



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

POŽÁRNÍ NÁSTŘIKY

FIRE PROTECTION SPRAYS

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Vedoucí práce: Prof. Ing. František Wald, CSc.

Bc. Eliška Doležalová

Praha 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Tato práce byla podpořena Evropskou unií, OP VaVpI projekt č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Františku Waldovi, který mi svým vedením a cennými radami během konzultací pomohl při její tvorbě. Rovněž bych ráda poděkovala Ing. Vítězslavu Stankemu za poskytnutí protokolu zkoušky, který sloužil jako podklad pro vypracování této práce.

Nakonec bych ráda poděkovala svému příteli a rodině, která mě podporovala při celém mém dosavadním studiu.

Abstrakt

Práce shrnuje možnosti požární ochrany, popisuje ochranu stavebních konstrukcí požárními nástříky a obsahuje metody přestupu tepla do chráněné ocelové konstrukce.

Výsledkem jsou efektivní teplotně závislé vlastnosti požárního nástříku na základě teplot naměřených při experimentu. K výpočtu se použila přírůstková metoda podle evropských návrhových norem. Následuje ověření výsledků podle čínských návrhových norem a metodou konečných prvků. Po stanovení koeficientů pro výpočet tepelné vodivosti nástříku, který byl odzkoušen podle nominální hydrokarbonové teplotní křivky, je vyhodnocen podle nominální normové křivky. Na závěr jsou vykresleny návrhové diagramy pro požární odolnosti v časech 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 a 240 min.

Abstract

The thesis summarizes the possibilities of fire protection, describes the fire protection of building structures by sprays and includes methods of heat transfer in a protected steel structure.

The result is an effective temperature-dependent properties of the fire spray based on the temperatures measured in the experiment. To calculate was used the incremental method by European design standards. The results are validated according the Chinese design standards and final element method. After determining the coefficients for calculating the thermal conductivity of the spray which has been tested by the nominal Hydrocarbon temperature curve is evaluated by the nominal Standard curve. At the conclusion are drawn design diagrams for fire resistance times of 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 and 240 min.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ
 studijní obor: INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB
 akademický rok: 2013/2014

Jméno a příjmení diplomanta: ELIŠKA DOLEŽALOVÁ

Zadávací katedra: K134

Vedoucí diplomové práce: PROF. FRANTIŠEK WALD

Název diplomové práce: POŽÁRNÍ NÁSTŘIKY
 Název diplomové práce
 v anglickém jazyce: FIRE PROTECTION SPRAYS

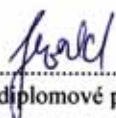
Rámcový obsah diplomové práce: STRAŽNÍ POŽÁRNÍ OCHRANY, MODELOVÁNÍ
POŽÁRNÍ OCHRANY, NÁVRH MODELU PŘESUNU TEPLA
PŘI POUŽITÍ POŽÁRNÍCH NÁSTŘIKŮ

Datum zadání diplomové práce: 9.9.2013 Termín odevzdání: 20.12.2013
 (vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.



 vedoucí diplomové práce



 vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 9.9.2013



 diplomant

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x diplomant, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání DP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se DP do databáze KOS.

DP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student DP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci stud. programů a SZS na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. ELIŠKA DOLEŽALOVÁNázev diplomové práce: POŽÁRNÍ NÁSTŘIKYZákladní část: STATIKA podíl: 100 %Formulace úkolů: ANALÝZA EXPERIMENTŮ PRO HYDROKARBONOVOU
ZKUSEBNÍ KŘIVKY, PŘEVEDENÍ NA NOMINÁLNÍ NORMOVOU
KŘIVKY, STROUČENÍ SOUČINITELŮ PRO KALKULACI MODEL
TEPLOTNÍ VODIVOSTI Z EXPERIMENTŮPodpis vedoucího DP: Datum: 24/9/2023

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Obsah

Úvod	1
1 Požární ochrana	2
2 Požární nástřiky	6
2.1 Začátky nástřiků v Československu	6
2.2 Nástřiky v dnešní podobě	9
3 Přestup tepla do chráněné konstrukce	14
3.1 Přírůstkové metody	15
3.1.1 EN 1993-1-2	15
3.1.2 CECS200-2006	16
3.1.3 Řešení MKP	20
3.2 Materiálové vlastnosti	22
3.2.1 Tepelné vlastnosti oceli	22
3.2.2 Tepelné vlastnosti požární ochrany	24
4 Experimenty	29
4.1 Vstupní hodnoty do výpočtu	30
5 Cíle práce	35
6 Výpočetní analytický model	36
6.1 Ověření modelu dle čínských návrhových norem	60
6.2 Ověření metodou konečných prvků	64
7 Vyhodnocení	68
8 Závěr	78
Literatura	79

Úvod

Pro stavební konstrukce je velmi důležitá jejich odolnost při vystavení požáru. Proto v dnešní době roste zájem o požární ochranu stavebních konstrukcí. Firmy se snaží vyvíjet požárně ochranné materiály s co nejlepšími tepelnými vlastnostmi a vysokou požární odolností. Po prostudování možností požárních ochran jsem si pro zpracování diplomové práce vybrala problematiku požárních nástřiků.

V práci budou popsány požární nástřiky používané v dřívějších dobách v Československu a nástřiky používané dnes. K vypracování práce byly získány od firmy Promat protokoly o zkoušce požárního nástřiku odzkoušeného podle nominální hydrokarbonové teplotní křivky. Budou uvedeny podrobnější informace o použitých zkušebních vzorcích a popis naneseného požárního nástřiku. Úkolem je pomocí přírůstkové metody přestupu tepla zjistit efektivní teplotně závislé vlastnosti nástřiku a následně ho vyhodnotit podle nominální normové teplotní křivky.

Budou popsány tepelné vlastnosti použitých materiálů a modely přestupu tepla přírůstkovými metodami podle evropských a čínských návrhových norem a metodou konečných prvků. K výpočtu efektivních tepelně závislých vlastností nástřiku bude použita přírůstková metoda podle evropských norem a pro ověření zbylé dvě popsání modely přestupu tepla.

Výstupem pro firmu Promat bude tabulka popisující závislost efektivní tepelné vodivosti na teplotě a návrhové diagramy pro požární odolnosti 30 až 240 min. Diagramy budou zobrazovat teploty chráněných ocelových prvků různých dimenzí požárního nástřiku pro hodnoty součinitele průřezu 76 až 386 m⁻¹.

Kapitola 1

Požární ochrana

Požárně ochranný systém musí projít normovým testem ve zkušební peci a musí splnit normové požadavky. Důležitými požadavky jsou soudržnost požární ochrany s povrchem a zachování celistvosti během požáru. Požární odolnost je ovlivněna i zpracováním, stavem a kvalitou podkladu.

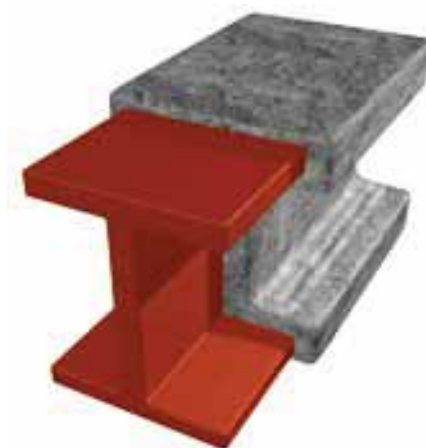
Požární odolnost stavebních nosných konstrukcí je dle České technické normy ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb-Společná ustanovení dána třemi základními mezními stavy. Jedná se o nosnost konstrukce $R(t)$, celistvost konstrukce $E(t)$ a tepelnou izolaci konstrukce $I(t)$. Pro potřeby projektování jsou tyto hodnoty vyjádřeny dobou, po kterou jsou schopny při požáru plnit svoji funkci.

Mnoho stavebních konstrukcí dokáže splnit požadované požární odolnosti. Část konstrukcí se musí požárně chránit dodatečnými úpravami. Každý způsob ochrany má své přednosti a nedostatky. Úkolem projektanta je zvážit konkrétní podmínky stavby (technické, ekonomické a dodavatelské) a vybrat nejvhodnější řešení ochrany.

Výběr a aplikace hmot vhodných k ochraně ocelových konstrukcí je ovlivňován fyzikálně-chemickými vlastnostmi (tepelně izolační schopnost, hořlavost, objemová stálost, objemová hmotnost, korozivní účinky, přilnavost povrchu a životnost), technologií prováděné ochrany, ekonomickými hledisky (velikost průřezové plochy a celková hospodárnost) a některými dalšími kritérii podle povahy objektu, jako jsou povrchová úprava a hygienická hlediska.

Dlouhodobé požární ochrany lze dosáhnout pomocí požárních tepelně izolačních nástřiků, obrázek 1.1, a obkladů, obrázek 1.2. Tyto materiály na bázi anorganických hmot stárnou velmi pomalu. Nepodléhají příliš vlivům prostředí a jsou i mechanicky velmi odolné proti zásahům z vnějšího prostředí. Lze se s nimi setkat i ve starších stavbách prakticky v nezměněném stavu. Požárním nástřikům je věnována kapitola 2.

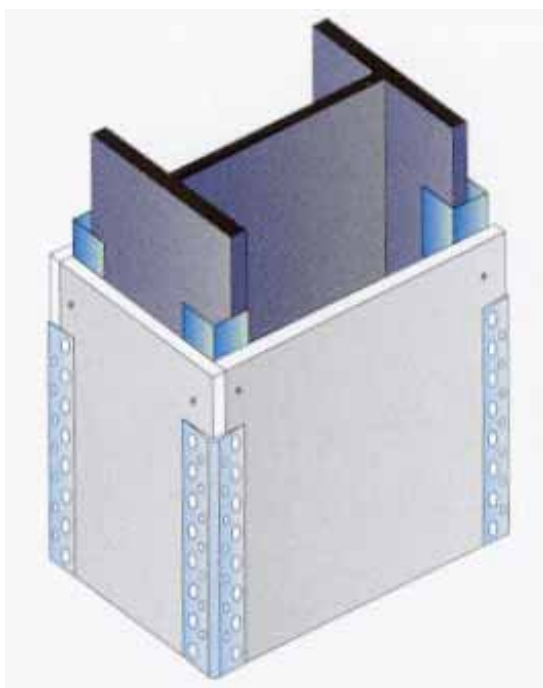
Mezi oblíbenou formu zvyšování požární odolnosti stavebních konstrukcí patří požární obklady. Jedná se o suchou technologii, kdy se konstrukce opláští nehořlavým materiálem s určitou izolační schopností. Obklady jsou po celou dobu své životnosti stejné, nemusí se obnovovat a při zabudování již mají požární vlastnosti. Hlavní nevýhodou je vysoká pracnost provádění ochrany, protože se pro uchycení desek používají pomocné profily. Chráněné kon-



Obrázek 1.1: Požární nástrih z materiálu na bázi minerální vaty [7]

strukce se musí před obložením natřít impregnačním (dřevo) či protikorozním (ocel) nátěrem, aby pod obkladem nedocházelo k degradaci materiálu. Mezi výhody požárních obkladů patří nízká hmotnost, libovolné tvarování desek, barevné řešení a estetický vzhled a při vyšších odolnostech (nad 60 min) jsou levnější než nástriky a nátěry [1].

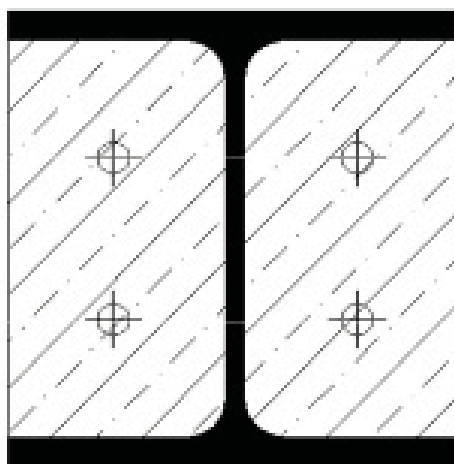
Deskové obklady se vyrábějí cementové, sádrové, vápenocementové nebo z minerálních vláken. Desky mohou být homogenní, sendvičové nebo vrstvené.



Obrázek 1.2: Požární obklad ze sádrokartonových desek [6]

Jiný způsob požární ochrany je obetonování či obezdění konstrukce. Jedná se o jednu z nejstarších a tradičních technologií. Obetonování se dnes nahrazuje ocelobetonovými konstrukcemi, vzhledem k pracnosti a váze betonu. Ocelové sloupy s uzavřenými průřezy se vy-

betonovávaají. Sloup se navrtá ve spodní a vrchní části podlaží (maximálně ve vzdálenosti 10 m) a do spodního otvoru se poté vloží hubice, kterou se čerpá betonová směs až do úrovně vrchního otvoru. Vrchní otvor musí zůstat otevřený, aby umožňoval odvod páry z betonu při požáru. Obezdní je mokřý proces. Účinnost je dána tloušťkou obezdní, materiálem a druhem omítky. Přenos tepla závisí na tepelném odporu, neboli součiniteli prostupu tepla přízdívky. Klasické cihly jsou vodivější a proto je lepší použít lehčené tvárnice, např. pórobetonové nebo křemelinové, s menší vodivostí. Jejich nevýhodou je křehkost a velký počet spár, které dovolují vznik tepelných mostů [1].



Obrázek 1.3: Částečné obetonování ocelového otevřeného profilu

Poslední způsob ochrany stavebních konstrukcí před požárem jsou požární nátěry. Nátěry se dají rozdělit do tří skupin, a to zábranové, zpěňující a sublimující.

Zábranové nátěry zabraňují přístupu plamene k povrchu chráněného předmětu. Uplatňují se především u hořlavých konstrukcí jako jsou plasty a dřevo. Tento nátěr brání přístupu kyslíku, což je jedna ze tří základních podmínek vzniku požáru. Oproti zpěňujícím nátěrům nemají žádnou izolační schopnost.

Intumescentní neboli zpěňující nátěry, obrázek 1.4, dokáží při působení zvýšených teplot několikanásobně zvětšit svůj objem. Napětí vytvoří izolační vrstvu, která je schopna ochránit danou konstrukci. Na povrchu se díky chemické reakci polyalkoholů s kyselinami vytvoří uhlíkatý zbytek, který brání přístupu plamene k povrchu. Nátěry se používají hlavně u ocelových konstrukcí, ale mohou se použít i u dřevěných a plastových konstrukcí.

Sublimující nátěry kombinují nátěr zábranový a intumescentní. Podstatou je poměrně silná vrstva, vyztužená obvykle skleněnými vlákny či rohožemi, ve které se snadno teplem rozkládají a sublimují aditiva v polymerním, obvykle epoxidovém pojivu, která se při vyšších teplotách začínají odpařovat, respektive sublimovat. Odcházející plyny strhují plamen a ochlazuje povrch na kterém jsou naneseny. Tento typ nátěrů lze použít i v extrémních podmínkách, protože je výjimečný svou stálostí a dlouhou životností. Dokáže vzdorovat povětrnostním



Obrázek 1.4: Napěnění intumescentního nátěru při působení zvýšených teplot [20]

vlivům, proto je vhodný i do nepřístupných míst v exteriéru. Jeho hlavní nevýhodou je cena, která brání jeho širšímu uplatnění [1].

Kapitola 2

Požární nástřiky

V této kapitole přehled požárních nástřiků, které se používali v historii a které již nejsou na našem trhu.

S výjimkou deskových silikátových obkladů jsou požární nástřikové hmoty jedním z prvních ochranných systémů, které se ve stavebnictví používaly již v dávných dobách. Nejstarším materiálem byl jíl a hliněné omítky, kterými se chránily dřevěné a rákosové stěny stavebních objektů. V některých zemích se užívají dodnes i když ne jenom jako ochrana proti požáru. Ke zvýšení požární odolnosti sloužily po celá staletí vápenné a cementové omítky. Tepelně izolační vlastnosti všech těchto materiálů byly poměrně nízké. Již v 17. století existovaly nejrůznější požární řády a nařízení pro konstrukce staveb, ale i přesto byla požární ochrana jednotlivých objektů řešena téměř vždy individuálně [3].

Výhoda nástřiků spočívá v relativně nízké hmotnosti vzhledem k dobré požární odolnosti a nižší staveništní pracnosti.

2.1 Začátky nástřiků v Československu

První moderní typy tepelně izolačních omítek a požárních nástřikových hmot se u nás objevily již koncem 19. a počátkem 20. století. Bohužel se žádné bližší údaje nezachovaly. Převážně se jednalo o sádrové omítky a štuky nevyztužené či vyztužené pletivem.

Přesnější informace o požárních ochranách jsou k dispozici až od 70. let minulého století. Po velkých požárech, které vypukly v Praze a Ostravě a s ohledem na přípravu stavby první moderní jaderné elektrárny Dukovany řada výzkumných pracovišť v celé republice začala intenzivně vyvíjet požární hmoty a konstrukce. Pro potřeby velkých administrativních objektů dovozních společností a dalších budov (KOVO, STROJIMPORT, MOTOKOV, CHEMAPOL nebo Palác kultury), jejichž výstavba byla zahájena v těchto letech, byly dováženy i požární nástřiky ze zahraničí. Některé z těchto nástřiků byly ověřovány i zkouškami v České republice.

Častá surovina používaná do požárních nástřiků v zahraničí byla azbest. V tehdejší Československu bylo ložisek dlouhovláknitých azbestů nedostatek. Proto vývoj směřoval

k používání dostupných minerálních materiálů, například čedičových, skelných, struskových a perlitových s různými pojivy a přísadami. Dnes je krátkovláknitý azbest prokázán jako karcinogenní a proto se v současné době odstraňuje.

Nástřiky na bázi azbestů se vyráběly pod různými obchodními názvy. Nástřiky, které byly aplikovány v Československu, nebo které byly popsány v dostupné literatuře, jsou uvedeny dále. Nástřík LIMPET byl směs dlouhovláknitých azbestových vláken s pojivem a vodou. K nám ho dovážela anglická firma J.W.Roberts Ltd.. Jugoslávská firma Termika udávala tyto doporučené hodnoty fyzikálních vlastností [2]:

$$\rho = 130 \text{ až } 200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,044 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$c = 0,84 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Normové hodnoty požární odolnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1. Tyto hodnoty platí pouze pro nástřiky, které jsou stlačeny hladítkem.

Azbestospray je směsí minerální vlny a osinku se suchým anorganickým pojivem. Před vlastním nástřikem se nejdříve provede nástřík syntetického adheziva pro dobré zachycení k podkladu. Dokončování se provádělo válečkem nebo hladítkem. Normové hodnoty požární odolnosti chráněných ocelových prvků jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Nástřík LIMPET a jeho obdoba Azbestospray obsahovaly až 75 % objemu azbestových vláken.

Tabulka 2.1: Požární odolnost ocelových sloupů a nosníků chráněných nástřikem dle ČSN 73 0821, tabulka 5A, položka 2 a tabulka 9, položka 2 [2]

Druh nástřiku	Požární odolnost [min]			
	100 < O/F ≤ 150 m ⁻¹		150 < O/F ≤ 300 m ⁻¹	
	sloup	nosník	sloup	nosník
Na bázi azbestů (Limpet, Azbestospray)				
tloušťky 10 mm	55	60	40	45
tloušťky 20 mm	95	100	75	80
tloušťky 30 mm	135	140	105	110
tloušťky 40 mm	180	200	140	150
tloušťky 50 mm		240		220
tloušťky 55 mm	240		180	
Na bázi perlitů nebo vermikulitů (Sibaterm, Metizol, Pyrok)				
tloušťky 20 mm	75	80	55	60
tloušťky 30 mm	110	120	85	90
tloušťky 40 mm	150	180	120	130

Nástřík Comprispray je směsí minerální vlny a osinku s taveným hlinitanovým cementem, do něhož se přidávala během stříkání voda. Tento materiál se nanášel přímo na konstrukci

bez adhezního nástřiku. Další nástřik Pistofibre P.I. je směsí minerálních vláken s obsahem 85 % bílého osinku stříkaného s pojivem (vynilickým). Podle údajů výrobce vrstva tloušťky 30 mm tohoto nástřiku na ocelovém sloupu zvyšuje požární odolnost prvku na hodnotu 120 min [2].

Nástřik Silbestos je směs rozvlákněného krokydolitů s pojivem a vodou. Výrobce, firma Hamilton Gilmour Sprayed Asbestos LTD Velká Británie, vyráběl i stříkací zařízení. Orientační hodnoty fyzikálních vlastností jsou [2]:

$$\rho = 200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,046 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$c = 0,84 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Za jedny z nejlepších, nejúčinnější a nejstabilnější lze považovat tepelně izolační omítky na bázi vermikulitu. Nástřiky lze aplikovat v poměrně tenkých vrstvách, jsou soudržné a dají se povrchově upravovat stejně jako běžné druhy vápenocementových omítek. Tento druh nástřiků může obsahovat i ztužující minerální vlákna a je schopen odolávat i povětrnostním vlivům.

V 70. a 80. letech byly na bázi vermikulitu nabízeny dva nástřiky a to tepelně izolační omítky Thermax, která byla dovážena od rakouské firmy Isovelta a přípravek PYROK od anglické firmy PYROK Ltd..

Nástřik Pyrok je strojně nanášená původně vermikulitová omítková hmota, převzatá z Velké Británie. Aplikací licence do našich podmínek u výrobce Národní podnik Stavoservis Praha byl deficitní vermikulit nahrazen domácím perlitem. Jeho složení je jeden objemový díl cementu, jeden objemový díl vápna a pět objemových dílů perlitu. V porovnání s pružností vermikulitických slíd jsou perlitová zrna křehká a tvrdá. Proto tento nástřik s perlitem vykazuje nižší požární odolnost nežli Pyrok s vermikulitem [3].

Českou obdobou byl nástřik Metizol-P, který vyráběl kolínský závod Národní podnik Stavební izolace Praha. Tento nástřik je směs minerálního vlákna typu A, portlandského cementu, disperze PVAC BD-20 a modifikačních přísad. Nanáší se stříkáním s použitím strojního zařízení zvaného Izomet. Povrch ocelové konstrukce se nejprve opatří antikoročním nátěrem (zinkochromátová barva), případně může být obalena tahokovem. Na takto upravený a zaschlý povrch se nanáší kotvicí nátěr, do kterého se ještě před zaschnutím nastříká vláknitá hmota Metizol-P v jedné nebo více vrstvách. Nástřik se prováděl ve stejnosměrné tloušťce 10 až 40 mm. Povrch se nakonec upravil válečkem nebo hladítkem. Tuto povrchovou úpravu bylo třeba provést dodatečně. Doporučené hodnoty fyzikálních vlastností jsou [2]:

$$\rho = 250 \text{ až } 320 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,057 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

V roce 1971 byly ve VÚPS Veselí nad Lužnicí provedeny zkoušky ocelových sloupů chráněných tímto nástřikem. Hodnoty uvedené v závěrečné zprávě byly neplatné, protože závěry byly zpracovány pro kritickou teplotu $T_{crit} = 350^\circ\text{C}$. Tento nástřik měl horší vlast-

nosti, ale požadavky tehdejších norem splňoval. V současnosti tento nástřík již není v České republice nabízen.

Další velmi dobře propracovaný byl i slovenský nástřík Sibaterm, vyráběný a aplikovaný přibližně od roku 1992 firmou Stavoindustry, Bratislava. Jedná se o stříkanou směs složenou z perlitu, čedičových vláken, cementu a zvláštních přísad s vodou. Ocelová konstrukce se musí před nástříkem opatřit základním nátěrem a nátěrem kotvicím nebo tahokovem kvůli dobré adhezi. Mokrý napěněná směs se dopravuje hadicovým čerpadlem k rozstřikovací hubici, která stlačeným vzduchem vrhá rozptýlenou směs na požadovanou plochu oceli. Směs lze zpracovávat při teplotách od 0 °C do 40 °C. Vhodná povrchová úprava je buď tradiční omítka či tenkovrstvá hmota (Plaston, Introplast, Polycem, Eternex či latexové nástříky). Doporučené hodnoty fyzikálních vlastností jsou [2]:

$$\rho = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,091 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Mezi některé další nástříky také patří Thermax, Termizol, Unipron či dovážený maďarský nástřík Polystop K-Poliplast, který k nám byl dovážen kolem roku 1992 maďarskou firmou Dunamenti.

Většina dříve vyráběných nástříků nebyla příliš rozšířena a postupně se upouštělo od jejich používání. V pozdějších letech bylo omezeno a nakonec úplně zakázáno používání nástříků na bázi azbestu. Většina nástříků zmizela z trhu, když v 90. letech minulého století zanikl jejich výrobce.

Na trhu se dodnes udrželo pouze několik systémů, které byly dostatečně propracovány a které snesou náročná měřítka postupně se zpřísnujících norem a požadavků.

2.2 Nástříky v dnešní podobě

Schémata základního rozdělení požárních nástříků podle jejich složení je na obr. 2.1.

Nejrozšířenějším typem tepelně izolačních omítkovin na našem trhu jsou nástříky na bázi expandovaného perlitu. Hlavní složkou tohoto nástříku je experlit, dále je tvořen vápnem a cementem a eventuálně může být doplněn dalšími plnivy, přísadami disperze a jako armující složka minerální či skleněná vlákna. V posledních deseti letech český trh zcela ovládly modernější systémy nabízené pod obchodními názvy Porfix, Terfix a v modifikované formě nástřík Termo. Na těchto systémech je modernější a jednodušší hlavně zpracování hmoty na stavbě. V současnosti je vyrábějí tři výrobci z Čech a Moravy a až donedávna se jednalo o nejlevnější a v některých případech jediný možný způsob požární ochrany zejména u tyčových prvků.

Vývoj systému Porfix byl zahájen v letech 1972-1974 ve Výzkumném vývojovém ústavu Stavebních závodů Praha a patří mezi pokrokové typy nástříků. Porfix je syntetická stříkaná



Obrázek 2.1: Základní rozdělení požárních nástřiků z hlediska jejich složení

omítkovina, která obsahuje jako jediné pojivo speciální disperzní polymer s nehořlavým změkčovadlem. Proto si hmota udržuje potřebný stupeň elasticity při velmi dobré přilnavosti na podklad. Plnivo tohoto nástřiku je expandovaný perlit. Hmota je vyráběna v konzistenci husté vláknité pasty připravené k přímé aplikaci výhradně v tloušťce od 5 mm do 40 mm. Porfix lze nanášet na podklady opatřené základním antikoročním nátěrem různých typů (suříkové, syntetické či jiné základní barvy). Tento základní nátěr je vzhledem k mírně kyselému charakteru Porfixu velmi důležitý. Povrchovou úpravu lze provádět buď tmelením povrchu Armotixem či stěrkovou úpravou Fibroplastem. Konečnou povrchovou úpravu lze provést běžně používanými hmotami pro malířské úpravy.

Aplikace této hmoty byla vyzkoušena při ochraně ocelové konstrukce nové budovy odbovovací haly Hlavního nádraží v Praze. Doporučená hodnota objemové hmotnosti je [2]:

$$\rho = 650 \text{ kg/m}^3$$

Orientační hodnoty tepelné vodivosti a vlhkosti jsou:

$$\lambda = 0,175 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$w = 5,0 \text{ \%}$$

U vývojové řady Termo byla vodní disperze nahrazena disperzním práškovým pojivem a některé složky obsahující vodu byly zaměněny za vhodnější. Tím vznikla kompletní směs Terfix, která je vyráběna v suchém stavu. Má to výhody při jejím zpracování, protože nemusí být skladována při teplotách nad bodem mrazu. Při aplikaci se pouze rozmíchá s vodou.

Pro aplikaci požárních nástřiků má hmota vlastní dimenzační tabulku, která je vypočtena na základě průkazných zkoušek. Jejich vlastnosti jsou nezaměnitelné. Nástřiky Porfix, Terfix a Termo byly průkazně odzkoušeny jako ochrana ocelových a železobetonových konstrukcí dle normy ČSN 73 0851 Stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí až do požární odolnosti R(EI) 180 a u dřevěných tyčových prvcích (nosníky/sloupy) až do požární odolnosti R 90.

Další typ nástřiků je tepelně izolační nástřik na bázi experlitu, kde se jako pojivo užívá síran vápenatý (sádra). Tato změna umožňuje mírné zlepšení požárních vlastností systému, protože sádra při požáru ztrácí vodu a ochlazuje plamen, přičemž s ohledem na armující složky si nástřik dlouhodobě zachovává svoji tepelně izolační funkci. Jediný nástřik na našem trhu je slovenský systém PYROTHERM. Byl vyvinut Výzkumným ústavem stavebním v Košicích v letech 1976-1978. Tento nástřik byl průkazně odzkoušen na ocelové konstrukce do požární odolnosti R 180 a stále je jediným nástřikem na této bázi, který se u nás používá. V případě, že je do detailu dodržena správná aplikační technologie, jde o velmi kvalitní a účinný systém.

Experlitové omítky se liší od vermikulitových nástřiků nižší tepelně izolační schopností. Při požadavcích na vyšší požární odolnost tyto omítky vyžadují aplikaci silnějších vrstev a v některých případech kotvení do pletiva. To je vynahrazováno podstatně nižší cenou. U těchto nástřiků je velmi obtížná povrchová úprava, protože se hmota nedá s ohledem na experlit a vlákna dobře uhlazovat. Omítky se proto používají spíše v průmyslových prostorách, skladech a výrobních halách. To znamená tam, kde se příliš nehledí na estetiku konstrukce nebo tam, kde je nástřik skrytý pod podhledem.

Mezi další požární nástřiky používané v dnešní době patří PROMASPRAY[®] nebo Cafco FENDOLITE[®] MII, které vyvinula a odzkoušela firma Promat Praha s r.o.. Nástřik PROMASPRAY[®] má několik typů.

PROMASPRAY[®] F250 je průmyslově vyráběná suchá omítková směs určená pro nástřik konstrukcí ve vnitřním prostředí. Je vyroben na základě směsi z biorozpustných minerálních vláken a cementového pojiva. Za běžných podmínek tento nástřik nepraská a ani se neláme. Je určen pro aplikaci na ocelové a betonové konstrukce a stropy z trapézových plechů. Je také vhodný pro aplikace na prvky složitějších tvarů nebo jako požárně ochranná membrána.

