

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**VLIV SENDVIČOVÝCH PANELŮ
NA CHOVÁNÍ OCELOVÉ KONSTRUKCE
PŘI POŽÁRU**

**INFLUENCE OF SANDWICH PANELS ON BEHAVIOUR OF STEEL
STRUCTURE DURING FIRE**

Bc. Klára Píhová

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

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pihová	Jméno: Klára	Osobní číslo: 423749
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb (Q)		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv sendvičových panelů na chování ocelové konstrukce při požáru	
Název diplomové práce anglicky: Influence of sandwich panels on behaviour of steel structure during fire	
Pokyny pro vypracování:	
1. Shrnutí problematiky	
2. Experimentální studie	
3. Numerický model	
4. Vyhodnocení a shrnutí	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cáblová, Ph.D., od 1.12.2018 prof. Ing. František Wald, CSc.	
Datum zadání diplomové práce: 3.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
..... Podpis vedoucího práce	..... Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

..... 8.10.2018	..... Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a informace jsem čerpala z uvedených zdrojů.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6.ledna 2019

Bc. Klára Píhová

Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucí mé diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za poskytnutí konzultací, při kterých jsem získala mnoho věcných rad a připomínek. Dále bych chtěla poděkovat svým přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali. Děkuji také svým rodičům, kteří mi umožnili tuto práci realizovat a poskytnutí výborných podmínek ke studiu. V neposlední řadě svému příteli za trpělivost a povzbuzování během psaní této práce.

Obsah

Abstrakt	.....	VI
Abstract	.....	VI
Seznam použitých symbolů a zkratk	.....	VII
1 Úvod	.....	9
1.1 Motivace	.....	9
1.2 Struktura práce	.....	9
1.3 Cíle práce	.....	9
2 Současný stav poznání	.....	10
2.1 Chování konstrukce se sendvičovými panely za běžné teploty	.....	10
2.2 Chování sendvičových panelů za požáru	.....	14
2.3 Nosná konstrukce	.....	15
2.4 Sendvičové panely	.....	16
2.4.1 Sřešní panel KINGSPAN KS 1000 RW	.....	16
2.4.2 Upevňovací prvky	.....	18
2.4.3 Příčný spoj	.....	19
2.4.4 Podélný spoj	.....	19
3 Experimentální zkoušky	.....	20
3.1 Popis zkušebního zařízení	.....	20
3.2 Popis použitých prvků	.....	21
3.2.1 Nosná konstrukce	.....	21
3.2.2 Sendvičový panel	.....	21
3.2.3 Spojovací prvky	.....	22
3.3 Teplotní zatížení	.....	23
3.4 Mechanické zatížení	.....	23
3.5 Kritéria experimentu	.....	24
3.6 Experiment	.....	24
3.7 Výsledky a výstupy	.....	27
3.7.1 Experiment sendvičového panelu tloušťky 100 mm	.....	27
3.7.2 Experiment sendvičového panelu tloušťky 160 mm	.....	34
3.8 Porovnání	.....	38
4 Numerický model	.....	41
4.1 ANSYS Workbench	.....	41
4.1.1 Materiálové vlastnosti	.....	42
4.1.2 Geometrie	.....	46
4.1.3 Kontakty ploch	.....	47
4.1.4 Okrajové podmínky	.....	47
4.1.5 Výpočetní síť	.....	49
4.1.6 Teplotní zatížení	.....	50
4.1.7 Mechanické zatížení	.....	52
4.2 Teplotní analýza	.....	52
4.2.1 Výsledky teplotní analýzy	.....	52

4.3	Statická analýza.....	55
4.3.1	Výsledky statické analýzy.....	55
5	Validace numerického modelu.....	58
5.1	Validace teplotní analýzy.....	59
5.2	Validace statické analýzy.....	61
6	Závěr	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam tabulek.....	68
	Literatura	68

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá aktuálním problémem vlivu chování sendvičových panelů na ocelovou nosnou konstrukci za požáru. V kapitole současný stav poznání jsou shrnuty výsledky zahraničních studií, které tento problém již řešily, ať už za běžné teploty i za požáru. Dále se práce zabývá experimentálními zkouškami, kde jsou uvedeny poznatky z experimentů z požární zkušebny PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Zkoušenou sestavou byl ocelový nosník stabilizovaný pomocí sendvičových panelů ve dvou tloušťkách. Provedené experimenty poskytly informace o chování stabilizovaného nosníku ve smyslu deformací. V programu ANSYS Workbench byl vytvořen model odpovídající provedeným experimentům, díky čemuž bylo možno porovnat relevantnost výsledků.

Klíčová slova

Sendvičový panel; stabilita; ocelový nosník; požární zkouška; průhyb; numerický model; Ansys Workbench

Abstract

This diploma work deals with the current problem of stabilisation of a steel beam by the aid of sandwich panel in fire. In the chapter of current state of knowledge there are summarized results of foreign studies which have already addressed this problem, whether at normal temperatures or in a fire. Further, the thesis deals with the fire experiments, where the findings from the experiments from the PAVUS a.s. in Veselí nad Lužnicí are described. The tested assembly was a steel beam stabilized with sandwich panels in two thicknesses. The conducted experiments provided information on beam behaviour in terms of deflections. In software ANSYS Workbench a numerical model which corresponds to executed experiments were carried out. Thanks to the model, a relevance of results could be evaluated.

Keywords

Sandwich panel; stability; steel beam; fire test; deflection; numerical model; Ansys Workbench

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

d	Tloušťka jádra	mm
D	Celkové rozměry	mm
H	Horizontální síla	N
L	Rozpětí	mm
m	Plošná hmotnost	kg/m ²
q	Zatížení	kN/m
R _w	Vážený průměr indexu zvukové neprůzvučnosti	dB
t	Čas	min
T	Teplota	°C
u	Deformace	mm
U	Součinitel přestupu tepla	W/m ² K

Zkratky

APDL	Ansys parametric design language
ČSN	Česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické
EN	Evropská norma
FE	Finite element
FEM	Finite element method
MKP	Metoda konečných prvků
PAVUS	Požárně atestační a výzkumný ústav stavební
PC	Personal computer
PIR	Polyisokyanurát
PUR	Polyuretan
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RFCS	Research fund for coal and steel

STABFI	Steel cladding systems for stabilization on buildings in fire
UK	United Kingdom
UV	Ultrafialové záření

1 Úvod

1.1 Motivace

Sendvičové panely vynikají tepelně izolační schopností, jednoduchou manipulací a snadnou aplikací, vyžadují minimální údržbu a zaručují nízkou spotřebu energie. Díky těmto vlastnostem jsou sendvičové panely stále více využívány zejména ve výstavbách jednopodlažních a vícepodlažních průmyslových a halových budov.

Problematice stabilizačního účinku sendvičových panelů se doposud nevěnovala velká pozornost. Řešilo ji pouze několik málo projektů a část z nich sloužila jako podklad pro vydání Evropského doporučení pro stabilizaci ocelových nosníků pomocí sendvičových panelů. Tyto projekty se zabývaly pouze účinkem za běžné teploty a bylo zjištěno, že při návrhu ocelových konstrukcí lze dosáhnout značné úspory s využitím sendvičových panelů, kdy je tento systém využit ke stabilizaci celé konstrukce namísto běžných konstrukčních řešení. Díky možné úspoře materiálu je možné snížit náklady na výstavbu ocelových konstrukcí a zvýšit tak jejich konkurenceschopnost vůči ostatním materiálům.

Projekty bohužel opomíjejí chování těchto systémů za zvýšené teploty. Tato diplomová práce je proto tomuto tématu věnována. Požární bezpečnost staveb je nedílnou součástí každého projektu a je velmi důležité na tento fakt, při jakémkoliv návrhu, nezapomínat.

1.2 Struktura práce

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První dvě kapitoly se zabývají úvodem do problematiky stabilizačního účinku sendvičových panelů, motivací pro tuto práci a dále současným stavem poznání o této problematice. Dále jsou popsány jednotlivé prvky studovaného typu konstrukce (nosník, sendvičový panel a upevňovací prvky). Třetí kapitola je věnována experimentálním zkouškám. Čtvrtá kapitola se zabývá numerickým modelem v softwaru ANSYS Workbench. Dále jsou v této kapitole uvedeny výsledky numerického modelu. Předposlední kapitola se věnuje validaci numerického modelu pomocí provedených experimentů. Poslední kapitolou je závěr celé práce.

1.3 Cíle práce

Cílem diplomové práce je ověřit vliv chování sendvičových panelů na nosnou konstrukci za požáru. K ověření byly použity velkorozměrové zkoušky provedené v požární zkušebně PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Vliv sendvičových panelů na chování ocelového nosníku je sledován pomocí průhybu konstrukce. Dále je v práci vytvořen numerický model v programu Ansys Workbench, jehož výsledky jsou porovnány s výsledky z požárních zkoušek.

2 Současný stav poznání

V současnosti je vliv chování sendvičových panelů na ocelovou konstrukci za požáru řešen v rámci evropského projektu RFCS STABFI několika evropskými univerzitami a výrobci plášťových systémů Kingspan. Toto téma je považováno za velice aktuální a přínosné pro zvýšení konkurenceschopnosti ocelových konstrukcí vůči jiným materiálům.

2.1 Chování konstrukce se sendvičovými panely za běžné teploty

Dokument [1] uvádí informace o použití sendvičových panelů jako stabilizačních prvků pro ocelové konstrukce (nosníky, sloupy). Dále rozšiřuje oblast použití sendvičových panelů pro stavební třídy II podle EN 1993-1-3.

Sendvičové panely vykazují tuhost proti posunu v rovině panelu a proti otáčení kolem příčné osy panelů. Z toho vyplývá, že sendvičové panely mohou být použity jako prvky, které zajišťují ocelové konstrukce proti ohybu, kroucení a klopení. Účinek stabilizace závisí ať už na vlastnostech vybraného sendvičového panelu, tak na vlastnostech spojů – tzn. umístění a počtu upevňovacích prvků mezi jednotlivými panely a mezi panely a nosnou ocelovou konstrukcí.[1]

Tuhost v kroucení je obecně závislá na spojovacích prostředcích umístěných mezi nosnou konstrukcí a sendvičovým panelem. Tuhost také závisí na přeneseném zatížení sendvičového panelu na nosnou konstrukci. Sendvičové panely zvyšují odolnost nosné konstrukce proti klopení a vzpěru tím, že brání posunu a natočení. [1]

Dále v dokumentu [1] najdeme vyhodnocení rotační a smykové tuhosti jednotlivých sendvičových panelů, které jsou instalované ve stěně nebo střešní konstrukci. Vysoká smyková pevnost sendvičových panelů v rovině může být použita pro stabilizaci proti bočnímu posunu nosné konstrukce. Tím je možné pomocí sendvičových panelů zabránit klopení a prostorovému vybočení nosné konstrukce. Tento typ stabilizace vyžaduje přesné znalosti o smykové tuhosti v rovině. Zvláštní opatření jsou nezbytné pro spojovací prostředky, protože spojovací prostředky významně snižují tuhost ve smyku.

Sendvičové panely se používají pro stabilizaci ocelové konstrukce za následujících podmínek:

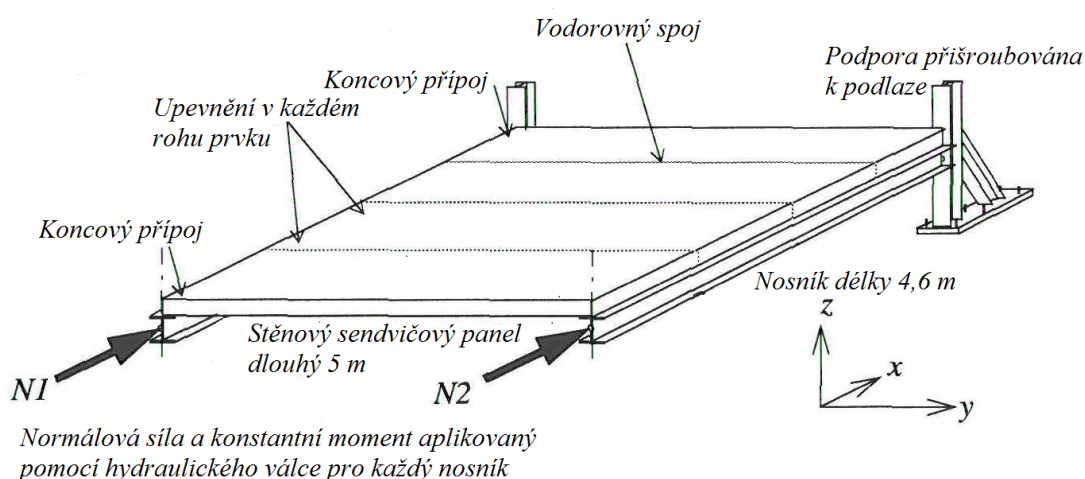
- Sendvičové panely jsou použity jako konstrukční části, které nemohou být odstraněny nebo upraveny bez vhodného uvážení.
- Specifikace projektu, včetně výpočtů a výkresů, bere v úvahu, že sendvičové panely jsou určeny ke stabilizaci ocelových prvků.
- Je použito přímé upevnění se vzdáleností od okraje ≥ 20 mm ve směru rozpětí.
- K zabránění klopení není potřebné znát vlastnosti materiálu jádra sendvičových panelů.

V příloze dokumentu [1] je možné najít vypočtené příklady, které ilustrují postupy řešení zavedené v tomto doporučení. Jedná se o příklady zabývající se kroucením a klopením ocelových konstrukcí se sendvičovými panely.

Diplomová práce od Eva Hedman-Pétursson [2] se zabývá stabilizačním účinkem ocelového sloupu pomocí sendvičových panelů. Je zřejmé, že stěnové prvky zabraňují deformování sloupů v rovině stěny. Pomocí stěnových prvků tak může být zvýšena únosnost těchto prvků. Bohužel současné Eurokódy neposkytují žádné informace o tom, jak tento pozitivní efekt v návrhu uvažovat. Stejně tak i ve Švédské příručce je stabilizace nosník prvků pomocí sendvičových panelů ignorována. V práci [2] je tato problematika zkoumána pomocí experimentální a numerické studie. Cílem práce je vyvodit analytické vzorce pro síly, které musí být navrženy upevňovací prostředky sendvičových panelů.

Všechny laboratorní testy popisované v práci [2] byly prováděné na Katedře Civil and Mining Engineering na univerzitě ve Švédsku. Proběhla řada samostatných malorozměrových testů pro stanovení klopení a kroucení, vlastností materiálů a zbytkového napětí pro konstrukční prvky. Následovalo 7 testů ve skutečném měřítku. Celkem bylo provedeno 12 zkoušek sloupů ve dvou celoplošných sestavách s různými průřezy a interakcí mezi momentovou a normálovou silou.

První sestava zkoušky, která je uvedena na obr. 1 zahrnovala část stěny sendvičového prvku. Stěna byla přikotvena ke dvěma ocelovým sloupům. Délka každého sloupu byla přibližně 4,6 m a stěnové prvky měly délku 5 m. Zatížení, normálová síla a ohybový moment byl aplikován pomocí hydraulických válců.



obr. 1 Schéma sestavy 1 (přeloženo z [2])

Uspořádání dalšího experimentu bylo navrženo tak, aby byl sloup namáhán pouze normálovou silou. Sloup o délce 6 m byl bočně podepřen. Podmínky tohoto podepření byly řízeny tak, aby odpovídaly bočnímu podepření, které je způsobeno stěnovým prvkem.

