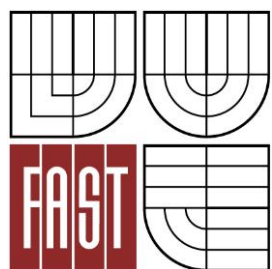




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÉ ŘEŠENÍ OCELOVÝCH PRVKŮ PŘI POŽÁRU

STRUCTURAL ANALYSIS OF STEEL MEMBERS IN FIRE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MONIKA RUNŠTUKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ROMAN GRATZA, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. MONIKA RUNŠTUKOVÁ
Název	Statické řešení ocelových prvků při požáru
Vedoucí diplomové práce	Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. FEM – Principy a praxe metody konečných prvků. Vydavatelství Computer Press, Praha: 1997.

Šesták, J., Rieger, F. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha: 2004.

Theory Reference – ANSYS, release 13.0.

Wald, F. a kol. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha: 2005.

Zásady pro vypracování

V rámci posuzování ocelových konstrukcí na účinky požáru využít vhodné metody pro určení rozložení teplotního pole v konstrukci a vyšetřit snížení únosnosti ocelových prvků v důsledku zvýšené teploty. Řešení realizovat na bázi metody konečných prvků s využitím programového systému ANSYS. Výsledky porovnat s normami.

Předepsané přílohy

.....

Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá řešením ocelových prvků při požáru. V rámci práce se posuzují a porovnávají nechráněné ocelové prvky a ocelové prvky chráněné různými druhy pasivní ochrany zatížené teplotním a mechanickým zatížením. Výpočet je proveden dle platných návrhových norem a pro tepelné a statické analýzy se využívá programový systém ANSYS.

Klíčová slova

požár, požární ochrana, požární odolnost, ocelový prvek, MKP

Abstract

This thesis deals with solution of steel members under fire conditions. The goal of the thesis is to examine and compare unprotected steel members with steel members protected by different types of passive protection. Calculation is performed according to applicable design standards. ANSYS software is used for thermal and structural analysis.

Keywords

fire, fire protection, fire resistance, steel member, FEM

Bibliografická citace VŠKP

RUNŠTUKOVÁ, Monika. *Statické řešení ocelových prvků při požáru*. Brno, 2013. 74 s.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební
mechaniky. Vedoucí práce Ing. Roman Gratza, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.1.2013

.....
podpis autora
Monika Runštuková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Romanu Grazovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce a za cenné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce	Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Autor práce	Bc. MONIKA RUNŠTUKOVÁ
Škola	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta	Stavební
Ústav	Ústav stavební mechaniky
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Název práce	Statické řešení ocelových prvků při požáru
Název práce v anglickém jazyce	Structural Analysis of Steel Members in Fire
Typ práce	Diplomová práce
Přidělováný titul	Ing.
Jazyk práce	Čeština
Datový formát elektronické verze	
Anotace práce	Diplomová práce se zabývá řešením ocelových prvků při požáru. V rámci práce se posuzují a porovnávají nechráněné ocelové prvky a ocelové prvky chráněné různými druhy pasivní ochrany zatížené teplotním a mechanickým zatížením. Výpočet je proveden dle platných návrhových norem a pro tepelné a statické analýzy se využívá programový systém ANSYS.
Anotace práce v anglickém jazyce	This thesis deals with solution of steel members under fire conditions. The goal of the thesis is to examine and compare unprotected steel members with steel members protected by different types of passive protection. Calculation is performed according to applicable design standards. ANSYS software is used for thermal and structural analysis.
Klíčová slova	požár, požární ochrana, požární odolnost, ocelový prvek, MKP
Klíčová slova v anglickém jazyce	fire, fire protection, fire resistance, steel member, FEM

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Cíl práce	3
3	Požár.....	4
3.1	Průběh požáru.....	4
3.2	Požární odolnost ocelových konstrukcí.....	7
3.3	Požární ochrana ocelových konstrukcí.....	8
4	Materiálové charakteristiky oceli v závislosti na teplotě.....	13
4.1	Mechanické vlastnosti	13
4.2	Tepelné vlastnosti.....	15
5	Teplotní analýza	19
5.1	Přenos tepla	19
5.2	Rovnice vedení tepla	19
5.3	Okrajové a počáteční podmínky.....	22
5.4	Přestup tepla do konstrukce	23
5.5	Modelování požáru.....	27
6	Statická analýza.....	28
6.1	Metodika posuzování ocelových konstrukcí na požár	28
6.2	Zatížení při požáru	30
6.3	Nosníky při požáru	32
7	Vývoj rozdělení teplot v ocelovém průřezu	36
8	Teplotní a statická analýza vybraného prvku	56
9	Závěr.....	70
10	Použitá literatura	71
11	Seznam symbolů	73

1 Úvod

Ocel je již od dob průmyslové revoluce pro své vlastnosti jedním z nejužívanějších materiálů ve stavebnictví. Montáž ocelových konstrukcí je rychlá, konstrukční prvky jsou subtilní a lehké a lze pomocí nich přenášet velká zatížení při poměrně malých dimenzích. Na druhou stranu má ocel i zásadní nevýhody, jako je snadné podléhání korozi nebo malá odolnost vůči požáru, která má velký dopad na únosnost a stabilitu konstrukce.

Diplomová práce se zabývá statickým řešením ocelových prvků při požáru. Na obr. 1.1 jsou zachyceny následky požáru nechráněné ocelové konstrukce skladovací haly. Je zde patrné, že ohybově tuhé kotvení sloupů v rovině rámu zapříčinilo zhroucení objektu při požáru dovnitř [8], [5]. Návrh haly na požární zatížení byl ale proveden dle dnes již neplatných norem ČSN na požární odolnost 5 minut, přičemž schopnost dojezdu požárních jednotek byla odhadnuta na 13 minut [8].

Při řešení požární odolnosti je nezbytné zabývat se pasivními prvky požární ochrany ocelových konstrukcí a jejich vlivu na nosnost a stabilitu konstrukce. Požární bezpečnost konstrukcí je totiž jedním z hlavních požadavků na stavební objekty, a proto by konstrukce měly být navrhovány tak, aby po danou dobu odolávaly požáru. Práce se tedy zabývá rychlostí šíření tepla v ocelovém průřezu při použití některých ochranných materiálů, vyšetřuje snížení únosnosti ocelových prvků v důsledku zvýšení teploty a navrhuje prvky konstrukce na požadovanou požární odolnost.



Obr. 1.1 Následky požáru nechráněné ocelové konstrukce skladovací haly [9]

2 Cíl práce

Na obr. 2.1 jsou vidět následky nechráněných ocelových prvků po zatížení požárem. Se vzrůstající teplotou dochází ke snižování meze kluzu a modulu pružnosti oceli a při zatížení prvků vysokými teplotami, které při požáru běžně vznikají, může dojít i k deformaci průřezů ocelových prvků.



Obr. 2.1 Nechráněný ocelový prvek po zatížení požárem [9]

Cílem práce je pochopit princip návrhu a posudku konstrukcí za zvýšených teplot, návrh vhodných ochranných materiálů, aplikování výpočetního programu na daný problém a výsledky ověřit pomocí zjednodušených kontrolních výpočtů dle platných návrhových norem.

V první praktické části se posuzují a porovnávají nechráněné ocelové prvky a ocelové prvky chráněné různými druhy pasivní ochrany z hlediska doby prohřátí průřezu. Dále je zde určena nejvhodnější ochrana ocelových konstrukcí z hlediska ekonomického, estetického a funkčního.

Druhá praktická část se zabývá vybraným prvkem konstrukce zatíženým jak vzrůstající teplotou od požáru, tak statickým zatížením. Pro řešení problému byl vybrán výpočetní systém ANSYS, který pracuje na principu metody konečných prvků a umožňuje kombinaci tepelné a statické analýzy. Na závěr jsou výsledky zhodnoceny a srovnány s ručním výpočtem provedeným dle platných návrhových norem.

3 Požár

Pro účely požární ochrany je za požár považováno každé nežádoucí hoření (obr. 3.1), při kterém došlo k usmrcení, zranění či bezprostřednímu ohrožení osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách [21].



Obr. 3.1 Požár ocelové konstrukce skladovací haly [9]

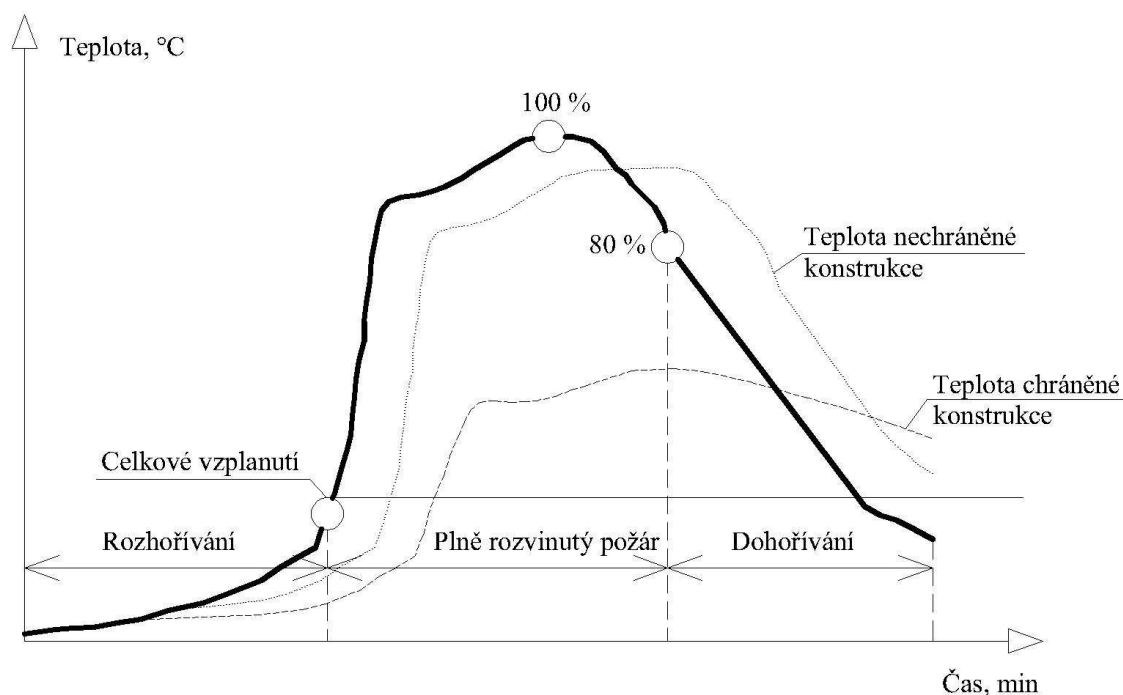
Požár je živel, který lze charakterizovat časovým průběhem teplot, tlaku a složením plynů hořících produktů v prostoru. Jako prostor se obvykle uvažuje požární úsek stavebního objektu, který je ohraničen požárně odolnými konstrukcemi, či konstrukcemi z části bez odolnosti [5].

3.1 Průběh požáru

Při požárech můžeme rozlišit tři časové fáze:

- rozhořívání,
- plně rozvinutý požár,
- dohořívání.

Při rozhořívání požár roste a šíří se z místa jeho vzniku. Plně rozvinutý požár začíná přibližně při tepelném výkonu 1 MW a je charakterizován intenzivním hořením v prostoru celého požárního úseku. V poslední fázi dochází k dohořívání a chladnutí [5]. Fáze požáru jsou zobrazeny na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Fáze požáru [5]

Nominální a parametrické křivky

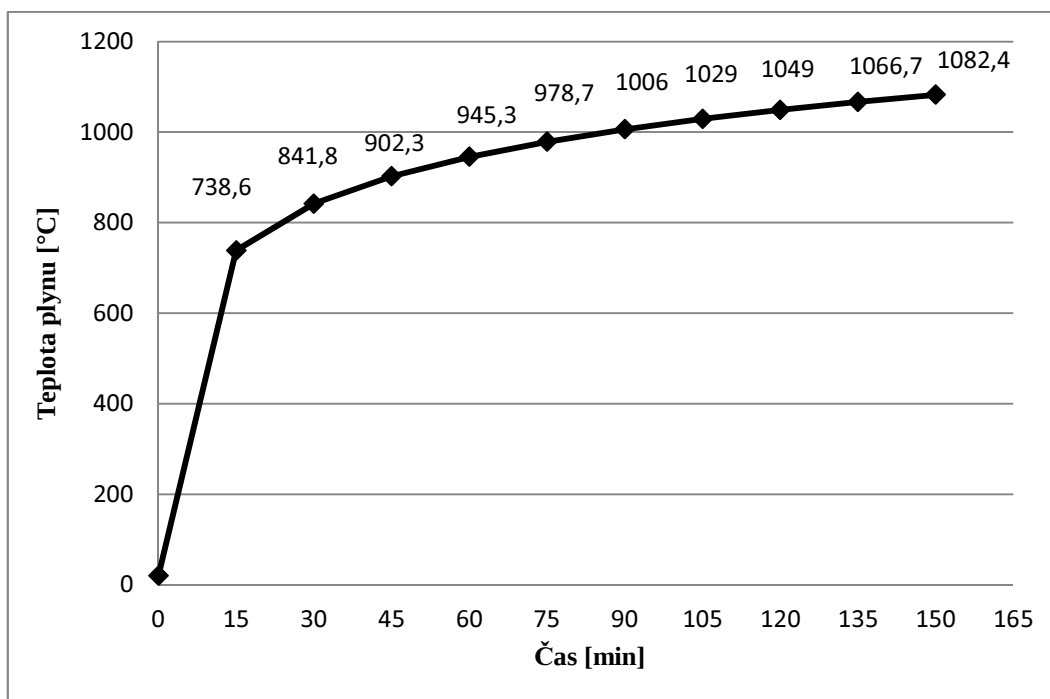
Nominální a parametrické křivky se používají pro přibližný popis požáru, popřípadě pro určení teploty plynu, v požárních úsecích. Nominální teplotní křivky vyjadřují závislost teploty v požárním úseku pouze na době požáru. Oproti tomu parametrické křivky pro popis požáru využívají hlavních fyzikálních závislostí popisujících hoření [5].

Nominální teplotní křivky

Mezi nominální teplotní křivky patří normová teplotní křivka, křivka vnějšího požáru a uhlovodíková křivka [10]. Jejich zavedení zajistilo první zvýšení požární spolehlivosti konstrukcí, přestože vyjadřují teplotu při požáru pouze nepřímo. Nominální normová teplotní křivka (obr. 3.3) je dána vztahem [5], [10]

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (3.1)$$

kde T_g je teplota plynů v příslušném požárním úseku a t čas. Součinitel přestupu tepla prouděním pro nominální normovou křivku a křivku vnějšího požáru je $\alpha_c = 25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.



Obr. 3.3 Nominální teplotní křivka

Křivka vnějšího požáru, kterou jsou namáhány obvodové stěny, je popsána rovnicí [10]

$$T_g = 20 + 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-0,38t}). \quad (3.2)$$

Nominální uhlovodíková teplotní křivka umožňuje simulaci prudkých požárů s rychlým nárůstem intenzity. Součinitel přestupu tepla prouděním je $\alpha_c = 50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Uhlovodíková křivka je dána výrazem

$$T_g = 20 + 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}). \quad (3.3)$$

Parametrické teplotní křivky

Parametrické modely pro popis rozvoje teploty v požárním úseku berou v úvahu požární zatížení, tepelně technické vlastnosti ohraničujících konstrukcí a otvory v požárním úseku. Modely předpokládají rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku. Vstupem do výpočtu jsou hustota požárního zatížení, největší rychlost uvolňování tepla a tepelné ztráty ohraničujících konstrukcí. Součinitel přestupu tepla prouděním pro parametrické teplotní křivky a dynamickou analýzu plynů je $\alpha_c = 35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [5].

3.2 Požární odolnost ocelových konstrukcí

Požární odolnost stavebních konstrukcí je schopnost konstrukcí odolávat účinkům požáru. Vyjadřuje se dobou, po kterou mohou být stavební konstrukce vystaveny teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce specifikované mezními stavy požární odolnosti [5]. Tato doba je určena požárními předpisy podle typu, složitosti a důležitosti objektu v intervalu od 15 minut až do tří hodin. Stavební konstrukce se pak podle požární odolnosti zařazují do stupnice požární odolnosti: 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut [14].

Pro klasifikaci konstrukcí do této stupnice se používají písemné značky, které charakterizují dosažené mezní stavy požární odolnosti. Mezi mezní stavy požární odolnosti patří mezní stav únosnosti, který se označuje $R(t)$, kde t je doba v minutách, např. R30 značí, že mezní stav únosnosti nenastane dříve než za 30 minut. Dále mezní stav celistvosti E, mezní stav limitních teplot I, mezní stav limitní hustoty tepelného toku ve stanoveném místě W a mezní stav kouřotěsnosti S, kdy se prokazuje, že intenzita pronikání studeného kouře v $\text{m}^3\text{hod}^{-1}$ nepřekročí mezní hodnotu. Mezní stav limitních teplot se dá prokázat výpočtem přestupu a vedení tepla v konstrukci, přičemž se hodnotí teplota na neohřívané straně konstrukce. Celistvost se výpočtem obvykle prokázat nedá, může jít např. o otevření spáry mezi dílci [5], [14].

Požární odolnost konstrukcí lze stanovit zkouškou a výpočtem. V případech, kdy nelze postihnout všechny rozhodující činitele ovlivňující požární odolnost, kombinují se zkoušky s výpočtem.

Ověření požární odolnosti

Požární odolnost je možno posoudit třemi způsoby, a to z hlediska času, únosnosti nebo teploty. Posouzení požární odolnosti z hlediska času se vyjádří výrazem [10]

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}, \quad (3.4)$$

kde $t_{fi,d}$ je návrhová doba požární odolnosti a $t_{fi,requ}$ je požadovaná doba požární odolnosti. Z hlediska únosnosti požární odolnost popisuje výraz

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}, \quad (3.5)$$

kde $R_{fi,d,t}$ je návrhová hodnota únosnosti prvku při požáru v čase t , $E_{fi,d,t}$ je návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase t ; a z hlediska teploty používáme výraz

$$T_d \leq T_{cr,d}, \quad (3.6)$$

kde T_d je návrhová hodnota teploty materiálu a $T_{cr,d}$ návrhová hodnota kritické teploty materiálu. Pro ocelové konstrukce je posouzení z hlediska teploty méně obvyklé. Volba

hlediska ověřování sice nemá na spolehlivost návrhu vliv, ale upřednostňováno je posuzování konstrukcí z hlediska času, protože přímo ukazuje rezervy spolehlivosti konstrukce při požáru [10], [5].

Zjednodušeně se návrhová hodnota únosnosti prvku stanoví dle normy [11] redukcí návrhové hodnoty únosnosti prvku při pokojové teplotě R_d pomocí součinitele $\eta_{fi,t}$ takto

$$R_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} R_d, \quad (3.7)$$

kde R_d je návrhová hodnota únosnosti prvku při pokojové teplotě a $\eta_{fi,t}$ úroveň zatížení pro návrhový požár [5].

V případě, že se uvažuje časově nezávislá aproximace účinků zatížení, lze vzhledem k rovnici (3.7) nahradit podmínku pro odolnost konstrukce při požáru (3.5) nerovností

$$\eta_{fi,t} R_d \geq \eta_{fi,t} E_d. \quad (3.8)$$

Konstrukce se pro pokojovou teplotu navrhují tak, že platí $R_d \geq E_d$. Při ověřování požární odolnosti dle kritéria únosnosti tedy stačí splnit nerovnost

$$\eta_{fi,t} \geq \eta_{fi}, \quad (3.9)$$

která požaduje, aby v čase t měl redukční součinitel únosnosti $\eta_{fi,t}$ vyšší hodnotu než redukční součinitel účinku zatížení η_{fi} [5], [11].

3.3 Požární ochrana ocelových konstrukcí

Požární ochranu můžeme rozdělit na aktivní a pasivní. Mezi prvky aktivní požární ochrany patří požárně bezpečnostní zařízení a opatření (např. samočinná stabilní hasicí zařízení, elektrická požární signalizace nebo hasičský záchranný sbor). Jako pasivní prvek požární ochrany je označeno například vytvoření požárních úseků, únikových cest a požární návrh konstrukce. Pasivní prvky požární ochrany zajišťují nosnost a stabilitu konstrukce a zabraňují nadměrnému šíření ohně v objektu i mimo něj.

Práce se zabývá především požárně ochrannými materiály, které zastíňují nebo tepelně izolují nosnou konstrukci a patří tedy mezi pasivní prvky požární ochrany.

Ocelové konstrukce se nejčastěji chrání obetonováním, nástřikem, obkladem nebo zpěnitelnými nátěry. Požárně ochranný materiál musí, kromě izolačních požadavků, splňovat i požadavky na celistvost za požadovaných teplot. V jednoduchých modelech se neuvažuje se změnami vlastností požárně ochranných materiálů při vzrůstající teplotě, používají se konzervativní hodnoty uvedené v tab. 3.1 [5].

Tab. 3.1 Vlastnosti požárně ochranných materiálů [5]

Tepelně izolační materiál	Hustota ρ [kg m ⁻³]	Obsah vlhkosti u [%]	Tepelná vodivost λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Nástřiky				
minerální vlákna	300	1	0,12	1200
vermikulit	350	15	0,12	1200
perlit	350	15	0,12	1200
Hutné nástřiky				
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
silikátová (vápenosilikátová) vlákna a cement	800	5	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

Zpěnitelné nátěry

Zpěnitelné nátěry při požáru nabydou přibližně padesátkrát na objemu a vytvoří tuhou pěnu, obdobu zuhelnatělé vrstvy dřeva (obr. 3.4). K výhodám nátěrů patří především nízká hmotnost, zdánlivě jednoduchá a rychlá aplikace a nezměněný vzhled konstrukce. Nátěry mají ale i množství nevýhod jako třeba dosud neprokázanou funkční životnost, nespolehlivou aplikaci, velmi obtížnou kontrolu funkce a složitou obnovitelnost nátěrů. Navíc cena ochrany bývá srovnatelná s cenou ocelové konstrukce. Nátěry se používají do chemicky neagresivních prostředí. Na konstrukce se nanáší štětcem, válečkem nebo se mohou stříkat. Dosažení požadované tloušťky nátěru se kontroluje ultrazvukovými a odporovými tloušťkoměry. Na trhu jsou k dispozici i mechanicky odolné zpěnitelné nátěry, které se nanášejí na konstrukční prvky již ve výrobě [5], [20].



Obr. 3.4 Zpěnitelný nátěr po účinku zvýšených teplot [15]

Nástřík požárně ochranným materiálem

Ve srovnání s nátěry má nástřík požárně ochranným materiálem nízkou estetickou hodnotu (obr. 3.5, 3.6). Oproti nátěrům mají nástříky nesrovnatelně vyšší objemovou hmotnost, díky níž více zatěžují konstrukci. Nástříky jsou také poměrně křehké a nesnášejí dynamické namáhání konstrukce. Výhodou nástříků je, že jsou schopny téměř u všech ocelových konstrukcí zajistit požadovanou dobu požární odolnosti tedy od 15 až do 180 minut. Mezi další klady použití protipožárních nástříků patří například pomalé stárnutí a výrazně nižší náklady na dosažení požadované požární odolnosti než je tomu u nátěrů. Základem nástříku je sádrové nebo cementové pojivo vyztužené vermikulitem (expandovanou slídou) nebo minerálními vlákny [5], [16].