Konstrukce chráněné nástřikem PROMASPRAY[®] F250 prošly řadou testů požární odolnosti ve schválených nezávislých laboratořích na celém světě. Nástřik je trvanlivý s nízkou objemovou hmotností a splňuje hodnoty požární odolnosti až do 240 min. Při aplikaci na stropní konstrukce je velmi účinný jako tepelná izolace. Vlastnosti udávané výrobcem jsou [8]:

$$\rho = 264 \text{ kg/m}^3 \pm 40 \text{ kg/m}^3 \text{ (provedeného nástřiku)}$$

$$\lambda = 0,043 \text{ W/m}\cdot\text{K při } 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Třída reakce na oheň} = \text{A1 dle ČSN EN 13501-1}$$

Další nástřik PROMASPRAY[®] P300 je také průmyslově vyráběná suchá omítková směs pro nástřik do vnitřního prostředí. Nástřik je složen ze směsi sádry a vermikulitu. Používá se jako lehká a účinná protipožární ochrana ocelových a betonových konstrukcí a stropů z trapézových plechů při dosažení minimální tloušťky nástřiku. Je vhodný pro aplikace na prvky složitých tvarů. Konstrukce chráněné tímto nástřikem mohou dosahovat až 240

min. Vlastnosti udávané výrobcem jsou [9]:

$$\rho = 310 \text{ kg/m}^3 \pm 15 \% \text{ bez akceleratoru, přibližně o } 10 \% \text{ méně s urychlovačem}$$

$$\lambda = 0,078 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Třída reakce na oheň = A1 dle ČSN EN 13501-1



Obrázek 2.2: Nástřík PROMASPRAY[®] P300 [9]

Poslední typ z řady PROMASPRAY[®] je nástřík PROMASPRAY[®] T. Jedná se o průmyslově vyráběnou suchou omítkovou směs složenou z biorozpuštěných minerálních vláken a cementového pojiva a je určen pro nástřík stavebních konstrukcí v interiéru budov. Na rozdíl od nástříku PROMASPRAY[®] F250 lze nástřík použít v místech, kde je nástřík chráněn před přímým působením klimatických podmínek.

PROMASPRAY[®] T se používá nejen jako tepelná izolace stavebních konstrukcí, ale i pro zlepšení akustických a požárně ochranných vlastností. Nástřík je určen pro aplikaci na betonové a ocelobetonové konstrukce. Zejména se používá na železobetonové stropní desky, průvlaky a trámy a na stropní konstrukce z trapézového nebo samosvorného plechu a betonovou výplň. Je vhodný pro aplikaci na prvky složitých tvarů. Jeho vlastnosti udávané výrobcem jsou [10]:

$$\rho = 165 \text{ kg/m}^3 \pm 9 \% \text{ (provedeného a vytvrzeného nástříku)}$$

$$\lambda = 0,041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Třída reakce na oheň = A1 dle ČSN EN 13501-1

Poslední výše zmíněný nástřík je Cafco FENDOLITE[®] MII. Jedná se o průmyslově vyráběnou suchou omítkovou směs pro nástřík do vnitřního i venkovního prostředí. Je vyroben ze směsi portlandského cementu a vermikulitu. Nanáší se jako monolitický povlak, který odolává teplotním šokům, například při vysoké intenzitě požáru uhlovodíků. V případě výbuchu má výbornou odolnost proti odprýskávání a při mechanickém namáhání je také dobře odolný proti odprýskávání a drolení. Díky nízké objemové hmotnosti příliš staticky

Obrázek 2.3: Nástřik PROMASPRAY[®] T [10]

nezatěžuje chráněnou konstrukci [11].

Obrázek 2.4: Nástřik Cafco FENDOLITE[®] MII

Nástřik je určen pro petrochemický průmysl a tunelové stavby. Je odzkoušen podle hydrokarbonové křivky. Používá se pro aplikaci na stavební prvky, jako jsou betonové nebo ocelové konstrukce. Udávané vlastnosti jsou:

$$\rho = 775 \text{ kg/m}^3 \pm 15 \% \text{ (v suchém stavu)}$$

$$\lambda = 0,19 \text{ W/m}\cdot\text{K při } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Třída reakce na oheň = A1 dle ČSN EN 13501-1

Kapitola 3

Přestup tepla do chráněné konstrukce

Lze rozlišit tři základní mechanismy sdílení tepla; vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). Při vedení dochází k výměně energie pevných látek na molekulární úrovni, ale bez pohybu makroskopických částí hmoty ve vztahu k sobě navzájem. Proudění se týká přenosu tepla na rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou. Záření je výměna energie elektromagnetickými vlnami, které mohou být absorbovány, přenášet se nebo se odrážet na povrchu. Na rozdíl od vedení a proudění, přenos tepla zářením nevyžaduje žádná mezilehlá média mezi tepelným zdrojem a přijímačem.

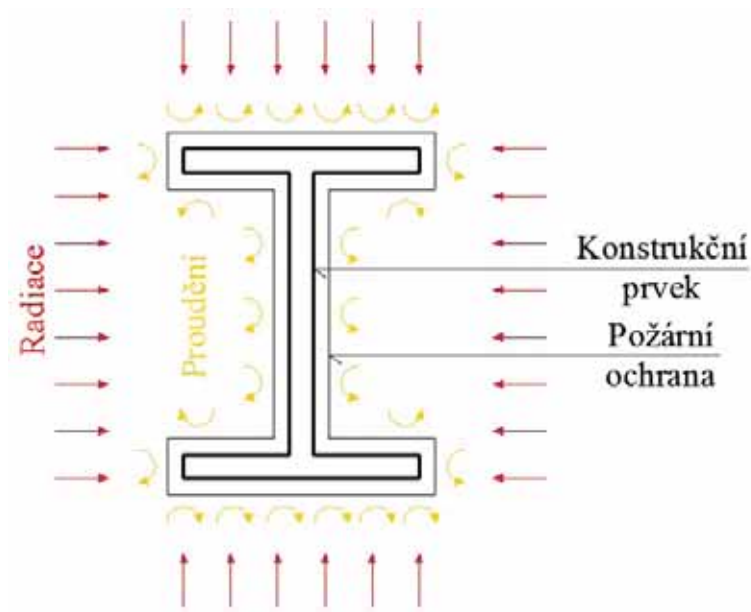
Analýza reakce teploty na konstrukční prvky může být rozdělena na dvě části. Jedna z nich je přenos tepla přes hranice z požáru na povrch konstrukčního prvku, který je kombinací proudění a sálání. Ty jsou obvykle považovány za okrajové podmínky. Na druhé straně je přenos tepla v rámci konstrukčního prvku, kterým je vedení.

Základní rovnice pro jednorozměrné vedení tepla v ustáleném stavu je Fourierův zákon vedení tepla. Tento zákon je vyjádřen jako:

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

kde ∂T je teplotní rozdíl po nekonečné tloušťce ∂x , Q je rychlost přenosu tepla (tepelný tok) po tloušťce materiálu a λ je součinitel tepelné vodivosti. Podrobnější informace o tepelné vodivosti materiálů při vysokých teplotách uvedu v kapitole 3.2. Z rovnice vyplývá, že znaménko mínus určuje tepelný tok ze strany s vyšší teplotou na stranu s teplotou nižší.

Přenos tepla mezi horkým kouřem a povrchem konstrukčního prvku je zprostředkován radiací a prouděním (konvekcí) [13].



Obrázek 3.1: Přenos tepla mezi horkým kouřem a konstrukčním prvkem

Modely přestupu tepla lze rozdělit na jednoduché přímé, analytické přírůstkové a MKP (metoda konečných prvků) 2D a 3D.

3.1 Přírůstkové metody

Přírůstkové modely vychází z jednoduchého principu ohřívání objemu v závislosti na velikosti prvku vystaveného požáru. Přírůstkové metody vykazují pro materiály s vysokou teplotní vodivostí, ocel, litina, hliník, dobrou přesnost a využívají je normové postupy.

Nejnovější praxí ověřené analytické modely jsou modely v [14] a v [15].

3.1.1 EN 1993-1-2

Výpočetní modely vychází z představy rovnoměrného rozložení teploty po průřezu. Teplotní přírůstek $\Delta\theta_{a,t}$ izolovaného ocelového prvku v průběhu časového intervalu Δt se může spočítat z rovnice [14]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot \frac{A_p}{V}}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (3.2)$$

$$(\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad \text{když} \quad \Delta\theta_{g,t} > 0)$$

a vzorec pro tepelnou jímavost ϕ je

$$\phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} \quad (3.3)$$

kde

$\frac{A_p}{V}$	je součinitel průřezu [m^{-1}]
A_p	je oblast požárně ochranného materiálu na jednotku délky prvku [m^2]
V	je objem prvku na jednotku délky [m^3]
c_a	je měrná tepelná kapacita oceli [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]
c_p	je teplotně nezávislá měrná tepelná kapacita ochranného materiálu [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]
d_p	je tloušťka ochranného materiálu [m]
Δt	je časový přírůstek [s] rozmezí $\langle 5\text{s}; 30\text{s} \rangle$
$\theta_{a,t}$	je teplota oceli [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{g,t}$	je teplota plynu [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta\theta_{a,t}$	je přírůstek teploty oceli [$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta\theta_{g,t}$	je přírůstek okolní teploty plynu v průběhu časového intervalu [$^{\circ}\text{C}$]
λ_p	je součinitel tepelné vodivosti ochranného materiálu [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]
ρ_a	je hustota oceli [kg/m^3]
ρ_p	je hustota ochranného materiálu [kg/m^3]

Hodnota časového přírůstku Δt by neměla překročit 30 sekund. Čím je hodnota tohoto přírůstku větší, tím větší se vnaší do výpočtu chyba.

3.1.2 CECS200-2006

Konstrukční prvek je v závislosti na součiniteli průřezu $\frac{F}{V}$ rozdělen na sekci lehkých komponentů a těžkých komponentů.

Povlak pro ochranu prvků z konstrukční oceli se dělí na lehké a těžké požární ochrany. Pro lehkou požární ochranu platí, že teplo absorbované požárně ochranným materiálem může být ignorováno. V opačném případě u těžké požární ochrany, teplo absorbované ochranným materiálem nemůže být ignorováno. Přestup tepla a rozložení teploty v celé konstrukční části mají různé typy.

Konstrukční prvek s lehkým požárně ochranným materiálem

Tepelné vlastnosti lehkých požárních ochran splňují podmínku

$$c_s \cdot \rho_s \cdot V \geq 2 \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot F_i \quad (3.4)$$

Výpočet přestupu tepla mezi horkým vzduchem a požární ochranou je

$$q = \alpha \cdot F'_i \cdot (T_g - T_b) \quad (3.5)$$

kde

T_b je teplota plynu [°C]

T_b je teplota na povrchu požárně ochranného materiálu [°C]

F'_i je vnější plocha požární ochrany na jednotku délky [$\frac{m^2}{m}$].

Výpočet přestupu tepla mezi požární ochranou a konstrukčním prvkem je

$$q = \frac{\lambda_i}{d} \cdot F'_i \cdot (T_b - T_s) \quad (3.6)$$

kde T_s je teplota konstrukčního prvku.

Rovnici přestupu tepla pro nechráněný konstrukční prvek můžeme přepsat jako

$$q = \alpha \cdot F'_i \cdot (T_g - T_s) \quad (3.7)$$

kde α je součinitel prostupu tepla, který se vypočítá jako

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r + \alpha_c} + \frac{d_i}{\lambda_i} \cdot \frac{F'_i}{F_i}} \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r + \alpha_c} + \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (3.8)$$

Obecně platí, že $\alpha_r + \alpha_c$ je mnohem větší než $\frac{\lambda_i}{d_i}$. Proto je α přibližně vyjádřena jako

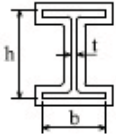
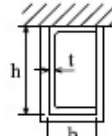
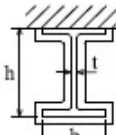
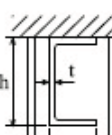
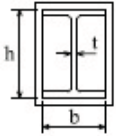
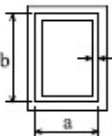
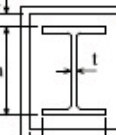
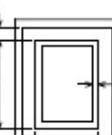
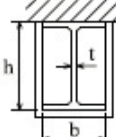
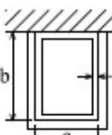
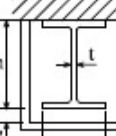
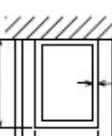
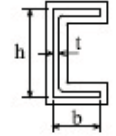
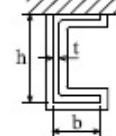
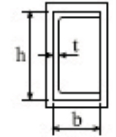
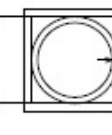
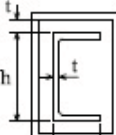
$$\alpha = \frac{\lambda_i}{d_i} \quad (3.9)$$

Přírůstek teploty oceli potom je

$$\Delta T_s = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{F_i}{V} \cdot (T_g - T_s) \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

Časový přírůstek Δt se doporučuje menší než 30 s. Rovnice pro vyjádření součinitele průřezu různých chráněných konstrukčních prvků je uvedeno v tabulce 3.1 [12].

Tabulka 3.1: Součinitel průřezu pro chráněné konstrukční prvky [12]

Typ průřezu	$\frac{F_i}{V}$	Typ průřezu	$\frac{F_i}{V}$
	$\frac{2 \cdot h + 4 \cdot b - 2 \cdot t}{A}$		$\frac{2 \cdot h + b}{A}$
	$\frac{2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot t}{A}$		$\frac{2 \cdot h + b}{A}, t \leq h/4$
	$\frac{2 \cdot (h + b)}{A}$		$\frac{a + b}{t \cdot (a + b - 2 \cdot t)}$
	$\frac{2 \cdot (h + b)}{A}, t \leq h/4$		$\frac{a + b}{t \cdot (a + b - 2 \cdot t)}, t \leq h/4$
	$\frac{2 \cdot h + b}{A}$		$\frac{a + b/2}{t \cdot (a + b - 2 \cdot t)}$
	$\frac{2 \cdot h + b}{A}, t \leq h/t$		$\frac{a + b/2}{t \cdot (a + b - 2 \cdot t)}, t \leq b/4$
	$\frac{2 \cdot h + 4 \cdot b - 2 \cdot t}{A}$		$\frac{d}{t \cdot (d - t)}$
	$\frac{2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot t}{A}$		$\frac{t}{t \cdot (d - t)}, t \leq d/4$
	$\frac{2 \cdot (h + b)}{A}$		$\frac{d}{t \cdot (d - t)}$
	$\frac{2 \cdot (h + b)}{A}, t \leq h/4$		

Konstrukční prvek s těžkým požárně ochranným materiálem

V případě, že vlastnosti požárně ochranného materiálu nesplňují podmínku, nazývá se požární ochrana těžká. Teplo absorbované požárně ochranným materiálem je třeba zvážit ve výpočtu konstrukčního prvku při nanesení těžké požární ochrany [12].

Energetická rovnováha požární ochrany je vyjádřena jako

$$\lambda_i \cdot \frac{\partial T_i^2}{\partial x^2} - \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

Okrajové podmínky jsou

a) na rozhraní teplého vzduchu a požární ochrany

$$T_i(x, 0) = T_0 \quad (3.12)$$

b) na rozhraní teplého vzduchu a požární ochrany

$$F_i \cdot \lambda_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x} + Q_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = 0 \quad (3.13)$$

kde

T_i je teplota požární ochrany ve vzdálenosti x od povrchu [°C]

T_s je teplota plynu [°C]

d_i je tloušťka požární ochrany [m]

Řešení rovnice energetické rovnováhy lze vyjádřit jako

$$\frac{T_i(x, t)}{T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} K_n \cdot e^{-\beta_n \cdot t} \cdot \sin(\alpha_n \cdot x) \quad (3.14)$$

Konečná rovnice pro výpočet teploty konstrukčního prvku s požárně ochranným materiálem vystaveného nominální normové křivce může být přibližně

$$T_s = \sum_{j=0}^3 \frac{B_j}{1 - \beta_j \cdot \tau} \{ \exp[-\beta_j \cdot (t - \bar{t})] - \exp(-\frac{t - \bar{t}}{\tau}) \} \quad (3.15)$$

V praxi použití této rovnice není moc praktické. Pro zjednodušení, norma ECCS poskytuje následující formulaci přírůstku pro výpočet teploty konstrukčního prvku s těžkou požární ochranou jako

$$\Delta T_s = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{F_i}{V} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\mu}{2}} \cdot (T_g - T_s) \cdot \Delta t - \frac{\Delta T_g}{1 + \frac{\mu}{2}} \quad (3.16)$$

kde ΔT_s je přírůstek teploty plynu v každém časovém kroku a

$$\mu = \frac{Q_i}{Q_s} = \frac{\rho_i \cdot c_i \cdot d_i \cdot F_i}{\rho_s \cdot c_s \cdot V} \quad (3.17)$$

V EC3 je popsána rovnice pro výpočet teploty chráněného konstrukčního prvku a je uvedena v kapitole 3.1.

Výpočet teploty konstrukčních prvků s těžkým požárně ochranným materiálem, které jsou vystaveny nominální normové křivce, může být počítán pomocí zjednodušené metody. V této metodě je polovina měrné tepelné kapacity požární ochrany $\frac{Q_i}{2}$ přidána ke konstrukčnímu prvku a potom lze využít stejný postup výpočtu jako pro konstrukční prvek s lehkou požární ochranou. Tvar teplotního přírůstku je

$$\Delta T_s = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \left(\frac{F_i}{V}\right)_{mod} \cdot (T_g - T_s) \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

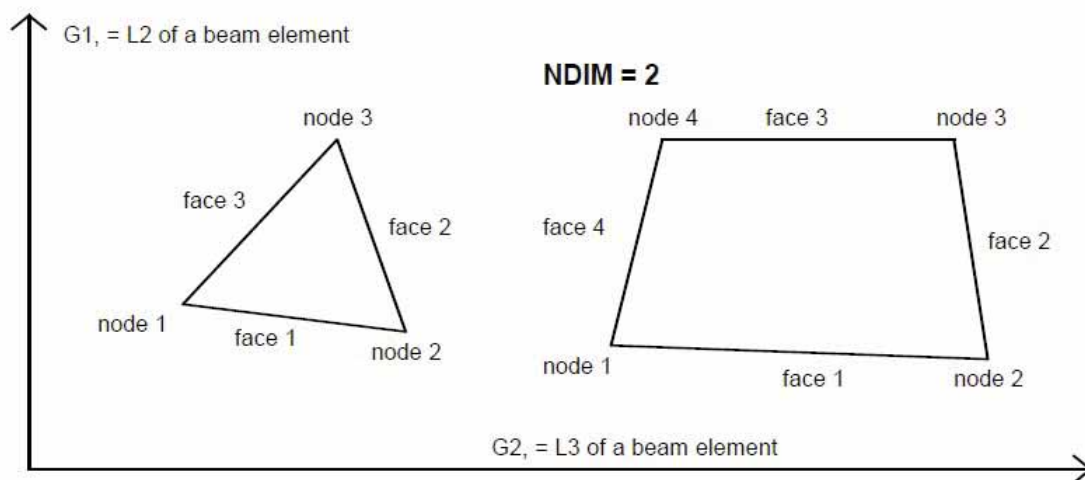
kde hodnota $\left(\frac{F_i}{V}\right)_{mod}$ je modifikovaný součinitel průřezu a má tvar

$$\left(\frac{F_i}{V}\right)_{mod} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{2}} \cdot \frac{F_i}{V} \quad (3.19)$$

3.1.3 Řešení MKP

Pro řešení konstrukce vystavené požáru pomocí metody konečných prvků lze použít program SAFIR 2011. Je to počítačový software vyvinutý na univerzitě v Lutychu, Belgii, pro simulaci chování stavebních konstrukcí vystavených požáru. Je založen na metodě konečných prvků a může se použít k analýze chování jednorozměrného, dvourozměrného a trojrozměrného problému. Program se může použít k provedení tří typů výpočtů, a to, k termální, torzní a mechanické analýze konstrukce. SAFIR přizpůsobuje různé prvky rozlišeným idealizacím, výpočetními postupům a různými popisům chování materiálových modelů. Prvky zahrnují 2D elementy typu SOLID, 3D elementy typu SOLID, prvky typu BEAM (nosník), SHELL (skořepina) a TRUSS (příhradovina).

Rozložení teploty po průřezu se určuje metodou konečných prvků. Průřez se musí rozdělit na určitý počet ploch, z nichž každá má jednoduchý tvar. Tyto plochy (konečné prvky) jsou podporovány body (uzly) a ty jsou při výpočtu analyzovány. Všechny uzly mají jeden stupeň volnosti, který představuje teplotu daného uzlu. SAFIR používá lineární prvky, proto linie, které tvoří hrany prvků mezi jednotlivými uzly, jsou úsečky. Změna teploty probíhá lineárně podél každé úsečky [16].



Obrázek 3.2: Uzly a povrchy prvku pro výpočet 2D modelu [16]

Pro vedení v pevných látkách je tepelná výměna založena na Fourierově rovnici. V systému Kartézské soustavy souřadnic je vyjádřena rovnicí

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q = c\rho\frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.20)$$

kde

$\{x, y, z\}$ jsou vektory Kartézské soustavy souřadnic [m]

T je teplota [K]

k je tepelná vodivost [W/m · K]

Q je člen představující interní zdroj tepla [W/m³]

ρ je objemová hmotnost [kg/m³]

c je měrná tepelná kapacita [J/kg · K]

t je čas [s]

Na povrchu a ve vnitřních dutinách konstrukce je výměna tepla založena na lineárním proudění a na definici šedých těles. To znamená, že tok vysálaného tepla nezávisí na vlnové délce elektromagnetického vlnění.

$$h_c = h \cdot (T_g - T_s) \quad (3.21)$$

kde

h_c je tepelný tok prouděním mezi plynem a pevnou látkou [W/m²]

h je součinitel přestupu tepla prouděním [W/m² · K]

T_g je teplota plynu [K]

T_s je teplota na povrchu pevné látky [K]

$$h_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot T_s^4 \quad (3.22)$$

kde

h_r je tepelný tok sáláním vyzařený pevnou látkou [W/m^2]

σ je Stefan-Boltzmanova konstanta [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}^4$]

ϵ je emisivita povrchu pevné látky [-]

T_s je teplota na povrchu pevné látky [K]

Pro zobrazování výsledků výpočtů se používá program Diamond 2011.

3.2 Materiálové vlastnosti

3.2.1 Tepelné vlastnosti oceli

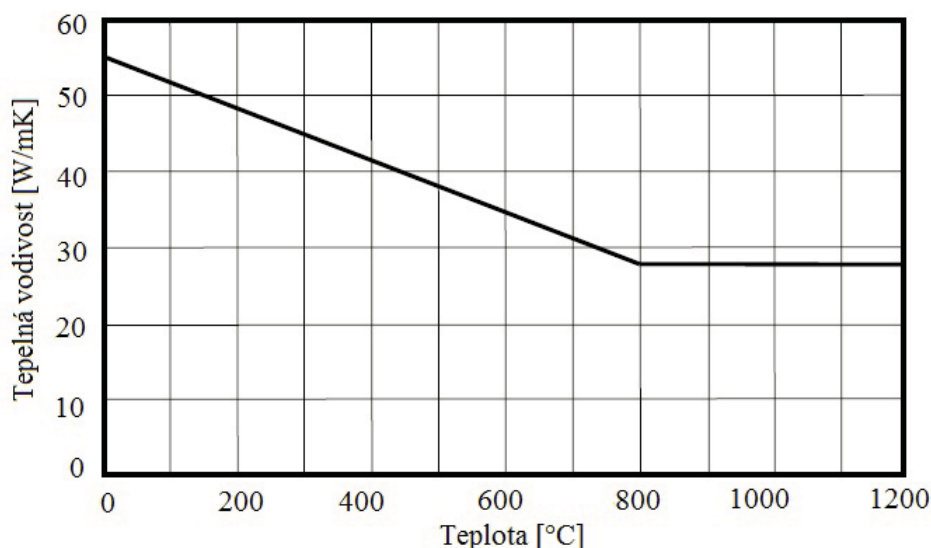
Emisivita

Emisivita je vlastnost povrchu materiálu. Představuje schopnost jeho povrchu vyzařovat nebo absorbovat teplo, vyjádřené jako podíl množství vysálané energie povrchem skutečného tělesa k množství energie vyzařené černým tělesem při stejné teplotě.

Ideální černé těleso má emisivitu $\epsilon = 1,0$. Dále lze definovat vlastnost nasákavost, což je poměr dopadajícího tepla absorbovaného konkrétním povrchem materiálu na teplo absorbované dokonalým černým tělesem. Nasákavost ideálního černého tělesa je opět $\alpha = 1,0$. Emisivita a pohltivost povrchu skutečného tělesa se mění s povrchovou teplotou, vlnovou délkou a směrem záření. V souladu s Kirchhoffovými zákony je emisivita shodná s pohltivostí povrchu tělesa, to znamená, že $\alpha = \epsilon$. Odrazivost povrchu je $\rho = (1 - \epsilon)$.

Je logické, že barva a textura povrchu materiálu do značné míry řídí jeho vyzařování. Matnější a tmavší povrchy mají tendenci mít emisivitu blíže k 1,0 než lesklejší a lehčí povrchy, které mohou být myšleny jako více reflexní. Struktura povrchu se během požáru budovy mění. Připisovat konstantní hodnoty emisivity na materiál podléhá značné nejistotě. Účinky různých typů paliva a ventilační podmínky závisí na zbarvení a struktuře povrchů.

V kódech požárního inženýrství, jako ČSN EN 1993-1-2 (CEN 1993-2005b) a EN 1994-1-2 (CEN 1994-2005b), jsou hodnoty vyzařování uvedeny pro materiály a jsou založeny na předpokladu konstantního ohřevu v peci, spíše než v podmínkách skutečného požáru budovy. U konstrukční a nerezové oceli jsou použity jednotlivé hodnoty 0,7 či 0,4, u betonových povrchů norma EN 1994-1-2 předepisuje jedinou hodnotu 0,7 [13].

Tepelná vodivost

Obrázek 3.3: Změna tepelné vodivosti oceli s teplotou [13]

Změna je popsána v normě 1993-1-2 jako

$$\begin{array}{ll} \theta_a = 20^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 800^\circ\text{C} & \lambda_a = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}] \\ \theta_a = 800^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 1200^\circ\text{C} & \lambda_a = 27.3 \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}] \end{array}$$

kde θ_a je teplota oceli v $^\circ\text{C}$.

Měrná tepelná kapacita

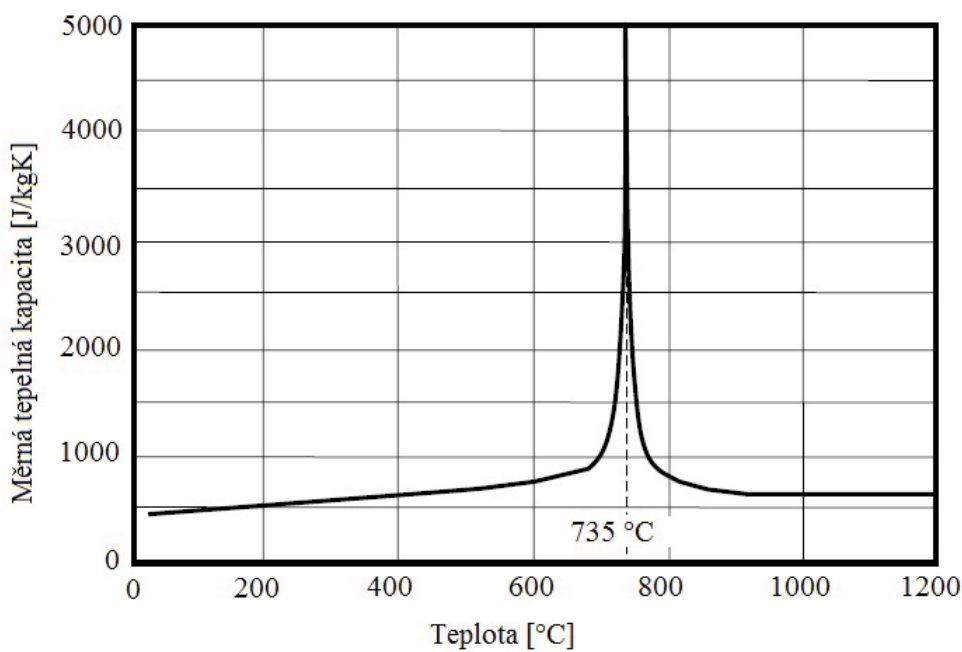
Změna měrné tepelné kapacity oceli v závislosti na teplotě, ve formě uvedené v EN 1993-1-2, je znázorněna na obrázku. Je vidět, že se mění velmi pozvolna v průběhu využitelného rozsahu. Hodnota tepelné kapacity prochází velmi dramatickými změnami a velmi vysoká změna je v rozsahu od 700 $^\circ\text{C}$ do 800 $^\circ\text{C}$. Zdánlivý prudký nárůst do "nekonečna" v hodnotě cca 735 $^\circ\text{C}$ je vlastně pragmatický způsob zohlednění tepelného příkonu potřebného umožnit endotermní proces křišťálově-strukturovanou fázovou změnou uhlíkové oceli ze středu prvku na jeho povrch. Pokud se přenos tepla na výpočet ocelové konstrukce provede analyticky nebo numericky, pak jasná "špice" v měrné tepelné kapacitě umožňuje provést výpočet pomocí běžného výpočtu vedení tepla [13].

ČSN EN 1993-1-2 vyjadřuje tuto vlastnost pro všechny uhlíkové oceli jako sled těchto rovnic [14]:

$$\begin{array}{ll} \theta_a = 20^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 600^\circ\text{C} & c_a = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 \\ & + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \quad [\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}] \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
\theta_a = 600^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 735^\circ\text{C} & c_a = 666 + \frac{13002}{(738 - \theta_a)} & [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \\
\theta_a = 735^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 900^\circ\text{C} & c_a = 545 + \frac{17820}{(\theta_a - 731)} & [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \\
\theta_a = 900^\circ\text{C} \text{ do } \theta_a = 1200^\circ\text{C} & c_a = 650 & [\text{J/kg} \cdot \text{K}]
\end{array}$$

kde θ_a je teplota oceli v $^\circ\text{C}$.



Obrázek 3.4: Znázornění změny měrné tepelné kapacity uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [13]

3.2.2 Tepelné vlastnosti požární ochrany

Pro analýzu tepla jsou potřeba tepelné vlastnosti objemová hmotnost ρ_p , měrná tepelná kapacita c_p a tepelná vodivost λ_p . Model závislosti vlastností na teplotě umožňuje vyplnit mezery v experimentálních datech a zpřesnit výpočty.

Objemová hmotnost, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita běžně používaných požárně ochranných materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Objemová hmotnost

Materiály požární ochrany mění objemovou hmotnost v důsledku dehydratace, rozkladu organických sloučenin nebo dekarbonizace při vystavení ohni. Objemová hmotnost je hmotnost dělená objemem. Vzhledem ke změně objemu a hmotnosti materiálu požární ochrany při vysokých teplotách by měly být tyto hodnoty kvantifikovány. Pro kvantifikaci změny hmotnosti lze použít termogravimetrická analýza. Tato analýza sleduje snížení objemové hmotnosti při zvýšení teploty. Změna objemu se může měřit pomocí dilatometru.

Tabulka 3.2: Tepelné vlastnosti požárně ochranných materiálů [12]

Materiál	ρ_i [kg/m ³]	λ_i [W/m.°C]	c_i [kJ/kg.°C]
Tenká požární ochrana nátěrem	600-1000	-	-
Tlustá požární ochrana nátěrem	250-500	0,09-0,12	-
Sádrokarton	800	0,20	1,7
Vápenosilikátové desky	500-1000	0,10-0,25	-
Plátno	80-250	0,10-0,20	-
Hliněné cihly, popílkové cihly	1000-2000	0,40-1,20	1,0
Pórobeton	400-800	0,20-0,40	1,0-1,20
Lehký beton	800-1800	0,30-0,90	1,0-1,20
Beton	2200-2400	1,30-1,70	1,20

Většina požárních materiálů je lehká. Teplo v požárně ochranném materiálu je nízké ve srovnání s vedením materiálem a uložení do chráněného konstrukčního prvku. Pokud nejsou k dispozici, lze použít konstantní hodnotu objemové hmotnosti. Konstantní hodnota požární ochrany se obvykle udává v materiálech výrobce [13].

