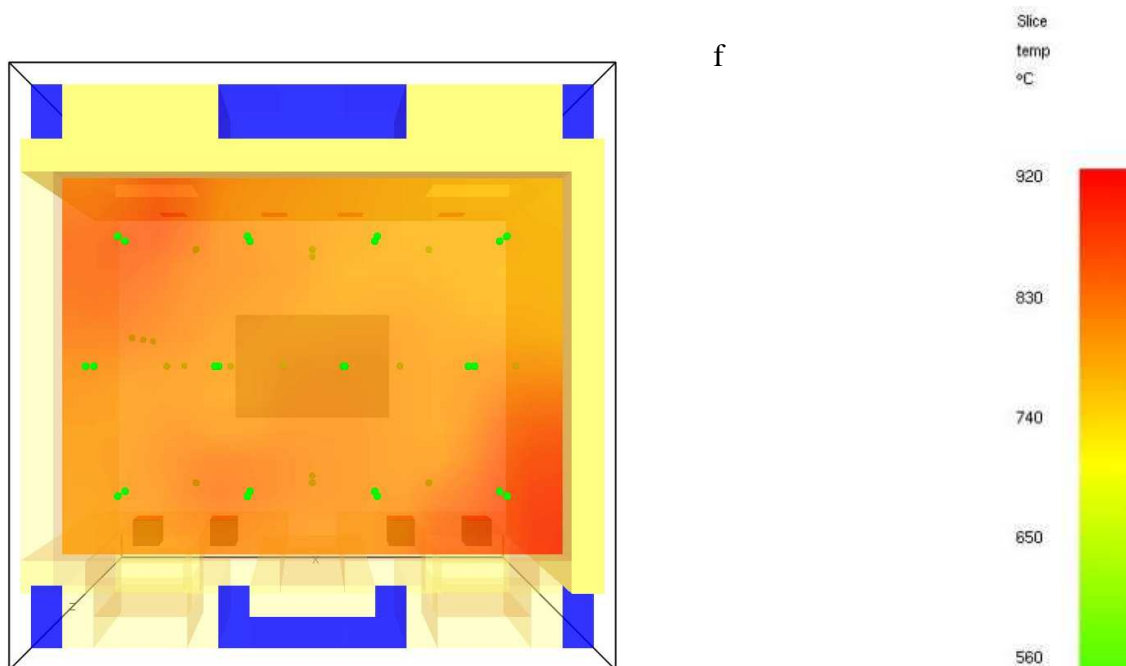


Graf 33 Teplota stojiny a dolní pásnice ocelového nosníku dle DST.

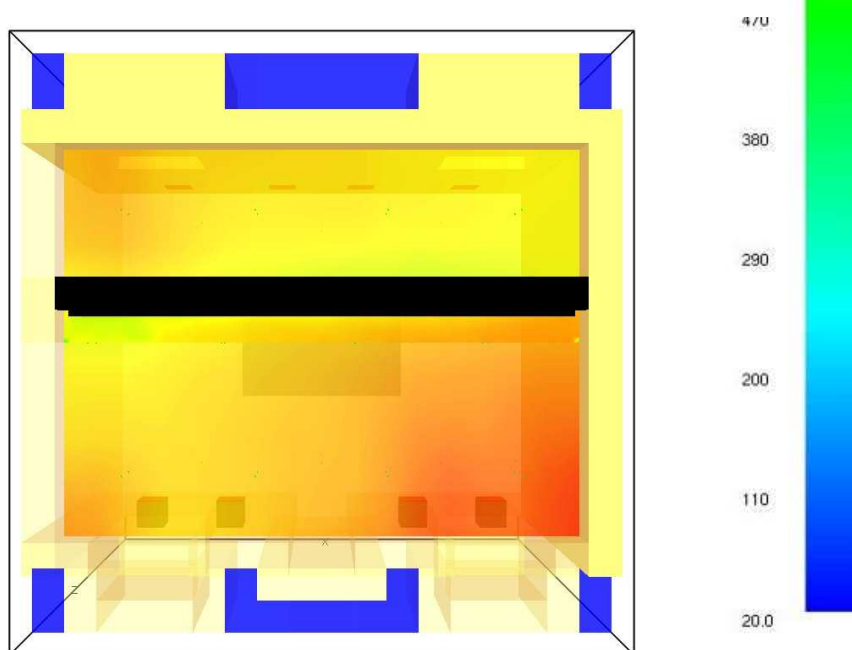


Graf 34 Tlak v prostoru pece.

