

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

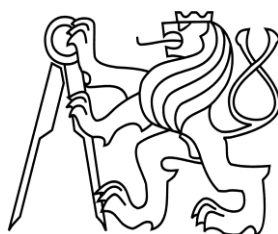
2017

Bc. Michal Sladký

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra 134 Ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

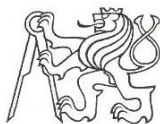
**MODELOVÁNÍ POŽÁRNÍ OCHRANY
OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ**

MODELING FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES

zpracoval: Bc. Michal Sladký

vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Sladký	Jméno: Michal	Osobní číslo: 380342
Zadávací katedra: K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požární ochrany ocelových konstrukcí	
Název diplomové práce anglicky: Modeling fire protection of steel structures	
Pokyny pro vypracování: Shrnutí problematiky teplotních vlastností požárně ochranných materiálů; shrnutí výpočtu přestupu tepla do požárně chráněné ocelové konstrukce; návrh teplotní modelu požární ochrany; validace a verifikace modelu využití modelu na předpověď požární odolnosti konstrukce	
Seznam doporučené literatury: Wald F, a kol.: Performance-Based Fire Engineering of Structures, Boca Raton: CRC Press, 2012. Wald F, a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2005.	
Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. František Wald, Csc.	
Datum zadání diplomové práce: 20.2.2017	Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

20.2.2017	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení prof. Ing. Františka Walda, CSc. Veškeré podklady, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Nemám námitky proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne _____

_____ podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Františku Waldovi, CSc., za odborné vedení, gramatické úpravy a cenné rady. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli rady k tvorbě této práce, panu Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. a Ing. Vilému Stankovi za obdržené vzorky ochranných desek k experimentu. V neposlední řadě děkuji mé rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Obsah

Abstrakt	IV
Abstract.....	V
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	VI
1 Úvod...	7
2 Shrnutí problematiky	8
2.1 Požární ochrana.....	8
2.1.1 Požární nástřiky.....	8
2.1.2 Požární nátěry	9
2.1.3 Požární obklady.....	10
2.1.4 Obetonování či obezdění.....	12
2.2 Teplotní analýza.....	13
2.2.1 Přenos tepla	13
2.2.2 Přestup tepla do konstrukce	14
2.3 Materiálové vlastnosti	16
2.3.1 Tepelné vlastnosti oceli.....	16
2.3.2 Tepelné vlastnosti požární ochrany.....	18
2.3.3 Materiály a jejich požární vlastnosti	20
2.3.4 Produkty požární ochrany	25
2.4 Návrh požární ochrany.....	27
2.4.1 Tabulková metoda.....	27
2.4.2 Analytický model.....	27
2.4.3 Numerický model.....	27
3 Cíle práce	29
4 Ověření materiálů na požárních zkouškách.....	30
4.1 Vstupní parametry.....	30
4.2 Přírůstková metoda	31
4.3 Metoda konečných prvků.....	40
5 Dimenzační tabulka	59
5.1 Vstupní parametry.....	59
5.2 Výpočet	62
6 Shrnutí.....	64
6.1 Další otázky k problematice.....	66
Literatura	67
Příloha 1 – Experiment.....	69

Abstrakt

Práce je zaměřena na modelování požární ochrany ocelových konstrukcí. Je shrnuto poznání o požární ochraně, modelování přestupu tepla do konstrukce a modely nelineární závislosti tepelné vodivosti při jejím zahřívání. Je popsána validace modelů tepelné vodivosti deskového obkladu v závislosti v čase na požárních zkouškách při zahřívání podle nominální teplotní křivky. Přestup tepla do konstrukce byl počítán analytickým přírůstkovým modelem a numerickým modelem metodou konečných prvků programem ANSYS.

Klíčová slova

Požární ochrana; požární odolnost; požární ochranné materiály; přestup tepla; tepelná vodivost; teplota; čas; ocelová konstrukce; modelování; metoda konečných prvků

Abstract

The thesis is focused to modelling of fire protection of steel structures. It summarised knowledge in fire protection, modelling of transfer of heat to structures and nonlinear models of thermal conductivity during heating. It describes validation models of thermal conductivity of the fire protect boards on fire tests heated according to standard time-temperature curve. Heat transfer was studied by the analytical step by step model and by the numerical finite element model in code ANSYS.

Keywords

Fire protection; fire resistance; fire protection materials; heat transfer; thermal conductivity; temperature; time; steel structure; modelling; finite element method

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

Q	teplo	W
C_p	tepelná kapacita	W/K
c_p	měrná tepelná kapacita ochranného materiálu	W/(kg·K)
m	hmotnost	kg
T	teplota	°C
t	čas	min
S	plocha	m ²
A_p/V	součinitel průřezu	m ⁻¹
d_p	tloušťka požárně ochranného materiálu	m
C_a	měrné teplo oceli	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
C_p	měrné teplo požárně ochranného materiálu	Jkg ⁻¹ K ⁻¹

Řecké symboly

λ	součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ_p	objemová hmotnost požárně ochranného materiálu	kg/m ³
ρ_a	objemová hmotnost oceli	kg/m ³
$\Delta \theta_{a,t}$	přírůstek tepla prvku v časovém intervalu	Δt °C
$\Delta \theta_{g,t}$	přírůstek okolní tepla v časovém intervalu	Δt °C
α	součinitel přestupu tepla	W/(m ² ·K)
Φ	tepelná jímavost	Ws ^{0,5} m ⁻² K ⁻¹

Zkratky

MKP	metoda konečných prvků
-----	------------------------

1 Úvod

Ocel je již od jejího objevení pro své vlastnosti jedním z nejvyužívanějších materiálů ve stavebnictví. Ocelové konstrukce jsou lehké, při malých dimenzích dokáží přenášet velká zatížení a jejich montáž je oproti konstrukcím s mokřým procesem rychlá. Ocel má jako ostatní materiály také své nevýhody. Hlavní je podléhání korozi a malá odolnost vůči požáru. Ty mají dopad na únosnost a stabilitu konstrukce.

V dnešní době se však u stavebních konstrukcí dbá na jejich požární ochranu. Vysoká teplota za požární situace ovlivňuje stavební konstrukce změnou materiálových charakteristik, redistribucí vnitřních sil a nerovnoměrným rozložením teplot po konstrukci. Pokud konstrukce nedokáže odolávat požáru sama, musejí se navrhnout opatření. Rozhodl jsem se tedy, že se v diplomové práci budu věnovat modelování požární ochrany ocelových konstrukcí.

Práce se zabývá validací vypočtených hodnot pomocí analytické přírůstkové metody a metody konečných prvků s výsledky z požárních zkoušek požárně ochranných obkladů PROMATECT H a L od firmy Promat s.r.o. Dále je pro výrobek PROMATECT 200 sestavena dimenzační tabulka udávající tloušťku ochranného materiálu pro různé součinitele průřezu.

Na závěr byl proveden experiment, kde byla změřena tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita výše zmíněných požárních obkladů.

2 Shrnutí problematiky

2.1 Požární ochrana

Pasivní požární ochrana konstrukce zajišťuje tepelnou ochranu po požadovanou dobu požární odolnosti při zachování požadavků na celistvost a přilnavost.

Každý požárně ochranný systém by měl nejdříve projít normovým testem ve zkušební peci. Platné projektové normy ČSN 73 0802 a ČSN 73 0804 definují požární odolnost stavebních konstrukcí jako dobu, po kterou je konstrukce schopna odolávat účinkům požáru, aniž by došlo k porušení její funkce, specifikované třemi základními mezními stavy požární odolnosti. Tyto mezní stavy stanoví platná ČSN 73 0851. Jedná se o nosnost konstrukce $R(t)$, tepelnou izolaci konstrukce $I(t)$ a celistvost konstrukce $E(t)$. Podřadné jsou mechanická odolnost konstrukce $M(t)$ a radiace v konstrukci $W(t)$. Pro navrhování jsou tyto hodnoty vyjádřeny minutami, po které musí daný systém požáru odolat. Podle českých předpisů a norem se klasifikují nosné tyčové konstrukce (sloupy, nosníky, ztužidla) do tříd: R 15, R 30, R 45, R 60, R 90, R 120, R 180, R 240. Mnoho stavebních konstrukcí dokáže splnit požadované požární odolnosti bez ochrany, např. betonové prvky [1].

Ochranný systém musí být nejprve možný provést technicky, na konkrétních podmínkách stavby. Dále se také musí zvážit konečný estetický vzhled ochraňované konstrukce a finanční dopad na rozpočet projektu.

Požární systémy

I když existuje řada konstrukcí a stavebních materiálů, které splňují stanovené požární požadavky pro konkrétní aplikaci samy o sobě, většina stavebních konstrukcí se musí požárně chránit dodatečnými úpravami, a to podle charakteru konstrukce. Nejběžnější ochranou jsou nástřiky, nátěry a obklady [1].

2.1.1 Požární nástřiky

Ve srovnání s nátěry je nástřík požárně ochranným materiálem málo estetický. Na rozdíl pod nátěrů mají nástřiky nesrovnatelně vyšší objemovou hmotnost. Kvůli ní více zatěžují konstrukci. Nástřiky nemají rádi dynamické namáhání konstrukce a jsou poměrně křehké. Výhoda nástříku je, že je schopen téměř u všech ocelových konstrukcí zajistit požadovanou dobu požární odolnosti, a to od 15 až do 180 minut. Mezi další pozitiva použití protipožárních nástříku patří například pomalé stárnutí a výrazně nižší náklady na dosažení požadované požární odolnosti než je tomu

u nátěru. Základem nástřiku je cementové nebo sádrové pojivo vyztužené vermikulitem (expandovanou slídou) nebo minerálními vlákny. Nejrozšířenějším typem tepelně izolačních omítkovin na našem trhu jsou v současné době nástřiky na bázi expandovaného perlitu. Vedle vápna a cementu obsahují tyto nástřiky jako hlavní složku experlit, event. další plniva, přídavek disperze a jako armující složku i minerální nebo skleněná vlákna. Dalším a poněkud ojedinělým typem v ČR užívaných nástřiků je tepelně izolační nástřik opět na bázi experlitu, kde je však jako pojiva užito síranu vápenatého. To umožňuje mírné zlepšení požárních vlastností systému, protože sádra při požáru mimo jiné ztrácí vodu a ochlazuje tak plamen, přičemž s ohledem na armující složky si nástřik dlouhodobě zachovává svoji tepelně izolační funkci. Na obr. 1 aplikovaný nástřik PROMASPRAY F250 od firmy Promat s.r.o. na ocelovém vazníku [2] [3] [4].



obr. 1 Nástřik na ocelovém vazníku [4]

2.1.2 Požární nátěry

Zpěnitelné nátěry nabydou na objemu při požáru přibližně padesátkrát a vytvoří tuhou pěnu, která plní funkci podobně jako zuhelnatělé vrstvy dřeva. K výhodám nátěru patří především nízká hmotnost, jednoduchá a rychlá aplikace a nezměněný vzhled konstrukce. Mají ale i množství nevýhod jako jsou třeba dosud neprokázaná funkční životnost, velmi obtížnou kontrolu funkce, nespolehlivou aplikaci, a složitou obnovitelnost nátěru. Cena ochrany navíc bývá srovnatelná s cenou ocelové konstrukce. Nátěry se používají do chemicky neagresivních prostředí. Na konstrukce se nanáší válečkem, štětcem nebo se mohou stříkat. Dosažení požadované tloušťky

nátěru se kontroluje ultrazvukovými a odporovými tloušťkoměry. Jsou k dispozici i mechanicky odolné zpěnitelné nátěry, které se na konstrukční prvky nanášejí již při výrobě [5].

Protipožární nátěrové systémy ve stavebnictví lze dělit jednak podle své funkce a podle svého účelu. Podle funkce existují protipožární nátěry zábranové, které brání přístupu plamene k povrchu zapalovaného předmětu a po určitou dobu nedovolí jeho vznícení. Používají se hlavně na kabely a plasty. Určitým přechodem mezi nátěry a nástřiky jsou nátěry sublimující. Podstatou je poměrně silná vrstva snadno se teplem rozkládajících a sublimujících aditiv v polymerním, obvykle epoxidovém pojivu, která se při vyšších teplotách začíná odpařovat, resp. sublimovat. Odcházející plyny strhují plamen a ochlazují povrch, na kterém jsou naneseny. Nejrozšířenějším typem protipožárních nátěrů ve stavebnictví jsou v posledních letech nátěry intumescentní neboli zpěňující [5].

Podstatou působení těchto nátěrů, až donedávna vesměs na organické bázi, je chemická reakce, iniciovaná vyššími teplotami při požáru, v jejímž průběhu se dehydratací obvykle polyalkoholů v přítomnosti Lewisových kyselin vytváří na povrchu chráněného předmětu objemný uhlíkatý zbytek, ze kterého se vlivem přítomného nadouvadla vytváří izolační vrstva nehořlavé pěny. Struktura, výška vypěnění a velikost jednotlivých buněk této pěny limituje účinnost konkrétního nátěrového systému, a proto je formulace jednotlivých nátěrů velmi nákladná a obtížná. Používají se jako ochrana ocelových a dřevěných konstrukcí, kabelů a občas i železobetonu. Na obr. 2 je požární nátěr Plamostop P9 od firmy Izostav na oceli po aplikaci nátěru a následně po působení ohně [6].



obr. 2 Nátěr Plamostop P9 / nátěr po působení ohně [6]

2.1.3 Požární obklady

Mezi oblíbenou formu zvyšování požární odolnosti stavebních konstrukcí patří požární obklady. Jedná se o suchou technologii, kdy se konstrukce opláštějí nehořlavým materiálem s určitými teplotními vlastnostmi. Obklady mají po celou dobu své životnosti stejné vlastnosti, nemusí se

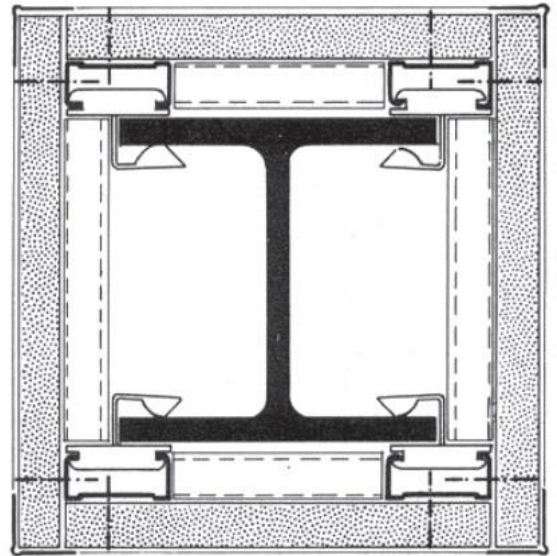
obnovovat a při zabudování již splňují požární vlastnosti. Hlavní nevýhodou je vysoká pracnost provádění ochrany na rozdíl od nástřiků či nátěrů.

Z hlediska materiálu a způsobu aplikace lze obklady rozdělit na obklady deskové, jejichž základem jsou tvrdé, mechanicky upevňované desky podle typu buď přímo na chráněnou konstrukci, případně na tak zvanou podkonstrukci, to jest na pomocný kovový rošt nebo v poslední době nacházejí stále větší uplatnění obklady lepené, to jsou obklady z materiálů, které se na konstrukci nalepují přímo. Tyto obklady nepotřebují pro aplikaci žádné pomocné konstrukce a jsou výrazně lehčí [2] [3].

V současné době je na našem trhu velká řada nejrůznějších deskových materiálů, které jsou průkazně odzkoušeny zejména pro požární obklady ocelových a dřevěných nosných konstrukcí. Patří sem např. všechny typy prodáváných sádrokartonů, dále většina sádrovláknitých desek a to bez ohledu na jejich vnitřní strukturu (např. FIREBOARD, RIDURIT, FERMACEL) třískocementové desky CETRIS, třískovermikulitové desky GRENAMAT B, desky na bázi čistého vermikulitu THERMAX a v neposlední řadě i vápenosilikátové desky PROMATECT a PROMACLAD vesměs s ověřenou požární odolností až do R 180. Rozdíly jsou pouze v ceně a počtu desek, přičemž je třeba vždy uvažovat nejen s cenou desek samotných, ale i s celkovou pracností obkladu a hmotností. Často může být pro obklad výhodnější i dražší materiál, pokud vyžaduje pro shodnou požární odolnost nižší počet desek. Cenové rozdíly se mohou projevit i v technologii upevňování obkladu, např. možnost spojování desek do hran nebo na podkonstrukci. Tato práce je zaměřena na kalciumsilikátové desky PROMATECT H a PROMATECT L. Na obr. 3 a 4 je znázorněno obložení ocelového sloupu deskami PROMATECT L. V dnešní době se také velmi rozšířilo řešení požární odolnosti pomocí sádrokartonových desek. Hlavním důvodem používání těchto desek je jejich velký rozdíl v pořizovacích nákladech. Nevýhodou je nutná větší tloušťka materiálu obr. 4 [7] [8].



obr. 3 Obklad ocelového sloupu deskami PROMATECT L [8]

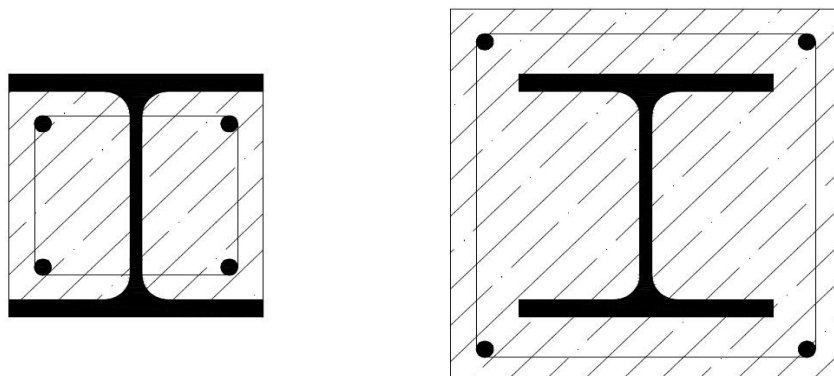


obr. 4 Obklad ocelového sloupu sádrokartonovými deskami [9]

2.1.4 Obetonování či obezdění

Další možnost požární ochrany je obezdění konstrukce či obetonování. Jedná se o jednu z nejstarších a tradičních technologií. Obetonování se dnes nahrazuje ocelobetonovými konstrukcemi, vzhledem k pracnosti a hmotnosti betonu.

Obezďení je mokrý proces. Účinnost je dána tloušťkou obezdění, materiálem a druhem omítky. Přenos tepla závisí na tepelném odporu neboli součiniteli prostupu tepla přízdívky. Klasické pálené cihly jsou vodivější, a proto je lepší použít lehčené tvárnice, např. pórobetonové nebo křemelinové s menší vodivostí. Možnosti obetonování naznačeny na obr. 5 [1].



obr. 5 Ocelobetonové sloupy [1]

2.2 Teplotní analýza

Přenos tepla tvoří souvislost mezi vysokou teplotou prostředí, u kterého je vystavena konstrukce při požáru. Teorie přenosu tepla jsou prokazatelné a dobře vyvinuté metody analýzy pro přenos tepla, a to buď analyticky, nebo číselně. Nicméně, výběr vstupních dat, především tepelné okrajové podmínky a materiálové tepelné vlastnosti, které mají být použity v analýze pro přenos tepla pro požární techniku, vyžaduje upřesnění. Ve specializovaných situacích, jako je předpovídání odštěpování betonu, hořící dřevo, kompozitní materiál, rozklad nebo intumescentní expanzní vrstva, kombinovaná výroba tepla a přenos hmoty bude nutná analýza. Naštěstí pro většinu konstrukcí vystavených požáru, postačí provést pouze analýzu přenosu tepla, ale modifikace musejí být provedeny u některých materiálových tepelných vlastností, kterou se sbližují účinky přenosu hmoty. Jak to může být provedeno se dále zabývá Kapitola 2.3.3 na materiálových vlastnostech [10].

2.2.1 Přenos tepla

Tři základní mechanismy přenosu tepla jsou:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- zářením (radiací neboli sáláním).

Ve stavebnictví je analýza přenosu tepla obvykle o řešení problému jejího vedení pomocí konvekce a tepelné radiace jako tepelné okrajové podmínky. S výjimkou v nejjednodušších případech, kde není možné nalézt analytická řešení k problému přenosu tepla. Proto v aplikacích problémy požární bezpečnosti přestupu tepla jsou zpravidla řešeny buď experimentálně, nebo numericky. Experimenty jsou dražší možností, a jejich výsledky mohou být použity pouze ke konkrétním situacím, které byly testovány. Numerická analýza konstrukcí přenosu tepla může být obecnější a je stále široce používána.

Sdílení tepla vedením

Vedení tepla je založeno na dvou základních zákonech. První zákon vyjadřuje závislost mezi tepelnými toky a teplotními spády. Druhý zákon je zákon zachování energie, který je aplikován na tepelné jevy. Závislost mezi tepelnými toky a teplotními spády vyjadřuje Fourierův zákon, který je základním zákonem vedení tepla. Tento zákon byl experimentálně ověřen. Podle tohoto zákona

a II. věty termodynamické se uskutečňuje tepelný tok resp. výkon kolmo na isothermické plochy, tj. plochy, na nichž je teplota stálá, a to z ploch o vyšší teplotě na plochy o nižší teplotě.

Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním v sobě obsahuje dva mechanismy přenosu tepla, které spolu neodlučitelně souvisí. V proudící tekutině (kapalině, plynu) existuje vedení tepla mezi částicemi různé teploty a přenosu přemístováním těchto částic. Přestup tepla je tedy neodlučitelně vázán na proudění tekutiny. Přestup se může uskutečňovat přímo, tj. že proudící teplotonosná tekutina je přímo ve styku s materiálem, do něhož tepelná energie přestupuje, např. při konvekčním teplovzdušném sušení atp. Je-li ohříváný materiál – zpravidla kapalina a plyn oddělena od teplotonosné tekutiny pevnou stěnou, uskutečňuje se nepřímý přestup tepla, tj. přestup tepla z tekutiny do stěny, již je teplo dále sdíleno vedením a na druhé straně této teplosměnné stěny dochází znovu k přestupu do proudícího ohřívacího média.

Sdílení tepla sáláním

Sálání souvisí se změnami vnitřní energie tělesa a následně těleso vydává záření. Toto záření je pak vysíláno ve formě elektromagnetických vln do prostoru, které těleso obklopuje. Dopadne-li toto záření na nějaké jiné těleso a dojde-li k pohlcení tohoto záření, zvýší se vnitřní energie tělesa. Souhrnně se vzájemné sálání a pohlcování při dvou nebo i více tělesech s různými teplotami nazývá sdílení tepla sáláním [10].

2.2.2 Přestup tepla do konstrukce

Nechráněné konstrukce

Obecně se nárůst teploty v ocelovém prvku vystaveném požáru řeší Fourier – Kirchhoffovou parciální diferenciální rovnicí neustáleného vedení tepla. Výpočet lze zjednodušit, pokud je uvažováno pouze jednorozměrné vedení tepla a vysoká tepelná vodivost oceli. Úlohu je možno řešit v přírůstcích. Předpokládá se, že se přírůstek tepla do ocelového průřezu v čase t rovnoměrně rozloží a zvýší teplotu prvku o T , neboli vstupující teplo se projeví nárůstem teploty podle vztahu [10] [11]:

$$q A_m \Delta t = \rho c V \Delta T \quad (1)$$

po úpravě

$$\Delta T = (A_m/V) (1/\rho c) q \Delta t \quad (2)$$

pro přírůstky času menší než 5 s, kde se využívá tvaru:

$$\Delta T_{a,t} = k_{sh} ((A_m/V) / \rho c) q_{net,d} \Delta t \quad (3)$$

Závislost teploty ocelového nechráněného profilu $\Delta T_{a,t}$ na době ohřevu podle nominální normové teplotní křivky v čase t lze pro součinitele průřezu A_m/V z grafu, který je uveden v normě [11].

Chráněná konstrukce

Zpoždění nárůstu teploty konstrukce za nárůstem teploty plynu v požárním úseku za požáru se dosahuje zastíněním konstrukce nebo tepelnou izolací požárně ochranným materiálem [1].

Analytický model přestupu tepla do chráněné konstrukce je popsán v normě ČSN EN 1993-1-2. Přírůstek teploty $\Delta \theta_{a,t}$ v prvku v časovém intervalu Δt se vypočte z rovnováhy tepla přicházejícího z požárně ochranné vrstvy s teplem kumulovaným v požárně izolačním materiálu a v ocelovém prvku [12].

Při rovnoměrném rozložení teploty po průřezu se teplotní přírůstek $\Delta T_{a,t}$ v požárně izolovaném prvku za časový interval t určí z rovnováhy tepla přicházejícího z požárně ochranné vrstvy s teplem kumulovaným v požárně izolačním materiálu a v ocelovém prvku jako:

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \phi / 3} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t}, \text{ ale } \Delta \theta_{a,t} > 0 \quad (4)$$

$$\text{kde } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}, \quad (5)$$

λ_p je součinitel tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu, A_p / V součinitel průřezu pro prvky s požárně ochranným materiálem. Výraz nelze použít pro A_p / V menší než 10 m^{-1} a pro hodnoty nad 350 m^{-1} již nemá řešení praktický význam, protože $T_{a,t} \cong T_{g,t}$. Symbol d_p označuje tloušťku požárně ochranného materiálu, ρ_p hustotu požárně ochranného materiálu, ρ_a hustotu oceli, c_p měrnou tepelnou kapacitu požárně ochranného materiálu; c_a měrnou tepelnou kapacitu oceli, $\Delta T_{g,t}$ přírůstek okolní teploty během časového intervalu Δt , který se nemá uvažovat větší než 30 sekund.

Pro prvky izolované požárně ochranným materiálem záleží nárůst teploty na vztahu A_p / V , kde A_p je vnitřní plocha izolačního materiálu a na tepelných vlastnostech materiálu chránícího konstrukci, zejména na součiniteli tepelné vodivosti a tloušťce [11] [1].

V praktické části práce byl vzorec 4 upraven na tvar uvedený pod číslem 6. S takto upravenou rovnicí je možné dopočítat tepelnou vodivost, pokud známe všechny ostatní parametry. Více popsáno v kapitole 4.2.

$$\lambda_p = (\Delta\theta_{a,t} + (e^{\frac{\Phi}{10}} - 1) * \Delta\theta_{g,t}) * \frac{d_p * c_a * \rho_a}{\frac{A_p}{V}} * \frac{1 + \frac{\Phi}{3}}{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}} * \frac{1}{\Delta t} \quad (6)$$

Důležitým faktorem ochranných desek je jejich vlhkost, která se zvyšující se tloušťkou hraje významnou roli. Vlhkost v požárně ochranném materiálu působí zpoždění ohřevu prvku při odpaření vody. Zpoždění vlivem vlhkosti u v % lze odhadnout podle výrazu:

$$t_u = \frac{u \rho_p d_p^2}{5\lambda_p} \text{ v min,} \quad (7)$$

kde ρ_p je hustota požárně izolačního materiálu. Zpoždění odpaření vlhkosti se přičte k požární odolnosti.

$$t_{fi,d} = t_{fi,p} + t_u \quad (8)$$

2.3 Materiálové vlastnosti

Materiálové tepelné vlastnosti, jejichž význam je třeba chápat při provádění praktických konstrukcí na účinky požáru mohou být shrnuta jako emisivita, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a tepelná roztažnost [10].