Měrná tepelná kapacita

Pro zvýšení teploty materiálu je třeba přísun vnější energie. Vnější energie se snižuje, pokud požární materiál vytváří teplo prostřednictvím exotermické reakce nebo se zvyšuje, pokud protipožární materiál podstupují endotermní reakci, nebo pokud se voda odpařuje. Množství energie, které je potřebné pro zvýšení teploty materiálu o 1 °C na jednotku hmotnosti se definuje jako měrné teplo ochranného materiálu. Ve zjednodušené analýze přenosu tepla lze využít odpovídající specifické teplo, které představuje kombinované účinky [13].

Ekvivalentní měrné teplo se získá přidáním dodatečné energie k základní hodnotě, která je nutná vzhledem k endotermické reakci nebo vzhledem k odpařování vody, nebo odečtením od základní hodnoty energie, která se uvolňuje při exotermické reakci. Základní hodnota je obvykle závislá na teplotě. Rozsah této změny je obvykle malý. V případě, že přesná změna není k dispozici, lze použít konstantní hodnotu.

Aby bylo možné vytvořit/spotřebovat teplo během exotermické/endotermické chemické reakce a teplo spotřebované v průběhu odpařování vody, je jednoduchý způsob distribuce energie spojený prostřednictvím teplotní doby, po kterou dochází k chemické reakci/odpařování vody. Přesné rozdělení může být obtížné kvantifikovat, ale protože stupeň požadované přesnosti není vysoký, a proto může být použito trojúhelníkového rozdělení. Průběh měrné tepelné kapacity předvedu na příkladu:

Základní hodnota měrného tepla materiálu	1000 J/kg · K
Vlhkost	5 %

Skupenské teplo odpařování vody

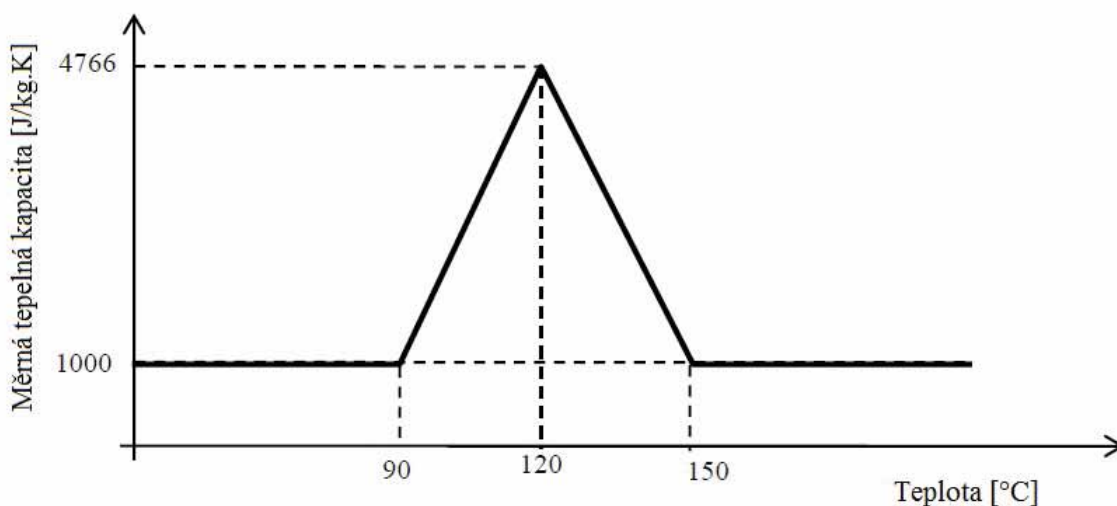
$$2260 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Předpokládá se, že k odpařování vody dojde mezi 90 °C a 150 °C. Průměrné dodatečné měrné teplo je:

$$2260000 \cdot \frac{0,05}{(150 - 90)} = 1883 \text{ J/kg} \cdot K \quad (3.23)$$

Předpokládá se, že maximální odpařování vody dochází při teplotě 120 °C. To znamená, že hodnota měrného tepla ve špičce při 120 °C je:

$$1000 + 2 \cdot 1883 = 4766 \text{ J/kg} \cdot K \quad (3.24)$$



Obrázek 3.5: Vliv odpařování vody na měrnou tepelnou kapacitu požární ochrany [13]

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost má rozhodující vliv na teplotu chráněné konstrukce. Na přesnosti jejího odhadu závisí přesnost celého výpočtu. Výrobci požárně ochranných materiálů ve své literatuře obvykle udávají seznam hodnot tepelné vodivosti v závislosti na okolní teplotě. Konstantní hodnota tepelné vodivosti by se neměla používat, protože tepelná vodivost se zvyšuje s teplotou. Použití konstantní hodnoty okolní teploty podceňuje teplotu chráněné konstrukce [13]. Tabulka 3.3 shrnuje teoretické výpočty tepelné vodivosti λ pro některé požárně ochranné materiály.

Pokud jsou od výrobce k dispozici podrobné vlastnosti požárně ochranného materiálu při zvýšených teplotách, měly by být použity. Nicméně, vlastnosti uvedené v tabulce 3.3 lze použít, pokud vlastnosti pro vyšší teploty nejsou k dispozici.

Tabulka 3.3: Modely tepelných vlastností pro některé běžné požárně ochranné materiály [13]

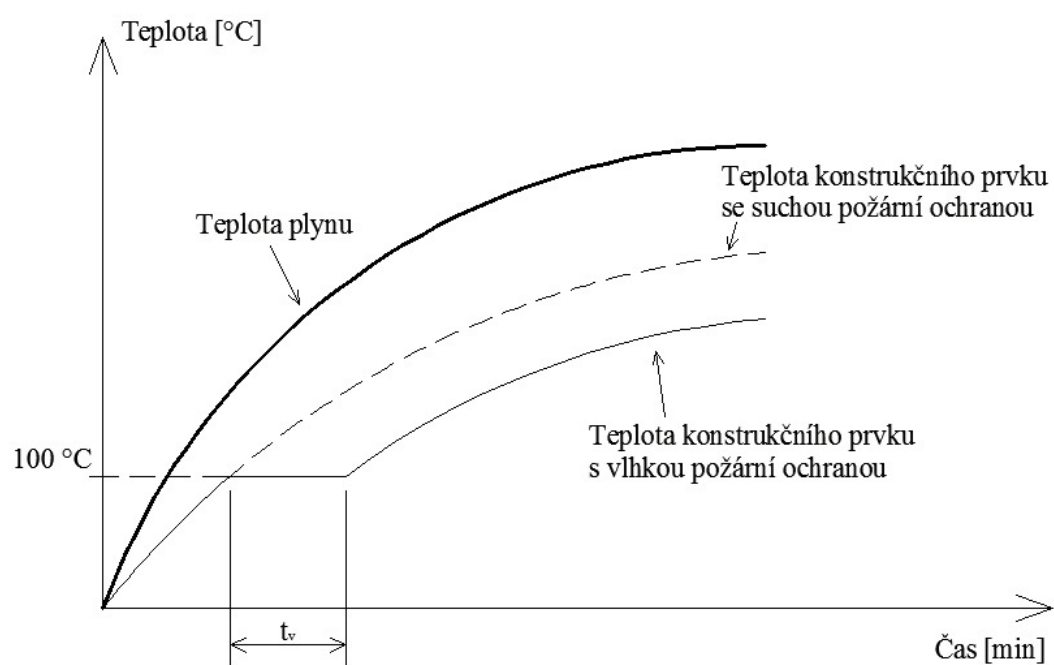
Materiál	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Základní hodnota měrného tepla c [J/kg · K]	Tepelná vodivost [W/m · K]
Skelná vata	155-180	900	$\lambda_{sv} = 0,022 + 0,1475 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3$
Minerální vlna	165	840	$\lambda_{mv} = 0,03 + 0,2438 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3$
Vápenosilikát	proměnná	900	$\lambda^* = \lambda_0^* + C \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3$ $\lambda_0^* = 0,23 \cdot \frac{\rho}{1000}$ $C = 0,08 \cdot \frac{(2540-\rho)}{2540}$
Vermikulit	proměnná	900	$\lambda^* = \lambda_0^* + C \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3$ $\lambda_0^* = 0,27 \cdot \frac{\rho}{1000}$ $C = 0,18 \cdot \frac{(1000-\rho)}{1000}$

Účinky vlhkosti při zvyšování teploty

Obvykle se v požární ochraně nachází trochu vody. Pokud je ochrana proti požáru vystavena ohni, odpařování vody způsobuje zpoždění na zvýšení teploty v chráněném konstrukčním prvku. Časové zpoždění je znázorněno na obrázku níže. Návrhová hodnota tohoto zpoždění t_v se vypočítá jako

$$t_v = \frac{p \cdot \rho_i \cdot d_i^2}{5 \cdot \lambda_i} \quad (3.25)$$

p	vlhkost požární ochrany [%]
ρ_i	objemová hmotnost požární ochrany [kg/m ³]
d_i	tloušťka požární ochrany [m]
λ_i	tepelná vodivost požární ochrany [W/m·K]



Obrázek 3.6: Časové zpoždění teploty konstrukčního prvku s vlhkou požární ochranou [12]

Kapitola 4

Experimenty

Firma Promat pro práci poskytla protokoly o zkoušce, při které se testovala pasivní ochrana ocelových prvků nástřikem Cafco FENDOLITE® MII. Podrobnější informace o použitých zkušebních vzorcích uvedu v kapitole 4.1.

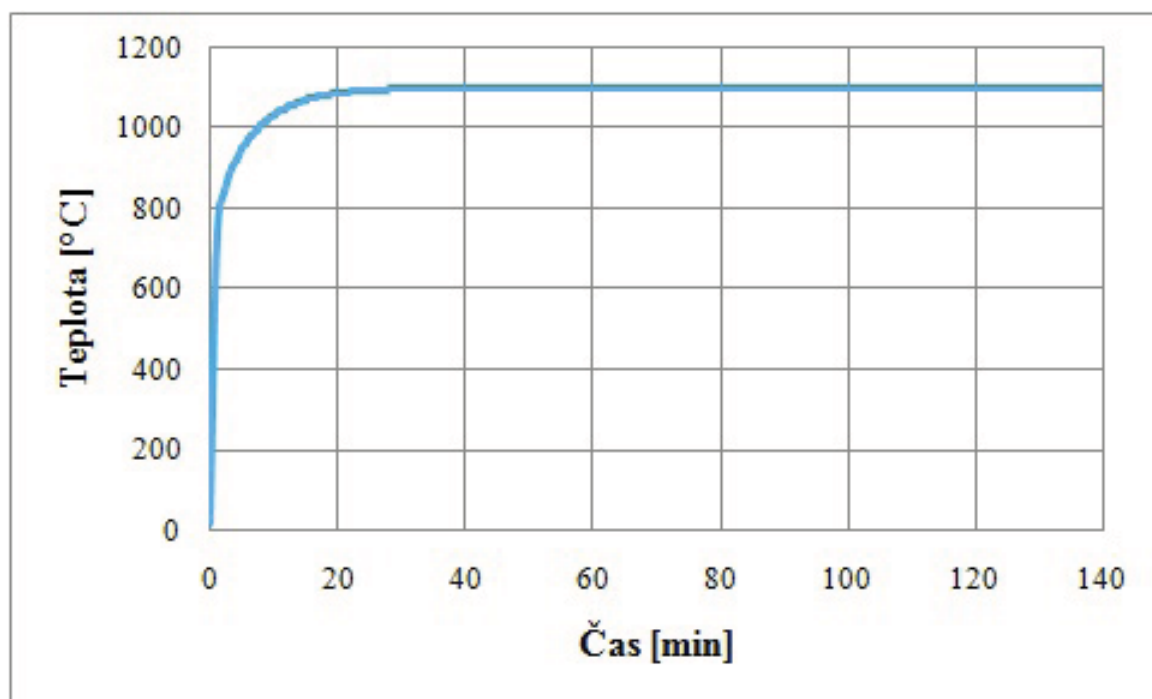
Nástřik Cafco FENDOLITE® MII

V návodu je uveden výrobek jako průmyslové vyráběnou suchou omítkovou směs pro nástřik do vnitřního a venkovního prostředí. Je vytvořena na základě směsi portlandského cementu a vermikulitu. Nanáší se jako monolitický povlak, který odolává teplotním šokům, například při vysoké intenzitě požáru uhlovodíků. Má výbornou odolnost proti odprýskávání v případě výbuchu. Při mechanickém namáhání je dobře odolný proti odprýskávání a drolení. Díky nízké objemové hmotnosti příliš staticky nezatěžuje chráněnou konstrukci.

Cafco FENDOLITE® MII je speciální nástřik, který je určen pro petrochemický průmysl a tunelové stavby. Používá se pro aplikaci na stavební prvky, jako jsou betonové nebo ocelové konstrukce.

Tento nástřik je odzkoušen podle nominální hydrokarbonové teplotní křivky. Křivku lze v závislosti na čase popsat jako

$$\theta = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad [^{\circ}C] \quad (4.1)$$



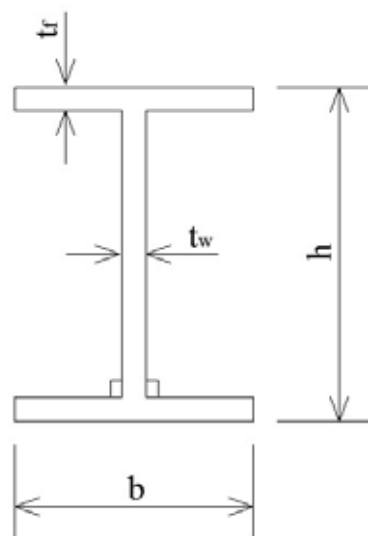
Obrázek 4.1: Nominální hydrokarbonová teplotní křivka

4.1 Vstupní hodnoty do výpočtu

Vzorky s čísly 23 a 24 byly navíc vyztuženy ocelovým drátěným pletivem - krabicová ochrana. Ostatní vzorky byly bez jakéhokoliv vyztužení.

Pracovníci specializované firmy aplikovali požárně ochrannou maltu na povrch ocelových profilů. Malta byla nanesena nástřikem pomocí stříkacího zařízení s pistolí. Aplikace malty na povrch ocelových profilů byla prováděna od 6.12.2010 až do 10.12.2010. Během přípravy tloušťky ochrany byly její hodnoty kontrolovány pracovníky zkušební laboratoře a tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 4.4, 4.5 a 4.6. Objemová hmotnost požárně ochranného materiálu byla při zkoušce $\rho_p = 721 \text{ kg/m}^3$ a hodnota vlhkosti tohoto materiálu byla $p = 7,1\%$. Bylo zjištěno, že hodnota měrné tepelné kapacity pro tento nástřik je $c_p = 0,97 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ při teplotách $25 - 35^\circ\text{C}$ [21].

Nástřik Cafco FENDOLITE[®] MII byl odzkoušen na ocelových profilech během tří termínů zkoušek. Tyto zkoušky byly provedeny v datech 10.1.2011 (Test č.1), další 13.1.2011 (Test č.2) a poslední 20.1.2011 (Test č.3).



Obrázek 4.2: Rozměry prvků pro výpočet součinitele průřezu

Tabulka 4.1: Rozměry ocelových profilů a vypočtený součinitel průřezu (Test č.1) [21]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Rozměry prvků				Součinitel průřezu $A_m/V [m^{-1}]$
			h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	
1	IPE 400	zatižený nosník	401	177	9,4	12,8	163
2	IPE 400	nezatižený nosník	401	177	9,4	12,8	163
14	HEB 300	krátký sloup	303	299	10,8	18,6	127
15	HEA 300	krátký sloup	293	301	9	13,8	166
17	HEA 200	krátký sloup	194	201	6,6	10,3	223
23	HEA 300 box	krátký sloup	294	302	9,1	13,9	124

Tabulka 4.2: Rozměry ocelových profilů a vypočtený součinitel průřezu (Test č.2) [21]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Rozměry prvků				Součinitel průřezu $A_m/V [m^{-1}]$
			h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	
3	IPE 400	zatižený nosník	401	177	9,4	12,8	163
4	IPE 400	nezatižený nosník	401	177	9,4	12,8	163
13	HEB 450	krátký sloup	452	302	13,8	24,2	103
16	HEA 300	krátký sloup	293	301	9	13,8	166
18	HEA 200	krátký sloup	194	201	6,6	10,3	223
20	IPE 200	krátký sloup	200	101	5,1	8,1	309
21	IPE 120	krátký sloup	120	64,3	4,4	6,6	371

Tabulka 4.3: Rozměry ocelových profilů a vypočtený součinitel průřezu (Test č.3) [21], [23]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Rozměry prvků				Součinitel průřezu $A_m/V [m^{-1}]$
			h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	
5	IPE 400	nezatížený nosník	401	177	9,4	12,8	163
6	IPE 400	nezatížený nosník	401	177	9,4	12,8	163
11	HEM 280	krátký sloup	312	287	18,6	31,5	76
12	HEM 280	krátký sloup	312	287	18,6	31,5	76
19	IPE 200	krátký sloup	200	101	5,1	8,1	309
22	IPE 80	krátký sloup	79	46	5,1	5,6	386
24	HEA 300 box	krátký sloup	294	302	9,1	13,9	124

Tabulka 4.4: Změřené tloušťky ochrany (Test č.1) [21]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Tloušťka ochrany d_p [mm]	Součinitel průřezu s ochranou $A_p/V [m^{-1}]$
1	IPE 400	zatížený nosník	10,8	162,9
2	IPE 400	nezatížený nosník	10,8	162,9
14	HEB 300	krátký sloup	10,6	127,1
15	HEA 300	krátký sloup	10,9	165,7
17	HEA 200	krátký sloup	11,2	222,6
23	HEA 300 box	krátký sloup	10,8	124

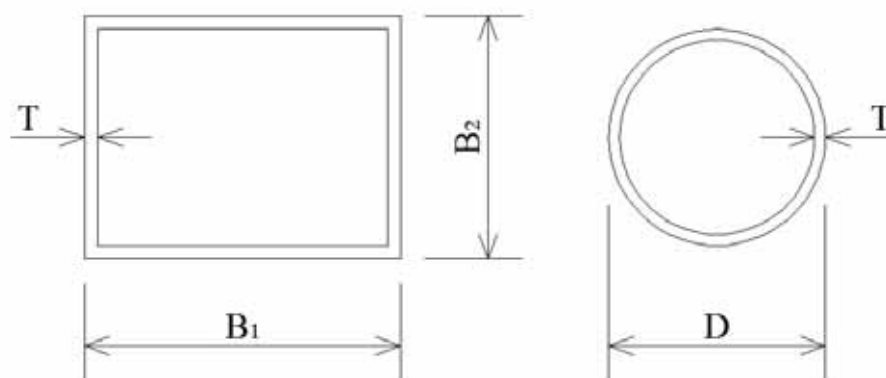
Tabulka 4.5: Změřené tloušťky ochrany (Test č.2) [21]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Tloušťka ochrany d_p [mm]	Součinitel průřezu s ochranou $A_p/V [m^{-1}]$
3	IPE 400	zatížený nosník	56,4	162,9
4	IPE 400	nezatížený nosník	55,9	162,9
13	HEB 450	krátký sloup	55,2	103,2
16	HEA 300	krátký sloup	58,1	165,7
18	HEA 200	krátký sloup	57,1	222,6
20	IPE 200	krátký sloup	57,7	308,9
21	IPE 120	krátký sloup	57,4	370,7

Tabulka 4.6: Změřené tloušťky ochrany (Test č.3) [21], [23]

Číslo vzorku	Prvek	Orientace	Tloušťka ochrany d_p [mm]	Součinitel průřezu s ochranou A_p/V [m ⁻¹]
5	IPE 400	nezatížený nosník	56,1	162,9
6	IPE 400	nezatížený nosník	56,0	162,9
11	HEM 280	krátký sloup	10,5	76,3
12	HEM 280	krátký sloup	36,1	76,3
19	IPE 200	krátký sloup	32,5	308,9
22	IPE 80	krátký sloup	57,4	385,7
24	HEA 300 box	krátký sloup	56,7	124

Tabulky obsahují pouze otevřené ocelové profily. V tomto testu však byly odzkoušeny i uzavřené čtvercové a kruhové ocelové profily se vzduchovou dutinou. Rozměry těchto profilů a tloušťky požární ochrany jsou shrnuty v tabulkách 4.7 a 4.8.



Obrázek 4.3: Rozměry prvků pro výpočet součinitele průřezu

Tabulka 4.7: Rozměry ocelových profilů a vypočtený součinitel průřezu [22]

Číslo vzorku	Číslo testu	Prvek	Orientace	Rozměry prvků				Součinitel průřezu A_m/V [m ⁻¹]
				B_1 [mm]	B_2 [mm]	T [mm]	D [mm]	
31	1	D76,1 x 5	vysoký sloup	-	-	5,5	76,1	196
32	3	D76,1 x 6	vysoký sloup	-	-	5,5	76,1	196
33	1	100 x 100 x 7,1	vysoký sloup	162	162	8,3	-	127
34	2	100 x 100 x 7,2	vysoký sloup	162	162	8,3	-	127

Tabulka 4.8: Změřené tloušťky ochrany [22]

Číslo vzorku	Číslo testu	Prvek	Orientace	Tloušťka ochrany d_p [mm]	Součinitel průřezu s ochranou A_p/V [m ⁻¹]
31	1	D76,1 x 5	vysoký sloup	11,2	196
32	3	D76,1 x 6	vysoký sloup	57,2	196
33	1	100 x 100 x 7,1	vysoký sloup	11,4	127,3
34	2	100 x 100 x 7,2	vysoký sloup	56,9	127,3

Kapitola 5

Cíle práce

Cílem práce je navrhnout efektivní teplotně závislé vlastnosti požárně ochranného nástřiku na základě experimentu.

Dílčím cílem práce je shrnout možnosti požární ochrany požárním nástřikem a ověřování zvýšení požární odolnosti nosných konstrukcí. K výpočtu se použije přírůstková metoda podle evropských návrhových norem. Výsledky budou ověřeny modely podle čínských návrhových norem a metodou konečných prvků.

Vyhodnocení experimentu při zahřívání podle nominální hydrokarbonové teplotní křivky umožní přípravu pomůcek pro zjednodušený návrh požární ochrany při vystavení požáru podle nominální normové křivky. Stanovení koeficientů pro předpověď teplotně závislé tepelné vodivosti nástřiku umožní přibližný i pokročilý návrh požárně chráněných ocelových prvků vystavených požáru podle nominální normové křivky i přesnějších modelů nárůstu teploty plynu v požárním úseku.

Kapitola 6

Výpočetní analytický model

Výpočetní analytický model se vytvoří s pomocí přírůstkové metody popsané v evropské normě EN 1993-1-2. Pomocí metody nejmenších čtverců se zjistí koeficienty pro výpočet tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu. Koeficienty v kapitole 3.2.2 byly experimentálně zjištěny, ale nelze je v tomto případě použít. Výpočetní model by nebyl spolehlivý.

Z experimentu jsou známy teploty všech ocelových profilů a pro ně se spočítá měrná tepelná kapacita c_a ze vzorců uvedených v kapitole 3.2.1. Zbývá zjistit průběh měrné tepelné kapacity požárně ochranného materiálu c_p pro výpočet tepelné jímavosti ϕ .

Měrná tepelná kapacita požární ochrany

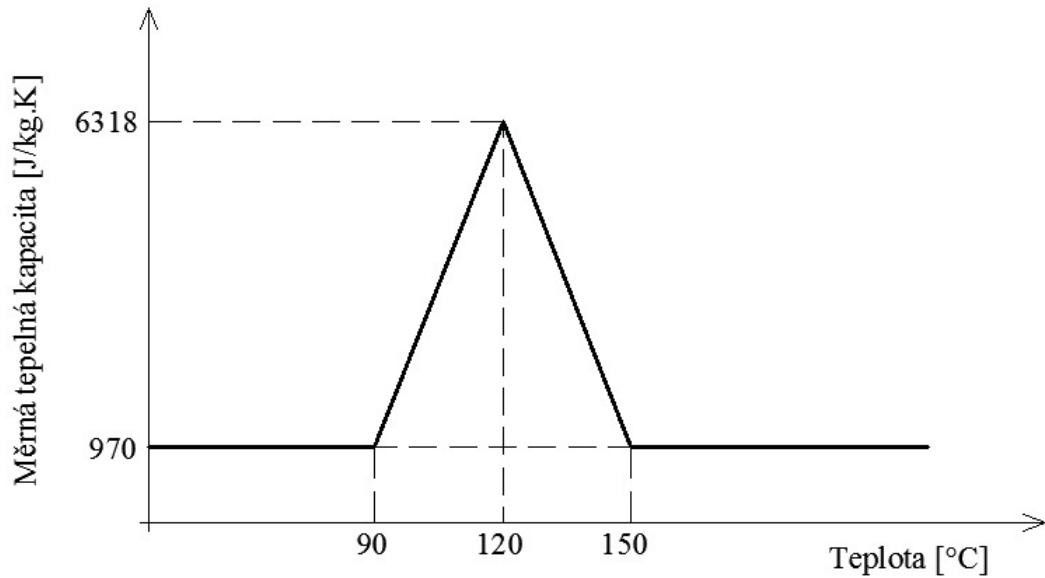
Základní hodnota měrného tepla materiálu	970 J/kg · K
Vlhkost materiálu	7,1 %
Skupenské teplo odpařování vody	2260 kJ/kg · K

K odpařování vody dochází mezi 90 °C a 150°C a průměrné dodatečné teplo je

$$2260000 \cdot \frac{0,071}{(150 - 90)} = 2674 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (6.1)$$

K maximálnímu odpařování vody dochází při teplotě 120 °C a hodnota měrného tepla ve špičce je

$$970 + 2 \cdot 2674 = 6318 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (6.2)$$



Obrázek 6.1: Průběh měrné tepelné kapacity

Tepelná jímavost ϕ se spočítá pro jednotlivé teploty a následně lze vyjádřit tepelnou vodivost požárně ochranného materiálu λ_p z rovnice pro teplotní přírůstek $\Delta\theta_{a,t}$.

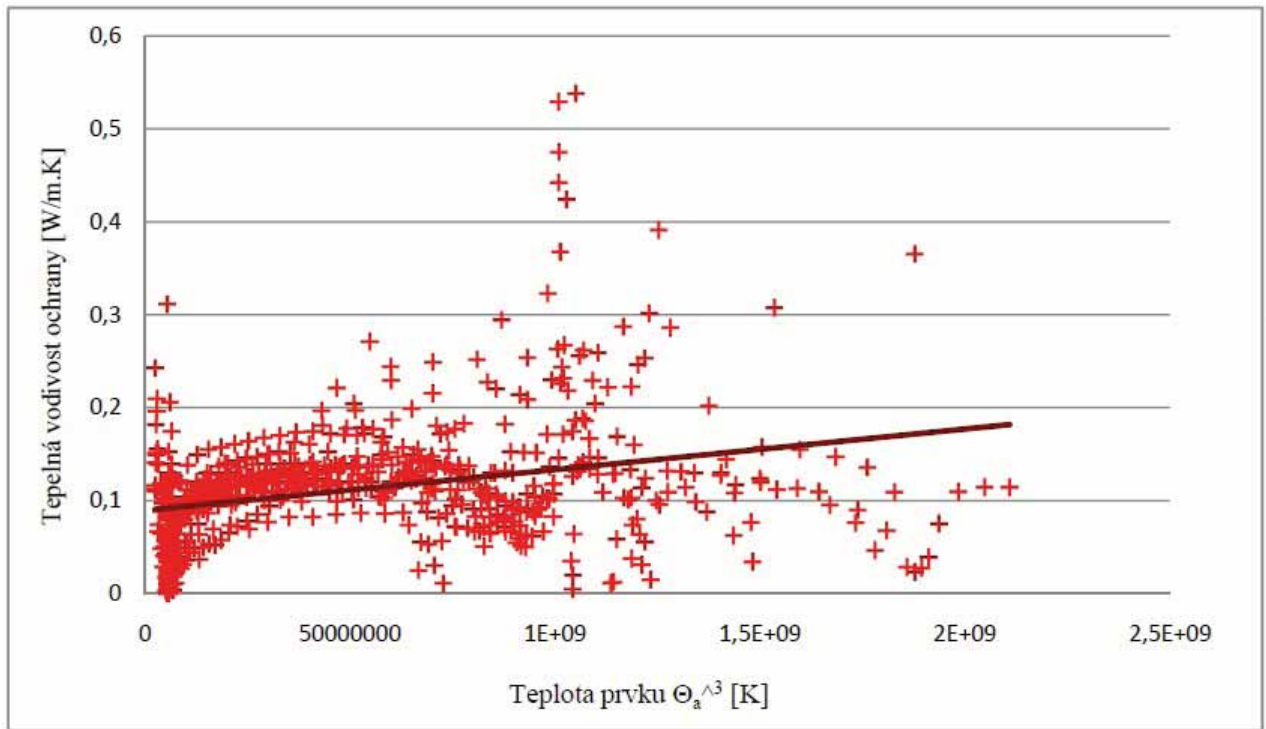
$$\lambda_p = (\Delta\theta_{a,t} + (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t}) \cdot \frac{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a}{\frac{A_p}{V}} \cdot \frac{1 + \frac{\phi}{3}}{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (6.3)$$

Tepelná vodivost se spočítá pro všechny naměřené teploty z experimentu. A nyní se tyto tepelné vodivosti a dané teploty do zanesou grafu a pomocí metody nejmenších čtverců se zjistí koeficienty A a B pro výpočet tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu. Černá přímka v grafu, obrázek 6.2, představuje lineární regresi a rovnice této přímky má tvar:

$$y = 4,37 \cdot 10^{-11} \cdot x + 0,0895 \quad (6.4)$$

Při testu byl zkoušen nástřík Cafco FENDOLITE[®] MII, který je vytvořen na základě směsi portlandského cementu a vermikulitu. Použijí se proto vzorce pro výpočet tepelné vodivosti z tabulky 3.3 jako vermikulit. Koeficienty ve výpočtu vodivosti λ_0^* A=0,27 a ve výpočtu hodnoty C B=0,18 se nahradí hodnotami, které se zjistí z rovnice lineární regrese. Rovnice můžeme přepsat na tvar:

$$y = 0,0895 + 4,37 \cdot 10^{-11} \cdot x \quad (6.5)$$



Obrázek 6.2: Závislost tepelné vodivosti na teplotě prvku

$$\lambda^* = \lambda_0^* + C \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (6.6)$$

a z toho plyne, že $\lambda_0^* = 0,0895$ a $C = 4,37 \cdot 10^{-11}$. Nyní lze spočítat koeficienty A a B.

$$\lambda_0^* = A \cdot \frac{\rho}{1000} \Rightarrow A = \lambda_0^* \cdot \frac{1000}{\rho} = 0,0895 \cdot \frac{1000}{721} = \mathbf{0,124133} \quad (6.7)$$

Do výpočtu koeficientu B se jako hodnota x bere hodnota T^3 , to znamená, že rovnice se ještě vynásobí číslem 1000^3 z rovnice pro tepelnou vodivost λ^* .

$$C = B \cdot \frac{(1000 - \rho)}{1000}$$

$$\Rightarrow B = C \cdot \frac{1000}{(1000 - \rho)} \cdot 1000^3 = 4,37 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1000}{(1000 - 721)} \cdot 1000^3 = \mathbf{0,156631} \quad (6.8)$$

Konečné vzorce tepelné vodivosti pro požárně ochranný nástřík Cafco FENDOLITE® MII jsou:

$$\lambda_0^* = 0,124133 \cdot \frac{\rho}{1000} \quad (6.9)$$

$$C = 0,156631 \cdot \frac{(1000 - \rho)}{1000} \quad (6.10)$$

Test č.1 - datum 10.1.2011

V prvním testu byly odzkoušeny všechny prvky s tenkou vrstvou požárně ochranného materiálu (tloušťka d_p kolem 10 mm) v časovém intervalu (0 až 145 minut). Tabulka 6.1, 6.2 a tabulka 6.3 ukazuje hodnoty naměřených teplot z experimentu a vypočtených teplot pro jednotlivé ocelové chráněné profily. V testu byly zkoušeny ocelové otevřené profily a také dva ocelové uzavřené profily, a to kruhový profil 31.D76,1 x 5 a čtvercový profil 33.100 x 100 x 7,1; s rozměry 162 x 162 x 8,3 mm.