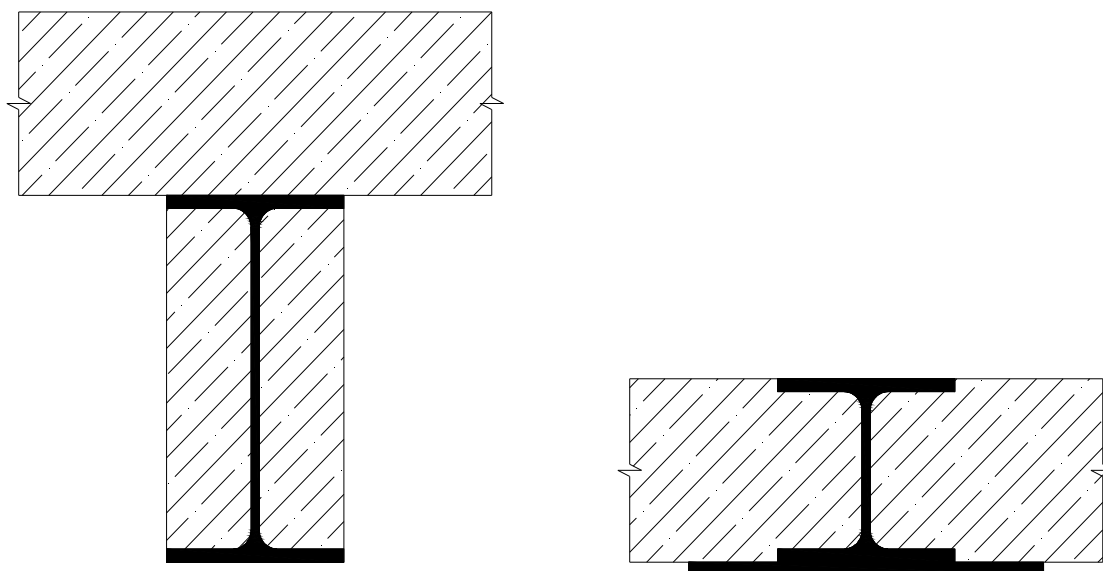
Obr. 3.5 Protipožární nástřík Terfix [17]



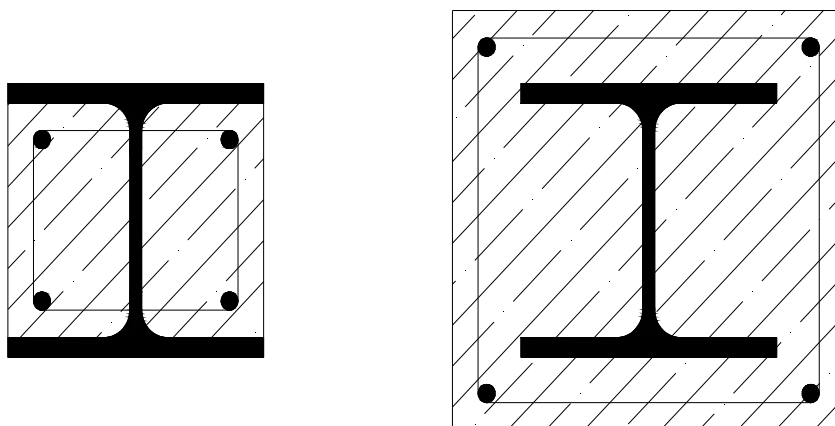
Obr. 3.6 Aplikace protipožárního nástříku [17]

Obetonování

Obetonování je ekonomicky výhodné při integraci požární ochrany do konstrukčního systému a využití lehkých betonů [5]. Spojení těchto dvou materiálů je při požáru staticky výhodné, protože betonové části se prohřívají podstatně pomaleji než ocelové prvky a zajišťují tak únosnost konstrukce. Příkladem takových konstrukcí jsou ocelové nosníky vybetonované mezi pásnicemi (obr. 3.7) a obetonované ocelové sloupy (obr. 3.8). Měrná hmotnost betonů se pohybuje v rozmezí od 1600 do 2300 kg m⁻³.



Obr. 3.7 Ocelové nosníky vybetonované mezi pásnicemi jako součást nosného systému stropních konstrukcí



Obr. 3.8 Obetonované ocelové sloupy

Obklady deskami

Na rozdíl od nástříků jsou esteticky vhodným řešením obklady deskami (obr. 3.9), které lze dle složení rozdělit na desky z hmot anorganických, organických a desky kombinované. Jedním z nejpoužívanějších materiálů je sádra a desky na její bázi. Sádrové desky se ale při teplotě 210 °C rozpadají. Celistvosti se za zvýšených teplot dosahuje plněním nebo pokrytím výztužnými vlákny. Oproti tomu vápenocementové a vermikulitové desky mají minimální tendenci k praskání a dlouho si zachovávají svoji celistvost. Měrná hmotnost desek se pohybuje od 700 do 1000 kg m⁻³. V obkladech lze kombinovat desky měkké s nižší tepelnou vodivostí a desky tvrdé, povrchově odolnější. Na překrytí spár mezi dílci se používá více vrstev. Pro zvýšení celistvosti se hrany opatřují plechovými prvky. Do vysokých teplot se používají rohože na bázi minerálních a křemíkových vláken o měrné hmotnosti 60 až 500 kg m⁻³. Závěsy z tkaných křemíkových vláken mají teplotu tání kolem 1800 °C a osvědčily se do teplot 1200 °C až 1750 °C [5], [18].



Obr. 3.9 Protipožární deskový obklad stropu [18]

4 Materiálové charakteristiky oceli v závislosti na teplotě

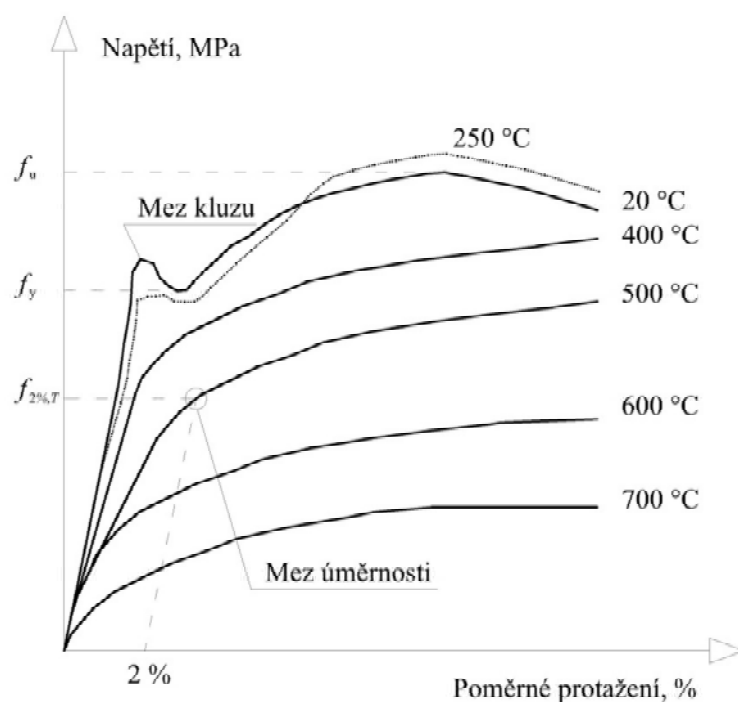
Mechanické a tepelné vlastnosti oceli se mohou v závislosti na teplotě měnit a tyto změny je nutné zohlednit ve výpočtech. Významně se se zvyšující teplotou redukuje modul pružnosti E , mez kluzu f_y i charakteristiky mající vliv na změnu teploty jako je součinitel teplotní roztažnosti α_T , součinitel tepelné vodivosti λ a měrná tepelná kapacita c . Naopak hustota má při výpočtech konstantní hodnotu $\rho = 7850 \text{ kg m}^{-3}$ a neuvažuje se s jejími změnami.

4.1 Mechanické vlastnosti

Ocel je slitina, tudíž její mechanické vlastnosti a chování za zvýšených teplot jsou ovlivněny obsahem uhlíku a legujících příměsí [5]. Mezi mechanické vlastnosti patří [1], [2]:

- | | | |
|--|-------------|-----|
| • modul pružnosti v tahu a tlaku (Youngův) | $E = 210$ | GPa |
| • modul pružnosti ve smyku | $G = 81$ | GPa |
| • součinitel příčné kontrakce (Poissonův) | $\nu = 0,3$ | |
| • mez kluzu (pro ocel S235) | $f_y = 235$ | MPa |

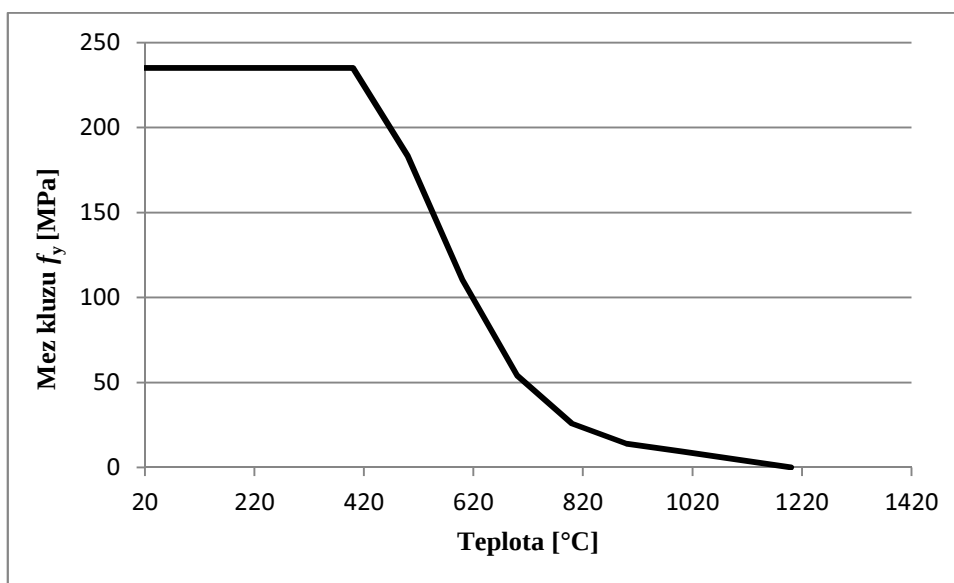
Pro zjednodušené výpočty jsou hodnoty mechanických vlastností oceli při zvýšených teplotách snižovány redukčními součiniteli hodnot stanovených při 20 °C. Hodnoty těchto součinitelů jsou uvedeny v normě [11]. Snížené hodnoty mechanických a tepelných vlastností oceli S235 v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tab. 4.1.



Obr. 4.1 Pracovní diagram oceli [5]

Mez kluzu

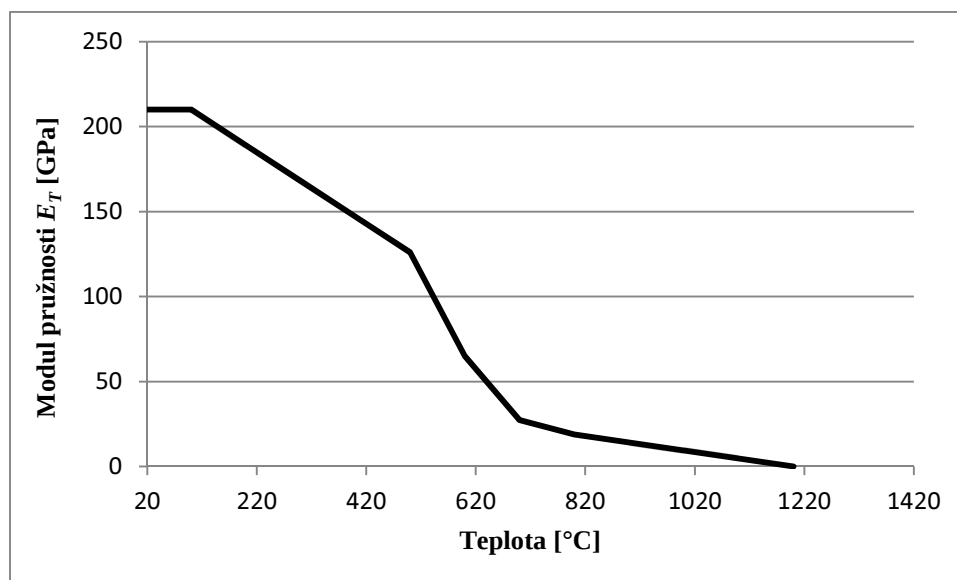
Mez kluzu s rostoucí teplotou klesá, jak je patrné z pracovního diagramu na obr. 4.1 a z grafu na obr. 4.2. Na rozdíl od meze pevnosti, která se mírně zvyšuje a kolem teploty 250 °C dosahuje nejvyšší hodnoty. Při teplotách okolo 350 °C nabývá svých původních hodnot a při dalším růstu teplot klesá. Při teplotách nad 400 °C přestává být mez kluzu patrná a pro návrh se proto používá mez úměrnosti, která se nazývá účinnou mezí kluzu. Úroveň napětí pro danou teplotu, při kterém dochází pro danou ocel k porušení linearit vztahu napětí poměrné protažení a začíná plastifikace, se liší pro různé slitiny a teploty [5].



Obr. 4.2 Závislost meze kluzu oceli S235 na zvyšující se teplotě

Modul pružnosti

Modul pružnosti, který se ve výpočtech využívá ke stanovení tuhosti prvků a jejich částí při stabilitě s teplotou klesá, jak je patrné z obr. 4.3.



Obr. 4.3 Závislost modulu pružnosti oceli S235 na zvyšující se teplotě

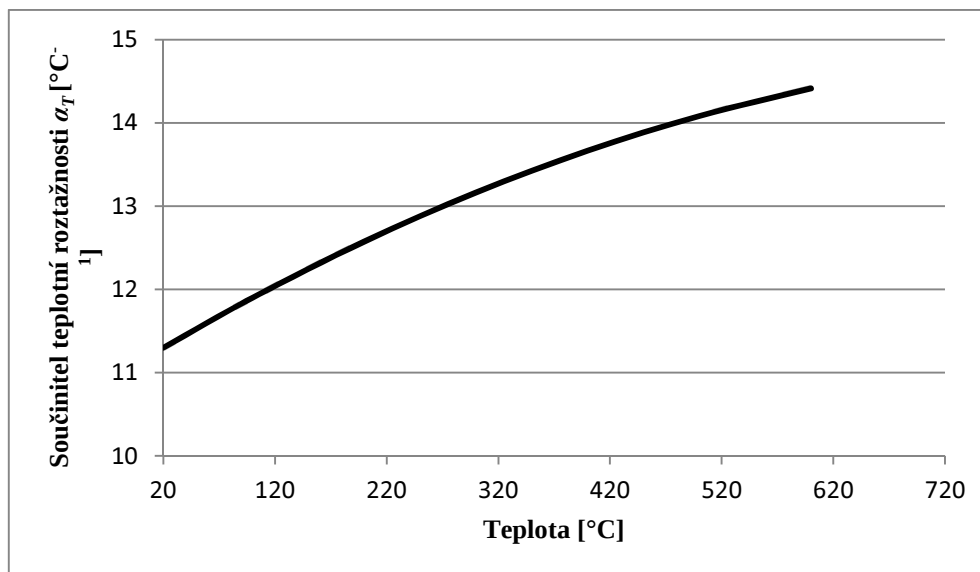
4.2 Tepelné vlastnosti oceli

Materiálové charakteristiky mající vliv na změnu teploty v oceli jsou:

- součinitel teplotní roztažnosti α_T
- součinitel tepelné vodivosti λ
- měrná tepelná kapacita c

Součinitel teplotní roztažnosti

Pro prvky, které se mohou volně deformovat, např. prostý nosník, se ve výpočtu uvažuje pouze se závislostí deformace na napětí. Jestliže je zabráněno protažení od teploty, mají na napjatost vliv i složky teplotního protažení a tečení v čase. Tepelná roztažnost oceli je při zvýšených teplotách výrazná (např. při ohřevu o 400 °C se 10 m dlouhý nosník prodlouží o 50 mm). Závislost součinitele teplotní roztažnosti oceli na zvyšující se teplotě je zobrazena na obr. 4.4 [5], [13]:



Obr. 4.4 Závislost součinitele teplotní roztažnosti oceli na zvyšující se teplotě

Součinitel tepelné vodivosti

Změna součinitele tepelné vodivosti oceli λ vlivem teploty, znázorněná na obr. 4.5, se určuje [5], [11]:

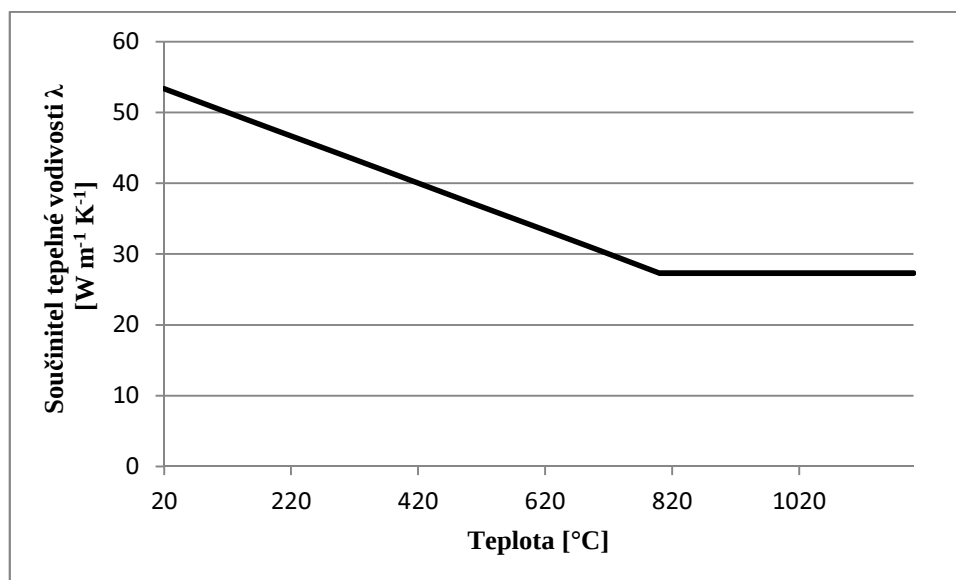
- pro $20\text{ °C} \leq T < 800\text{ °C}$ jako

$$\lambda = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} T \quad (4.1)$$

- pro $800\text{ °C} \leq T \leq 1200\text{ °C}$ jako

$$\lambda = 27,3, \quad (4.2)$$

kde T je teplota oceli. Při zjednodušení výpočtů se počítá se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda = 45\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$.



Obr. 4.5 Závislost součinitele tepelné vodivosti oceli na zvyšující se teplotě

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita oceli vzrůstá ze $440 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ při pokojové teplotě na $650 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 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. 4.6. Měrná tepelná kapacita se určí podle následujících vztahů [5], [11]:

- pro $20 \text{ °C} \leq T < 600 \text{ °C}$ jako

$$c = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} T - 1,69 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (4.3)$$

- pro $600 \text{ °C} \leq T < 735 \text{ °C}$ jako

$$c = 666 + 13002/(738 - T) \quad (4.4)$$

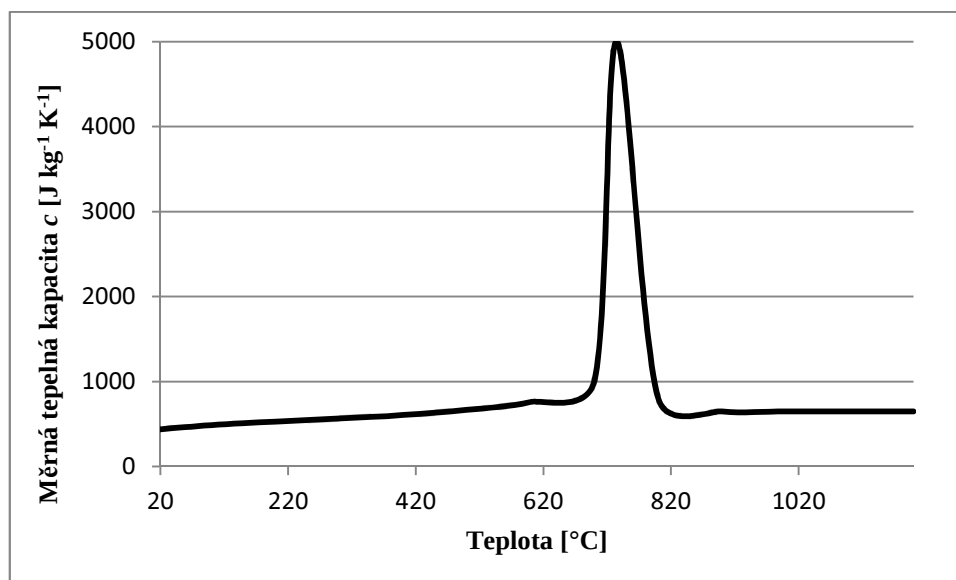
- pro $735 \text{ °C} \leq T < 900 \text{ °C}$ jako

$$c = 545 + 17820/(T - 731) \quad (4.5)$$

- pro $900 \text{ °C} \leq T \leq 1200 \text{ °C}$ jako

$$c = 650, \quad (4.6)$$

kde T je teplota oceli. Měrná tepelná kapacita se přibližně, nezávisle na teplotě oceli, uvažuje hodnotou $c = 600 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.



Obr. 4.6 Závislost měrné tepelné kapacity na zvyšující se teplotě

Tab. 4.1 Mechanické a tepelné vlastnosti v závislosti na teplotě, hodnoty meze kluzu f_y a modulu pružnosti E_T jsou uvedeny pro ocel S 235

	Mez kluzu	Modul pružnosti	Součinitel teplotní roztažnosti	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita
T °C	f_y [MPa]	E_T [GPa]	α_T [°C ⁻¹]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
20	235,00	210,00	11,30	53,33	439,80
100	235,00	210,00	11,90	50,67	487,62
200	235,00	189,00	12,57	47,34	529,76
300	235,00	168,00	13,16	44,01	564,74
400	235,00	147,00	13,67	40,68	605,88
500	183,30	126,00	14,08	37,35	666,50
600	110,45	65,10	14,41	34,02	760,22
700	54,05	27,30	-	30,69	1008,16
735	44,18	24,36	-	29,52	5000,00
800	25,85	18,90	-	27,30	803,26
900	14,10	14,18	-	27,30	650,00
1000	9,40	9,45	-	27,30	650,00
1100	4,70	4,73	-	27,30	650,00
1200	0,00	0,00	-	27,30	650,00

5 Teplotní analýza

Tato kapitola se zabývá přenosem tepla a zaměřuje se především na kondukcí neboli vedení. Je zde vysvětlena rovnice vedení tepla, definované některé okrajové a počáteční podmínky a přiblížen výpočet přestupu tepla do chráněné a nechráněné ocelové konstrukce.

5.1 Přenos tepla

Přenos tepla se může uskutečnit třemi způsoby:

- vedením,
- prouděním,
- zářením.

U pevných a kapalných látek se teplo přenáší vedením (kondukcí). V plynném prostředí se teplo sdílí prouděním (konvekci) a zářením (radiací neboli sáláním). Základním předpokladem, aby tyto děje mohly probíhat, je existence teplotního rozdílu. Směr přenosu je vždy orientován z místa s vyšší teplotou k místům s nižší teplotní hladinou [5]. Jedná se tedy o vyjádření nultého termodynamického zákona, který říká, že každé dva systémy si časem vyrovnají svou teplotu.

5.2 Rovnice vedení tepla

Vedení tepla, tepelný tok – Fourierův zákon

Vedení tepla je přenos energie působením mezi atomy a molekulami ustáleného spojitého prostředí, který vzniká v důsledku nerovnoměrného rozložení teplot. Energie předávaná částicemi teplejšího tělesa částicím chladnějšího tělesa se nazývá tepelný tok $q(x, y, z)$ a může být v určitém okamžiku stanoven v každém místě teplotního pole. Tepelný tok vztažený na jednotku plochy v rovině kolmé ke směru toku se nazývá hustota tepelného toku q [Wm^{-2}] [5], [3].

Závislost mezi hustotou tepelného toku a rozložením teploty je dána rovnicí

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5.1)$$

ve které je hustota tepelného toku q přímo úměrná a opačného znaménka než teplotní gradient. λ představuje součinitele tepelné vodivosti. Nejnižší tepelnou vodivost mají plyny, řádově $0,01 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Tepelná vodivost kapalin je řádově $0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a tepelná vodivost kovových materiálů se řádově pohybuje mezi $10 - 100 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [3].

Konvektivní přenos tepla

Konvektivní přenos libovolné fyzikální veličiny se může uskutečnit pouze při proudění tekutin. Jestliže teplotní rozložení v tekutině, na kterou působí pole objemových sil, vyvolá rozdíly hustot, nastane volná neboli přirozená konvence. Pokud je proudění vyvoláno jedná se o konvekci nucenou [3].

Tepelné zatížení

Tepelné zatížení se udává čistým tepelným tokem q dopadajícím na povrch prvku. Při přenosu tepla na plochu vystavenou účinkům požáru lze čistý tepelný tok q rozdělit na části přenášené prouděním a sáláním

$$q = q_c + q_r. \quad (5.2)$$

Podle normy [10] se návrhová hodnota tepelné pohltivosti povrchu prvku q_d stanovuje ze vztahu

$$q_d = \gamma_{n,c} q_c + \gamma_{n,r} q_r, \quad (5.3)$$

kde $\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$ jsou součinitele pro přepočet národních zkoušek. V ČR se používá hodnota 1,0 pro oba součinitele. Složka tepelného toku sdílená prouděním neboli konvekcí se stanoví jako [5], [3], [4]

$$q_c = \alpha_c (T_g - T_m), \quad (5.4)$$

kde α_c je součinitel přestupu tepla prouděním, T_g teplota plynů v blízkosti prvku vystaveného účinkům požáru a T_m povrchová teplota prvku. Na straně vystavení požáru se součinitel přestupu tepla prouděním α_c uvažuje pro nominální teplotní křivku a křivku venkovního požáru $\alpha_c = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy se počítá jako

$$q_r = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(T_r + 273)^4 - (T_m + 273)^4], \quad (5.5)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Emisivita požáru se uvažuje obecně jako $\varepsilon_f = 1,0$. Emisivita povrchu prvku se navrhuje konzervativně $\varepsilon_m = 0,8$. Pokud je prvek vystaven požáru ze všech stran, teplota sálání T_r může být nahrazena teplotou plynů T_g kolem tohoto prvku [5].