2.3.1 Tepelné vlastnosti oceli

Tepelná vodivost

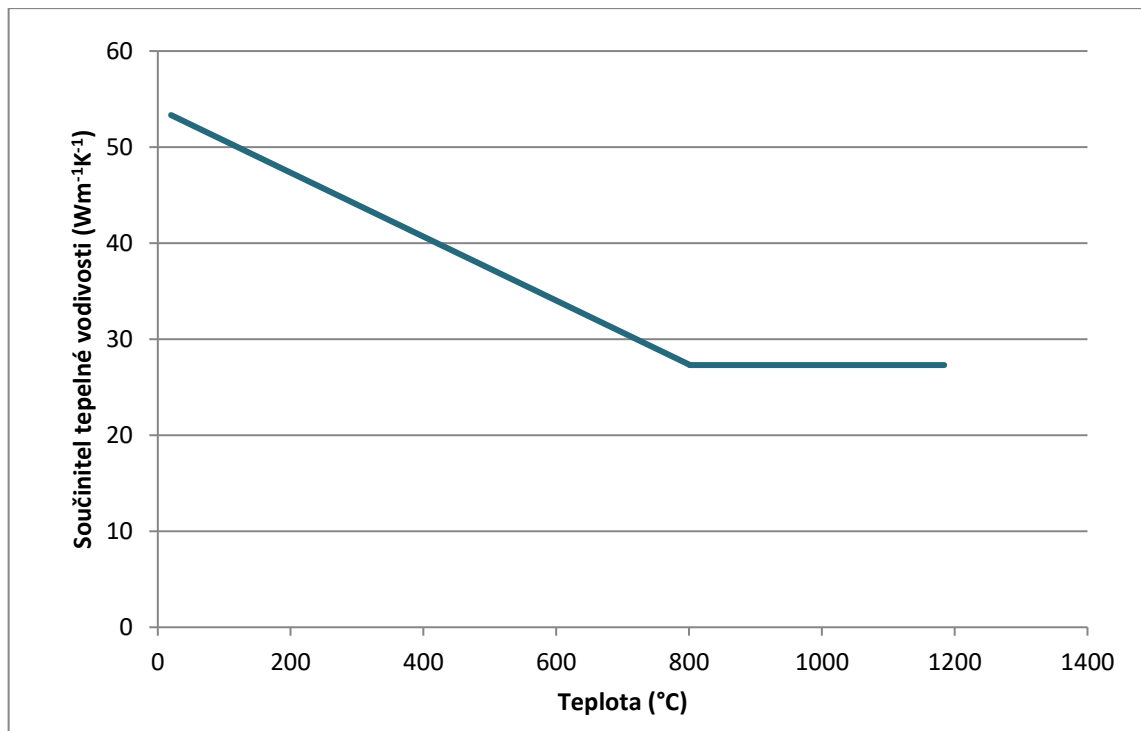
Změna součinitele tepelné vodivosti oceli λ vlivem teploty, znázorněná na obr. 6 a určuje se [1] [11]:

- a) pro $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 800 \text{ }^\circ\text{C}$ jako

$$\lambda = 54 - 3,33 * 10^{-2} T \quad (9)$$

- b) pro $800 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ jako

$$\lambda = 27,3 \quad (10)$$



obr. 6 Závislost součinitele tepelné vodivosti oceli na zvyšující se teplotě

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita oceli vzrůstá ze 440 J kg⁻¹K⁻¹ při pokojové teplotě na 650 J kg⁻¹K⁻¹ při teplotě nad 900 °C. Výrazný vrchol křivky okolo teploty 735 °C způsobuje endotermická změna krystalické mřížky železa z feritu na austenit. Závislost měrného tepla na zvyšující se teplotě je znázorněna na obr. 7. Měrná tepelná kapacita se určí podle následujících vztahů [11] [1]:

- a) pro 20 °C ≤ T < 600 °C jako

$$c = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} T - 1,69 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (11)$$

- b) pro 600 °C ≤ T < 735 °C jako

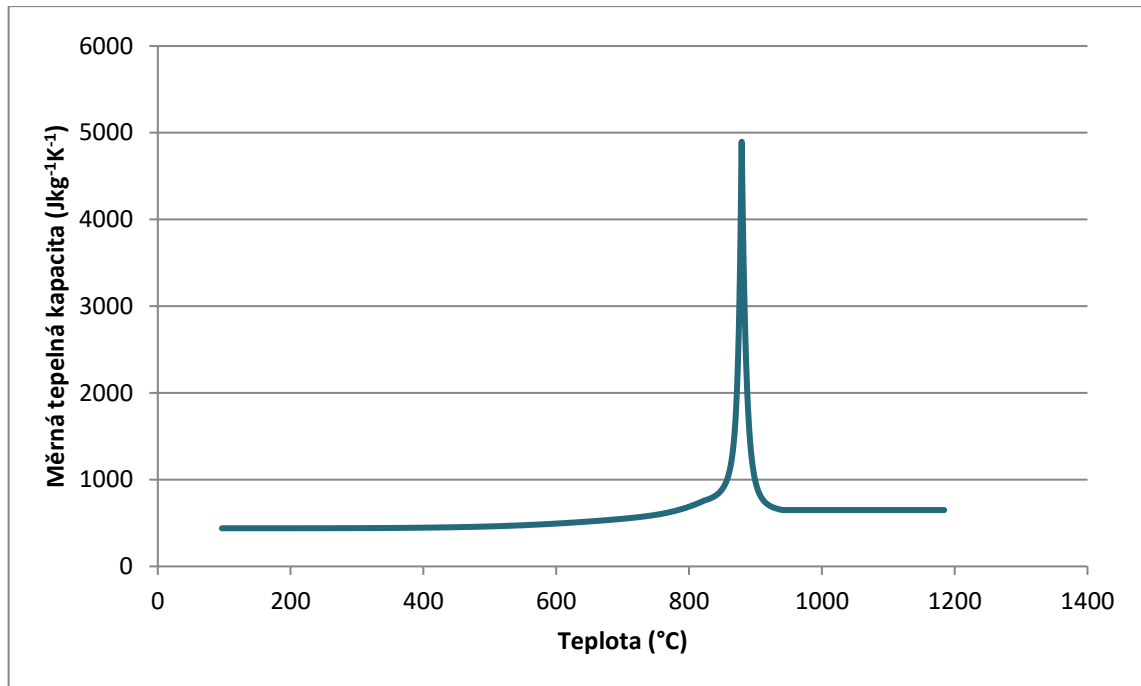
$$c = 666 + 13002 / (738 - T) \quad (12)$$

- c) pro 735 °C ≤ T < 900 °C jako

$$c = 545 + 17820 / (T - 731) \quad (13)$$

- d) pro 900 °C ≤ T ≤ 1200 °C jako

$$c = 650 \quad (14)$$



obr. 7 Závislost měrné tepelné kapacity oceli na zvyšující se teplotě

2.3.2 Tepelné vlastnosti požární ochrany

Pro analýzu tepla jsou potřeba tepelné vlastnosti:

- objemová hmotnost ρ_p
- měrná tepelná kapacita c_p
- tepelná vodivost λ_p

Objemová hmotnost

U mnoha protipožárních materiálů dochází ke změnám v hustotě kvůli dehydrataci, rozklad organických látek nebo odstranění oxidu uhličitého během požární expozice. Z hlediska požadavků na odhmotnění konstrukcí je požadována nízká objemová hmotnost požárně ochranných materiálů. Proto se v dnešní době upouští od obetonování, obezdívání a omítek. Hustota je hmotnost dělená objemem. Vzhledem k tomu, jak se hmotnost a objem požárně ochranných materiálů může měnit při vysokých teplotách, obě hodnoty by měly být kvantifikovány.

Objemová změna může být měřena pomocí dilatometru. Naštěstí je většina materiálů požární ochrany lehká. Pokud nejsou přesné informace k dispozici, může být použita konstantní hustota [10] [13].

Měrná tepelná kapacita

Když u protipožárního materiálu narůstá teplota, je požadovaná vnější energie. Požadovaná vnější energie se sníží, jestliže požárně ochranný materiál vytváří teplo prostřednictvím exotermické reakce nebo zvýší, pokud v ohni ochranný materiál podstoupí endotermní reakci, nebo pokud se odpaří voda. Množství energie potřebné pro zvýšení teploty o jednotku hmotnosti materiálu o 1 °C je definována jako měrné teplo materiálu.

Ekvivalentní specifické teplo se získá přidáním k základní hodnotě dodatečné energie, která je nutná v důsledku endotermické reakce nebo odpařením vody nebo odečtením od energie základní hodnoty, která se uvolňuje během exotermní reakce. Základní hodnota je obvykle závislá na teplotě. Nicméně, rozsah této změny je obvykle malý. Z tohoto důvodu, v případě, že není přesná varianta k dispozici, může být použita konstantní hodnota [13] [10].

Tepelná vodivost

Ze tří tepelných vlastností požárně ochranných materiálů má tepelná vodivost nejdůležitější vliv na teplotu chráněné konstrukce z důvodu lehké povahy materiálu. Proto je nanejvýš důležité, aby byla tato hodnota stanovena přesně. Výrobci materiálů požární ochrany obvykle uvádějí seznam změny tepelná vodivost při různé okolní teplotě v jejich literatuře. Neměla by být však používána konstantní tepelná vodivost. Tepelná vodivost materiálu požární ochrany se zvyšuje s teplotou. Proto při použití konstantní hodnoty teploty okolí budeme podceňovat teplotu chráněné konstrukce, což vede k nebezpečným výsledkům.

Pro řadu níže zmíněných materiálů je možné tepelnou vodivost v závislosti na teplotě vyjádřit jako

$$\lambda^* = \lambda_0^* + CT^3, \quad (15)$$

kde λ_0 je tepelná vodivost materiálu při nulové teplotě. T je absolutní teplota v kelvinech a C je konstanta. Při pokojové teplotě je tepelná vodivost vzduchu ve srovnání s pevnými látkami velmi nízká. Jednotka tepelné vodivosti jsou $W/(m \cdot K)$.

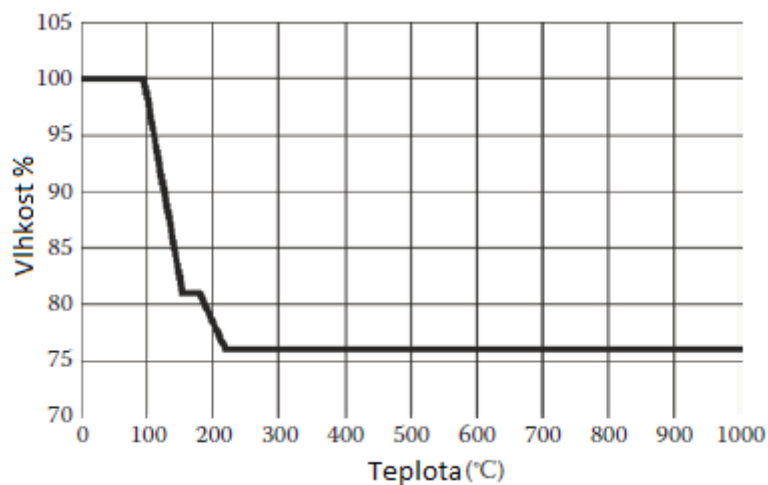
Vlhkost

U ochrany ocelových konstrukcí hraje také velmi důležitou roli vlhkost. Ochranné materiály s vyšším obsahem vlhkosti brání rychlejšímu zahřívání chráněného prvku. Různé druhy vod z hmot se odpařují nejvíce ve 100°C. Chemicky vázané až při 200-400°C [13] [10].

2.3.3 Materiály a jejich požární vlastnosti

Sádra

Sádra má asi 3% volné vody a 21% chemicky vázané. Pokud je vystavena vysoké teplotě, tak se volná voda začíná odpařovat při 100°C a chemicky vázaná při 150°C. Změna vlhkosti v závislosti na teplotě je znázorněna na obr. 8. Sádrokartonové desky mají hustotu do teploty 100°C 770 kg/m³. Po překročení teploty 220°C dojde k odpaření volné i chemicky vázané vody a hustota klesne na 623 kg/m³. Výpočty musí být prováděny pro dvě fáze. První je při ztracení volné vody a 75% vázané a druhé pro zbývajících 25% vázané vody [10].



obr. 8 Závislost vlhkosti sádry na teplotě [10]

Měrná tepelná kapacita má hodnotu 950 J/(kg*K). Při výpočtu špičkových hodnot (obr. 9), je nutné zahrnout požadovanou energii pro oddělení molekul vody ze sádry, jakož i účinky pohybu vody by měly být zahrnuty kondenzace v chladnějších oblastech. Dle tohoto se průměrná měrná tepelná kapacita vypočítá dle vztahu [10]:

$$C = \frac{2,26 \times 10^6}{T} (e_d f_1 + e_{free}) f_2, \quad (16)$$

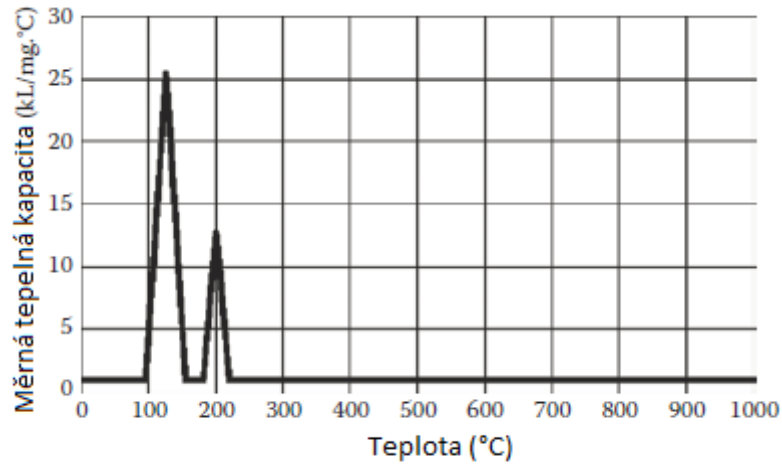
kde:

e_d je obsah vody dehydratace

e_{free} volný obsah vody

T teplota

f_1, f_2 opravné faktory, které představují reakční teplo a účinky pohybu vody



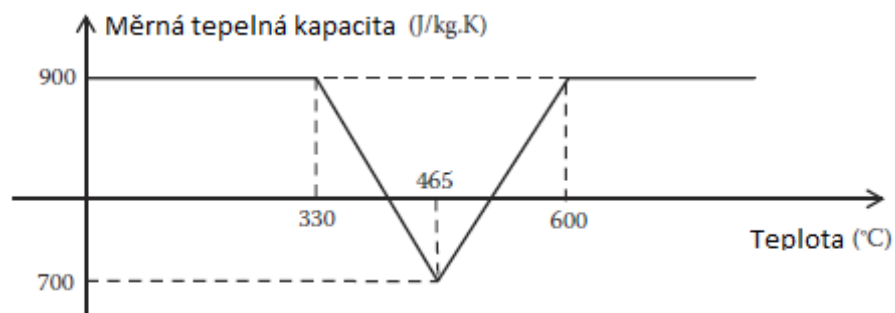
obr. 9 Závislost měrné tepelné kapacity sádry na teplotě [10]

Vrcholové hodnoty jsou při 120°C 25,3 kJ/(kg·K) a pro 200°C 12,7 kJ/(kg·K).

Tepelná vodivost sádry se do 95°C uvažuje jako konstantní. Poté vodivost lineárně klesá z důsledku odpařování vody až do 220°C. Po odpaření vody se tepelná vodivost zvyšuje jako funkce od sálavého přenosu tepla v pórech sádry. Sádrové desky mají tepelnou vodivost v první fázi 0,24 W/(m·K) a v druhé 0,12 W/(m·K). Sádrokartonové desky mají tepelnou vodivost lepší. V první fázi je 0,19 W/(m·K) a v druhé 0,1 W/(m·K) [10].

Minerální vlákna

Hustota minerálních vláken je 155 – 180 kg/m³, základní hodnota měrného tepla je asi 900 J/(kg·K). Exotermní reakce se děje při teplotě v rozmezí 330 – 600 °C. V rozmezí těchto hodnot klesá měrné teplo přibližně o 1600 J/(kg·K). Trojúhelníková redistribuce tepla je vidět na obr. 9 [10].



obr. 10 Měrná tepelná kapacita pro minerální vlákna [10]

Tepelná vodivost je udávána Benichovo-Sultanovou rovnicí:

$$\lambda_{\text{minerální vlákna}} = 0,022 + 0,1475 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (17)$$

Doporučené hodnoty:

$$\lambda = 0,0815 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$c = 0,92 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\rho = 450 \text{ kg/m}^3 \text{ [13]}$$

Minerální vlna

Hmota je složena z roztavených vysokopecních strusek, silikátů nebo jejich směsí, pojená pryskyřicí. Hustota minerální vlny je 165 kg/m^3 . Měrná tepelná kapacita se může použít konstantní $840 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Vztah mezi tepelnou vodivostí a teplotou byl stanoven následovně [10]:

$$\lambda_{\text{minerální vlna}} = 0,03 + 0,2438 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (18)$$

Doporučené hodnoty:

$$\lambda = 0,046 - 0,055 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$c = 0,730 - 0,835 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

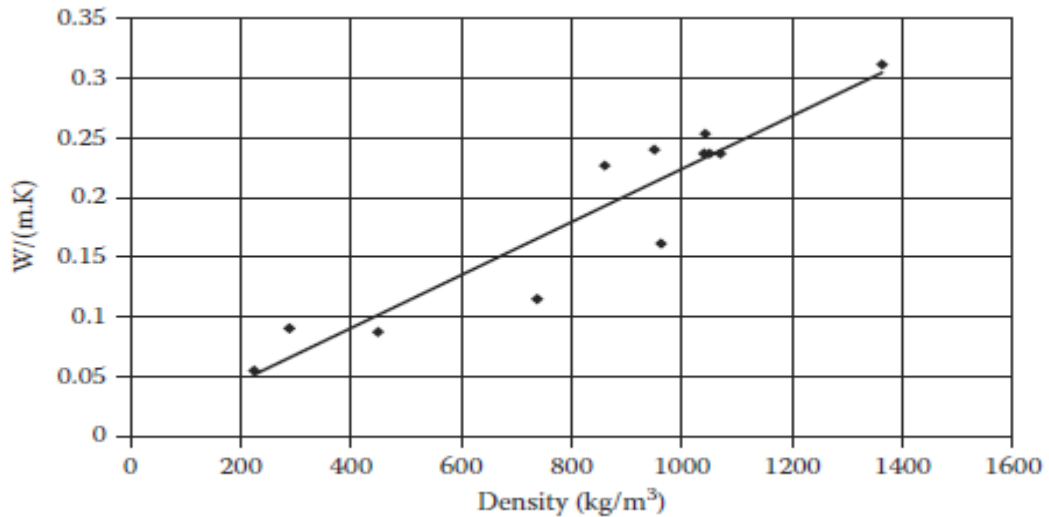
$$\rho = 100 - 150 \text{ kg/m}^3 \text{ [13]}$$

Kalcium silikát

Měrná tepelná kapacita je udávána hodnotou $900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, je podobná jako u sádry. Materiály na bázi kalcium silikátu mají celou řadu hodnot objemové hmotnosti $200\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$. Tepelná vodivost je udávána vztahem [10]:

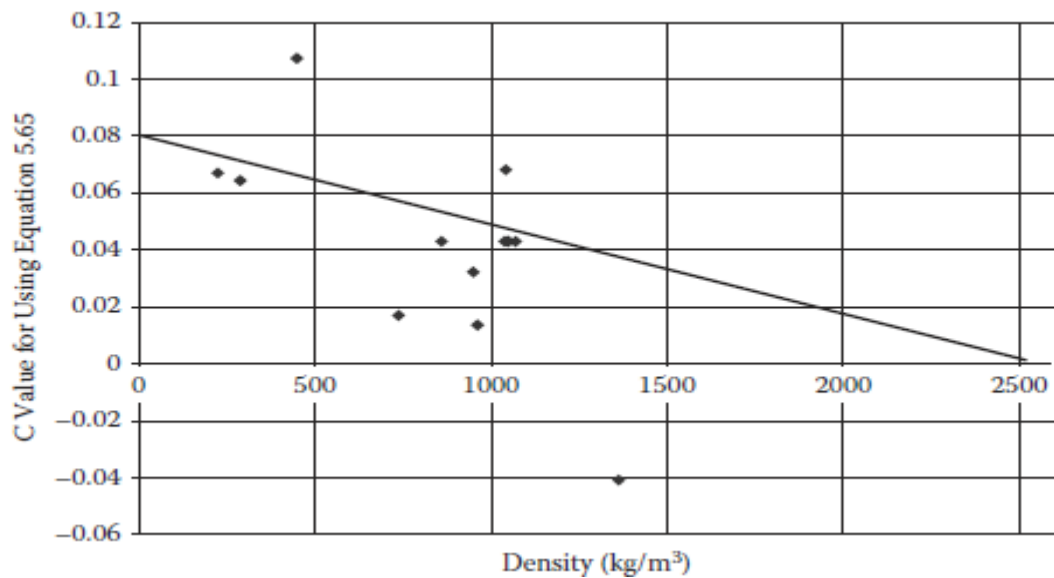
$$\lambda_0^* = 0,23 \frac{\rho}{1000} \quad (19)$$

Na obr. 9 je znázorněna lineární závislost tepelné vodivosti na hustotě. Křivka prochází počátkem, což je správně. Při nulové hustotě by měla být také nulová tepelná vodivost.



obr. 11 Vztah mezi tepelnou vodivostí a hustotou kalcium silikátu [10]

Vztah mezi hodnotou C rovnice (5.65) a teplotou je znázorněn na obr. 10. Tento obrázek ukazuje, že hodnota C může být vysoce proměnná v podobných hustotách [10].



obr. 12 Vztah mezi hodnotou C a hustotou kalcium silikátu [10]

Z tohoto důvodu nemusí být úplně vhodné použít hustotu jako jediný faktor určující tepelnou vodivost. Nicméně protože údaje chybí a účel této práce je nalézt dostatečně přesný odhad tepelné vodivosti kalcium silikátu, je to považováno za přijatelné. Hodnotu C je možné vypočítat dle následující vztahu [10]:

$$C = 0,08 \times \frac{(2540 - \rho)}{2540} \quad (20)$$

Hodnota 2540 kg/m^3 představuje pevnou hustotu. Kalcium silikát v pevné látce má nulovou poréznost, takže nemá žádný příspěvek k sálavému přenosu tepla do tepelné vodivosti. Pro pevné látky je možné předpokládat hodnotu $C=0$. [10].

Vermikulit

Vermikulitové výrobky mohou být na bázi cementu nebo sádry. Používají se spíše na nástřiky než obklady. Hustota je $375\text{-}600 \text{ kg/m}^3$. Měrná tepelná kapacita se udává v hodnotě $900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Pro tepelnou vodivost byl odvozen následující vztah [10]:

$$\lambda_0^* = 0,27 \frac{\rho}{1000} \quad (21)$$

$$C = 0,18 \frac{(1000-\rho)}{1000} \quad (22)$$

Hodnotu 1000 kg/m^3 pro výpočet C lze možné uvažovat pro pevný vermikulit.

Vlastnosti dřívě používaných desek jsou uvedeny v tab. 1.

tab. 1 Vlastnosti tepelně ochranných obkladových materiálů [13]

Tepelně izolační obklady	Hustota P [kg/m^3]	Obsah vlhkosti u [%]	Tepelná vodivost λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita c [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Měkké				
Kolvit	60 – 80	18	0,039	835
Vistemat	250 - 450	5,8	0,043 – 0,086	900
Tuhé				
Hobrex S	450	7,8	0,0815	920
Izomin	350 – 550	1,5 – 3	0,058 – 0,064	-
Akumin	350-400	1,5 – 3	0,058	-
Tvrdé				
Dupronit B	800 - 950	7,2 – 11,3	0,15 – 0,16	930
Ezalit B	700 - 1000	-	0,17 – 0,198	880 - 890
Pyral E, D	750 - 1000	-	0,088	-
Pyral H	480 – 525	-	0,08	-
Cerafelt	48 – 384	-	0,048 – 0,039	-
Duripanel	1200	12 – 15	0,18	1900
Marinite	576 – 720	14,6	0,105 – 0,126	-
Pical	650	-	0,113	3780
Picalux	750	-	0,113	4600

Pro ostatní používané materiály požární ochrany jsou hodnoty uvedeny v tab. 2.

tab. 2 Vlastnosti požárně ochranných materiálů [1]

Tepelně izolační materiál	Hustota P [kg/m ³]	Obsah vlhkosti u [%]	Tepelná vodivost λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Nástříky perlit	350	15	0,12	1200
Hutní nástříky Vermikulit (perlit) a cement	550	15	0,12	1100
Vermikulit (perlit) a sádra	650	15	0,12	1100
Desky Vermikulit (perlit) a cement	800	15	0,20	1200
Silikátová (vápenosilikátová) vlákna	600	3	0,15	1200
Sádrové desky	800	20	0,20	1700
Slisované vláknité ze silikátových vláken, min. vlny, čedičové vlny	150	2	0,20	1200
Zpěnitelné nátěry	100	0	0,10	1200
Beton běžný	2300	4	1,60	1000
lehký	1600	5	0,80	840
Zdivo z dutých cihel	1000	8	0,40	1200
z plných cihel	2000	8	1,20	1200
z betonových bloků	2200	8	1,00	1200

2.3.4 Produkty požární ochrany

Výrobků, které slouží k požární ochraně ocelových konstrukcí je ve světě celkem hodně. Tato práce je zaměřena hlavně na deskovou požární ochranu. Jiné systémy jako jsou nástříky, nátěry či obetonování jsou zmíněny v kapitole 2.1.

V České republice se hlavně používají ochranné desky od firmy Promat s.r.o., ať už jde o PROMATECT H, L nebo 200. Všechny tyto desky jsou na bázi výše zmíněného kalciumsilikátu. Tento způsob řešení požární ochrany je však z finančních důvodů méně používaný. Využívají se hlavně v místech, kde je zapotřebí splnit velké požární odolnosti konstrukcí nebo je zapotřebí, aby

ochranný materiál byl co nejtenčí. Tyto desky mají lepší tepelné vlastnosti než například sádrokartonové konstrukce či konstrukce z Cetris desek, které jsou na bázi betonu. Nejvíce rozšířenou deskovou požární ochranou jsou však sádrokartonové konstrukce. Výhodou je rychlá montáž, nižší pořizovací náklady a také možnost povrchové úpravy desek.

Promat s.r.o. nemá distribuci pouze v České republice. Působí po celé Evropě. V zahraničí je hodně používá desky SUPALUX. Montují se podobně jako sádrokartonové konstrukce. Tak jako PROMATECT existuje více druhů tohoto výrobku. Na podhledy se používají desky CF 420. Příčky a venkovní stěny se montují z desek CF 420A. Deska s označením CF 739 slouží k ochraně ocelových prvků a zároveň je také chrání proti korozi. Všechny tyto desky mají objemovou hmotnost 950 kg/m^3 a tepelnou vodivost $0,17 \text{ W/mK}$. Níže je uveden přehled dalších zahraničních požárně ochranných deskových výrobků [14].

Firma Fermacell vyrábí desku AESTUVES T. Jedná se o cementovou lepenou lehkou desku. Používá se hlavně pro ochranu betonových konstrukcí v podzemních dopravních systémech. Tepelná vodivost je na hodnotě $0,175 \text{ W/mK}$ a hustota $690 - 890 \text{ kg/m}^3$ [15].

Dalším produktem jsou kompozitní desky od firmy Invicta s názvy DURASTEEL a DURAWALL. Jedná se o desky, které mají ochranné izolační jádro vložené mezi vnějšími vrstvami. Deska DURASTEEL se skládá z cementového jádra vyztuženého vlákny mechanicky spojených s děrovanými plechy po obou vnějších plochách. Je vysoce odolná proti nárazu a vlhkosti. Byly vyvinuty tak, aby se daly používat i v konstrukcích odolných proti výbuchu, včetně výroby energie a protiteroristických zařízeních. Tepelná vodivost tohoto výrobku je $0,55 \text{ W/mK}$, objemová hmotnost je uvedena jako 2 kg/m^2 na mm tloušťky. Systém DURAWALL byl vyvinut s ohledem na odolnost vůči požáru a stabilitě. Systém je vhodný pro konstrukci vnitřních dělících stěn bez zatížení. Systém Durawall je postaven kolem kompozitního panelu Durawall s ocelovým povrchem a nehořlavým jádrem z minerální vlny. Panely se vyrábějí v tloušťkách 100, 120 a 150 mm [16].

2.4 Návrh požární ochrany

Požární ochranu je možné navrhovat mnoha způsoby. Záleží na složitosti konstrukce. Pro návrh požární odolnosti konstrukcí lze využít postupů uvedených v evropských normách EN 199x-1-2. Postupně se řeší teplotní analýza požárního úseku, přestup tepla do konstrukce, vedení tepla v konstrukci a návrh konstrukce za vysokých teplot. Teplotní analýza je založena na popisu požárního zatížení, geometrii požárního úseku, vlastnostech ohraničujících konstrukcí a možnosti odvětrání. Návrh konstrukce za vysokých teplot řeší odezvu konstrukce na teplotní a mechanická zatížení [1].

2.4.1 Tabulková metoda

První a nejjednodušší možností je návrh pomocí tabulek. Ty byly vytvořeny na základě výpočtů a běžných experimentů. Kritérium pro návrh je požadavek na požární odolnost a součinitel průřezu A_m / V . Jedná se hlavně o ochranu deskovými materiály. V této práci nebyla používána [11].

2.4.2 Analytický model

Analytický model se vytváří pomocí přírůstkové metody. Jedná se o metodu, která vykazuje vysokou přesnost pro materiály s vysokou teplotní vodivostí jako je ocel, litina, hliník. Je popsána vztahem [11]:

$$h_{net,d} A_m \Delta t = \rho_a c_a \Delta \theta_a. \quad (23)$$

V normě EN 1993-1-2: 2004 je definována ve tvaru:

$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \quad (24)$$

Tato metoda byla používána ve výpočtu.

2.4.3 Numerický model

Numerický model se vytváří pomocí metody konečných prvků, která může být využita k řešení celé řady úloh. Kromě problémů mechaniky (statiky a dynamiky pevných a poddajných těles) se běžně využívá pro modelování proudění tekutin, pro úlohy vedení tepla, k analýze elektromagnetických polí a podobně. Atraktivita metody vyplývá z její poměrně velké univerzálnosti a schopnosti popsat i značně komplikované a rozsáhlé problémy. Metoda je také velmi snadno algoritmizovatelná. K určitým nevýhodám patří poměrně velká výpočetní náročnost. Metodu nelze prakticky použít bez výpočetní techniky, a to ani pro úlohy, které by byly jinou

metodou řešitelné ručním výpočtem. Programy, které využívají metodu konečných prvků jsou: ANSYS (byl používán v této práci), ADAPTIC, FEAST, SAFIR, VULCAN atd... [11] [12] [17]

3 Cíle práce

Hlavním cílem práce je nalézt vhodnou rovnici nelineárního průběhu tepelné vodivosti požárně ochranného deskového materiálu ocelových konstrukcí. Dalšími cíli je shrnutí problematiky požární ochrany a prováděných systémů, teplotní analýzy přestupu tepla do konstrukce, materiálové teplotní vlastnosti včetně jejich modelování a návrh požární ochrany.