Výše popsané zkoušky skutečného měřítka byly poté v práci [2] namodelovány metodou konečných prvků v softwaru ABAQUS. Model byl vytvořen tak, aby odpovídal geometrickým a okrajovým podmínkám laboratorních zkoušek. Výsledky numerické simulace a zkoušek skutečného měřítka vykazovaly shodu při porovnání posunutí, způsobu podepření a únosnosti. Tyto simulace poskytly nejen další informace o podepření ve zkoušených případech, ale také představovaly základ pro další výsledky s úpravami průřezu, délkou sloupu a zatížení pomocí interakce mezi normálovou silou a momentem. Následně byla pomocí FE modelu vytvořena parametrická studie.

Závěrem této studie je, že o konceptu plného podepření lze hovořit pouze tehdy, když je prostorové podepření dostatečné k prokázání předpokladu tuhosti v obecném směru. Mód porušení nastane boulením v rovině stojiny nosníku nebo alternativně může být klopení zabráněno, a to v případě, že tažená pásnice je zajištěna. Sendvičový panel, který je upevněn pomocí jednoho šroubu v každém rohu, přispívá k pozitivnímu vlivu a únosnosti sloupu. Kritická únosnost pro torzní vzpěr je rovněž pomocí sendvičových panelů zvýšena a tato zvýšená kritická únosnost může být použita při běžném konstrukčním návrhu sloupů. Pevnost spoje musí být zkontrolována jako součást konstrukce. Přidáním spojovacích prvků a zpevněním přípojů sendvičového panelu ke sloupu v horní a spodní části je vytvořena smyková stěna, jejíž účinek lze popsat jako pružinové podepření sloupu. U malých a středních rozměrů konstrukcí stačí k vytvoření úplného podepření. Síly působící na konstrukční systém byly odhadnuty třemi různými metodami: teorií elasticity, rovnováhou sloupu bez uvažování tuhosti a FE simulací. Odhady ukazují značný rozptyl, avšak stále poměrně nízké síly. Konvekční 2 % pravidlo je obvykle bezpečné uvažovat jako součet podpůrných sil podél sloupu. Návrhová únosnost konstrukce by však měla být zvýšena, když zatížení dosahuje kritické síly při klopení vzhledem k pružnosti podepření. Je navržen zjednodušený návrhový vzorec a pokud jsou potřebné podrobné informace o podpůrných silách, lze použít řešení podle teorie elasticity. Díky tomuto zjednodušenému vzorci je možné současně uvažovat jak tuhost, tak pevnost konstrukčního systému. V případě, že je tlačovaná pásnice zajištěna, může zde být tendence k boulení s vlastním tvarem, ve tvaru sinusoidy. To zvyšuje síly na mezilehlých přípojích, zatímco součet stabilizačních sil zůstává stále nízký. Z tohoto důvodu byl navržen konzervativní odhad pro mezilehlá připojení. Torzní tuhost, které prvky nabízejí, je malá a lze ji v návrhu zanedbat [2].

V rámci této studie nebylo možné zjistit, zda jsou omezení dána tloušťkou sendvičových prvků. V navrženém řešení pro zajištění dostatečné tuhosti musí jádro prvků přenést smykové síly mezi plechy na povrchu a mezi výplní sendvičového panelu. Testy, které byly provedeny, neprokázaly žádný problém s přenosem smykových sil, ale s narůstající silou v podpoře, zde musí být stanoven určitý limit [2].

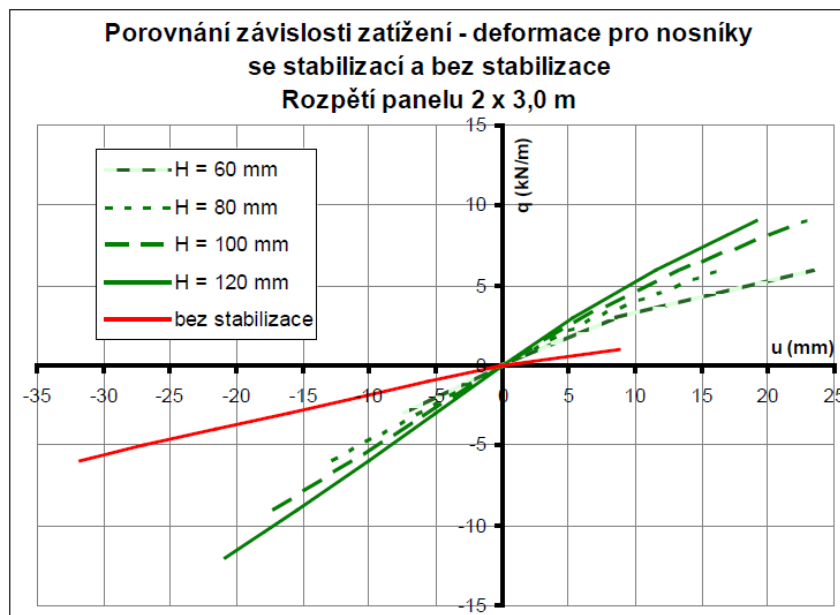
Na zkoušky ve skutečném měřítku z diplomové práce bylo navázáno prací [3], kde byly vytvořeny dva modely ocelových sloupů podporovaných sendvičovými panely pomocí metody konečných prvků.

Článek v časopise z roku 2014 [4] se zabývá stabilizací ocelových tenkostěnných nosníků jednoose symetrického průřezu tvaru C stabilizovaných sendvičovými panely s polyuretanovým (PUR) jádrem připevněnými k horní pásnici nosníku. Jsou uvažovány dvě varianty průřezu nosníku a dvě varianty rozpětí sendvičového panelu. Panel byl uvažován jako spojitý nosník o dvou polích. Zkoumaný nosník tvoří střední podporu tohoto spojitého nosníku a jeho chování (napětí, deformace) je podrobně popsáno. Numerický model a numerická analýza je provedena v programu Dlubal RFEM založeném na metodě konečných prvků. Na obr. 2 je znázorněn modelovaný konstrukční systém. Analýza je provedena formou parametrické studie, kdy je sledován vliv různé tloušťky sendvičových panelů na chování nosníku. Dále je provedeno i porovnání se samostatným nosíkem bez jakékoliv stabilizace.



obr. 2 Řešený konstrukční systém [4]

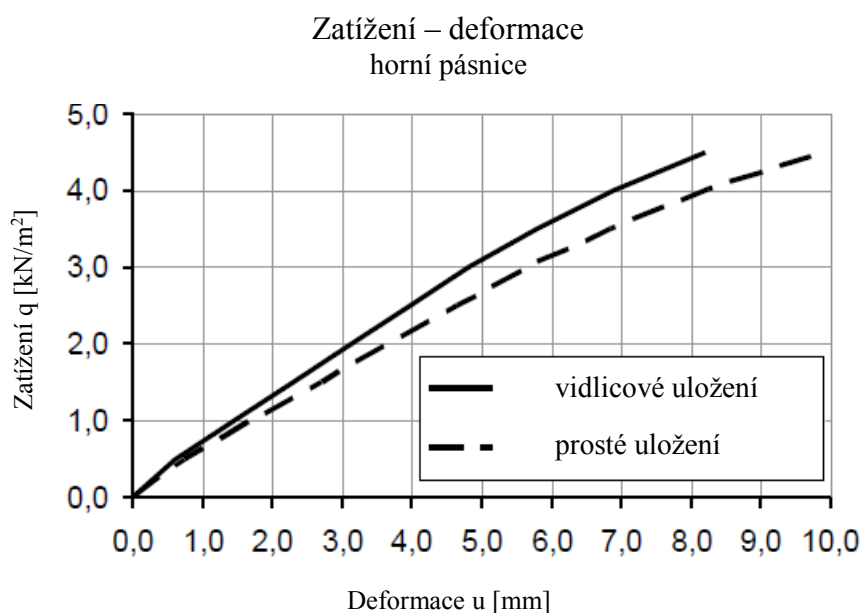
V rámci vyhodnocení výsledků numerické analýzy byly zaznamenávány hodnoty deformací. Z výsledku této studie je patrné, že přítomnost sendvičových panelů má pozitivní vliv na chování tenkostěnných průřezů. Tento fakt je znázorněn v grafu obr. 3. Stabilizovaný nosník dosahuje při působení ekvivalentního zatížení menších hodnot.



obr. 3 Závislosti zatížení a deformace [4]

Příspěvek [5] z konference EUROSTEEL 2014 se zabývá numerickou analýzou ocelového tenkostěnného nosníku profilu Z stabilizovaného pomocí sendvičových panelů upevněných na horní straně pásnice ocelového nosníku. Panely jsou uvažovány jako spojité nosníky o dvou stejných polích. Uložení je uvažováno ve dvou různých případech, kdy první variantou je prosté podepření a druhou variantou je vidlicové uložení.

Výsledky této studie ukazují značný účinek podpory nosníku, viz obr. 4. Ve zkoumaném případě jsou hodnoty posunutí uprostřed nosníku (při maximálním zatížení), který je podepřen na spodní pásnici, o 22 % vyšší než posunutí nosníku s vidlicovým uložení. Co se týče von Misesova napětí je rozdíl o 9 %. V obou případech von Misesova napětí ocelové nosníky nedosáhly meze kluzu, tj. nosníky splňují podmínky globální stability a z hlediska stability nedochází k torznímu vzpěru nosníku. [5]



obr. 4 Zatížení - deformace na horní straně příruby (přeloženo z [5])

2.2 Chování sendvičových panelů za požáru

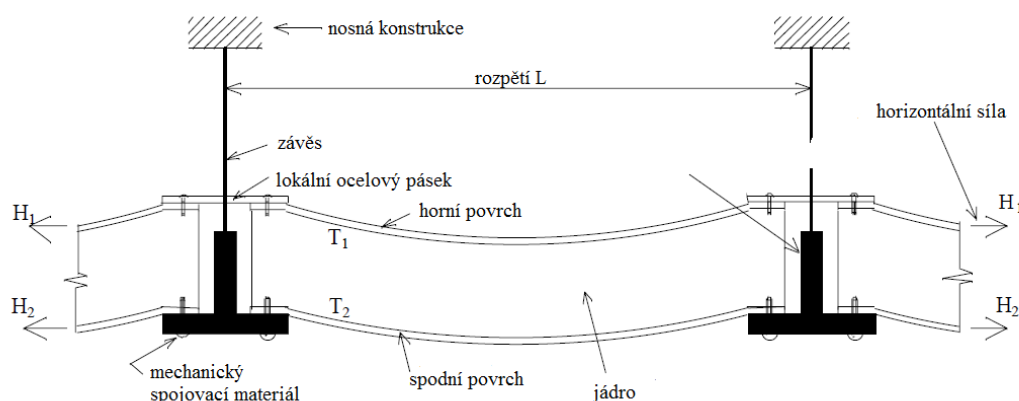
V článku [6] je řešena stabilita sendvičových panelů vystavených požáru. Požární odolnost sendvičových panelů může být vynikající, pokud je použit vhodný materiál jádra a pokud plechové opláštění panelů správně s jádrem spolupůsobí.

U použití sendvičových panelů v chladírenských skladech nastává problém tepelných mostů z důvodu kotvení kovovými prostředky skrz panel k nosné konstrukci. To vede k návrhům, které fungují velmi dobře v normálních podmínkách, ale v případě požáru, kdy obklady nejsou kotveny k nosné konstrukci, může dojít velmi rychle k jejich zhroucení. Takový kolaps byl zaznamenán při požáru z roku 1993 v drůbežárně Sun Valley v Herefordu ve Velké Británii. Při tomto požáru přišli o život dva hasiči.

Tento článek dále popisuje, co se může stát, když opláštění panelů není mechanicky upevněno ocelovými prvky. Dále uvádí metody pro posouzení požární bezpečnosti a stability stropních sendvičových panelů vystavených požáru. Metoda předpokládá, že konce panelů jsou podepřeny proti vodorovnému posunu a panel se i po případné delaminaci chová jako membrána.

Dále je v práci [6] uvedeno, že většina sendvičových panelů ve Velké Británii má plechová opláštění, ve kterém jsou jádra připevněna pomocí lepidla. Zkoušky v malém měřítku v UK Fire Research Station, Building Research Establishment ukázaly, že teploty delaminace se pohybují v rozmezí 130 – 350 °C. To znamená, že se panely mohou delaminovat a mohou zkolabovat již před dosažením celkového vzplanutí (flashoveru) v požárním úseku, pokud není opláštění panelů dostatečně zajištěno.

Střešní panely jsou závislé na použitém lepidlu mezi tenkými ocelovými plechy a materiálem jádra panelu. Většina lepidel používaných v panelech se delaminuje při poměrně nízkých teplotách, v rozmezí 130 až 350 °C, jak bylo zmíněno dříve. Těchto teplot je dosaženo za méně než 5 minut podle normové teplotní křivky. Pokud jsou panely podepřeny pouze ve svislém směru a nejsou zajištěny ve vodorovném směru, tak při delaminaci vznikne průhyb a sendvičové panely by z podpor sklouzly. Pro zabránění kolapsu musí být konce panelových ploch upevněny k nosné konstrukci a vodorovně zajištěny tak, aby působily jako membrány. To lze například provést bez vytvoření tepelného mostu mezi horním a spodním povrchem, jak je uvedeno na obr. 5. [6]



obr. 5 Vhodný způsob upevnění panelů na střešní konstrukci (přeloženo z [6])

2.3 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce použitá pro střešní nebo stěnové opláštění sendvičovými panely, může být z tenkostěnných za studena tvarovaných průřezů nebo válcovaných průřezů. Pro střešní konstrukci je nejčastěji používán tenkostěnný nosník tvaru C, Z a HEA. Pro stěnové konstrukce je používán válcovaný průřez typu HEA či HEB.

2.4 Sendvičové panely

Sendvičové panely mají širokou škálu použití včetně fasád, střech, dílčích příček, vnitřních stěn a stropů. Vynikají tepelnou izolací, jednoduchou manipulací a jednoduchým použitím. Vyžadují minimální údržbu a zaručují nízkou spotřebu energie.

Sendvičové panely jsou složeny z tenkých ocelových plechů a jádra z tepelné izolace (PIR a PUR pěny, či minerální vaty).

2.4.1 Střešní panel KINGSPAN KS 1000 RW

Panely KS 1000 RW jsou střešní panely určené pro šikmé střechy všech typů budov od 4° (resp. 6° v případě více řad nad sebou). Panel může být také použit pro stěnové aplikace.

Střešní panel RW s trapézovou profilací horního plechu se upevňuje standardní metodou viditelného kotvení. Panel je vhodný pro všechny typy budov s minimálním sklonem střešní konstrukce. Vyráběné rozměry sendvičových panelů s hmotností jsou uvedeny v tab. 1.

tab. 1 Tabulka rozměrů a hmotnosti sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7]

<i>d</i> – tloušťka jádra (mm)	25	40	50	60	70	80	100	120	160
<i>D</i> – celkové rozměry (mm)	60	75	85	95	105	115	135	155	195
<i>Hmotnost</i> (kg/m ²)	9,03	9,63	10,03	10,43	10,83	11,23	12,03	12,83	14,43

Vyráběné standardní délky panelů jsou od 2 m do 14,5 m. Panely kratší než 2 m jsou kráceny na stavbě. Šířka panelů je 1 m.

Možnosti galvanické ochrany jsou dvě. První možností je žárově pozinkovaná ocel s celkovou hmotností zinku 275 g/m² s řadou možností finální povrchové úpravy jako je polyester, Spectrum, PVDF, Plastisol a Foodsafe. Druhou variantou je Galvalloy (žárově aplikovaný povlak z eutektické slitiny složený z přibližně 95 % Zn, 5 % Al a dalších prvků) s finální povrchovou úpravou 200 μm Plastisolu. [7]

Standardní tloušťky ocelových vnějších plechů jsou 0,50 mm. U vnitřního plechu je tloušťka 0,40 mm.