Fourier – Kirchhoffova rovnice

Hlavním cílem řešení základních diferenciálních bilancí je získat teplotní rozložení $T(t, x_i)$ v tuhé látce nebo tekutině jako východisko ke stanovení hustoty tepelného toku q [3]. Stavební konstrukce je za požáru vystavena teplotám proměnným v čase. Základem požárních výpočtů je neustálené (nestacionární) vedení tepla z prostoru

zasaženého požárem do stavební konstrukce. Bilanci tepla lze popsat Fourier – Kirchhoffovou parciální diferenciální rovnicí neustáleného vedení tepla [5]

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}, \quad (5.6)$$

kde x, y, z jsou pravoúhlé souřadnice v prvku, T teplota, λ tepelná vodivost proměnná v čase, ρ hustota, c měrná tepelná kapacita, t čas a v rychlost. Z fyzikálního hlediska je člen

$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$	rychlost akumulace entalpie,
$\rho c \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)$	rychlost konvektivního přenosu tepla (ve směru osy x),
$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)$	rychlost konduktivního přenosu tepla (ve směru osy x) a
$\dot{Q}$	je vydatnost objemového zdroje tepla za jednotku času.

Rovnice se řeší přímo nebo v přírůstcích, diferenční metodou nebo metodou konečných prvků [5].

Ohřev tyčových ocelových prvků chráněných požárně ochranným materiálem závisí na množství tepla, které tímto materiálem projde, a na objemu prvku, který se tímto teplem ohřeje. Množství tepla, které projde ochranným materiálem, závisí na vlastnostech požárně ochranného materiálu (λ, c, ρ , vlhkosti u), jeho tloušťce d a na velikosti plochy, která obklopuje ocelový průřez. Plocha se vztahuje na jednotku délky prvku a značí se A_p . Objem ohřívaného ocelového prvku se také vztahuje na jednotku délky a značí se V . Poměr těchto dvou veličin se nazývá součinitel průřezu a značí se A_p/V . Pro tyčové prvky konstantního průřezu není nutné uvažovat prostorovou soustavu, ale lze řešit pouze rovinu příčného řezu. Plocha ochranného materiálu se změní na vnitřní obvod ochranného materiálu O a objem celého ocelového prvku na jeho průřezovou plochu A [5].

Před vlastním řešením je nutno Fourier-Kirchhoffovu rovnici rozepsat do některé ze souřadných soustav. Snažíme se zvolit takovou soustavu, aby co nejlépe popisovala plochy ohraničující těleso, protože na tyto plochy jsou obvykle zadávány okrajové podmínky. Nejčastěji používané soustavy souřadnic jsou kartézské, cylindrické a sférické [3].

5.3 Okrajové a počáteční podmínky

Fourier-Kirchhoffovu rovnici je nutno doplnit příslušnými okrajovými podmínkami. Vzhledem k tomu, že rovnice obsahuje pouze první derivaci teploty podle času, určuje se pouze jedna počáteční podmínka. Bývá formulovaná tak, že v určitém okamžiku teplotní rozložení $T|_{t=0} = T_0(x_i, t)$ známe.

Počet okrajových podmínek je dán dvojnásobkem (derivace teploty podle souřadnic jsou druhého řádu) počtu prostorových souřadnic. Mezi okrajové podmínky patří například [3]:

- **Okrajová podmínka prvního druhu**

V určitém místě tělesa je zadána teplota jako funkce souřadnic. V nestacionárních úlohách může záviset také na čase.

$$T|_{x=0} = T_s = konst. \quad (5.7)$$

Protože je povrchová teplota konstantní, musí všechny teplotní profily vycházet z jednoho bodu, měnit se bude pouze teplotní gradient. V praxi tyto úlohy můžeme uplatnit jen tehdy, pokud je součinitel prostupu tepla α_c na ploše styku tuhé a tekuté fáze velmi vysoký.

- **Okrajová podmínka druhého druhu**

Na povrchu tělesa je zadána hustota tepelného toku jako funkce polohy. Její hodnota může být konstantní nebo záviset na čase.

$$q_x|_{x=0} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = q_0. \quad (5.8)$$

- **Okrajová podmínka třetího druhu**

Je dána teplota prostředí T_f , které těleso obklopuje spolu se součinitelem přestupu tepla α_c . Ohříváme-li těleso, které má původní teplotu T_0 tím, že je vložíme do prostředí o teplotě T_f a známe hodnotu α_c , pak na povrchu musí platit podmínka spojitosti hustot tepelných toků, tedy že teplo převedené tělesu kondukcí je rovno teplu odvedenému z prostředí konvekcí. Třetí podmínka může být formulována takto:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = \alpha_c (T_f - T|_{x=0}). \quad (5.9)$$

Při platnosti této podmínky se v průběhu času bude měnit nejen teplota, ale i tepelný tok [3].

5.4 Přestup tepla do konstrukce

Nechráněná konstrukce

Obecně se nárůst teploty v ocelovém prvku vystaveném požáru řeší Fourier – Kirchhoffovou parciální diferenciální rovnicí neustáleného vedení tepla, viz (5.6). 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 Δt rovnoměrně rozloží a zvýší teplotu prvku o ΔT , neboli vstupující teplo se projeví nárůstem teploty podle vztahu [5]

$$q A_m \Delta t = \rho c V \Delta T, \quad (5.10)$$

kde q je čistý tepelný tok na plochu, A_m plocha povrchu prvku, ρ hustota oceli, c měrná tepelná kapacita a V objem prvku na jednotku délky. Po úpravě

$$\Delta T = (A_m/V)(1/\rho c) q \Delta t, \quad (5.11)$$

je patrné, že pro nechráněné prvky závisí vzrůst teploty oceli v čase na součiniteli průřezu A_m/V v m^{-1} . Výpočet součinitele průřezu je znázorněn v tab. 5.1. Čistý tepelný tok na plochu q se vypočte z rovnice (5.2).

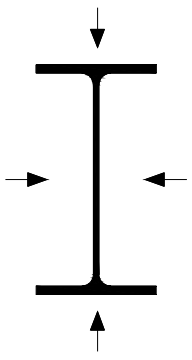
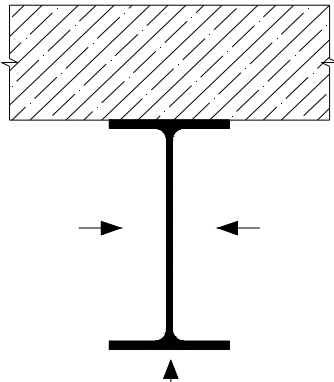
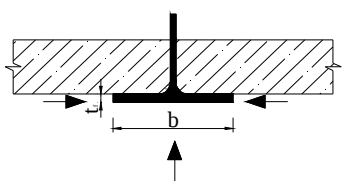
Řešení rovnice (5.10) po krocích popisuje rozvoj teploty v prvku. Postup je využit v normě [11] pro přírůstky času menší než 5 s, kde se využívá tvaru

$$\Delta T_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c\rho} q_{net,d} \Delta t, \quad (5.12)$$

kde k_{sh} je součinitel zastínění. Výraz nelze použít pro hodnoty A_m/V menší než 10 m^{-1} . Pro hodnoty nad 200 m^{-1} nemá řešení praktický význam, protože teplota oceli se prakticky rovná teplotě plynu, $T_{a,t} \cong T_{g,t}$. Ve vzorci značí $q_{net,d}$ návrhovou hodnotu tepelné pohltivosti od proudění a sálání vztaženou na jednotku plochy.

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

Tab. 5.1 Součinitel průřezu A_m/V nechráněných ocelových prvků

Otevřený průřez vystavený požáru ze všech stran: $A / V_m = \text{obvod průřezu} / \text{průřezová plocha}$ 	Otevřený průřez vystavený požáru ze tří stran: $A / V_m = \text{obvod průřezu vystavený požáru} / \text{průřezová plocha}$ 
Pásnice I průřezu vystavená požáru ze tří stran: $A_m / V = (b + 2 t_f) / (b t_f)$ pro $t \ll b$: $A_m / V = 1 / t_f$ 	

Přibližné přímé řešení dává konzervativní odhad požární odolnosti. Za předpokladu rovnoměrného rozložení teploty po průřezu lze čas t k ohřátí nechráněného ocelového profilu v minutách na teplotu T_a odhadnout ze vztahu

$$t = 0,54 (T_a - 50)(A_m/V)^{0,6}, \quad (5.13)$$

kde A_m/V je součinitel průřezu v m^{-1} . Výraz platí pro hodnoty 10 až 300 m^{-1} a teploty v rozsahu od 400°C do 600°C . Přibližně lze výraz použít od teploty 100°C po 700°C .

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 [5]. Při rovnoměrném rozložení teploty po průřezu se teplotní přírůstek $\Delta T_{a,t}$ v požárně izolovaném prvku za časový interval Δt určí z rovnováhy tepla přicházejícího z požárně ochranné vrstvy s teplem kumulovaným v požárně izolačním materiálu a v ocelovém prvku jako [11]

$$\Delta T_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (T_{g,t} - T_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \Phi / 3)} \Delta t - (e^{\Phi / 10} - 1) \Delta T_{g,t} \quad (\text{ale } \Delta T_{a,t} \geq 0 \text{ pro } \Delta T_{g,t} > 0), \quad (5.14)$$

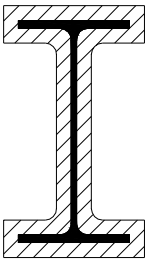
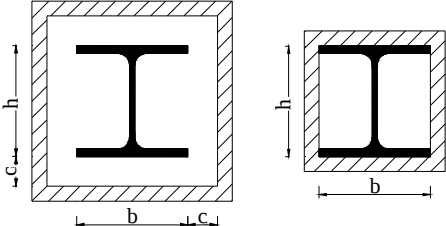
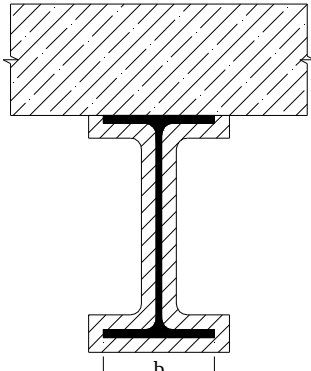
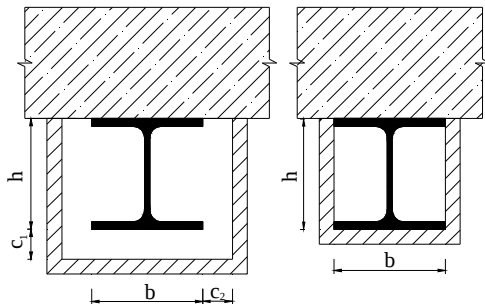
kde $\Phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$, λ_p je součinitel tepelné vodivosti požárně ochranného materiálu, A_p / V součinitel průřezu pro prvky s požárně ochranným materiálem. Výraz nelze použít pro A_p / V menší než 10 m^{-1} a pro hodnoty nad 350 m^{-1} již nemá řešení praktický význam, 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 [5], [11].

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.

Pro chráněné prvky jsou vztahy pro určení hodnot A_p / V v tab. 5.2 a v normě [11] je uveden graf zobrazující závislost teploty ocelového profilu izolovaného požárně ochranným materiálem $T_{a,t}$ na době trvání požáru t vypočtená podle (5.14) pro nominální normovou teplotní křivku a pro různé součinitele průřezu izolovaného požárně ochranným materiálem $(A_p / V)(\lambda / d)$ s přírůstky času $\Delta t = 30$ sekund. Tepelná jímavost požárně ochranného materiálu je konzervativně zanedbána, tj. předpokládá se

$$c_p \cdot \rho_p \approx 0, \text{ neboli } \Phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \approx 0 \text{ [5].}$$

Tab. 5.2 Součinitel průřezu A_p/V ocelových prvků izolovaných požárně ochranným materiálem

Zakrytí konstantní tloušťky podél celého povrchu: $A_p / V = \text{obvod průřezu} / \text{plocha ocelového průřezu}$ 	Truhlíkové zakrytí konstantní tloušťky: $A_p / V = 2(b + h) / \text{plocha ocelového průřezu}$ 
Zakrytí konstantní tloušťky vystavené požáru ze tří stran: $A_p / V = \text{obvod ocelového profilu} - b / \text{plocha ocelového průřezu}$ 	Truhlíkové zakrytí konstantní tloušťky vystavené požáru ze tří stran: $A_p / V = (2h + b) / \text{plocha ocelového průřezu}$ 

Přibližný přímý výpočet času k dosažení teploty T_a prvku izolovaného požárně ochranným materiálem vychází z předpokladu rovnoměrného rozložení teploty po průřezu. Čas t k dosažení teploty v min se stanoví ze vztahu

$$t = 40(T_a - 150) \left(\frac{d/\lambda}{A_p/V} \right)^{0,77} \quad (5.15)$$

Výraz vyjadřuje odolnost 30 až 240 min; tj. pro A_p/V od 10 m^{-1} až po 300 m^{-1} a pro d/λ od 0,1 do $0,3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ závislost teploty na čase dostatečně přesně [5].

5.5 Modelování požáru

Požární modelování popisuje nejen rozvoj tepla a kouře, ale celou událost požáru od rozhořívání po evakuaci a kolaps konstrukce [6]. Pro posuzování konstrukcí je rozhodující modelování plně rozvinutého požáru probíhajícího v celém prostoru požárního úseku. Modelování první fáze požáru umožňuje zajištění bezpečné evakuace osob, odvětrání prostoru, návrh únikových cest a shromažďovacích prostor při požáru [5].

Rozložení teplot v požárním úseku se dá předpovědět několika způsoby. Je možné využít normové nominální křivky, která ale neuvažuje některé faktory ovlivňující chování skutečného požáru, tudíž její použití vykazuje nepřesnosti [7].

Dále se používají zjednodušené a zdokonalené modely požáru, které jsou založeny na fyzikálních parametrech. Zjednodušené modely mají omezený rozsah použití. Vychází se z návrhové hustoty požárního zatížení. Pro prostorové požáry v požárním úseku se předpokládá rovnoměrné a pro lokální požáry nerovnoměrné rozložení teploty [6].

Zdokonalené modely uvažují všechny hlavní faktory ovlivňující požár jako je výměna plynu, hmotnostní výměna a energetická výměna. Je možné využít jednozónový model, dvouzónový model nebo výpočtové dynamické modely kapalin a plynů. Jednozónový model uvažuje rovnoměrné, časově závislé rozdělení tepla v požárním úseku. Dvouzónový model předpokládá proměnnou tloušťku horní vrstvy kouře s rovnoměrnou teplotou a dolní vrstvu o nižší teplotě [6]. Dynamické modely kapalin a plynů umožňují nejkvalitnější řešení. Využívají 3D modelování úseků, které jsou popisovány, stanovují tedy vývoj teploty v úseku v čase i v prostoru [5], [6].

Praktická část této práce byla provedena v programu ANSYS, který pracuje na principu metody konečných prvků. Pro řešení tepelné analýzy byly použity následující prvky:

- **PLANE 55**

PLANE 55 může být použit jako rovinný nebo osově symetrický prvek. Má čtyři uzly s jedním neznámým parametrem, a to teplotou v každém uzlu. Element je možno použít pro výpočet ustálené nebo neustálené tepelné analýzy [4].

- **SOLID 70**

Prvek SOLID 70 umožňuje řešit prostorové úlohy. Má osm uzlů s jedním neznámým parametrem, a to teplotou v každém uzlu. SOLID 70 umožňuje výpočet ustálené nebo neustálené 3-D tepelné analýzy. [4].

6 Statická analýza

Kapitola se zabývá metodikou posuzování ocelových konstrukcí na požár, zatížením při mimořádných situacích a návrhem ocelového nosníku na požární situaci.

6.1 Metodika posuzování ocelových konstrukcí na požár

Požární odolnost ocelových konstrukcí je založena na jejich konstrukční celistvosti při mimořádných situacích. Nevýhodou oceli je její malá odolnost vůči požáru způsobená dobrou tepelnou vodivostí. Materiálové vlastnosti oceli se při vysokých teplotách vznikajících při požáru redukuje.

Při požáru dochází k poklesu pevnostních charakteristik oceli (tab. 6.1), zejména pak meze kluzu a Youngova modulu pružnosti E . Pokud je pokles meze kluzu v důsledku požáru tak vysoký, že jeho hodnota klesne pod okamžité napětí v ocelovém prvku, konstrukční prvek se zdeformuje nebo poruší. Teplota, při níž k tomu dojde, se označuje jako kritická teplota a u běžných typů konstrukčních ocelí dosahuje přibližně 550 °C [14], může se však měnit v závislosti na velikosti konstrukčního prvku. Při této teplotě si ocel zachovává pouze 60 % své původní meze kluzu a 45 % původního modulu pružnosti za laboratorní teploty.

Tab. 6.1 Změny chování oceli při zvyšující se teplotě [14]

Teplota [°C]	Změny chování oceli
400	oblast beze změn meze kluzu
450 do 650	zvyšování duktility a tažnosti
od 750	rekrytalizace a významná redukce pevnosti
do 900	měknutí a ztráta pevnosti

Při posuzování ocelových konstrukcí na požár dle platných návrhových norem se vychází z posouzení konstrukce za pokojové teploty.

Jednoduché konstrukce se navrhují:

- pomocí grafů
- po prvcích nebo po částech konstrukce.

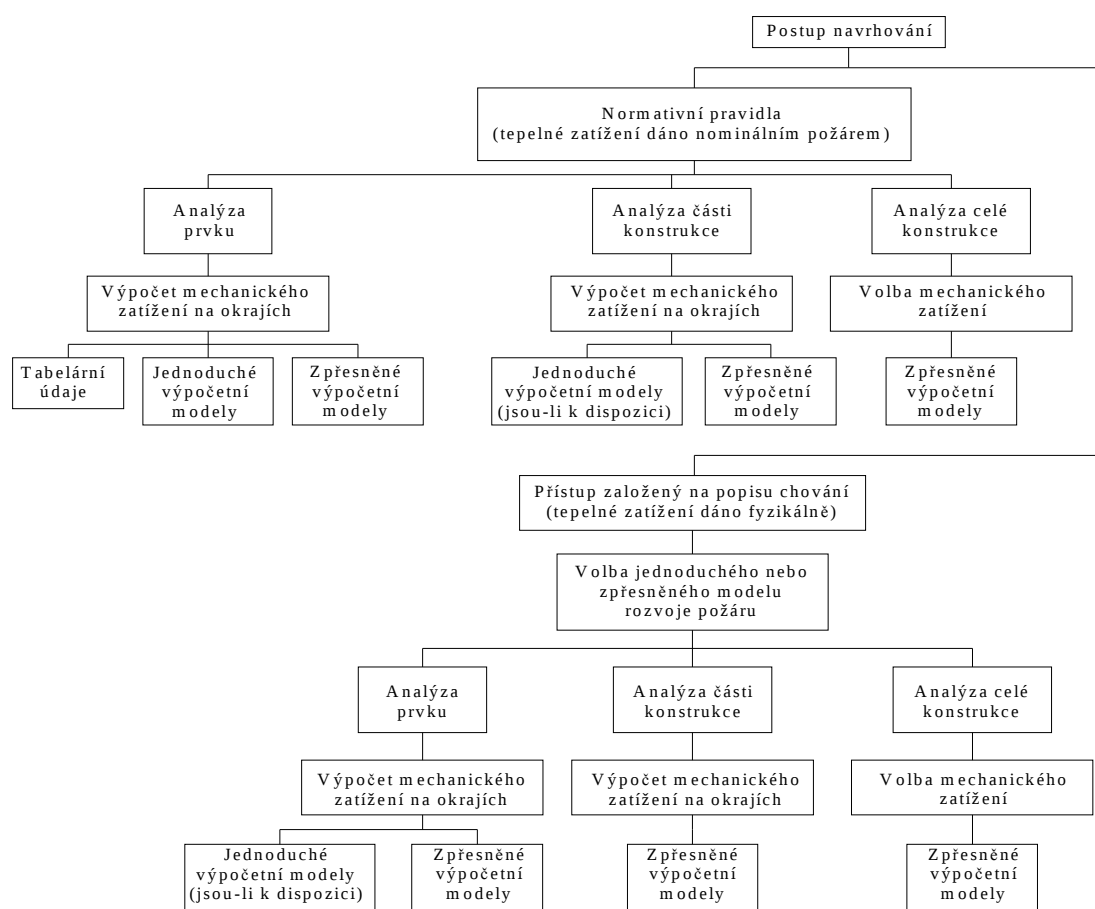
Složitější konstrukce se řeší:

- analytickými modely,
- metodou konečných prvků,
- přesněji jako celek.

Teplota plynu v požárním úseku se počítá pro dané požární zatížení nebo se odhaduje pomocí nominálních teplotních křivek. Z teploty plynu se určí teplota konstrukce přírůstkovou metodou pro požárně chráněné nebo nechráněné prvky. Zatížení

při mimořádné situaci zatížení požárem se určuje a kombinuje podle norem pro zatížení. V praxi se prvky a styčníky posuzují přednostně podle času, kdy je odolnost přímo vyjádřena v minutách. Při jednoduchém výpočtu se z rezervy v zatížení, která se vyjadřuje součinitelem stupně využití, stanoví kritická teplota a její dosažení v čase se porovná s požadovanou odolností. Posouzení z hlediska únosnosti je výhodné pro náročnější výpočty. Z materiálových charakteristik za vysoké teploty se vypočte únosnost v požadovaném čase a ta se porovná s účinky zatížení na konstrukci při požáru [5].

Postup navrhování ocelových konstrukcí je naznačen na obr. 6.1 [11].



Obr. 6.1 Postup navrhování [11]

Pro řešení statické analýzy lze v programovém systému ANSYS použít následující prvky PLANE 182 a SOLID 185.

- **PLANE 182**

PLANE 182 se používá pro modelování rovinných úloh. Může být použit pro úlohu rovinné napjatosti, rovinné deformace nebo úlohu osově symetrickou. Prvek je definovaný čtyřmi uzly se dvěma neznámými parametry v každém uzlu, a to posuvu ve směru osy

x a y . Prvek umožňuje modelovat plasticitu, hyperelasticitu, vliv napjatosti na tuhost konstrukce, tečení, velké průhyby a deformace [4].

- **SOLID 185**

Tento prvek je používán pro modelování prostorových těles. Je definovaný osmi uzly, v každém z nich jsou tři stupně volnosti (posuvy v ose x , y a z). Prvek umožňuje modelovat plasticitu, hyperelasticitu, vliv napjatosti na tuhost konstrukce, tečení, velké průhyby a deformace [4].

6.2 Zatížení při požáru

Zatížení při požáru E_d se stanoví podle obecného pravidla pro mimořádné návrhové situace dle [12]

$$E_d = E \{ G_{k,j}; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1, \quad (6.1)$$

kde symbol $G_{k,j}$ označuje stálá zatížení, A_d mimořádné zatížení, $Q_{k,1}$ hlavní proměnné zatížení a $Q_{k,i}$ vedlejší proměnné zatížení. Hodnoty součinitelů $\psi_{1,i}$ a $\psi_{2,i}$ jsou pro častou a kvazistálou hodnotu proměnných zatížení pozemních staveb dány v normě [12], např. pro skladovací plochy $\psi_1 = 0,9$ a $\psi_2 = 0,8$. Kombinace zatížení ve vztahu (6.1) lze vyjádřit výrazem

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.2)$$

Pro mimořádnou situaci požáru objektu norma [10] doporučuje uvažovat kvazistálou hodnotu $\psi_{2,1} Q_{k,1}$. Avšak u některých objektů zejména u halových konstrukcí, u nichž je zatížení sněhem nebo větrem hlavním proměnným zatížením, se doporučuje uvažovat častou hodnotu $\psi_{1,1} Q_{k,1}$ místo kvazistálé hodnoty $\psi_{2,1} Q_{k,1}$ [5].

Teplotní změny konstrukce při požáru se projeví účinky teploty na vlastnosti materiálu a jako nepřímá zatížení od teplotních změn. Nepřímá zatížení konstrukce v důsledku roztažení a přetvoření, způsobená teplotními změnami od požáru, vyvolávají síly a momenty, které se při výpočtu účinků zatížení podle obecných vztahů (6.1, 6.2) berou v úvahu. Tato nepřímá zatížení se při výpočtu neuvažují, pokud jsou zanedbatelná nebo příznivá, přihlíží se k nim konzervativními předpoklady výpočtu konstrukce a/nebo konzervativními požadavky na požární bezpečnost. Pokud se nepřímá zatížení uvažují, mají se brát v úvahu [5]:

- vyvolaná teplotní roztažení prvků,
- rozdílná přetvoření staticky neurčitých prvků od teploty,
- teplotní gradienty v průřezu vyvolávající vnitřní napětí,
- přetvoření přilehlých prvků od teploty,
- teplotní roztažení prvků působících na prvky mimo požární úsek.