Po sepsání této problematiky je možné provést výpočet průběhu teplot ocelových prvků požárně ochráněných deskovými materiály analytickou přírůstkovou metodou a metodou konečných prvků. Výsledky budou následně validovány na požárních zkouškách obdrženy od firmy Promat s.r.o. pro výrobky PROMATECT H a L. Pro porovnání byla zvolena ochrana ocelového sloupu HEM 280 a nosníků IPE 400 a Z 50x100.

Stanovená rovnice nelineárního průběhu tepelné vodivosti požárně ochranného deskového materiálu bude aplikována pro stanovení dimenzační tabulky obkladu PROMATECT 200 na požární odolnost EI 45 min.

4 Ověření materiálů na požárních zkouškách

Od firmy Promat s.r.o. byly poskytnuty výsledky z požárních zkoušek obkladů PROMATECT H a L. V experimentu bylo zkoušeno více prvků. Z těchto prvků byl zvolen ocelový sloup HEM 280. Ve zkoušce je počítáno s různými tloušťkami obkladu. Pro PROMATECT H to jsou 7,6 mm, 25 mm a 38,8 mm. U obkladu deskou PROMATECT L se jedná o tloušťky 19,7 mm, 39,4 mm a 59,3 mm [18] [19].

4.1 Vstupní parametry

Jak jsem již výše zmínil, tak pro výpočet byly zvoleny tři prvky: ocelový sloup HEM 280, nosníky IPE 400 a Z 50x100. Jejich rozměry byly přejaty z protokolů o zkoušce [18] [19].

Vstupní parametry a vlastnosti materiálů

Vstupní parametry a vlastnosti materiálů, s kterými bylo při výpočtech uvažováno jsou shrnuty v tab. 3.

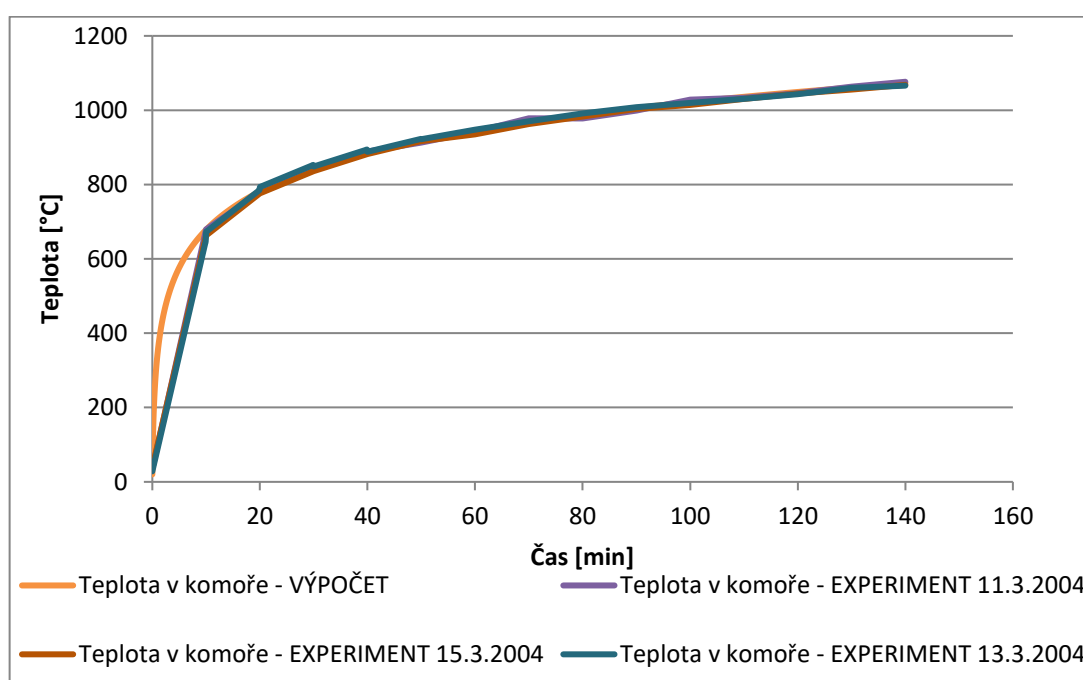
tab. 3 Vstupní parametry a vlastnosti materiálů [18] [19] [20]

Vstupní parametry			
Časový přírůstek	$\Delta t =$	5	sec
Polohový faktor	$\Phi =$	1	
Povrchová emisivita prvku	$\varepsilon_m =$	0,7	
Eemisivita požáru	$\varepsilon_r =$	1	
Ocel - S275			
Měrná tep. Kapacita	$c_a =$	440	J / kg*K
Objemová hmotnost materiálu	$\rho_a =$	7850	kg / m ³
Tepelná vodivost materiálu	$\lambda_a =$	50	Wm ⁻¹ K ⁻¹
Výsledná emisivita	$\varepsilon_{res} =$	0,7	
Součinitel přestupu prouděním	$\alpha_c =$	25	W / m ² K
Mez kluzu	$f_y =$	275	MPa
Souč. spoleh. mat. při požáru	$\gamma_{M,fi} =$	1	
Ochranný materiál - PROMATECT H			
Tloušťka ochranné desky	$d_p =$	0,0076	m
	$d_p =$	0,025	m
	$d_p =$	0,0388	m
Objemová hmotnost materiálu	$\rho_p =$	900	kg/m ³
Tepelná vodivost materiálu	$\lambda_p =$	0,17	Wm ⁻¹ K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	$c_p =$	920	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Vlhkost	$u =$	7,5	%

Ochranný materiál - PROMATECT L			
Tloušťka ochranné desky	$d_p =$	0,0197	m
	$d_p =$	0,0394	m
	$d_p =$	0,0593	m
Objemová hmotnost materiálu	$\rho_p =$	450	kg/m ³
Tepelná vodivost materiálu	$\lambda_p =$	0,085	Wm ⁻¹ K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	$c_p =$	950	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Vlhkost	$u =$	4,8	%
Vzduch			
Měrná tep. Kapacita	$c_v =$	1010	J / kg*K
Objemová hmotnost materiálu	$\rho_v =$	1,188	kg / m ³
Tepelná vodivost materiálu	$\lambda_v =$	0,0252	Wm ⁻¹ K ⁻¹

4.2 Přírůstková metoda

Výpočet přírůstkové metody probíhal v programu Excel od firmy Microsoft. Časový přírůstek jednoho kroku byl nastaven na 5 s. Nejdříve byla vypočtena a následně porovnána teplota ve zkušební komoře s normovou nominální křivkou na obr. 13.



obr. 13 Porovnání teploty naměřené ve zkušební komoře s normovou křivkou

Tepelná vodivost požárně ochranného materiálu byla do výpočtu zadána dvěma způsoby. Nejdříve jako konstantní a poté lineární, která byla vypočítána pomocí metody nejmenších čtverců. Z experimentu byly známy teploty ocelových profilů. Z nich je možné vypočítat tepelnou kapacitu c_a pomocí vzorců uvedených v kapitole 2.2.1. Měrnou tepelnou kapacitu ochranného materiálu

ponecháváme konstantní. Nyní je možné vypočítat tepelnou jímavost Φ . Ta se stanoví pro všechny teploty a následně se vyjádří tepelná vodivost ochranného materiálu λ_p podle vzorce 6 [10].

Vypočtené hodnoty teploty a tepelné vodivosti se zanesou do grafu a pomocí metody nejmenších čtverců se vypočítají koeficienty a a b pro výpočet tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu. Z těchto vypočtených koeficientů je vypočítána výsledná hodnota tepelné vodivosti za pomoci vzorců 15, 19, 20. Jedná se o lineární regrese a přímka má tvar:

$$y = -5,25 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0,19 \quad (25)$$

Koeficienty ve výpočtu tepelné vodivosti se nahradí hodnotami, které se zjistí z rovnice lineární regrese. Za λ_0^* se dosadí 0,19 a místo C hodnota $-5,25 \cdot 10^{-5}$. Konečná podoba vzorců pro stanovení tepelné vodivosti je následující:

$$\lambda^* = \lambda_0^* + CT^3 \quad (15)$$

$$\lambda_0^* = 0,211 \frac{\rho}{1000} \quad (26)$$

$$C = -0,081 \frac{(2540 - \rho)}{2540} \quad (27)$$

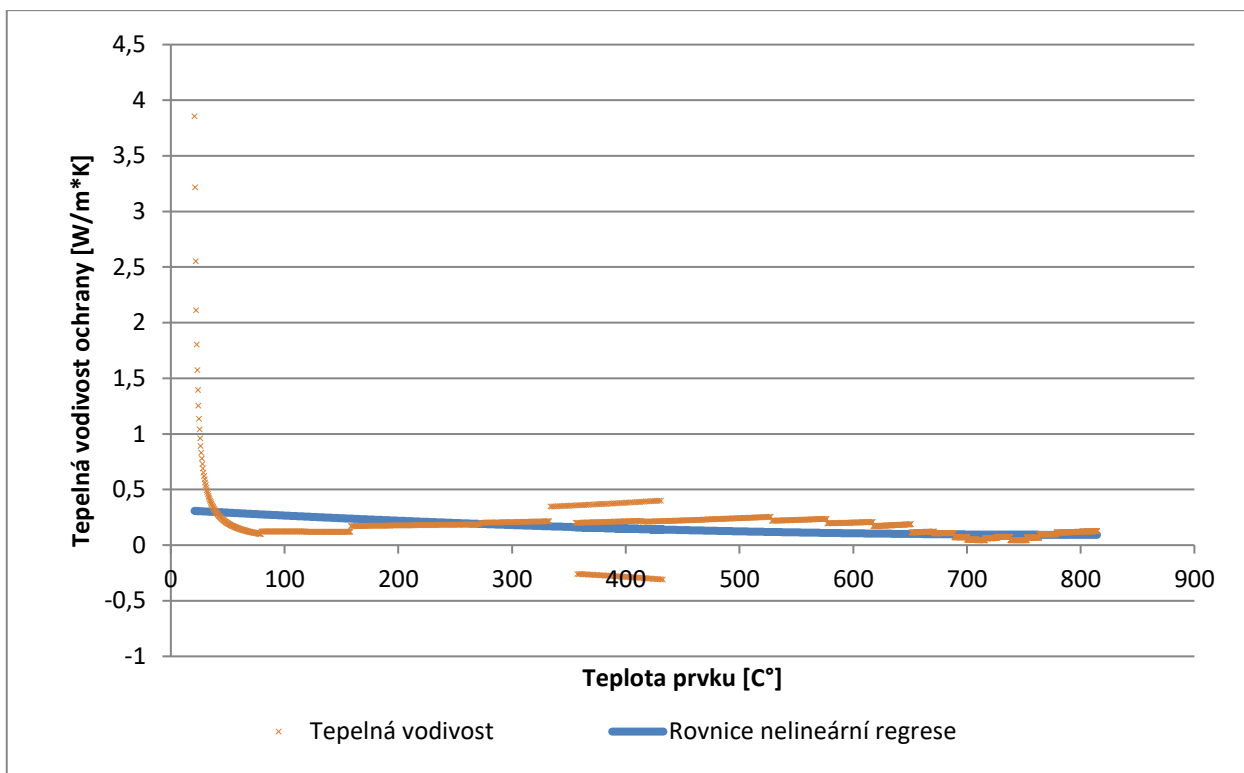
Tento model byl však použit pouze pro stanovení dimenzační tabulky v kapitole 5.2. Pro výpočet teploty analytickým modelem byla z metody nejmenších čtverců stanovena ještě nelineární regrese ve tvaru:

$$y = 1,37 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 1,56 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0,1901 \dots \text{ pro PROMATECT H} \quad (28)$$

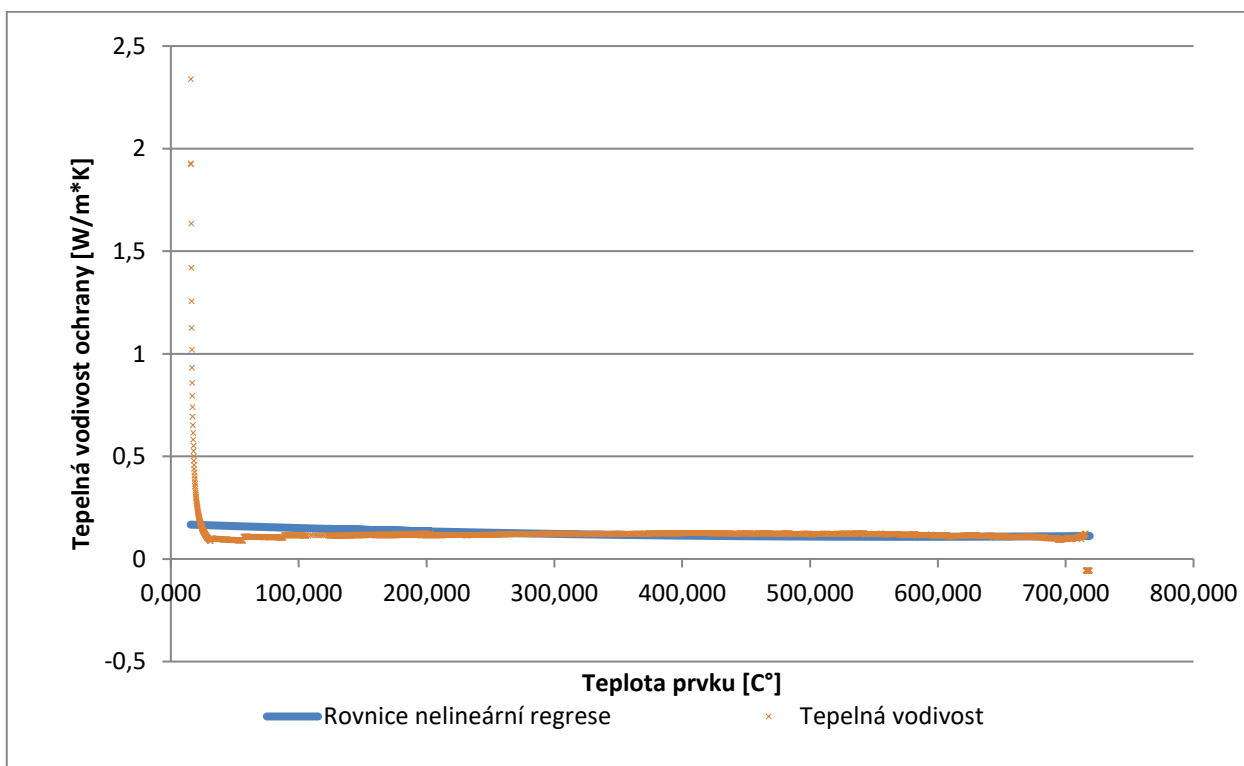
PROMATECT L má poloviční hodnotu tepelné vodivosti. Proto byla vypočtena nelineární regrese i pro tento výrobek. Rovnice má tvar:

$$y = 8,27 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4,65 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0,1728 \dots \text{ pro PROMATECT L} \quad (29)$$

Přímka v grafu č. 14 představuje nelineární regresi pro PROMATECT H a v grafu č. 15 pro PROMATECT L.

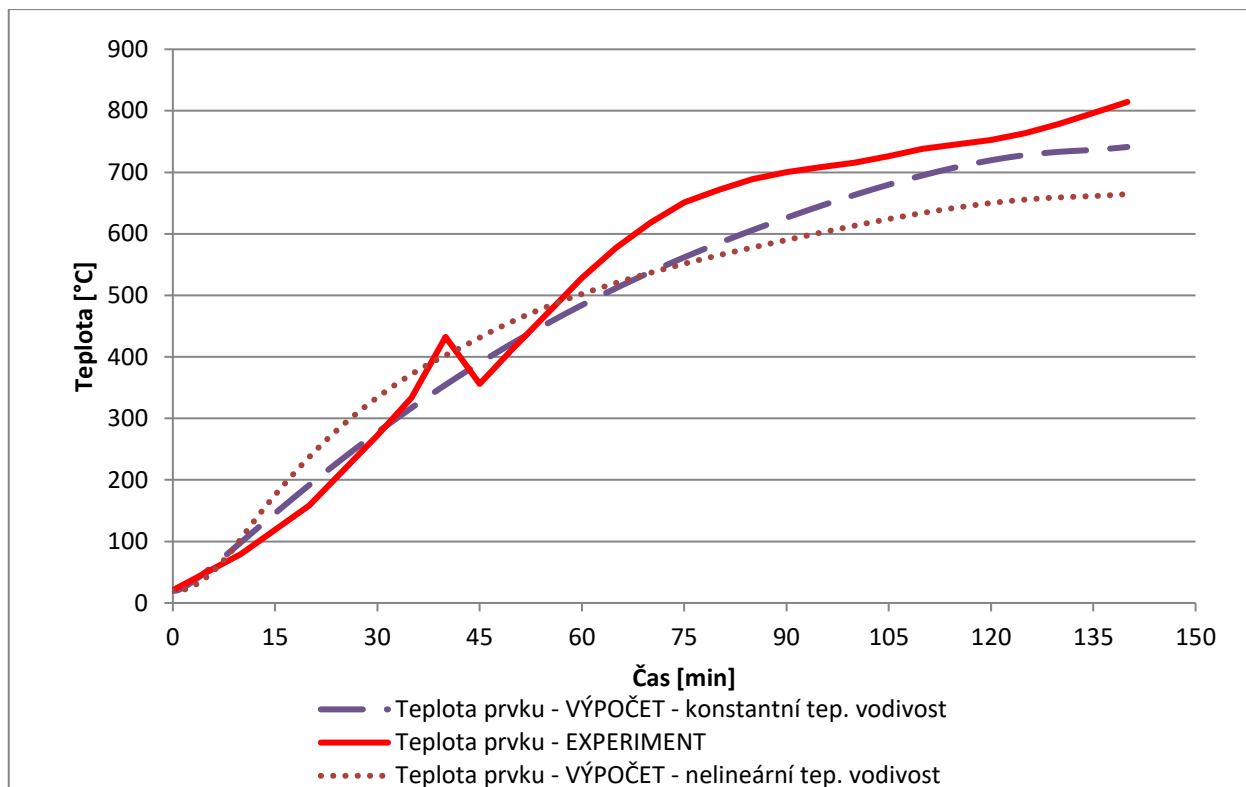


obr. 14 Závislost tepelné vodivosti na teplotě prvku PROMATECT H

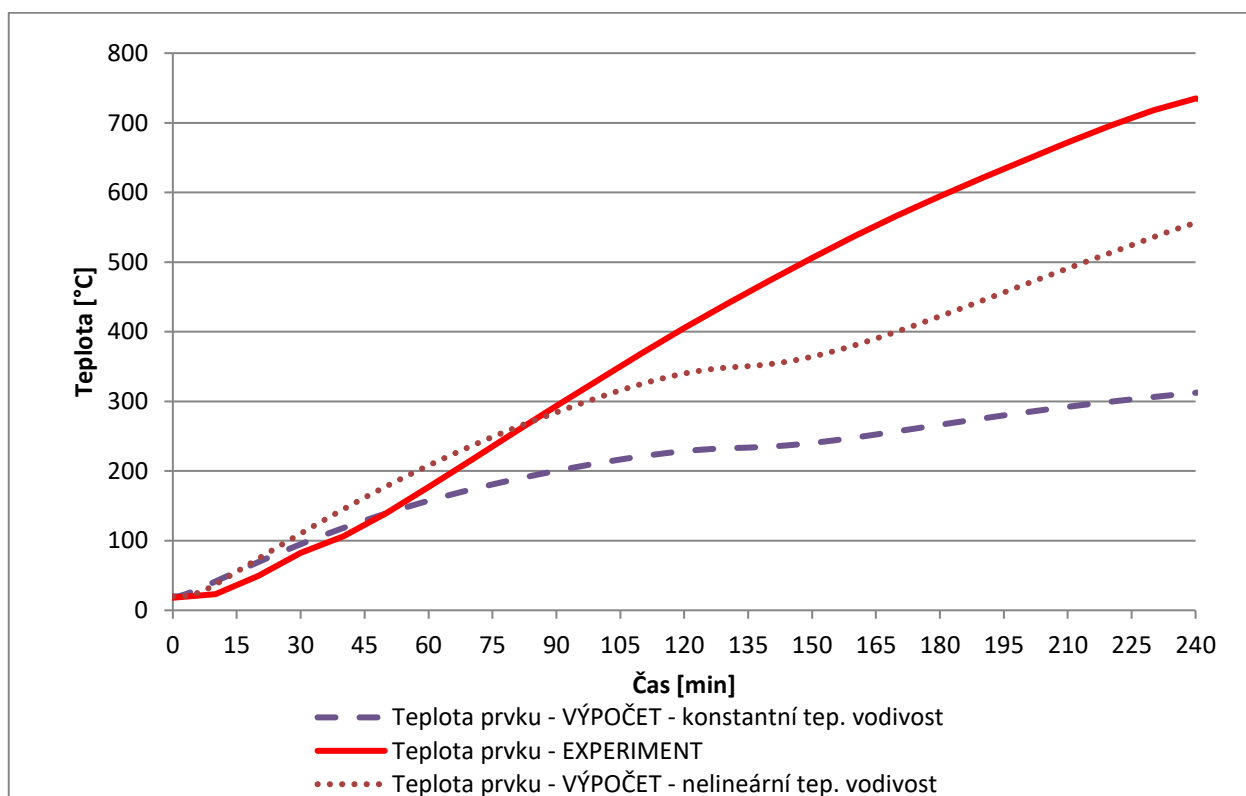


obr. 15 Závislost tepelné vodivosti na teplotě prvku PROMATECT L

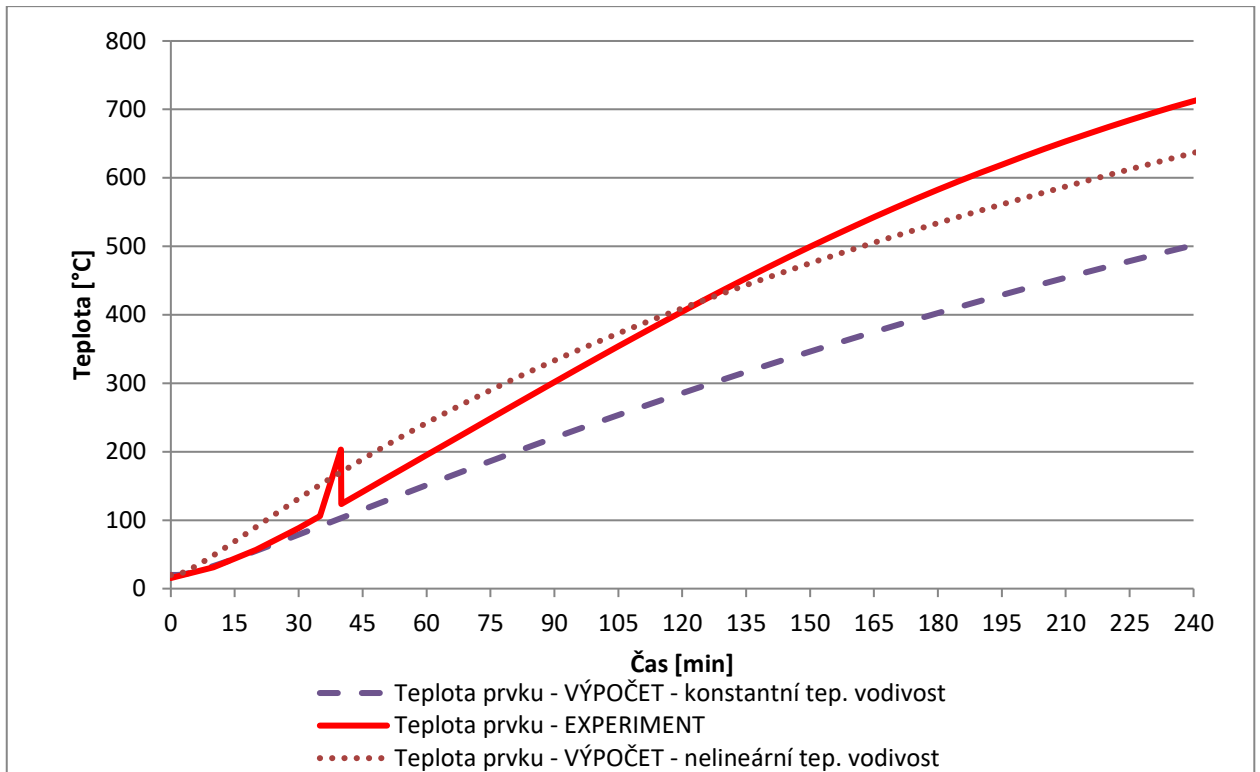
Na obr. 16 – 27 jsou porovnány průběhy teplot výpočtu s požární zkouškou. Výpočet je proveden s variantami konstantním a nelineárním průběhem tepelné vodivosti.