Vnější povrchovou úpravou může být standardní polyester, který je univerzální a cenově výhodný. Další varianta PVDF je bezkonkurenční v stálosti barvy a lesku a dobrou odolností proti korozi. Tuto úpravu lze použít v oblastech s extrémně vysokým UV zářením a zároveň vysokými teplotami a relativní vlhkostí. Pololesklou finální úpravu s polyuretanovou vrstvou a lehce zrnitým efektem a vysokou stálostí barvy a lesku, má úprava Spectrum. Jedná se o úpravu, která má vynikající životnost, dále je velmi odolná proti povětrnostním podmínkám, korozi a také UV záření. Díky skvělé flexibilitě má také vysokou odolnost vůči mechanickému poškození.

Poslední možností vnější povrchové úpravy je Plastisol. Jedná se o vysoce odolnou povrchovou vrstvu, která má zrnitou strukturu. Má výbornou odolnost vůči abrazi a korozi a díky skvělé flexibilitě je i dobře odolná proti poškrábání.

Mezi vnitřní povrchové úpravy patří polyester nebo foodsafe, se silnou polymerní vrstvou. Je netoxický, odolný nejen vůči plísním, a snadno se čistí. Také je chemicky inertní a bezpečný pro stálý kontakt s nezabalenými potravinami.

Standardně používaným jádrem je tuhá IPN Firesafe (PIR) pěna s uzavřenými buňkami. Tento materiál vyhovuje požadavkům na zdravotní nezávadnost. Velkým plusem je nulový potenciál poškozování ozónové vrstvy. Jádro totiž neobsahuje tvrdé, ale ani měkké freony. [7]

Těsnění panelů je řešeno pomocí antikondenzačních těsnících pásek, které jsou umístěny už z výroby ve žlábcích všech podélných spojů. Pokud budou panely aplikovány v nestandardních podmínkách (např. prostory s vysokou vlhkostí v objektu), navrhuje se dotěsnit spoje pomocí butylové pásky. Ta se umísťuje do zámků jednotlivých panelů před samotnou montáží.

Hodnoty tepelné izolace a akustických vlastností sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW jsou uvedeny v následujících tabulkách (tab. 2 a tab. 3).

tab. 2 Tepelně izolační vlastnosti sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7]

Tloušťka panelu (mm)	25	40	60	80	100	120	140	160
U (W/m^2K)	0,803	0,521	0,334	0,254	0,206	0,172	0,149	0,131

tab. 3 Akustické vlastnosti sendvičových panelů KINGSPAN KS 1000 RW [7]

Tloušťka panelu (mm)	Vážený průměr indexu vzduchové neprůzvučnosti R_w (dB)
25	24
40	
60	
80	
100	25
120	
140	
160	26

Z hlediska požární bezpečnosti prošly sendvičové panely mnoha testy provedenými výrobcem. Byly schváleny a odpovídají stavebním předpisům a normám. Izolační jádro IPN FIREsafe zaručuje klasifikaci B-s_{1,d0} a zároveň nepodporuje šíření ohně. Hodnoty požární odolnosti v závislosti na tloušťce panelu jsou uvedeny v tab. 4.

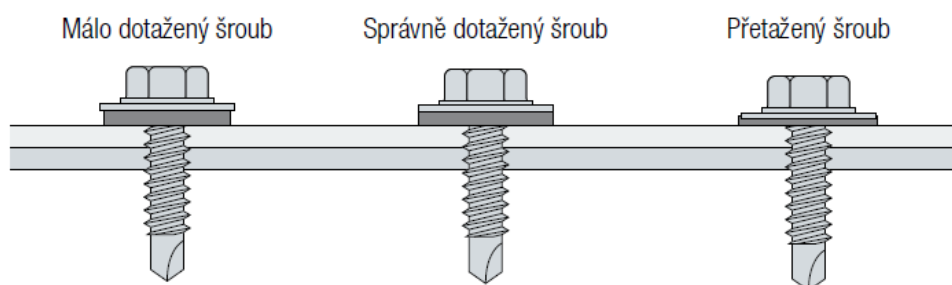
tab. 4 Požární odolnost sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7]

Tloušťka panelu (mm)	Požární odolnost podle EN 13501-2 a ČSN 730810	
	zevnitř (zespod)	zvenku (shora)
25	N	$B_{ROOF}(t3)$
40		
60	REI20 DP3 RE30 DP3	
80		
100		
120	REI20 DP3 RE30 DP3	
140		
160		

2.4.2 Upevňovací prvky

K připevnění panelů k nosné konstrukci se využívají samovrtné, či závitové šrouby, které musí být instalovány pomocí hloubkového dorazu. Určení počtu upevňovacích prvků závisí na statikovi, který bere v potaz uložení a zatížení panelu a také velikost namáhání, které šrouby zvládnou přenést. Důležitým parametrem je dodržení minimální hloubky zašroubování do nosné konstrukce, a to bez započítání délky navrženého vrtáčku, či tvrzené špičky.

Správné spojení sendvičového panelu k nosné konstrukci závisí i na dotažení upevňovacích šroubů. Musí dojít k mírné deformaci těsnící podložky pod hlavou šroubu a také k mírnému zatlačení povrchového plechu sendvičového panelu. Nesmí ale dojít k jeho přetažení, či nedotažení. Podstatné je, aby u panelů s izolačním jádrem z PIR pěny nedošlo k větší prohlubni v místě šroubů jak 2 mm. Správné a nesprávné dotažení vrutu je vidět na obr. 6.

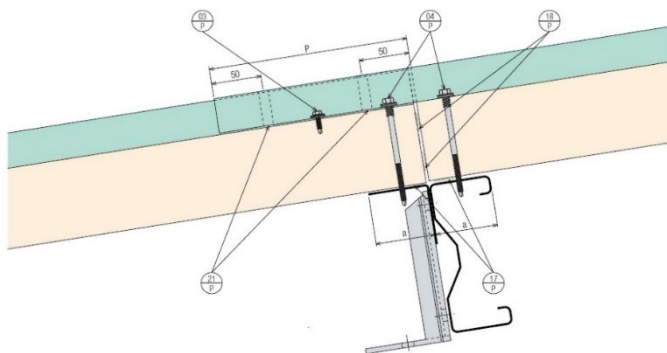


obr. 6 Dotažení upevňovacích prvků [7]

2.4.3 Příčný spoj

Při montáži více panelů ve spádu střechy vzniká tzv. příčný spoj, ten je zobrazen na obr. 7. Jedná se o spoj mezi navazujícími střešními panely, které se překrývají délkou podřezu panelu. Délka podřezu se odvíjí od sklonu střechy. Při hodnotě do 10 % je navržen minimální podřez na 250 mm. Nad 10 % se pak doporučuje podřez délky 200 mm.

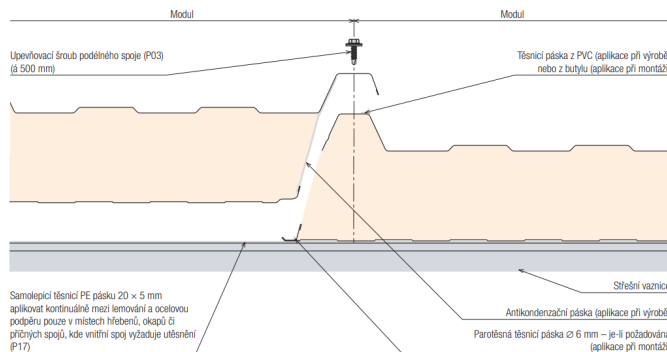
Kvalita příčného spoje, závisí i na postupu montáže. V místě překrytí panelů je potřeba odstranit ochrannou fólii a také otřepy, které mohou vzniknout při řezání panelů. Než dojde k uložení horního panelu je potřeba osadit do jeho příčného řezu dvě samolepící expanzní pásky (P18). Díky nim by případná mezera v příčném spoji mezi panely zůstala vyplněna. Před uložení horního panelu na spodní, je nutné aplikovat butylovou těsnicí pásku (P21). Ta se aplikuje ve dvou řadách na spodní panel. Samovrtné šrouby s bezzávitovou zónou (P03), v počtu 6 kusů na panel, se umísťují do úžlabí z důvodu spojení panelů v příčném spoji. Při standardním použití panelů na střeše o minimálním spádu 10°, se toto sešroubování nevyžaduje.



obr. 7 Příčný spoj sendvičového panelu KS 1000 RW [7]

2.4.4 Podélný spoj

Veškeré panely mají z výroby opatřeny podélné spoje antikondenzační těsnicí páskou na boční straně spoje. Dále pak těsnicí páskou aplikovanou ve volné přesahové vlně. Pro správnou montáž je důležité, aby podélné spoje byly přesně uloženy, a to tak aby byla zajištěna těsnost spoje. Následně je potřeba zkontrolovat jejich správnost umístění. Panely se kotví pomocí upevňovacího šroubu podélného spoje po 500 mm, viz obr. 8.



obr. 8 Podélný spoj panelu KS 1000 RW [7]

3 Experimentální zkoušky

V rámci diplomové práce byly zkoumány dva experimenty na plášťových systémech tvořených sendvičovými panely s jádrem z PIR pěny a ocelovým nosníkem průřezu HEA. Experimenty byly provedeny jako velkorozměrové zkoušky na horizontální peci neboli stropní peci v požární zkušebně PAVUS, a.s.

Tyto experimenty byly realizovány s cílem zjistit, jakým způsobem se za zvýšené teploty chová ocelový nosník, který je stabilizovaný pomocí sendvičových panelů.

Experimenty jsou součástí evropského výzkumného projektu Steel cladding systems for stabilization on buildings in fire (STABFI).

3.1 Popis zkušebního zařízení

Horizontální pec v požární zkušebně PAVUS, a.s. má vnitřní půdorysné rozměry 3,0 x 4,0 m se světlou výškou stropu 2,2 m, viz obr. 9. Do pece je umožněn vstup dveřmi o světlem rozměru 0,7 m x 1,795 m. Během zkoušky lze do pece nahlížet přes čtyři prosklené průzory o vnějším rozměru 0,1 m x 0,1 m. V podlaze uprostřed pece je odvětrávací otvor. Otvor má světlé rozměry 0,5 m x 0,8 m. Kolem otvoru je zhotoven betonový límec s výškou 0,1 m.

Pomocí celkem osmi plynových hořáku, které jsou umístěny ve výšce 0,68 m nad podlahou (čtyřmi na jedné z delších stran), je pec ohřívána. Palivem pro plynové hořáky je směs zemního plynu a vzduchu. Nejčastěji se pec ohřívá podle nominálních teplotních křivek. Řízení teploty probíhá pomocí deskových snímačů teploty umístěných 0,1 m pod stropem. Tyto deskové snímače řídí výkon hořáků na základě zjištěných teplot v peci. Díky tomuto způsobu lze dosáhnout velmi přesných hodnot teploty plynu uvnitř pece podle nominálních teplotních křivek.

V peci se měří přetlak oproti okolnímu tlaku vzduchu. Měření je prováděno pomocí čidel na jedné z delších stran pece. Regulování tlaku pece se provádí přes obdélníkový otvor v podlaze, který je napojen na potrubí s osazeným ventilátorem. Odvodem plynů pomocí otvoru v podlaze se reguluje přetlak v peci tak ,aby odpovídal normovým požadavkům. [8]



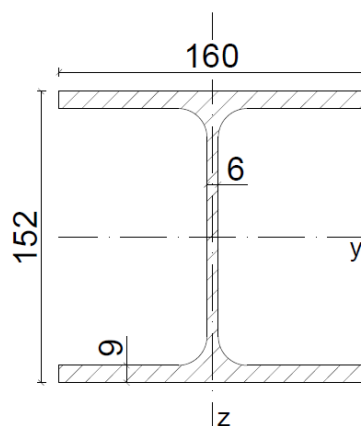
obr. 9 Horizontální pec ve Veselí nad Lužnicí PAVUS a.s. [8]

3.2 Popis použitých prvků

3.2.1 Nosná konstrukce

Pro tento experiment je použit ocelový válcovaný průřez tvaru HEA 160, jehož rozměry jsou uvedeny na obr. 10. Nosník je vyroben z oceli třídy S355. Rozpětí nosníku je 4,5 m. Ocelový nosník je požárně chráněn pomocí intumescentního nátěru Sherwin Williams FX5090. Nátěr je dimenzován tak, aby vyhověl požadavku R60.

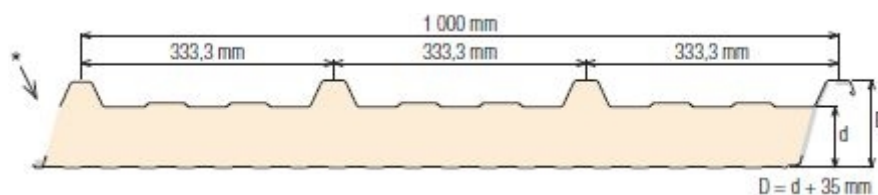
Nátěr Sherwin Williams FX5090 je možné použít až do požadavku R180. Návrhová doba životnosti intumescentního nátěru je 10 let za předpokladu, že je správně aplikován a udržován. Klasifikaci třídy reakce na oheň má tento nátěr B-s₁-d₀. Nátěr je na nosník aplikován ze všech stran nehledě na to, že při zkoušce bude horní pásnice zakryta uloženými sendvičovými panely. Před aplikací nátěru byl nosník opískován, aby byla zajištěna dostatečná soudržnost nátěru s podkladem. Po opískování byly k nosníku přivařeny termočlánky, které později během experimentu sloužily pro měření teploty nosníku.



obr. 10 Řez průřezem HEA 160

3.2.2 Sendvičový panel

Pro experimenty byly vybrány izolační panely Kingspan KS 1000 RW tloušťky 100 a 160 mm. Řez panelem je zobrazen na obr. 11. Jedná se o stropní panel s prolisovanými plechy. Izolační jádro panelu je tvořeno PIR pěnou. Vnější plech je tloušťky 0,5 mm a vnitřní plech má tloušťku 0,4 mm. Šířka panelů je 1000 mm. Délka panelů je uvažována ve dvou různých rozměrech. Na jedné straně jsou panely v délce 2600 m a v druhé kratší o 1000 mm, tedy 1600 mm.