Ostatní zatížení uvedená kombinačních v pravidlech (6.1, 6.2), která se mohou během požáru vyskytnout, se uvažují podobně jako při návrhu pro pokojovou teplotu.

Současné působení požáru s jiným nezávislým mimořádným zatížením se obvykle neuvažuje. V závislosti na konkrétních podmínkách daného objektu mohou být během působení požáru uplatněna druhotná zatížení vyvolaná požárem, např. ráz vyvolaný zřícením nosného prvku [10].

Vzhledem k tomu, že účinky zatížení $E_{fi,d,t}$ jsou v důsledku nepřímých zatížení od požáru závislé na čase t od vzniku požáru, a tudíž jejich stanovení může být obtížné, je v normě [10] zavedeno zjednodušení pro analýzu prvků. Dle tohoto zjednodušení se zatížení určí pouze v čase $t = 0$. V tomto čase dochází ke vzniku požáru, tedy je zde uvažována pokojová teplota. Tyto účinky zatížení $E_{fi,d}$ se mohou uvažovat konstantní během celého trvání požáru [10]

$$E_{fi,d,t} \cong E_{fi,d}. \quad (6.3)$$

Výpočet lze zjednodušit tím, že se konstantní účinky zatížení při požáru $E_{fi,d}$ (nezávislé na čase t) odvodí z účinků E_d stanovených v návrhu pro pokojovou teplotu

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d, \quad (6.4)$$

kde E_d je návrhová hodnota účinků zatížení stanovená na základě kombinačních pravidel uvedených v normě [12] a η_{fi} je redukční součinitel účinku zatížení, který závisí na použitém kombinačním pravidlu pro stanovení E_d , dílčích součinitelích zatížení γ_G , γ_Q a kombinačních součinitelích $\psi_{1,i}$ popřípadě $\psi_{2,i}$. Pro jednoduchý případ konstrukčního prvku, který přenáší pouze jedno stálé zatížení G_k a jedno (hlavní) proměnné zatížení $Q_{k,1}$ je objasněn význam redukčního součinitele zatížení η_{fi} . Účinek zatížení podle vztahu (6.2) je v tomto případě dán jednoduchou kombinací [5]

$$E_{fi,d} = G_k + \psi_{2,1} Q_{k,1}. \quad (6.5)$$

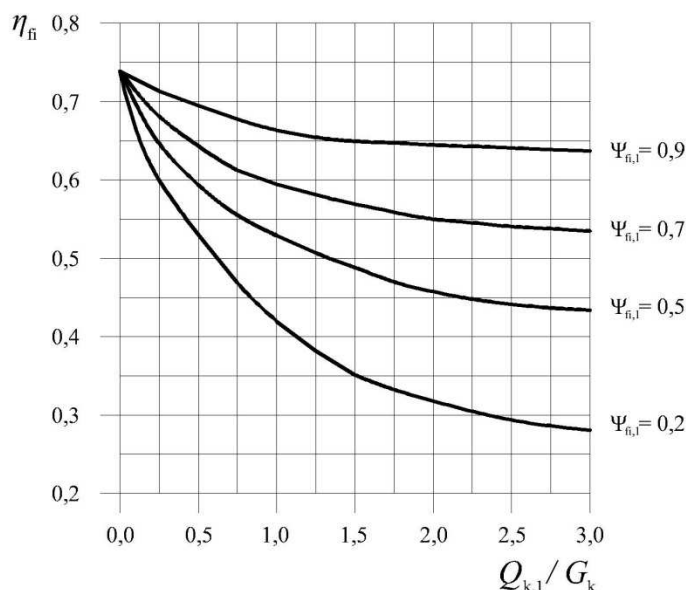
Zatížení podle vztahu (6.10) v normě [10] pro základní kombinaci zatížení je

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \quad (6.6)$$

Podle rovnice (3.4) je redukční součinitel η_{fi} dán poměrem zatížení $E_{fi,d}$ a E_d . Vzhledem k rovnicím (6.5, 6.6) platí

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} = \frac{G_k + \psi_{2,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} = \frac{1 + \psi_{2,1} Q_{k,1}/G_k}{\gamma_G + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}/G_k}. \quad (6.7)$$

Na obr. 6.1 je závislost redukčního součinitele účinku zatížení η_{fi} daného vztahem (6.7) na poměru charakteristických hodnot zatížení $Q_{k,1}/G_k$ pro dílčí součinitele $\gamma_G = 1,35$; $\gamma_{Q,1} = 1,5$ doporučené v normě [12] a pro vybrané hodnoty součinitele $\psi_{2,1}$. Pro zjednodušení výpočtů lze ale uvažovat přibližné konzervativní hodnoty součinitele účinku zatížení η_{fi} . Pro ocelové, ocelobetonové a hliníkové konstrukce se počítá s $\eta_{fi} = 0,65$ s výjimkou skladů, kde se uvažuje $\eta_{fi} = 0,7$ [5], [10].



Obr. 6.1 Závislost redukčního součinitele η_{fi} na poměru Q_{kl}/G_k pro $\gamma_G = 1,35$; $\gamma_{Q,1} = 1,5$ a vybrané hodnoty součinitele $\psi_{2,1}$ [19]

6.3 Nosníky při požáru

Při požáru jsou volně uložené nosníky ovlivněny nerovnoměrným ohříváním průřezu a nosníku po jeho délce a ohybovou tuhostí styčníků. Nerovnoměrné rozložení podél rozpětí nosník nedeformuje a při výpočtech je možné ho zanedbat, ale nerovnoměrné ohřátí po výšce nosníku způsobuje příčnou deformaci [5]. Každý přípoj má ohybovou tuhost. Při zvyšování teploty bude například nosník, který je za pokojové teploty uložen kloubově, dokonale vetknut při teplotě zhruba 870°C. Částečné vetknutí se projevuje už od počátku zahřívání [5].

V konstrukci je podélné roztažení i natočení nosníku omezeno. Vlivem zahřívání nosníku ztrácí tlačená spodní pásnice u podpor stabilitu a místně vybočí, čímž se zvýší průhyb nosníku. Díky velkému průhybu a klesající ohybové tuhosti ve středu nosníku působí v podporách tahové síly a soustava se chová jako tažené vlákno. Kolaps nosníku závisí na únosnosti styčníků v tahu a na schopnosti konstrukce tahové síly přenést [5]. Kolaps nosníku při požáru ocelové haly je znázorněn na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Kolaps nosníku při požáru ocelové haly [9]

Při návrhu podle [11] se neuvažuje s vlivem tuhosti podpor, s teplotní roztažností ani s působením nosníku jako taženého vlákna. Jestliže se uvažuje nerovnoměrné rozložení teploty po průřezu, modifikuje se na základě tohoto rozdělení teplot návrhová únosnost za běžné teploty.

Klasifikace průřezů

Průřezy pro jednoduché výpočetní modely je možné klasifikovat jako při návrhu za běžné teploty s použitím upravené hodnoty ε_p podle výrazu [11]

$$\varepsilon_p = 0,85 \left[235/f_y \right]^{0,5}, \quad (6.8)$$

kde f_y je mez kluzu při 20 °C a redukční součinitel 0,85 zahrnuje vlivy od rostoucí teploty.

Návrh nosníků s průřezy 1 a 2

Návrhová momentová únosnost průřezů s rovnoměrnou teplotou T_a se určí z výrazu [11]

$$M_{fi,T,Rd} = k_{y,T} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] M_{pl,Rd}, \quad (6.9)$$

kde $M_{pl,Rd}$ je plastická momentová únosnost neoslabeného průřezu a $k_{y,T}$ redukční součinitel meze kluzu při teplotě oceli T_a . Hodnoty tohoto součinitele jsou uvedeny v normě [11].

Pokud je uvažováno nerovnoměrné rozložení teploty po průřezu v čase t může být návrhová momentová únosnost určena ze vztahu

$$M_{fi,T,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,T,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi}, \quad (6.10)$$

kde z_i je vzdálenost neutrální osy zplastizovaného průřezu od těžiště dílčí plochy A_i , $f_{y,i}$ účinná mez kluzu f_y dílčí plochy A_i , která se bere jako kladná na tlačené straně neutrální osy zplastizovaného průřezu a záporná na tažené straně, A_i je dílčí plocha části průřezu prvku s teplotou T_i a $k_{y,T,i}$ redukční součinitel meze kluzu oceli při teplotě T_i [5].

Návrhovou momentovou únosnost prvků třídy 1 nebo 2 při rovnoměrném rozložení teploty lze určit i konzervativním odhadem z výrazu [11]

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,T,Rd} / \kappa_1 \kappa_2, \quad (6.11)$$

kde $M_{fi,T,Rd}$ je momentová únosnost neoslabeného průřezu pro rovnoměrné rozdělení teploty T_a rovné teplotě T_a v čase t v průřezu, který není teplotně ovlivněn podporami, κ_1 je součinitel podmínek pro nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu, κ_2 je součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty podél nosníku.

Součinitelé nabývají následujících hodnot:

- nosník, který je vystaven požáru ze všech čtyř stran $\kappa_1 = 1,00$
- nechráněný nosník, který je vystaven požáru ze tří stran,
se spřaženou nebo betonovou deskou na straně čtvrté $\kappa_1 = 0,70$
- chráněný nosník, který je vystaven požáru ze tří stran,
se spřaženou nebo betonovou deskou na straně čtvrté $\kappa_1 = 0,85$
- v podporách staticky neurčitého nosníku $\kappa_2 = 0,85$
- ve všech ostatních případech $\kappa_1 = 1,00$

Pokud nosník s průřezem třídy 1 nebo 2 není zajištěn proti ztrátě stability při ohybu, návrhová momentová únosnost se stanoví ze vztahu [11]

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,T,com} f_y / \gamma_{M,fi}, \quad (6.12)$$

kde $\chi_{LT,fi}$ je součinitel klopení při návrhové požární situaci a jeho hodnota se určí dle [11], $k_{y,T,com}$ je redukční součinitel meze kluzu oceli pro nejvyšší teplotu tlačené pásnice $T_{a,com}$, která byla dosažena v čase t .

Únosnost ve smyku se pro průřezy třídy 1 a 2 při vzrůstající teplotě spočítá podle vztahu

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,T,web} V_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}], \quad (6.13)$$

kde V_{Rd} je smyková únosnost neoslabeného průřezu při běžné teplotě, $k_{y,T,web}$ je redukční součinitel meze kluzu oceli pro průměrnou teplotu stojiny průřezu T_{web} .

Tlak s ohybem

Kombinace osově síly a ohybu, případně ohybu ve směru obou os, lze posoudit metodou konečných prvků s desko-stěnovými prvky nebo lze využít nebo lze využít znalostí o chování při jednotlivých namáháních samostatně a únosnost vypočítat z interakce všech vlivů [5]. V normě [11] je uveden výraz pro kombinaci namáhání nosníku tlakem a ohybem k oběma osám pro posouzení za teploty T

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,T,maxfy}/\gamma_{M,fi}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,T,maxfy}/\gamma_{M,fi}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} k_{y,T,maxfy}/\gamma_{M,fi}} \leq 1. \quad (6.14)$$

Alternativně může být návrhová únosnost stanovena pomocí kritické teploty T_{cr} . Pokud se nemusí uvažovat deformační kritéria nebo stabilitní jevy, může se kritická teplota v čase t při rovnoměrném rozdělení teploty po průřezu pro libovolný stupeň využití μ_0 v čase $t = 0$ určit výrazem [11]

$$T_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482,$$

kde μ_0 nesmí být menší než 0,013.

Pro prvky s průřezy třídy 1, 2, 3 a pro všechny tažené prvky může být stupeň využití μ_0 v čase $t = 0$ určen výrazem

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}},$$

kde $R_{fi,d,0}$ je hodnota $R_{fi,d,t}$ v čase $t = 0$.

7 Vývoj rozdělení teplot v ocelovém průřezu

První praktická část diplomové práce se zabývá změnou rozdělení teplot v čase při zatížení ocelového průřezu vysokými teplotami dle nominální křivky, viz kapitola 3.1. Sleduje se rychlost ohřátí průřezů na danou teplotu a porovnává se vliv tepelně izolačních nástřiků a obetonování ocelových prvků na rychlost prohřátí průřezu.

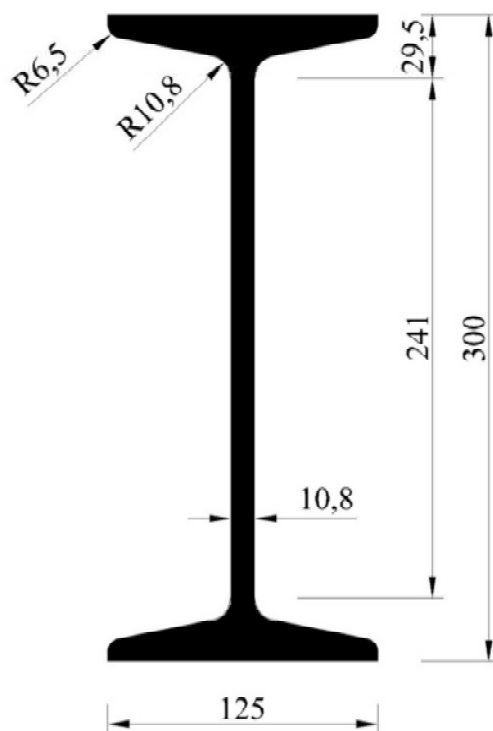
Studie byla provedena na ocelovém válcovaném průřezu I300 (obr. 7.1) zatíženém teplotami proměnnými v čase dle nominální křivky v rozsahu od 20 do 700 °C, kterých může konstrukce při požáru reálně dosáhnout. Průřez byl namodelován v programovém systému ANSYS jako rovinná úloha s využitím prvku PLANE 55 a pro výpočet byla použita analýza neustáleného vedení tepla. Úloha byla modelována v pěti variantách:

1. nechráněný ocelový průřez,
2. ocelový průřez chráněný vermikulitovým nástřikem,
3. obetonovaný ocelový průřez,
4. obetonovaný ocelový průřez,
5. ocelový průřez obložený vermikulitovými deskami.

Výsledky jednotlivých variant byly vyhodnoceny a vzájemně srovnány.

Ve všech variantách byl uvažován průřez I300, vyrobený z oceli S235.

- základní rozměry průřezu I300:



Obr. 7.1 Geometrie průřezu I300

- materiálové charakteristiky:
 - o hustota: $\rho = 7850$ kg m⁻³
 - o měrná tepelná kapacita c : viz tab. 7.1
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : viz tab. 7.1

Tab. 7.1 Hodnoty měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě

Teplota T [°C]	Měrná tepelná kapacita c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]
20	440	53,3
100	488	51,0
200	530	47,0
300	565	44,0
400	606	41,0
500	667	37,0
600	760	34,0
700	1008	30,0

- zatížení:
 - o teplota T : $T = 20 - 700$ °C
- okrajové podmínky:
 - o teplota mění se v čase
 - o pro jednoduchost teplota zadána přímo na vnější povrch průřezu (zanedbání přestupu tepla a vliv záření [3])
- vyhodnocení:
 - o na obr. 7.2 jsou uvedena místa pro sledování vývoje teploty

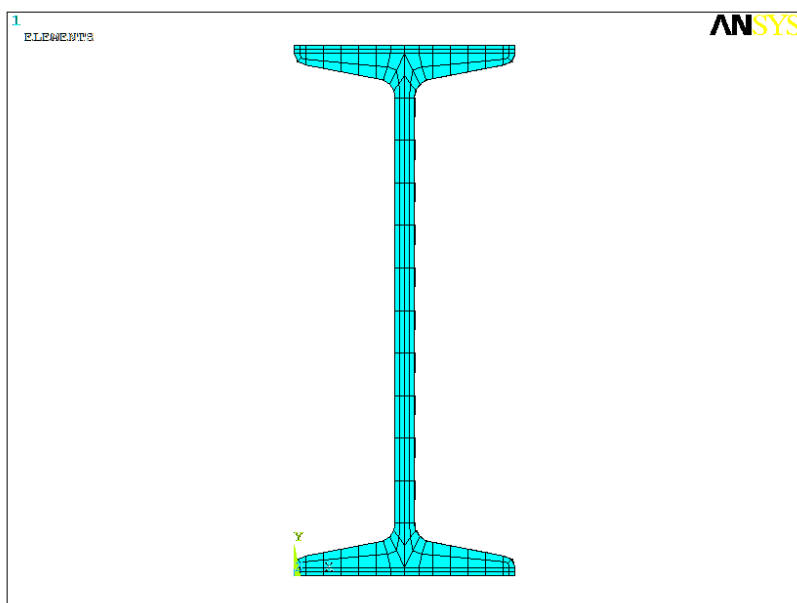


Obr. 7.2 Sledovaná místa pro vyhodnocení vývoje teploty

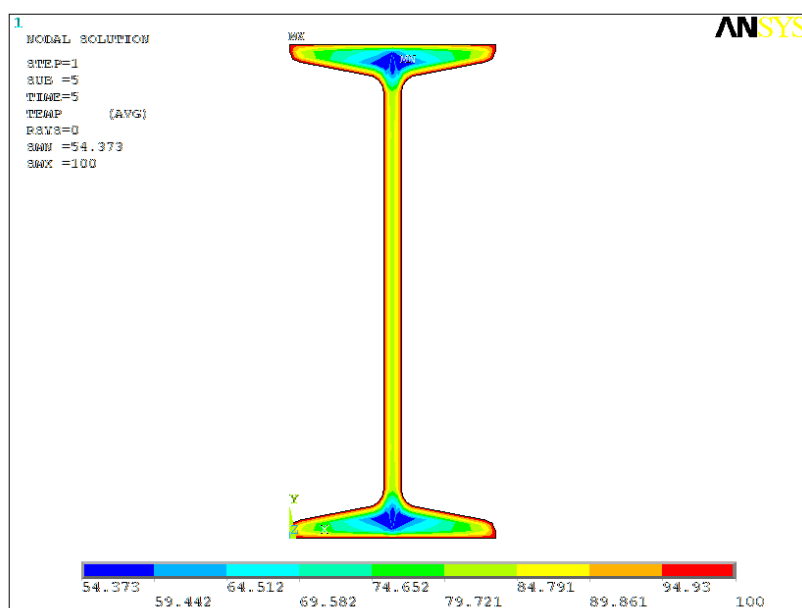
1. varianta – nechráněný ocelový průřez

Pro nechráněný ocelový průřez byla provedena konvergenční analýza, která uvažovala různé počty prvků po tloušťce stojiny i pásnice. Odzkoušeny byly varianty 4, 6, 8, 10 a 12 prvků (obr. 7.3, 7.5, 7.7, 7.9, 7.11). Průřez byl vyhodnocován po 5 sekundách zatížení dle nominální křivky, kdy teplota na vnějším povrchu průřezu dosáhne 100 °C. Při vyhodnocení byly sledovány teploty ve dvou místech na průřezu, ve středu stojiny a ve středu pásnice viz obr. 7.2.

4 prvky po tloušťce stojiny i pásnice

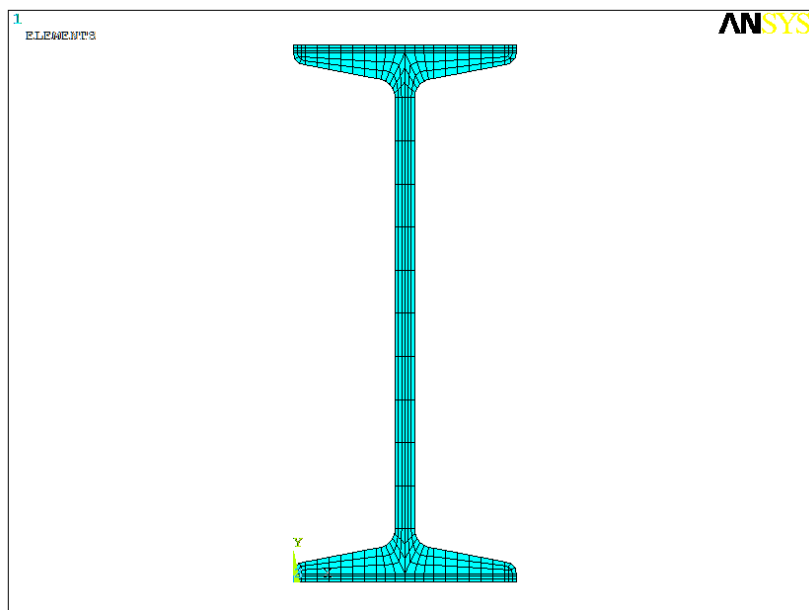


Obr. 7.3 Model sítě konečných prvků se čtyřmi prvky po tloušťce

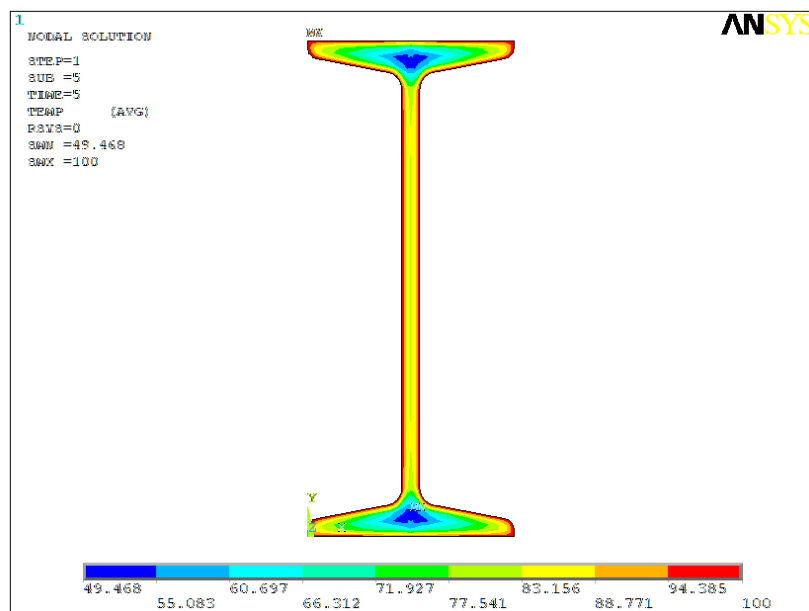


Obr. 7.4 Rozložení teploty v průřezu při využití sítě se čtyřmi prvky po tloušťce