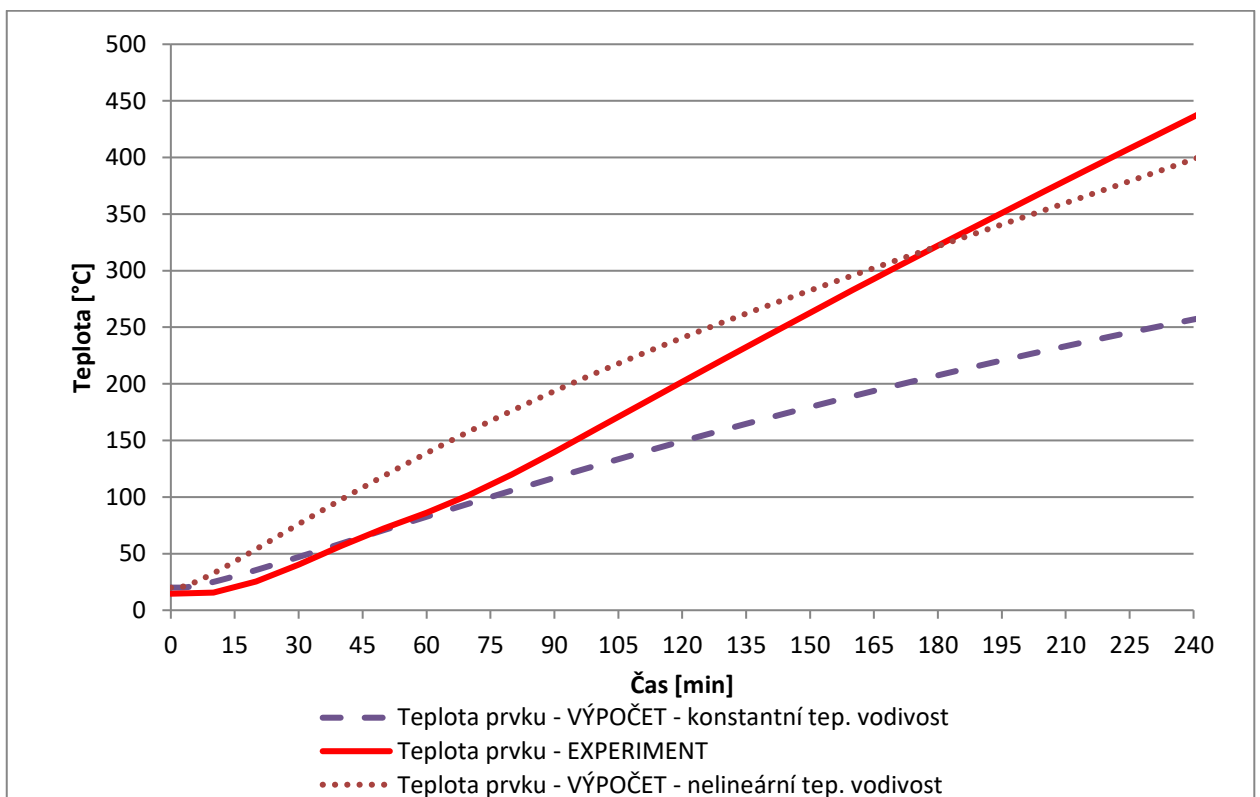
obr. 16 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - HEM 280 pro požární obklad PROMATECT H 7,6 mm



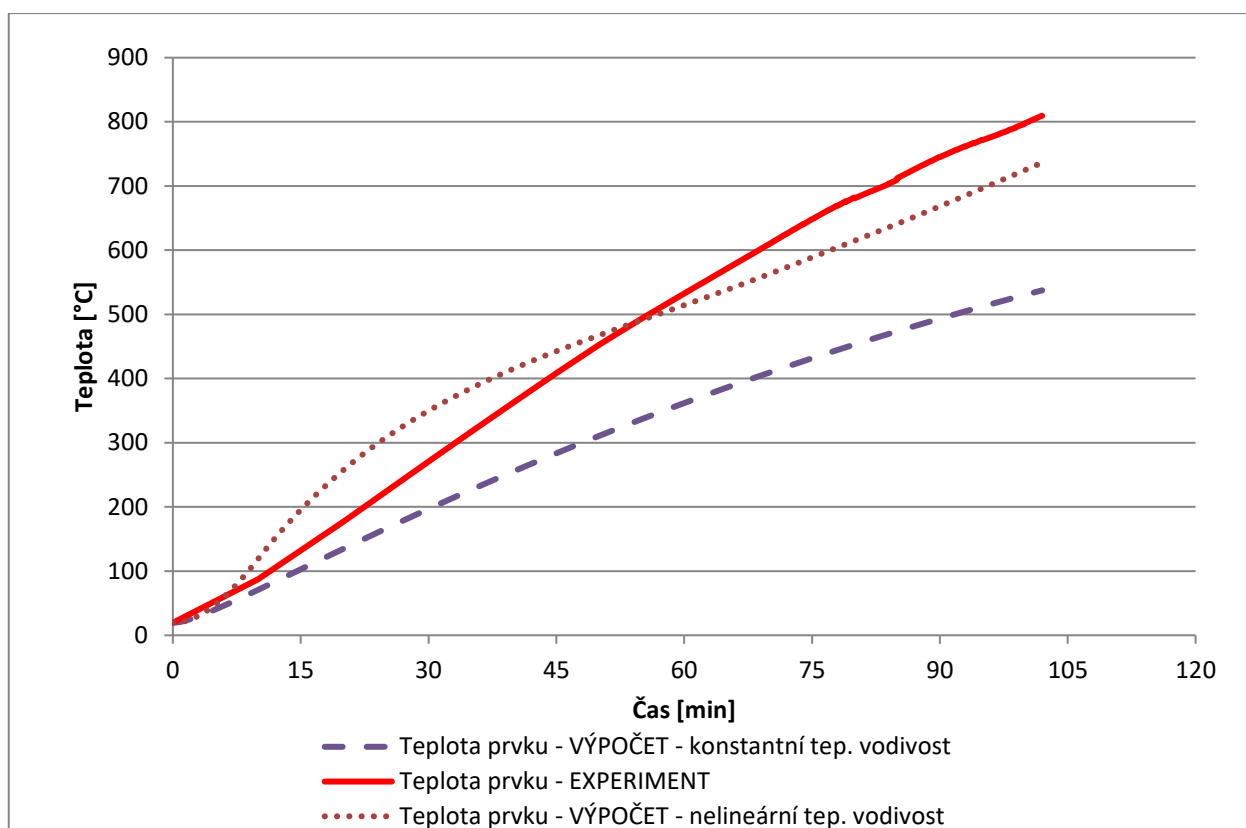
obr. 17 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - HEM 280 pro požární obklad PROMATECT H 25 mm



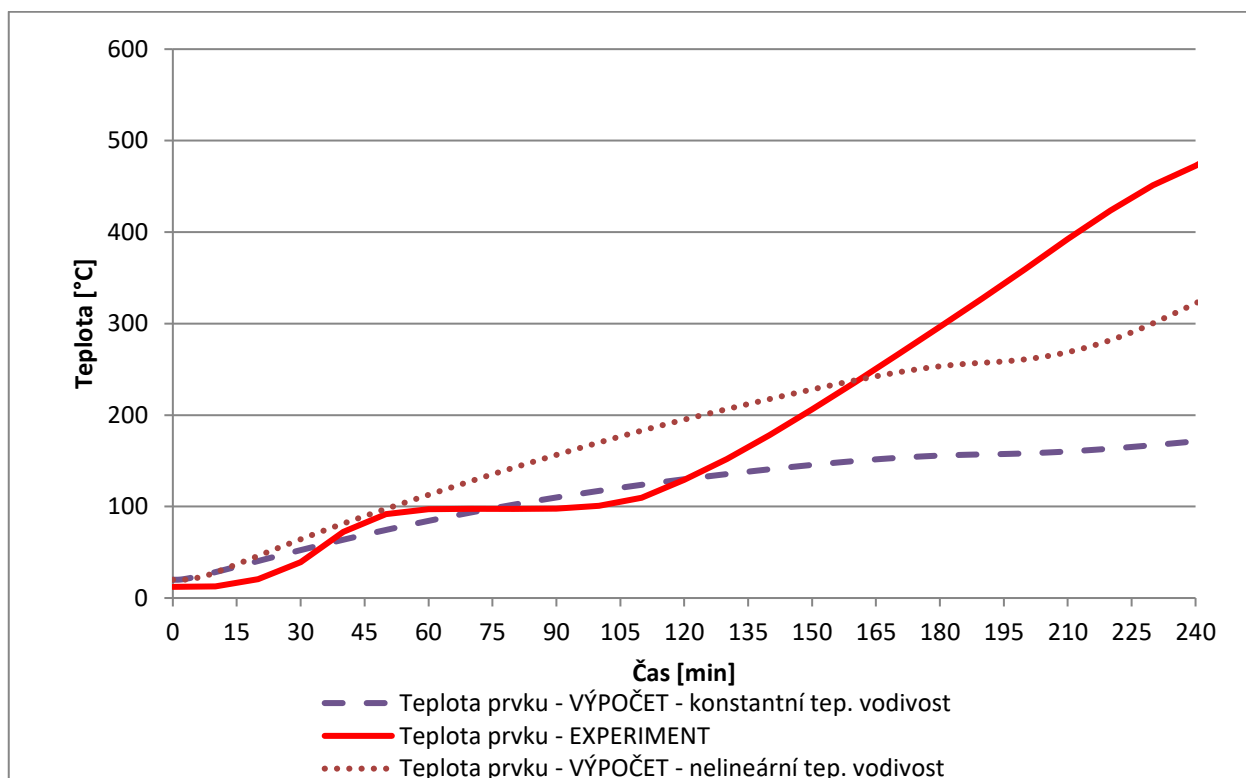
obr. 18 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - HEM 280 pro požární obklad PROMATECT L 19,7 mm



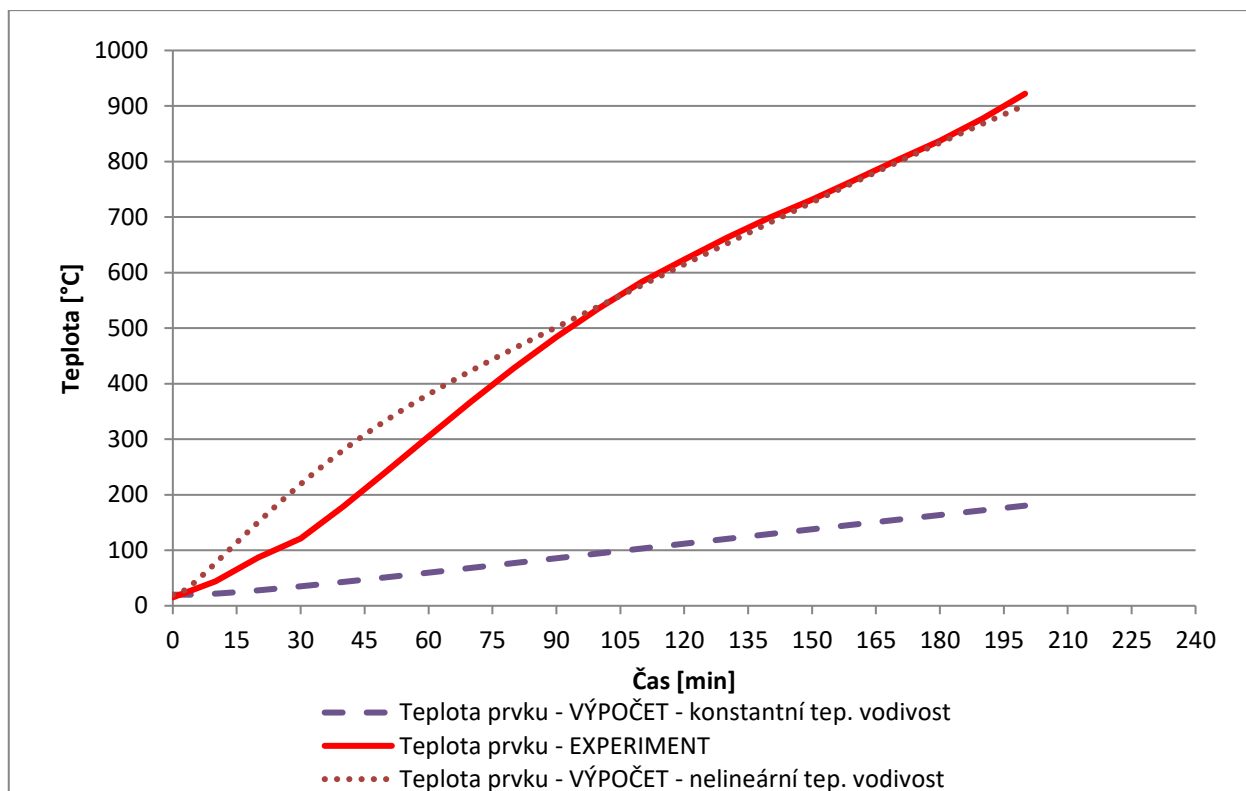
obr. 19 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - HEM 280 pro požární obklad PROMATECT L 39,4 mm



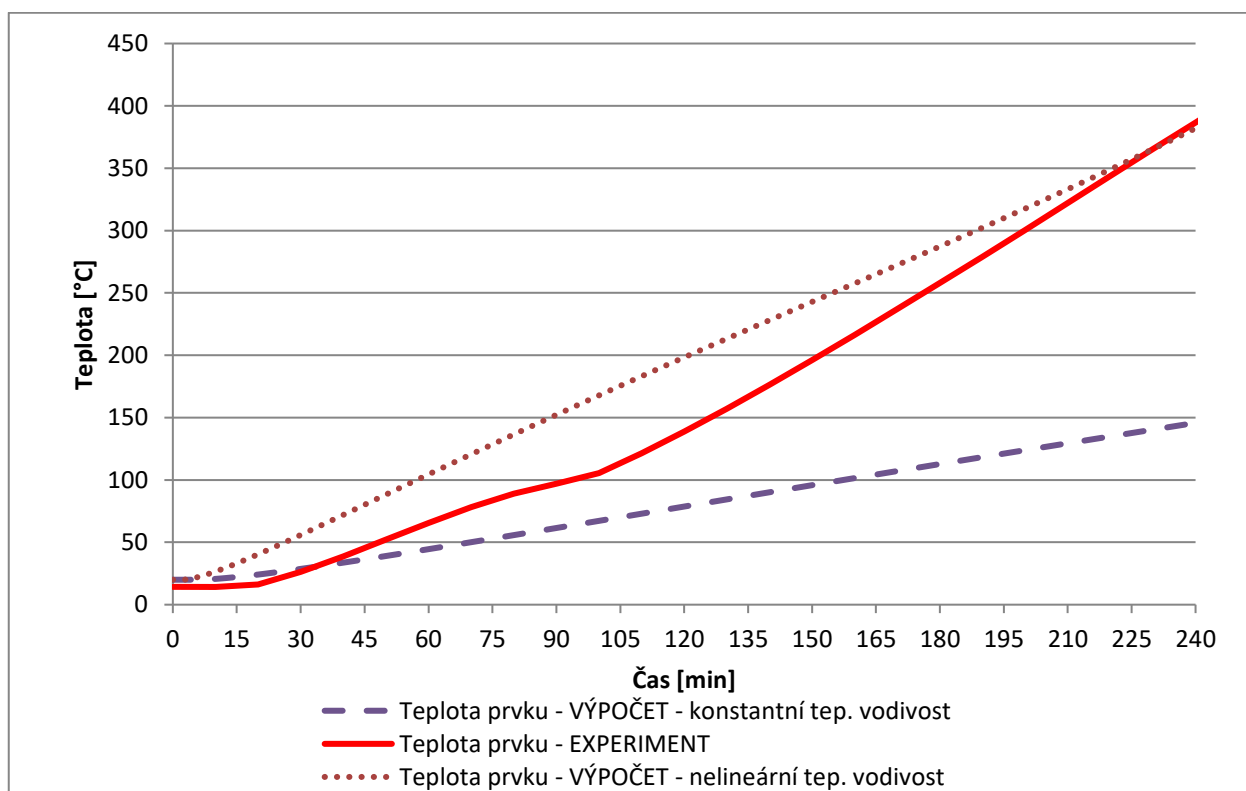
obr. 20 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - IPE 400 pro požární obklad PROMATECT H 7,6 mm



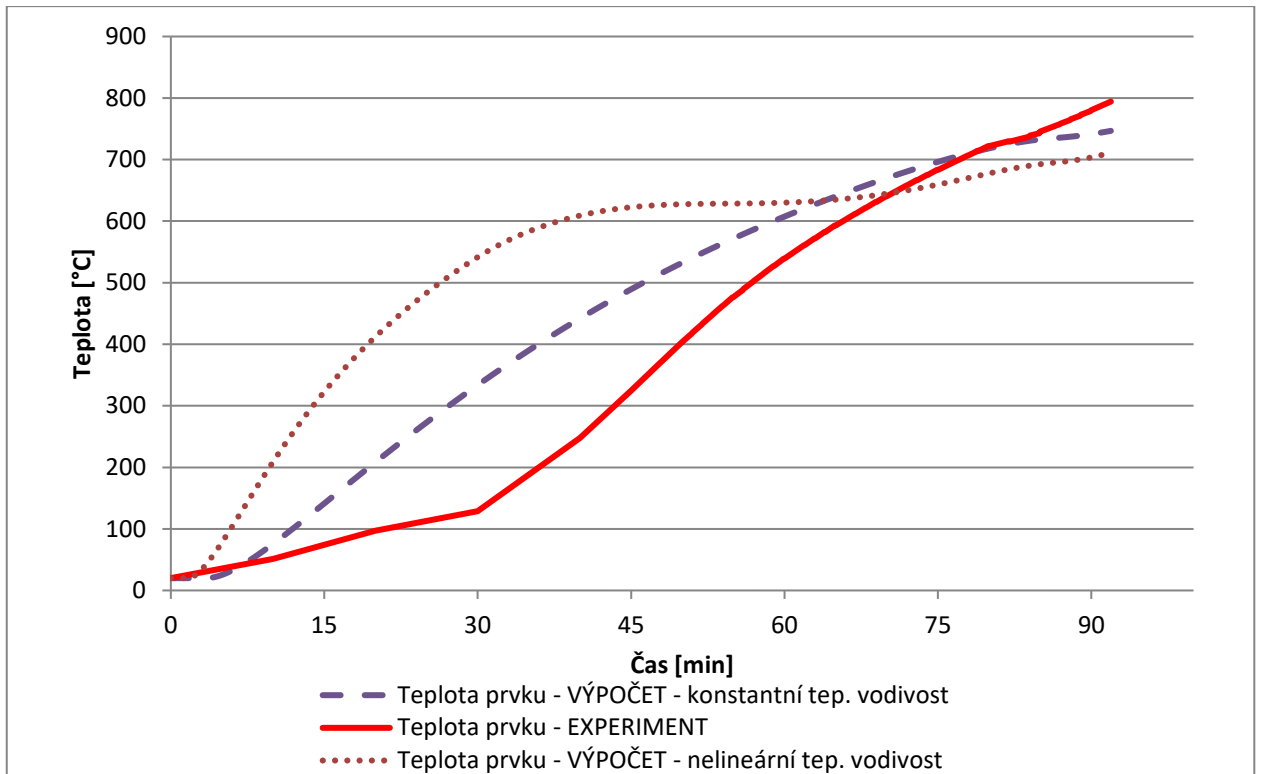
obr. 21 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - IPE 400 pro požární obklad PROMATECT H 38,8 mm



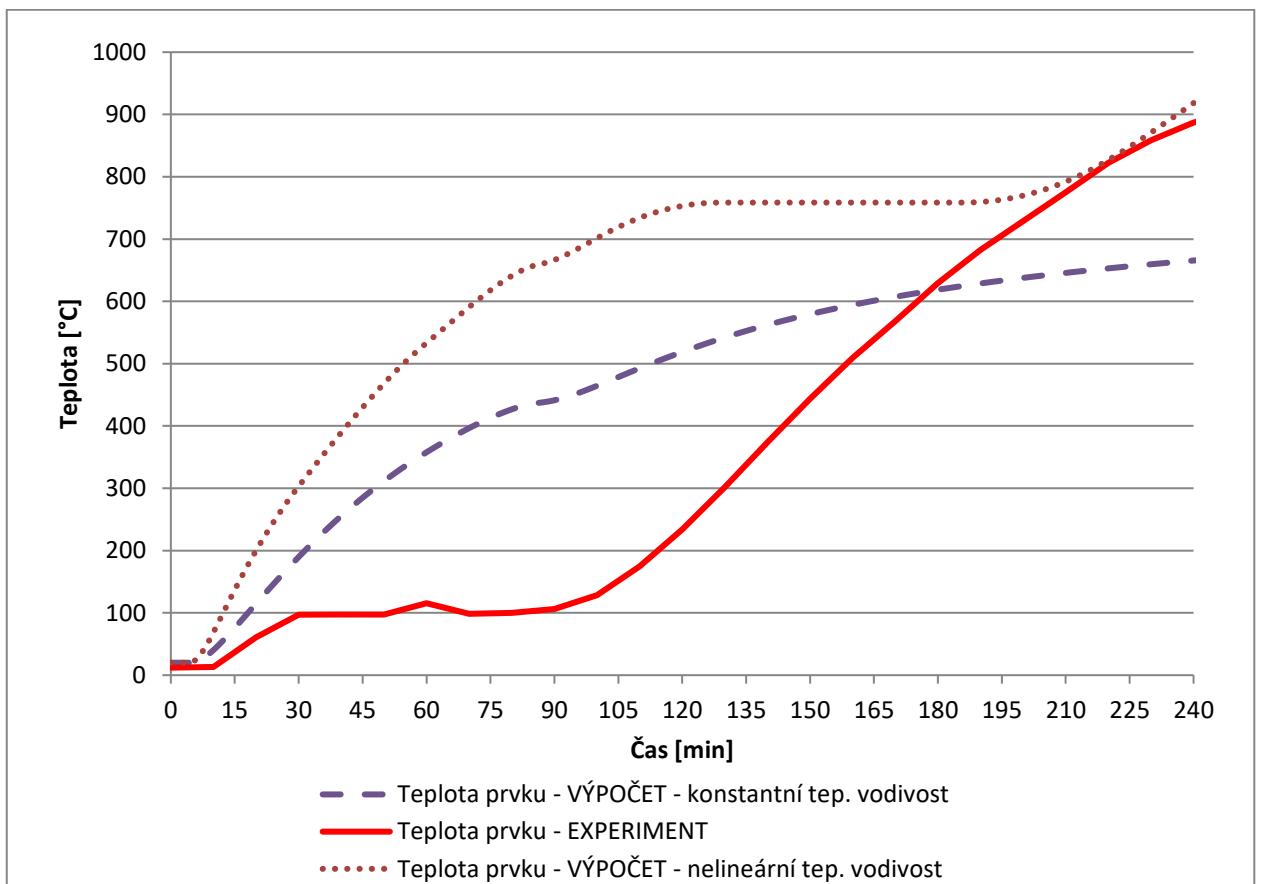
obr. 22 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - IPE 400 pro požární obklad PROMATECT L 19,7 mm



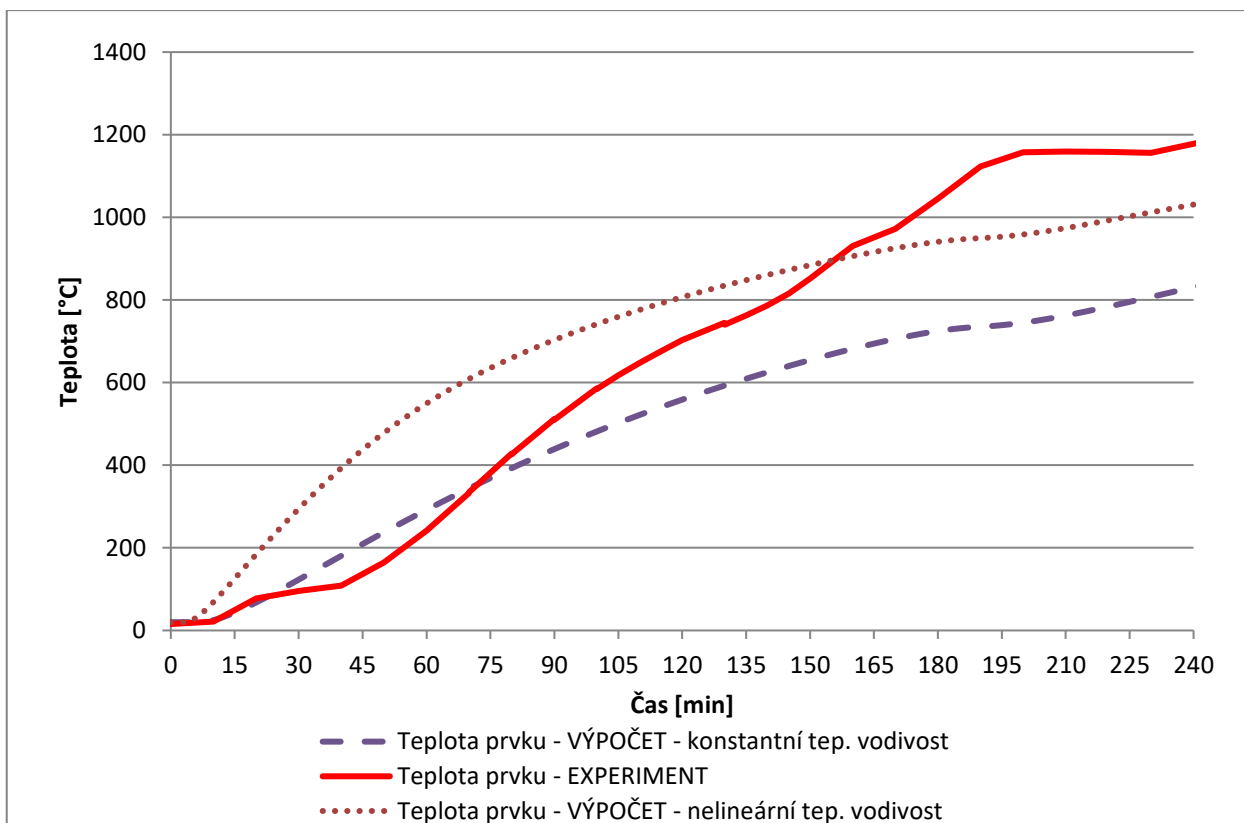
obr. 23 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - IPE 400 pro požární obklad PROMATECT L 59,3 mm



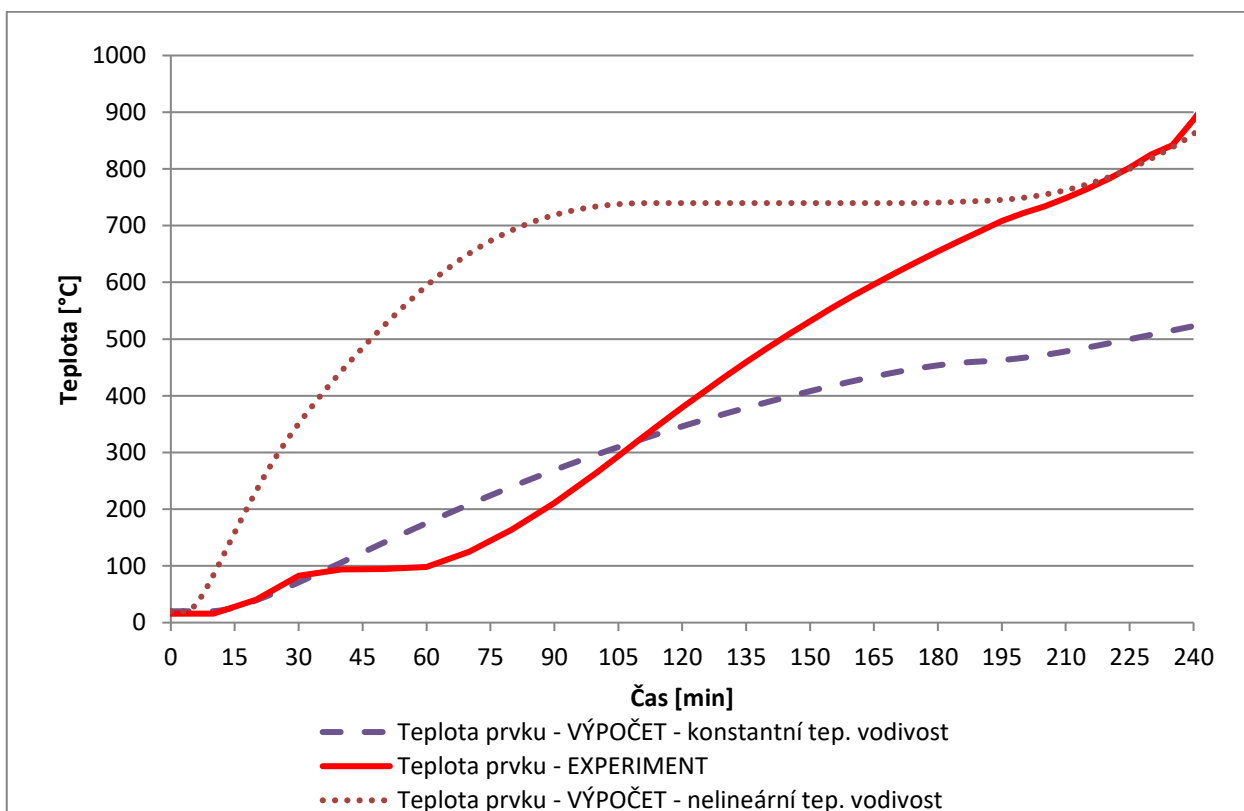
obr. 24 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - Z 50x100 pro požární obklad PROMATECT H 25 mm



obr. 25 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - Z 50x100 pro požární obklad PROMATECT H 38,8 mm



obr. 26 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - Z 50x100 pro požární obklad PROMATECT L 39,4 mm



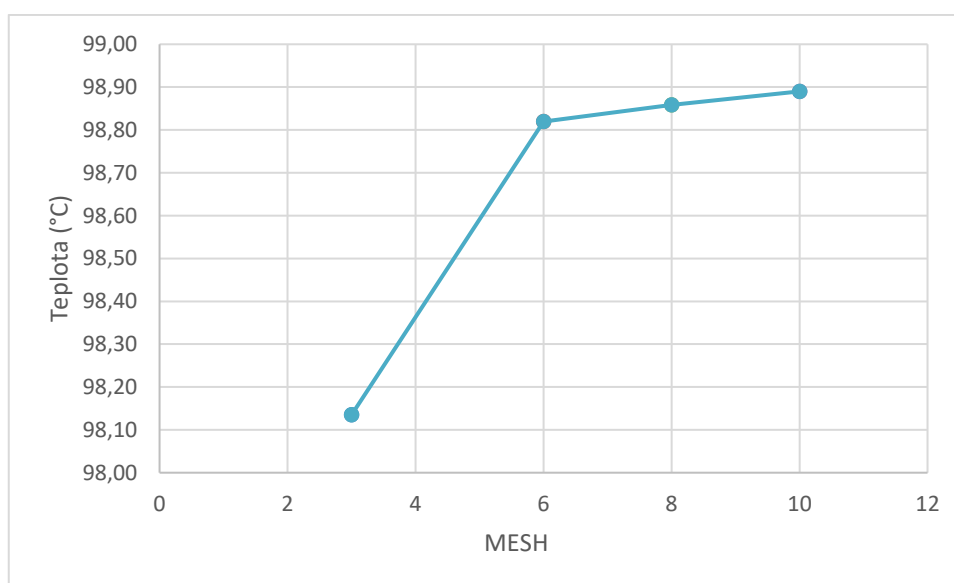
obr. 27 Porovnání výpočtu s požární zkouškou - Z 50x100 pro požární obklad PROMATECT L 59,3 mm

4.3 Metoda konečných prvků

Výpočet pomocí metody konečných prvků probíhal pomocí programu ANSYS 17.2. Studie byla provedena na prvcích HEM 280, Z50x100x5 a IPE 400. Nejdříve byly tyto prvky vymodelovány včetně ochranných desek PROMATECT H a L o jednotlivých tloušťkách. Jako prvek byl zvolen SOLID 70, který umožňuje také řešit prostorové úlohy. Má osm uzlů s jedním neznámým parametrem, a teplotou v každém uzlu. Poté byla do každé plochy umístěna síť s body, která ji rozděluje na menší části. Nejdříve byla vytvořena hrubá síť a následně jemnější. Pro HEM 280 ochráněný deskami PROMATECT H o tloušťce 25 mm byla vytvořena studie citlivosti znázorněna v tab. 4 a grafu č. 28. Byly odzkoušeny varianty 3,6,8 a 10 prvků po tloušťce ochranné desky. [21]