obr. 11 Řez sendvičovým panelem Kingspan KS 1000 RW

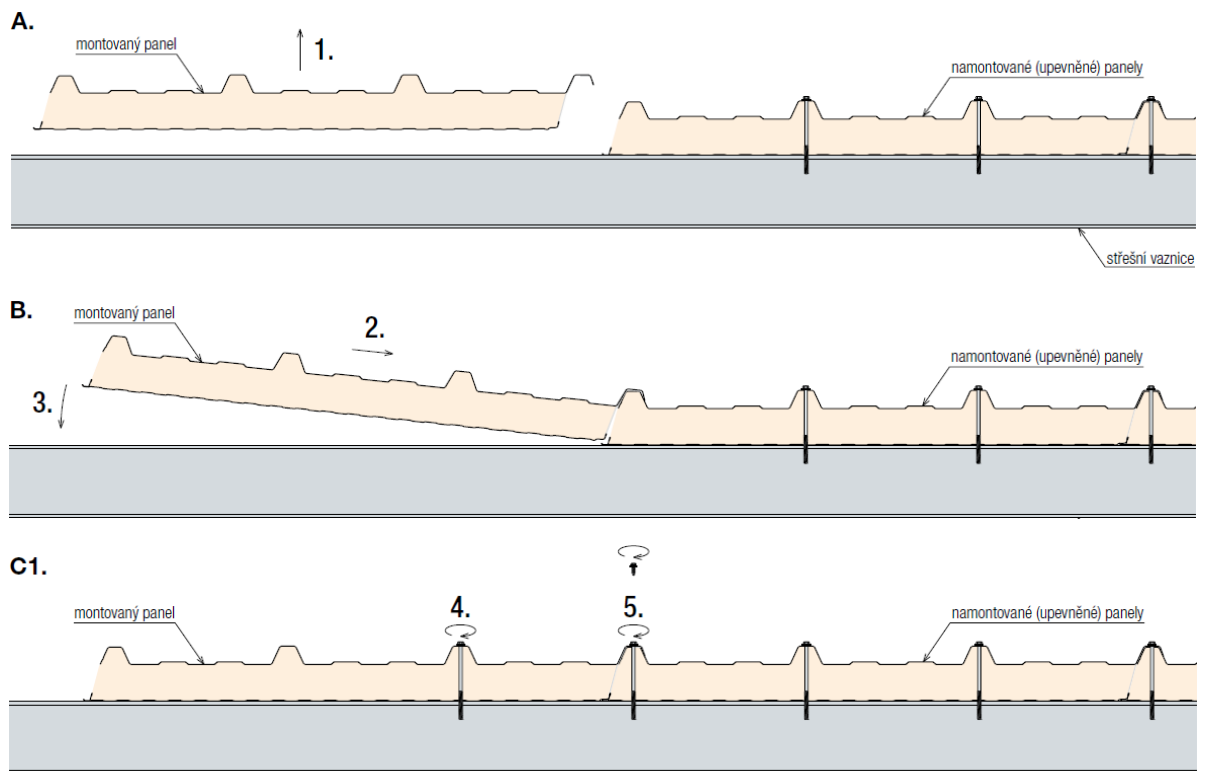
3.2.3 Spojovací prvky

Sendvičový panel je připevněn k horní pásnici ocelového nosníku pomocí samořezných šroubů (obr. 12). Materiál šroubu i podložky je z nerez. Pro panel tloušťky 160 mm byly použity šrouby délky 240 mm o průměru 5,5 mm. Přesné označení pro tento typ šroubů dodaný výrobcem SFS Intec je SXC14-S19-5,5x240. Pro panel tloušťky 100 mm byla použita jiná délka šroubů (190 mm). Přesné označení pro tento typ šroubů dodaný výrobcem SFS Intec je SXC14-S19-5,5x190.



obr. 12 Samořezný šroub se závitem pod hlavou

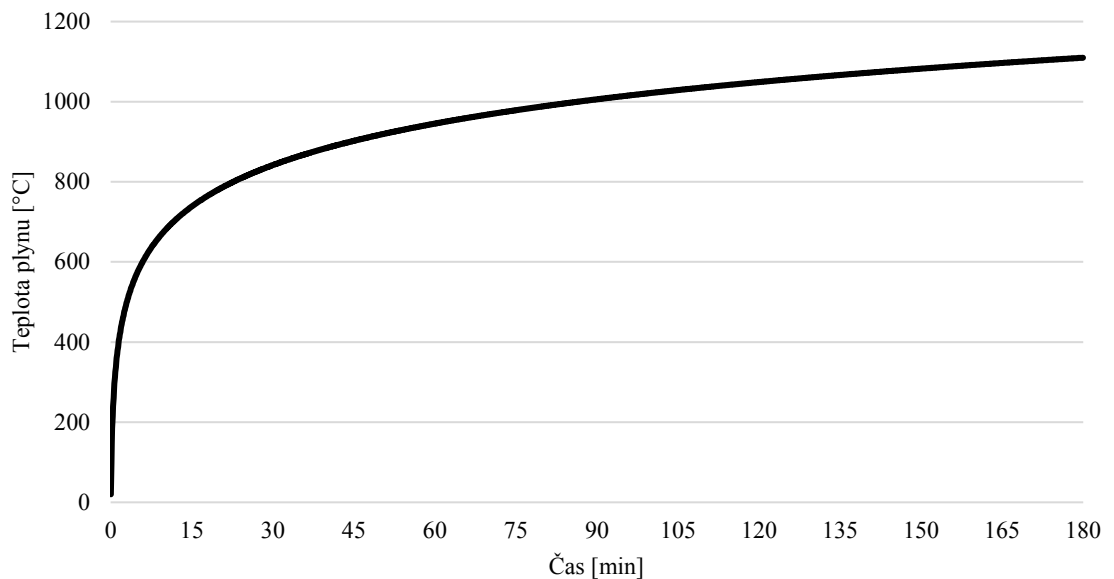
Během montáže sestavy pro zkoušku byl panel na horní pásnici nosníku a obvodové stěny pece umístěn ručně. V případě vyšší hmotnosti by se dal pro montáž prvku využít jeřáb, či jiný vhodný montážní přípravek. Panel se zdvihl a ve sklonu byl nasazen na volnou vlnu na již namontované panely a po sléze byl dotlačen ke konstrukci. Nejdříve došlo k upevnění panelu v místě druhé vlny (ve směru od volné přesahové vlny), následně v místě volné vlny, kde došlo k nasazení. Panely byly nakonec vzájemně sešroubovány krátkými šrouby v podélné vlně po á 500 mm (případně také v místě příčného spoje) z vnitřní a vnější strany. Obr. 13 uvádí postup montáže.



obr. 13 Postup montáže panelu na nosník [7]

3.3 Teplotní zatížení

Zahřívání v peci probíhalo pomocí normové teplotní křivky, viz obr. 14. Dosažení normové teplotní křivky je zajištěno pomocí plynových hořáků, které byly řízeny deskovými teplotními snímači. Výkony hořáků je možné regulovat podle průměrné teploty ze všech řídicích deskových teplotních snímačů nebo jednotlivě přiřadit hořák ke konkrétním deskovým termočládkům. V tomto případě byly hořáky regulovány pomocí průměrné teploty ze všech snímačů.



obr. 14 Normová teplotní křivka

3.4 Mechanické zatížení

Sendvičové panely byly zatíženy rovnoměrně rozloženým zatížením o velikosti 1 kN/m^2 . Zatížení bylo provedeno pomocí ocelových plechů uložených na horní povrch panelů. V případě první zkoušky s panely tloušťky 100 mm byly ocelové plechy uloženy na vlny panelu vždy s nezatíženou mezerou, kde se nacházela jedna horní vlna (obr. 15). Při druhé zkoušce s panely tloušťky 160 mm byly ocelové plechy vzájemně propojeny tak, aby zatížení působilo na všechny vlny plechu panelu (obr. 16).



obr. 15 Mechanické zatížení s nezatíženou mezerou



obr. 16 Mechanické zatížení s propojením plechů

3.5 Kritéria experimentu

Kritéria pro experiment byla stanovena pro:

- únosnost po dobu 60 minut
- teplotu na odvrácené straně sendvičového panelu 200 °C

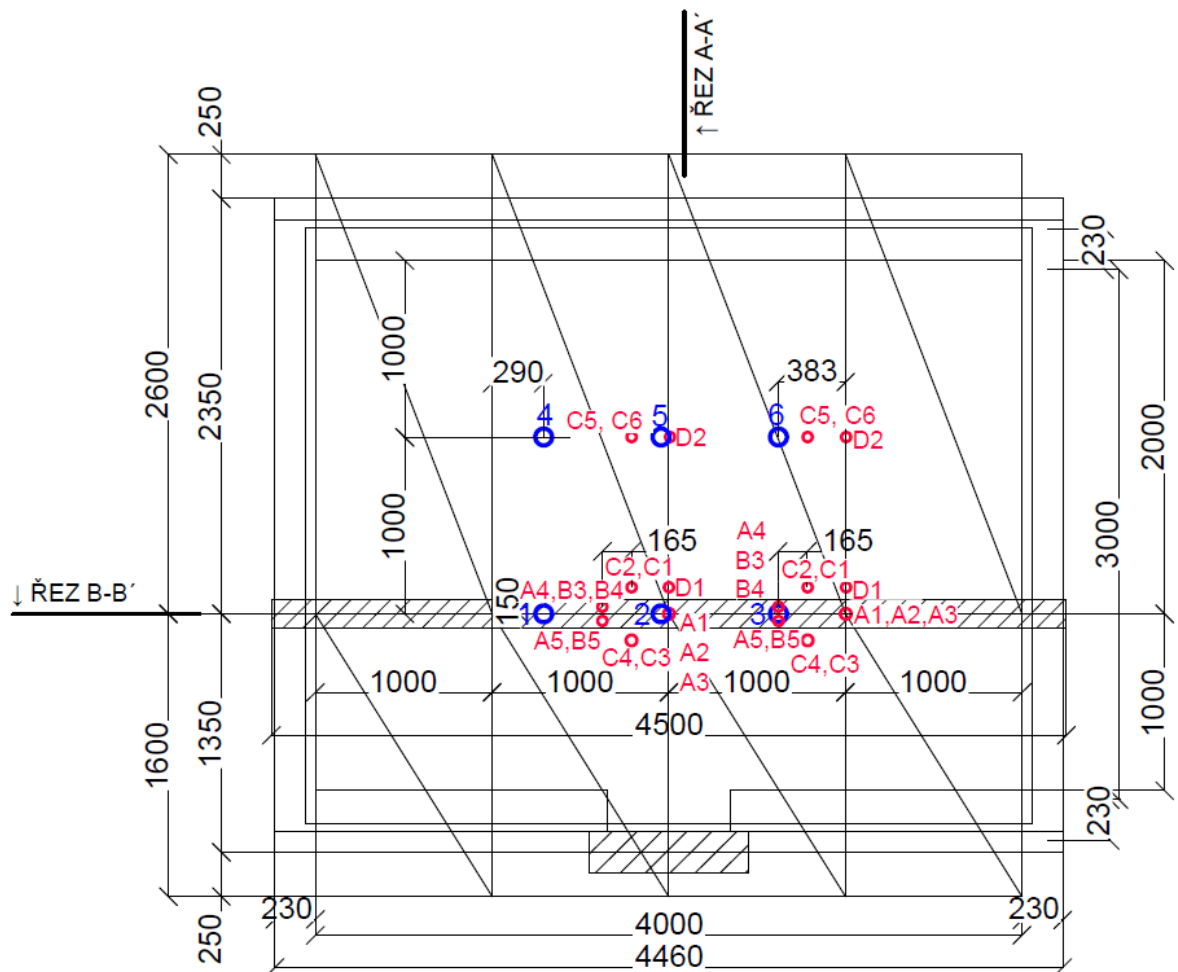
Po dosažení jednoho z těchto kritérií byl experiment ukončen.

3.6 Experiment

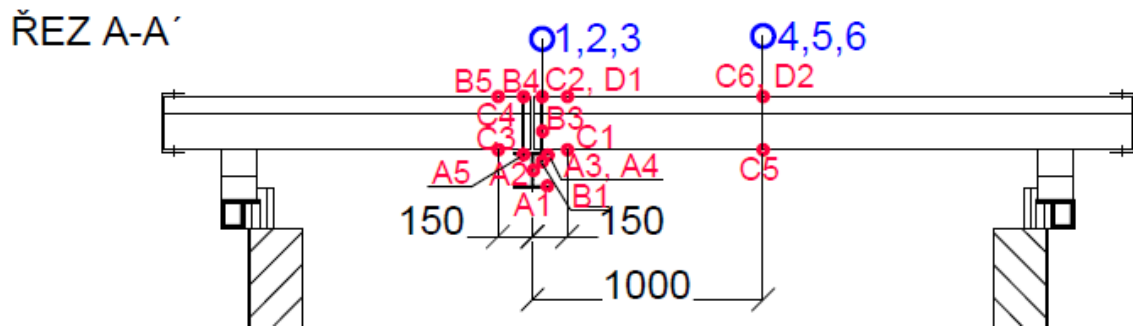
První experiment proběhl v pondělí 5.3.2018. Zkušební sestava se skládala z nosníku HEA 160 s požárním nátěrem Sherwin Williams FX5090 a sendvičovým panelem Kingspan KS 1000 RW

tloušťky 100 mm. Druhý experiment proběhl v úterý 13.3.2018, kdy byl oproti prvnímu experimentu použit sendvičový panel tloušťky 160 mm.

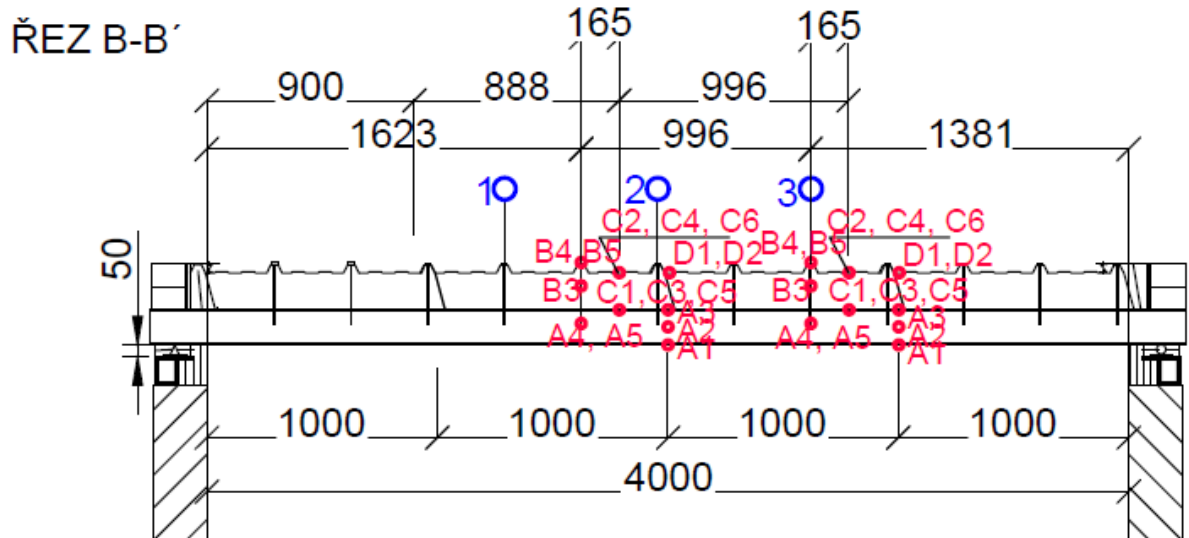
Na obr. 17 je půdorysné schéma a řezy (obr. 18 a obr. 19) uložení nosníku a panelů na peci, kde jsou označená místa, kde během experimentu byly měřeny teploty plynu uvnitř pece, teploty na nosníku (A1, A2, A3, A4, A5) a teploty na panelu. Byla měřena teplota plechu na odvrácené straně (C2, C4, C6), teplota na ohřívané straně panelu (C1, C3, C5) a dále teplota ve spárách panelu (D1, D2). Teploty byly také zaznamenávány po výšce šroubů (B1, B2, B3, B4, B5). Zaznamenávány byly rovněž průhyby na sendvičových panelech nad nosníkem a v polovině rozpětí sendvičových panelů v delším rozměru 2600 mm.



obr. 17 Půdorysné schéma uložení nosníku a sendvičových panelů na peci



obr. 18 Řez A-A'



obr. 19 Řez B-B'

Na obr. 20 je fotografie stropní konstrukce před zkouškou. Na dalších dvou obrázcích jsou vidět použité a vyvedené termočlánky (obr. 21), které jsou připojeny k dataloggeru (obr. 22). Ten přenášel údaje do PC v operačním středisku.



obr. 20 Pohled na stropní konstrukci před zkouškou



obr. 21 Vyvedení termočlánků



obr. 22 Datalogger

3.7 Výsledky a výstupy

Výsledkem experimentu jsou naměřené teploty na jednotlivých termočláncích, hodnoty průhybů a celkové chování konstrukce při zahřívání, které bylo sledováno vizuálně.