6 prvků po tloušťce stojiny i pásnice

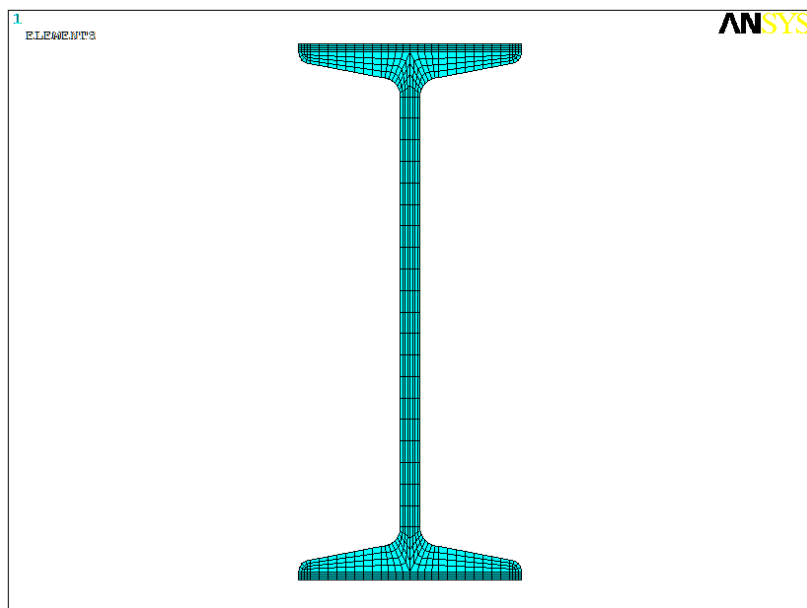


Obr. 7.5 Model sítě konečných prvků se šesti prvky po tloušťce

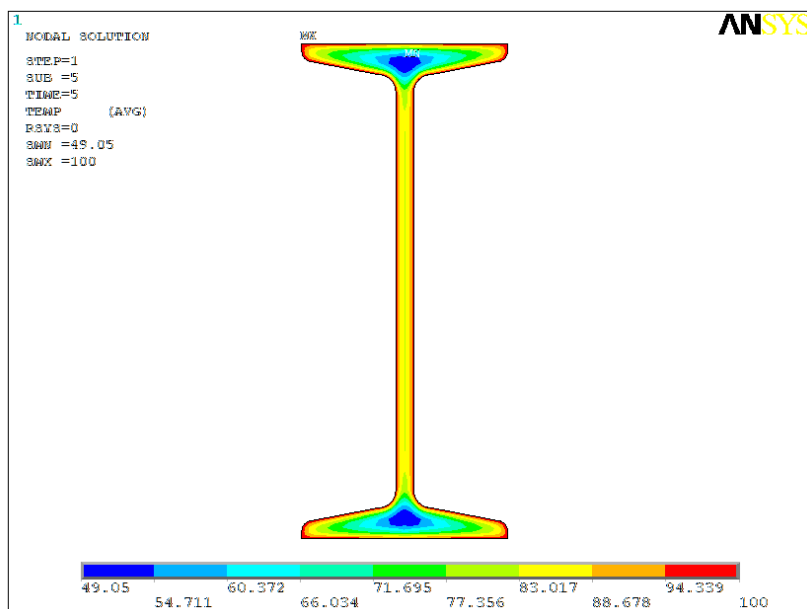


Obr. 7.6 Rozložení teploty v průřezu při využití sítě se šesti prvky po tloušťce

8 prvků po tloušťce stojiny i pásnice

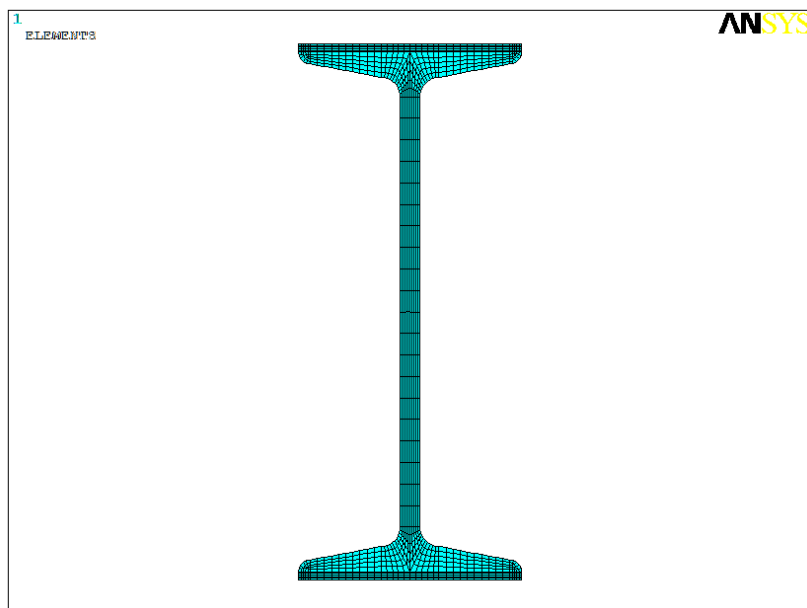


Obr. 7.7 Model sítě konečných prvků s osmi prvky po tloušťce

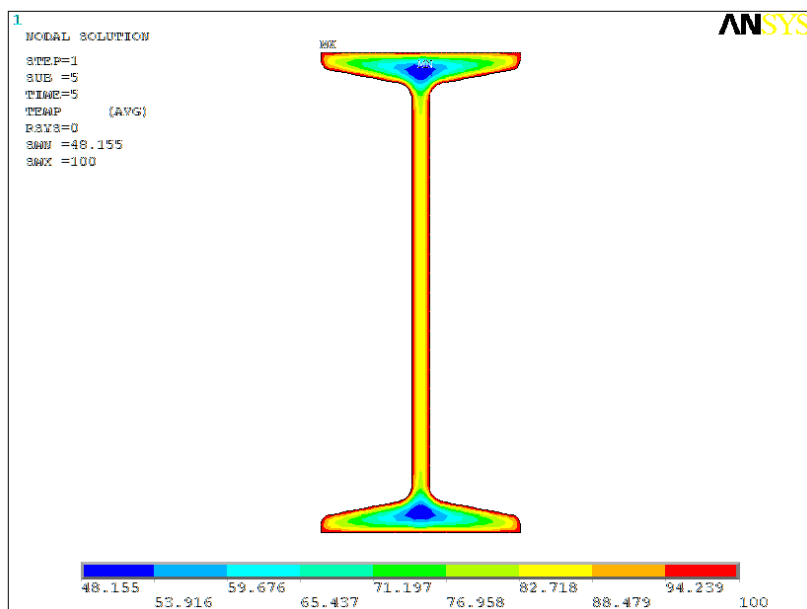


Obr. 7.8 Rozložení teploty v průřezu při využití sítě s osmi prvky po tloušťce

10 prvků po tloušťce stojiny i pásnice

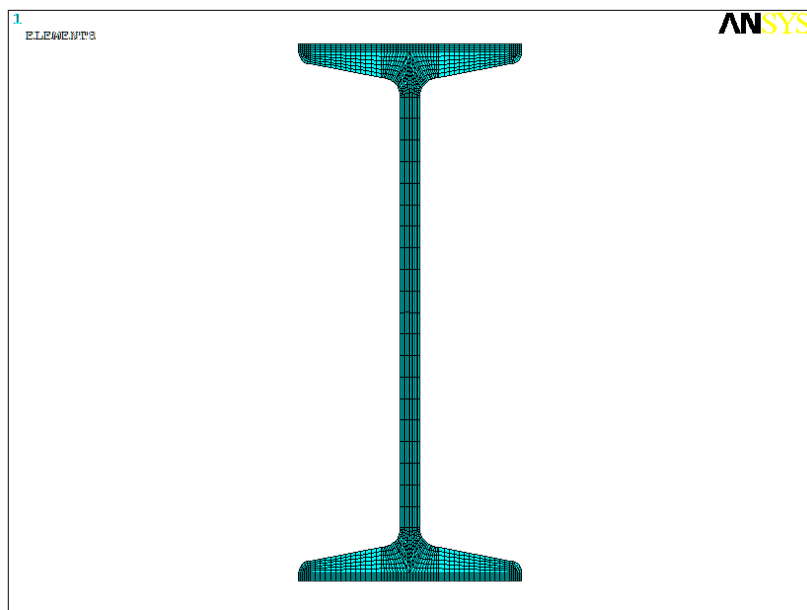


Obr. 7.9 Model sítě konečných prvků s deseti prvky po tloušťce

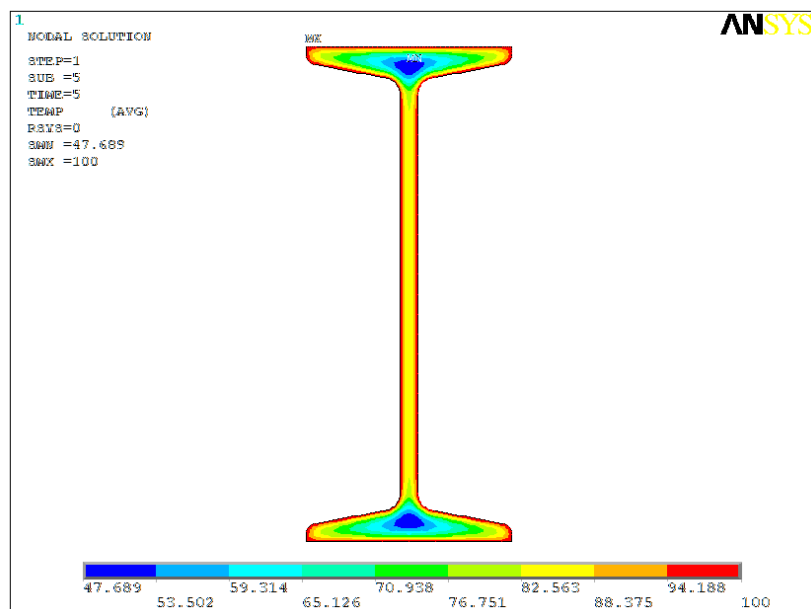


Obr. 7.10 Rozložení teploty v průřezu při využití sítě s deseti prvky po tloušťce

12 prvků po tloušťce stojiny i pásnice



Obr. 7.11 Model sítě konečných prvků s dvanácti prvky po tloušťce



Obr. 7.12 Rozložení teploty v průřezu při využití sítě s dvanácti prvky po tloušťce

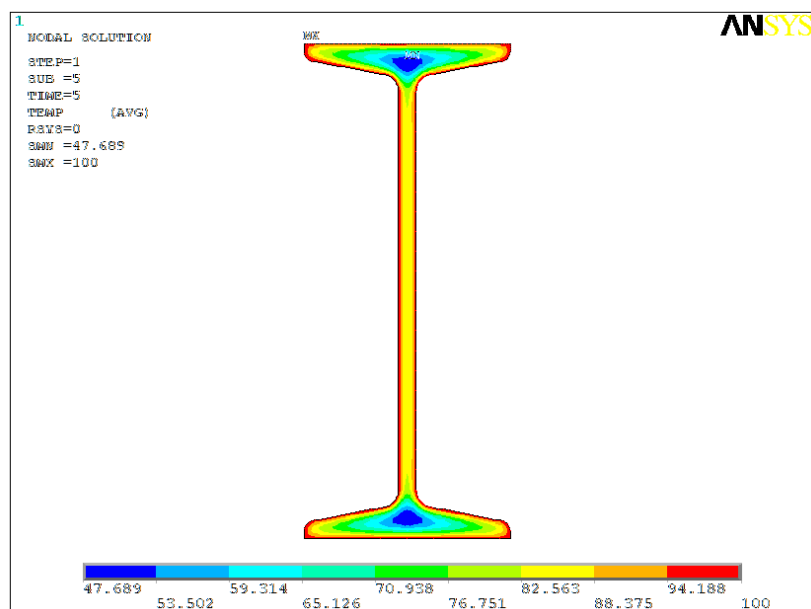
Tab. 7.2 Vyhodnocení konvergenční analýzy

Počet prvků po tloušťce stojiny i pásnice	$T [^{\circ}\text{C}]$ ve středu stojiny	$T [^{\circ}\text{C}]$ ve středu pásnice
4	82,95	56,20
6	82,92	49,47
8	82,91	49,05
10	82,90	48,89
12	82,90	48,74

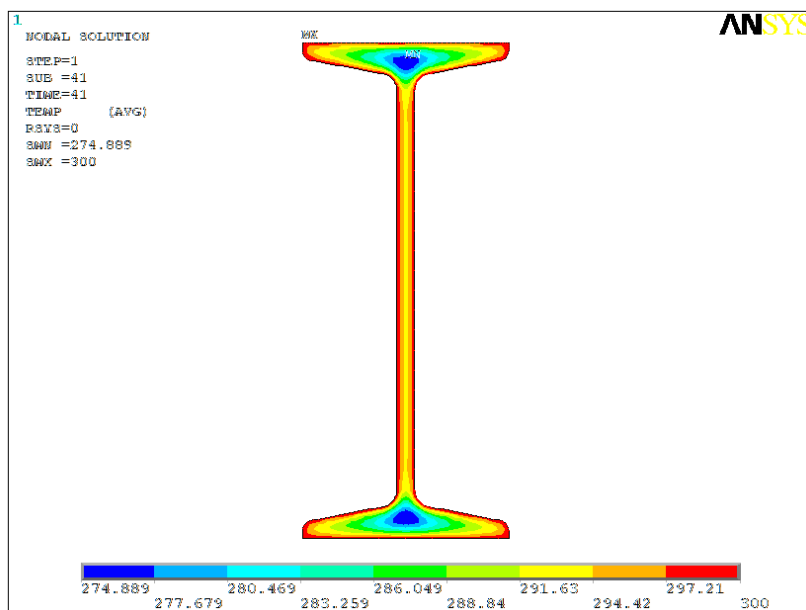
Z výsledků konvergenční analýzy je patrné, že ke sledování změny rozložení teplot v ocelovém průřezu je dostačující dělení, kdy je stojina i pásnice rozdělena již na šest prvků po tloušťce. Hodnoty teploty ve sledovaných místech se totiž přibližně shodují s hodnotami zjištěnými výpočty s hustější sítí. Ovšem kvůli přesnějšímu vykreslení teplotního rozložení v prvku a vzhledem k rychlosti analýzy byla dále ve výpočtu volena síť, kde je stojina i pásnice po tloušťce rozdělena na deset prvků.

Výsledky vývoje rozložení teplot pro nechráněný průřez

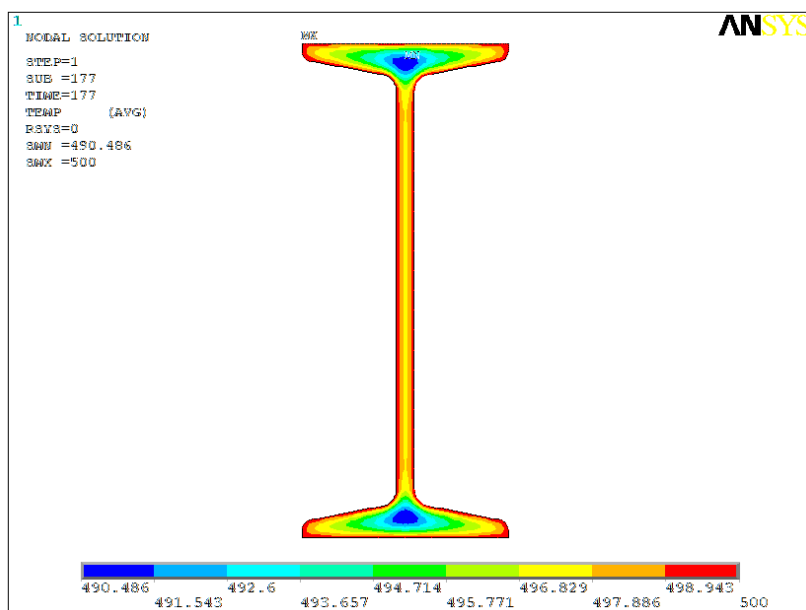
Na obrázcích 7.13, 7.14, 7.15, 7.16 jsou zobrazeny změny rozložení teploty v nechráněném průřezu v čase 5, 41, 177 a 694 s při zatížení teplotou T na vnějším povrchu uvažovaného průřezu. Z obrázků je patrné, že ocel má velmi dobrou tepelnou vodivost.



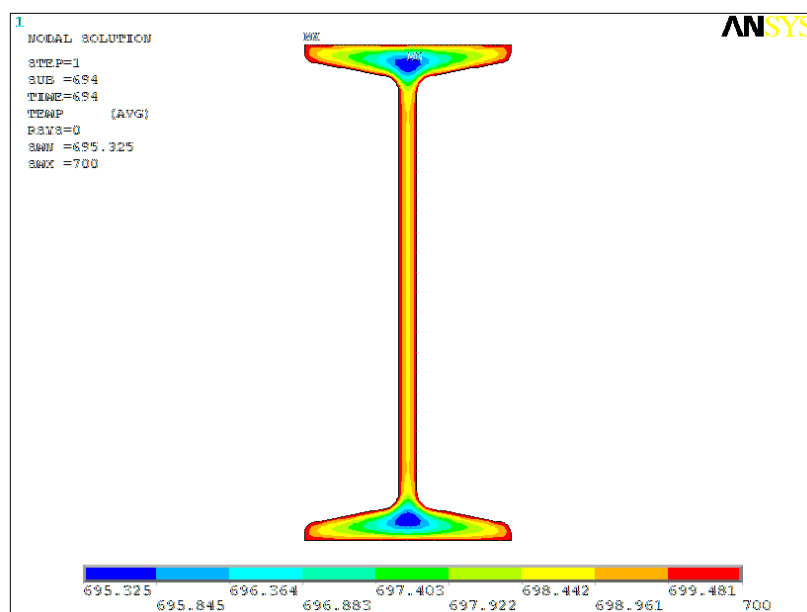
Obr. 7.13 Rozložení teploty v nechráněném průřezu (1. varianta, $T = 100^{\circ}\text{C}$, $t = 5\text{ s}$)



Obr. 7.14 Rozložení teploty v nechráněném průřezu (1. varianta, $T = 300\text{ °C}$, $t = 41\text{ s}$)



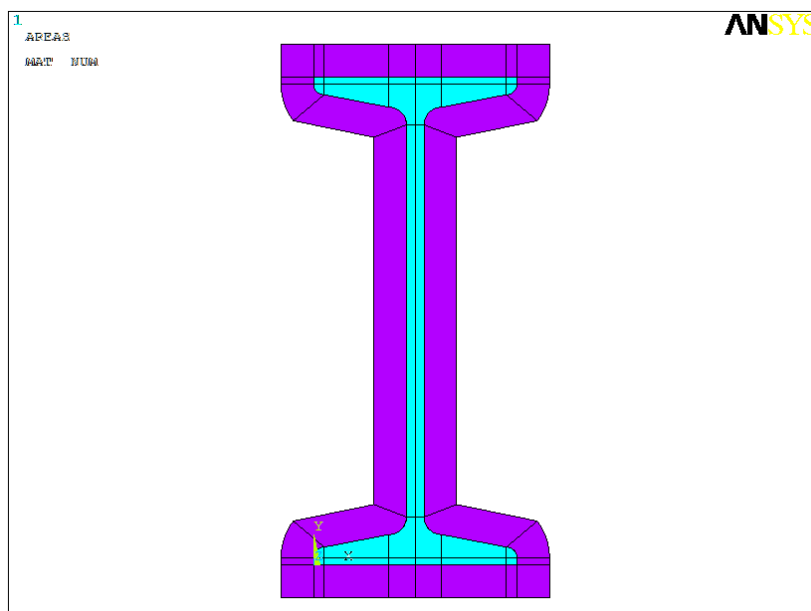
Obr. 7.15 Rozložení teploty v nechráněném průřezu (1. varianta, $T = 500\text{ °C}$, $t = 177\text{ s}$)



Obr. 7.16 Rozložení teploty v nechráněném průřezu (1. varianta, $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 694\text{ s}$)

2. varianta – ocelový průřez chráněný nástřikem

V této variantě výpočtu bylo uvažováno, že ocelový průřez je chráněn vermikulitovým protipožárním nástřikem o tloušťce 20 mm. Profil I300 chráněný nástřikem je zobrazen na obr. 7.17.

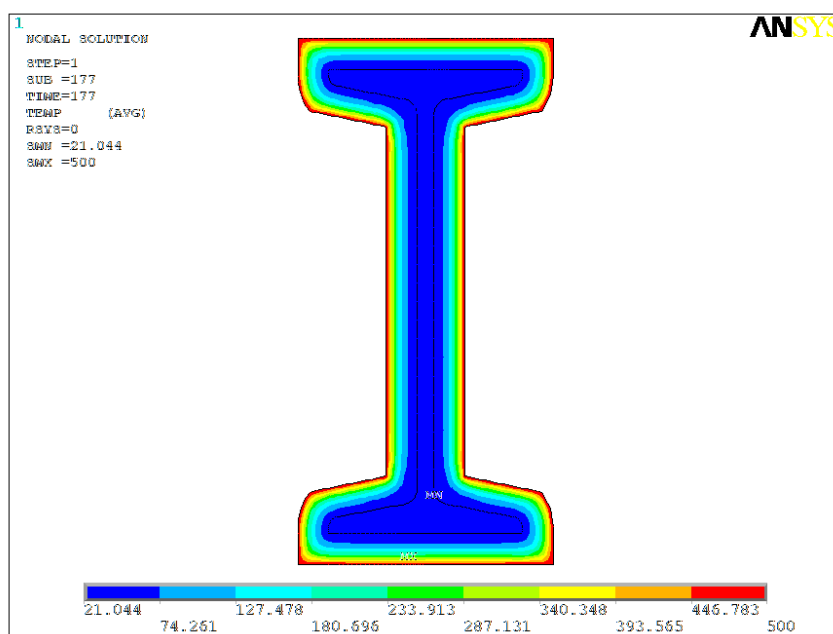


Obr. 7.17 Ocelový průřez I300 chráněný vermikulitovým nástřikem

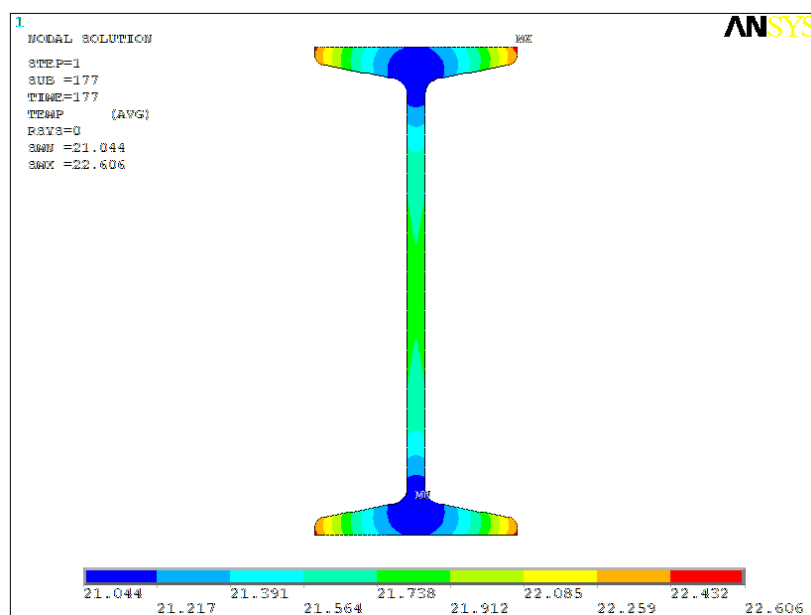
- materiálové charakteristiky vermikulitového nástřiku:
 - o hustota: $\rho = 350 \text{ kg m}^{-3}$
 - o měrná tepelná kapacita c : $c = 1200 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : $\lambda = 0,12 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Výsledky vývoje rozložení teplot pro průřez chráněný vermikulitovým nástřikem

Rozložení teplot v průřezu chráněném vermikulitovým nástřikem po 177 s, kdy teplota na vnějším povrchu průřezu dosahuje 500 °C, je znázorněno na obr. 7.18. Z obr. 7.19 je patrné, že i při zatížení 500 °C dosahují teploty v ocelovém průřezu maximálně 22,61 °C, tedy průřez si stále zachovává přibližně pokojovou teplotu.



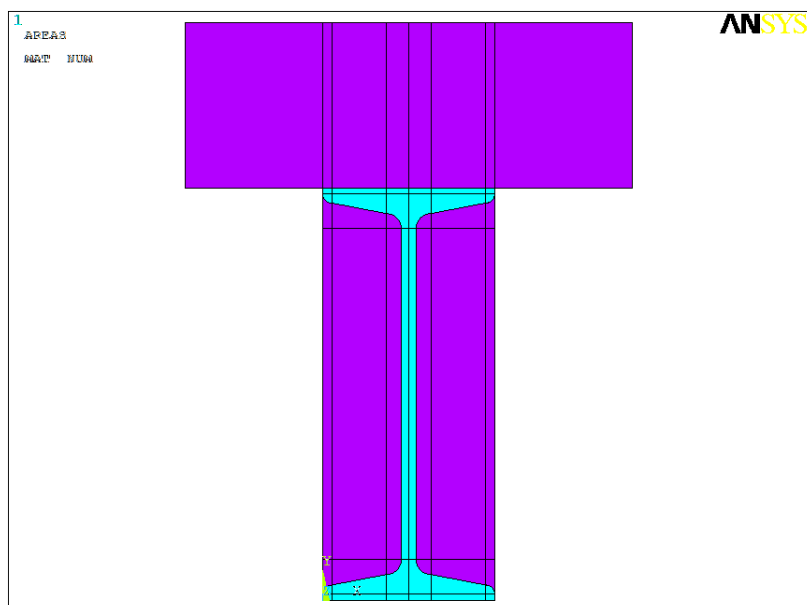
Obr. 7.18 Rozložení teploty v průřezu chráněném vermikulitovým nástřikem
(2. varianta, $T = 500 \text{ °C}$, $t = 177 \text{ s}$)



Obr. 7.19 Rozložení teploty průřezu, který je chráněn vermikulitovým nástřikem (2. varianta, $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 177\text{ s}$)

3. varianta – obetonovaný ocelový průřez

Dále byl sledován vývoj rozložení teplot v ocelovém průřezu, který je obetonovaný. Pro obetonování byl zvolen lehký beton, který je pro konstrukci staticky výhodný vzhledem k relativně nízké objemové hmotnosti. Obetonovaný průřez je znázorněn na obr. 7.20.