Tabulka 6.1: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 1

Čas t [min]	1. IPE 400		2. IPE 400		14. HEB 300	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	26,9	20,00	22,7	20,00	18,1	20,00
5	81,5	81,85	86,1	81,85	70,9	71,51
10	105,7	138,39	121,1	138,39	119,8	126,19
15	169,3	218,10	192,1	218,10	183,9	189,03
20	253,6	293,51	276,5	293,51	254,4	253,35
25	333,2	362,77	355,1	362,77	322,5	313,23
30	404,9	425,96	425,7	425,96	383,6	368,78
35	470,2	483,28	490,2	483,28	440,3	420,16
40	530,5	535,02	547,3	535,02	492,9	467,54
45	586,9	581,57	597,7	581,57	541,1	511,12
50	633,1	623,49	641,8	623,49	584,2	551,11
55	668,8	661,40	684,5	661,40	610,5	587,76
60	731,2	694,32	729,9	694,32	640,7	621,43
65	760,9	719,78	770,5	719,78	668,7	652,53
70	784,8	733,72	772,5	733,72	691,5	680,60
75	810,9	742,11	774,8	742,11	710,2	704,68
80	837,7	759,67	785,7	759,67	726,1	723,01
85	855,1	784,89	793,1	784,89	736,3	733,45
90	867,0	813,71	799,3	813,71	754,2	739,42
95	873,3	843,33	802,3	843,33	773,7	750,84
100	872,0	872,20	797,3	872,20	793,0	768,28
105	878,5	899,48	792,4	899,48	811,4	789,71
110	876,9	924,51	789,0	924,51	829,3	813,10
115	875,0	946,98	785,3	946,98	850,3	837,04
120	867,5	967,02	786,2	967,02	872,8	860,67
125	865,9	984,81	788,9	984,81	895,9	883,44
130	864,8	1000,49	793,6	1000,49	916,8	905,02
135	863,9	1014,27	799,6	1014,27	934,7	925,02
140	863,1	1026,30	806,5	1026,30	949,6	943,34
145	862,3	1036,78	814,0	1036,78	960,5	960,06

Tabulka 6.2: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 2

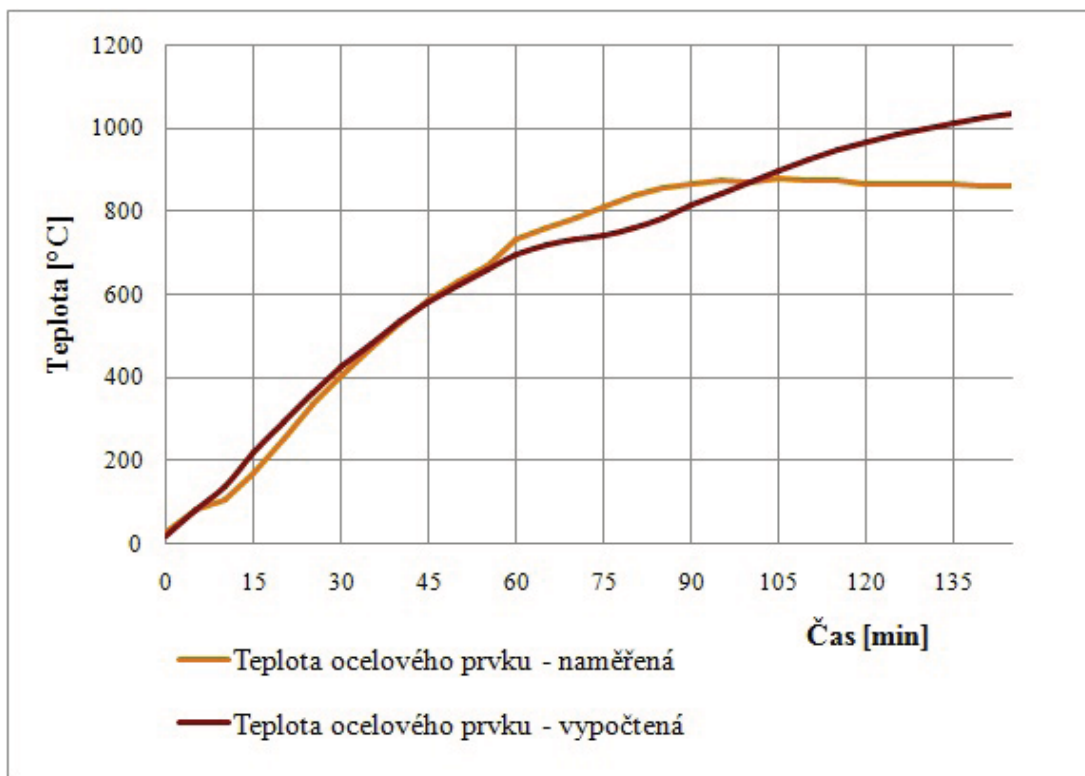
Čas t [min]	15. HEA 300		17. HEA 200		23. HEA 300 box	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	19,7	20,00	20,1	20,00	16,9	20,00
5	68,5	81,94	91,4	95,13	46,8	69,19
10	112,6	138,07	143,3	152,83	97,9	123,16
15	172,3	218,08	236,1	252,22	126,0	182,02
20	248,1	293,88	332,4	342,62	161,0	244,34
25	321,6	363,47	418,4	423,87	196,6	302,49
30	389,6	426,94	493,3	496,06	235,6	356,60
35	452,4	484,48	561,5	559,61	277,1	406,82
40	510,7	536,39	618,1	615,26	319,0	453,31
45	562,6	583,06	665,7	664,26	360,3	496,24
50	604,2	625,09	703,7	704,80	396,1	535,80
55	638,5	663,05	732,5	730,55	433,0	572,20
60	670,5	695,88	754,4	741,85	469,3	605,67
65	695,5	720,96	779,9	766,02	502,6	636,71
70	716,8	734,20	805,4	800,88	534,1	665,24
75	734,3	743,07	830,3	838,78	563,4	690,68
80	747,7	761,48	855,6	875,73	590,0	711,94
85	764,5	787,31	882,0	909,92	610,9	727,16
90	783,3	816,48	907,1	940,12	624,9	734,91
95	803,1	846,26	929,3	966,29	639,2	741,43
100	823,5	875,16	945,4	988,75	656,5	753,64
105	846,7	902,40	956,4	1007,85	671,5	771,13
110	871,6	927,28	960,7	1023,98	685,0	791,98
115	894,3	949,58	964,1	1037,50	697,8	814,47
120	913,4	969,44	968,0	1048,77	708,0	837,41
125	928,1	987,04	973,4	1058,11	717,3	860,04
130	938,9	1002,55	983,4	1065,82	725,7	881,90
135	945,1	1016,14	996,8	1072,16	733,4	902,69
140	945,0	1028,00	1009,2	1077,35	741,2	922,06
145	941,5	1038,31	1020,1	1081,60	749,7	939,89

Tabulka 6.3: Teploty ocelových uzavřených chráněných profilů °C

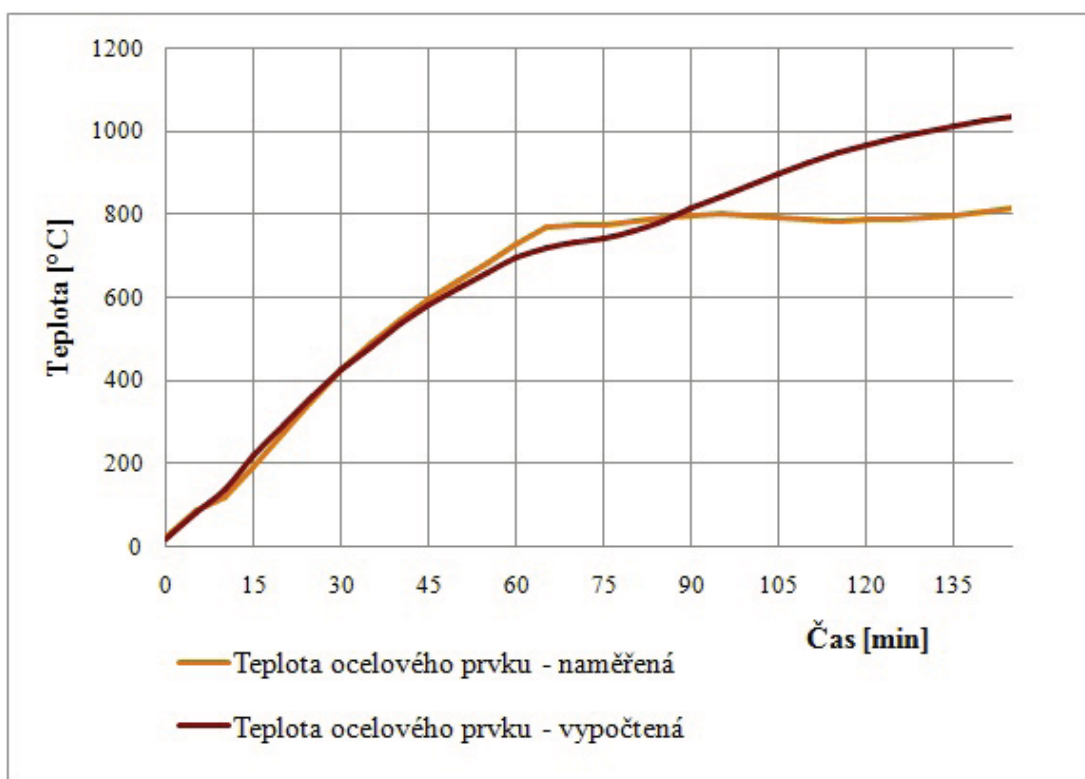
Čas t [min]	31. D76,1 x 5		33. 100 x 100 x 7,1	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	19,9	20,00	21,3	20,00
5	111,0	88,36	95,2	66,79
10	225,4	144,00	239,1	119,88
15	362,7	234,09	409,0	174,08
20	473,2	317,32	548,8	235,06
25	563,1	392,99	586,3	292,07
30	636,2	461,16	754,6	345,23
35	692,9	522,09	795,3	394,70
40	732,3	576,24	838,9	440,63
45	760,3	624,36	877,4	483,19
50	787,4	667,21	899,7	522,54
55	810,9	703,18	911,2	558,86
60	831,6	727,81	915,4	592,36
65	851,8	738,01	907,9	623,36
70	868,7	754,75	901,1	652,15
75	880,5	782,52	893,3	678,36
80	888,5	815,38	886,6	701,24
85	892,8	849,13	885,5	719,47
90	894,5	881,62	886,9	731,20
95	897,2	911,76	888,8	736,80
100	904,6	938,66	895,4	745,04
105	914,6	962,35	905,1	758,77
110	923,1	983,05	914,4	776,94
115	929,6	1001,01	922,5	797,74
120	932,1	1016,48	926,2	819,72
125	933,8	1029,75	929,4	841,92
130	935,3	1041,06	932,2	863,72
135	936,5	1050,66	934,4	884,74
140	937,9	1058,77	936,5	904,73
145	939,1	1065,61	937,2	923,35

V následujících grafech jsou vykresleny hodnoty pro jednotlivé ocelové profily z výše uvedených tabulek 6.1, 6.2 a 6.3.

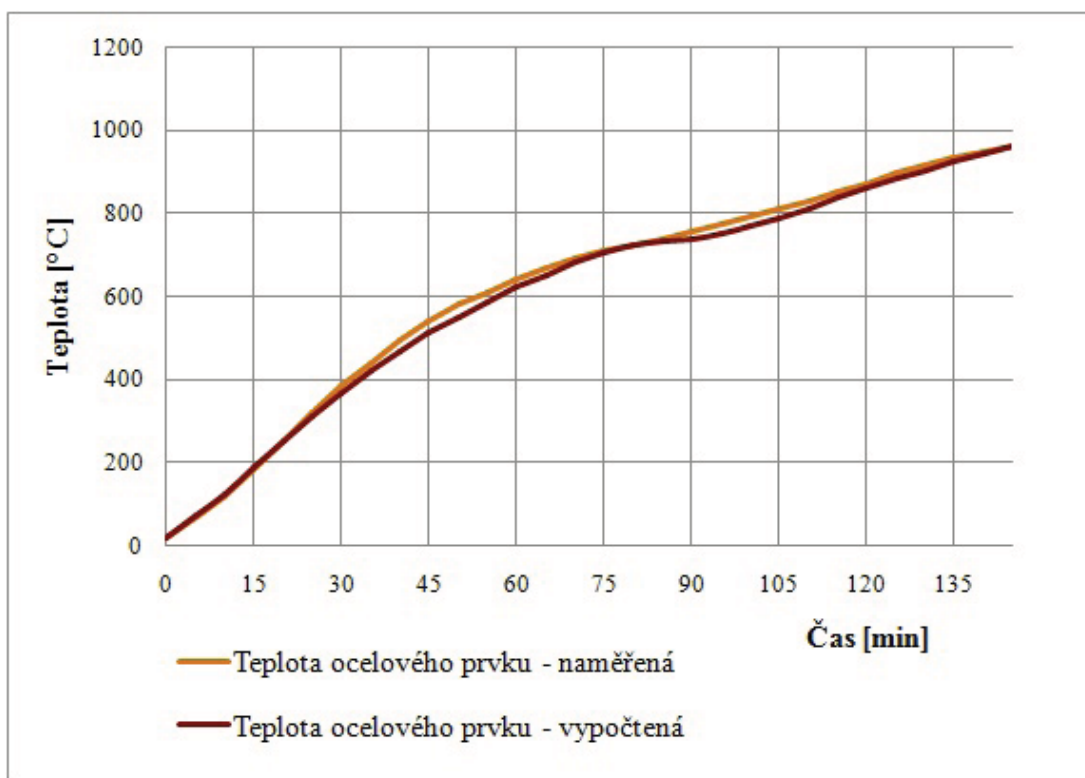
Chráněné ocelové profily 23.HEA 300 box protection, 31.D76,1 x 5 a 33.100 x 100 x 7,1 obsahují vzduchové dutiny, které se v přírůstkové metodě nedají zohlednit. Proto předpověď teploty těchto profilů není správná a musí se použít metoda jiná, například řešení pomocí metody konečných prvků.



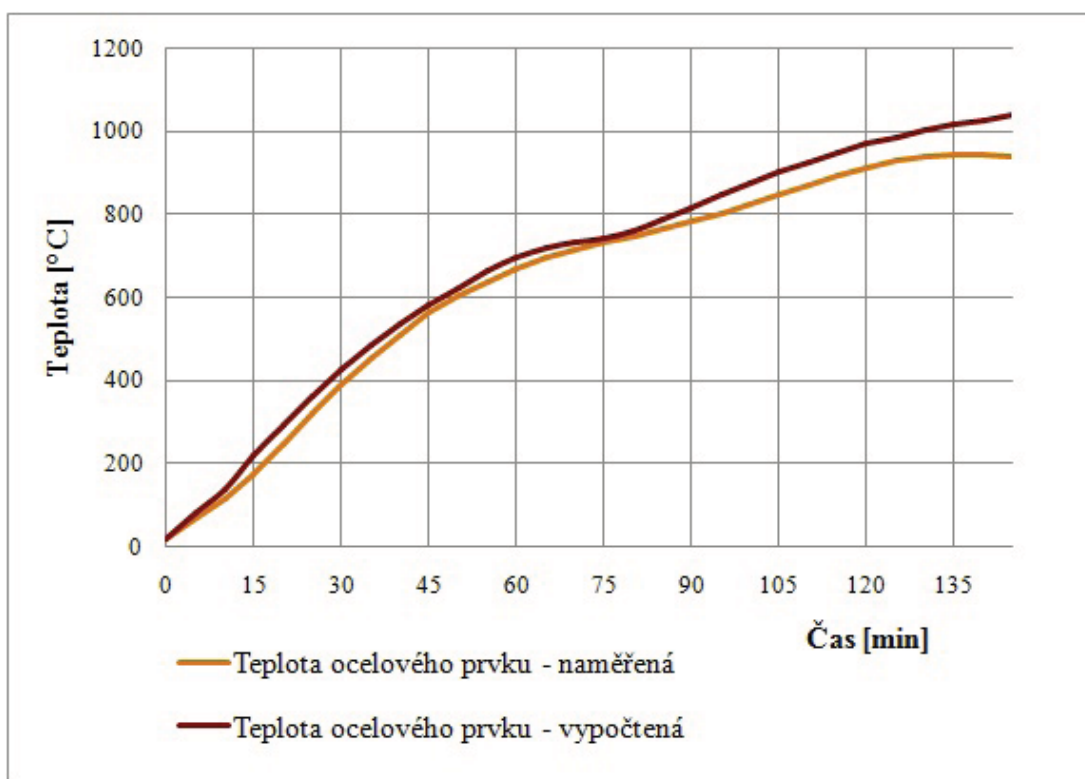
Obrázek 6.3: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 1.IPE 400



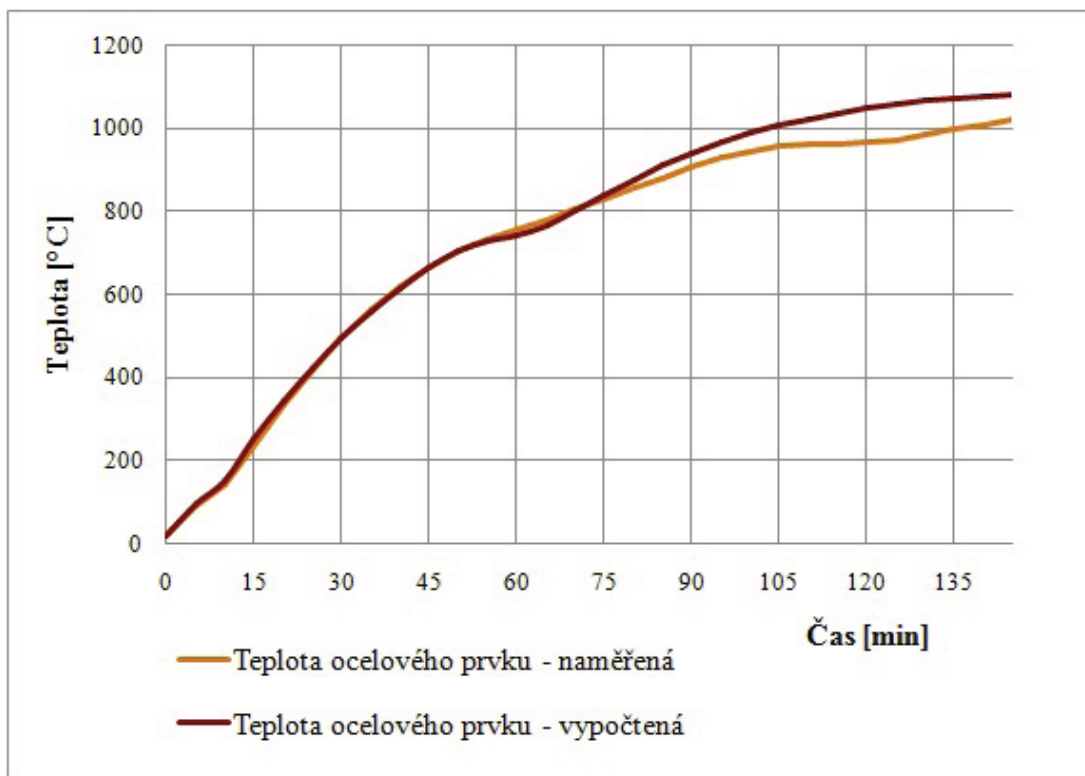
Obrázek 6.4: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 2.IPE 400



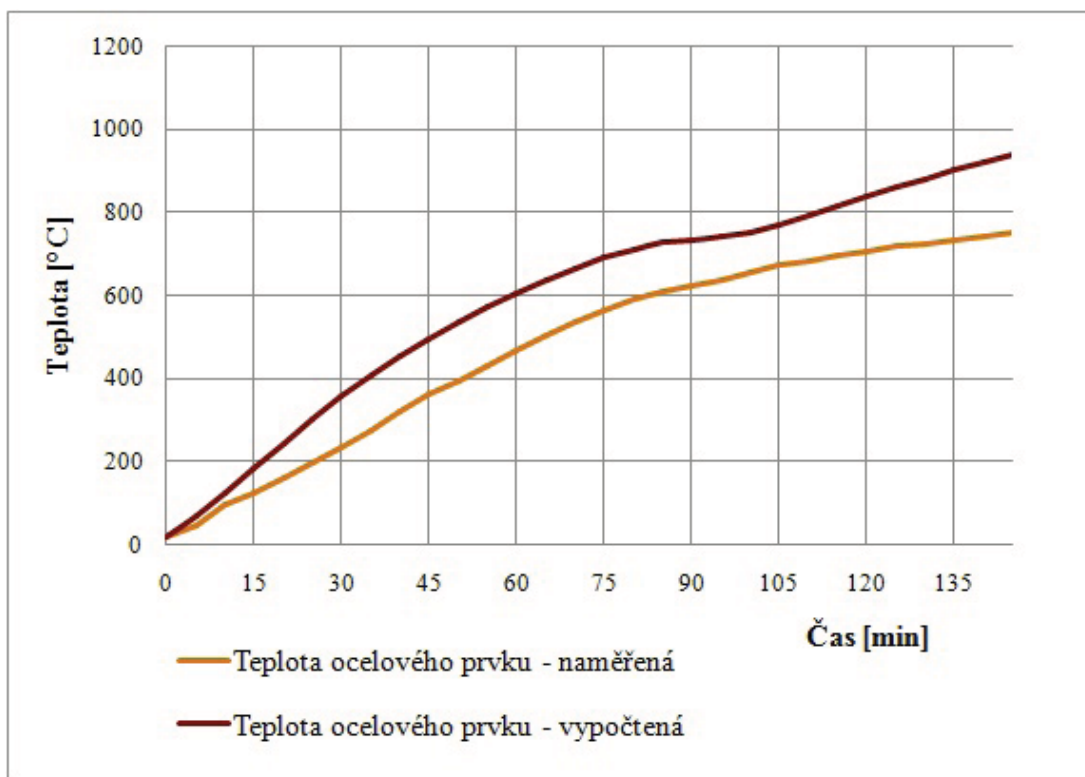
Obrázek 6.5: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 14.HEB 300



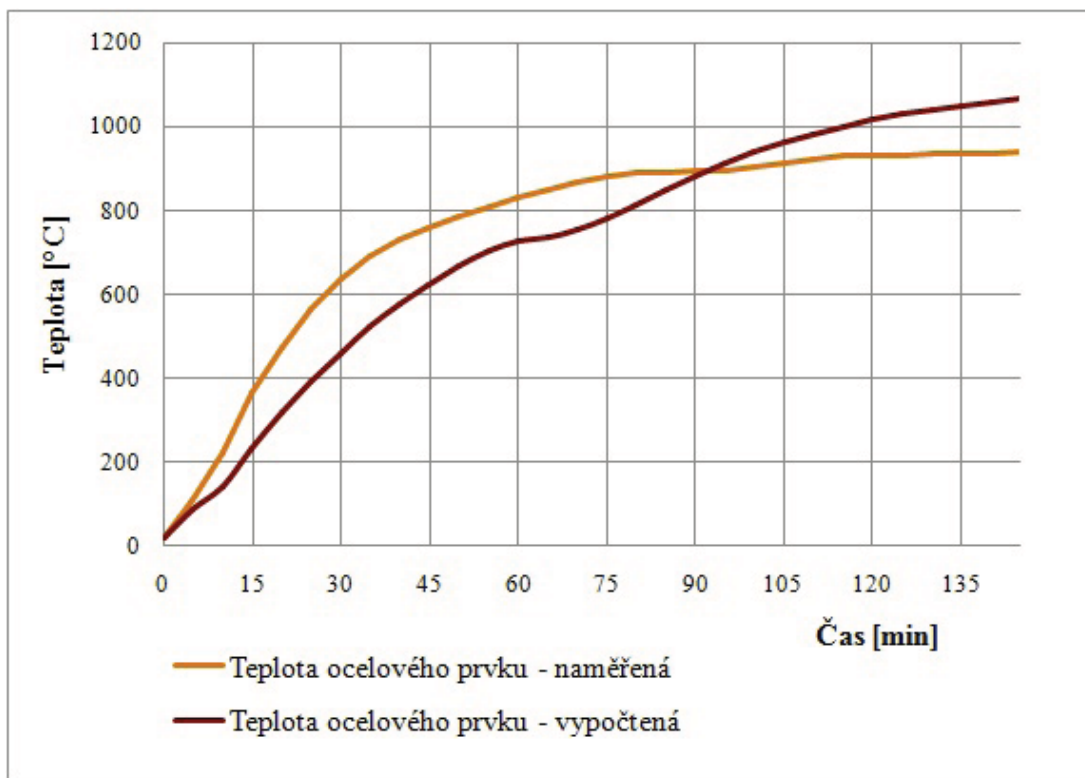
Obrázek 6.6: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 15.HEA 300



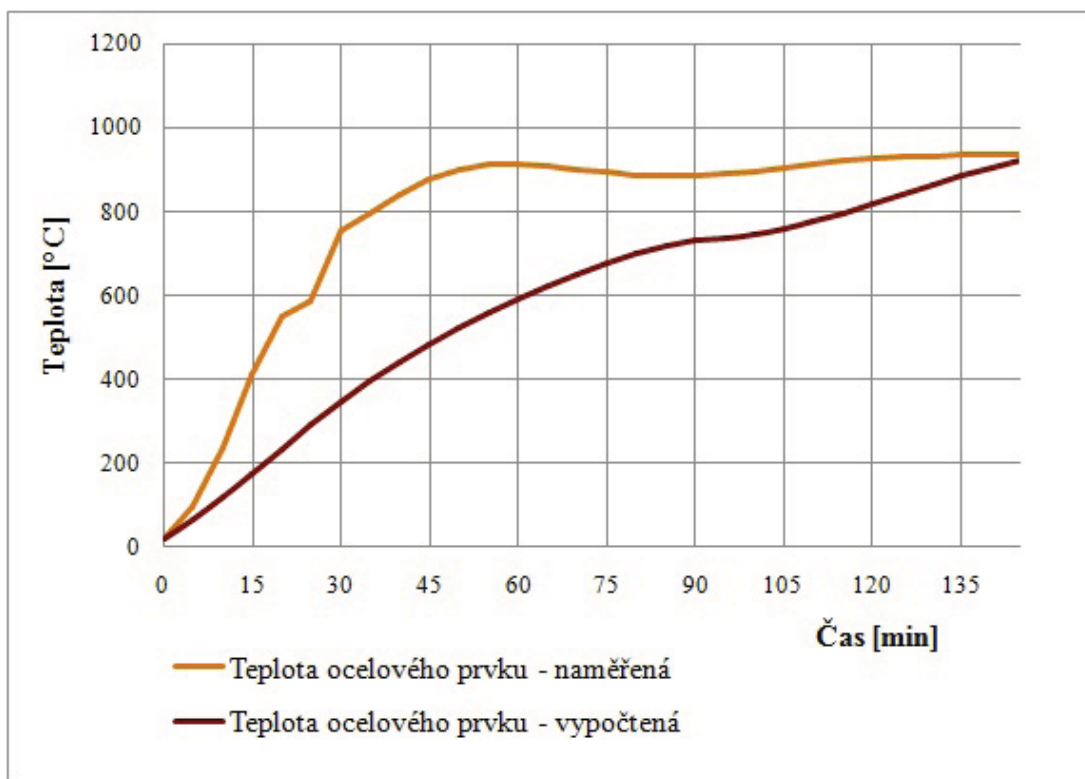
Obrázek 6.7: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 17.HEA 200



Obrázek 6.8: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 23.HEA 300 box



Obrázek 6.9: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 31.D76,1 x 5



Obrázek 6.10: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 33.100 x 100 x 7,1

Test č.2 - datum 13.1.2011

V druhém testu byly odzkoušeny všechny prvky s tloušťkou vrstvy požárně ochranného materiálu d_p kolem 50 mm v časovém intervalu (0 až 509 minut). Tabulka 6.4, 6.5 a tabulka 6.6 ukazuje hodnoty naměřených teplot z experimetu a vypočtených teplot pro jednotlivé ocelové chráněné profily. V testu byly zkoušeny ocelové otevřené profily a také uzavřený čtvercový profil 34.100 x 100 x 7,2; s rozměry 162 x 162 x 8,3 mm.