3.7.1 Experiment sendvičového panelu tloušťky 100 mm

Laboratorní experiment probíhal u sendvičového panelu tloušťky 100 mm po dobu 78 min.

Zkouška začala podle plánu v 11:46 hodin. V první minutě, jak je vidět na obr. 23 začalo docházet k průchodu kouře z pece přes panely ven. Vlivem nárůstu průhybu panelů narostla

deformace okrajového profilu, který měl za úkol chránit PIR výplň panelů před přímým stykem s plameny.



obr. 23 Průběh zkoušky v 1. minutě

Na obr. 24 z 21 min je vidět deformace okrajového profilu a prostup hustě žlutého kouře z mezery u tohoto profilu. Hustě žlutý kouř signalizuje teplotní degradaci PIR výplně panelu. S nárůstem teploty uvnitř pece narůstal i průhyb panelů. K ukončení zkoušky došlo v 78 min z důvodu dosažení teploty 200 °C (kritérium experimentu) na nezahřívané straně panelu.



obr. 24 Průběh zkoušky ve 21. minutě

Stav konstrukce v 78 min je vidět na obr. 25. Ve shodném čase došlo k nadměrnému úniku kouře a prohořívání panelu nad nosníkem. V tomto čase již nebyl ocelový nosník chráněn nátěrem (nátěr po 60 min odpadl). Na obr. 26 je první fotografie po vypnutí hořáků. Na obr. 27 je fotografie z pece a pohled na nosník a sendvičové panely. Je zde vidět, že na nosníku chybí požární nátěr.



obr. 25 Ukončení zkoušky v 78. minutě

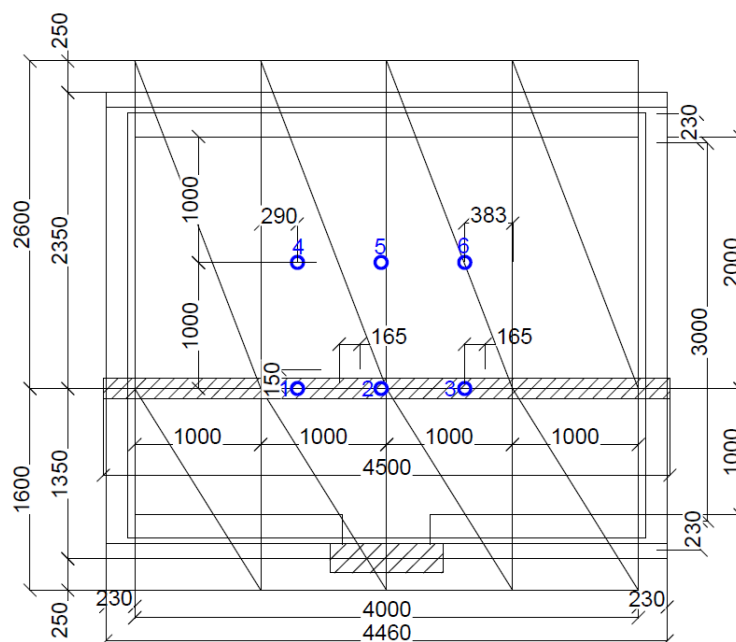


obr. 26 Stropní konstrukce po zkoušce



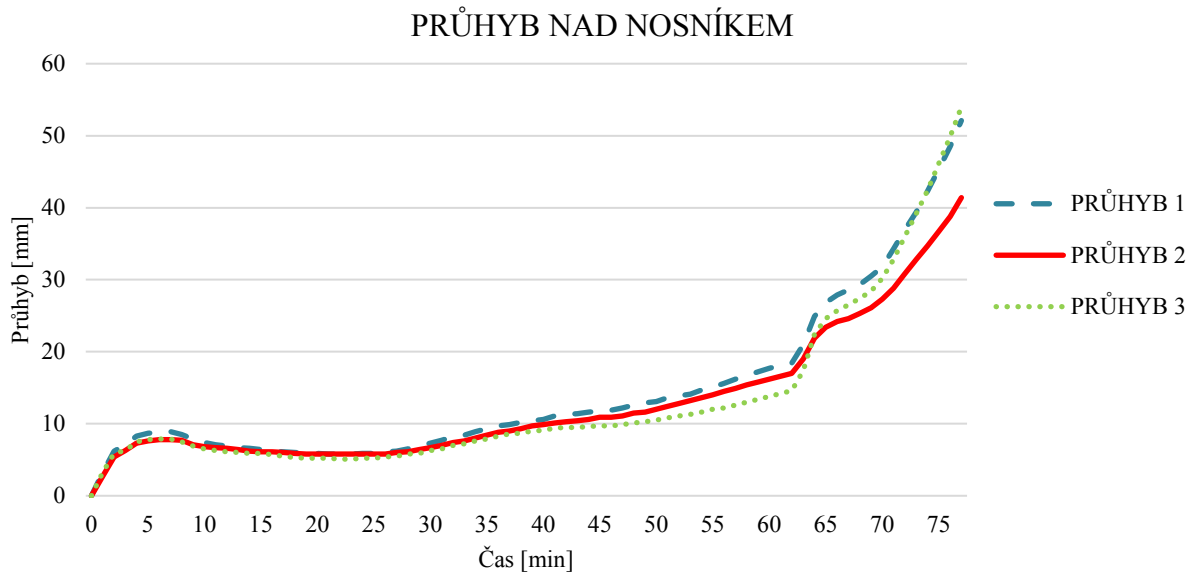
obr. 27 Pohled z pece na nosník a sendvičové panely po zkoušce

Jedním z výstupů z toho experimentálního měření jsou záznamy průhybů na několika místech. Celkem bylo použito 6 měřících zařízení, které byly umístěny na horní plech sendvičových panelů. Z toho tři byly situované nad nosníkem (na obr. 28 označené jako 1, 2 a 3). Průhyboměr č. 2 byl umístěn ve středu nosníku. Další dvě měřící zařízení (1 a 3) jsou umístěna ve vzdálenosti 650 mm na každou stranu od středového měřidla. Zbylé tři se nacházely ve vzdálenosti 1000 mm na stranu delších panelů od osy nosníku. Pozice měření průhybu jsou znázorněna na nákrese na obr. 28.



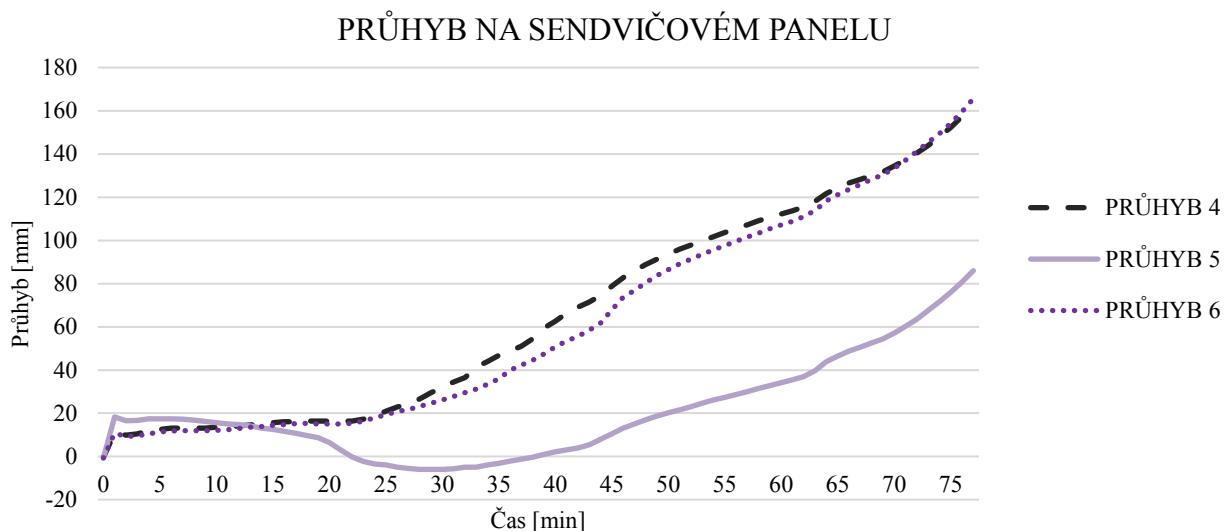
obr. 28 Pozice měření průhybů

Na následujícím obr. 29 si lze povšimnout nárůstu průhybů v čase. Průhyb na snímačích 1, 2 a 3 umístěných v úrovni nosníku dosahoval 8,7 mm v 5 min. Poté do 30 min byl průhyb konstantní. V 60 min maximální průhyb dosahoval hodnoty 17,7 mm na snímači 1. Maximální průhyb nosníku na konci zkoušky (78 min) dosahoval hodnoty 54 mm na snímači 3. Zaznamenané průhyby na jednotlivých snímačích se příliš neliší. Největšího rozdílu je dosaženo na průhyboměrech 1 a 3 v čase od 45 min do 62 min a dále pak mezi průhyboměry 1 a 2, resp. 3 a 2 po 70 min zkoušky.



obr. 29 Průběh průhybu nad nosníkem

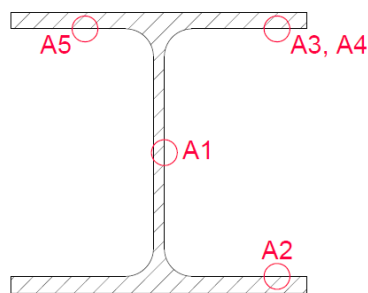
Průhyby uprostřed sendvičového panelu na obr. 30 dosahují daleko větších průhybů než naměřené průhyby v místě nad nosníkem. V průběhu 5 min průhyb označený č. 5 byl 17,4 mm. Průhyb ve stejném místě ve 30 min dosáhl záporných hodnot vlivem vyboulení plechu. K deformaci došlo vlivem nerovnoměrně zatížených vln plechu sendvičového panelu. Ostatní místa, kde byl průhyb zkoumán, k záporným hodnotám nedochází. Maximální průhyb na konci zkoušky dosahoval 165,7 mm.



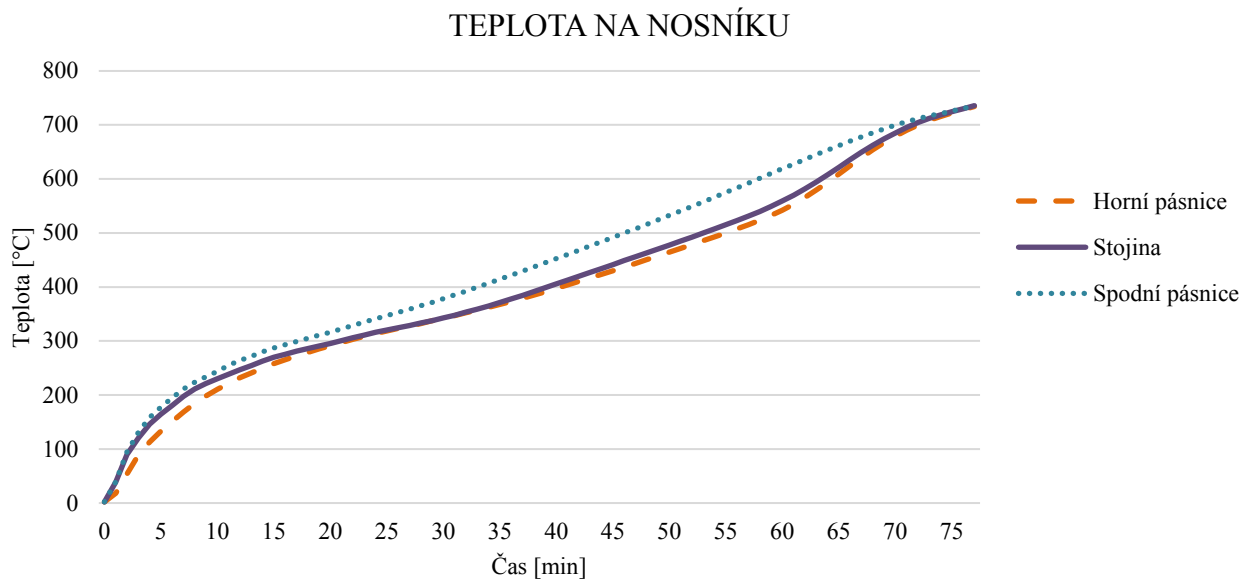
obr. 30 Průběh průhybu na sendvičovém panelu

Další z výstupů z toho experimentálního měření jsou zaznamenávané teploty na jednotlivých místech nosníku a panelu.

Teplota na nosníku byla měřena na čtyřech místech, viz obr. 31. Vybraná tři místa (A1, A2, A3) jsou znázorněna na obr. 32 (na horní pásnici, uprostřed stojiny nosníku HEA a na spodní pásnici). Teploty v 30 min dosahovaly 300–400 °C. Po hodině zahřívání teplota na horní pásnici a v polovině nosníku dosahovala 550 °C a teplota na spodní pásnici byla o 50 °C vyšší. Maximální teplota na konci zkoušky byla 735,8 °C na stojině.

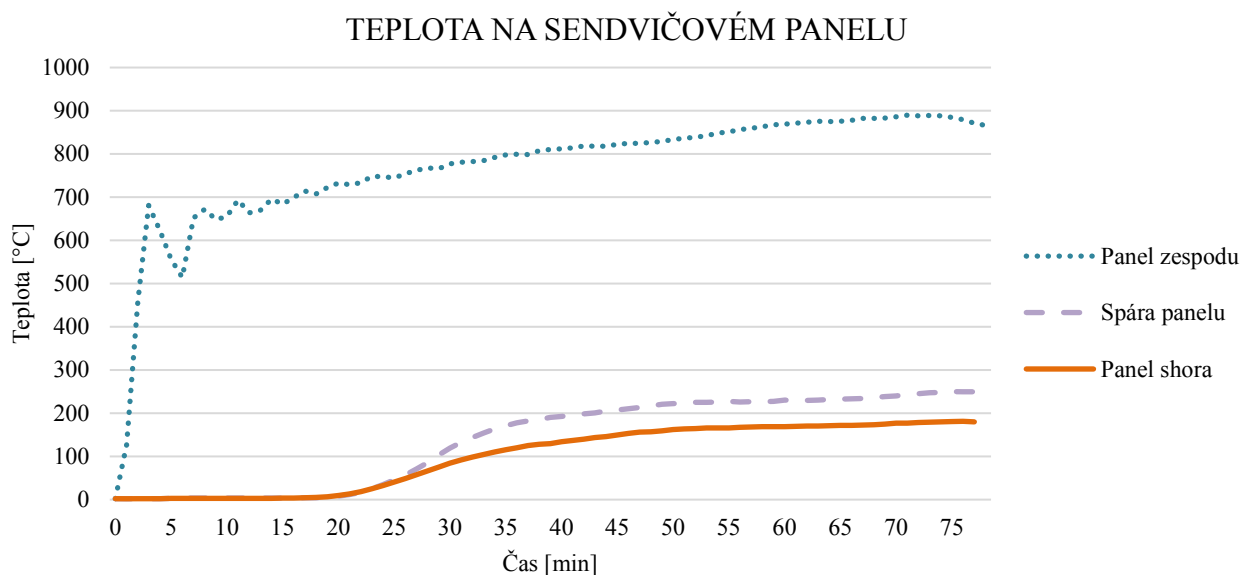


obr. 31 Umístění termočlánků na nosníku



obr. 32 Průběh teplot na nosníku

Naměřené teploty na sendvičovém panelu, zobrazené na obr. 33, dosahují daleko větších hodnot oproti teplotám na nosníku, který byl opatřen požárním nátěrem. Teploty na spodní straně sendvičového panelu v místě C5 v polovině rozpětí nosníku dosahují až 900 °C. Měření také probíhalo ve spárách (D2) sendvičových panelů. Maximální hodnota, která byla naměřena, odpovídala 249,7 °C (na konci zkoušky). Měřením teplot ve spárách bylo zjištěno, že spáry jsou dobře utěsněné a nevniká do nich příliš horkých plynů. Naměřené teploty ve spárách byly oproti teplotám na spodní straně panelu menší. Teplota na odvrácené straně panelu byla 179,9 °C (C6), nedosáhla tedy na kritérium experimentu 200 °C.



obr. 33 Průběh teplot na sendvičovém panelu

3.7.2 Experiment sendvičového panelu tloušťky 160 mm

V druhém laboratorním experimentu byl použit sendvičový panel tloušťky 160 mm. Zkouška trvala 83 min.