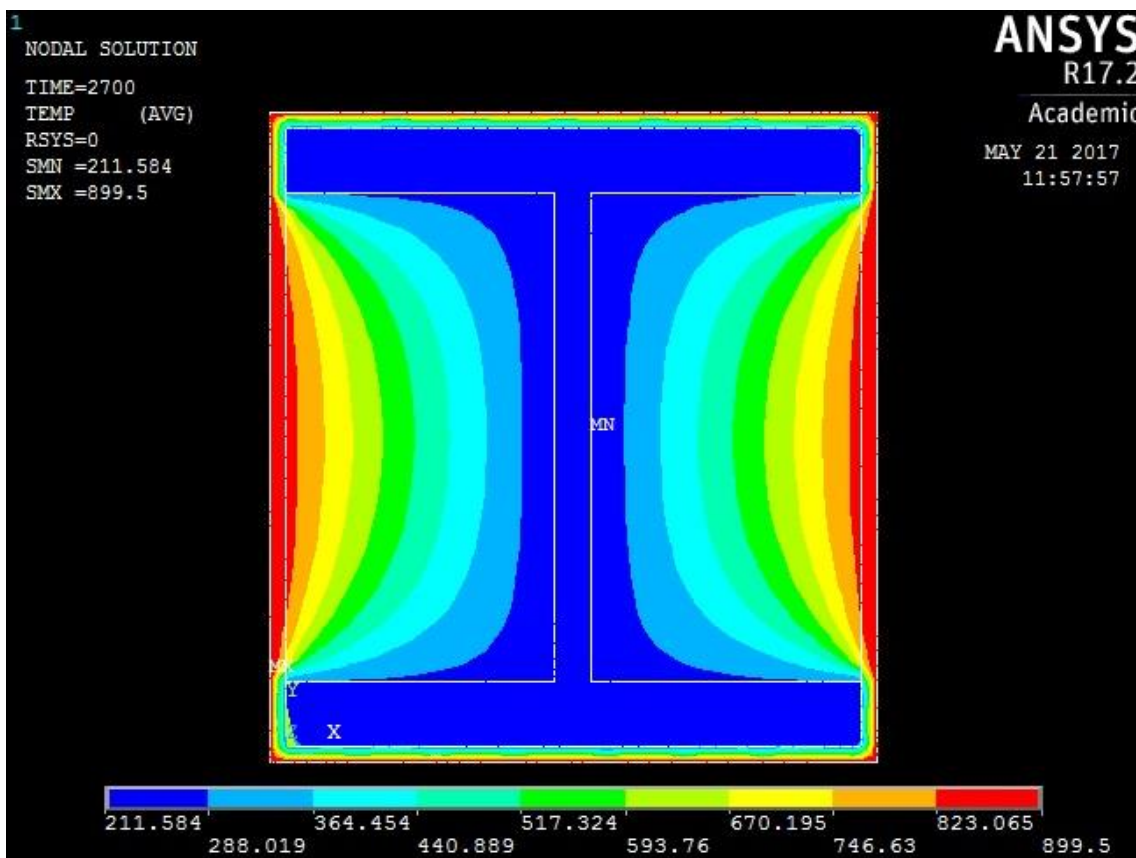
tab. 4 Teplota na povrchu prvku v závislosti na hustotě sítě

Čas [min]	Teplota v dané síti [°C]			
	MESH 3	MESH 6	MESH 8	MESH 10
1	20,09	20,00	20,00	20,00
15	28,57	28,47	28,46	28,45
30	59,90	60,36	60,30	60,28
45	98,13	98,85	98,86	98,87
60	141,41	142,07	142,35	142,41
90	226,63	226,86	227,19	227,22
120	309,58	309,46	309,48	309,49

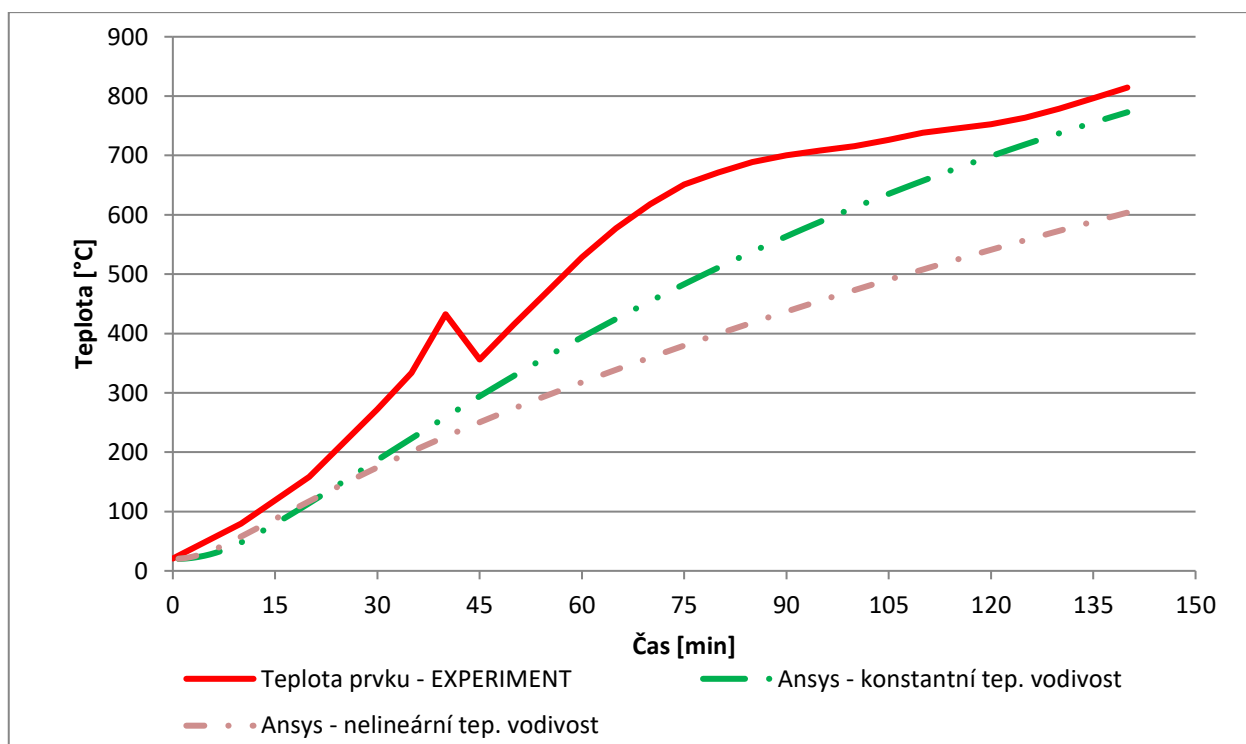


obr. 28 Studie citlivosti při teplotě v čase 45 min

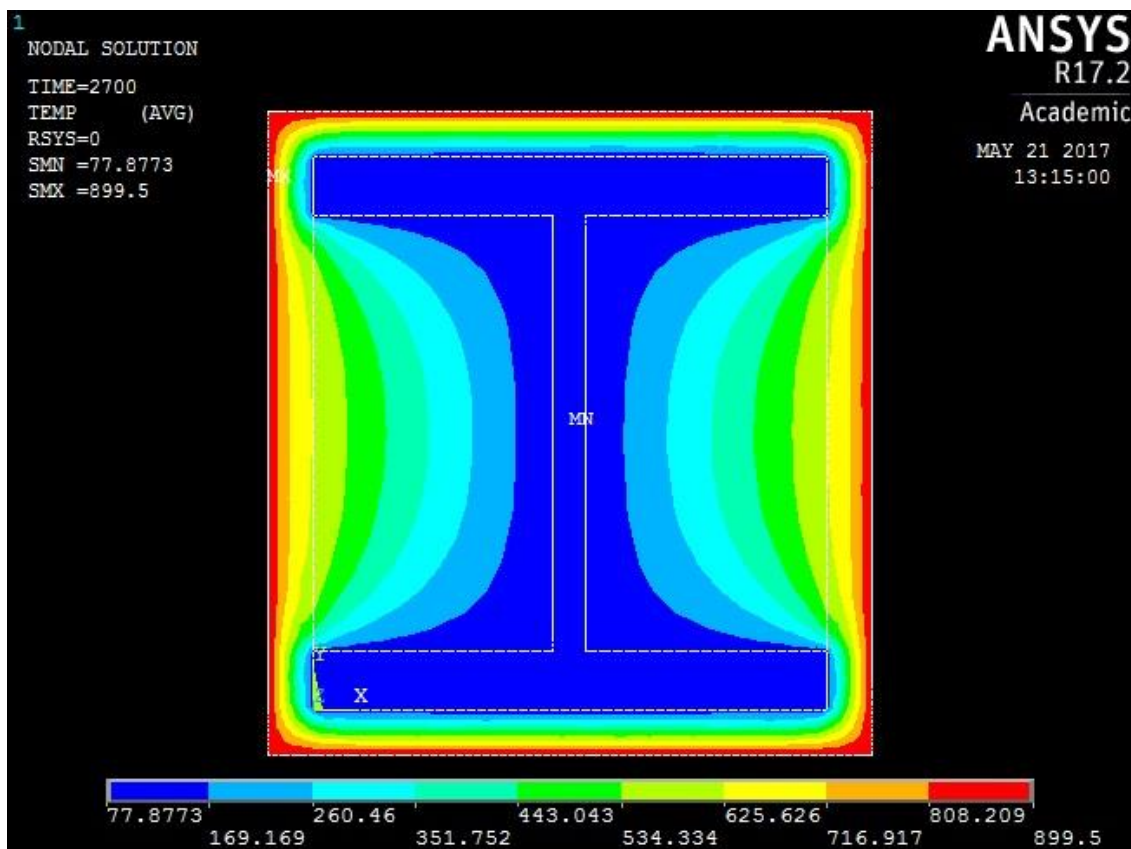
Dle studie citlivosti byly všechny prvky vypočítány pro 10 prvků po tloušťce ochranné desky.



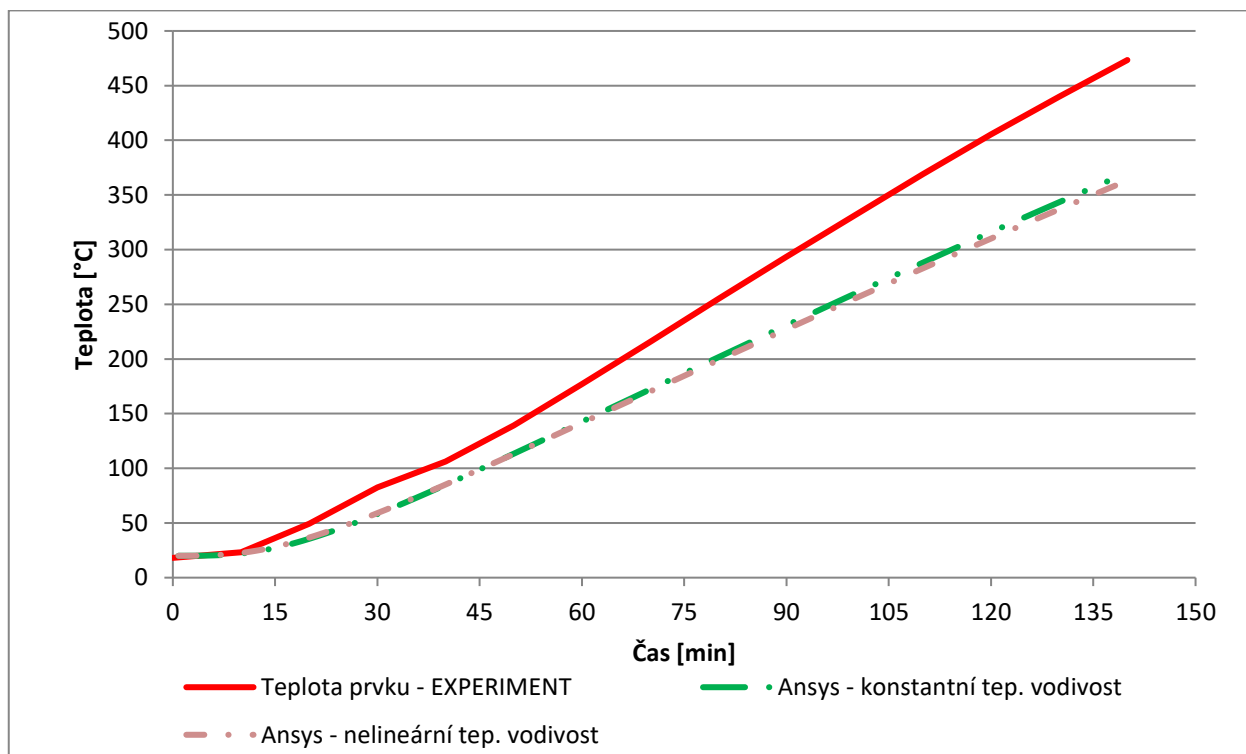
obr. 29 Rozložení teploty v čase 45 min prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 7,6 mm



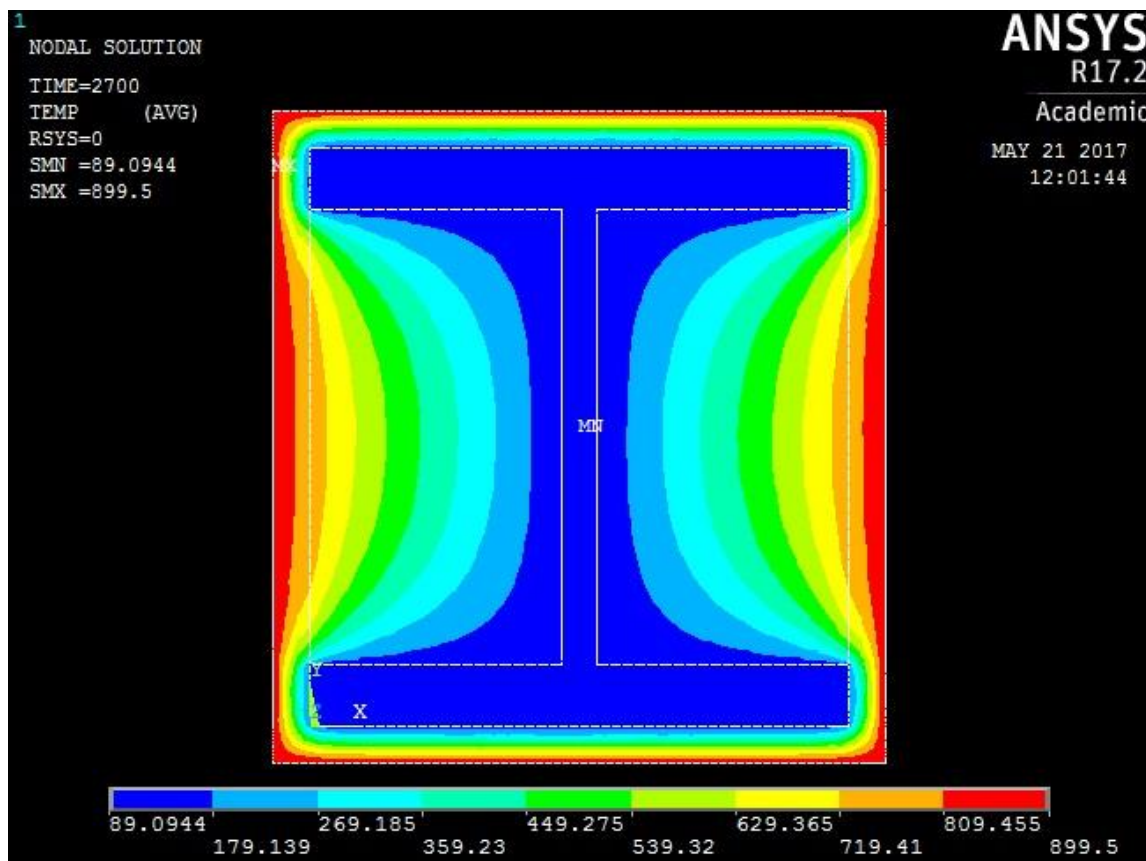
obr. 30 Průběh teploty v závislosti na čase prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 7,6 mm



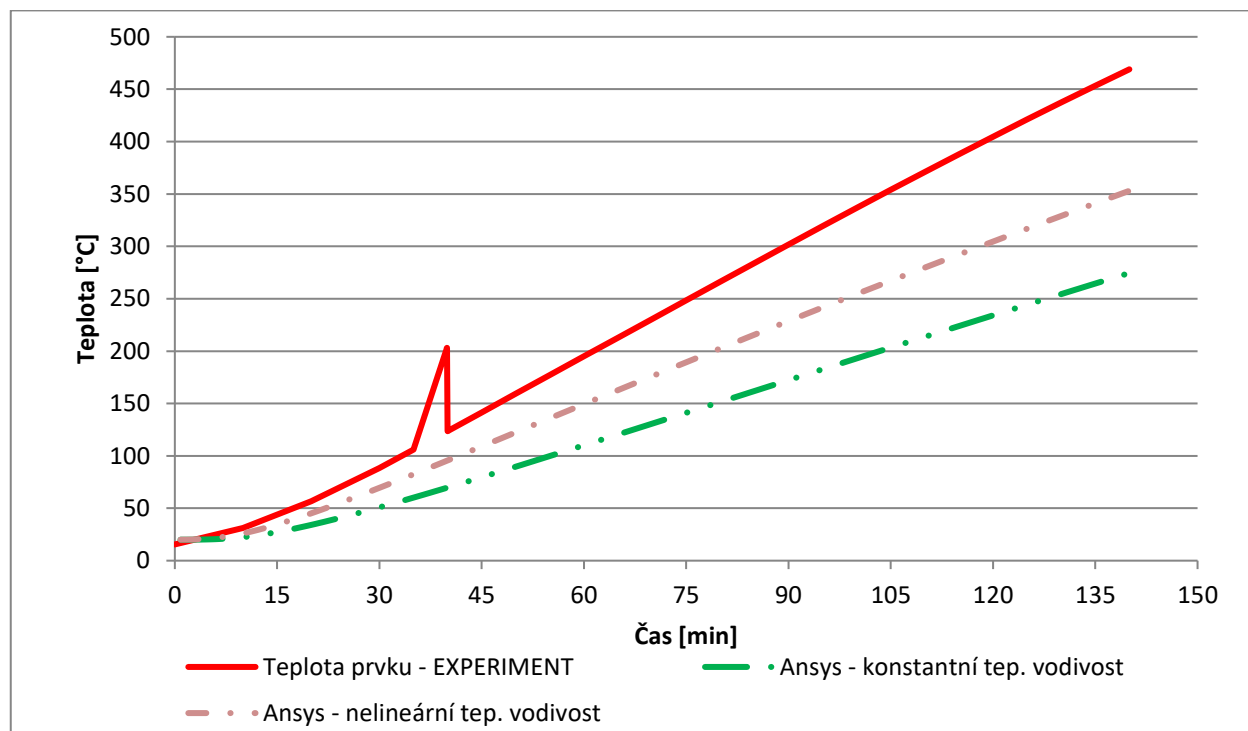
obr. 31 Rozložení teploty v čase 45 min prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 25 mm



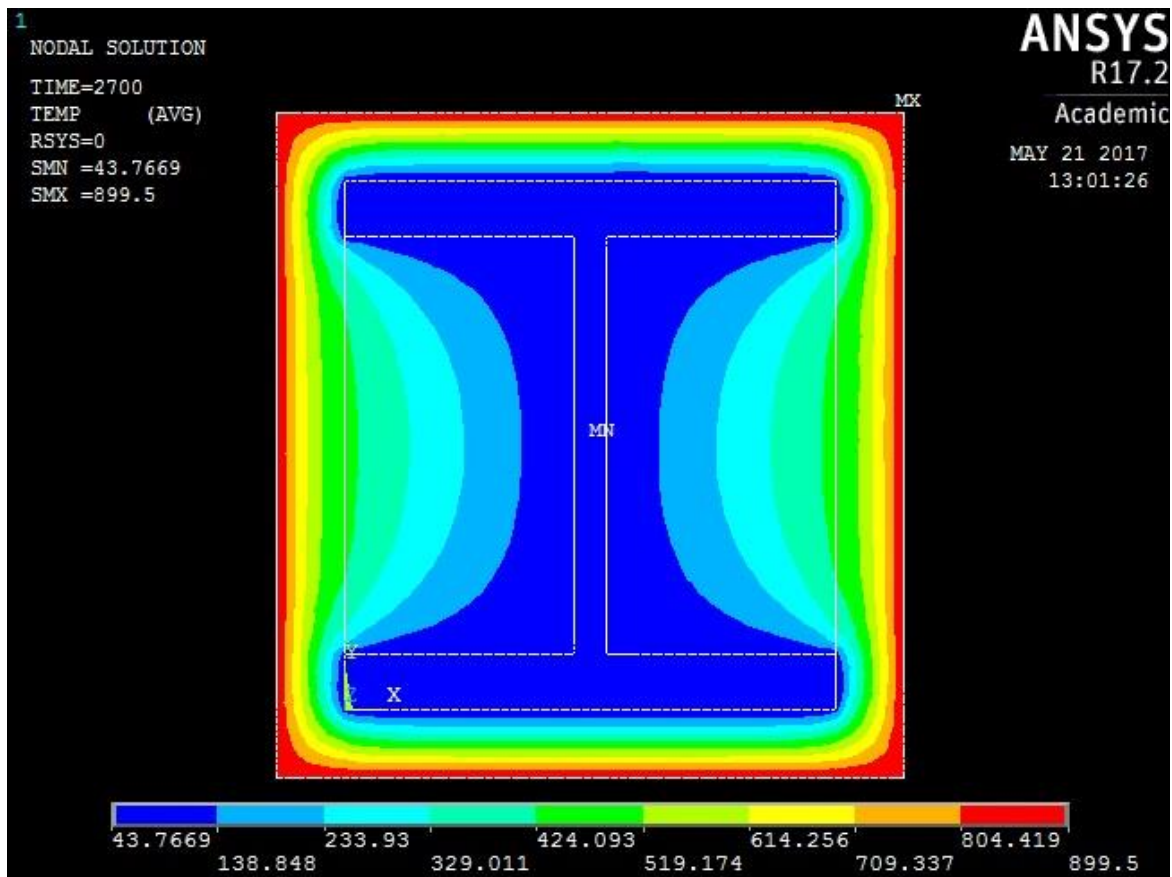
obr. 32 Průběh teploty v závislosti na čase prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 25 mm



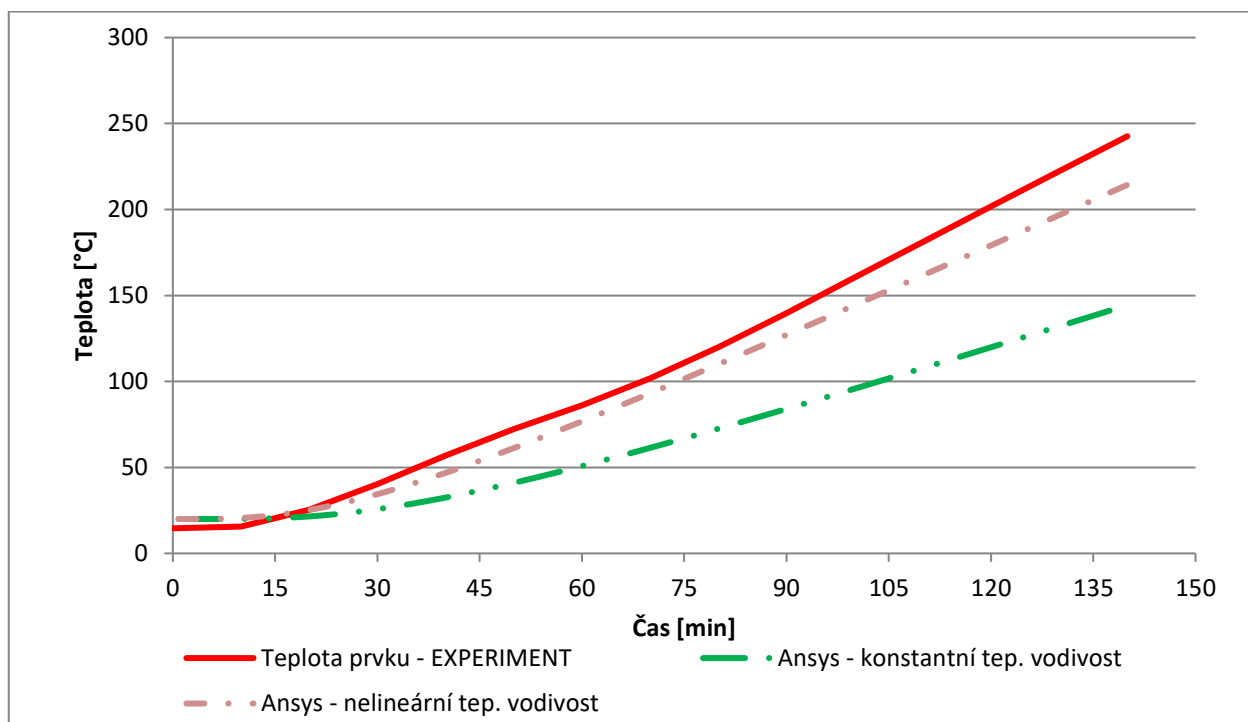
obr. 33 Rozložení teploty v čase 45 min prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 19,7 mm



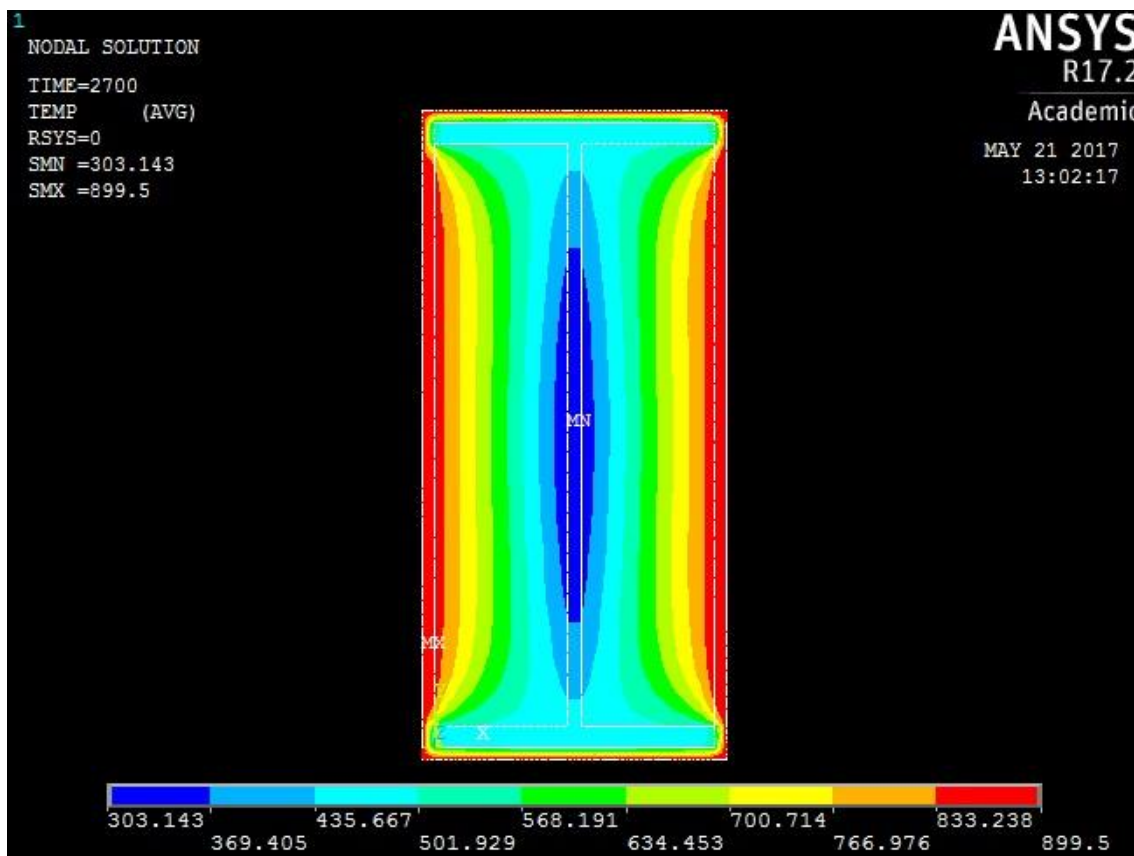
obr. 34 Průběh teploty v závislosti na čase prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 19,7 mm



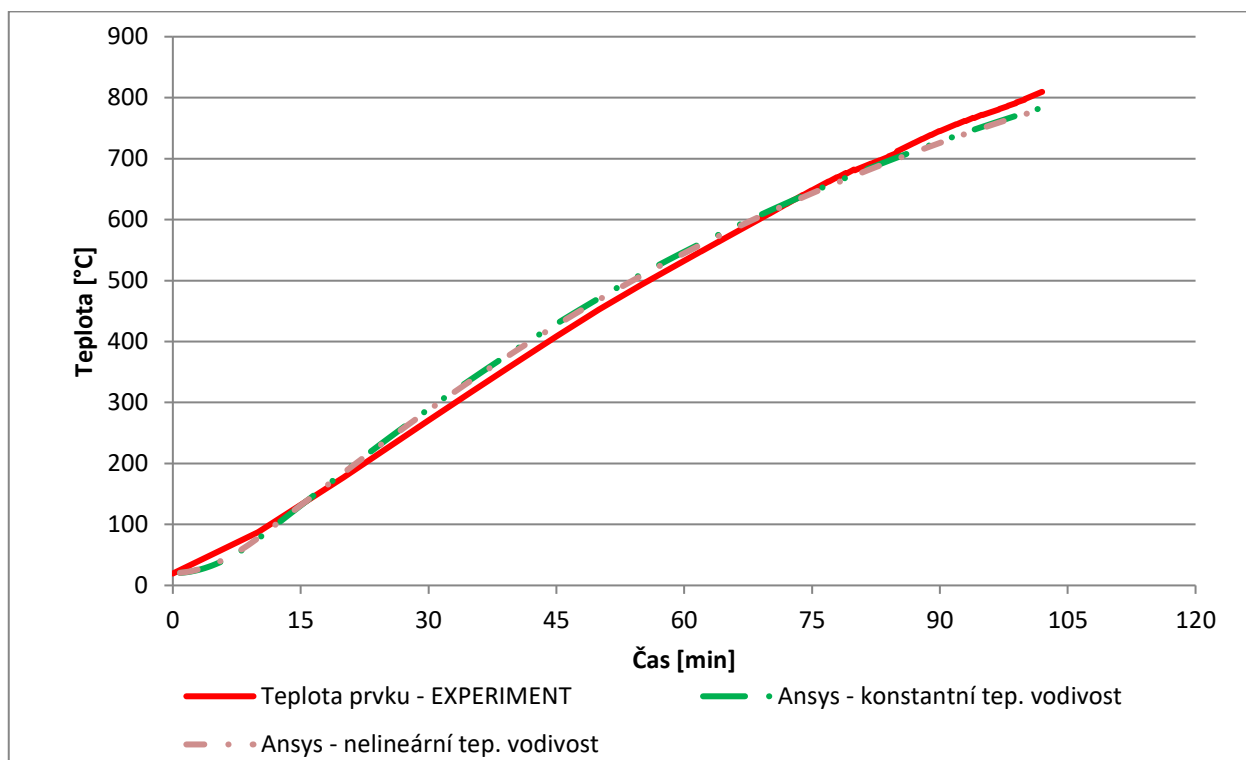
obr. 35 Rozložení teploty v čase 45 min prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 39,4 mm