Tabulka 6.4: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 1

Čas t [min]	3. IPE 400		4. IPE 400		13. HEB 450		16. HEA 300	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	30,5	20,00	27,7	20,00	26,8	20,00	29,8	20,00
10	35,2	20,37	28,9	20,46	27,7	21,10	36,4	20,15
20	84,3	38,47	65,5	39,01	47,0	36,52	87,0	36,84
30	108,6	65,07	100,0	65,95	78,8	57,06	115,4	62,57
40	115,2	92,15	105,6	93,18	102,7	77,89	120,2	89,00
50	115,9	108,16	108,8	108,84	114,0	97,14	121,1	106,21
60	115,6	118,49	110,5	119,15	114,8	109,43	120,5	116,61
70	115,6	127,89	109,8	128,82	114,5	118,66	121,8	125,37
80	116,5	140,29	109,1	141,92	115,4	127,20	122,3	136,13
90	117,8	161,83	108,6	164,66	118,8	137,62	125,3	153,71
100	120,1	185,93	108,4	188,96	122,3	152,58	128,1	177,38
110	124,1	209,32	109,3	212,54	126,9	170,83	135,7	200,35
120	132,5	232,05	112,4	235,44	128,7	188,64	148,0	222,69
130	147,3	254,16	118,7	257,72	121,6	206,03	157,2	244,42
140	166,5	275,68	130,8	279,41	130,1	223,03	179,2	265,60
150	187,4	296,66	148,2	300,53	142,4	239,66	200,5	286,25
160	209,5	317,10	166,9	321,12	155,9	255,95	222,3	306,39
170	232,4	337,03	186,6	341,18	171,8	271,91	245,5	326,03
180	256,3	356,47	207,1	360,74	189,6	287,54	269,7	345,21
190	280,8	375,42	228,3	379,81	209,0	302,86	295,2	363,92
200	305,3	393,91	249,7	398,39	229,2	317,89	319,9	382,19
210	329,9	411,93	271,7	416,51	250,3	332,62	344,8	400,01
220	354,4	429,49	293,9	434,16	271,1	347,07	368,3	417,40
230	378,6	446,61	316,9	451,35	292,1	361,24	391,3	434,37
240	402,3	463,29	340,2	468,10	313,7	375,14	413,7	450,91
250	425,5	479,53	363,6	484,40	334,9	388,77	435,1	467,04
260	448,0	495,35	386,6	500,26	355,8	402,14	455,9	482,77
270	469,8	510,74	409,1	515,70	376,2	415,24	475,7	498,09
280	491,3	525,72	430,9	530,72	396,1	428,09	495,0	513,02
290	513,3	540,30	451,9	545,32	415,6	440,69	513,7	527,56
300	536,6	554,47	472,3	559,51	434,7	453,04	532,2	541,71
310	559,5	568,25	491,8	573,31	452,8	465,14	549,4	555,49
320	579,1	581,65	510,8	586,71	464,2	476,99	566,2	568,90
330	593,4	594,67	529,9	599,74	482,2	488,61	583,7	581,95
340	607,8	607,34	549,4	612,41	503,3	499,99	600,9	594,64
350	621,5	619,69	571,6	624,78	525,8	511,13	615,9	606,99
360	629,7	631,73	593,6	636,82	545,4	522,04	630,1	619,05
370	638,1	643,45	615,5	648,51	570,0	532,73	646,7	630,82
380	645,0	654,81	637,8	659,83	590,6	543,19	663,2	642,27
400	662,9	676,35	672,0	681,20	641,1	563,46	681,6	664,16
410	670,7	686,44	682,9	691,15	670,5	573,27	704,3	674,54
420	677,6	695,99	689,3	700,51	700,3	582,87	731,0	684,48
430	684,5	704,90	700,9	709,15	729,0	592,26	761,0	693,93
440	691,0	713,06	711,4	716,92	752,0	601,45	787,4	702,80
450	697,7	720,26	720,6	723,62	773,1	610,47	796,9	710,97
460	704,2	726,31	729,2	729,01	786,3	619,32	786,0	718,30
470	710,2	730,98	738,2	732,92	789,5	628,01	785,4	724,59
480	715,3	734,20	746,4	735,44	793,0	636,52	791,5	729,62
490	720,5	736,51	756,6	738,18	785,4	644,84	795,3	733,25
500	725,6	739,68	768,2	742,01	795,0	652,98	795,3	735,63
509	730,0	743,47	779,6	746,43	805,0	660,13	798,3	738,05

Tabulka 6.5: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 2

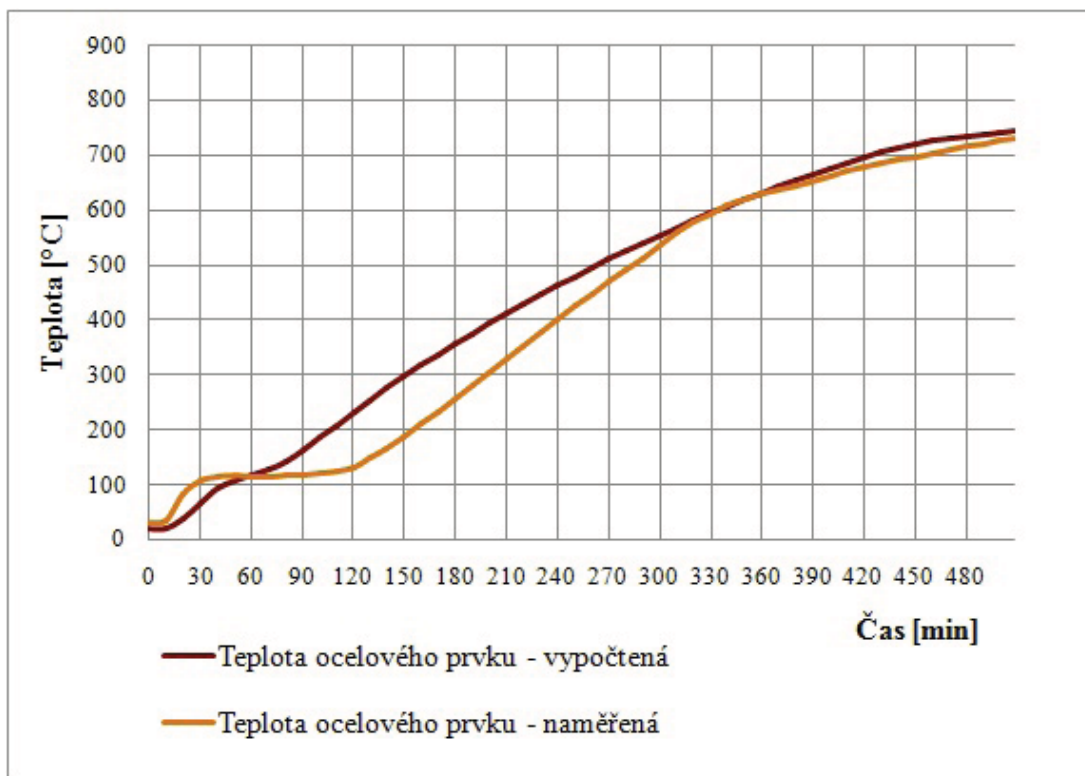
Čas t [min]	18. HEA 200		20. IPE 200		21. IPE 120	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	27,6	20,00	33,8	20,00	29,2	20,00
10	31,2	20,00	39,5	20,00	85,1	20,00
20	69,8	38,55	79,2	37,06	100,3	36,21
30	98,7	69,38	121,1	71,99	100,4	73,78
40	109,1	98,52	130,2	101,90	100,0	103,54
50	110,8	112,29	137,4	114,43	99,9	115,40
60	111,1	122,04	137,9	124,04	99,6	125,07
70	115,5	132,88	137,7	136,24	100,2	138,41
80	118,6	150,68	136,8	161,47	104,0	168,90
90	121,3	179,74	138,5	195,07	113,0	205,46
100	125,1	207,79	143,1	227,41	132,6	240,58
110	130,8	234,94	149,7	258,62	144,7	274,40
120	135,5	261,24	153,8	288,76	150,4	307,01
130	141,1	286,76	147,7	317,92	168,6	338,48
140	157,1	311,53	159,8	346,12	188,3	368,85
150	174,8	335,58	172,1	373,41	209,7	398,17
160	211,3	358,94	181,8	399,82	233,7	426,45
170	238,6	381,63	193,0	425,37	260,9	453,73
180	269,7	403,67	205,6	450,07	291,2	480,03
190	301,6	425,08	220,9	473,94	322,8	505,35
200	332,2	445,85	237,4	496,99	354,7	529,71
210	361,8	466,01	249,5	519,24	386,1	553,14
220	388,6	485,56	265,6	540,70	416,9	575,65
230	414,2	504,51	282,4	561,38	446,6	597,26
240	438,6	522,88	298,5	581,31	475,1	618,03
250	461,6	540,67	315,8	600,49	503,0	638,03
260	483,6	557,89	334,9	619,00	525,5	657,19
270	504,0	574,56	355,4	636,88	547,2	675,40
280	522,8	590,69	376,7	654,07	570,1	692,47
290	540,8	606,29	399,1	670,49	593,2	708,05
300	558,4	621,44	422,9	686,03	615,1	721,48
310	573,7	636,13	448,1	700,47	635,2	731,40
320	589,8	650,33	474,2	713,48	650,4	736,97
330	607,6	664,00	501,1	724,40	661,2	744,60
340	623,5	677,08	529,5	732,24	671,1	755,55
350	644,6	689,46	562,1	736,76	682,8	768,60
360	655,6	701,03	591,8	742,95		
370	665,6	711,57	614,7	751,85		
380	671,0	720,75	631,9	762,74		
400	684,7	733,26	676,7	787,69		
410	697,4	736,46	703,8	800,84		
420	703,8	740,78	729,9	814,07		
430	721,1	746,89	758,5	827,24		
440	741,2	754,58	775,1	840,23		
450	741,4	763,50	790,3	852,97		
460	740,0	773,27	813,0	865,40		
470	741,3	783,60	839,0	877,48		
480	742,1	794,28	856,4	889,17		
490	744,8	805,13	866,0	900,47		
500	751,1	816,04	872,1	911,33		
509	760,7	825,84	880,5	920,71		

Tabulka 6.6: Teplota ocelového uzavřeného chráněného profilu ve °C

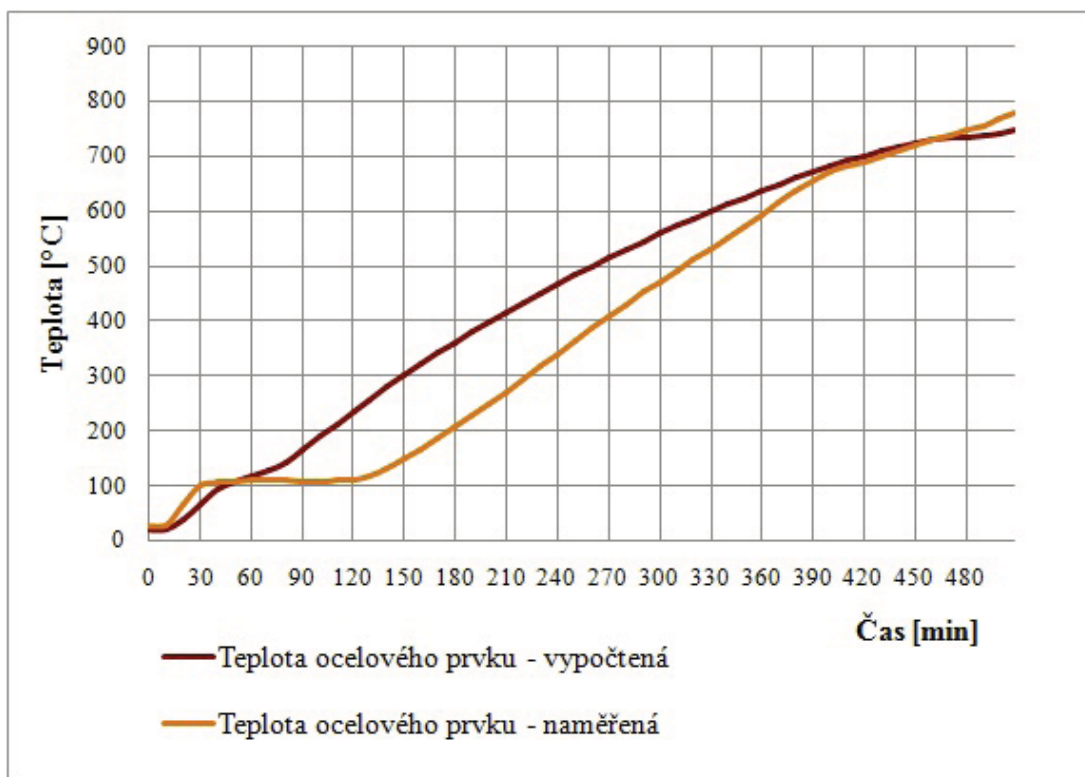
Čas t [min]	34. 100 x 100 x 7,2		Čas t [min]	34. 100 x 100 x 7,2	
	Naměřená	Vypočtená		Naměřená	Vypočtená
0	26,7	20,00	260	593,8	434,95
10	36,7	20,58	270	615,1	449,03
20	112,8	36,61	280	634,8	462,81
30	126,4	59,25	290	652,8	476,27
40	132,5	82,35	300	669,2	489,44
50	129,7	101,44	310	684,1	502,30
60	130,8	112,77	320	697,4	514,88
70	134,6	121,52	330	707,5	527,17
80	146,1	130,73	340	718,9	539,17
90	145,7	142,89	350	725,2	550,89
100	152,0	162,08	360	733,6	562,34
110	165,6	182,26	370	745,0	573,52
120	187,4	201,92	380	756,5	584,43
130	220,4	221,10	400	761,2	605,48
140	256,6	239,82	410	768,2	615,67
150	290,8	258,11	420	761,7	625,65
160	326,0	275,98	430	759,8	635,41
170	359,6	293,47	440	760,9	644,94
180	392,1	310,58	450	764,0	654,22
190	422,2	327,32	460	771,6	663,24
200	449,8	343,71	470	778,2	671,98
210	476,0	359,74	480	780,2	680,41
220	501,0	375,44	490	784,4	688,50
230	525,0	390,81	500	791,8	696,21
240	548,2	405,84	509	801,5	702,77
250	571,6	420,56			

V následujících grafech jsou vykresleny hodnoty pro jednotlivé ocelové profily z výše uvedených tabulek 6.4, 6.5 a 6.6.

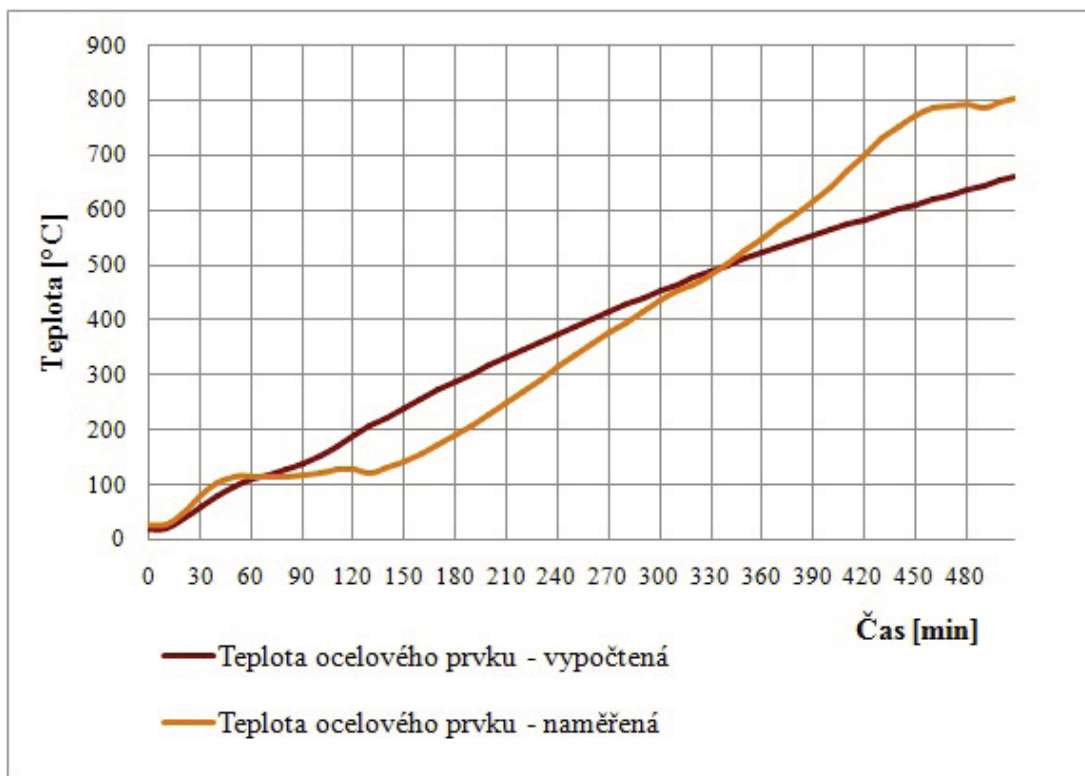
Chráněný ocelový uzavřený profil 34.100 x 100 x 7,2 obsahuje vzduchovou dutinu, která se v přírůstkové metodě nedá zohlednit. Proto předpověď teploty tohoto profilu není správná a musí se použít metoda jiná, například řešení pomocí metody konečných prvků.



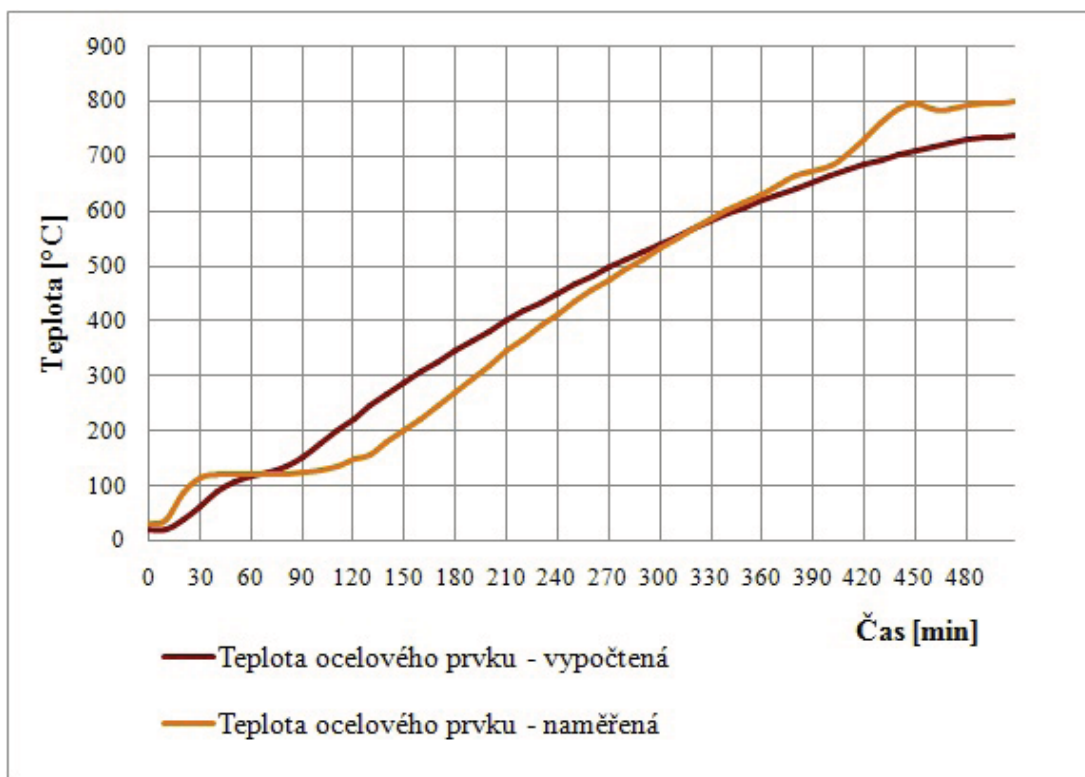
Obrázek 6.11: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 3.IPE 400



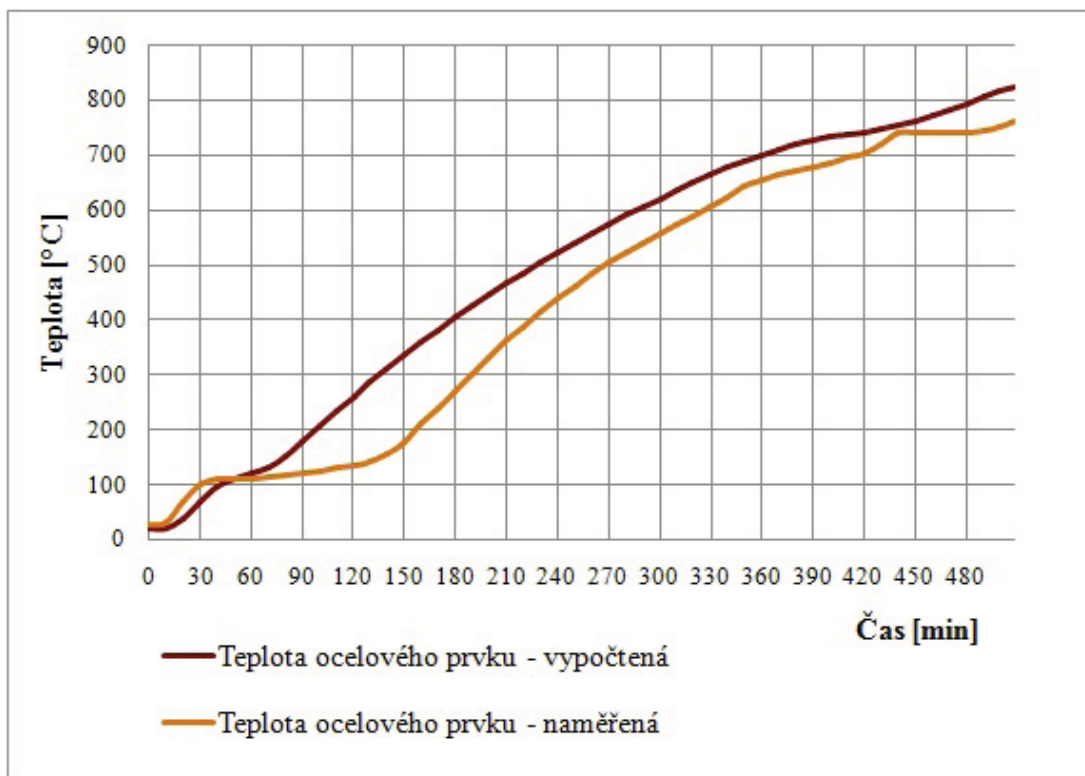
Obrázek 6.12: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 4.IPE 400



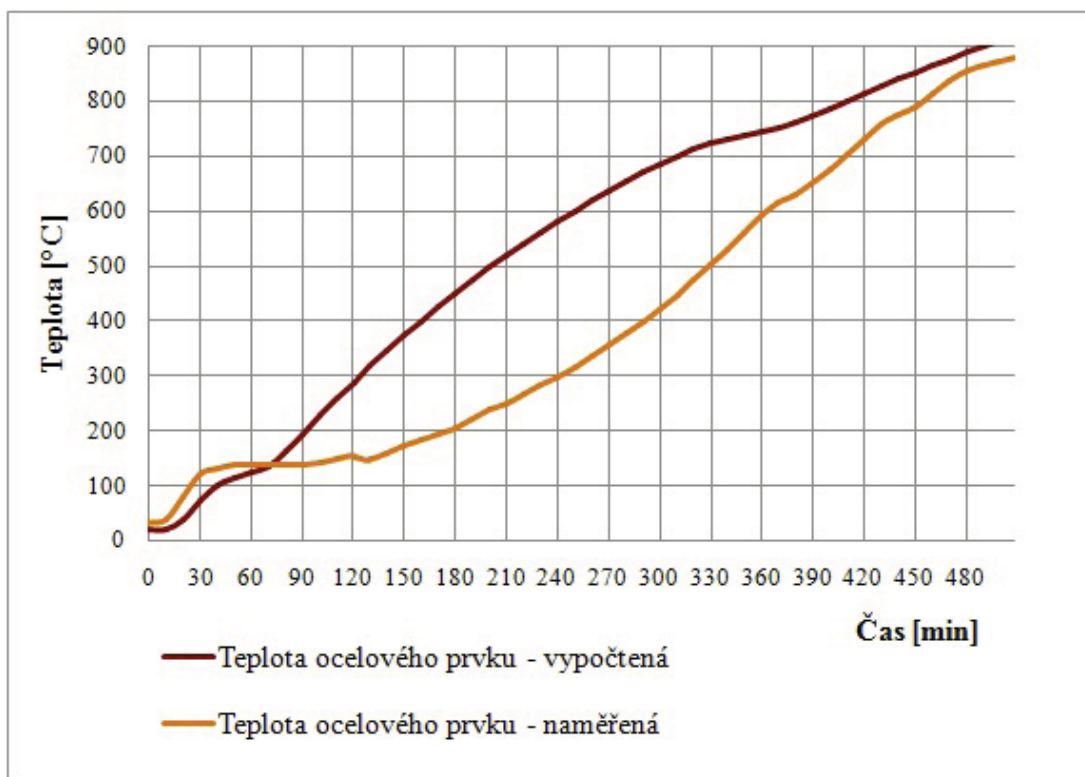
Obrázek 6.13: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 13.HEB 450



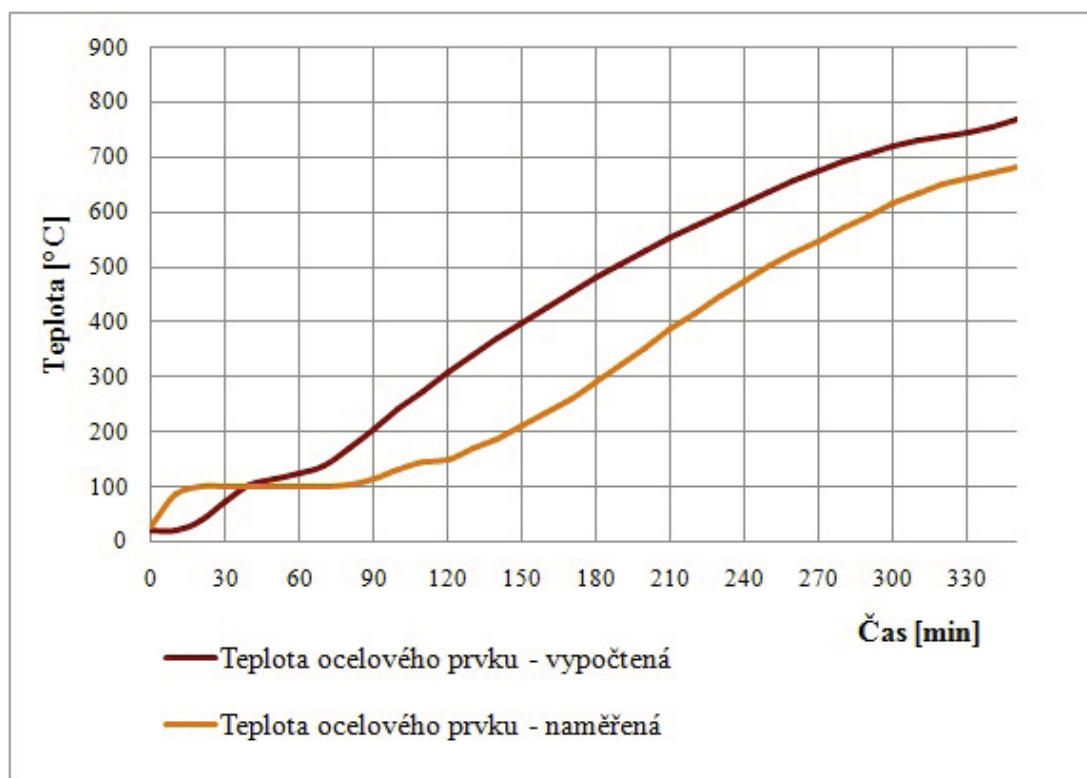
Obrázek 6.14: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 16.HEA 300



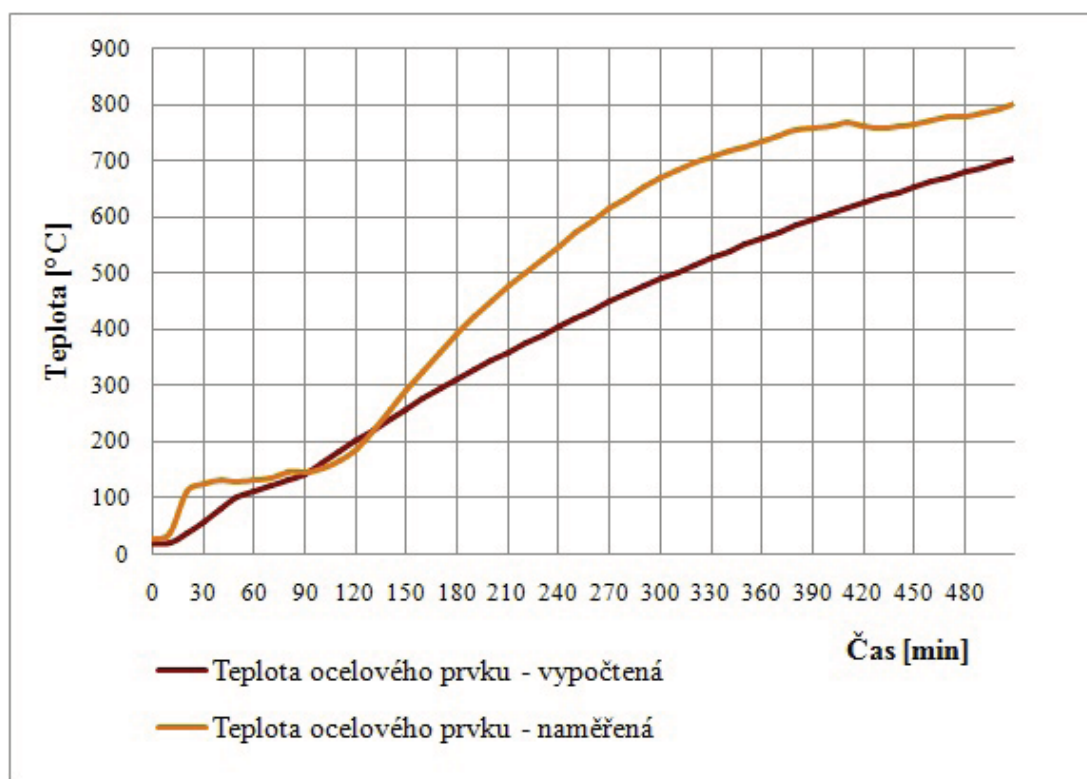
Obrázek 6.15: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 18.HEA 200



Obrázek 6.16: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 20.IPE 200



Obrázek 6.17: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 21.IPE 120



Obrázek 6.18: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 34.100 x 100 x 7,2

Test č.3 - datum 20.1.2011

V třetím testu byly odzkoušeny všechny prvky s různými tloušťkami vrstvy požárně ochranného materiálu d_p v časovém intervalu (0 až 525 minut). Tabulka 6.7, 6.8 a tabulka 6.9 ukazuje hodnoty naměřených teplot z experimentu a vypočtených teplot pro jednotlivé ocelové chráněné profily. V testu byly zkoušeny ocelové otevřené profily a také uzavřený kruhový profil 32.D76,1 x 6.