5.3 Teplotní analýza numerického modelu pece s konstrukcí a bez konstrukce



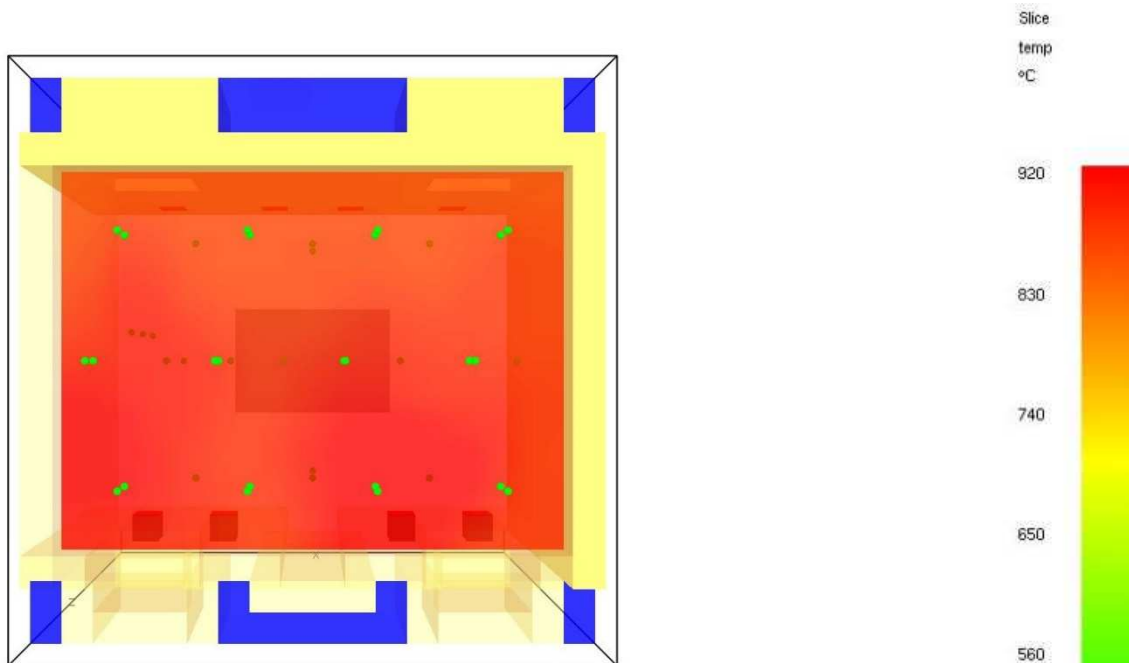
Obr. 33 Teplotní pole ve výšce 2,25 m od podlahy v 15 minutě simulace – bez konstrukce



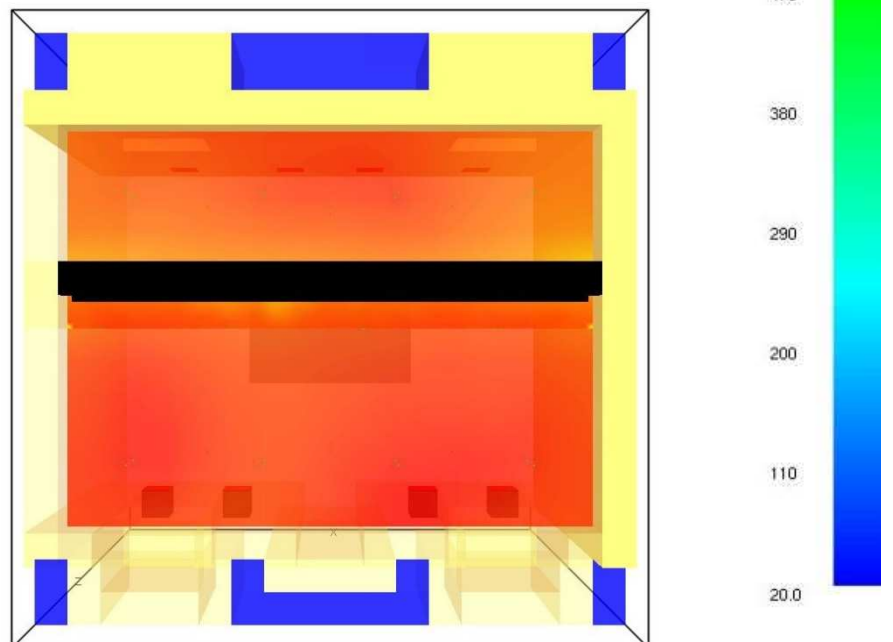
Obr. 34 Teplotní pole ve výšce 2,25 m v 15. minutě – s konstrukcí