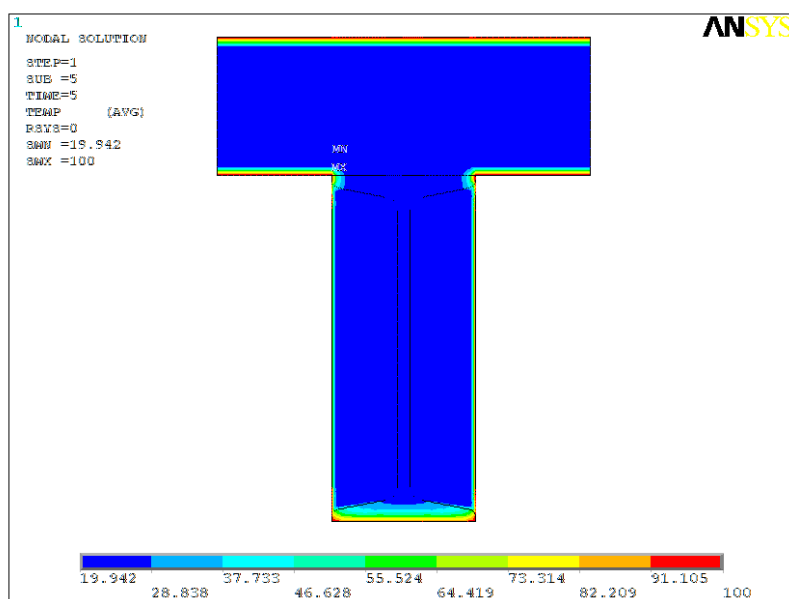


Obr. 7.20 Obetonovaný ocelový průřez I300

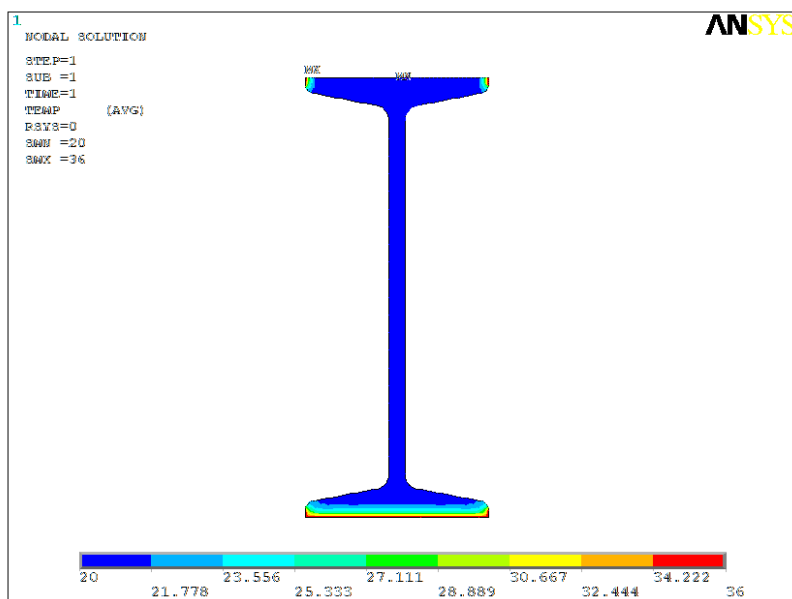
- materiálové charakteristiky lehkého betonu:
 - o hustota: $\rho = 1600 \text{ kg m}^{-3}$
 - o měrná tepelná kapacita c : $c = 840 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : $\lambda = 0,8 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Výsledky vývoje rozložení teplot pro obetonovaný průřez

Na obr. 7.21 je 3. varianta protipožární izolace, průřez obetonovaný, a rozložení teplot v něm při zatížení 100°C na vnějším povrchu průřezu. Z obr. 7.22 je vidět, že nejrychleji teplo do průřezu přechází přes nechráněnou pásnici, kde se teplota zvyšuje již po 5 s požáru.



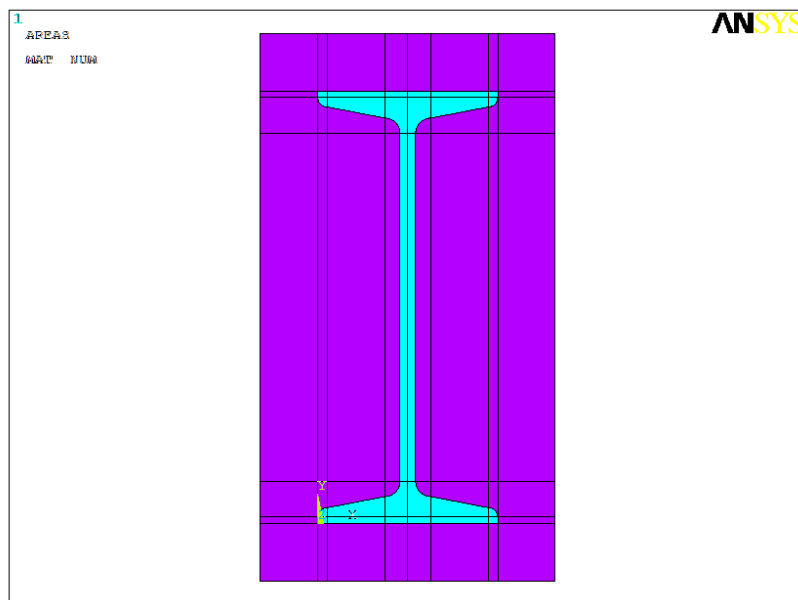
Obr. 7.21 Rozložení teploty v průřezu (3. varianta, $T = 100^\circ\text{C}$, $t = 5 \text{ s}$)



Obr. 7.22 Rozložení teploty v průřezu (3. varianta, $T = 100^\circ\text{C}$, $t = 5 \text{ s}$)

4. varianta – obetonovaný ocelový průřez

V tomto případě byl ocelový průřez rovněž obetonovaný, ale namísto lehkého betonu byl použit beton běžný a obetonování bylo simulováno kolem celého průřezu (obr. 7.23), kde nejmenší krytí průřezu dosahovalo 40 mm.

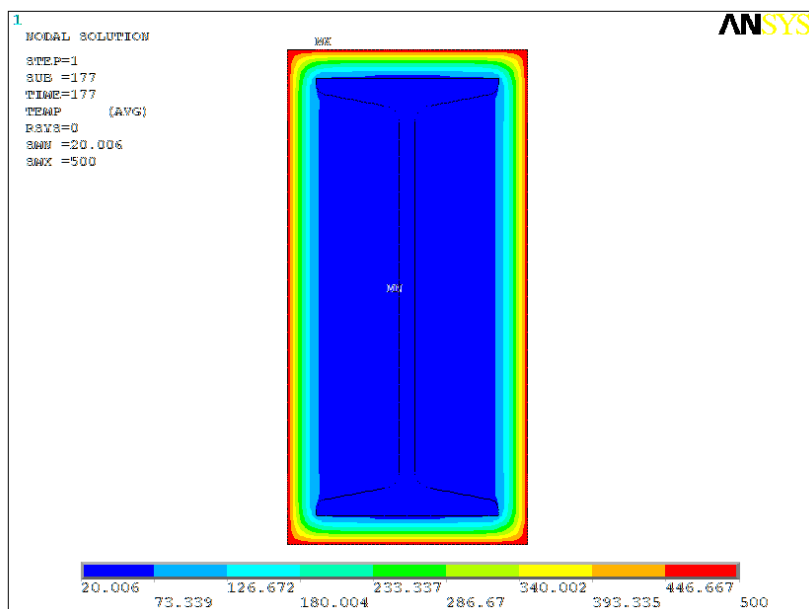


Obr. 7.23 Obetonovaný ocelový průřez I300

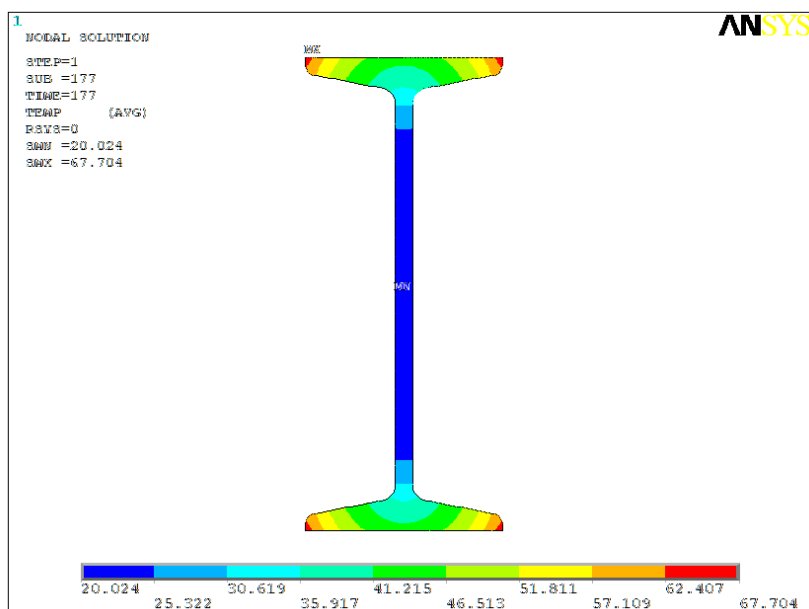
- materiálové charakteristiky běžného betonu:
 - o hustota: $\rho = 2300$ kg m⁻³
 - o měrná tepelná kapacita c : $c = 1000$ J kg⁻¹K⁻¹
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : $\lambda = 1,60$ W m⁻¹K⁻¹

Výsledky vývoje rozložení teplot pro obetonovaný průřez

Další varianta (obr. 7.24, 7.25), kdy bylo obetonování provedeno kolem celého průřezu ukazuje, že ocel si drží pokojovou teplotu až do 177 s požáru, tedy do zatížení 500 °C.



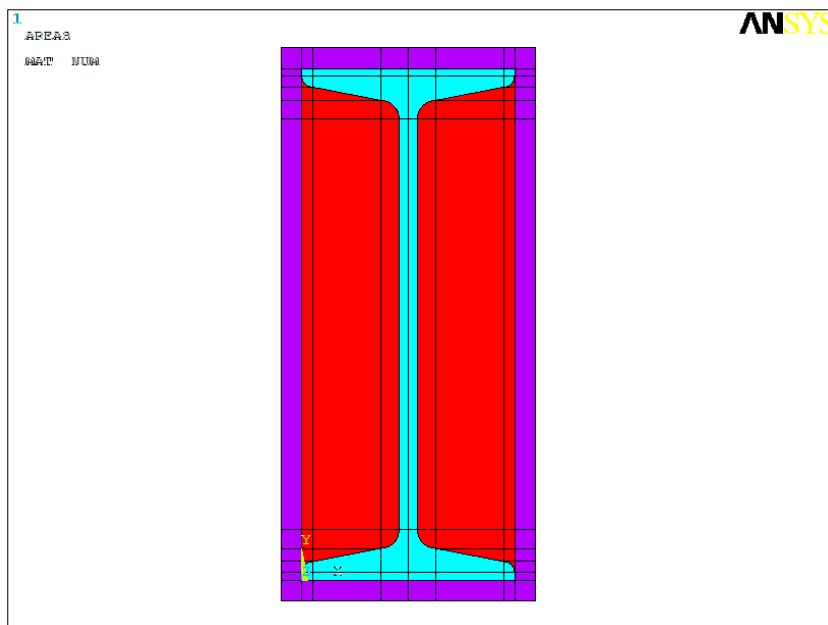
Obr. 7.24 Rozložení teploty v obetonovaném průřezu (4. varianta, $T = 500\text{ °C}$, $t = 177\text{ s}$)



Obr. 7.25 Rozložení teploty v obetonovaném průřezu (4. varianta, $T = 500\text{ °C}$, $t = 177\text{ s}$)

5. varianta – ocelový průřez chráněný vermikulitovou deskou

Poslední vyhodnocovanou variantou byl průřez chráněný deskou vyrobenou z vermikulitu a cementu. Průřez byl dle obr. 7.26 obložený deskou, přičemž v prostoru mezi deskou a ocelovým profilem byl uvažován vzduch.



Obr. 7.26 Ocelový průřez I300 chráněný vermikulitovou deskou

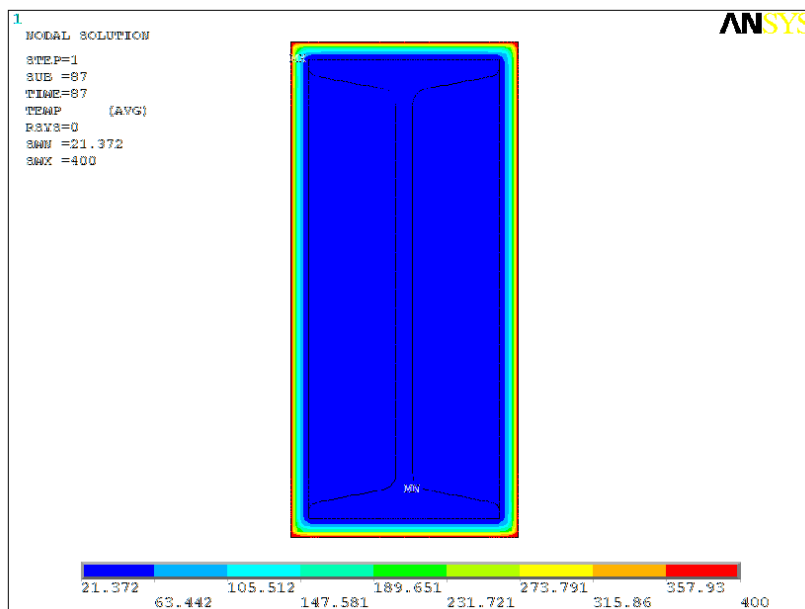
- materiálové charakteristiky vermikulitové desky:
 - o hustota: $\rho = 800 \text{ kg m}^{-3}$
 - o měrná tepelná kapacita c : $c = 1200 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : $\lambda = 0,20 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- materiálové charakteristiky vzduchu: viz tab. 7.3

Tab. 7.3 Závislost změny teploty vzduchu na měrné tepelné kapacitě a součiniteli tepelné vodivosti

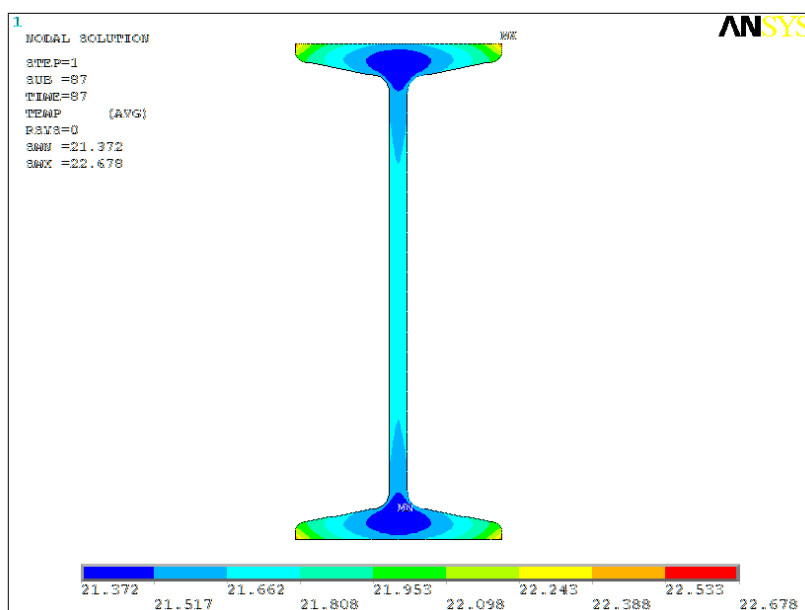
Teplota T [°C]	Měrná tepelná kapacita c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]
20	1005	259
100	1009	321
200	1026	393
300	1047	460
400	1068	521
500	1093	574
600	1114	622
700	1135	671

Výsledky vývoje rozložení teplot pro průřez chráněný vermikulitovými deskami

Na obr. 7.27 je ocelový průřez chráněný vermikulitovými deskami při zatížení 400 °C na vnějším povrchu průřezu. Ocel si zachová pokojovou teplotu přibližně do 87 s trvání požáru, viz obr. 7.28.



Obr. 7.27 Rozložení teploty v průřezu obloženém vermikulitovými deskami (5. varianta, $T = 400$ °C, $t = 87$ s)



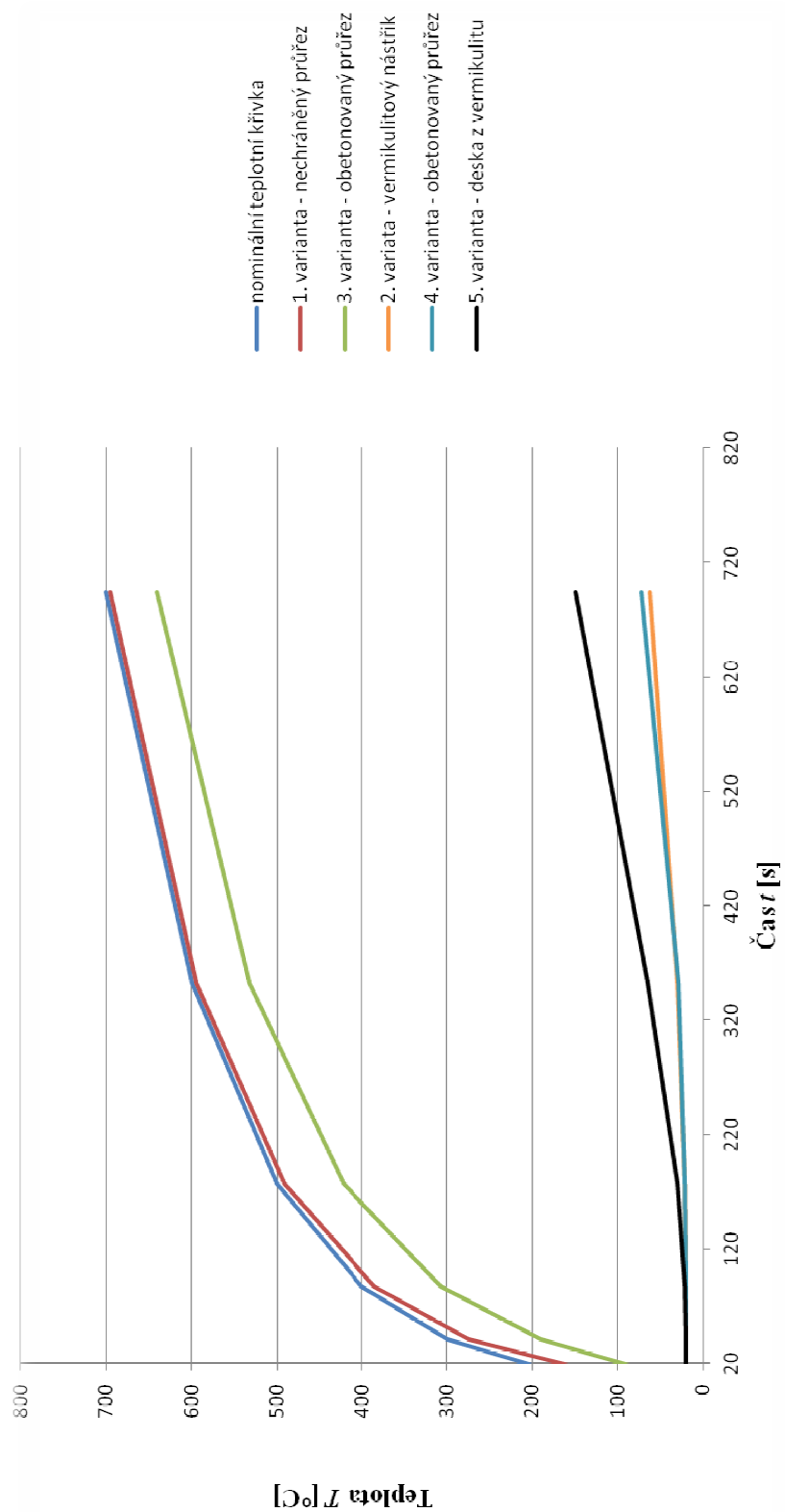
Obr. 7.28 Rozložení teploty v průřezu obloženém vermikulitovými deskami (5. varianta, $T = 400$ °C, $t = 87$ s)

Vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení výsledků byla vybrána dvě místa na průřezu, která byla během výpočtů monitorována, viz obr. 7.2. V tab. 7.4 jsou uvedeny teploty, kterých při daném teplotním zatížení a v daném čase dosáhla sledovaná místa v průřezu. Na obr. 7.29 jsou potom znázorněny závislosti teploty přírub pozorovaných průřezů v závislosti na době působení požáru.

Tab. 7.4 Výsledky vývoje rozdělení teplot ve sledovaných místech ocelového průřezu

Teplota na vnějším povrchu průřezu	Čas	1. varianta		2. varianta		3. varianta		4. varianta		5. varianta	
		nechráněný průřez		průřez chráněný nástrikem		obetonovaný průřez		obetonovaný průřez		průřez chráněný deskou	
		pásnice	stojina	pásnice	stojina	pásnice	stojina	pásnice	stojina	pásnice	stojina
$T [^{\circ}\text{C}]$	$t [\text{s}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$
20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
100	5	48,89	82,90	20	20	28,801	20	20	20	20	20
200	17	158,26	189,51	20	20	86,948	20	20	20	20,003	20,003
300	41	275,51	293,95	20,001	20,001	190,36	20,001	20	20	20,096	20,118
400	87	385,14	396,35	20,046	20,08	307,11	20,205	20,01	20	21,372	21,727
500	177	490,72	497,73	21,052	21,747	421,8	24,517	20,57	20	30,46	31,784
600	352	594,03	598,55	29,397	33,374	532,23	50,006	28,77	20,061	64,792	66,897
700	694	695,44	698,88	62,626	72,556	640,74	129,21	71,549	23,001	149,02	151,25



Obr. 7.29 Graf závislosti teploty přírub pozorovaných průřezů v závislosti na době působení požáru

Ze srovnání výsledků vývoje rozdělení teplot v ocelovém průřezu (tab. 7.4) vyplývá, že nejrychleji se prohřívá nechráněný ocelový průřez. Celý průřez dosáhne již přibližně po třech minutách teploty 500 °C a jak je vidět na obr. 7.29, závislost teploty nechráněného průřezu na době působení požáru se téměř shoduje s nominální teplotní křivkou.

Naopak z hlediska požárně izolačních vlastností nejlepší výsledky vykazovala 2. varianta protipožární izolace – průřez izolovaný vermikulitovým nástřikem, kdy se teplota ve stojině průřezu po třech minutách požáru zvýšila o pouhé dva stupně. Výborné výsledky byly zaznamenány i pro průřez 4. varianty – obetonovaný, který při zatížení 600 °C dosáhl v pásnici jen 28,77 °C.

Uspokojivé výsledky měla 5. varianta – obklady vermikulitovými deskami, kde ani při zatížení 600 °C na vnějším povrchu průřezu teploty ve sledovaných bodech nedosáhly 70 °C.

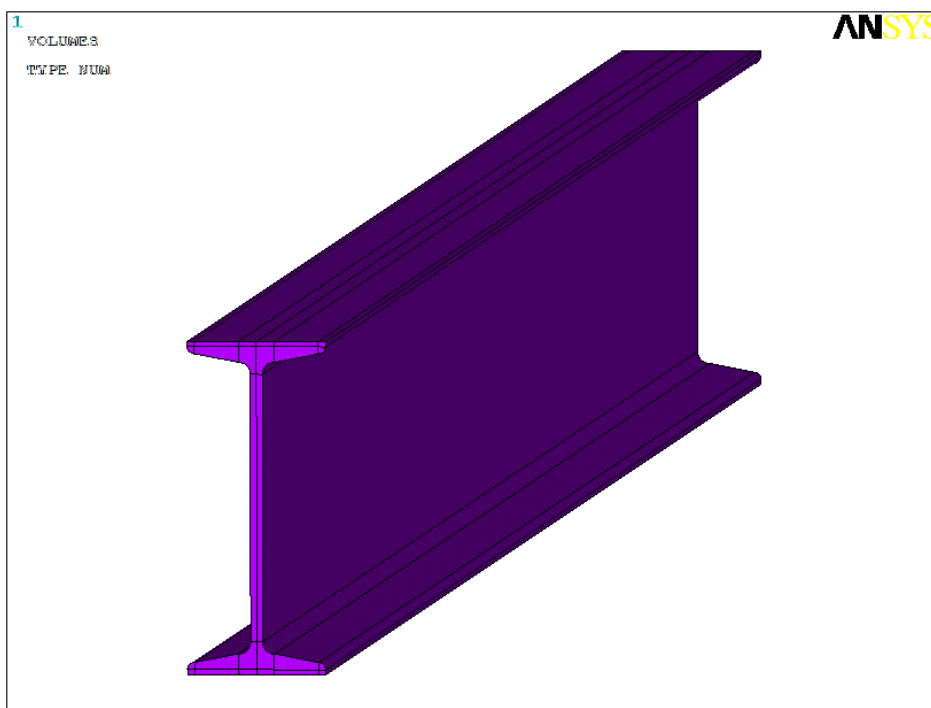
3. varianta – obetonovaný průřez se dle očekávání nejrychleji prohřívá přes nechráněnou pásnici, ostatní části průřezu se však na teplotu 100 °C prohřejí až zhruba po 10 minutách.