Tabulka 6.7: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 1

Čas t [min]	5. IPE 400		6. IPE 400		11. HEM 280		12. HEM 280	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	24,8	20,00	21,2	20,00	13,4	20,00	17,7	20,00
10	28,4	20,42	21,6	20,44	101,4	97,69	26,1	30,16
20	74,3	38,80	47,5	38,91	193,5	177,70	66,6	55,23
30	105,0	65,60	93,3	65,78	293,7	259,93	101,1	82,06
40	109,1	92,78	106,6	92,98	381,4	334,04	112,8	105,29
50	112,4	108,57	111,0	108,71	457,2	400,96	114,0	121,17
60	113,7	118,89	111,7	119,02	523,7	461,31	122,2	137,21
70	114,9	128,45	111,6	128,63	584,4	515,60	140,9	159,11
80	116,8	141,26	111,3	141,59	633,0	564,30	167,2	182,46
90	120,4	163,53	110,9	164,09	675,4	607,93	197,8	205,05
100	127,2	187,76	111,0	188,35	709,5	647,40	230,8	226,95
110	138,4	211,26	112,1	211,89	731,4	682,34	264,5	248,22
120	152,3	234,09	114,7	234,76	748,8	710,98	297,5	268,90
130	169,7	256,30	119,9	257,00	772,2	729,74	329,1	289,01
140	190,3	277,92	129,9	278,66	795,6	737,70	359,6	308,59
150	212,7	298,99	144,5	299,75	820,4	750,50	388,9	327,66
160	236,4	319,51	163,9	320,31	846,9	772,26	417,1	346,23
170	261,1	339,52	185,8	340,35	872,2	799,58	444,0	364,32
180	286,8	359,04	209,0	359,88			469,9	381,94
190	313,2	378,06	233,0	378,93			494,3	399,11
200	340,1	396,60	258,1	397,49			516,9	415,84
210	367,0	414,68	284,0	415,59			538,9	432,12
220	393,2	432,29	310,2	433,22			558,9	447,97
230	418,2	449,46	335,9	450,40			575,2	463,41
240	442,0	466,18	360,7	467,13			587,1	478,43
250	464,7	482,45	384,6	483,42			599,9	493,04
260	486,1	498,30	407,3	499,28			614,8	507,25
270	506,3	513,72	429,2	514,71			628,4	521,08
280	525,4	528,72	450,2	529,71			640,4	534,52
290	543,6	543,31	470,3	544,31			651,3	547,58
300	561,1	557,50	489,1	558,50			661,0	560,29
310	578,5	571,29	506,8	572,29			669,7	572,63
320	595,4	584,69	523,6	585,70			677,7	584,63
330	611,7	597,71	539,7	598,72			685,0	596,29
340	626,4	610,38	555,2	611,39			691,7	607,64
350	627,5	622,75	571,3	623,76			698,0	618,71
360	606,9	634,79	587,6	635,80			703,4	629,52
370	600,6	646,49	603,5	647,50			708,4	640,03
380	603,3	657,82	618,8	658,82			713,1	650,25
400	615,1	679,27	646,4	680,23			722,0	669,68
410	629,8	689,28	657,9	690,21			726,0	678,84
420	643,5	698,71	665,3	699,61			729,9	687,57
430	656,0	707,47	671,5	708,31			733,6	695,84
440	667,2	715,40	677,7	716,17			737,3	703,56
450	676,9	722,31	684,0	722,97			741,0	710,66
460	685,6	727,98	689,6	728,50			745,2	717,04
470	692,9	732,20	694,7	732,57			749,4	722,59
480	698,6	734,97	698,7	735,20			754,4	727,22
490	703,1	737,47	702,3	737,82			760,3	730,85
500	707,3	741,03	705,7	741,51			766,0	733,51

Tabulka 6.8: Teploty ocelových otevřených chráněných profilů ve °C - část 2

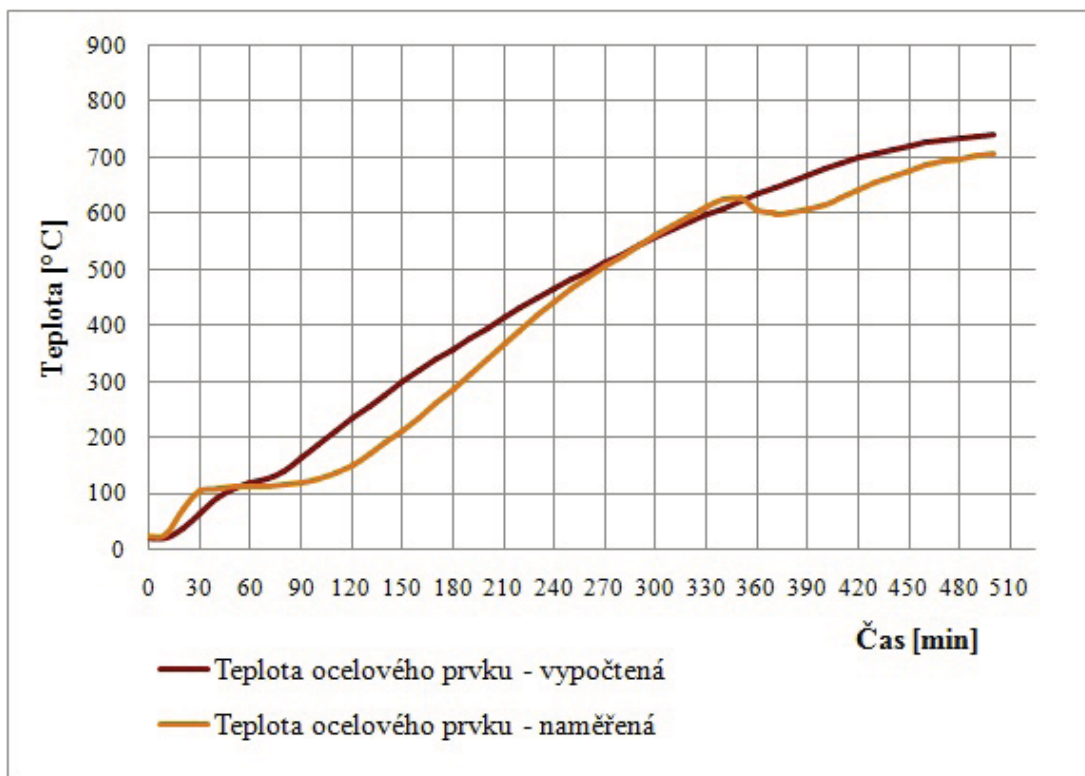
Čas t [min]	19. IPE 200		22. IPE 80		24. HEA 300 box	
	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená
0	14,3	20,00	14,5	20,00	19,0	20,00
10	51,7	45,59	22,1	20,00	19,7	20,65
20	110,1	104,86	106,6	35,85	40,8	36,62
30	112,7	122,47	115,0	73,88	80,4	59,00
40	128,2	169,16	114,9	103,70	104,2	81,80
50	169,6	243,01	114,2	115,43	106,5	100,96
60	231,3	310,81	113,5	125,08	106,5	112,40
70	300,7	373,36	113,0	138,52	106,2	121,19
80	370,6	431,11	112,6	169,65	105,8	130,31
90	436,2	484,31	112,5	206,82	105,8	142,22
100	495,2	533,20	115,4	242,52	106,4	160,89
110	549,0	577,98	129,2	276,88	107,7	180,83
120	603,5	618,95	152,9	310,00	110,4	200,25
130	651,3	656,58	183,3	341,95	115,1	219,20
140	691,5	690,20	218,9	372,77	123,0	237,70
150	722,5	717,74	260,5	402,50	135,0	255,77
160	743,2	734,05	306,8	431,17	150,0	273,45
170	764,2	744,81	353,4	458,81	167,1	290,74
180			398,3	485,43	185,6	307,66
190			441,2	511,05	204,9	324,22
200			484,1	535,69	224,4	340,44
210			527,7	559,36	244,0	356,31
220			570,8	582,09	263,4	371,85
230			615,8	603,89	282,8	387,06
240			659,1	624,86	302,0	401,96
250			697,4	645,01	321,1	416,54
260			724,3	664,26	339,9	430,80
270			743,8	682,46	358,5	444,76
280					376,7	458,42
290					394,6	471,78
300					412,0	484,85
310					428,8	497,62
320					445,1	510,11
330					460,9	522,31
340					476,1	534,24
350					490,8	545,89
360					505,0	557,28
370					518,5	568,40
380					531,6	579,26
400					555,6	600,22
410					565,9	610,35
420					576,3	620,28
430					587,4	630,00
440					598,8	639,50
450					609,8	648,77
460					617,2	657,80
470					619,7	666,57
480					634,4	675,05
490					665,4	683,22
500					697,1	691,06
510					718,3	698,50
520					735,9	705,50
525					743,7	708,82

Tabulka 6.9: Teplota ocelového uzavřeného chráněného profilu ve °C

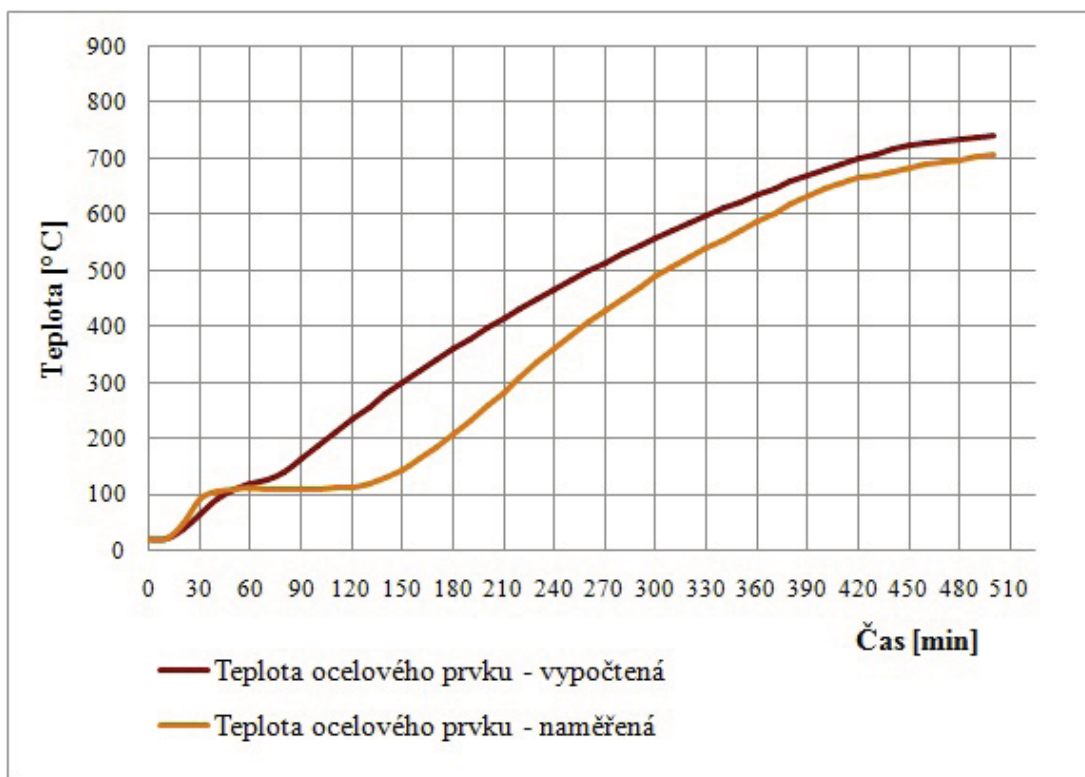
Čas t [min]	32. D76,1 x 6	
	Naměřená	Vypočtená
0	13,7	20,00
10	16,8	20,08
20	108,5	38,27
30	114,1	67,11
40	113,9	95,72
50	113,5	110,39
60	113,2	120,30
70	112,9	130,26
80	113,2	144,57
90	118,4	170,43
100	140,1	196,70
110	187,7	222,14
120	244,4	246,83
130	299,7	270,81
140	351,7	294,12
150	400,2	316,80
160	445,2	338,86
170	486,3	360,33
180	523,4	381,22
190	561,6	401,55
200	600,6	421,33
210	635,1	440,56
220	663,1	459,26
230	684,4	477,44
240	701,0	495,10
250	713,2	512,25
260	722,6	528,90
270	731,0	545,06
280	738,0	560,74
290	743,3	575,94
300	747,1	590,68
310	749,9	604,97

V následujících grafech jsou vykresleny hodnoty pro jednotlivé ocelové profily z výše uvedených tabulek 6.7, 6.8 a 6.9.

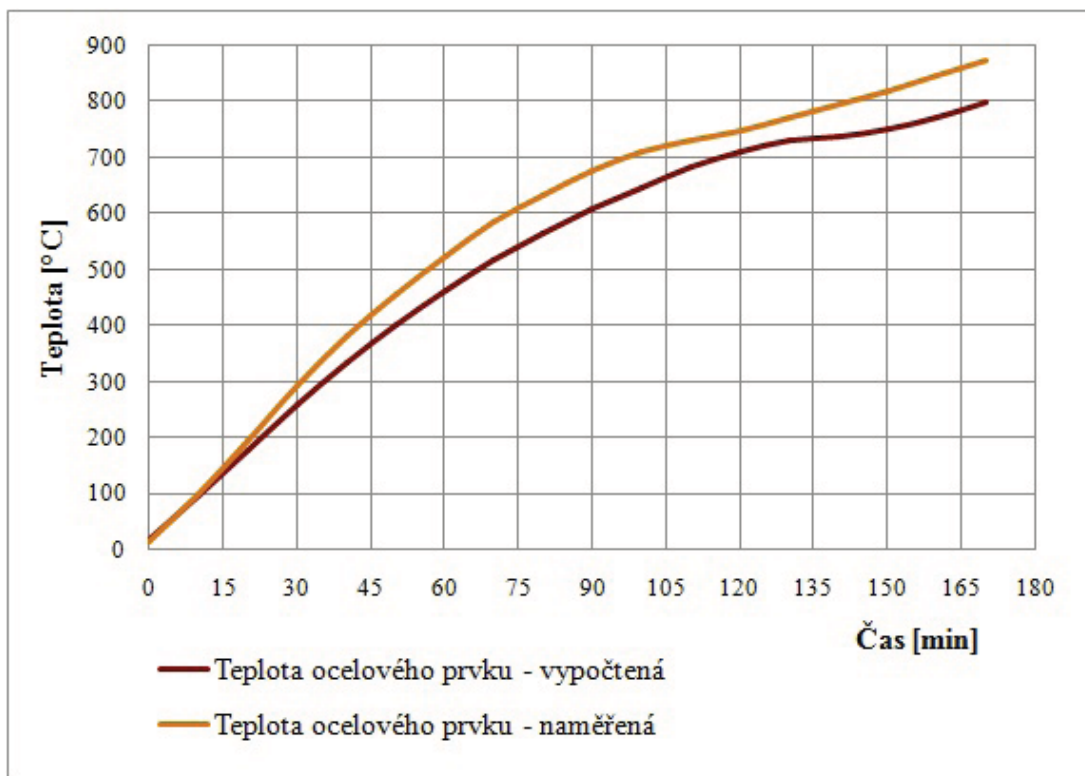
Chráněný ocelový uzavřený profil 32.D76,1 x 6 obsahuje vzduchovou dutinu, která se v přírůstkové metodě nedá zohlednit. Proto předpověď teploty tohoto profilu není správná a musí se použít metoda jiná, například řešení pomocí metody konečných prvků.



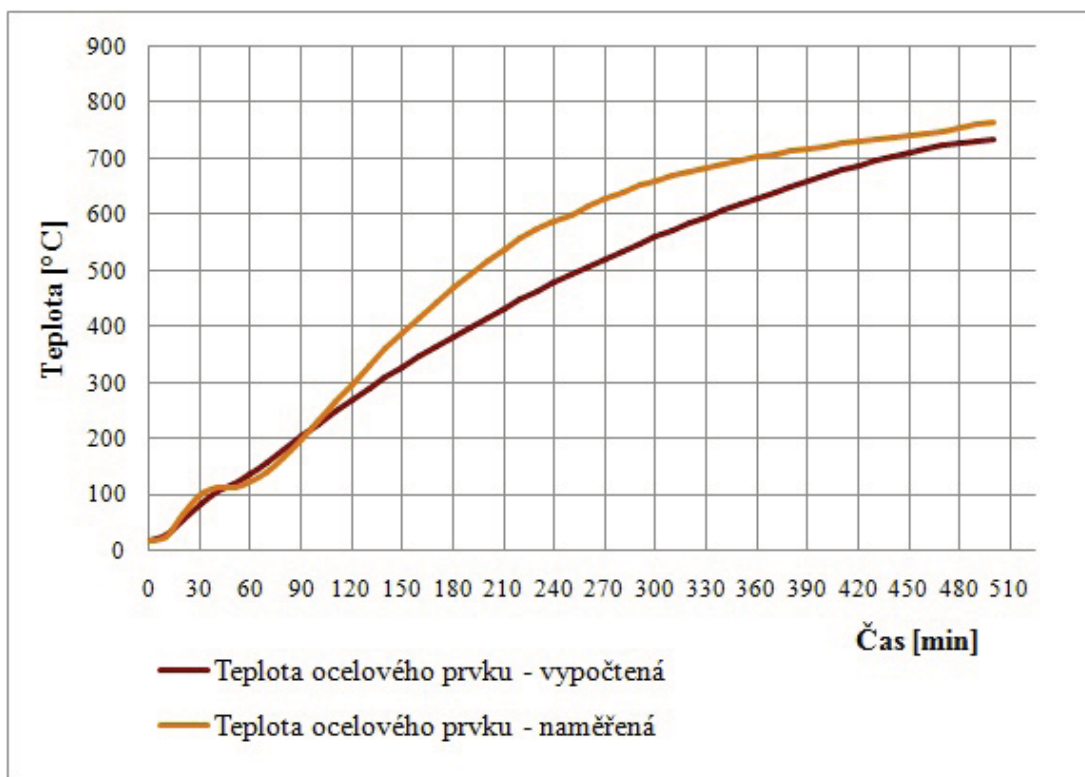
Obrázek 6.19: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 5.IPE 400



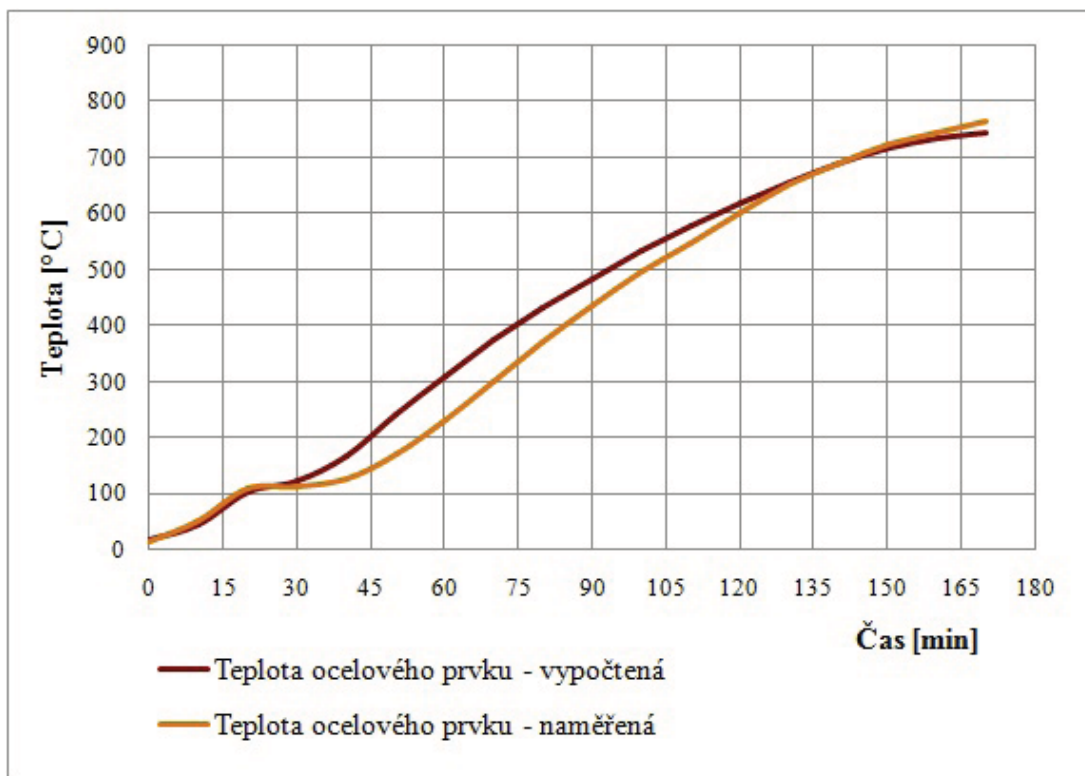
Obrázek 6.20: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 6.IPE 400



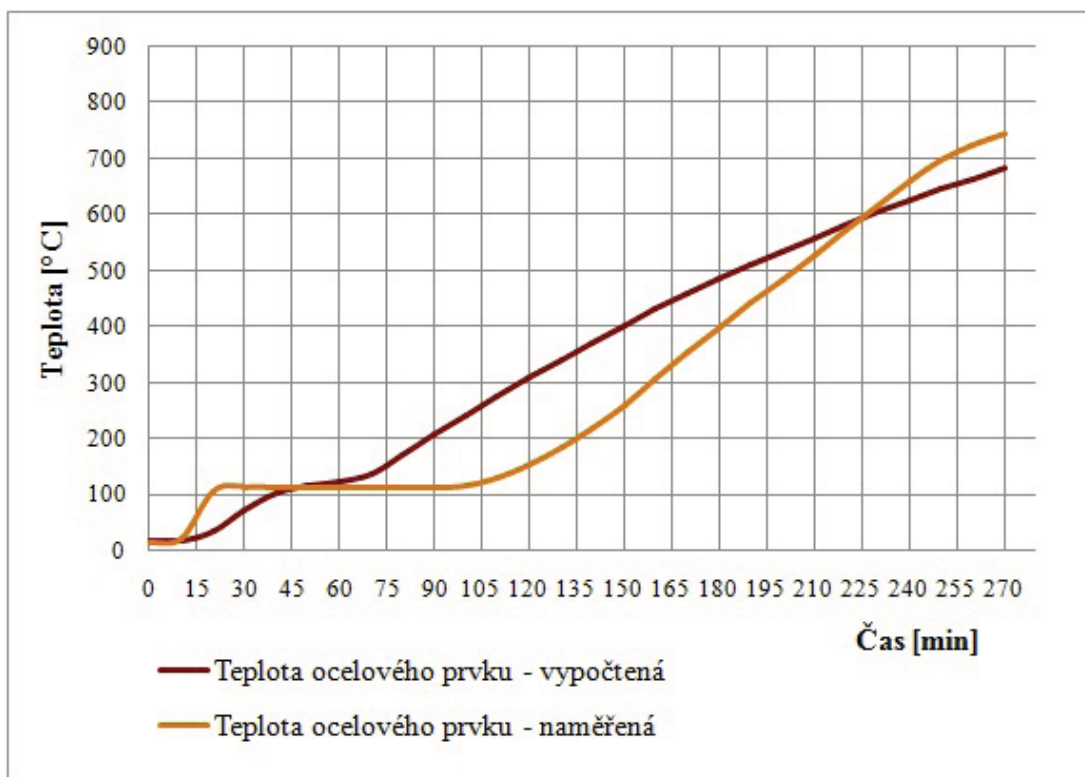
Obrázek 6.21: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 11.HEM 280



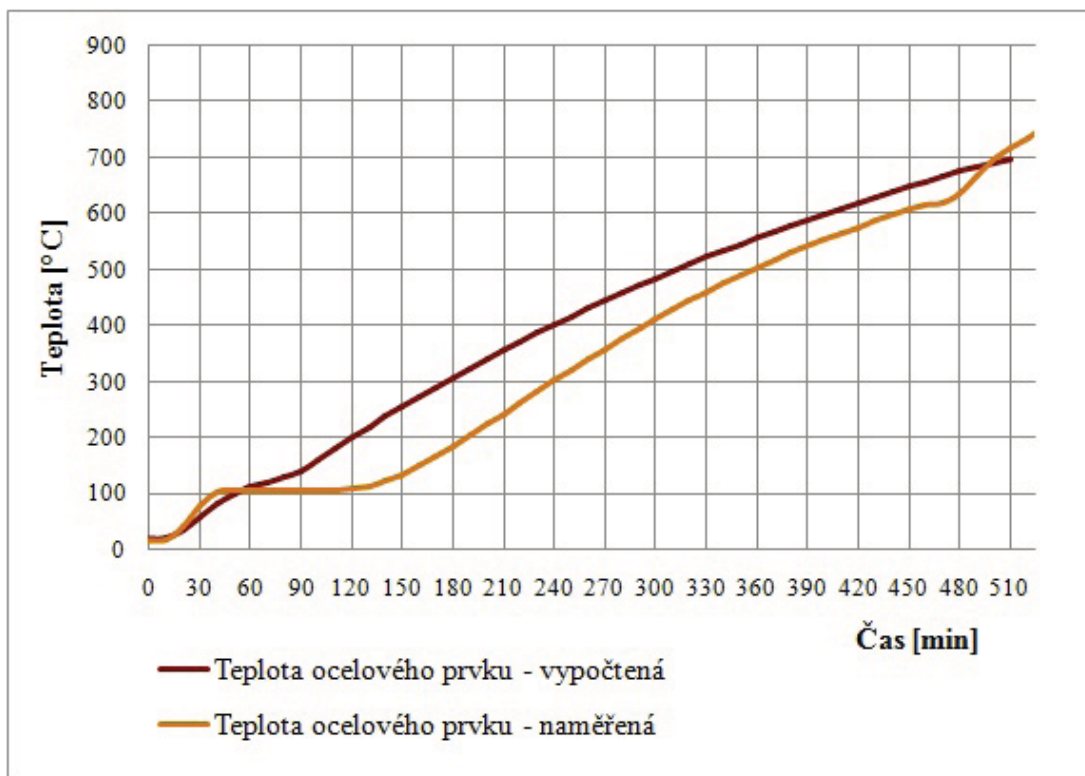
Obrázek 6.22: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 12.HEM 280



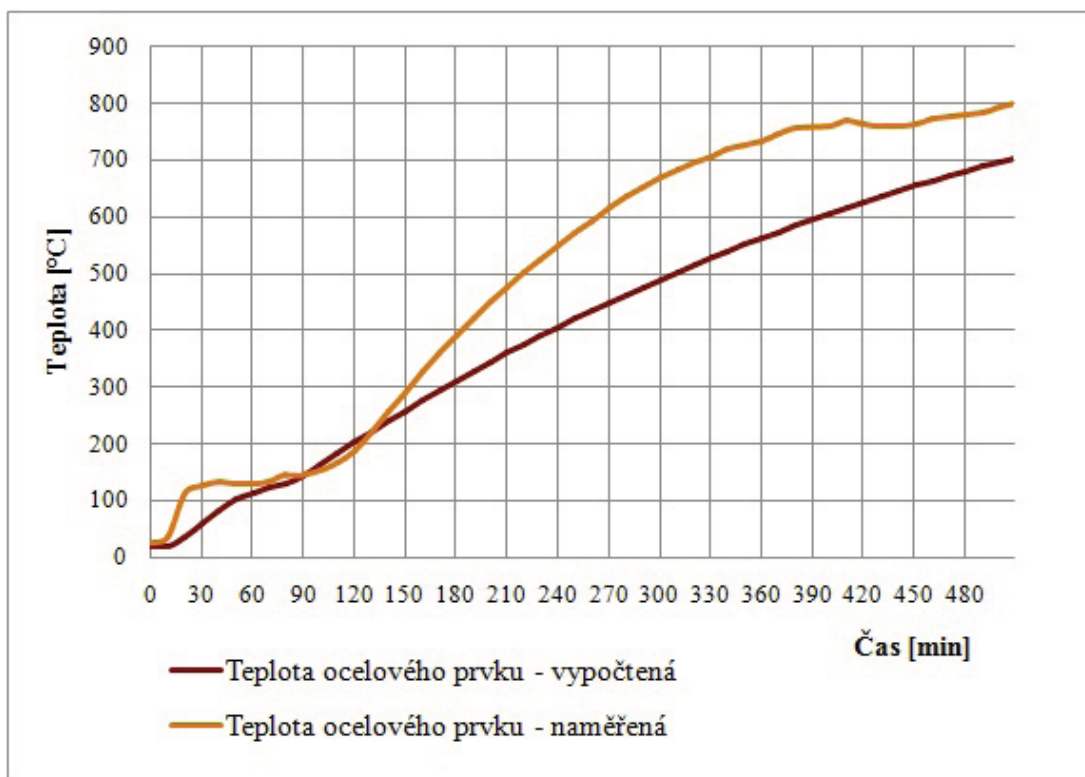
Obrázek 6.23: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 19.IPE 200



Obrázek 6.24: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 22.IPE 80



Obrázek 6.25: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 24.HEA 300 box



Obrázek 6.26: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 32.D76,1 x 6

6.1 Ověření modelu dle čínských návrhových norem

Analytický model vypočtený podle evropské normy v kapitole 6 se ověří přírůstkovou metodu popsanou v čínské normě CECS200-2006. Nejprve se musí pro jednotlivé chráněné ocelové profily ověřit podmínka z rovnice (3.4), kterou se zjistí zda se jedná o lehký požární nástřik nebo těžký požární nástřik. Pro výpočet tepelné vodivosti se použijí vzorce (6.9) a (6.10) s koeficienty zjištěnými metodou nejmenších čtverců. Teplotní přírůstek pro lehký požárně ochranný materiál je popsán rovnicí (3.10) a přírůstek pro těžký požárně ochranný materiál je popsán rovnicemi (3.16) a (3.17).

Pro ověření modelu jsou vybrány dva profily z Testu č.1 a dva profily z Testu č.2. Vybranými profily jsou 14.HEB 300, 17.HEA 200, 13.HEB 450 a 18.HEA 200.