Na obrázku 33 a 34 je možné vidět teplotní pole v numerickém modelu pece (bez konstrukce a s konstrukcí). Je patrné, že teploty v simulaci s konstrukcí jsou nižší než v simulaci bez ní. Nejvyšší teploty na obr. 35 se nacházejí v levém horním a v pravém dolním rohu a hodnoty dosahují přibližně 850°C. Oproti tomu u modelu s ocelovým nosníkem, jsou hodnoty viditelně

nižší cca kolem 720°C v levém horním rohu a 800°C v pravém dolním rohu. Okolo nosníku se teplota pohybuje do 700°C . Důvodem těchto rozdílů v teplotách je jiné proudění teplých plynů v okolí nosníku a dále množství tepla, které si nosník jako takový vezme (absorbuje). Na obrázcích 35 a 36 je možné vidět teplotní pole v 30. min simulace. Teplota v prázdné peci je téměř rovnoměrná, kdežto v modelu s ocelovým nosníkem jsou teploty v jeho okolí stále nižší.



Obr. 35 Teplotní pole ve 30. minutě simulace – bez konstrukce



Obr. 36 Teplotní pole ve 30. minutě simulace – s konstrukcí

6 Závěr

Cílem této práce bylo shrnout současnou problematiku zkoušení a hodnocení požární odolnosti. V práci je popsáno, jak v současné době požární zkoušky probíhají, jaké jsou podmínky, odchylky teplot, tlaku a celkově jak se hodnotí a stanovuje požární odolnost zkoušených prvků na základě těchto zkoušek. Současně je zde nastíněna historie vývoje požárních zkoušek a legislativa, které tyto zkoušky podléhají.

Hlavním bodem práce bylo vytvořit fungující model virtuální pece, který bude ověřen reálnou požární zkouškou. Modely tedy byly validovány pomocí dvou experimentů, které proběhly v roce 2016. Prozatím je numerický model funkční, ale není ještě ve stádiu, kdy by plně souhlasil s výsledky experimentálních zkoušek. Pro toto zdokonalení numerického modelu je nutné dořešit ještě spoustu nesrovnalostí, které se doposud při jeho řešení vyskytly. Jedná se zejména o dořešení ventilace. V reálné peci slouží pro odtažení spalin ventilátor, který je umístěn na odtažovém potrubí z pece. Přirozený odtažení spalin, který je nastaven ve stávajícím numerickém modelu, není dostačující a z tohoto důvodu je v prostoru pece vysoký tlak. Dalším bodem pro zpřesnění jsou naplánované materiálové zkoušky, které by měly proběhnout na jaře tohoto roku. Tyto zkoušky poskytnou vlastní a přesnější hodnoty fyzikálních vlastností materiálů, které jsou skutečně v peci použity. V neposlední řadě je nutná citlivostní studie numerického modelu. S fungující ventilací, novými materiálovými vlastnostmi atd., bude zapotřebí zjemnit stávající výpočetní síť. Tímto řešením je pak možné dosáhnout přesnějších výsledků. Například bude možné model rozměrově zpřesnit a přizpůsobit se tak skutečné zkušební peci (např. upravit ocelový nosník na skutečné rozměry), nebo také do modelu přidat některé další deskové snímače teploty, které nyní nelze namodelovat do prostoru pece kvůli velké výpočetní síti.