Zkoušky s panelem tloušťky 100 mm a tloušťky 160 mm měly do 62 min velmi podobný průběh. V 63 min došlo u zkoušky panelu tl. 160 mm k prošlehnutí plamene ven, viz obr. 34. Dále s nárůstem času docházelo k prošlehávání plamene na více místech, jak je zobrazeno na obr. 35.



obr. 34 Prošlehnutí plamene v 63. minutě



obr. 35 Prošlehnutí plamene na více místech

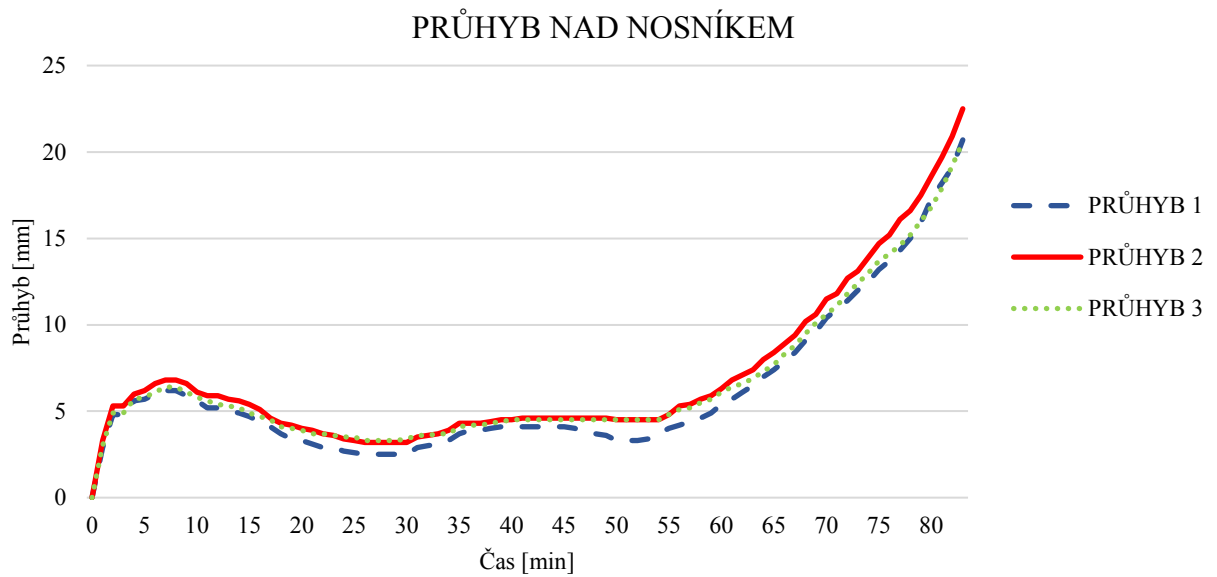
Tento experiment probíhal o 5 min déle. Po vstupu do pece, bylo zjištěno, že u panelů o delším rozměru a to 2600 mm došlo k odpadnutí spodního plechu a úplnému vyhoření PIR pěny, jak je vidět na obr. 36.



obr. 36 Pohled z pece na vyhořelý sendvičový panel

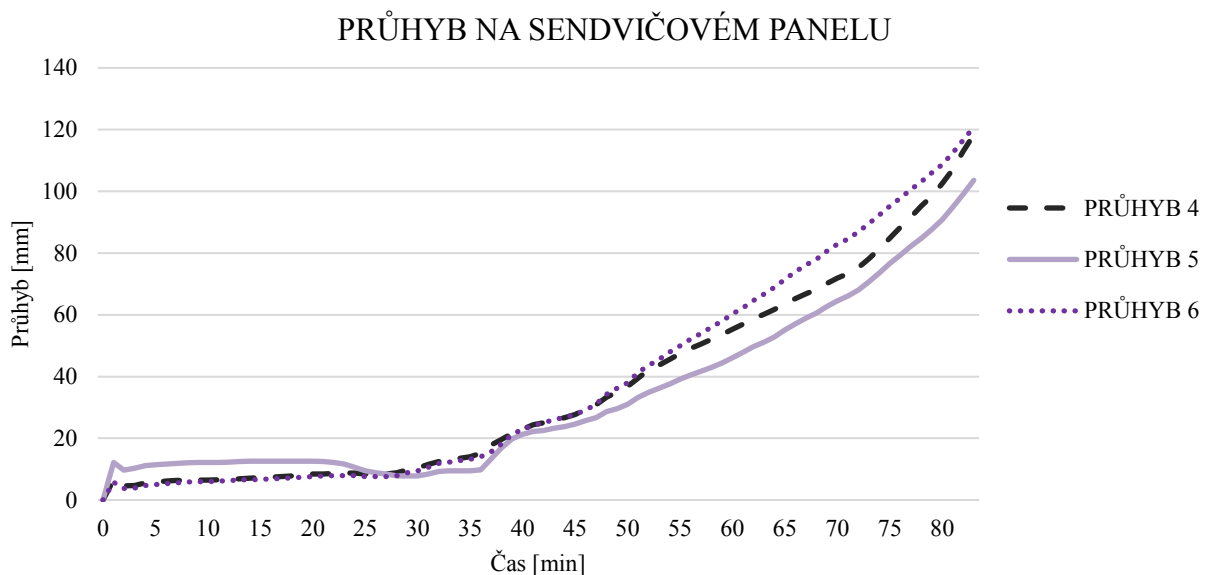
Jako u předchozího experimentu je jedním z výstupů záznam průhybů na jednotlivých místech (1 - 6). Na následujících grafech je znázorněn průhyb v čase. Místa měření průhybů byla na stejných pozicích jako u předchozího experimentu (obr. 28).

Průhyb panelu v úrovni nad nosníkem je znázorněn na obr. 37. Průhyb dosahoval v 5 min 6,2 mm. Dále se hodnota průhybu do 60 min snižovala. V 60 min hodnota průhybu dosahovala 6,3 mm. Ocelový nosník v tomto čase již nebyl chráněn požárním nátěrem a průhyb narůstal rychleji. Při ukončení zkoušky v 83 min maximální průhyb dosahoval až 22,5 mm. Naměřené průhyby na pozicích 1, 2 a 3 se příliš neliší.



obr. 37 Průběh průhybů nad nosníkem

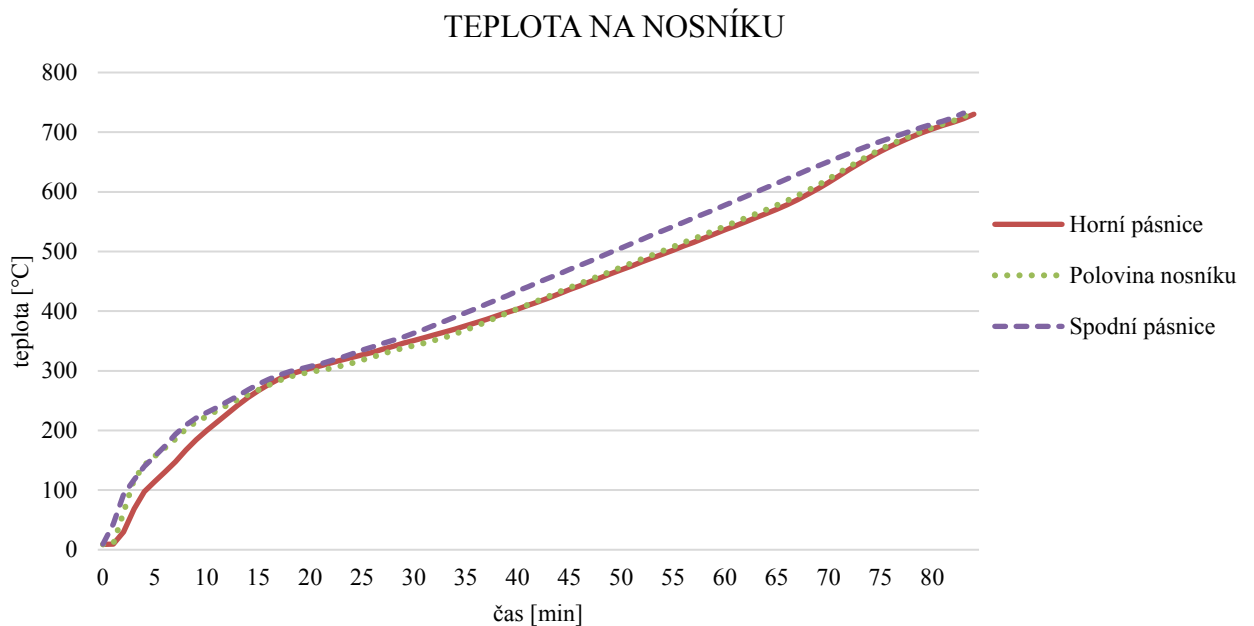
Průhyby na sendvičovém panelu (obr. 38) dosahují daleko větších hodnot než nad nosníkem, stejně jako v předchozím experimentu. Do 35 min se průhyb na snímači č. 5 pohyboval okolo 10 mm. Po 35 min začal průhyb rychle narůstat. V 60 min průběhu zkoušky průhyb na sendvičovém panelu dosahoval 62,2 mm (snímač č.6). Při ukončení zkoušky byl maximální průhyb č.6 pak rovem 120,8 mm. Rozdíl mezi průhyboměry 4 a 6 dosáhl nejvýše 18,8 mm a to v čase od 72 min.



obr. 38 Průběh průhybu na sendvičovém panelu

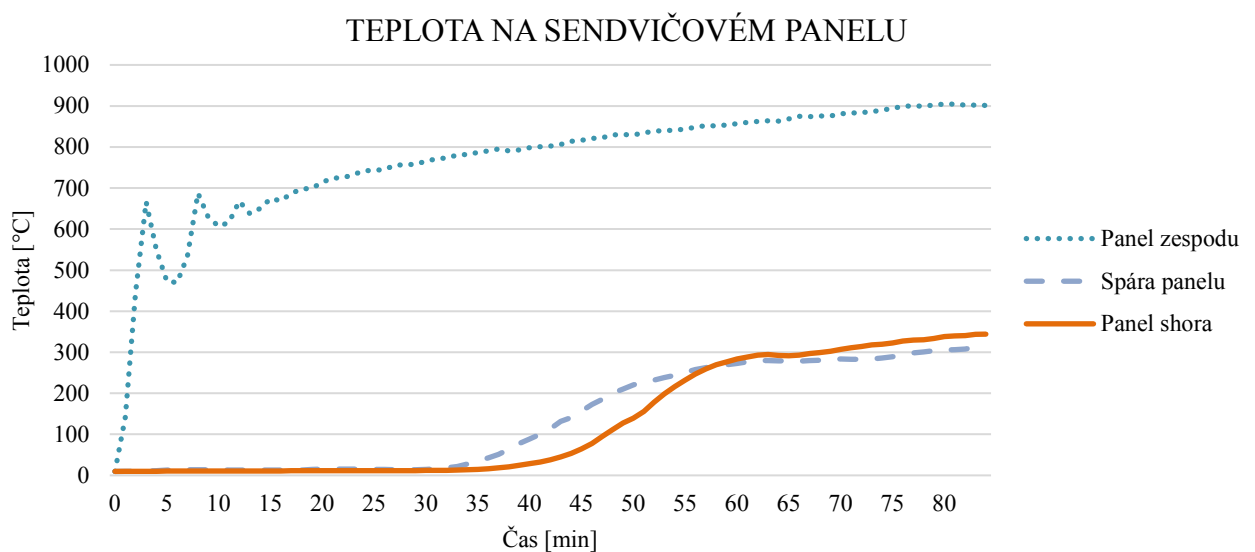
I v tomto experimentu byly zaznamenávány teploty. Na obr. 39 je uveden průběh teplot na nosníku ve třech místech. Umístění termočlánků je popsáno na obr. 28 v kapitole 3.7.1. Teploty na horní pásnici, spodní pásnici i uprostřed stojiny nosníku jsou velice podobné. Teplota ve 30 min

dosahuje 350 °C. Teplota narůstala rovnoměrně v závislosti na čase. Při ukončení zkoušky v 83 min dosahovala 738,8 °C na spodní pásnici.



obr. 39 Průběh teplot na nosníku

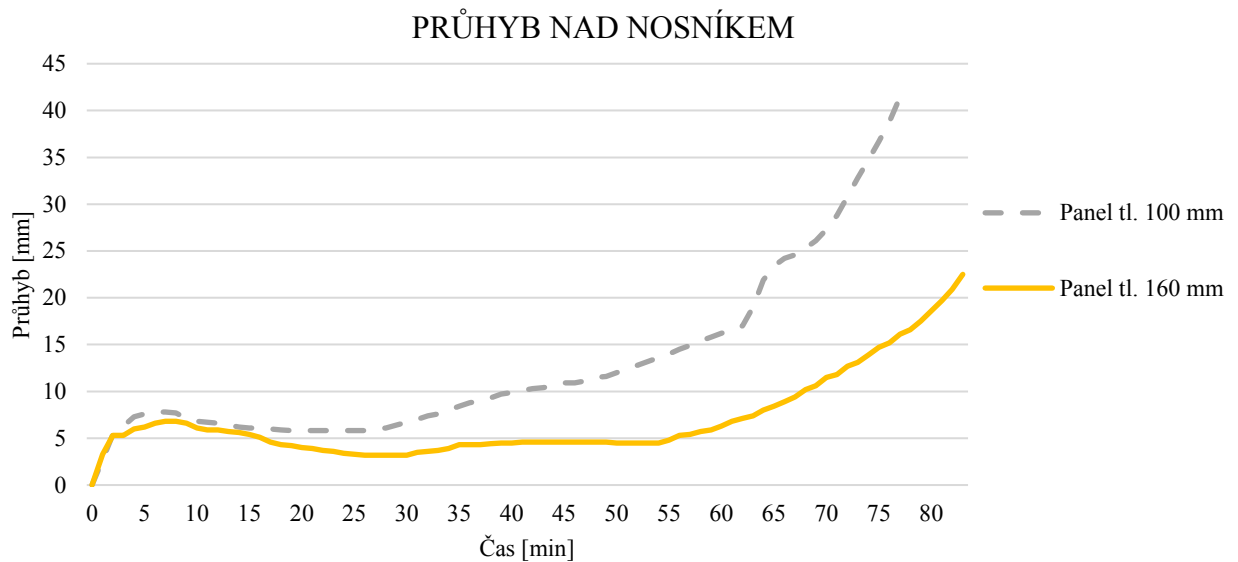
Teploty na sendvičovém panelu v polovině rozpětí delšího panelu (obr. 40) dosahovaly daleko větších hodnot než teploty nosníku. Teploty mezi spárami panelů (D2) a na odvrácené straně (C6) se až do 30 min pohybovaly do 20 °C. Až po 30 min se teplota začala zvyšovat. Panel na odvrácené straně (C5) dosáhl kritéria experimentu (200 °C) již v 50 min. Ve spáře je vidět rovněž postupné zvyšování teploty od 35 min. Od 60 min zkoušky je teplota ve spáře shodná jako teplota horního plechu. Teploty panelu zespodu jsou daleko vyšší, dosahovaly až 901,6 °C.