Test č.1 - datum 10.1.2011

V tabulkách 6.10 a 6.11 jsou uvedeny vlastnosti požárního nástřiku. Objemová hmotnost oceli je $\rho_s=7850 \text{ kg/m}^3$ a pro ověření podmínky je možné využít konstantní hodnotu měrné tepelné kapacity oceli $c_s = 650 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Objemová hmotnost požárního nástřiku je $\rho_p=721 \text{ kg/m}^3$ a měrná tepelná kapacita je $c_p = 970 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Tabulka 6.10: Vlastnosti požární ochrany profilu 14.HEB 300

d_p	0,0106	[m]
$\frac{F_i}{V}$	127,1	[m ⁻¹]
F_i	1,894	[$\frac{m^2}{m}$]
V	0,0149	[$\frac{m^3}{m}$]

$$650 \cdot 7850 \cdot 0,0149 \geq 2 \cdot 970 \cdot 721 \cdot 0,0106 \cdot 1,894 \quad (6.11)$$

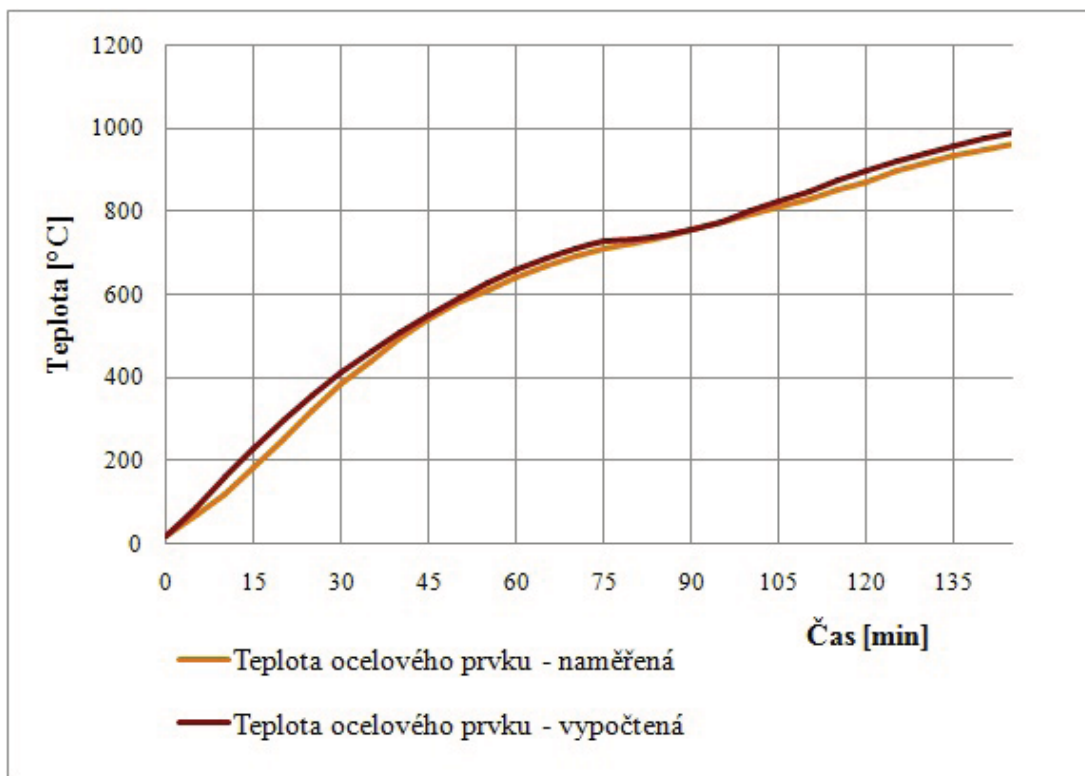
$76027,25 \geq 28081,66 \Rightarrow$ **lehký požární nástřik**

Tabulka 6.11: Vlastnosti požární ochrany profilu 17.HEA 200

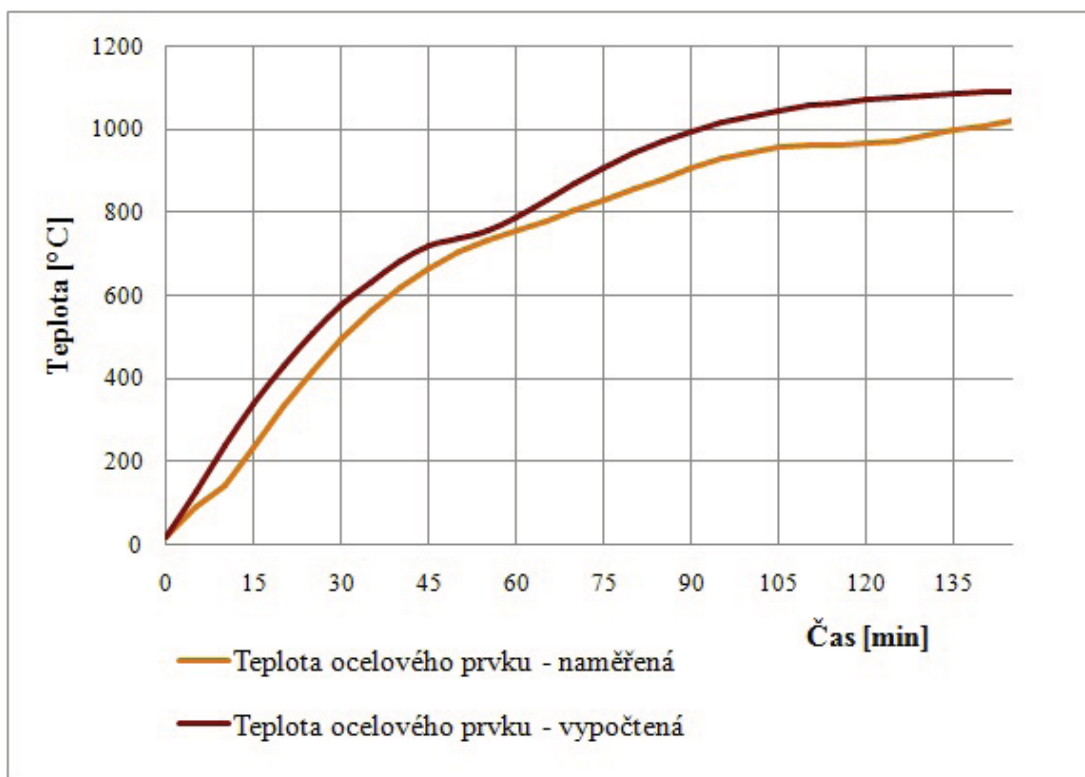
d_p	0,0112	[m]
$\frac{F_i}{V}$	222,6	[m ⁻¹]
F_i	1,198	[$\frac{m^2}{m}$]
V	0,00538	[$\frac{m^3}{m}$]

$$650 \cdot 7850 \cdot 0,00538 \geq 2 \cdot 970 \cdot 721 \cdot 0,0112 \cdot 1,198 \quad (6.12)$$

$27451,45 \geq 18767,73 \Rightarrow$ **lehký požární nástřik**



Obrázek 6.27: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 14.HEB 300



Obrázek 6.28: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 17.HEA 200

Test č.2 - datum 13.1.2011

V tabulkách 6.12 a 6.13 jsou uvedeny vlastnosti požárního nástřiku. Objemová hmotnost oceli je $\rho_s=7850 \text{ kg/m}^3$ a pro ověření podmínky je možné využít konstantní hodnotu měrné tepelné kapacity oceli $c_s = 650 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Objemová hmotnost požárního nástřiku je $\rho_p=721 \text{ kg/m}^3$ a měrná tepelná kapacita je $c_p = 970 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Tabulka 6.12: Vlastnosti požární ochrany profilu 13.HEB 450

d_p	0,0552	[m]
$\frac{F_i}{V}$	103,2	[m ⁻¹]
F_i	2,25	[$\frac{\text{m}^2}{\text{m}}$]
V	0,0218	[$\frac{\text{m}^3}{\text{m}}$]

$$650 \cdot 7850 \cdot 0,0218 \geq 2 \cdot 970 \cdot 721 \cdot 0,0552 \cdot 2,25 \quad (6.13)$$

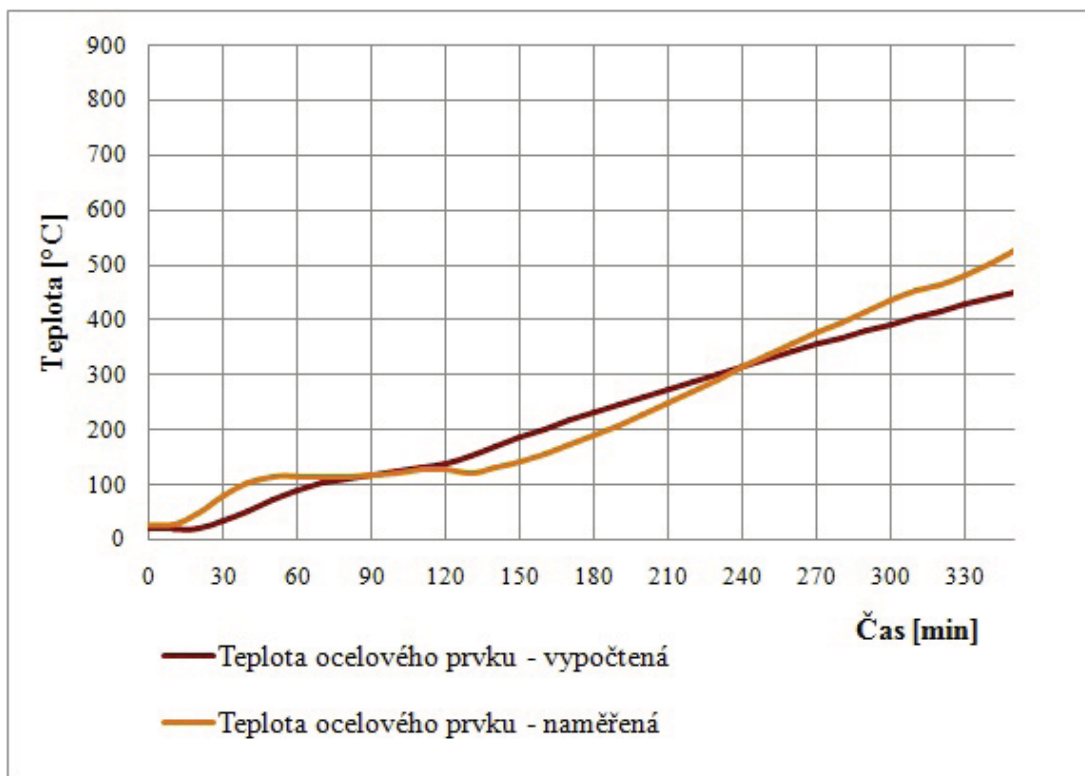
$$111234,5 \geq 173723,51 \Rightarrow \textbf{těžký požární nástřik}$$

Tabulka 6.13: Vlastnosti požární ochrany profilu 18.HEA 200

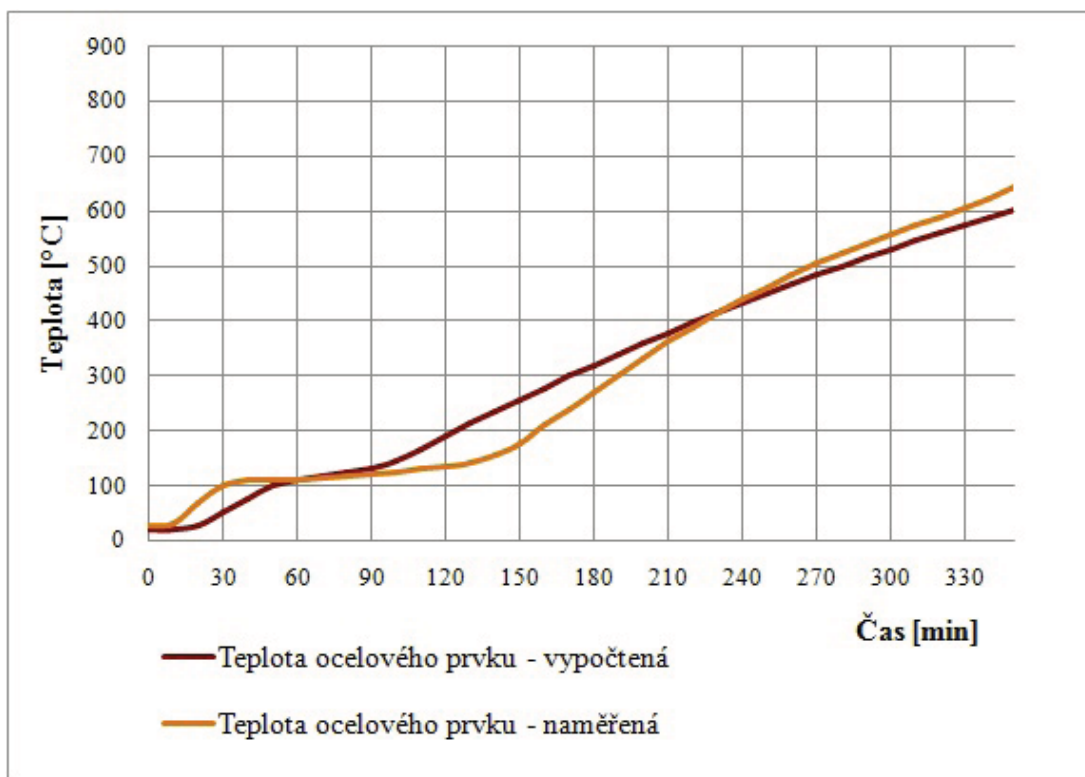
d_p	0,0571	[m]
$\frac{F_i}{V}$	222,6	[m ⁻¹]
F_i	1,198	[$\frac{\text{m}^2}{\text{m}}$]
V	0,00538	[$\frac{\text{m}^3}{\text{m}}$]

$$650 \cdot 7850 \cdot 0,00538 \geq 2 \cdot 970 \cdot 721 \cdot 0,0571 \cdot 1,198 \quad (6.14)$$

$$27451,45 \geq 95681,93 \Rightarrow \textbf{těžký požární nástřik}$$



Obrázek 6.29: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 13.HEB 450



Obrázek 6.30: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 18.HEA 200

Porovnáním průběhů teplot na obrázcích 6.27 a 6.28 v Testu č.1 a obrázcích 6.29 a 6.30 v Testu č.2 se ověřilo, že navržené efektivní teplotně závislé vlastnosti požárního nástřiku lze spolehlivě využít pro výpočet teplot požárně chráněných ocelových prvků vystavených požáru.

Tato přírůstková metoda se stejně jako přírůstková metoda podle evropských norem nedá použít pro uzavřené profily nebo profily v ochranném pouzdře, protože nelze zohlednit vzduchové dutiny.

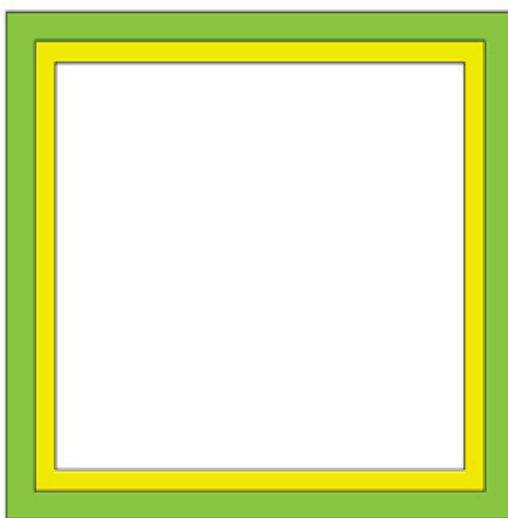
6.2 Ověření metodou konečných prvků

Model vypočtený podle evropské normy v kapitole 6 se dále ověří metodou konečných prvků pomocí programu SAFIR 2011. Metodou se ověří uzavřený chráněný ocelový profil 33.100 x 100 x 7,1, protože u uzavřených profilů lze zohlednit vliv vzduchových dutin.

Tabulka 6.14: Rozměry profilu 33.100 x 100 x 7,1

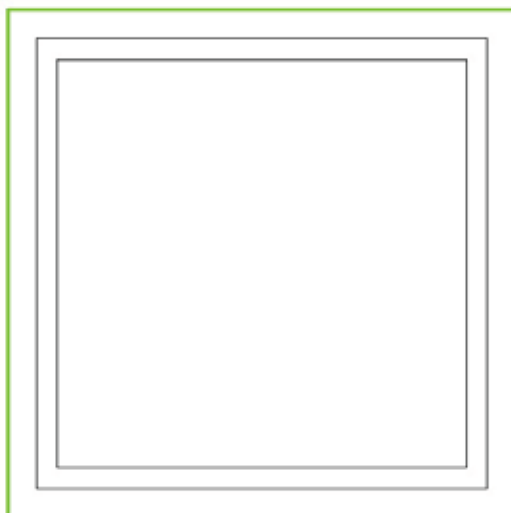
B_1	0,162	[m]
B_2	0,162	[m]
T	0,0083	[m]
d_p	0,0114	[m]

Nejprve se v programu vymodeluje geometrie ocelového prvku s požárním nástřikem a jednotlivým plochám se přiřadí materiály. Tepelné vlastnosti oceli se definují podle vzorců v kapitole 3.2.1 a vlastnosti požárního nástřiku ze vzorců zjištěných v kapitole 6.



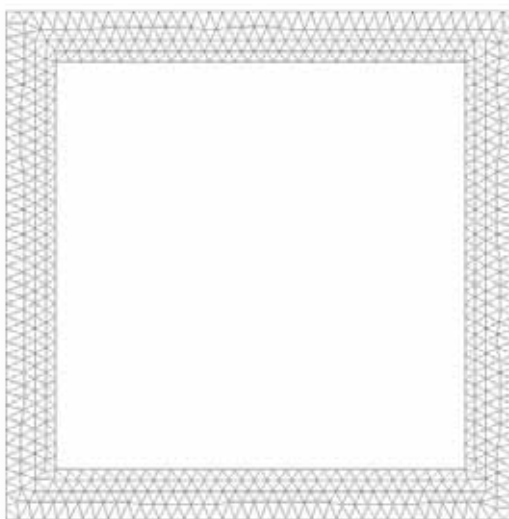
Obrázek 6.31: Modelace geometrie a přiřazení materiálů

Další krok je zadání okrajových podmínek, jako je počáteční teplota, vzduchová dutina a nominální hydrokarbonová teplotní křivka na straně vystavené požáru.



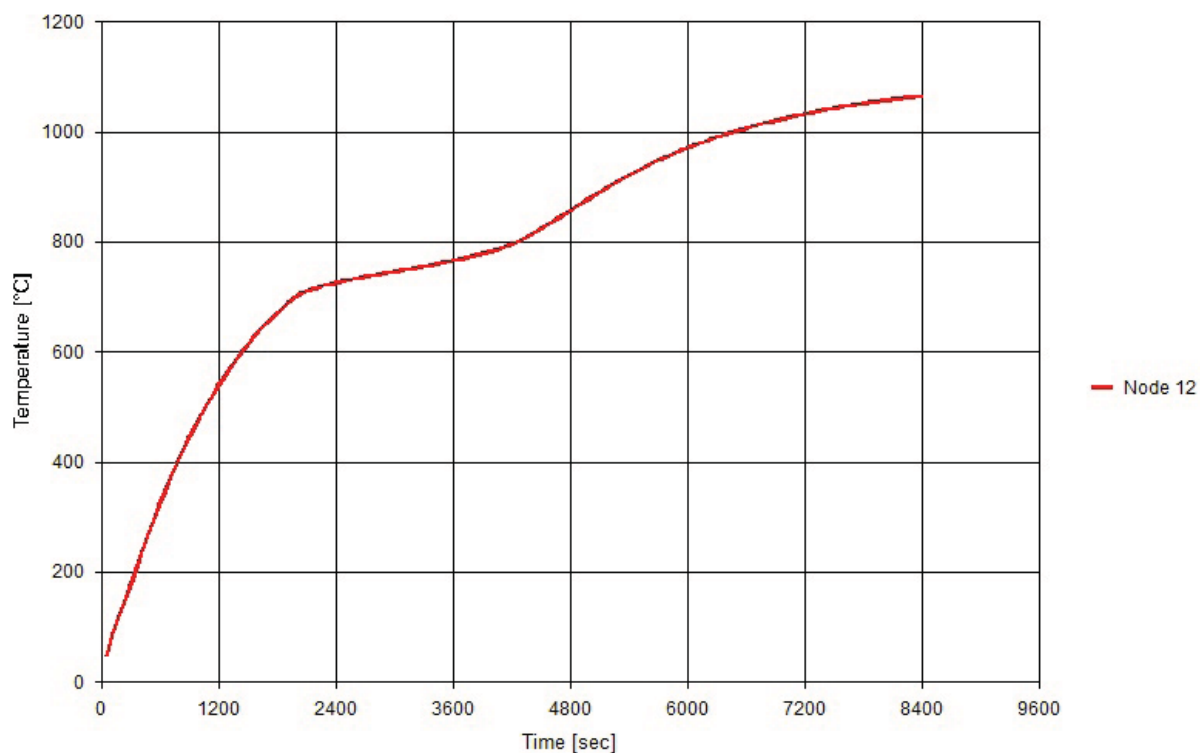
Obrázek 6.32: Okrajové podmínky

Důležitým krokem je vytvoření výpočetní sítě (mesh). Průřez se musí vhodně rozdělit na jednotlivé výpočetní elementy, obrázek 6.33. Čím je tato síť složena z více elementů, tím jsou výsledky přesnější.

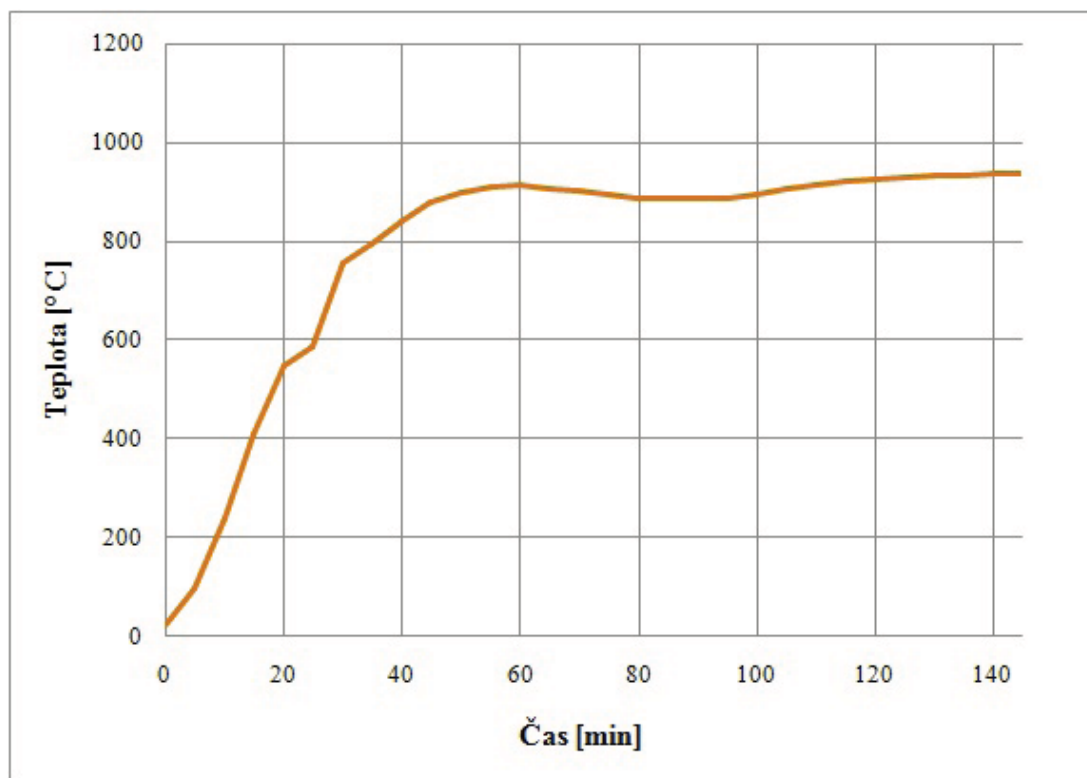


Obrázek 6.33: Rozdělení prvku na konečné elementy

Nakonec zbývá spustit výpočet. Výsledky se zobrazují v postprocesoru Diamond 2011. Vybere se vhodný bod z výpočetní sítě, aby nejlépe reprezentoval teplotu chráněného ocelového profilu. Pro tento bod se vykreslí teplota v závislosti na čase a porovná se s teplotou prvku naměřenou při experimentu.



Obrázek 6.34: Předpověď teploty chráněného ocelového profilu 33.100 x 100 x 7,1 - Diamond 2011



Obrázek 6.35: Teplota chráněného ocelového profilu 33.100 x 100 x 7,1 z experimentu

Porovnáním těchto průběhů teplot, obrázek 6.34 a 6.35, bylo zjištěno, že se jejich hodnoty v jednotlivých časech podobají. Teploty mají do 30 minut stejný nárůst a v časech 30 až 80 se mírně liší. Naměřená teplota z experimentu začala mezi 60 a 90 min klesat a následně mírně stoupla a držela se do konce zkoušky na 900 °C. Naopak teplota vypočtená programem SAFIR stále stoupá až mírně nad 1000 °C.

U této metody nelze přesně napodobit stejné podmínky jako při experimentu a nejde dostatečně vydefinovat použité materiály ve výpočtu.

Lze tedy říci, že navžené hodnoty efektivních tepelných vlastností lze využít pro popis požárního nástřiku a výpočet teplot chráněných ocelových prvků vystavených požáru.

Kapitola 7

Vyhodnocení

Pro vyhodnocení požární zkoušky se použije výpočetní model z kapitoly 6 a aplikuje se pro nominální normovou teplotní křivku. Výsledkem je tabulka popisující závislost efektivní tepelné vodivosti na teplotě a návrhové diagramy pro požární odolnosti 30 až 240 min.

Tabulka 7.1: Efektivní hodnoty tepelné vodivosti pro nástřík Cafco Fendolite MII

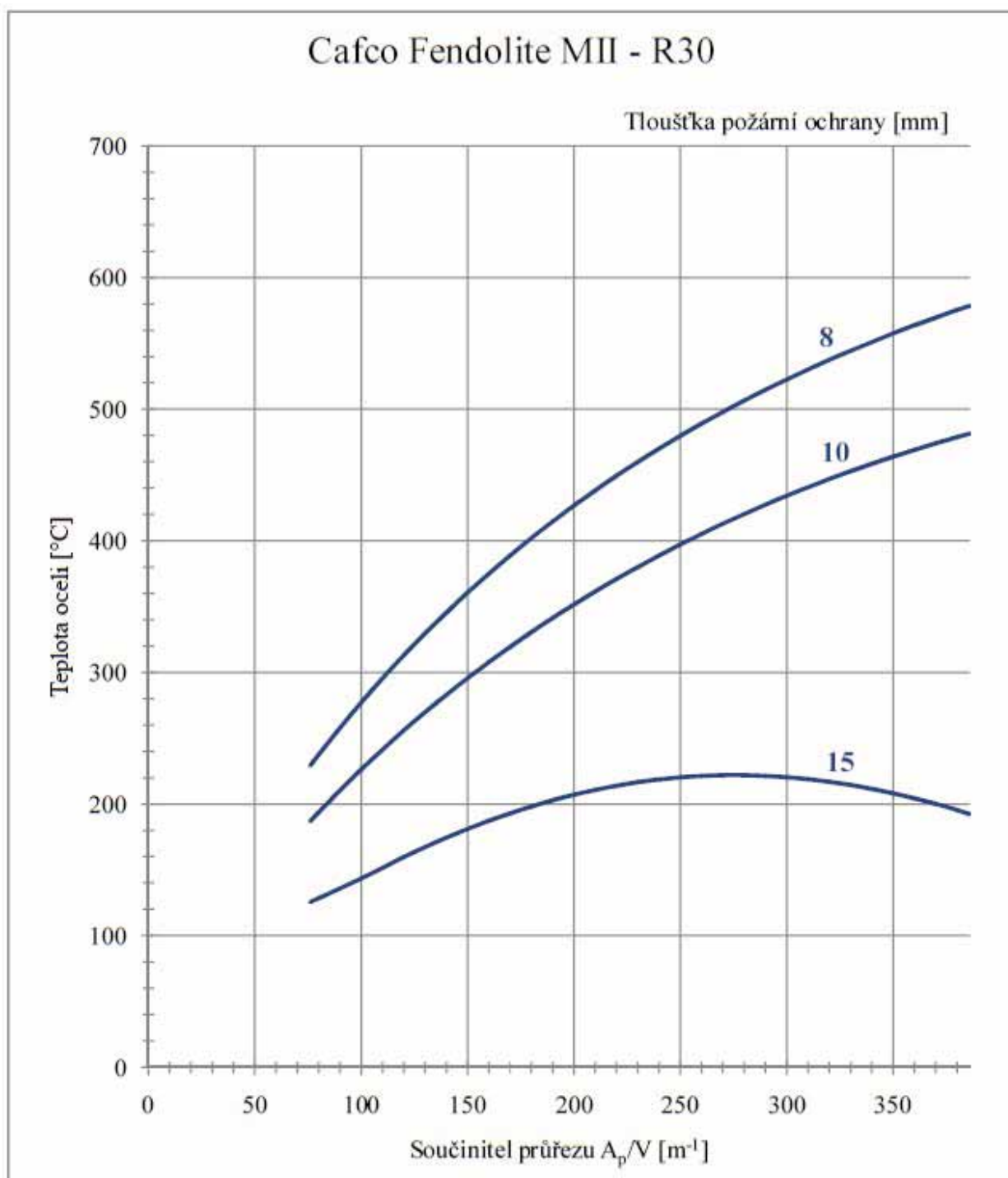
Teplota chráněného ocelového profilu $\theta_a [^{\circ}C]$	Efektivní tepelná vodivost $\lambda_{p,eff} [W/m \cdot K]$
20	0,0906
50	0,0910
100	0,0918
150	0,0928
200	0,0941
250	0,0958
300	0,0977
350	0,1001
400	0,1028
450	0,1060
500	0,1097
550	0,1139
600	0,1186
650	0,1239
700	0,1298
750	0,1363
800	0,1435
850	0,1514
900	0,1601

Výpočet teploty oceli na základě vypočtené tepelné vodivosti

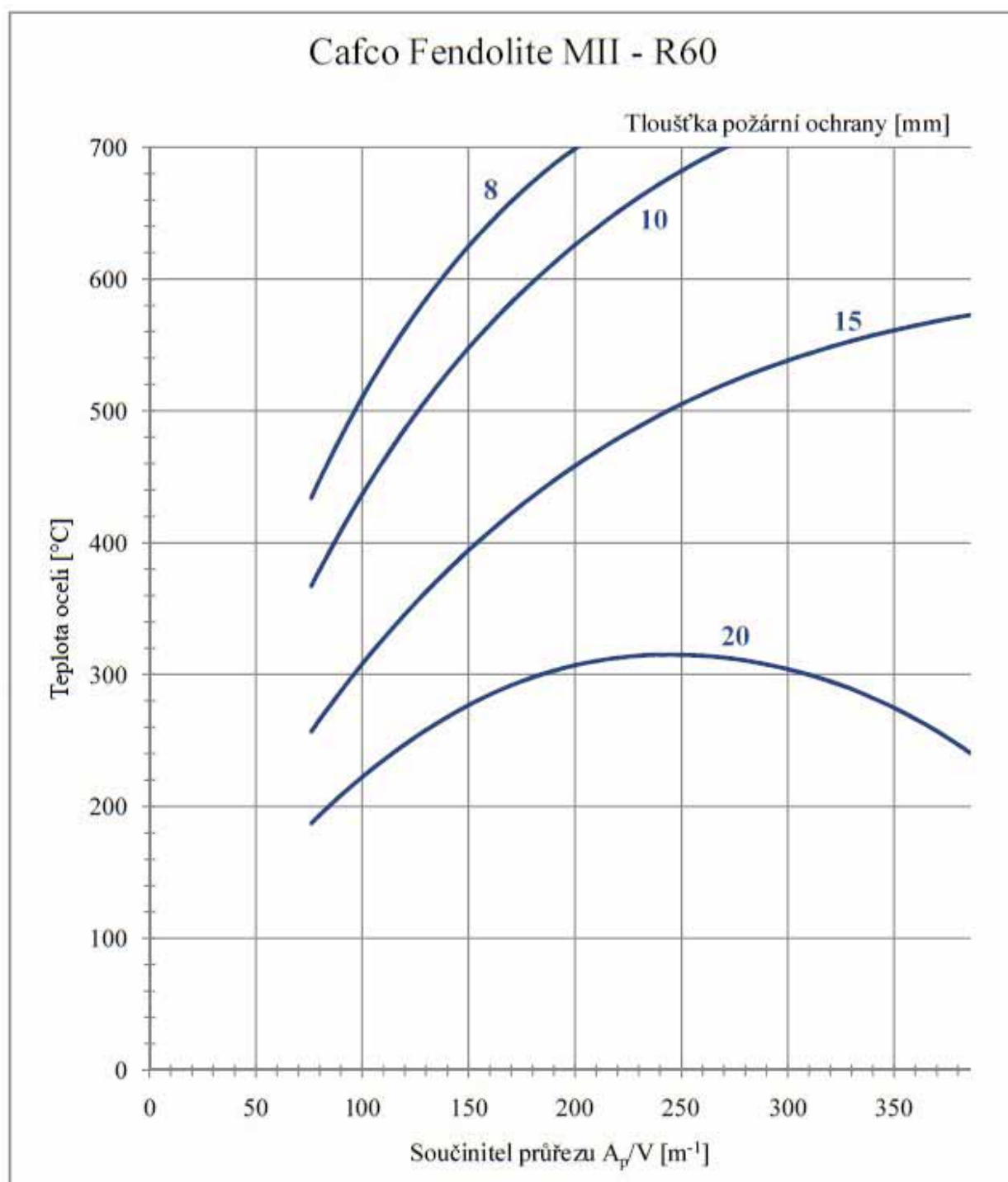
Získaná tepelná vodivost byla použita pro výpočet teploty ocelových profilů jako funkce času pro profily se součiniteli průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} a pro tloušťky požárního nástřiku 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 a 60 mm. Návrhové grafy jsou vykresleny pro požární odolnosti v časech 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 a 240 min.