Rovnoměrnost teplot v numerickém modelu pece s konstrukcí a bez konstrukce se značně liší. Z porovnání teplotních polí pro model prázdné pece a pro model pece s ocelovým nosníkem bylo zjištěno, že teploty v peci bez konstrukce jsou rovnoměrné přes objem pece. Oproti tomu ocelový nosník v peci ovlivňuje proudění horkých plynů a tím pak dochází k nerovnoměrnému rozložení teploty v peci. Horké plyny tak nemůžou rovnoměrně proudit přes prostor pece a nosník, jako překážka, tak mění jejich směr proudění. Změna proudění a dále teplo, které nosník absorbuje tak způsobí nižší teploty v peci s konstrukcí než v peci bez ní.

Zpřesněný model pak může být potencionálně použit k optimalizaci nastavení pece pro jednotlivé zkoušky. Výhoda numerického modelu je v nekonečných možnostech hodnocení tepelného působení v prostoru pece, což umožňuje přesnou předpověď požární zkoušky a vyhodnocení velkého počtu technických alternativ a okrajových podmínek. Kromě toho by díky podrobnější studii dynamiky proudění plynů v numerickém modelu, mohla být teplota plynů uvnitř virtuální pece v ideálním případě jednotná – to je nemožné dosáhnout v reálné peci.

Do budoucna je proto vhodné podporovat matematické modely pro hodnocení požární odolnosti, než jen současné a vysoce nákladné požární zkoušky.

Literatura

1. Michal Frank, Lenka Smetanová. Zkoušení požární odolnosti protipožárního instalačního kanálu. *TZB-info, stavebnictví, úspory energií*. [Online] 29. Zář 2014. [Citace: 18. Duben 2016.] <http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/11773-zkouseni-pozarni-odolnosti-protipozarniho-instalacniho-kanalu>.
2. Torero, J.L. a Steinhous, T. *Applications of computer modelling to fire safety design*. Essen : Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., 2004.
3. Purkiss J. A. *Fire Safety Engineering. Design of Structures*. 2007.
4. Heinisuo, M., Laasonen, M. a Ojala, A. *Effect of Gird Size to Temperature Predictions in FDS*. Tampere : University of Technology, 2009.
5. ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti - Část 1 : Základní požadavky*. Praha : ÚNMZ, 2013.
6. ASTM. *Standard Method of Fire Tests of Building Construction and Materials*. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
7. Gales, J., Maluk, Ch. a Bisby, L. Large-Scale Structural Fire Testing - Where are we, how did we get here, and where are we going? *15th International Conference of Experimental Mechanics (ICEM15)*. Porto, Portugal, 2012, str. 22.
8. Woolson, I. Dwelling Houses: A code of Suggestions for constructions and fire protection recommended by the National Board of Fire Underwriters. *American Institute of Architects*. 1916, str. 137.
9. F., Fitzpatrick a Condron, T. Fire proof construction. *American School of Correspondence*. 1914, str. 337.
10. Babrauskas, V. a Williamson, R.B. *Fire Technology*. [Online] Berkeley, California : Springer US, 1978. The Historical Basis of Fire Resistance Testing, Part I., Sv. 14. ISSN: 1572-8099.
11. Hull, W.A. a Ingberg, S.H. Fire resistance of concrete columns. *Notes from US bureau of standards. Tech paper. 272*, 1925, stránky 379-381.
12. K., Richardson. History of Fire Protection Engineering. *National Fire Protection Association*. 2003.
13. H., Holland. Resolutions of the Associated Architects. *Associated Architects*. 1973, str. 81.
14. Bačáková, Marie. Stavební výrobky a právní předpisy ČR. *Portál českého stavebnictví*. [Online] 10. 2009. [Citace: 19. 5 2016.] <http://www.ceskestavebnictvi.cz/rubrika.html?sk=0&k=14&l=2.2.1>.
15. —. Klasifikace stavebních výrobků z hlediska požární odolnosti. *Portál českého stavebnictví*. [Online] 10. 2009. [Citace: 19. 5 2016.] <http://www.ceskestavebnictvi.cz/rubrika.html?k=14&l=1.14.3>.
16. ČSN EN 13 501-1: *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1 : Klasifikace podle výsledků reakce na oheň*. Brussels : CEN, 2007, +A1 2009.