8 Teplotní a statická analýza vybraného prvku

Druhá praktická část diplomové práce řeší teplotní a statickou analýzu ocelového nosníku I300. Nosník byl modelován v programovém systému ANSYS (obr. 8.1). Tento systém umožňuje kombinaci teplotní a statické analýzy. Nosník byl tedy nejdříve zatížen teplotou dle nominální teplotní křivky. Pro výpočet rozložení teplot v nosníku byl použit konečný prvek SOLID 70 a byla použita analýza neustáleného vedení tepla. Poté bylo na nosník aplikováno mechanické zatížení a okrajové podmínky a byla řešena statická analýza, pro niž byl použit prvek SOLID 185. Při výpočtu byly uvažovány změny materiálových i tepelných charakteristik při zvyšující se teplotě. Výsledky získané z výpočetního programu byly ověřeny ručním výpočtem. Pro teplotní a statickou analýzu byly vybrány tři varianty příkladu:

1. nechráněný nosník zatížený mechanickým zatížením na 90 % jeho únosnosti,
2. nechráněný nosník zatížený mechanickým zatížením na 60 % jeho únosnosti,
3. nosník chráněný vermikulitovým nástřikem zatížený mechanickým zatížením na 60 % jeho únosnosti.

Na závěr byly výsledky jednotlivých variant vyhodnoceny a srovnány.



Obr. 8.1 Prostorový model nosníku I300

Zadané veličiny

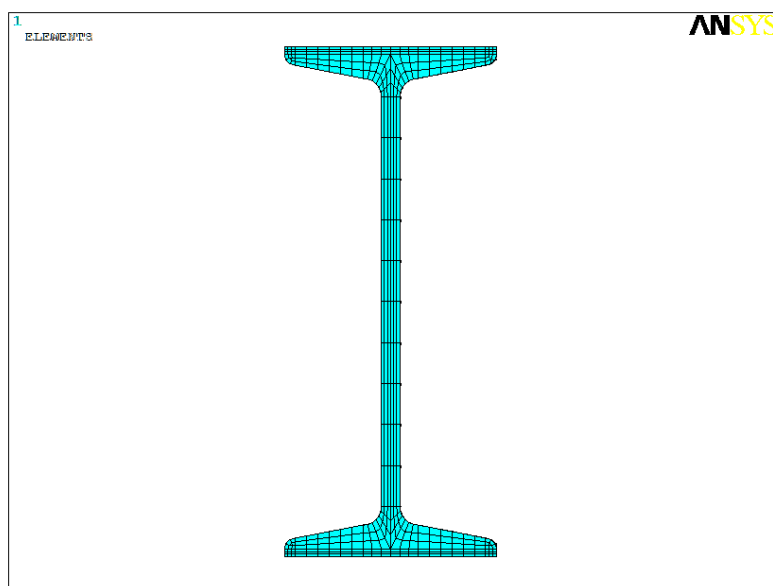
- základní rozměry průřezu I300: viz obr. 7.1
- délka nosníku: 5 m

- materiál I300: ocel S235
- materiálové charakteristiky:
 - o hustota: $\rho = 7850 \text{ kg m}^{-3}$
 - o měrná tepelná kapacita c : viz tab. 8.1
 - o součinitel tepelné vodivosti λ : viz tab. 8.1
 - o modul pružnosti E_T : viz tab. 8.1

Tab. 8.1 Uvažované hodnoty měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti a modulu pružnosti oceli v závislosti na teplotě

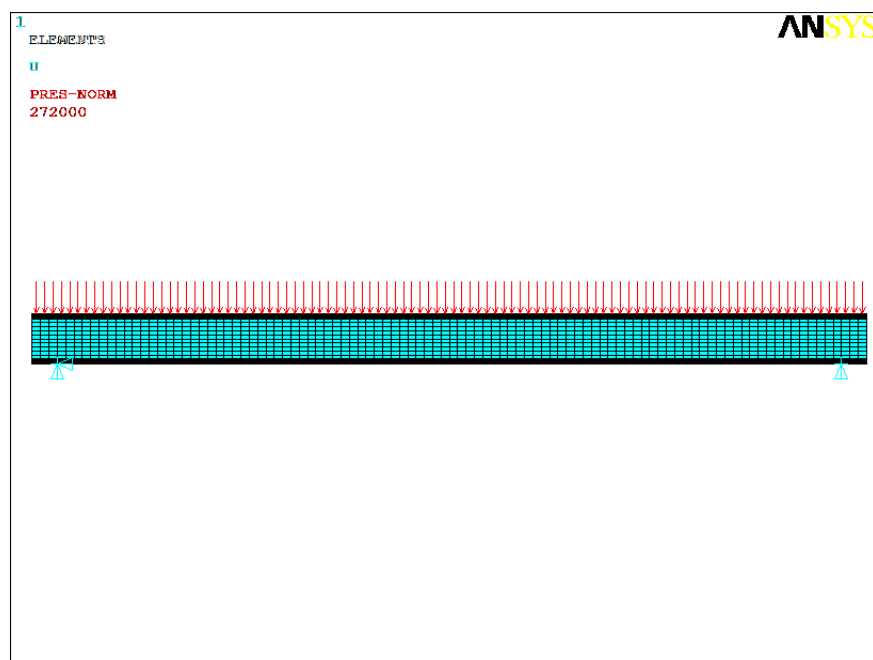
Teplota T [°C]	Měrná tepelná kapacita c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Modul pružnosti E_T [GPa]
20	440	53,3	210,00
100	488	51,0	210,00
200	530	47,0	189,00
300	565	44,0	168,00
400	606	41,0	147,00
500	667	37,0	126,00
600	760	34,0	65,10
700	1008	30,0	27,30
800	803	27,3	18,90
900	650	27,3	14,18

- síť konečných prvků:
 - o provedena konvergenční analýza
 - o v průřezu: 6 prvků po tloušťce stojiny i pásnice (obr. 8.2)
 - o délka prvku po délce nosníku: 0,05 m (obr. 8.3)



Obr. 8.2 Síť konečných prvků v průřezu

- okrajové podmínky pro tepelnou analýzu:
 - teplota mění se v čase
 - pro jednoduchost teplota zadána přímo na vnější povrch nosníku (zanedbání přestupu tepla a vlivu záření [3])
- okrajové podmínky pro statickou analýzu:
 - prosté podepření (obr. 8.3)



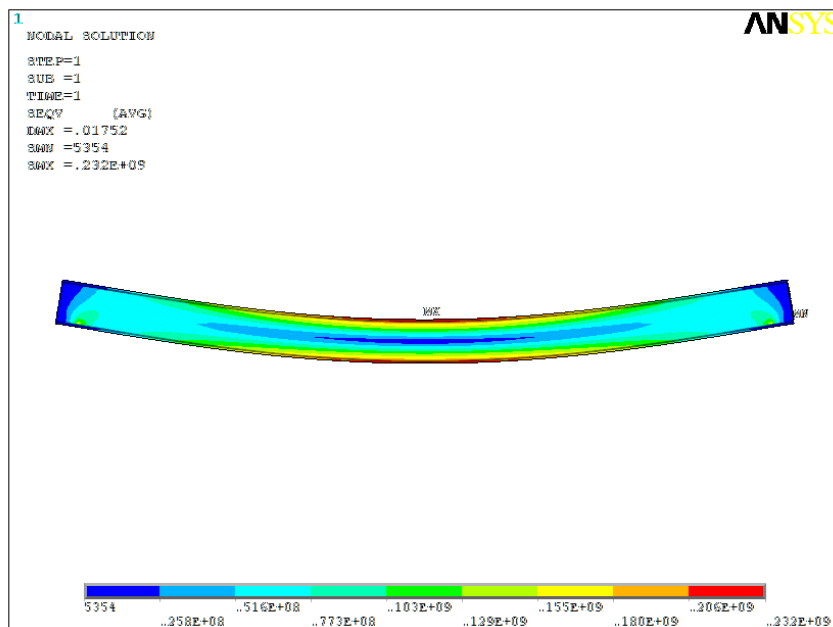
Obr. 8.3 Okrajové podmínky a zatížení pro statickou analýzu

1. varianta

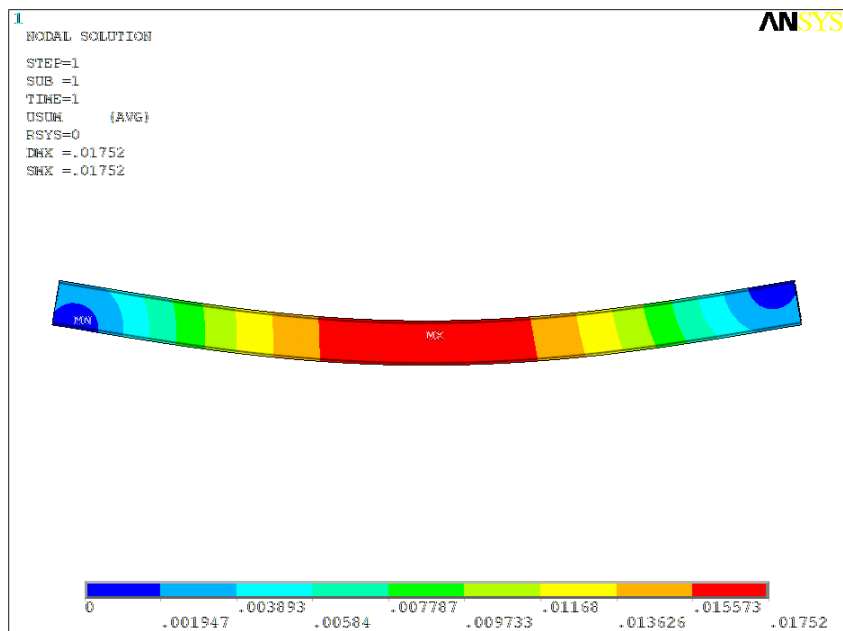
První varianta posuzuje nosník I300 při pokojové teplotě a při požáru v programovém systému ANSYS. Sleduje napětí a průhyb nosníku, jestliže je nosník při pokojové teplotě zatížen mechanickým zatížením na 90 % jeho únosnosti.

- zatížení:
 - teplota T : $T = 20 - 808,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
 - mechanické zatížení: 90 % z únosnosti nosníku I300
 - stálé: $G_k = 8\,330 \text{ Nm}^{-1}$
 - nahodilé: $Q_k = 45\,120 \text{ Nm}^{-1}$
- (viz obr. 8.3)

Napětí v nosníku vyšlo 232 MPa (obr. 8.4). Dále byl zjištěn průhyb nosníku při pokojové teplotě a daném zatížení, který vyšel 17,52 mm (obr. 8.5). Výsledky napětí a průhybu byly srovnatelné s ručním výpočtem.



Obr. 8.4 Napětí nosníku zatíženého na 90 % únosnosti a 20 °C (1. varianta)



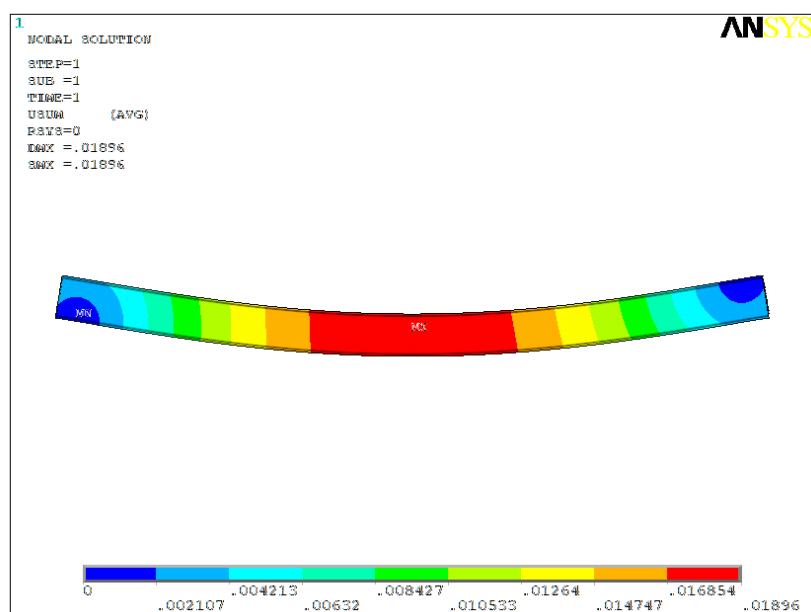
Obr. 8.5 Průhyb nosníku zatíženého na 90 % únosnosti a 20 °C (1. varianta)

Vyhodnocení výsledků

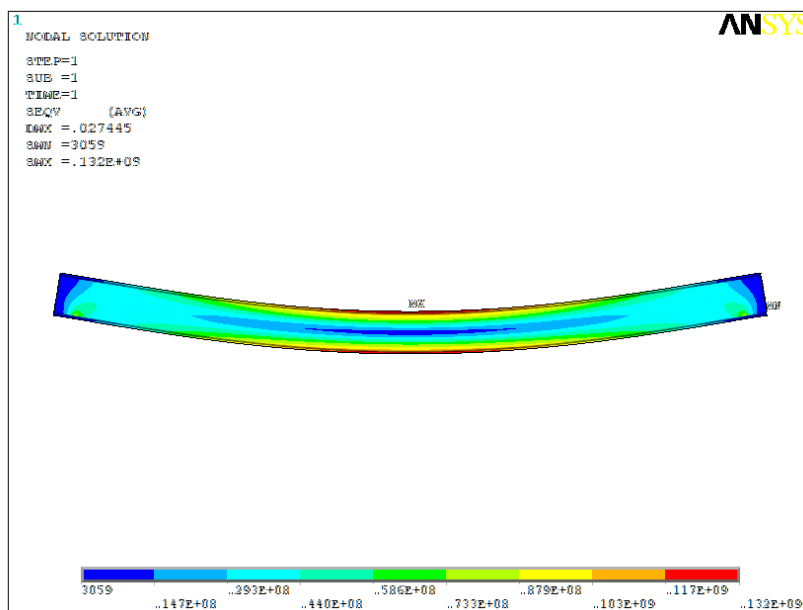
V tab. 8.2 jsou uvedeny hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku při zatížení na 90 % únosnosti prvku při pokojové teplotě v závislosti na zvyšující se teplotě zjištěné v programu ANSYS kombinací analýzy neustáleného vedení tepla a statické analýzy.

Tab. 8.2 Hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku při zatížení na 90 % únosnosti prvku při pokojové teplotě v závislosti na zvyšující se teplotě

Čas t [s]	Teplota na povrchu T [°C]	Maximální průhyb δ [mm]	Mezní průhyb $l/250$ [mm]	Misesovo napětí σ [MPa]	Teplota v pásnici T_p [°C]	Návrhová mez kluzu $f_{y,d}$ [MPa]
0	20	17,52	18,80	232,00	20	204,35
10	141,67	10,39	18,80	132,00	100,89	204,35
20	212,50	11,23	18,80	132,00	174,17	204,35
40	295,83	12,45	18,80	133,00	270,25	204,35
80	384,78	14,05	18,80	133,00	370,23	204,35
160	481,11	16,28	18,80	133,00	472,26	197,64
220	524,57	18,96	18,80	133,00	519,45	169,13
320	581,71	27,45	18,80	132,00	576,04	127,90
640	684,21	62,83	18,80	132,00	679,97	65,35
1440	808,5	114,79	18,80	134,00	807,02	25,03



Obr. 8.6 Průhyb nosníku zatíženého na 90 % únosnosti po překročení maximálního průhybu ($t = 220$ s, $T_p = 519,45$ °C) (1. varianta)



Obr. 8.7 Napětí nosníku zatíženého na 90 % únosnosti po překročení návrhové meze kluzu ($t = 320$ s, $T_p = 576,04$ °C) (1. varianta)

Z výsledků je patrné, že napětí nosníku přesahuje návrhovou mez kluzu již při pokojové teplotě. Nicméně po zatížení požárem, kdy se dle normy [11] nahodilé zatížení redukuje na polovinu, je maximálního průhybu dosaženo přibližně po 220 s (obr. 8.6) a únosnost se vyčerpá asi po 320 s požáru (obr. 8.7).

2. varianta

Ve druhé variantě bylo úkolem stanovit požární odolnost nechráněného nosníku zatíženého teplotami dle nominální křivky a daným mechanickým zatížením, které bylo uvažováno 60 % z únosnosti nosníku. Výpočet byl proveden jak zjednodušeným ručním výpočtem, tak výpočtem v programu ANSYS a výsledky byly porovnány.

- zatížení:

o teplota T :	$T = 20 - 808,5$	°C
o stálé:	$g = 8\,330$	Nm ⁻¹
o nahodilé:	$q = 17\,140$	Nm ⁻¹
	(viz obr. 8.3)	

Statická analýza při pokojové teplotě

$$M_{sd} = \frac{1}{8}(G_k + Q_k)l^2 = \frac{1}{8} \cdot (8,33 \cdot 1,2 + 17,14 \cdot 1,4) \cdot 4,7^2 = 93,88 \text{ kNm}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\text{Stěna: } \frac{h}{t_w} = \frac{241}{10,8} = 22,31 < 72 \varepsilon$$

⇒ průřez 1. třídy

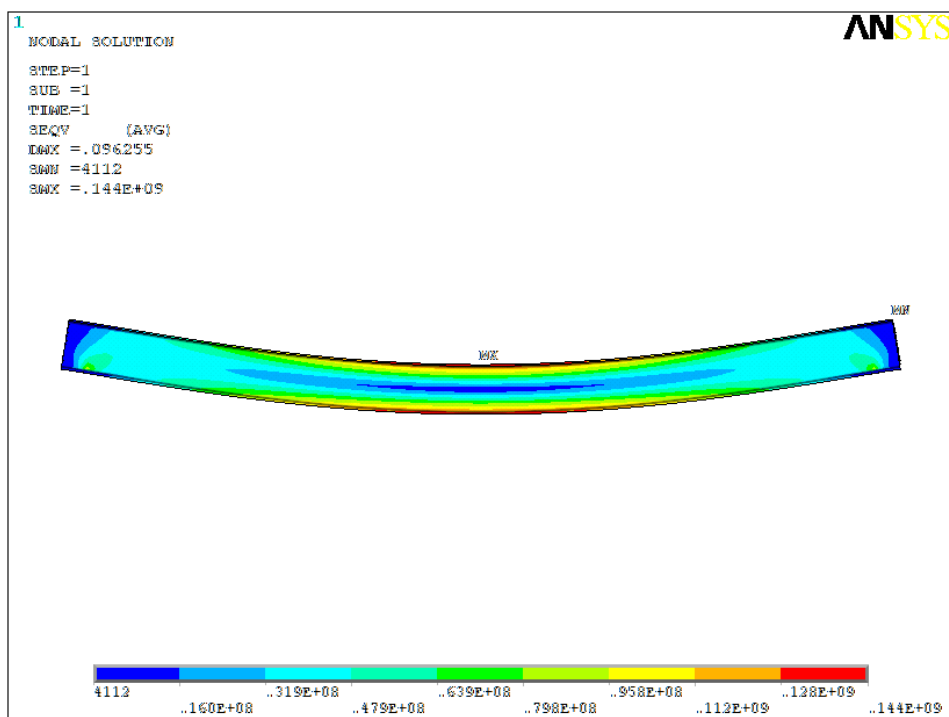
$$\text{Pásnice: } \frac{a}{t_f} = \frac{62,5}{16,2} = 3,86 < 10 \varepsilon$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{ply} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{762 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,15} = 155,71 \text{ kNm} > 93,88 \text{ kNm}$$

$$\sigma = \frac{M_{Sd}}{W_y} = 143,99 \text{ MPa}$$

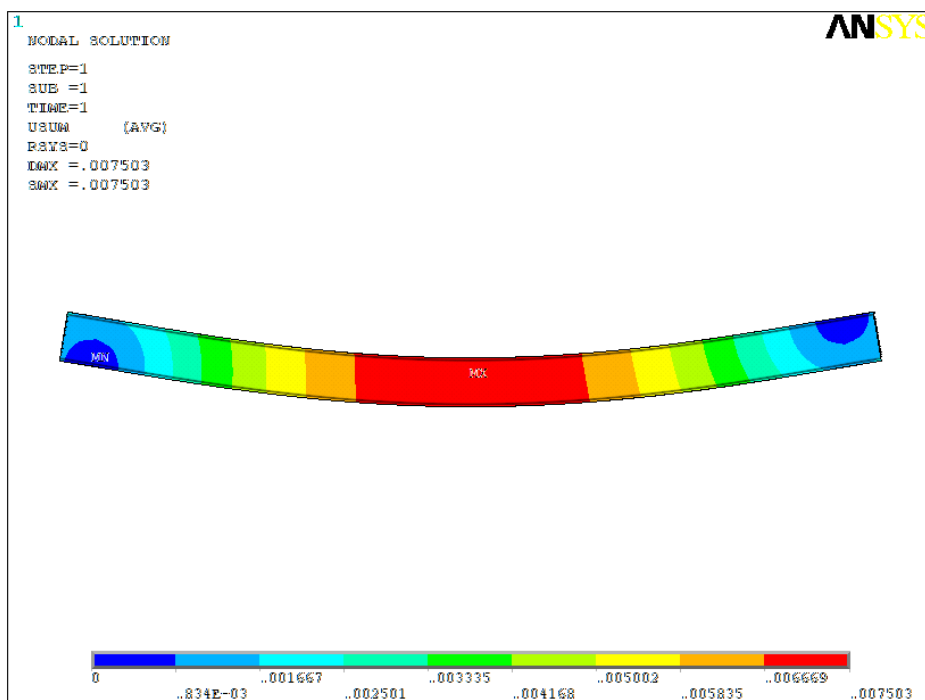
$$\delta = \frac{5}{384} \frac{(G_k + Q_k) l^4}{EI_y} = \frac{5}{384} \frac{25,47 \cdot 4700^4}{210000 \cdot 97,9 \cdot 10^6} = 7,87 \text{ mm} < \frac{l}{250} = 18,8 \text{ mm}$$

Poté byl proveden výpočet při pokojové teplotě ve výpočetním programu ANSYS, napětí v nosníku vyšlo 144 MPa dle obr. 8.8.



Obr. 8.8 Napětí nosníku zatíženého na 60 % únosnosti a 20 °C (2. varianta)

Dále byl zjištěn průhyb nosníku 7,50 mm při pokojové teplotě a daném zatížení (obr. 8.9).



Obr. 8.9 Průhyb nosníku zatíženého na 60 % únosnosti a 20 °C (2. varianta)

Tepelná a statická analýza při požáru

Určení kritické teploty

$$\eta_{fi} = \frac{8,33 + 0,5 \cdot 17,14}{8,33 \cdot 1,2 + 17,14 \cdot 1,4} = 0,497$$

$$M_{fi,Sd} = \eta_{fi} M_{Sd} = 0,497 \cdot 93,88 = 46,66 \text{ kNm}$$

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85$$

$$\text{Stěna: } \frac{h}{t_w} = \frac{241}{10,8} = 22,31 < 72 \varepsilon = 61,2$$

⇒ průřez 1. třídy

$$\text{Pásnice: } \frac{a}{t_f} = \frac{62,5}{16,2} = 3,86 < 10 \varepsilon = 8,5$$

$$M_{fi,T,Rd} = k_{y,T} M_{pl,Rd} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 1 \cdot 155,71 \cdot \frac{1,15}{1} = 179,07 \text{ kNm}$$

$$\mu_0 = \frac{M_{fi,Sd}}{M_{fi,T,Rd}} = \frac{46,66}{155,71} = 0,300$$

$$\sigma = \frac{M_{fi,Sd}}{W_y} = 71,56 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{(G_k + Q_k) l^4}{EI_y} = \frac{5}{384} \frac{16,898 \cdot 4700^4}{40984 \cdot 97,9 \cdot 10^6} = 26,76 \text{ mm}$$

$$T_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,3833}} - 1 \right] + 482 =$$

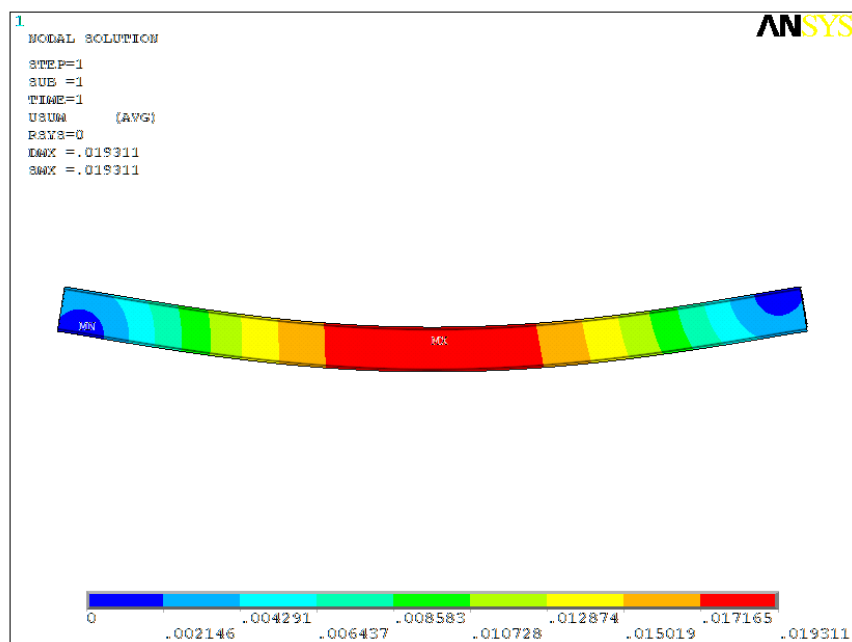
$$= 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,3^{3,3833}} - 1 \right] + 482 = 663,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vyhodnocení výsledků

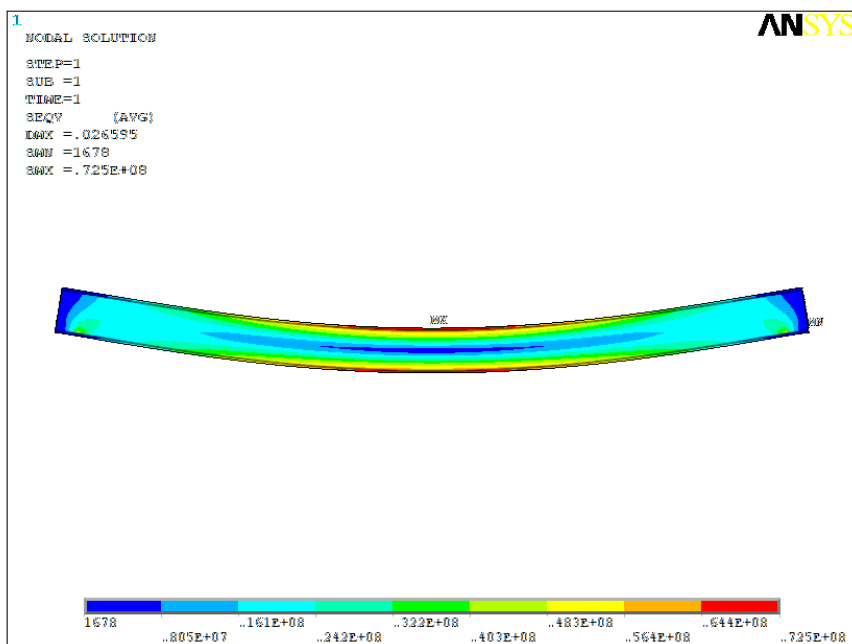
V tabulce 8.3 jsou uvedeny hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku zatíženého na 60 % únosnosti v závislosti na zvyšující se teplotě zjištěné v programu ANSYS kombinací analýzy neustáleného vedení tepla a statické analýzy.