Výsledky lze použít pro všechny otevřené profily typu H nebo I. Nelze je použít pro profily typu H nebo I v ochranném pouzdru nebo pro uzavřené profily, protože přírůstková metoda přestupu tepla nezohledňuje vliv vnitřních dutin.

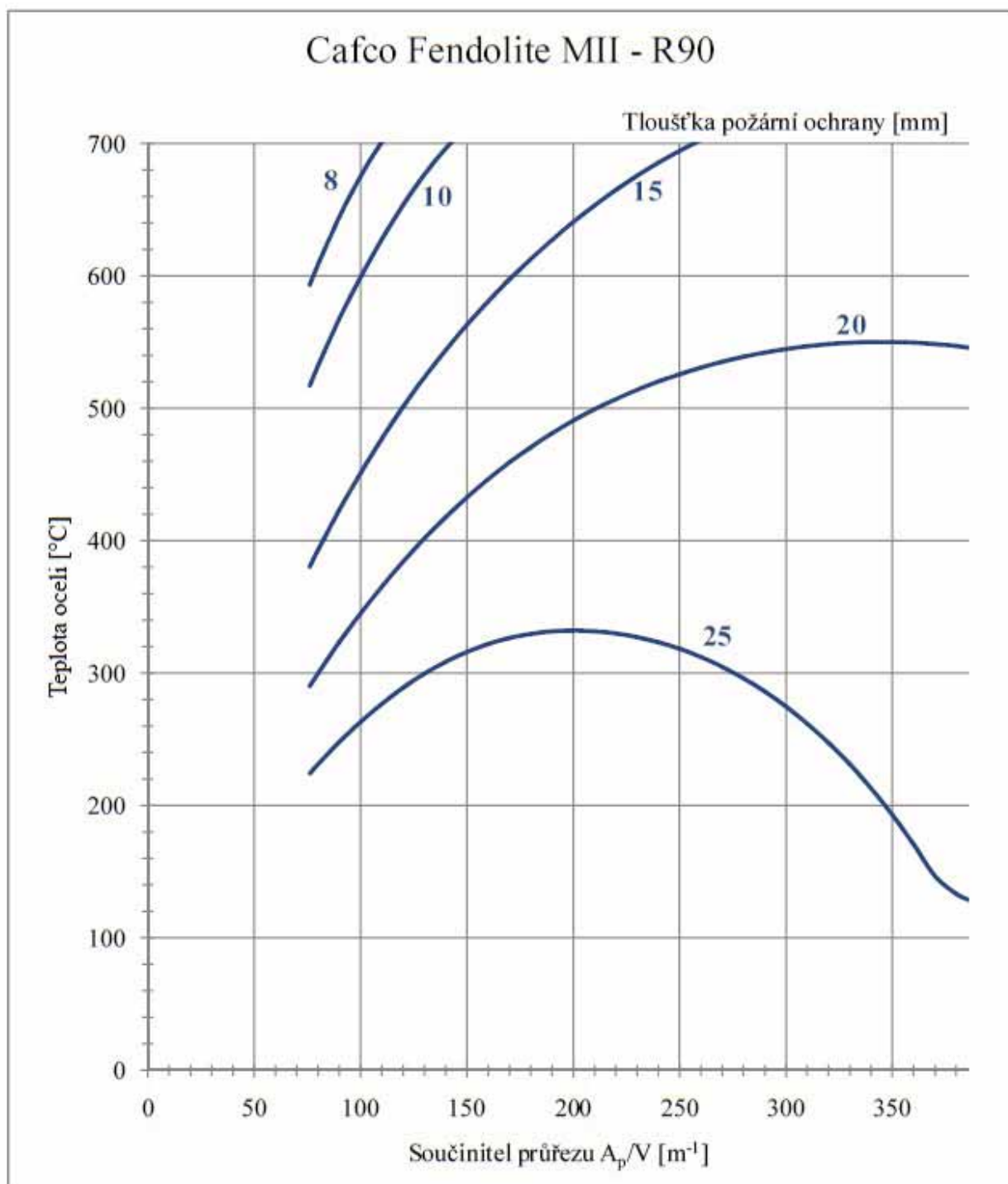
Návrhové grafy platí pro tloušťky požárního nástřiku 8 mm až 60 mm a kritické teploty oceli až 700°C .



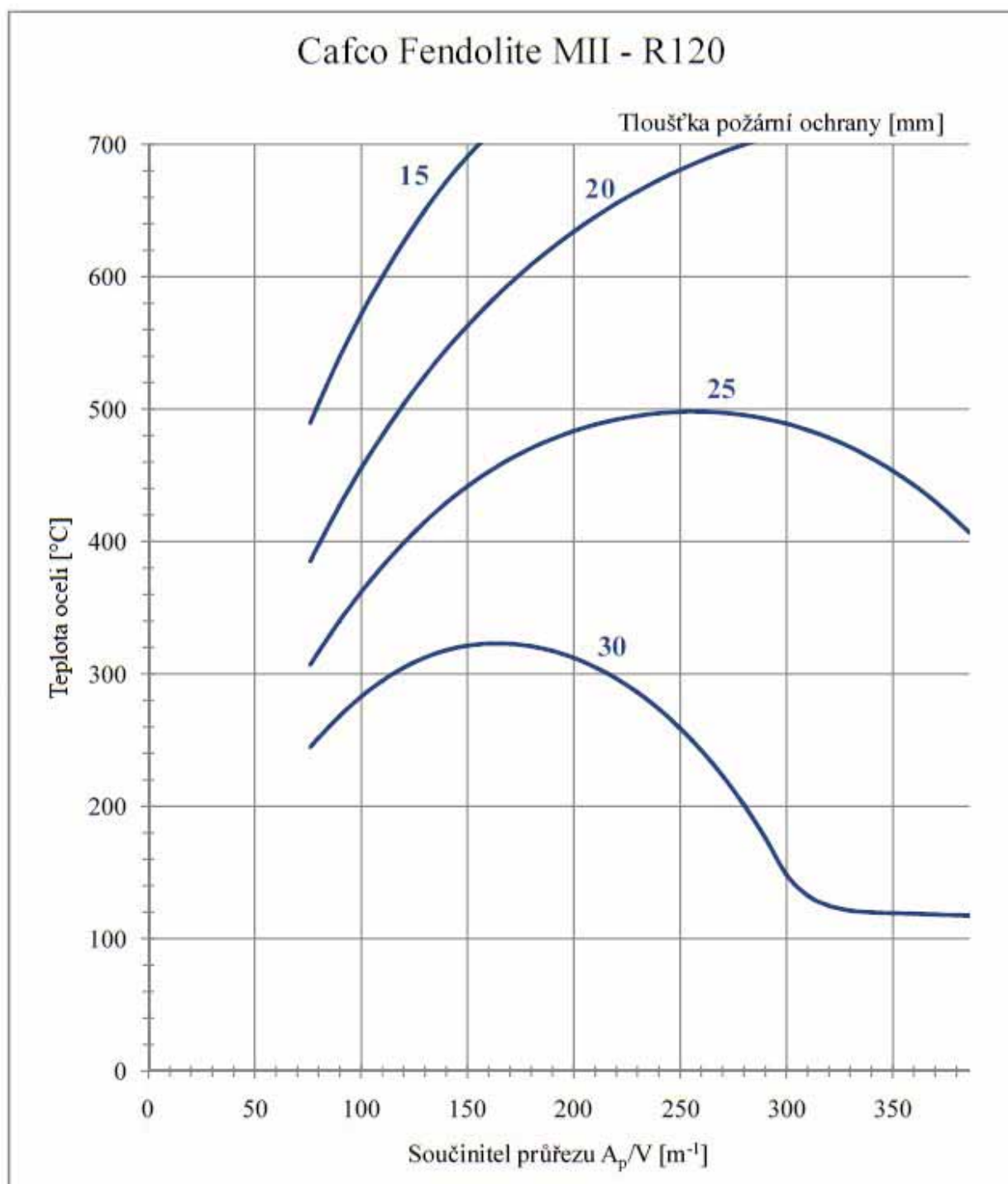
Obrázek 7.1: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupky profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



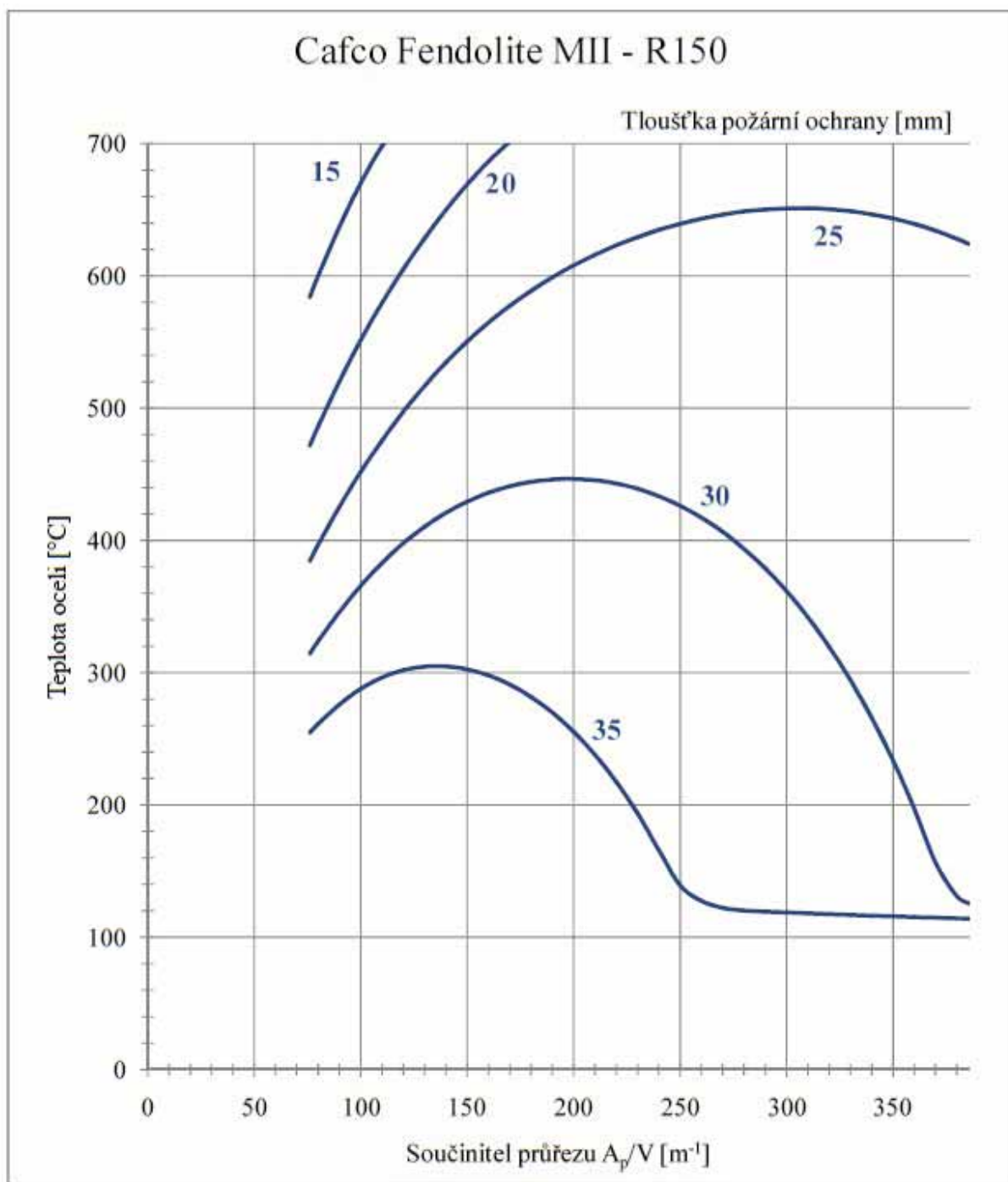
Obrázek 7.2: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



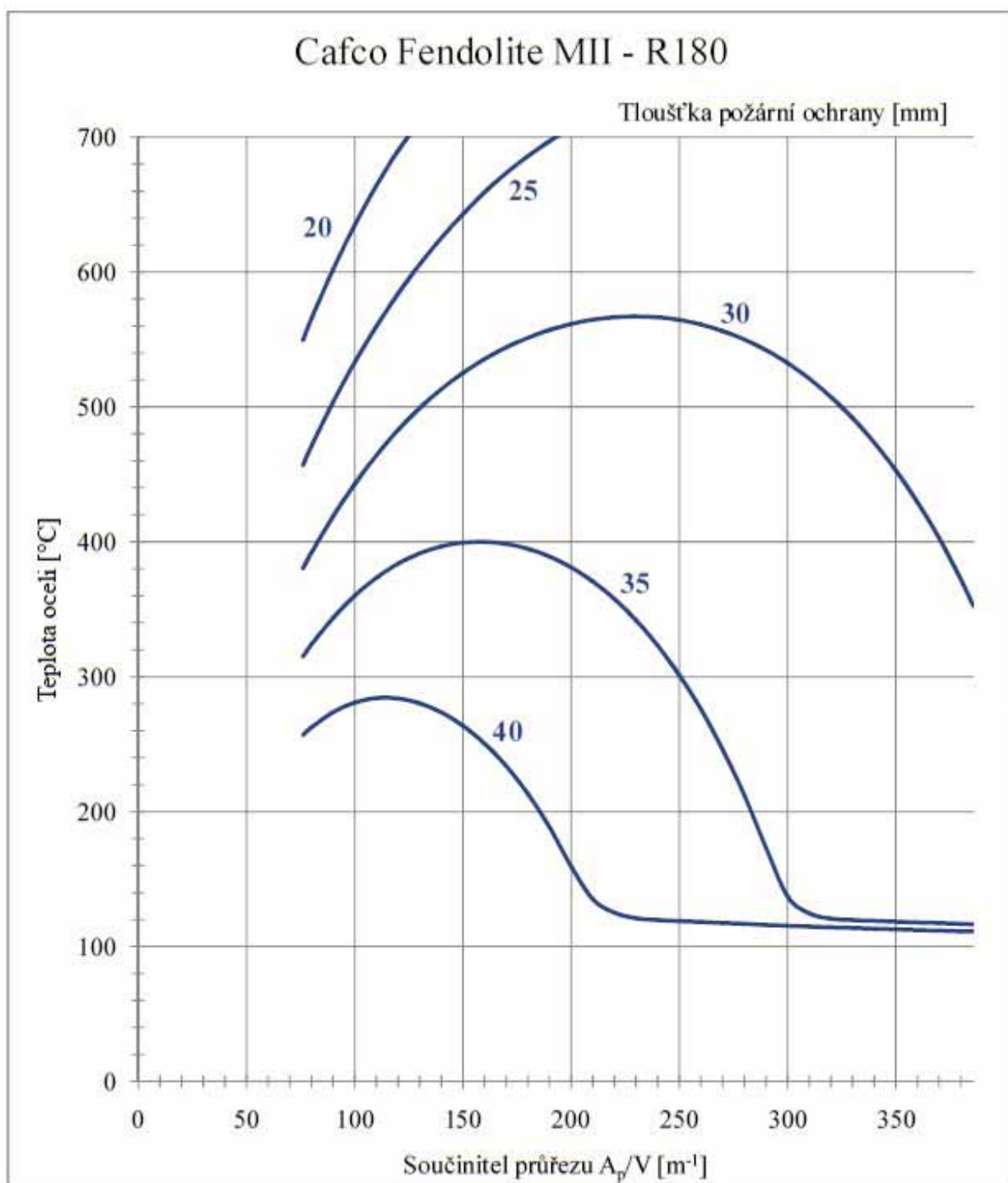
Obrázek 7.3: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



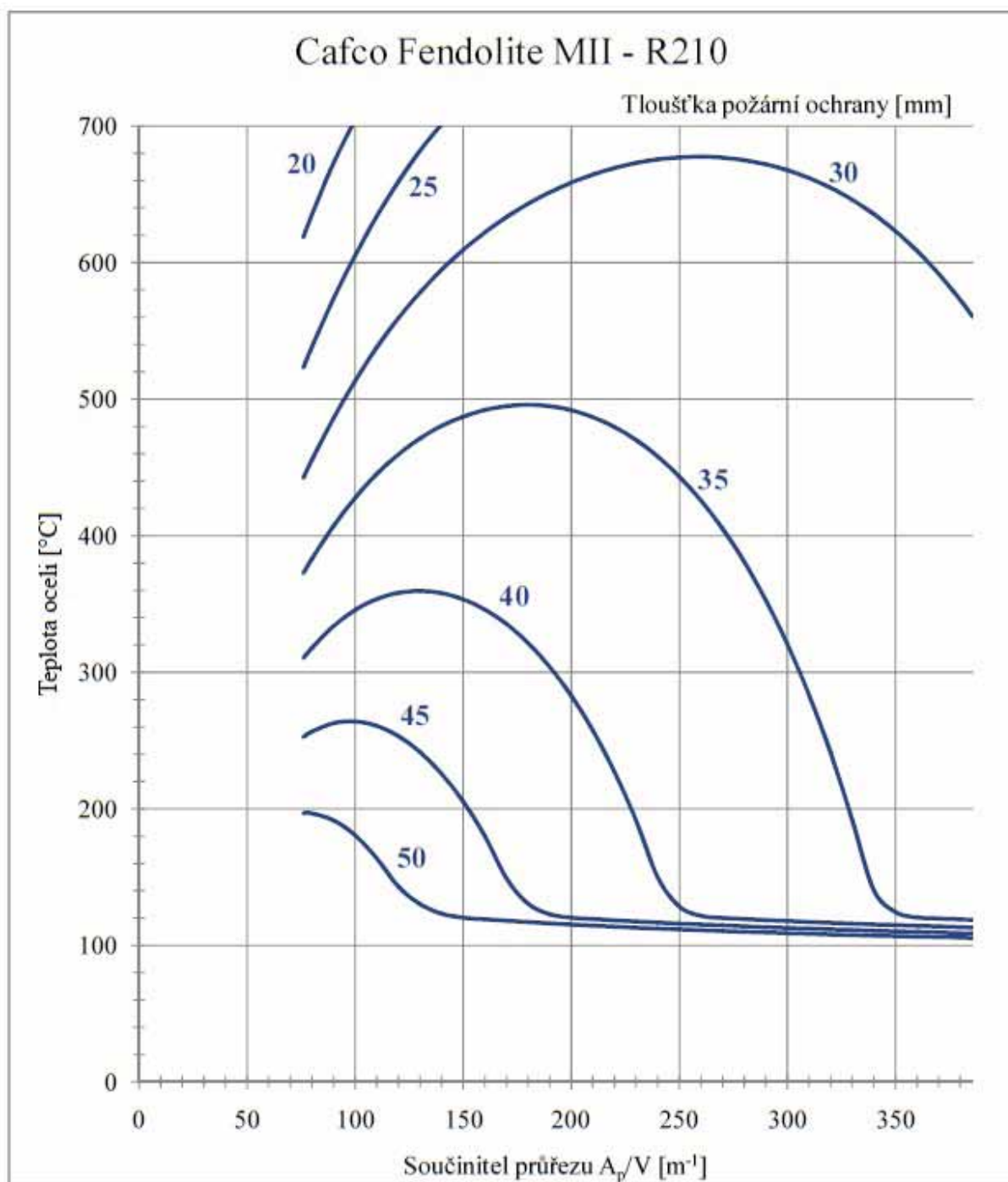
Obrázek 7.4: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupky profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



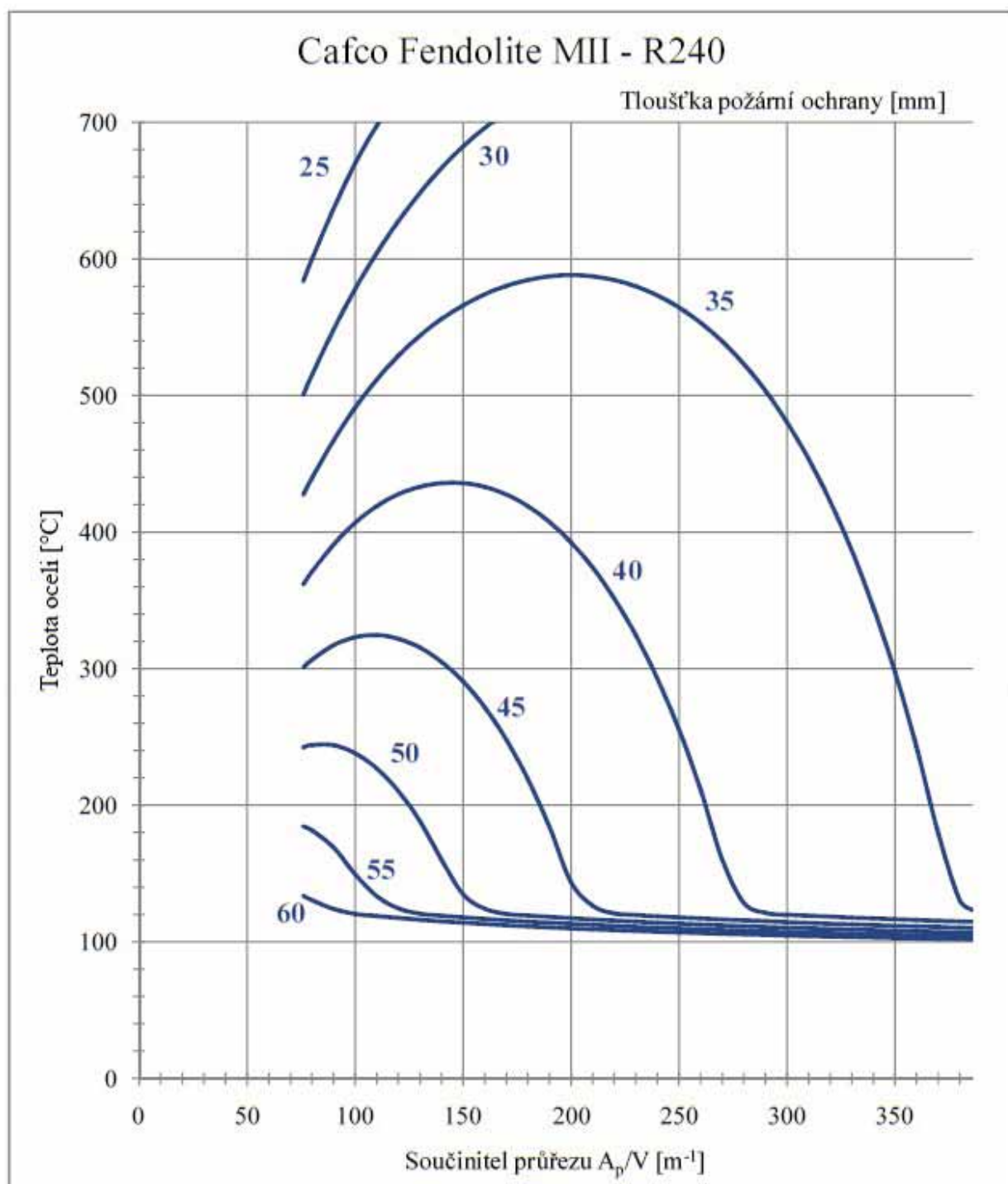
Obrázek 7.5: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



Obrázek 7.6: Návrhový diagram pro nástřík Caferco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



Obrázek 7.7: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .



Obrázek 7.8: Návrhový diagram pro nástřík Cafco Fendolite MII. Diagram se může použít pro ocelové nosníky a sloupky profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .

Kapitola 8

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout efektivní teplotně závislé vlastnosti požárně ochranného nástřiku na základě experimentu získaného od firmy Promat. K výpočtu těchto vlastností jsou využity modely přestupu tepla pomocí přírůstkových metod dle evropských a čínských návrhových norem a metoda konečných prvků. Jsou tu vypsány vzorce pro výpočet přírůstkových metod a specifikace programu založeného na metodě konečných prvků.

Dílčím cílem práce bylo shrnout možnosti požární ochrany požárním nástřikem a ověřování zvýšení požární odolnosti nosných konstrukcí. Jsou zde popsány druhy požárních nástřiků používaných v dřívějších dobách v Československu a druhy nástřiků používaných dnes.

Výpočtem přírůstkové metody podle evropských návrhových norem a ověřením přírůstkovou metodou podle čínských návrhových norem a metodou konečných prvků se zjistilo, že efektivní teplotně závislé vlastnosti požárního nástřiku jsou spolehlivě navrženy a lze je použít pro výpočet teplot chráněných ocelových prvků. Avšak pro správnou funkci požárního nástřiku musí být zajištěna dobrá soudržnost s povrchem ocelového prvku.

Vyhodnocení experimentu při zahřívání podle nominální hydrokarbonové teplotní křivky umožnilo přípravu pomůcek pro zjednodušený návrh požární ochrany při vystavení požáru podle nominální normové teplotní křivky. Stanovení koeficientů pro předpověď teplotně závislé tepelné vodivosti nástřiku poskytlo přibližný i pokročilý návrh požárně chráněných ocelových prvků vystavených požáru podle nominální normové křivky i přesnějších modelů nárustu teploty plynu v požárním úseku.

Výsledkem práce je tabulka popisující závislost efektivní tepelné vodivosti požárního nástřiku na teplotě a návrhové diagramy pro tloušťky požárního nástřiku 8 až 60 mm v požárních odolnostech 30 až 240 min. Diagramy se mohou použít pro ocelové nosníky a sloupy profilu H nebo I v rozsahu součinitele průřezu $\frac{A_p}{V} = 76$ až 386 m^{-1} .

V další práci by bylo možné řešit požární nástřiky s vyhodnocením zkoušky v určitém rozsahu teplot a času. Jiná možnost by byla řešení problematiky jiných požárních ochran a následné vyhodnocení získaných požárních experimentů.

Literatura

- [1] ŠIMMER Daniel. *Zvyšování požární odolnosti stavebních konstrukcí*. [online]. [cit. 2013-10-5]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/PST/bstud/BH11/pozarod.pdf>.
- [2] KARPAŠ Jan, ZOUFAL Roman. *Ochrana ocelových konstrukcí před požárem: Česká státní pojišťovna-Zabraňujeme škodám*. Svazek 6, Praha 1978.
- [3] VAŠÁTKO Eduard. Protipožární nástřikové hmoty ve stavebnictví. *Protipožární nástřikové hmoty ve stavebnictví* [online]. 2009 [cit. 2013-09-23]. Dostupné z: <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastrikove-hmoty-ve-stavebnictvi-69.html>.
- [4] MORAVEC Vladimír. Protipožární nástřiky a omítky. *Protipožární nástřiky a omítky* [online]. 2009 [cit. 2013-09-23]. Dostupné z: <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-omitky-70.html>.
- [5] VAŠÁTKO Eduard. Protipožární nástřiky a obklady stavebních konstrukcí (1.). *Protipožární nástřiky a obklady stavebních konstrukcí (1.)* [online]. 2009 [cit. 2013-09-24]. Dostupné z: <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-obklady-stavebnich-konstrukci-1-60.html>.
- [6] Obklady sloupů a nosníků. [online]. [cit. 2013-09-23]. Dostupné z: <http://www.gk-sadrokartony.cz/oblozeni.htm>.
- [7] Protipožární ochrana - Ocelové konstrukce. [online]. [cit. 2013-09-23]. Dostupné z: http://animatrans.cz/S8_Pozarni.php?Language=CZ&Podkapitola=6.

- [8] Promat PROMASPRAY[®] F250. [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z: http://www.promatpraha.cz/admin/files_upl/4970.pdf.
- [9] Promat PROMASPRAY[®] P300. [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z: http://www.promatpraha.cz/admin/files_upl/5795.pdf.
- [10] Promat PROMASPRAY[®] T. [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z: http://www.promatpraha.cz/admin/files_upl/5471.pdf.
- [11] Promat Cafco FENDOLITE[®] MII. [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z: http://www.promatpraha.cz/admin/files_upl/5793.pdf.
- [12] LI Guoqiang a WANG Peijun. *Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures*. New York: Springer, 2013, p. cm. ISBN 978-364-2343-926.
- [13] WANG Yong, BURGESS Ian, WALD František a GILLIE Martin. *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. Online-Ausg. Hoboken: CRC Press. ISBN 978-020-3868-713.
- [14] European Committee for Standardization. *EN 1993-1-2. Eurocode 3 : Design of steel structures: Part 1.2 : General rules-Structural fire design*. Central Secretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [15] China Association for Engineering Construction Standardization. *Technical Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings CECS200-2006*. China Plan Press, 2006.
- [16] FRANSSEN, J.M. *User's manual for SAFIR 2011: A computer program for analysis of structures subjected to fire*. University of Leige, 2012.
- [17] WALD František. *DIFISEK + Návrh ocelových a ocelobetonových konstrukcí vystavených požáru*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04099-7.

- [18] WALD František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
- [19] Tepelná a mechanická zatížení (TMZ). [online]. [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~sokol/tmz/sokoltmz.htm>.
- [20] 134PSO: Požární spolehlivost ocelových a ocelobetonových konstrukcí. [online].[cit. 2012-04-24]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~wald/134PSO_Pozar/Index.htm.
- [21] TEST REPORT FIRES-FR-008-11-AUNE. *Passive protection for fire protection of structural steel members Cafco FENDOLITE[®] MII*. 2011.
- [22] TEST REPORT FIRES-FR-029-11-AUNE. *Passive protection for fire protection of structural steel members Cafco FENDOLITE[®] MII*. 2011.
- [23] TEST REPORT FIRES-FR-030-11-AUNE. *Passive protection for fire protection of structural steel members Cafco FENDOLITE[®] MII*. 2011.