-
17. Pope, N.D. a Bailey, C.G. Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data. *Fire safety Journal*. 41,2, 2006, stránky 99-110.
 18. Welch S. . BRE large compartment fire test -Characterising post-flashover fires for model validation. *Fire Safety Journal*. 42, 2007.
 19. Yeoh, G.D. a Yuen, K.K. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering. *Theory, Modelling and Practice*. 2009.
 20. McGrattan, Kevin, a další. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. Gaithersburg, Maryland, USA : NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013.
 21. Forney, G. P. *Smokeview (Version 6), A tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, User's Guide*. Gaithersburg, Maryland, USA : NIST Special Publication 1017-1, National Institute of Standards and Technology, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013.
 22. Bressloff, N., Rubini, P. a Cox, G. Computational Fluid Dynamics Modelling of a Fire Resistance Furnace. Zurich, Switzerland : 1st European symposium on Fire Safety Science, 1995.
 23. Welch S., Rubini P.A. *Three-dimensional Simulation of Fire-Resistance Furnace*. Melbourne, Australia : Proceedings of 5th International Symposium on Fire Science, 1997.
 24. Cayla, F., Leborgne, H. a Joyeux, D. Application of a virtual resistance furnace : fire resistance test simulation of a plasterboard membrane. *ASFE Conference*. Prague, 2011.
 25. *PROJET VIRGILE MODÉLISATION D'UN FOUR DE RÉSISTANCE AU FEU*. France, Efectis. France : 16èmes journées du GDR CNRS 2864 Incendie, 2013.

Seznam obrázků

Obr. 1 Deskový snímač teploty (DST).....	12
Obr. 2 Plášťový termočlánek MTC10, průměr 2 mm (TC)	12
Obr. 3 Model pece Cranfield University 1997. Zdroj [23]	17
Obr. 4 Model vertikální pece v laboratoři Efectis ve Francii. [24]	19
Obr. 5 Pozice deskových snímačů teploty. [24].....	20
Obr. 6 Teplotní pole v místě zkoušeného prvku. [25].....	22
Obr. 7 Pohled do pece a model horizontální pece v laboratoři Efectis ve Francii. [25]	22
Obr. 8 Vodorovná požární pec ve zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí.....	23
Obr. 9 Pohled na hořáky v peci.....	24
Obr. 10 Rozmístění plášťových termočláneků a deskových snímačů teploty v prázdné peci...	25
Obr. 11 Detail deskového snímače teploty a plášťového termočlátku.....	25
Obr. 12 Zavěšení nosníku pomocí závitových tyčí a osazení TC a DST.....	29
Obr. 13 Detail DST a napojení TC na ocelový nosník.	29
Obr. 14 Zavěšení nosníku pomocí závitových tyčí.....	30
Obr. 15 Osazení TC a PT na nosník a kolem nosníku	30
Obr. 16 Detail napojení TC na nosník.	31
Obr. 17 Pohled do pece v průběhu experimentu.....	31
Obr. 18 Rozměry pece – půdorys.....	34
Obr. 19 Řez pecí A-A´	35
Obr. 20 Řez pecí B-B´	35
Obr. 21 Půdorys virtuální pece se znázorněním sítě 250 mm x 250 mm.....	37
Obr. 22 Numerický model prázdné pece v programu SMV.	38
Obr. 23 Řez B-B´ a znázornění sítě 250mm x 250 mm.....	38
Obr. 24 Teploty povrchů pece v 15. minutě simulace	42
Obr. 25. Řez A1-A1´ s rozmístěním TC a DST v FDS modelu.....	42
Obr. 26 Řez C – C´ s rozmístěním TC a DST v FDS modelu.	43
Obr. 27 Půdorys virtuální pece se stropním ocelovým nosníkem.....	44
Obr. 28 Numerický model pece s ocelovým stropním nosníkem.	45
Obr. 29 Řez B-B´ se znázorněním výpočetní sítě zjemněné v prostoru kolem nosníku na 50 mm x50 mm a znázorněnými TC a DST.....	47
Obr. 30 Řez D-D´ se znázorněním TC a DST.	48
Obr. 31 Teploty povrchu pece a ocelového nosníku v 15. minutě simulace.	51