obr. 40 Průběh teplot na sendvičovém panelu

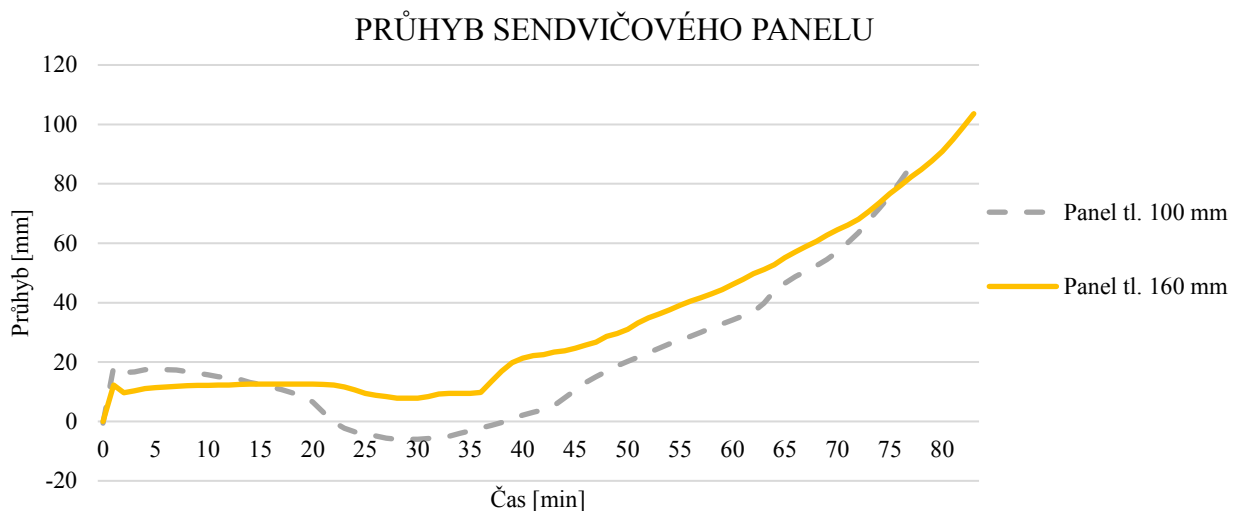
3.8 Porovnání

K porovnání těchto dvou experimentů bylo vybráno několik stejných míst se záznamem teplot a průhybu. Na obr. 41 je uvedeno porovnání průhybů uprostřed nosníku (v místě 2), viz obr. 28. Křivky v grafu potvrzují počáteční předpoklad, že při použití sendvičového panelu tloušťky 160 mm je průhyb nosníku menší, než průhyb při použití sendvičového panelu tloušťky 100 mm. V 60 min zkoušky činí rozdíl průhybů 10 mm. Na konci zkoušky je rozdíl 25,3 mm.



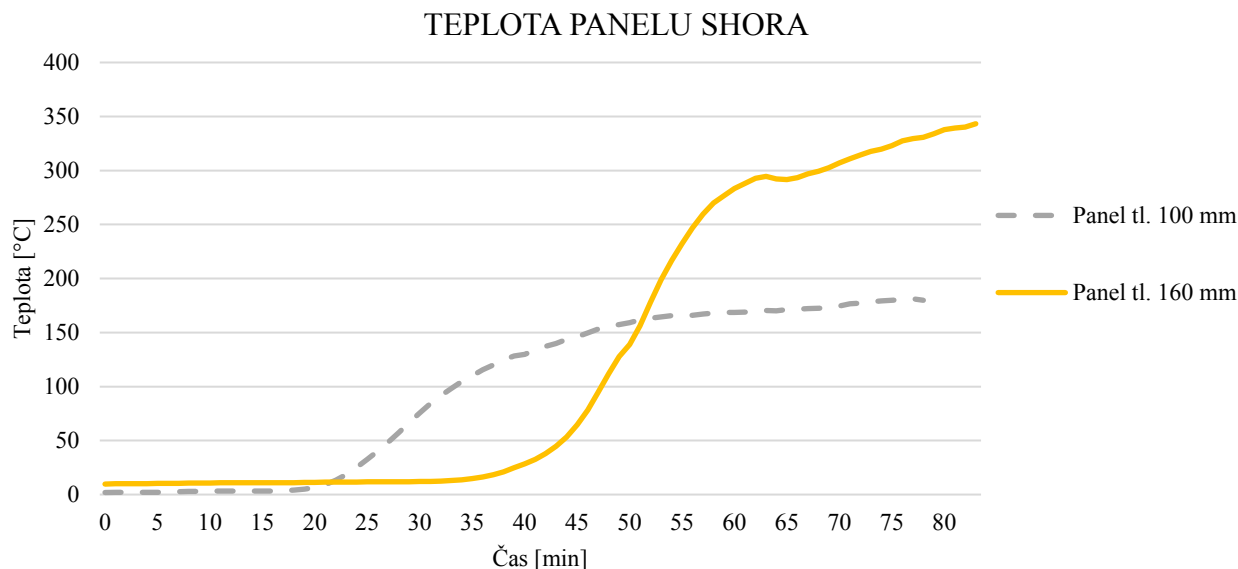
obr. 41 Porovnání průhybu nad nosníkem

Porovnání průhybů na sendvičových panelech je uvedeno na obr. 42. Pro porovnání byl vybrán průhyb uprostřed sendvičového panelu (v bodě č. 5), viz obr. 28. Rozdíly hodnot průhybů se liší od 22 min do 38 min, díky vyboulení plechu při zkoušce panelu tl. 100 mm, a tím dosažení záporných hodnot. V 60 min je rozdíl průhybu 12 mm.



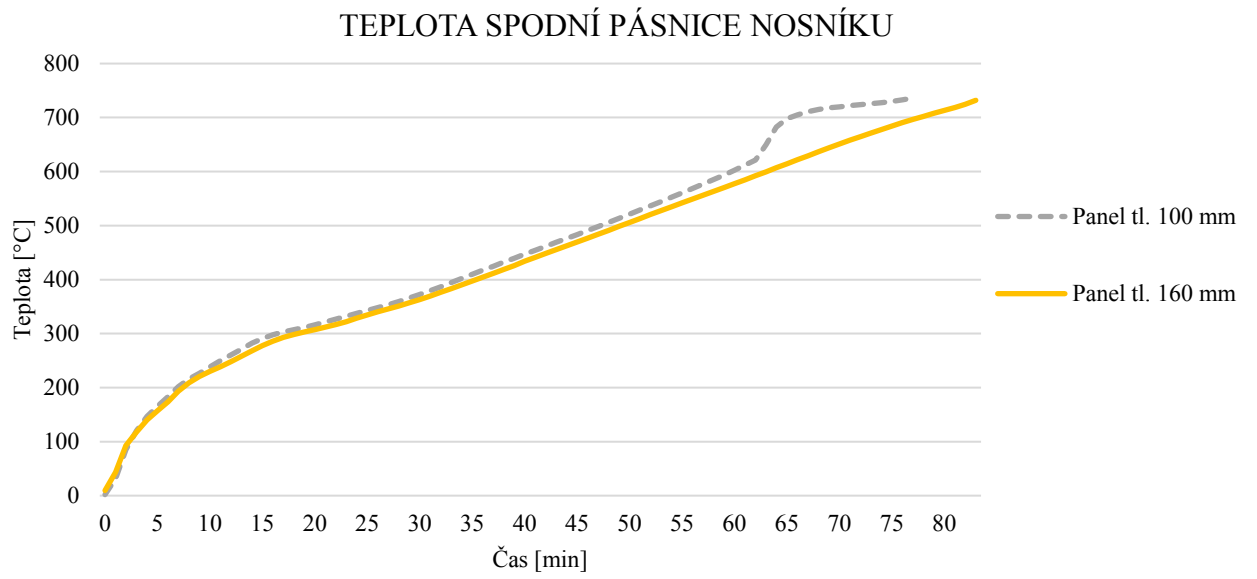
obr. 42 Porovnání průhybu na sendvičovém panelu

Na dalším obr. 43 je zobrazeno porovnání teplot panelů na jejich odvrácených stranách od požáru. Teplota u sendvičového panelu tloušťky 100 mm začala narůstat v 20 min. Při použití panelu tloušťky 160 mm se teplota začala zvyšovat až po 35 min. Při ukončení experimentů dosahuje teplota na odvrácené straně panelu tl. 100 mm 179,9 °C. Teplota na panelu tl. 160 mm dosahuje 344,1 °C. Teplota na neohřívané straně tlustšího panelu je vyšší z toho důvodu, že ze spodní strany panelu došlo k odtržení plechu během zkoušky a vyhoření izolačního jádra (uvedeno na obr. 36). Horní plech se tak rychleji prohříval než u zkoušky panelu tl. 100 mm, kde k odtržení spodního plechu a vyhoření jádra nedošlo.



obr. 43 Porovnání teploty na sendvičových panelech na odvrácené straně

Na obr. 44 je zobrazena teplota na spodní pásnici nosníků při zkouškách panelů tl. 100 mm a tl. 160 mm. Teploty na spodní pásnici nosníků z obou zkoušek mají podobný průběh. U experimentu se sendvičovým panelem tloušťky 100 mm teplota v 65 min rychleji vzrostla, protože z nosníku částečně odpadl požární nátěr.



obr. 44 Porovnání teplot na spodní pásnici nosníku

4 Numerický model

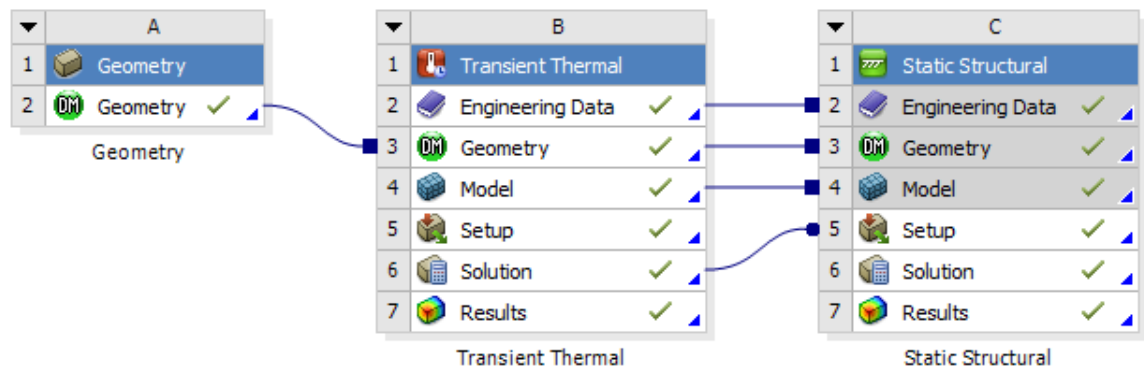
Kapitola se věnuje tvorbě numerického (někdy rovněž nazýváno matematického) modelu. Model je vytvořen pomocí výpočetního programu ANSYS Workbench 19.2, ve kterém je řešeno teplotní a mechanické chování sestavy na plášťovém systému tvořeným sendvičovým panelem tloušťky 100 mm s jádrem z PIR pěny a ocelovým nosníkem průřezu HEA.

4.1 ANSYS Workbench

Software ANSYS spadá pod americkou veřejnou společnost Ansys, Inc. která sídlí v Pensylvánii. Byla založena roku 1970 Johnem Swansonem. Tato společnost vyvíjí a prodává inženýrské simulační softwary, sloužící pro analýzu konečných prvků. Hlavním produktem firmy je program ANSYS. Jedná se o obecný nelineární program, který se věnuje mnoha typům analýz, jako například strukturální, termodynamické, analýze založené na proudění kontinua či akustické. Jelikož je program pojat jako multifyzikální, lze všechny tyto analýzy sloučit do jediné komplexní. Díky parametrickým výpočtovým modelům je pomocí softwaru možné jednoduše řešit i citlivostní a optimalizační analýzy. Na obr. 45 je znázorněno propojení jednotlivých analýz v prostředí Workbench. [9]

Většina simulací se provádí pomocí softwaru ANSYS Workbench, který je jedním z hlavních produktů společnosti. Model vytvořený v rámci této práce byl zhotoven právě v tomto rozhraní. Jedná se o velmi uživatelsky příjemný program, který si ale ponechává vysoký standard základního softwaru. Na rozdíl od výchozího prostředí APDL (ANSYS Parametric Design Language) nevyužívá programování pomocí vlastních skriptů. Tyto příkazy nejsou přívětivé pro začátečnického uživatele. Jako základní prostředí tedy používá k výpočtu stejný řešič a zároveň ale nabízí širokou analýzu v jednotlivě spuštěných modulech, které se pak dají sdružit v jednu komplexní úlohu. [9]

V porovnání s jinými výpočtovými softwary, používanými ve stavební praxi, má ANSYS v pozadí výpočtu síť konečných prvků, která může být tvořena pomocí různých typů konečných prvků. Tím se snaží co nejvíce odpovídat skutečnému chování modelovaných konstrukcí. Další výhodou je to, že umožňuje modelovat nelineární problémy (např. plasticity) a dále definovat vlastní materiál, a to pomocí zadání vlastních hodnot od základních fyzikálních (hustota, délková teplotní roztažnost...) či mechanických až po složitě měřitelné (například Poissonova čísla). [9]



obr. 45 Schéma propojení prostředí v ANSYS Workbench

4.1.1 Materiálové vlastnosti

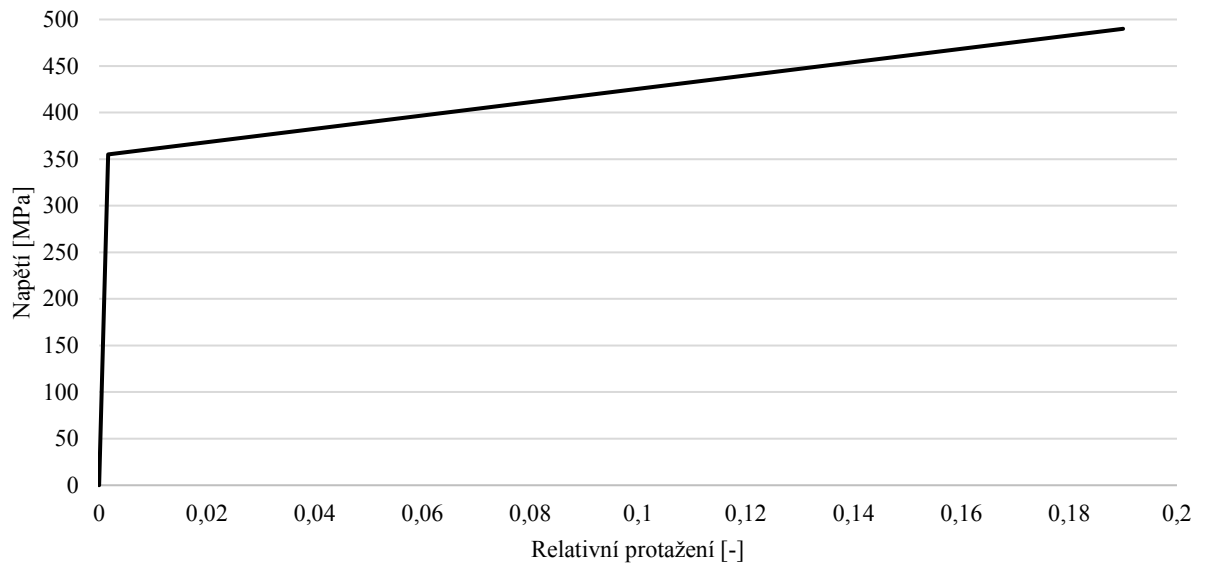
Existují dvě možnosti, jak materiál definovat – výběrem nabídky z knihovny nebo definováním vlastního materiálu. Pro model v rámci této práce bylo využito druhé z těchto možností. Ocel třídy S355 použitá pro nosník, ocel S250GD pro plechy sendvičových panelů a PIR pěna pro výplň panelů.