Tab. 8.3 Hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku zatíženého na 60 % únosnosti v závislosti na zvyšující se teplotě

Čas t [s]	Teplota na povrchu T [°C]	Maximální průhyb δ [mm]	Mezní průhyb $l/250$ [mm]	Misesovo napětí σ [MPa]	Teplota v pásnici T_p [°C]	Návrhová mez kluzu $f_{y,d}$ [MPa]
0	20	7,50	18,80	144,00	20	204,35
10	141,67	5,68	18,80	72,10	100,89	204,35
20	212,50	6,15	18,80	72,20	174,17	204,35
40	295,83	6,81	18,80	72,50	270,25	204,35
80	384,78	7,69	18,80	72,80	370,23	204,35
160	481,11	8,90	18,80	73,00	472,26	171,86
320	581,71	15,01	18,80	72,10	576,04	111,23
380	608,19	18,62	18,80	72,80	604,73	93,72
400	614,04	19,31	18,80	72,80	610,77	90,76
450	628,66	21,25	18,80	72,70	625,25	83,68
550	657,90	26,60	18,80	72,50	654,06	69,53
640	684,21	34,37	18,80	72,10	679,97	56,83
1440	808,5	62,79	18,80	73,20	807,02	21,77



Obr. 8.10 Průhyb nosníku zatíženého na 60 % únosnosti po překročení maximálního průhybu ($t = 400$ s, $T_p = 610,77$ °C) (2. varianta)



Obr. 8.11 Napětí nosníku zatíženého na 60 % únosnosti po překročení maximálního průhybu ($t = 550$ s, $T_p = 654,06$ °C) (2. varianta)

Jak je patrné z výsledků studie, ruční zjednodušený výpočet napětí a průhybů při pokojové teplotě 20 °C se téměř shoduje s přesným vyhodnocením problému pomocí výpočetního systému ANSYS. Přičemž největší hodnota napětí v nosníku při ručním výpočtu vyšla 143,99 MPa a napětí v programu 144 MPa. Hodnoty průhybů vykazují také

minimální rozdíly mezi jednotlivými druhy výpočtů. Pomocí ručního výpočtu byl průhyb nosníku odhadnut na 7,87 mm a program jej vypočítal na hodnotu 7,50 mm.

Ve druhé části zaměřené na posouzení nosníku při zvýšených teplotách vznikajících při požáru byla dle normy [11] určena kritická teplota 663,8 °C. Je to teplota, při níž je únosnost prvku rovna účinku působících zatížení a při dalším zatěžování dochází k jeho zhroucení [5]. Z tab. 8.3 vyplývá, že přibližně při této teplotě se Misesovo napětí přibližuje návrhové mezi kluzu při zvýšené teplotě. Dle výpočtu v programu ANSYS dosáhne nosník mezního průhybu po 300 s (obr. 8.10) a návrhovou mez kluzu překročí po 550 s (obr. 8.11), tedy po 9,2 minutách, z čehož vyplývá, že nosník nevyhoví na minimální požadovanou odolnost 15 minut.

3. varianta

Třetí varianta zjišťuje požární odolnost nosníku I300 chráněného vermikulitovým nástřikem, zatíženého teplotami dle nominální křivky a daným mechanickým zatížením, které bylo opět uvažováno 60 % z únosnosti nosníku. Výsledky srovnává s 2. variantou, nosníkem proti požáru nechráněným.

- materiálové charakteristiky vermikulitového nástřiku:

o hustota:	$\rho = 350$	kg m^{-3}
o měrná tepelná kapacita c :	$c = 1200$	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
o součinitel tepelné vodivosti λ :	$\lambda = 0,12$	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

- zatížení:

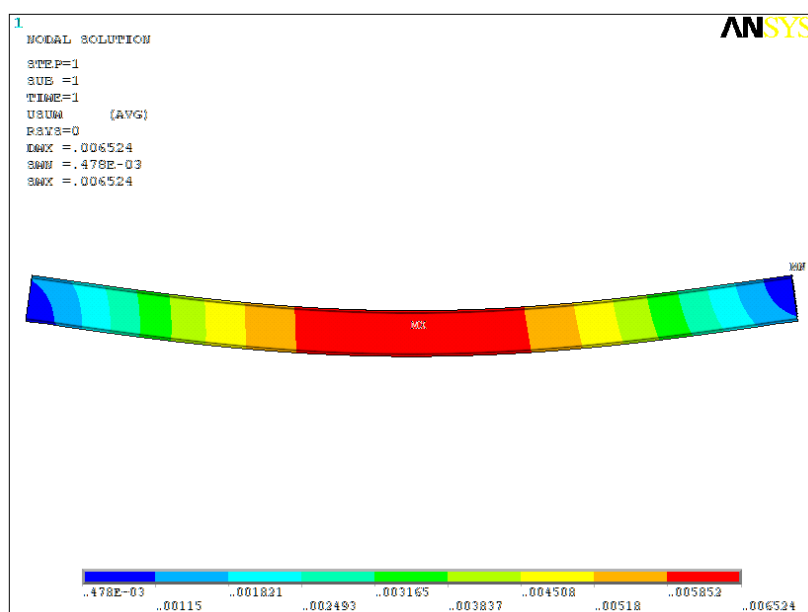
o teplota T :	$T = 20 - 808,5$	$^{\circ}\text{C}$
o stálé:	$g = 8\,330$	Nm^{-1}
o nahodilé:	$q = 17\,140$	Nm^{-1}
	(viz obr. 8.3)	

Vyhodnocení výsledků

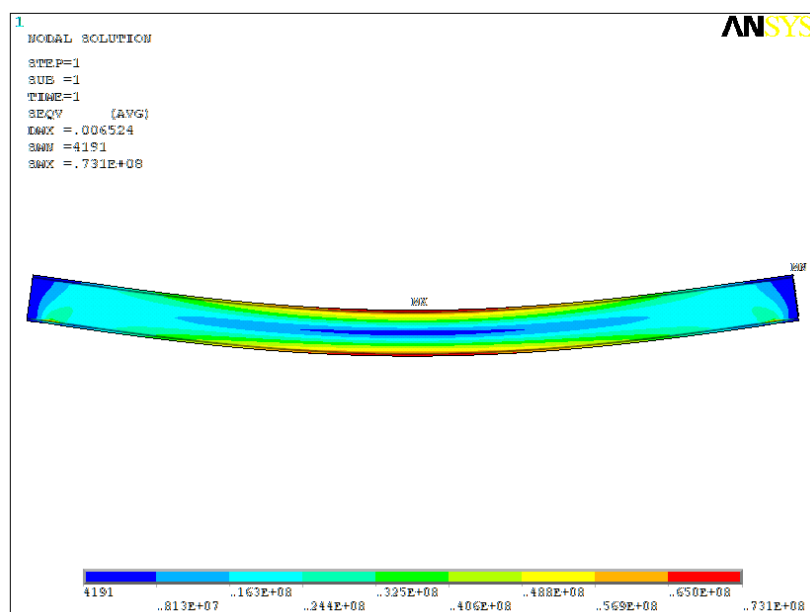
V tab. 8.4 jsou uvedeny hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku I300 chráněného vermikulitovým nástřikem a zatíženého na 60 % únosnosti v závislosti na teplotě.

Tab. 8.4 Hodnoty maximálních průhybů a Misesova napětí nosníku chráněného vermikulitovým nástřikem

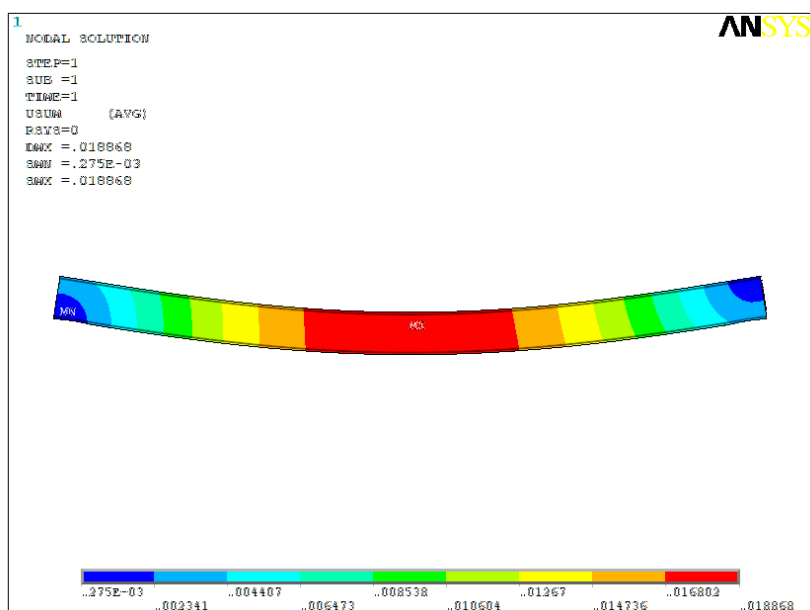
Čas t [s]	Teplota na povrchu T [°C]	Maximální průhyb δ [mm]	Mezní průhyb $l/250$ [mm]	Misesovo napětí σ [MPa]	Teplota v pásnici T_p [°C]	Návrhová mez kluzu $f_{y,d}$ [MPa]
0	20,00	9,82	18,80	110,00	20,00	204,35
10	141,67	6,52	18,80	73,10	20,00	204,35
20	212,50	6,52	18,80	73,10	20,00	204,35
40	295,83	6,52	18,80	73,10	20,01	204,35
80	384,78	6,52	18,80	73,10	21,14	204,35
160	481,11	6,52	18,80	73,10	21,35	204,35
320	581,71	6,52	18,80	73,10	29,35	204,35
640	684,21	6,52	18,80	73,10	60,86	204,35
700	701,25	6,52	18,80	73,10	67,87	204,35
800	720,16	6,52	18,80	73,10	79,92	204,35
900	738,60	6,52	18,80	73,10	92,27	204,35
3000	916,63	8,31	18,80	73,70	337,79	204,35
5400	1006,00	12,99	18,80	74,10	541,46	133,13
5800	1016,00	15,31	18,80	74,20	568,07	116,27
6000	1021,00	16,76	18,80	74,30	580,73	108,25
6200	1027,00	18,44	18,80	74,30	593,01	100,47
6250	1028,00	18,87	18,80	74,20	596,02	98,56
6300	1029,00	19,27	18,80	73,80	599,01	96,66
6500	1034,00	20,60	18,80	73,70	610,57	90,86
7000	1045	24,47	18,80	73,80	637,14	77,83
7200	1049	26,32	18,80	73,80	646,99	73,00



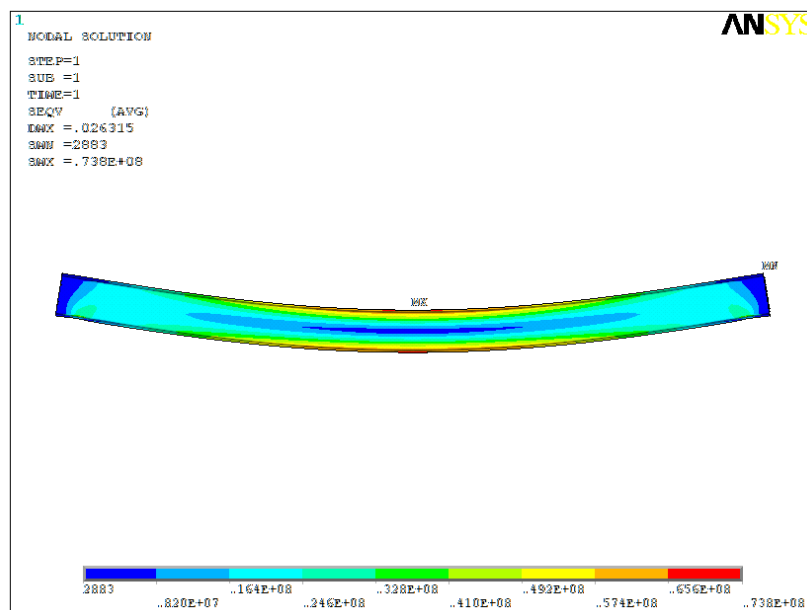
Obr. 8.12 Průhyb nosníku chráněného vermikulitovým nástřikem a zatíženého na 60 % únosnosti po 15 minutách požáru ($t = 900$ s, $T_p = 92,27$ °C) (3. varianta)



Obr. 8.13 Napětí nosníku chráněného vermikulitovým nástřikem a zatíženého na 60 % únosnosti po 15 minutách požáru ($t = 900$ s, $T_p = 92,27$ °C) (3. varianta)



Obr. 8.14 Průhyb nosníku zatíženého na 60 % únosnosti po překročení maximálního průhybu ($t = 6250$ s, $T_p = 596,02$ °C) (3. varianta)



Obr. 8.15 Napětí nosníku zatíženého na 60 % únosnosti po překročení maximálního průhybu ($t = 7200$ s, $T_p = 646,99$ °C) (3. varianta)

Výsledky ukazují, že při použití vermikulitového nástřiku, byla požární odolnost 15 minut (900 s) bez problémů splněna. Nosník v tomto čase vykazoval průhyb 6,52 mm (obr. 8.12) a Misesovo napětí 73,10 MPa (obr. 8.13), takže vyhověl na posouzení dle mezního stavu únosnosti i použitelnosti. Mezní průhyb byl překročen až po 105 minutách (obr. 8.14) a mezní napětí po 120 minutách požáru (obr. 8.15).

Ze srovnání výsledků 1. a 2. varianty je patrné, že návrh nosníku na maximální možné mechanické zatížení má vliv na jeho požární odolnost. V 1. variantě, kde byla rezerva mechanického zatížení pouhých 10 %, vyšla dle mezního stavu použitelnosti požární odolnost 220 s. Zatímco nosník 2. varianty, který měl stejné parametry jako nosník 1. varianty, ale byl zatížený pouze na 60 % své únosnosti, měl požární odolnost 400 s. Jeho požární odolnost se tím tedy zvýšila o 45 %. Z toho vyplývá, že zvýšení požární odolnosti je možno docílit nejen návrhem protipožární izolace, ale i zvětšením dimenzí použitých profilů.

Srovnáním výsledků 2. a 3. varianty byla získána představa, o kolik minut je možné zvýšit požární odolnost ocelového prvku použitím ochranného nástřiku. Nechráněný nosník I300 je dle tab. 8.3 únosný přibližně do 400 s (cca 7 minut) požáru, což z hlediska požadované požární odolnosti nevyhoví. Při použití vermikulitového nástřiku se ale požární odolnost zvýší až na 6250 s (105 minut), viz tab. 8.4, což umožní použití oceli jako konstrukčního materiálu i do staveb, které jsou z požárně bezpečnostního hlediska náročné.

9 Závěr

Jak bylo naznačeno již v úvodu, četnost užití oceli jako konstrukčního materiálu stále narůstá. Kvůli její vysoké tepelné vodivosti je však nutné více se zabývat požární ochranou. Zvyšující se teplota oceli totiž ovlivňuje tepelné i mechanické charakteristiky materiálu, výrazně se například snižuje modul pružnosti E i mez kluzu f_y . Návrhem vhodné požární izolace je možné zpomalit rychlost přestupu tepla do prvku, a tím jeho únosnost při požární situaci až několikanásobně zvýšit. Požární odolnost se při návrhu uvažuje v závislosti na typu, složitosti a důležitosti budovy od 15 minut až do 3 hodin, čímž se zajistí včasná evakuace osob, případně zabrání úplnému zborcení konstrukce.

Z první praktické části, která se zabývala přestupem tepla do ocelového průřezu a různými druhy pasivní požární ochrany ocelových prvků, dle očekávání vyplývá, že nejrychleji se prohřívá nechráněný ocelový prvek. Při srovnání jednotlivých druhů protipožární izolace je z hlediska tepelných vlastností nejlepší vermikulitový nástřík. Nicméně tato ochrana není příliš estetickým řešením, jejím nanesením na ocelový nosník se zcela změní charakter vzhledu prvku díky velké tloušťce nástříku a nepravidelnosti povrchu. Vzhledově nejzajímavějším typem ochrany jsou zpěnitelné nátěry, které se na ocelové prvky nanášejí v tenkých vrstvách a až při požáru nabydou na objemu a vytvoří ochranu konstrukce. Jejich nevýhodou je ale velmi vysoká cena a obtížně kontrolovatelná správnost aplikace nátěru a funkčnost. Při zvážení ekonomických a funkčních požadavků je nejlepším typem požární ochrany obetonování, a to především jedná-li se o beton lehký, který je součástí konstrukčního systému.

Druhá praktická část kombinuje tepelnou a statickou analýzu prostorového prvku v programovém systému ANSYS. Tento aplikovaný postup je vhodný jak pro řešení 3-D modelů, tak i konstrukčních detailů a je využitelný pro širokou škálu stavebních materiálů. V této části byly porovnány ruční výpočty požární odolnosti s výpočty v programovém systému. Výsledky průhybů a napětí při pokojové teplotě 20 °C a kritické teplotě 663,8 °C jsou pomocí ručního výpočtu a programu ANSYS srovnatelné. Dále se zhodnocením výsledků první a druhé varianty teplotní a statické analýzy dospělo k závěru, že pro zvýšení požární odolnosti může být dostačující návrh větších dimenzí prvků. Tímto řešením se ale výrazně zvýší hmotnost konstrukce, což může být nevýhodné ze statického i ekonomického hlediska. Analýzou třetí varianty byla přibližně zjištěna požární odolnost prvku chráněného vermikulitovým nástříkem a zatíženým požárem ze všech stran. Ve srovnání se stejně zatíženým nechráněným průřezem zvýšil vermikulitový nástřík požární odolnost přibližně dvanáctkrát, čímž se potvrdilo, že z hlediska tepelných vlastností patří mezi dobré volby protipožární izolace.

10 Použitá literatura

- [1] MELCHER, J., BAJER, M. *Prvky kovových konstrukcí, MODUL BO02-M0: Materiál a konstrukční prvky ocelových konstrukcí*. Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno: Fakulta stavební VUT v Brno, 2004. 48 s.
- [2] STUDNIČKA, J. *Ocelové konstrukce*. Skripta. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 147 s. ISBN 80-01-03473-9.
- [3] ŠESTÁK, J., RIEGER, F. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 299 s. ISBN 80-01-02933-6.
- [4] Theory Reference. ANSYS 12.1
- [5] WALD, F. a kol. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 336 s. ISBN 80-01-03157-8.
- [6] WALD, F. a kol. *Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2011. 134 s. ISBN 978-80-01-04746-0.
- [7] WALD, F. a kol. *Integrace statického výpočtu do požárně bezpečnostního řešení stavby*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2012. 123 s. ISBN 978-80-01-04994-5.

Projektová dokumentace

- [8] LLENTAB spol. s.r.o. *Průmyslová hala Šardice*. Dokumentace skutečného provedení. 2005.

Fotografická dokumentace

- [9] Hasičský záchranný sbor Jihomoravského kraje. Štefánikova 32, 602 00 Brno

Normy

- [10] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. 2004.
- [11] ČSN EN 1993-1-2 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhované konstrukce na účinky požáru*. 2006.
- [12] ČSN EN 1990 *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. 2004.
- [13] ČSN EN 13445-3 *Netopené tlakové nádoby – Část 3: konstrukce a výpočet*. 2003.

www stránky

- [14] http://www.hzspraha.cz/soubory/05_odol_ocel_kon.pdf

- [15] [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/07_Ucinne_vlastnosti_pozarne_ochrannych_materialu.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/07_Ucinne_vlastnosti_pozarne_ochrannych_materialu.pdf)
- [16] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastrikove-hmoty-ve-stavebnictvi-69.html>
- [17] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/protipozarni-nastriky-a-omitky-70.html>
- [18] <http://www.seidl.cz/cz/publikace/problematika-desek-a-deskovych-konstrukci-v-protipozarni-ochrane-staveb-72.html>
- [19] <http://stavba.tzb-info.cz/pozarni-ochrana/8853-tepelna-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru>
- [20] <http://www.seidl.cz/cz/katalog/ostatni/01103-protipozarni-nater-na-ok-flamizol-s-130.html>

vyhlášky

- [21] vyhláška MV č. 21/96 Sb., paragraf 51, 1996

11 Seznam symbolů

A_d	mimořádné zatížení	
A	plocha	$[m^2]$
a	polovina šířky pásnice	$[m]$
c	měrná tepelná kapacita	$[J\ kg^{-1}K^{-1}]$
d	tloušťka	$[m]$
E	modul pružnosti v tahu a tlaku (Youngův)	$[Pa]$
E_d	návrhová hodnota příslušných účinků zatížení	$[Nm^{-1}]$
f_y	mez kluzu	$[Pa]$
G	modul pružnosti ve smyku	$[Pa]$
G_k	stálé zatížení	$[Nm^{-1}]$
h	výška průřezu	$[m]$
I	moment setrvačnosti	$[m^4]$
k_{sh}	součinitel zastínění	
$k_{y,T}$	redukční součinitel meze kluzu	
l	délka	$[m]$
$M_{pl,Rd}$	plastická momentová únosnost	$[Nm]$
M_{Sd}	působící ohybový moment	$[Nm]$
N	osová síla	$[N]$
O	obvod	$[m]$
q	tepelný tok	$[Wm^{-2}]$
$q_{net,d}$	návrhová hodnota tepelné pohltivosti povrchu	$[Wm^{-2}]$
Q_k	proměnné zatížení	
$\dot{Q}$	vydatnost objemového zdroje tepla	
R	mezní stav únosnosti	
R_d	návrhová hodnota únosnosti	

T	teplota	[°C]
t	čas	[s]
t_f	tloušťka pásnice	[m]
t_w	tloušťka stojiny	[m]
u	obsah vlhkosti	[%]
V	objem	[m ³]
V_{Rd}	smyková únosnost	[N]
W	průřezový modul	[m ³]
A_p/V	součinitel průřezu	[m ⁻¹]
α_c	součinitel přestupu tepla	[W m ⁻² K ⁻¹]
α_T	součinitel teplotní roztažnosti	[°C ⁻¹]
$\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$	součinitele pro přepočet národních zkoušek	
δ	průhyb	[m]
ε	emisivita	
ε_p	součinitel průřezu	
$\eta_{fi,t}$	redukční součinitel únosnosti	
η_{fi}	redukční součinitel účinku zatížení	
κ	součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty	
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
μ	stupeň využití průřezu	
ν	součinitel příčné kontrakce (Poissonův)	
ρ	hustota	[kg m ⁻³]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W m ⁻² K ⁻⁴]
σ_M	Misesovo napětí	[Pa]
χ	součinitel klopení	
$\psi_{1,i}$	součinitele pro častou a kvazistálou hodnotu proměnných zatížení	