Obr. 32 Teploty povrchu pece a ocelového nosníku ve 30. minutě simulace.....	51
Obr. 33 Teplotní pole ve výšce 2,25 m od podlahy v 15 minutě simulace – bez konstrukce..	59
Obr. 34 Teplotní pole ve výšce 2,25 m v 15. minutě – s konstrukcí	59
Obr. 35 Teplotní pole ve 30. minutě simulace – bez konstrukce.....	60
Obr. 36 Teplotní pole ve 30. minutě simulace – s konstrukcí.....	60

Seznam grafů

Graf 1 Mezní odchylka pro teplotu v peci dle ČSN EN 1363-1 :5.1.2.....	11
Graf 2 Teploty z termočlánků v prostoru pece. [23].....	18
Graf 3 Teploty z termočlánků na stěně zkušebního prvku. [23].....	18
Graf 4 Teplotní křivky a změna průtoku plynu.....	19
Graf 5 Tlak v horní části pece v závislosti na čase. [24].....	20
Graf 6 Normová teplotní křivka, povolené odchylky a teploty naměřené DST. [24].....	21
Graf 7 Normová teplotní křivka, povolené odchylky a teploty naměřené DST. [24].....	21
Graf 8 Průměrná teplota v peci.	26
Graf 9 Rozložení tlaku v peci během experimentu.....	27
Graf 10 Průměrné teploty v peci naměřené TC a DST.....	27
Graf 11 Zahřátí pece konstantním výkonem hořáků.....	28
Graf 12 Průměrná teplota v peci - experiment s nosníkem.....	32
Graf 13 Průměrné teploty v peci a ocelového nosníku – experiment s ocelovým nosníkem .	33
Graf 14 Tlak v peci během zkoušky - experiment s ocelovým nosníkem	33
Graf 15 Zahřívání pece v numerickém modelu – prázdná pec.	40
Graf 16 Průběh tlaku v peci během simulace numerického modelu prázdné pece.....	41
Graf 17. Teploty z termočlánků v daných výškách pod stropem.....	43
Graf 18 Zahřívání pece s ocelovým stropním nosníkem dle DST v numerickém modelu.....	46
Graf 19 Průměrné teploty z TC v daných výškách v peci s ocelovým stropním nosníkem. ...	48
Graf 20 Teploty na ocelovém nosníku.....	49
Graf 21 Teploty na stojině a dolní pásnici ocelového nosníku – numerický model.....	50
Graf 22 Hodnota tlaku peci během simulace.....	50
Graf 23 Nárůst teploty v peci dle DST.	52
Graf 24 Porovnání hodnot tlaku v prostoru pece.	53
Graf 25 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.....	53
Graf 26 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.....	54

Graf 27 Porovnání teplot v peci v dané výškové poloze.....	54
Graf 28 Nárůst teploty v peci dle DST umístěných pod stropem.	55
Graf 29 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze.....	56
Graf 30 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze.....	56
Graf 31 Teploty v prostoru pece v dané výškové poloze.....	57
Graf 32 Teplota horní pásnice ocelového nosníku.....	57
Graf 33 Teplota stojiny a dolní pásnice ocelového nosníku dle DST.....	58
Graf 34 Tlak v prostoru pece.	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 Teploty pod stropem naměřené z experimentu v prázdné peci.....	26
Tabulka 2 Teploty naměřené pod stropem v daných výškách z experimentu s ocelovým 32	
Tabulka 3 Výkony hořáků dle experimentu ve zkušebně PAVUS a.s.....	39
Tabulka 4 Teploty pod stropem v numerickém modelu prázdné pece.	41
Tabulka 5 Výkony hořáků dle experimentu v peci s ocelovým nosníkem ve zkušebně PAVUS a.s.	45
Tabulka 6 Teploty pod stropem, numerický model – ocelový nosník.....	47
Tabulka 7 Teploty na ocelovém nosníku – numerický model	49