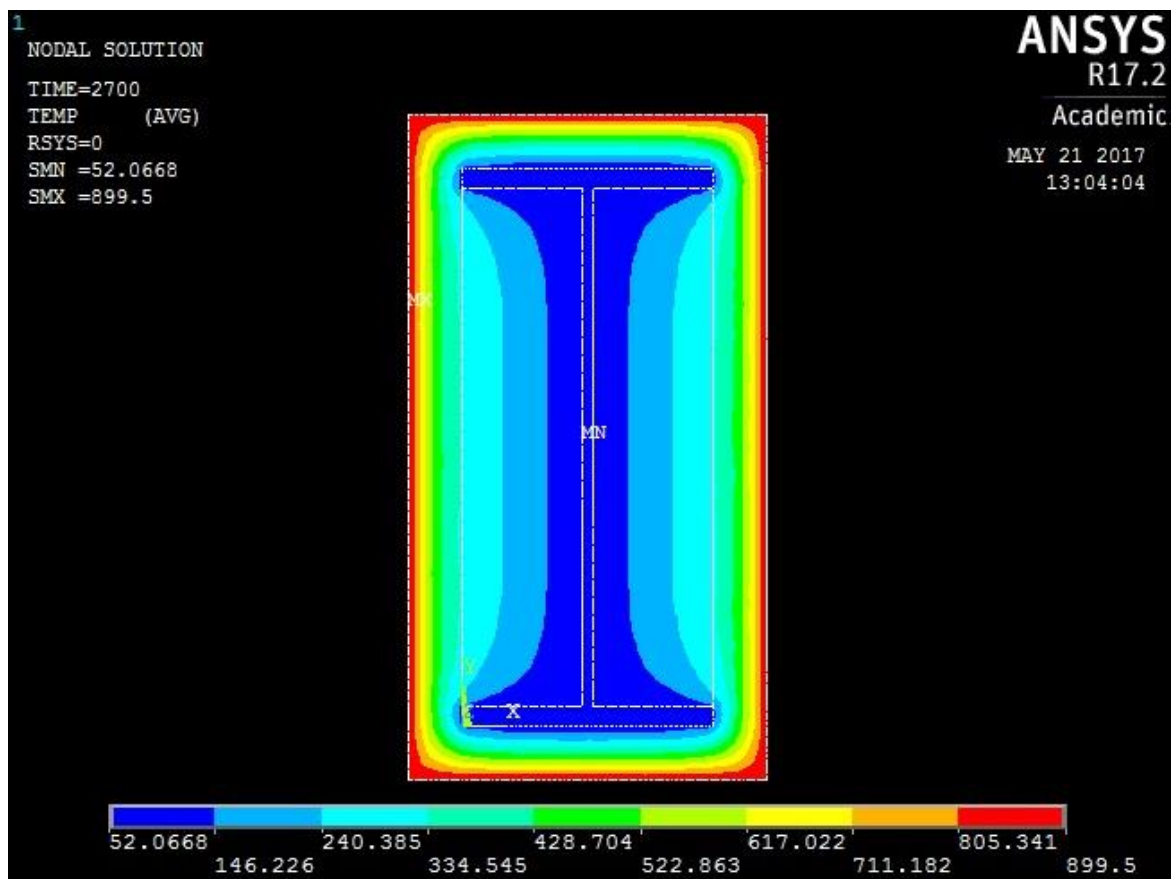
obr. 36 Průběh teploty v závislosti na čase prvku HEM 280 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 39,4 mm



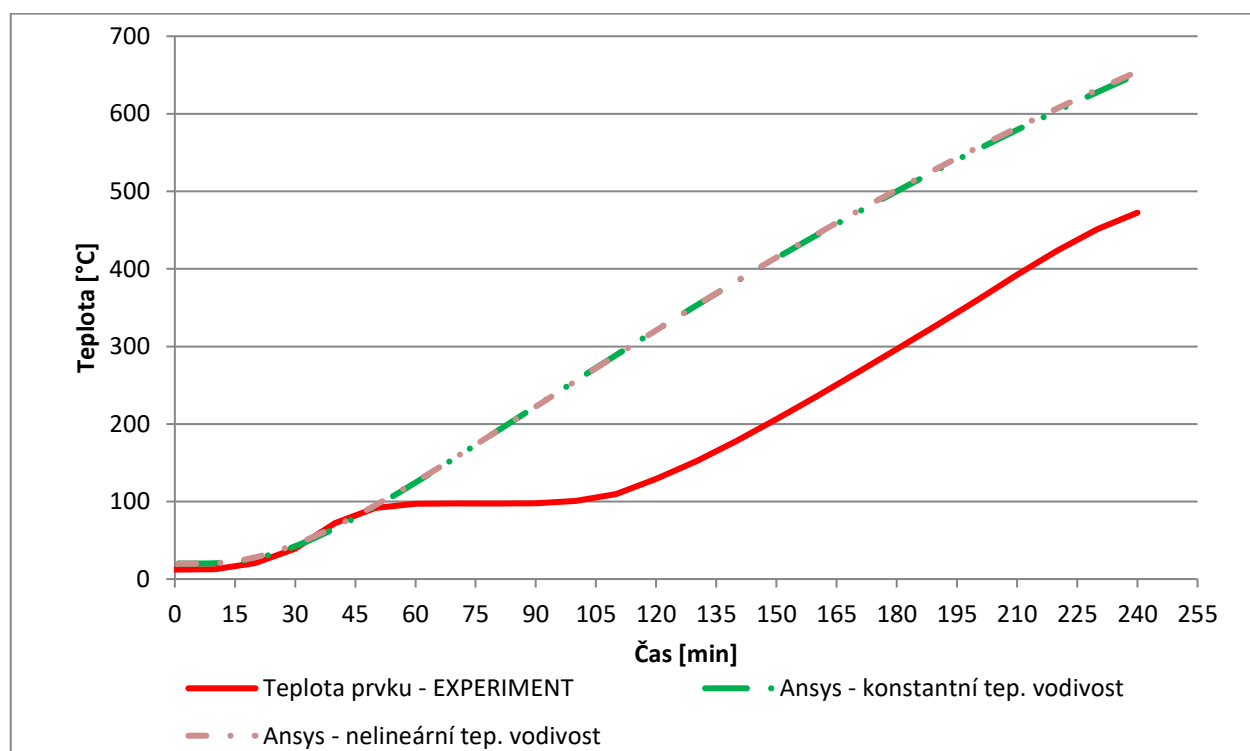
obr. 37 Rozložení teploty v čase 45 min prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 7,6 mm



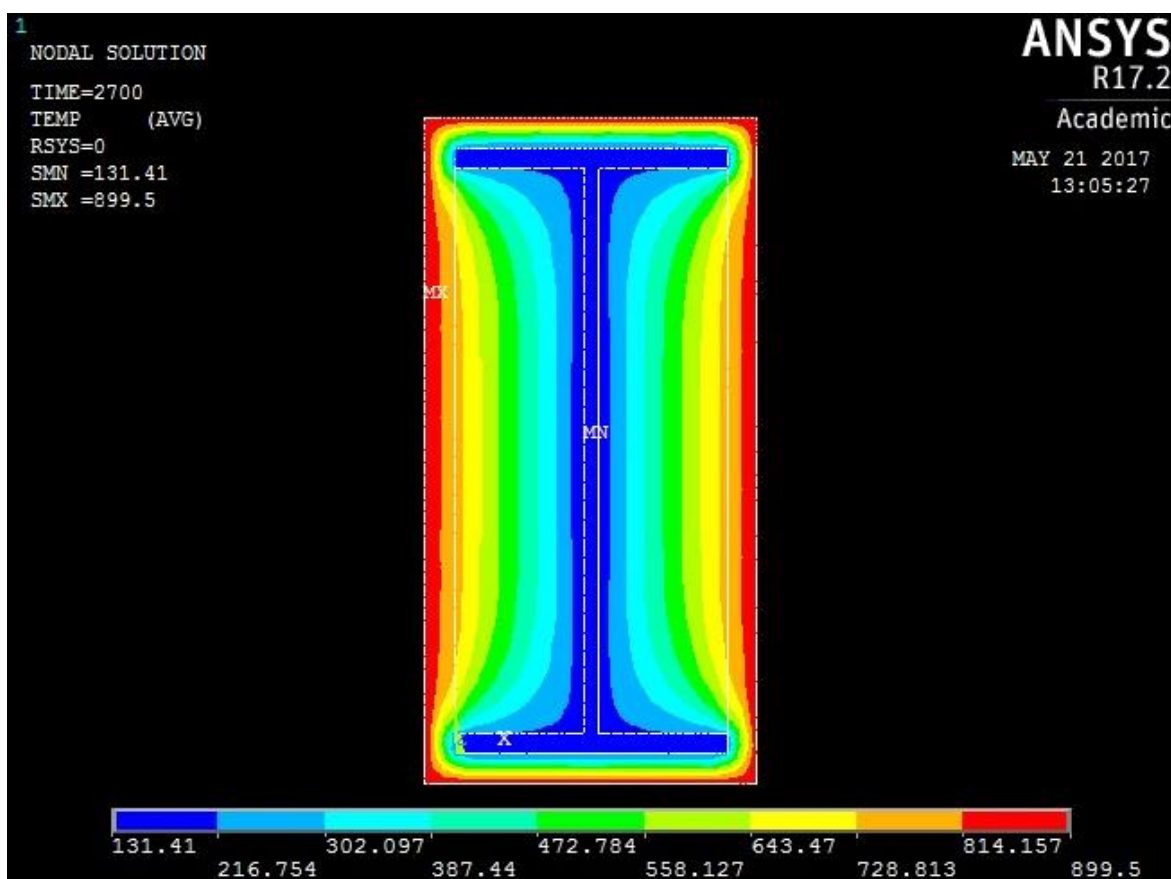
obr. 38 Průběh teploty v závislosti na čase prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 7,6 mm



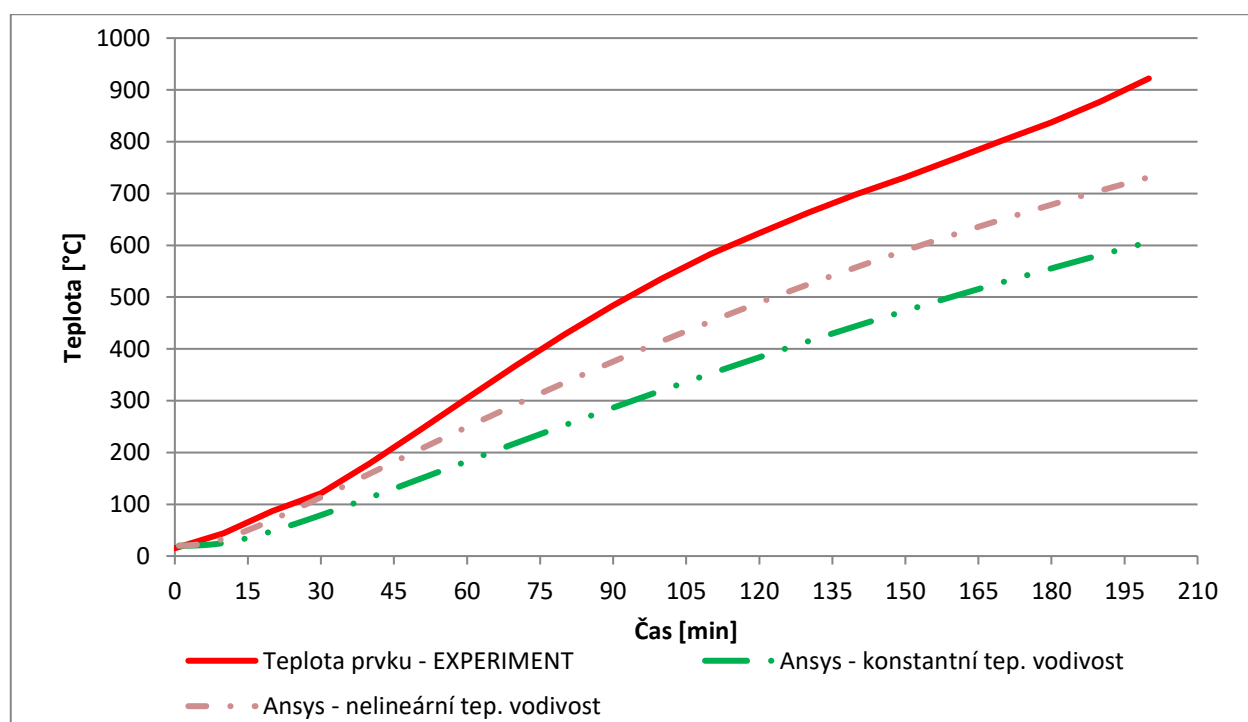
obr. 39 Rozložení teploty v čase 45 min prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 38,8 mm



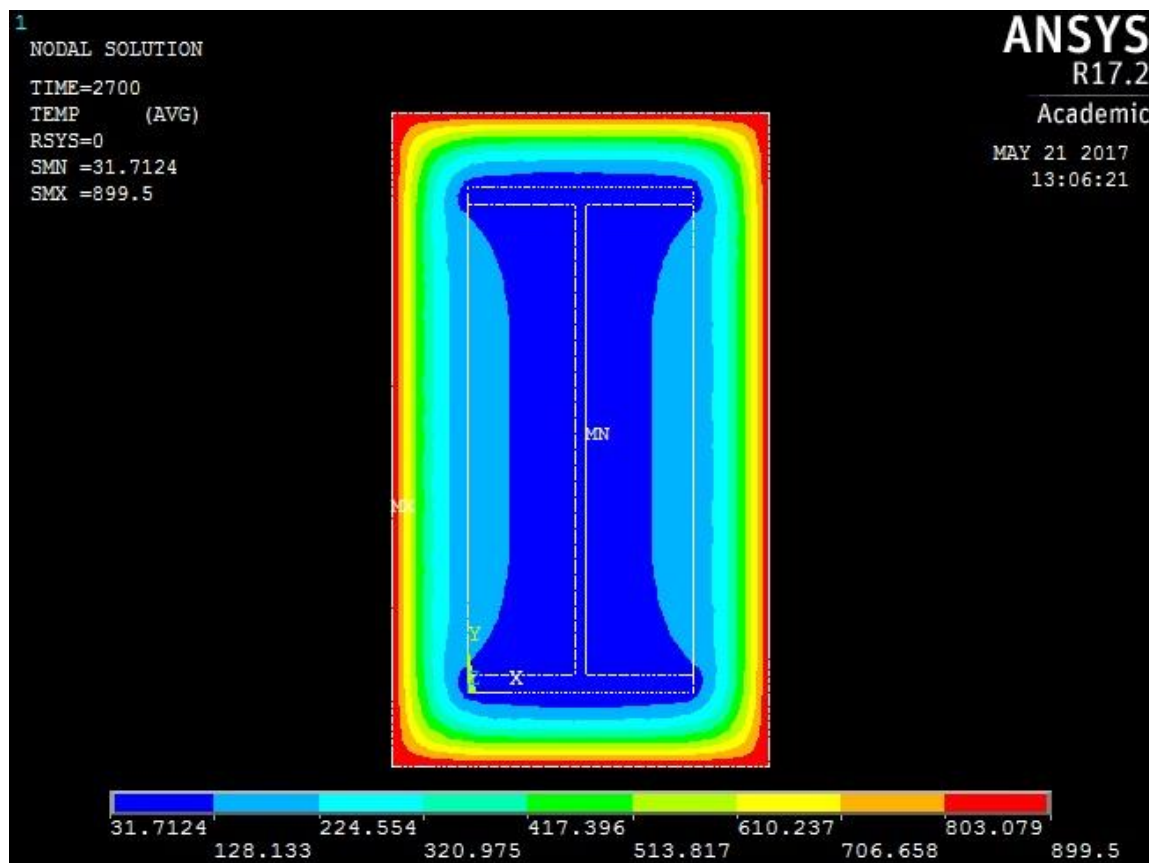
obr. 40 Průběh teploty v závislosti na čase prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 38,8 mm



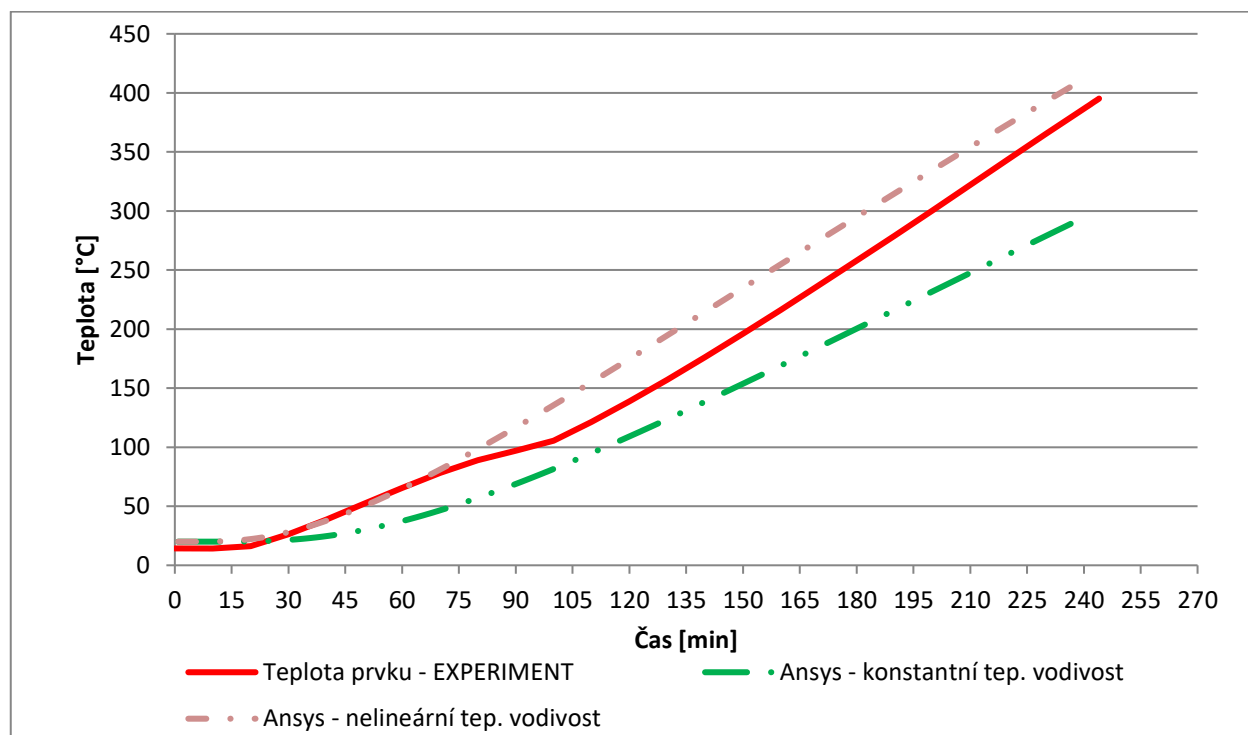
obr. 41 Rozložení teploty v čase 45 min prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 19,7 mm



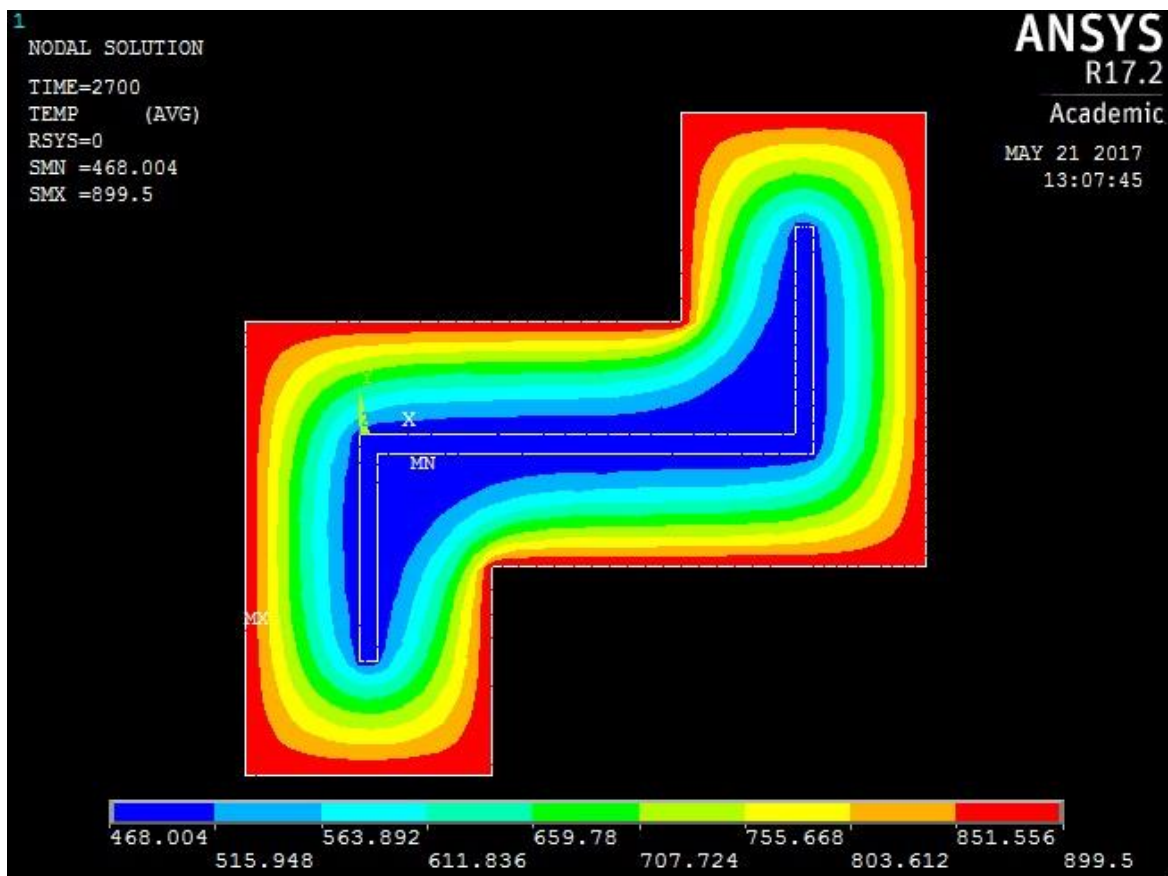
obr. 42 Průběh teploty v závislosti na čase prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 19,7 mm



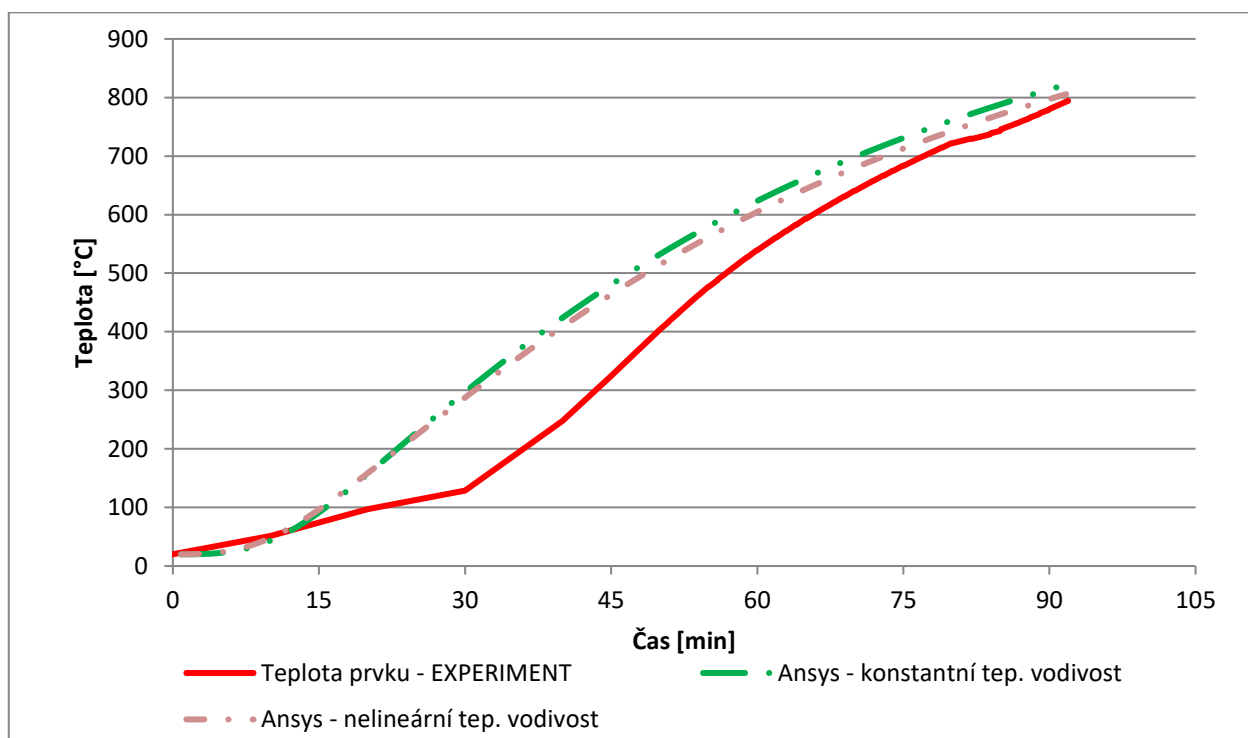
obr. 43 Rozložení teploty v čase 45 min prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 59,3 mm



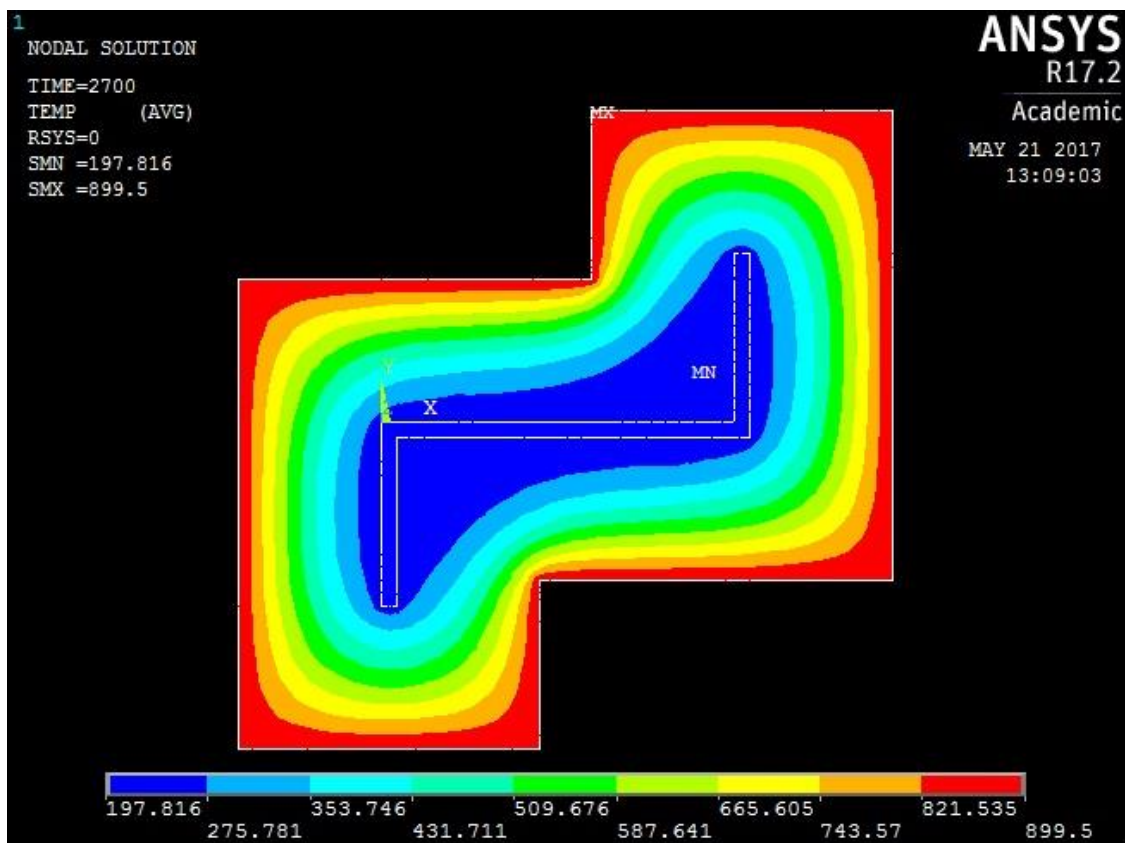
obr. 44 Průběh teploty v závislosti na čase prvku IPE 400 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 59,3 mm



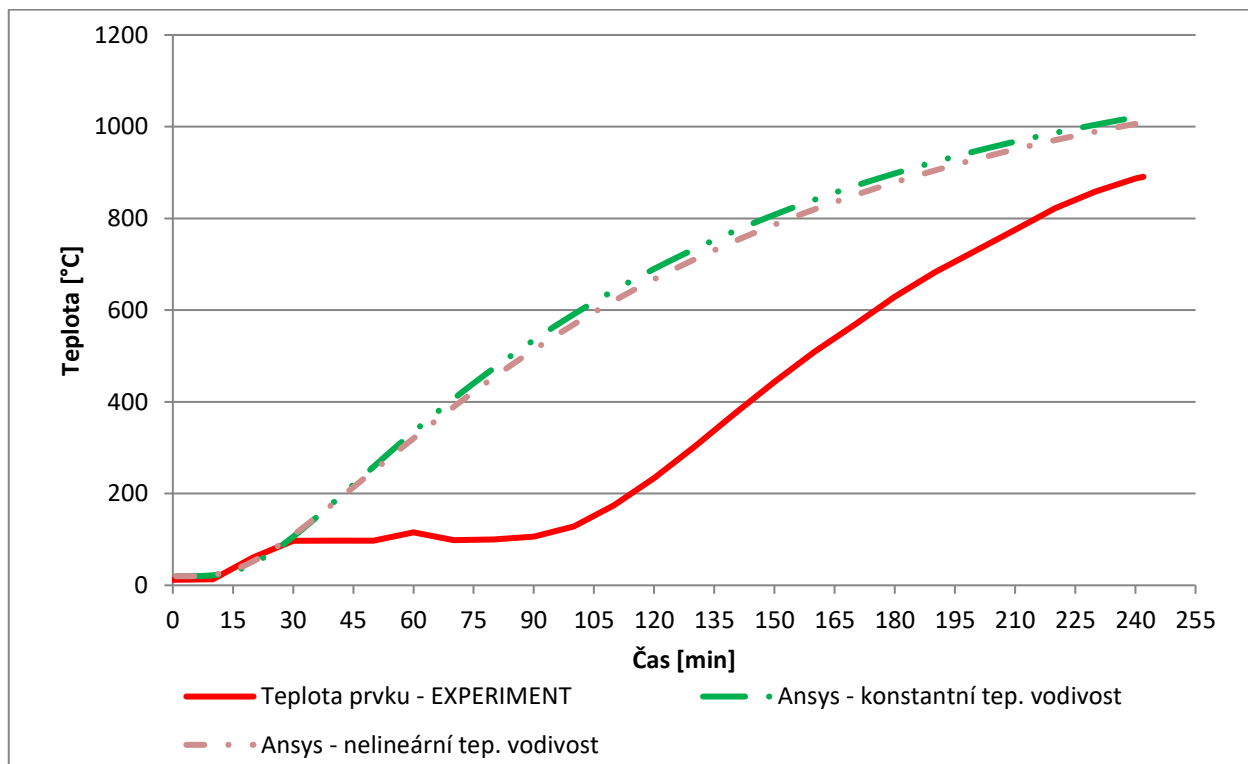
obr. 45 Rozložení teploty v čase 45 min prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 25 mm



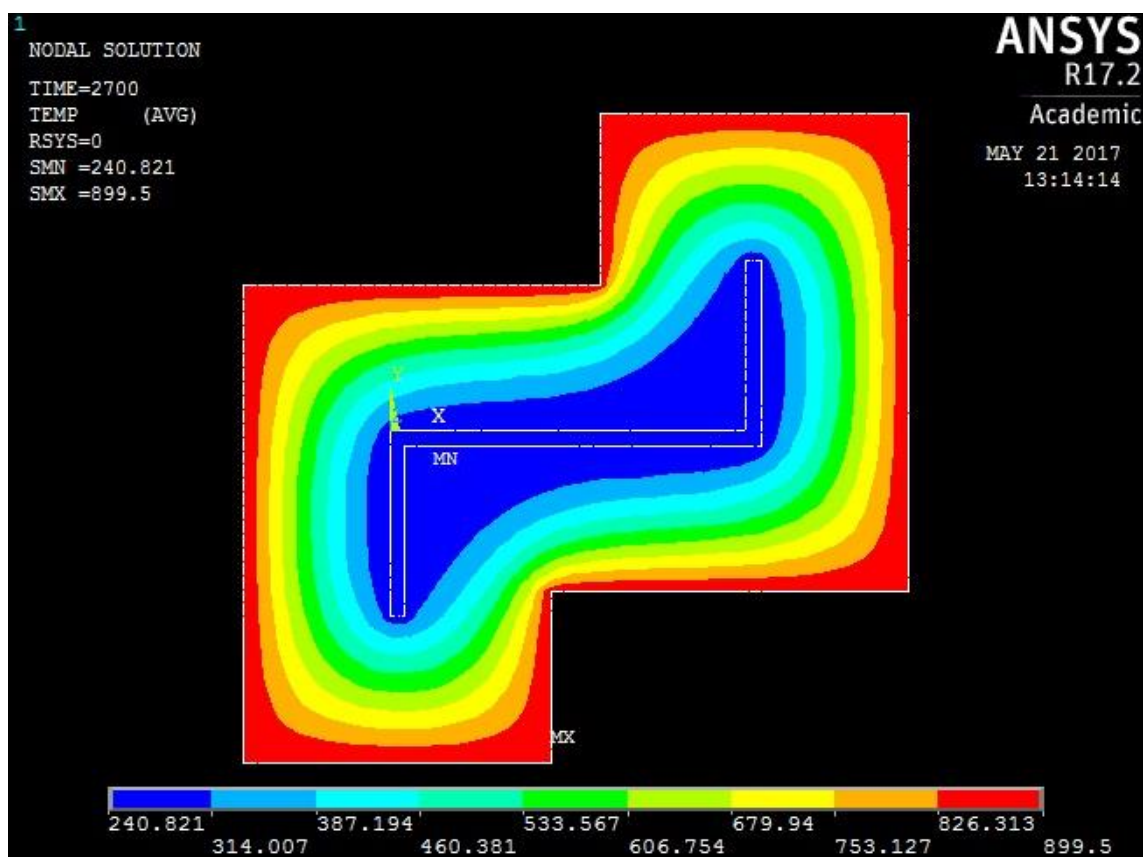
obr. 46 Průběh teploty v závislosti na čase prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 25 mm



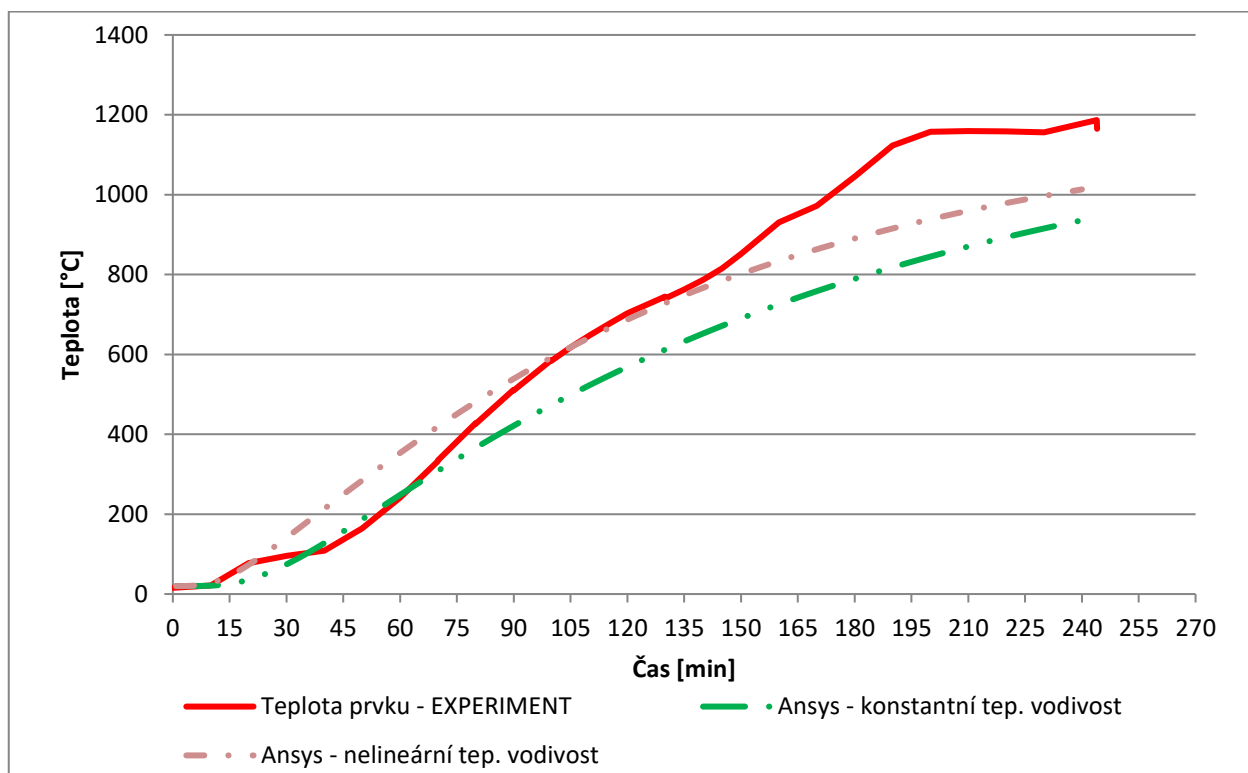
obr. 47 Rozložení teploty v čase 45 min prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 38,8 mm



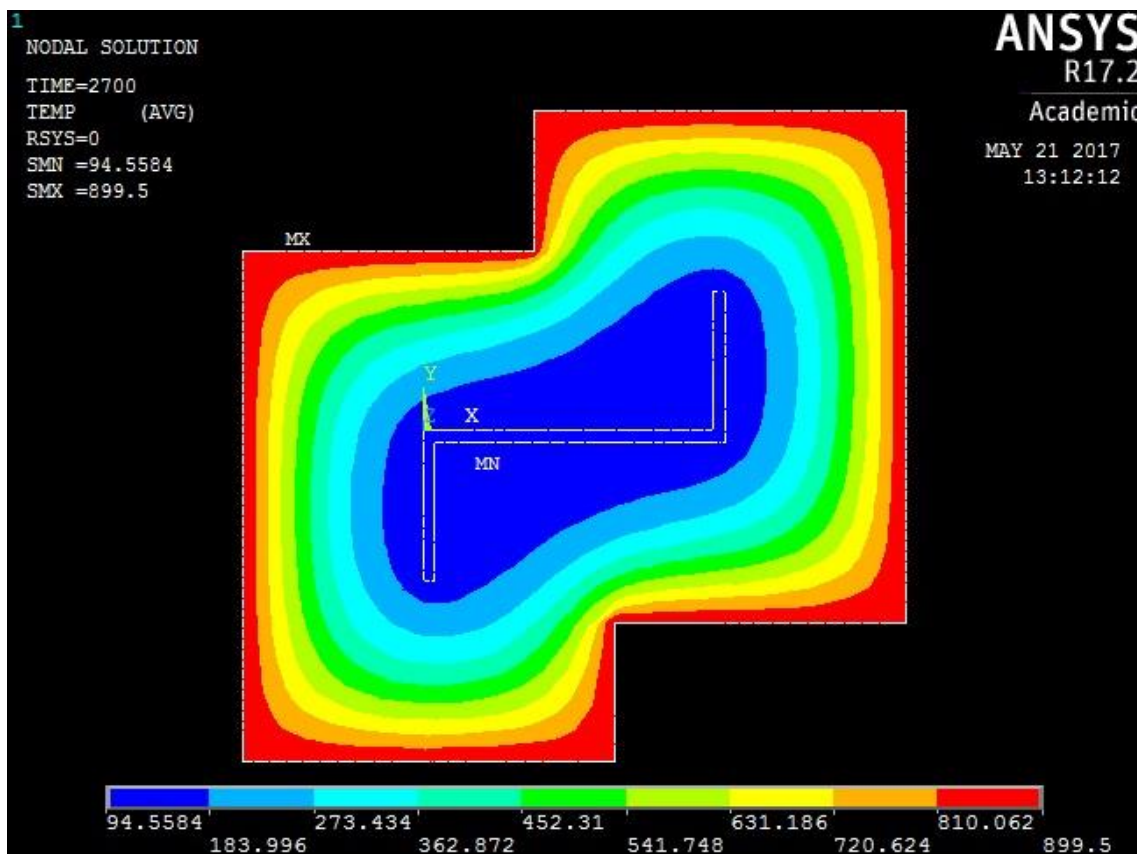
obr. 48 Průběh teploty v závislosti na čase prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 38,8 mm



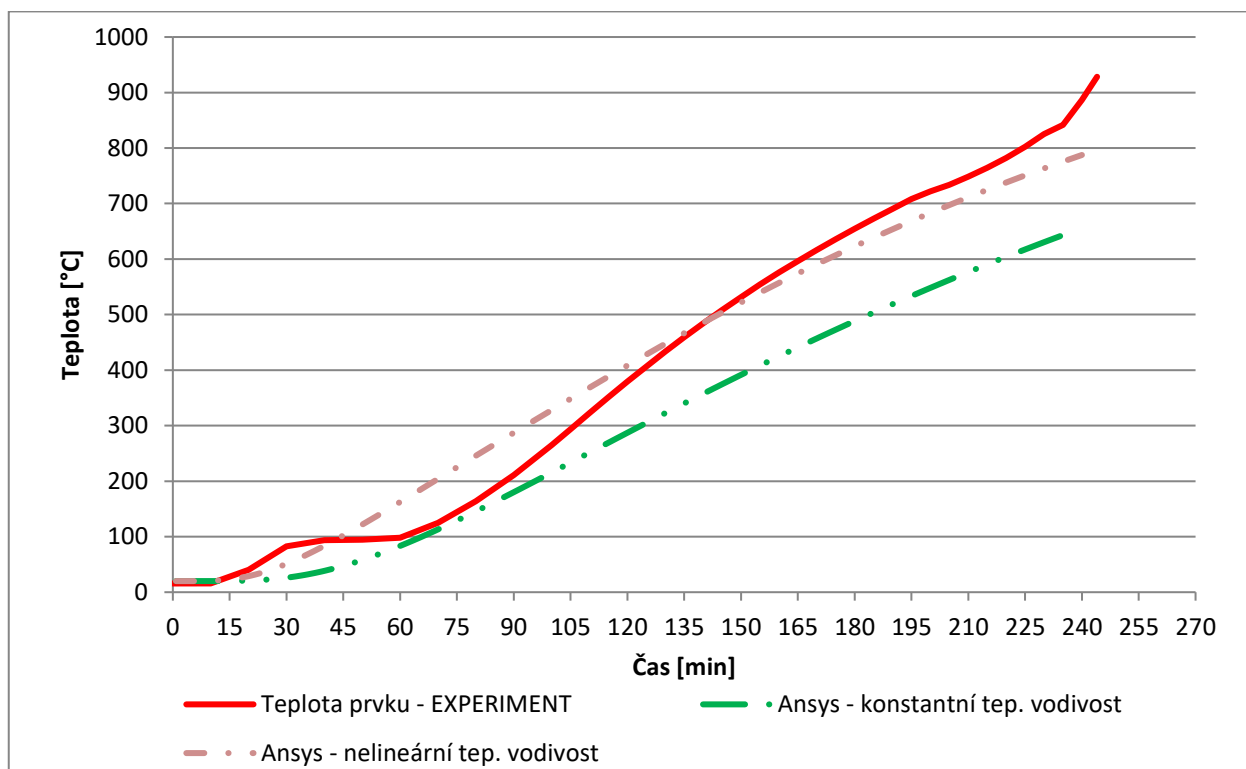
obr. 49 Rozložení teploty v čase 45 min prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 39,4 mm



obr. 50 Průběh teploty v závislosti na čase prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 39,4 mm



obr. 51 Rozložení teploty v čase 45 min prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 59,3 mm



obr. 52 Průběh teploty v závislosti na čase prvku Zx100x50 obloženým požárně ochrannými deskami PROMATECT L o tloušťce 59,3 mm

V tab. 5 – 16 jsou porovnány výsledky z výpočtu pomocí přírůstkové analytické metody a metody konečných prvků s požárními zkouškami pro jednotlivé požární odolnosti a požárně ochranné materiály.

tab. 5 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek HEM 280 – konstantní tepelná vodivost

HEM 280 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 7,6 mm			PROMATECT H tl. 25 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	145,81	80,88	119,00	55,44	27,49	36,25
30	277,36	184,34	272,40	94,90	57,28	82,50
45	390,07	293,94	356,10	128,88	98,82	122,70
60	484,15	395,36	528,40	157,30	143,47	177,00
90	626,19	563,77	700,30	200,25	230,81	293,50
120	719,62	697,96	752,60	228,52	315,35	405,40
180				266,39	472,18	594,50

tab. 6 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek HEM 280 – konstantní tepelná vodivost

HEM 280 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L 19,7 tl. mm			PROMATECT L tl. 39,4 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	43,78	27,55	43,95	30,05	20,52	20,50
30	78,95	50,31	88,40	47,06	25,54	40,30
45	115,22	79,57	141,40	64,86	36,54	64,60
60	151,14	110,68	195,10	82,61	51,08	86,10
90	220,44	172,32	301,70	116,95	84,03	139,70
120	285,58	233,65	404,60	149,32	119,60	201,80
180	402,50	352,89	582,80	207,50	193,82	322,10

tab. 7 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek HEM 280 - nelineární tepelná vodivost

HEM 280 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 7,6 mm			PROMATECT tl. H 25 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	201,36	88,87	119,00	53,95	28,46	36,25
30	355,50	177,20	272,40	103,84	60,30	82,50
45	459,66	250,21	356,10	153,07	98,86	122,70
60	537,53	318,91	528,40	199,26	142,35	177,00
90	625,49	437,10	700,30	279,57	227,19	293,50
120	677,71	540,26	752,60	340,81	309,48	405,40
180				431,49	463,24	594,50

tab. 8 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek HEM 280 - nelineární tepelná vodivost

HEM 280 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L tl. 19,7 mm			PROMATECT L tl. 39,4 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	65,61	34,98	43,95	36,04	22,40	20,50
30	126,82	70,84	88,40	64,77	35,02	40,30
45	187,49	108,93	141,40	95,28	53,82	64,60
60	245,57	150,11	195,10	125,97	77,23	86,10
90	352,03	228,74	301,70	186,02	127,09	139,70
120	445,34	303,99	404,60	243,24	178,77	201,80
180	595,26	445,23	582,80	346,97	284,42	322,10

tab. 9 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek IPE 400 – konstantní tepelná vodivost

IPE 400 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 7,6 mm			PROMATECT H tl. 38,8 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	102,78	133,32	132,10	28,00	22,42	16,65
30	196,83	294,37	270,70	52,37	43,46	39,20
45	283,55	428,75	408,40	69,14	79,14	82,00
60	361,81	549,15	532,50	84,33	125,27	97,10
90	493,38	728,01	745,10	109,91	222,87	97,70
120				129,84	320,26	129,20
180				155,68	500,47	296,50

tab. 10 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek IPE 400 – konstantní tepelná vodivost

IPE 400 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L tl. 19,7 mm			PROMATECT L tl. 59,3 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	35,00	35,52	65,40	23,61	20,05	15,20
30	57,70	80,72	121,20	30,67	21,61	26,30
45	81,69	130,09	210,00	38,37	27,08	45,45
60	105,94	184,00	304,80	46,24	37,63	65,50
90	153,94	286,50	483,90	61,93	68,88	97,00
120	200,48	383,00	623,40	77,21	108,77	138,80
180	288,11	555,76	837,30	106,08	200,56	258,00

tab. 11 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek IPE 400 - nelineární tepelná vodivost

IPE 400 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 7,6 mm			PROMATECT H tl. 38,8 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	201,22	133,69	132,10	28,00	23,29	16,65
30	374,22	292,61	270,70	45,28	45,70	39,20
45	510,39	426,43	408,40	64,03	81,07	82,00
60	615,83	546,80	532,50	83,02	126,24	97,10
90	759,37	725,89	745,10	119,76	222,51	97,70
120				153,35	320,00	129,20
180				206,05	502,32	296,50

tab. 12 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek IPE 400 - nelineární tepelná vodivost

IPE 400 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L tl. 19,7 mm			PROMATECT L tl. 59,3 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	85,04	50,85	65,40	29,32	20,78	15,20
30	166,90	115,88	121,20	48,42	28,54	26,30
45	246,48	181,62	210,00	69,46	43,64	45,45
60	321,50	250,34	304,80	91,10	65,28	65,50
90	457,85	375,51	483,90	134,54	116,74	97,00
120	578,52	488,42	623,40	177,17	174,27	138,80
180	778,92	678,70	837,30	258,67	295,19	258,00

tab. 13 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek Zx100x50 - konstantní tepelná vodivost

Z 50x100 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 25 mm			PROMATECT H tl. 38,8 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	141,33	94,14	74,20	75,98	30,78	37,00
30	333,70	304,04	128,80	189,74	109,68	97,10
45	489,27	480,00	324,60	284,80	219,03	97,35
60	607,42	625,60	539,10	357,80	336,66	115,50
90	741,41	813,87	780,30	441,28	534,79	106,20
120				518,82	688,91	233,90
180				618,70	898,33	629,30

tab. 14 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek Zx100x50 - konstantní tepelná vodivost

Z 50x100 - KONSTANTNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L tl. 39,4 mm			PROMATECT L tl. 59,3 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	43,46	25,87	49,45	26,89	20,20	28,05
30	123,07	76,74	95,60	70,99	26,55	82,60
45	209,23	156,61	136,60	123,54	47,31	94,10
60	292,01	249,96	241,50	175,41	84,11	98,10
90	438,94	421,63	509,90	268,97	180,18	210,90
120	558,73	567,85	703,00	346,04	286,33	379,40
180	724,76	794,59	1045,10	453,62	493,99	654,60

tab. 15 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek Zx100x50 - nelineární tepelná vodivost

Z 50x100 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT H tl. 25 mm			PROMATECT H tl. 38,8 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	265,91	99,05	74,20	40,40	33,93	37,00
30	521,75	294,15	128,80	142,45	112,96	97,10
45	683,64	463,20	324,60	253,62	213,64	97,35
60	780,37	606,85	539,10	354,71	322,24	115,50
90	860,71	797,32	780,30	492,38	513,52	106,20
120				633,87	666,24	233,90
180				861,29	883,50	629,30

tab. 16 Porovnání vypočtených a změřených teplot pro prvek Zx100x50 - nelineární tepelná vodivost

Z 50x100 - NELINEÁRNÍ TEPELNÁ VODIVOST						
t (min)	PROMATECT L tl. 39,4 mm			PROMATECT L tl. 59,3 mm		
	Teplota			Teplota		
	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška	Analytická M.	MKP	Pož. zkouška
15	108,04	46,82	49,45	33,80	23,27	28,05
30	267,90	144,85	95,60	113,16	52,55	82,60
45	409,89	249,16	136,60	205,93	102,13	94,10
60	528,69	355,18	241,50	296,45	163,55	98,10
90	706,62	539,24	509,90	457,20	287,21	210,90
120	825,59	686,13	703,00	587,01	407,43	379,40
180	959,80	894,98	1045,10	763,63	628,61	654,60

5 Dimenzační tabulka

5.1 Vstupní parametry

Vstupní parametry k vytvoření dimenzační tabulky pro požárně ochranný obklad PROMATECT 200 odolnosti EI 45 min byly přejaty z technických listů tohoto produktu a jsou vypsány v tab. 17.

tab. 17 Vstupní parametry pro PROMATECT 200 [22]

PROMATECT 200			
Měrná tep. Kapacita	$c_p =$	930	J / kg*K
Objemová hmotnost materiálu	$\rho_p =$	750	kg / m ³
Tepelná vodivost materiálu	$\lambda_p =$	0,189	Wm ⁻¹ K ⁻¹

Důležité pro vytvoření této tabulky byly tabulky vydané pro odolnost EI 30 min a EI 60 min (tab. 18 a 19). Dimenzační tabulky byly vytvořeny z výsledků požárních zkoušek v laboratoři firmy Efectis Nederland BV, Rijswijk v Holandsku konaných v březnu roku 2012 a též v březnu 2013.

tab. 18 Dimenzační tabulka požárně ochranného deskového materiálu PROMATECT 200 pro požární odolnost 30 min [23]

Design table 3 : fire resistance 30 minutes required protection thickness in mm									
Section factor m^{-1}	Critical steel temperatue °C								
	350	400	450	500	550	600	650	700	750
46	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
50	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
60	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
70	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
80	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
90	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
100	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
110	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
120	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
130	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
140	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
150	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
160	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
170	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
180	14,8	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
190	15,4	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
200	15,9	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
210	16,4	14,9	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
220	16,8	15,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
230	17,2	15,8	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
240	17,6	16,2	14,7	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
250	17,9	16,6	15,1	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
260	18,3	16,9	15,5	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
270	18,6	17,3	15,9	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
280	18,8	17,6	16,2	14,7	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
290	19,1	17,9	16,6	15	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
300	19,4	18,2	16,8	15,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
310	19,6	18,5	17,1	15,7	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3
320	19,8	18,7	17,4	16	14,7	14,3	14,3	14,3	14,3
330	20,1	18,9	17,7	16,2	15	14,3	14,3	14,3	14,3
340	20,2	19,1	17,9	16,5	15,3	14,3	14,3	14,3	14,3
350	20,4	19,4	18,2	16,7	15,5	14,3	14,3	14,3	14,3
360	20,5	19,6	18,4	17	15,8	14,3	14,3	14,3	14,3
370	20,7	19,7	18,6	17,2	16	14,6	14,3	14,3	14,3
378	20,8	19,9	18,7	17,4	16,2	14,8	14,3	14,3	14,3

tab. 19 Dimenzační tabulka požárně ochranného deskového materiálu PROMATECT 200 pro požární odolnost 60 min [23]

Design table 3 : fire resistance 60 minutes required protection thickness in mm									
Section factor m^{-1}	Critical steel temperature °C								
	350	400	450	500	550	600	650	700	750
46	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
50	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
60	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
70	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
80	16,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
90	18	15,8	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
100	19,4	17,2	15,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
110	20,7	18,6	16,5	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
120	21,7	19,8	17,7	15,6	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3
130	22,6	20,7	18,7	16,6	15,3	14,3	14,3	14,3	14,3
140	23,5	21,6	19,7	17,6	16,2	14,5	14,3	14,3	14,3
150	24,2	22,4	20,5	18,5	17,1	15,4	14,3	14,3	14,3
160	24,9	23,1	21,3	19,3	17,9	16,1	14,6	14,3	14,3
170	25,4	23,7	21,9	20	18,6	16,9	15,3	14,3	14,3
180	25,9	24,3	22,5	20,7	19,2	17,6	15,9	14,3	14,3
190	26,3	24,9	23,1	21,2	19,8	18,2	16,5	14,9	14,3
200	26,6	25,3	23,6	21,8	20,4	18,8	17,1	15,4	14,3
210	27	25,7	24,1	22,3	20,9	19,3	17,7	16	14,3
220	27,3	26,1	24,6	22,7	21,3	19,9	18,2	16,4	14,5
230	27,6	26,4	25,1	23,2	21,8	20,3	18,7	16,9	15
240	27,9	26,7	25,4	23,6	22,2	20,8	19,1	17,4	15,4
250	28,1	27	25,7	24	22,6	21,1	19,6	17,8	15,8
260	28,4	27,2	26	24,4	22,9	21,5	20	18,2	16,2
270	28,6	27,5	26,2	24,8	23,3	21,9	20,4	18,6	16,6
280	28,8	27,7	26,5	25,1	23,6	22,2	20,7	19	16,9
290	29	27,9	26,7	25,3	24	22,6	21	19,3	17,3
300	29,2	28,1	26,9	25,6	24,3	22,9	21,3	19,7	17,6
310	29,4	28,3	27,2	25,8	24,6	23,2	21,6	20	17,9
320	29,5	28,5	27,4	26	24,8	23,5	21,9	20,3	18,2
330	29,7	28,7	27,6	26,3	25,1	23,8	22,2	20,6	18,5
340	29,8	28,9	27,8	26,5	25,3	24	22,5	20,8	18,8
350	30	29	27,9	26,7	25,5	24,3	22,7	21,1	19,1
360	30,1	29,2	28,1	26,8	25,7	24,5	23	21,3	19,3
370	30,2	29,3	28,2	27	25,9	24,8	23,2	21,6	19,6
378	30,3	29,4	28,4	27,2	26	25	23,4	21,7	19,8

5.2 Výpočet

Od firmy Promat s.r.o. byly poskytnuty dimenzační tabulky deskového požárně ochranného materiálu PROMATECT 200. Dimenzační tabulky byly vytvořeny z výsledků požárních zkoušek v laboratoři firmy Efectis Nederland BV, Rijswijk v Holandsku konaných v březnu roku 2012 a též v březnu 2013. Zkoušky byly měřeny mimo Českou republiku a v tabulkách chybí návrh pro požární odolnost EI 45 min. Požární odolnost 45 min není běžně mimo Českou republiku používána.

V kapitole 2.2.2 je popsán vzorec přestupu tepla do konstrukce (4), který byl přepsán na

$$d_p = \left(\frac{\lambda_p^* A_p / V}{c_a^* \rho_a} * \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \Phi/3} * \Delta t \right) / (\Delta \theta_{a,t} + (e^{\Phi/10} - 1) * \Delta \theta_{g,t}), \quad (30)$$

tak aby bylo možné dopočítání požadované tloušťky ochranného materiálu v závislosti na součiniteli průřezu a kritické teplotě ocelového prvku.

Vstupní parametry pro výpočet byly brány z technického listu materiálu. Pouze tepelná vodivost byla zadána proměnná v závislosti na teplotě materiálu kalcium silikátu. Závislost byla stanovena dle vzorců:

$$\lambda^* = \lambda_0^* + CT^3 \quad (15)$$

$$\lambda_0^* = 0,211 \frac{\rho}{1000} \quad (26)$$

$$C = -0,081 \frac{(2540 - \rho)}{2540} \quad (27)$$

Hodnoty 0,211 a -0,081 byly zjištěny metodou nejmenších čtverců v kapitole 4.2 z materiálu PROMATECT H, který je svými vlastnostmi nejvíce podobný.

Tabulkovým procesorem bylo možno dopočítat jednotlivé hodnoty tloušťky ochranného materiálu pro součinitel průřezu Am/V . Výsledné hodnoty jsou zahrnuty v tab. 20.

tab. 20 Dimenzační tabulka požárně ochranného deskového materiálu PROMATECT 200 pro požární odolnost 45 min stanovena výpočtem

Design table 3 : fire resistance 45 minutes required protection thickness in mm									
Section factor m^{-1}	Critical steel temperature °C								
	350	400	450	500	550	600	650	700	750
46	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
50	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
60	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
70	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
80	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
90	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
100	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
110	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
120	15,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
130	16,4	15	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
140	17,3	15,9	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
150	18,2	16,8	15,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
160	19	17,6	16	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
170	19,9	18,3	16,8	15,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
180	20,6	19,1	17,4	15,8	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
190	21,4	19,7	18,1	16,4	14,6	14,3	14,3	14,3	14,3
200	22	20,4	18,7	17	15,2	14,3	14,3	14,3	14,3
210	22,7	21	19,3	17,5	15,7	14,3	14,3	14,3	14,3
220	23,3	21,6	19,9	18,1	16,2	14,3	14,3	14,3	14,3
230	23,9	22,2	20,4	18,6	16,7	14,7	14,3	14,3	14,3
240	24,4	22,7	20,9	19,1	17,1	15,1	14,3	14,3	14,3
250	25	23,2	21,4	19,5	17,6	15,5	14,3	14,3	14,3
260	25,4	23,7	21,9	20	18	15,9	14,3	14,3	14,3
270	25,9	24,1	22,3	20,4	18,4	16,3	14,3	14,3	14,3
280	26,4	24,6	22,7	20,8	18,8	16,6	14,3	14,3	14,3
290	26,7	25	23,1	21,2	19,1	17	14,7	14,3	14,3
300	27,2	25,4	23,5	21,5	19,5	17,3	15	14,3	14,3
310	27,5	25,7	23,9	21,9	19,8	17,6	15,3	14,3	14,3
320	27,9	26,1	24,2	22,2	20,1	17,9	15,6	14,3	14,3
330	28,2	26,4	24,5	22,5	20,5	18,2	15,9	14,3	14,3
340	28,5	26,7	24,8	22,9	20,7	18,5	16,1	14,3	14,3
350	28,9	27	25,1	23,1	21	18,8	16,4	14,3	14,3
360	29,1	27,3	25,4	23,4	21,3	19	16,6	14,3	14,3
370	29,4	27,6	25,7	23,7	21,5	19,3	16,9	14,3	14,3
378	29,6	27,7	25,8	23,8	21,7	19,4	17	14,4	14,3

6 Shrnutí

Ochranné materiály PROMATECT H a L se výrazně liší v tepelné vodivosti a objemové hmotnosti. Pro výpočet přestupu tepla je důležitější vlastností tepelná vodivost. Její řešení probíhalo pomocí konstantního a mocninného modelu, který je vhodný pro pokročilejší výpočet teploty.

Na základě studie byla stanovena rovnice nelineárního průběhu tepelné vodivosti pro výrobek PROMATECT H

$$y = 1,37 \cdot 10^{-7} * x^2 - 1,56 \cdot 10^{-4} * x + 0,1901$$

a pro PROMATECT L

$$y = 8,27 \cdot 10^{-7} * x^2 - 4,65 \cdot 10^{-4} * x + 0,1728.$$

Poté bylo možné provést validaci teplot vypočtených pomocí přírůstkové metody a metody konečných prvků s těmi z požárních zkoušek. Bylo zjištěno, že nejmenší rozdíl hodnot je u materiálu s horší tepelnou vodivostí (PROMATECT H) u silnějších desek. Desky o tloušťce 7,6 mm mají velké výkyvy oproti požárním zkouškám, jak při výpočtu přírůstkovou metodou, tak metodou konečných prvků. U ochranného obkladu PROMATECT H je také nejmenší rozdíl u vypočtených hodnot při zadání tepelné vodivosti jako konstantního a nelineárního průběhu. U materiálu PROMATECT L, který má lepší tepelnou vodivost je rozdíl výsledných teplot větší při zadávání tepelné vodivosti jako konstantního a nelineárního průběhu

Výsledné hodnoty vypočtené v programu ANSYS jsou blíže hodnotám z požární zkoušky při zadání tepelné vodivosti v nelineárním průběhu. Pro všechny prvky, kromě HEM 280 obloženého ochrannými deskami PROMATECT H o tloušťce 7,6 a 25 mm vycházeli průběhy teplot podobněji se zkouškami při zadání nelineárního průběhu tepelné vodivosti. Výpočty provedené metodou konečných prvků v programu ANSYS jsou dle výsledků přesnější než analytické modely. Dle stanovených hodnot je požární ochrana účinnější při použití obkladu PROMATECT L. U průběhu teplot prvku Z 50x100 z požární zkoušky byl počáteční nárůst teploty velmi pozvolný. Ani jeden z modelů nebyl tak dokonalý, aby tento jev vystihl. Výsledky z numerického modelu byly však o něco přesnější než z analytického modelu.

Po porovnání výsledků je možné doporučit tento postup výpočtu i pro jiné požárně ochranné materiály. Konstantní model tepelné vodivosti se však po vyhodnocení nedoporučuje. Hodnoty z požárních zkoušek lépe vystihuje nelineární regrese.

Po stanovení lineární regrese tepelné vodivosti ochranného obkladu, jí bylo možné použití pro sestavení dimenzační tabulky. Byla stanovena z obkladu PROMATECT H, protože ten je nejvíce podobný výrobku PROMATECT 200.

V příloze č. 1 je shrnut provedený experiment měření tepelné vodivosti požárně ochranných deskových materiálů. Bylo zjištěno, že tepelná vodivost výrobků PROMATECT H, L a 200 odpovídá s malou odchylkou hodnotám udávaným firmou Promat s.r.o. v technických listech produktů. Malé odchylky mohou být způsobeny jinými okrajovými podmínky i metodami zjišťování tepelné vodivosti.

6.1 Další otázky k problematice

Pro zlepšení výsledků by bylo možné stanovit všechny tepelné vlastnosti v nelineárním průběhu hodnot místo konstantních. V této práci byla jako nelineární zadána pouze tepelná vodivost.

Není zde započítán vliv vlhkosti, která je v modelování požární ochrany také důležitou vlastností. Ke zlepšení by též vedlo konkrétnější zadání okrajových podmínek ve výpočtech.

Bylo by také zajímavé pro validaci verifikovat výpočet v jiných programech jako je například SAFIR.

Další možností je zkalibrovat model na hodnotách tepelných vlastností změřených na vzorcích.

Literatura

1. WALD F. a kol. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. místo neznámé : Nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03157-8.
2. Eduard Vašátko. Protipožární nástřiky a obklady stavebních konstrukcí (1.). *www.seidl.cz*. [Online] 4. Listopad 2009. [Citace: 28. Říjen 2016.] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-obklady-stavebnich-konstrukci-1-60.html>.
3. Eduard Vašátko. Protipožární nástřiky a obklady stavebních konstrukcí (2.). *www.seidl.cz*. [Online] 4. Listopad 2009. [Citace: 2. Listopad 2016.] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-obklady-stavebnich-konstrukci-2-59.html>.
4. Promat. PROMASPRAY® F250 – suchá omítková směs. [Online] [Citace: 6. Listopad 2016.] <http://web.promatpraha.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/prehled-materialu/promaspray-f250>.
5. Eduard Vašátko. Protipožární nátěry ve stavebnictví. *www.seidl.cz*. [Online] 4. Listopad 2009. [Citace: 28. Říjen 2016.] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-natery-ve-stavebnictvi-61.html>.
6. Izostav. PLAMOSTOP P9. [Online] [Citace: 22. Listopad 2016.] <http://www.izostav.cz/cz/produkty/plamostop-p9-na-ocel/>.
7. Promat. PROMATECT H. [Online] [Citace: 6. Listopad 2016.] <http://web.promatpraha.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/prehled-materialu/promatect-h>.
8. Promat. PROMATECT L. [Online] [Citace: 6. Listopad 2016.] <http://web.promatpraha.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/prehled-materialu/promatect-l>.
9. Knauf Praha, s.r.o. *Ochrana stavebních konstrukcí před požárem systémy KNAUF dle ČSN EN*. 2013.
10. Yong Wang, Ian Burgess, František Wald and Martin Gillie. *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. místo neznámé : Taylor & Francis Group, 2013. ISBN: 978-0-203-86871-3.
11. ČSN EN 1993-1-2 Eurokód 3. *Navrhování ocelových konstrukcí – část 1-2*. 2006.
12. Zdeněk Sokol. Tepelná a mechanická zatížení (TMZ). [Online] [Citace: 3. Prosinec 2016.]
13. Karpaš J. a Zoufal R. *Ochrana ocelových konstrukcí před požárem*. místo neznámé : STNL - nakladatelství technické literatury, 1978. SIP-41868/03650.
14. SUPALUX. *Promat*. [Online] [Citace: 8. Březen 2017.] <https://www.promat.co.uk/en/products/supalux>.
15. AESTUVER T fire-protection. *Fermacell*. [Online] [Citace: 8. Březen 2017.] https://www.fermacell-aestuver.com/aestuver-t-fire-resistant-boards-for-underground-transport-systems_2039.php.

-
16. Fire protection board. *Invictia Fire Protection*. [Online] [Citace: 8. Březen 2017.] <http://www.durasteel.net/fire-protection-board.asp>.
 17. WALD F. a kol. *Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí*. místo neznámé : Nakladatelství ČVUT, 2011. ISBN: 978-80-01-04746-0.
 18. FIRES. *Protokol o skúške PROMATECT H*. 2004. FIRES FR 018/04 CP.
 19. FIRES. *Protokol o skúške PROMATECT L*. 2004. FIRES FR 019/04 CP.
 20. Protection, Association for Specialist Fire. *Yellow book - Fire protection for structural steel in buildings*. 2014. ISBN: 978-1-870409-38-4.
 21. ANSYS, Inc. *Theory Reference for the Mechanical APDL and MEchanical Applications*. 2009.
 22. Promat. PROMATECT 200. [Online] [Citace: 6. Listopad 2016.] <http://web.promatpraha.cz/pozarni-bezpcnost-staveb/prehled-materialu/promatect-200>.
 23. P.W.M. Kortekaas a L.M. Noordijk, M.Sc. *PROMATECT-200, a fire resistant board material*. místo neznámé : Efectis Nederland, 2015.
 24. Edurad Vašátko. Protipožární nástřikové hmoty ve stavebnictví. www.seidl.cz. [Online] 4. Listopad 2009. [Citace: 28. Říjen 2016.] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastrikove-hmoty-ve-stavebnictvi-69.html>.
 25. Ing. Vladimír Moravec, CSc. Protipožární nástřiky a omítky. www.seidl.cz. [Online] 4. Listopad 2009. [Citace: 2. Listopad 2016.] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-omitky-70.html>.

Příloha 1 – Experiment

Od firmy Promat s.r.o. byly poskytnuty vzorky produktů PROMATECT H, L a 200. Měření proběhlo v laboratoři UCEEB (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov). Materiály byly zkoušeny na dvou přístrojích.

V prvním přístroji LINSEIS HFM 300 (obr. 53) byla měřena tepelná vodivost. Tímto přístrojem je možné měřit tepelné vodivosti izolačních materiálů s malou tepelnou vodivostí. Principem měření je umístit vzorek mezi horkou a studenou desku a měřit tepelný tok. Pro tuto zkoušku byly zapotřebí vzorky o rozměrech 300 x 300 mm. Do přístroje se vzorky vkládali ve třech vrstvách od každého materiálu. Na horní vrstvu působila teplota 30°C a na dolní 10°C. Průměrně tedy cca 20°C. Zkouška jednoho materiálu trvala přibližně 45 min.



obr. 53 Přístroj LINSEIS HFM 300

Níže jsou vypsány výstupy z tohoto přístroje pro testované materiály.

PROMATECT H o tloušťce obkladu 4 x 8,5 mm:

Date: ct 11. kve 10:36:13 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.01 °C

Thickness: 33.8 mm

Heat transfer coefficient: 5.781 W/(m_cK)

Heat conductivity: 195.504 mW/(mK)

Comment: Promatect H (4 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 10:36:35 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 33.8 mm

Heat transfer coefficient: 5.780 W/(m_cK)

Heat conductivity: 195.490 mW/(mK)

Comment: Promatect H (4 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 10:37:03 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 33.8 mm

Heat transfer coefficient: 5.780 W/(m_cK)

Heat conductivity: 195.486 mW/(mK)

Comment: Promatect H (4 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 10:37:26 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 33.8 mm

Heat transfer coefficient: 5.780 W/(m_cK)

Heat conductivity: 195.476 mW/(mK)

Comment: Promatect H (4 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 10:38:01 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 33.8 mm

Heat transfer coefficient: 5.780 W/(m²K)

Heat conductivity: 195.463 mW/(mK)

Comment: Promatect H (4 desky), teplotní spád 10-30; Podmínky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

PROMATECT L o tloušťce obkladu 3 x 20 mm:

Date: ct 11. kve 13:19:33 2017

Results:

Top temperature: 30.00 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 60.9 mm

Heat transfer coefficient: 1.560 W/(m²K)

Heat conductivity: 95.037 mW/(mK)

Comment: Promatect L (3 desky), teplotní spád 10-30; Podmínky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 13:19:42 2017

Results:

Top temperature: 30.00 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 60.9 mm

Heat transfer coefficient: 1.560 W/(m²K)

Heat conductivity: 95.031 mW/(mK)

Comment: Promatect L (3 desky), teplotní spád 10-30; Podmínky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 13:21:43 2017

Results:

Top temperature: 30.00 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 60.9 mm

Heat transfer coefficient: 1.559 W/(m²K)

Heat conductivity: 94.948 mW/(mK)

Comment: Promatect L (3 desky), teplotní spád 10-30; Podmínky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 13:21:47 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C
Bottom temperature: 10.00 °C
Thickness: 60.9 mm
Heat transfer coefficient: 1.558 W/(m_cK)
Heat conductivity: 94.945 mW/(mK)

Comment: Promatect L (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 13:22:12 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C
Bottom temperature: 10.00 °C
Thickness: 60.9 mm
Heat transfer coefficient: 1.558 W/(m_cK)
Heat conductivity: 94.930 mW/(mK)

Comment: Promatect L (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

PROMATECT 200 o tloušťce 3 x 20 mm:

Date: ct 11. kve 12:13:37 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C
Bottom temperature: 10.01 °C
Thickness: 59.8 mm
Heat transfer coefficient: 3.589 W/(m_cK)
Heat conductivity: 214.662 mW/(mK)

Comment: Promatect 200 (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 12:14:00 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C
Bottom temperature: 10.01 °C
Thickness: 59.8 mm
Heat transfer coefficient: 3.589 W/(m_cK)
Heat conductivity: 214.654 mW/(mK)

Comment: Promatect 200 (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 12:14:09 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 59.8 mm

Heat transfer coefficient: 3.589 W/(m_c K)

Heat conductivity: 214.644 mW/(mK)

Comment: Promatect 200 (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 12:15:30 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.00 °C

Thickness: 59.8 mm

Heat transfer coefficient: 3.588 W/(m_c K)

Heat conductivity: 214.596 mW/(mK)

Comment: Promatect 200 (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Date: ct 11. kve 12:15:46 2017

Results:

Top temperature: 30.01 °C

Bottom temperature: 10.01 °C

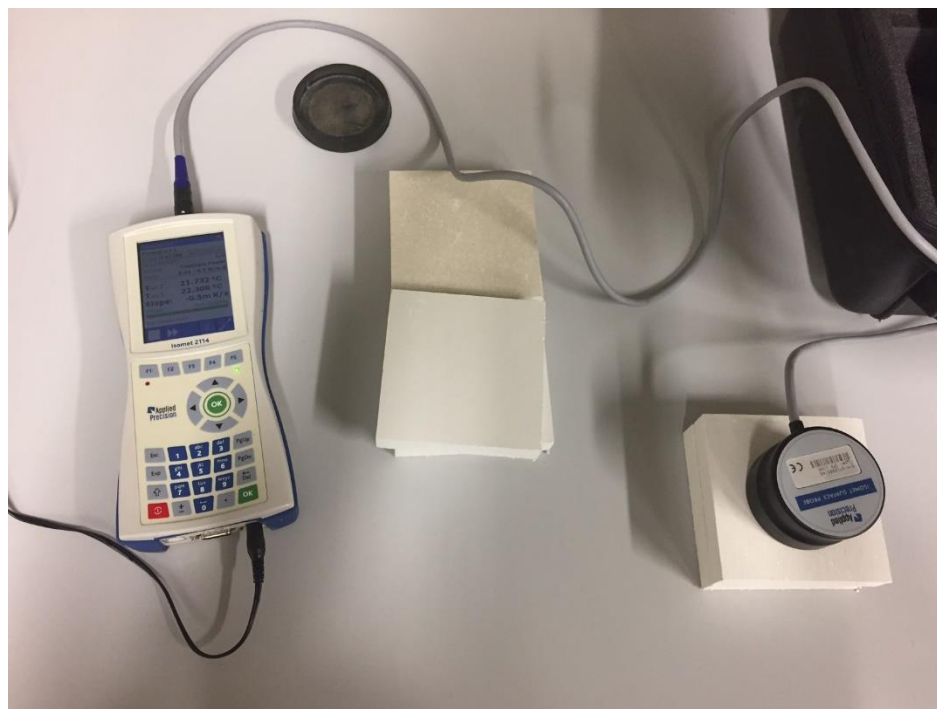
Thickness: 59.8 mm

Heat transfer coefficient: 3.588 W/(m_c K)

Heat conductivity: 214.576 mW/(mK)

Comment: Promatect 200 (3 desky), teplotní spád 10-30; Podminky v lab: T 22,3°C, RH 32,1%; meril JD a student Michal Sladký

Jako druhý přístroj ke měření byl použit přenosný ISOMET 2114 (obr. 54). Ten je vhodný ke měření izotropních materiálů, včetně buněčných izolačních materiálů, plastů, skel a minerálů. Je vybaven dvěma volitelnými typy měřících sond. Jehla pro měkké materiály a povrchová sonda pro tvrdé materiály. Zde byly použity pouze dvě vrstvy materiálu a sonda, která se přiložila na vzorky, snímala jeho tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu po dobu cca 90 min. Před započítáním měření se u tohoto přístroje musela nastavit přibližná tepelná vodivost, aby se zamezilo velkému rozptylu hodnot. Pro tento experiment byly potřeba vzorky o rozměrech 100 x 100 mm.



obr. 54 Příklad přístroje ISOMET 2114

Výstup tohoto z tohoto přístroje je shrnut v tab. 21.

tab. 21 Výstup naměřených hodnot přístrojem ISOMET 2114

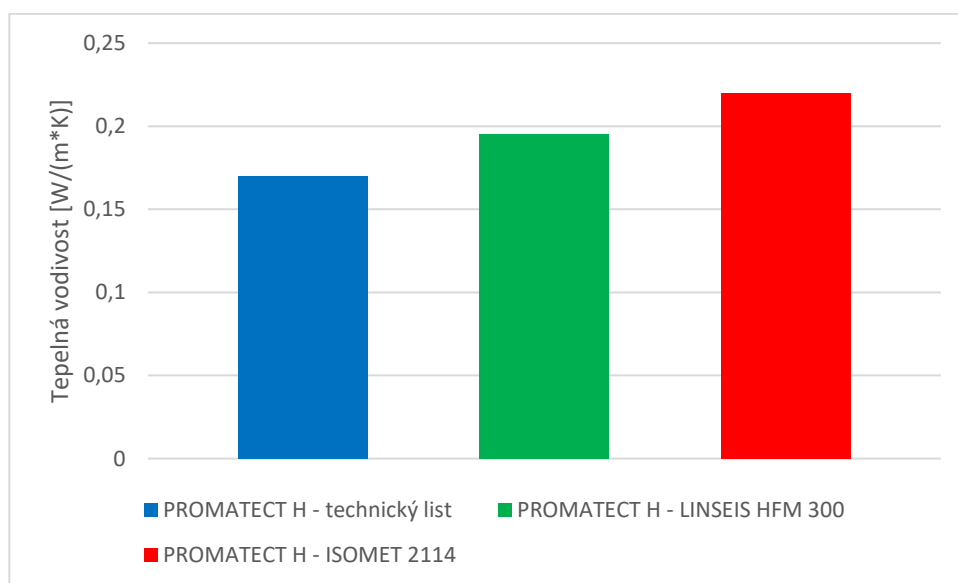
-1	Date	Time	Material	Label2	Label3	Lambda	Cro	a
						[W/(m*K)]	[J/(m3*K)]	[m2/s]
							*10 ⁶	*10 ⁶
308	11.05.2017	10:07	Promatect H	170511	JD	0.231752	1.258437	0.184159
308	11.05.2017	10:25	Promatect H	170511	JD	0.232098	1.269058	0.182890
308	11.05.2017	10:47	Promatect H	170511	JD	0.232231	1.270778	0.182747
309	11.05.2017	11:24	Promatect 200	170511	JD	0.225465	1.028465	0.219224
309	11.05.2017	11:41	Promatect 200	170511	JD	0.225198	1.035124	0.217557
309	11.05.2017	12:19	Promatect 200	170511	JD	0.225771	1.029282	0.219348
310	11.05.2017	12:49	Promatect L	170511	JD	0.087260	0.446092	0.195610
310	11.05.2017	13:26	Promatect L	170511	JD	0.087312	0.444719	0.196331
310	11.05.2017	13:43	Promatect L	170511	JD	0.087324	0.445728	0.195912
311	11.05.2017	14:30	Promatect H 2.pokus	170511	JD	0.219901	1.174353	0.187253
311	11.05.2017	14:47	Promatect H 2.pokus	170511	JD	0.220330	1.180183	0.186691
311	11.05.2017	15:05	Promatect H 2.pokus	170511	JD	0.219958	1.185857	0.185485

Výsledky z každého přístroje byly zprůměrovány a vloženy do tab. 22 a grafů č. 55 - 57 i s hodnotami udávanými v technických listech výrobků pro porovnání.

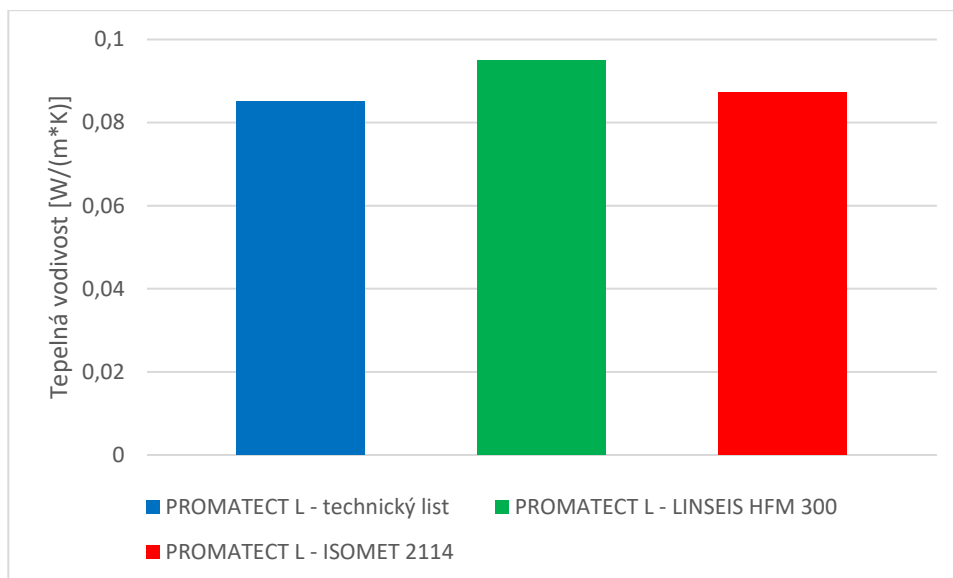
Jednotky bylo nutné nejdříve sjednotit, protože výstup z každého přístroje byl jiný. Tepelná vodivost je udávána jako $W/(m \cdot K)$. V ISOMETU 2114 je jednotka uvedena správně. U LINSEIS HFM 300 bylo nutné převést z mW na W . Měrná tepelná kapacita byla měřena pouze na přístroji ISOMET 2114. Ve výstupu byla však místo hmotnostní jednotky $J/(kg \cdot K)$ uvedena objemová jednotka $J/(m^3 \cdot K)$. Pro převedení byly hodnoty poděleny objemovou hmotností daného materiálu.

tab. 22 Vyhodnocení měření tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity s udávanými hodnotami

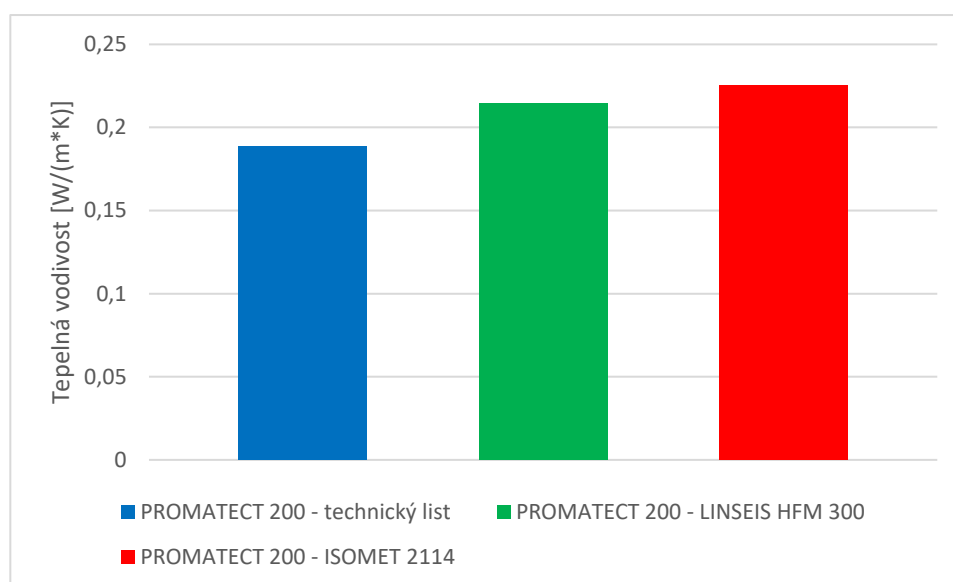
Výrobek	Tepelná vodivost [$W/(m \cdot K)$]			Měrná tepelná kapacita [$J/(kg \cdot K)$]	
	Technický list	LINSEIS HFM 300	ISOMET 2114	Technický list	ISOMET 2114
PROMATECT H	0,17	0,195	0,220	900	1311,26
PROMATECT L	0,085	0,095	0,087	950	990,03
PROMATECT 200	0,189	0,215	0,225	930	1374,61



obr. 55 Vyhodnocení tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu PROMATECT H s udávanými hodnotami z technického listu výrobku



obr. 56 Vyhodnocení tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu PROMATECT L s udávanými hodnotami z technického listu výrobku



obr. 57 Vyhodnocení tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu PROMATECT 200 s udávanými hodnotami z technického listu výrobku

Dle výše uvedených grafů je patrné, že velké odchylky měření od skutečnosti nevznikly. Blíže hodnotám uvedeným v technickém listu byly výsledky naměřeny přístrojem LINSEIS HFM 300. Malé odchylky mohou být způsobeny jinými okrajovými podmínky i metodami zjišťování tepelné vodivosti, než jaké byly při zkouškách, ze kterých byla poté stanovena hodnota udávána v technickém listu.