Materiálové vlastnosti oceli S355 a S250, které byly zadávány do programu jsou uvedeny v tab. 5 a tab. 6. Obě tabulky zahrnují mechanické vlastnosti materiálů. Tepelně technické parametry oceli jako součinitel tepelné vodivosti (obr. 48) a měrná tepelná kapacita (obr. 49) jsou zadány v závislosti na teplotě dle ČSN EN 1993-1-2. [10]

Dále byla definována materiálová nelinearita pomocí multilineární definice, kdy byla křivka rozdělena na dva přímé úseky představující idealizovaný pracovní diagram (obr. 46, obr. 47). První představuje elastickou oblast a druhá následující část pak plastickou oblast.

tab. 5 Vlastnosti oceli S355

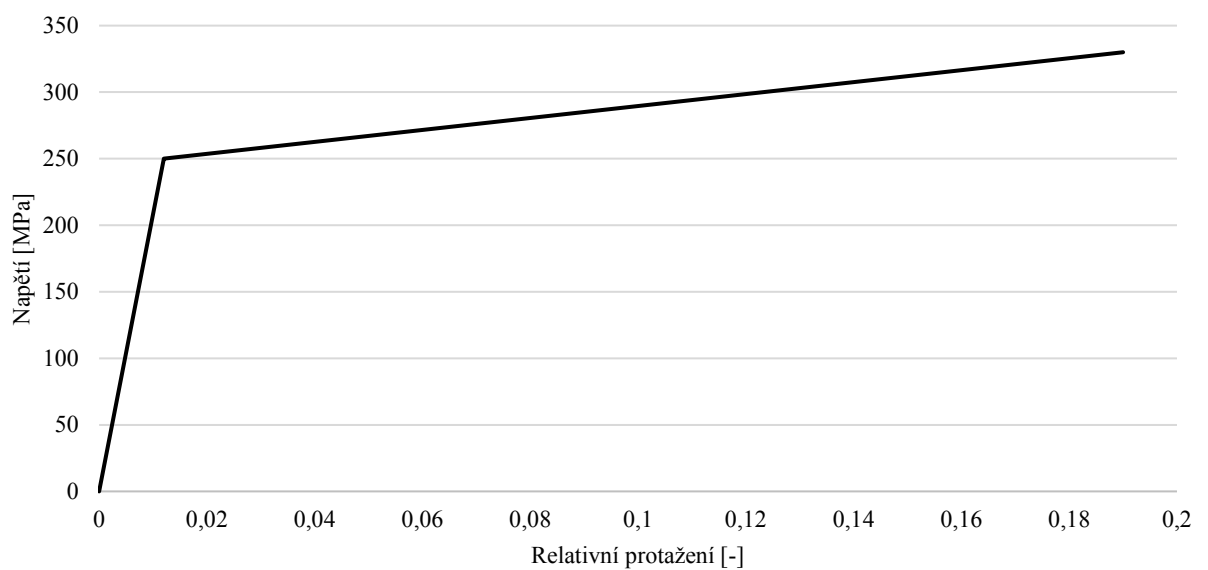
<i>Vlastnosti oceli S355</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<i>Hustota</i>	7850	kg/m^3
<i>Koeficient tepelné roztažnosti</i>	$1,2 \cdot 10^{-5}$	C^{-1}
<i>Modul pružnosti</i>	210 000	MPa
<i>Poissonovo číslo</i>	0,3	-
<i>Mez kluzu</i>	355	MPa
<i>Mez pevnosti</i>	460	MPa



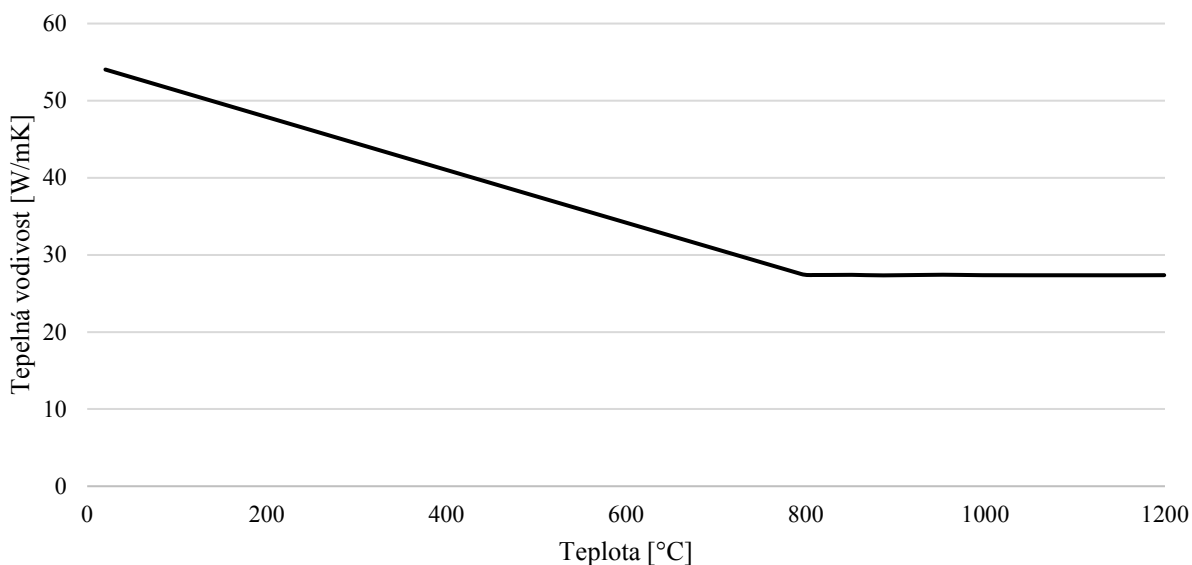
obr. 46 Idealizovaný materiálový model oceli S355

tab. 6 Vlastnosti oceli S250GD

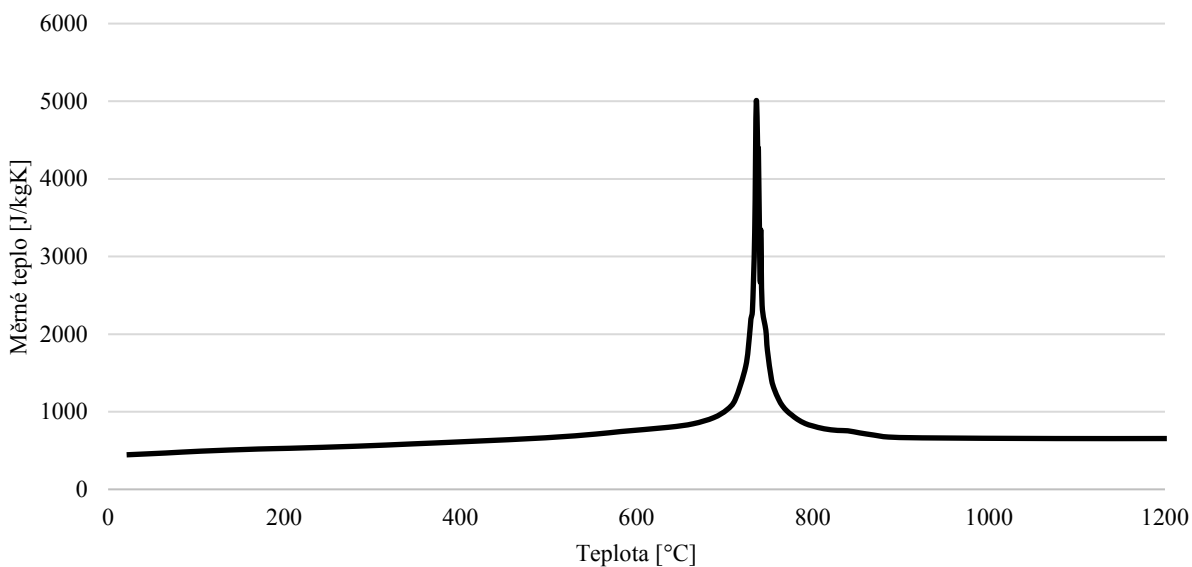
<i>Vlastnosti oceli S250GD</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<i>Hustota</i>	8000	<i>kg/m³</i>
<i>Koeficient tepelné roztažnosti</i>	$1,2 \cdot 10^{-5}$	<i>C⁻¹</i>
<i>Modul pružnosti</i>	205 000	<i>MPa</i>
<i>Poissonovo číslo</i>	0,287	-
<i>Mez kluzu</i>	250	<i>MPa</i>
<i>Mez pevnosti</i>	19	<i>MPa</i>



obr. 47 Idealizovaný materiálový model oceli S250GD



obr. 48 Součinitel tepelné vodivosti oceli v závislosti na teplotě [10]

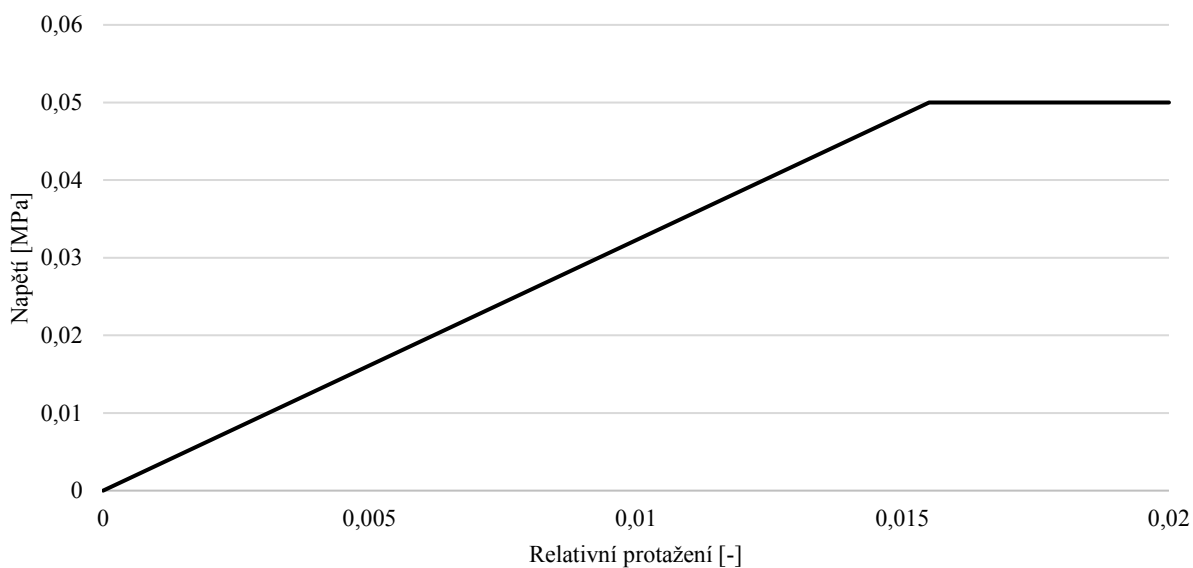


obr. 49 Měrná tepelná kapacita oceli v závislosti na teplotě [10]

Vlastnosti PIR pěny, které byly do softwaru zadány, jsou uvedeny v tab. 7. Použité materiálové vlastnosti jsou převzaty od výrobce. Tabulka uvádí vlastnosti vždy ve třech směrech namáhání. Vzhledem k nedostupnosti tepelně technických vlastností PIR pěny měnících se s rostoucí teplotou jsou tyto vlastnosti zadány jednou konstantní hodnotou. Jako u předchozího materiálu byl použit idealizovaný nelineární materiálový model uvažující plasticitu, viz obr. 50.

tab. 7 Vlastnosti PIR pěny

Vlastnosti PIR pěny		Hodnota	Jednotka
<i>Hustota</i>		37	kg/m ³
<i>Modul pružnosti</i>	X	3,0	MPa
	Y	3,0	MPa
	Z	3,0	MPa
<i>Poissonovo číslo</i>	XY	0,34	-
	YZ	0,34	-
	XZ	0,34	-
<i>Smykový modul</i>	XY	2,8	MPa
	YZ	2,8	MPa
	XZ	2,8	MPa
<i>Mez pevnosti v tlaku</i>	X	0,05	MPa
	Y	0,05	MPa
	Z	0,05	MPa
<i>Mez pevnosti v tahu</i>	X	0,10	MPa
	Y	0,10	MPa
	Z	0,10	MPa
<i>Tepelná vodivost</i>	X	0,018	W/mC
	Y	0,018	W/mC
	Z	0,018	W/mC
<i>Měrné teplo</i>	X	1400	J/kgC
	Y	1400	J/kgC
	Z	1400	J/kgC



obr. 50 Idealizovaný materiálový model PIR pěny

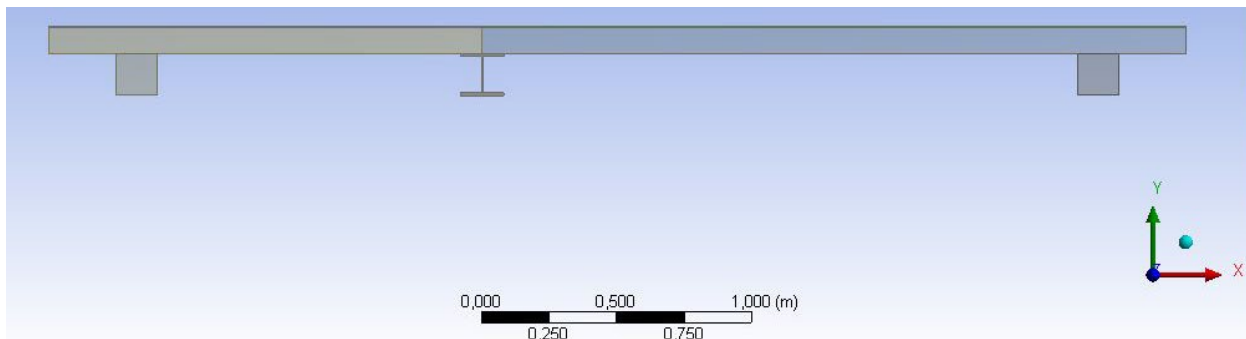
4.1.2 Geometrie

Geometrie modelu byla vytvořena v prostředí *Design Modeler*, ve zvolených základních jednotkách. Model byl vytvářen v m.

Nejprve byla vytvořena základní grafika zvaná *Sketch*. Jde o 2D geometrický model, který byl následně upravován příkazy během 3D modelu. V prvním kroku byla vybrána rovina XY a vymodelován průřez HEA 160 pomocí *Cross Section*. Využitím příkazu *Extrude* byl získán 3D konstrukce a zvolen rozměr 4,5 m ve směru osy Z.

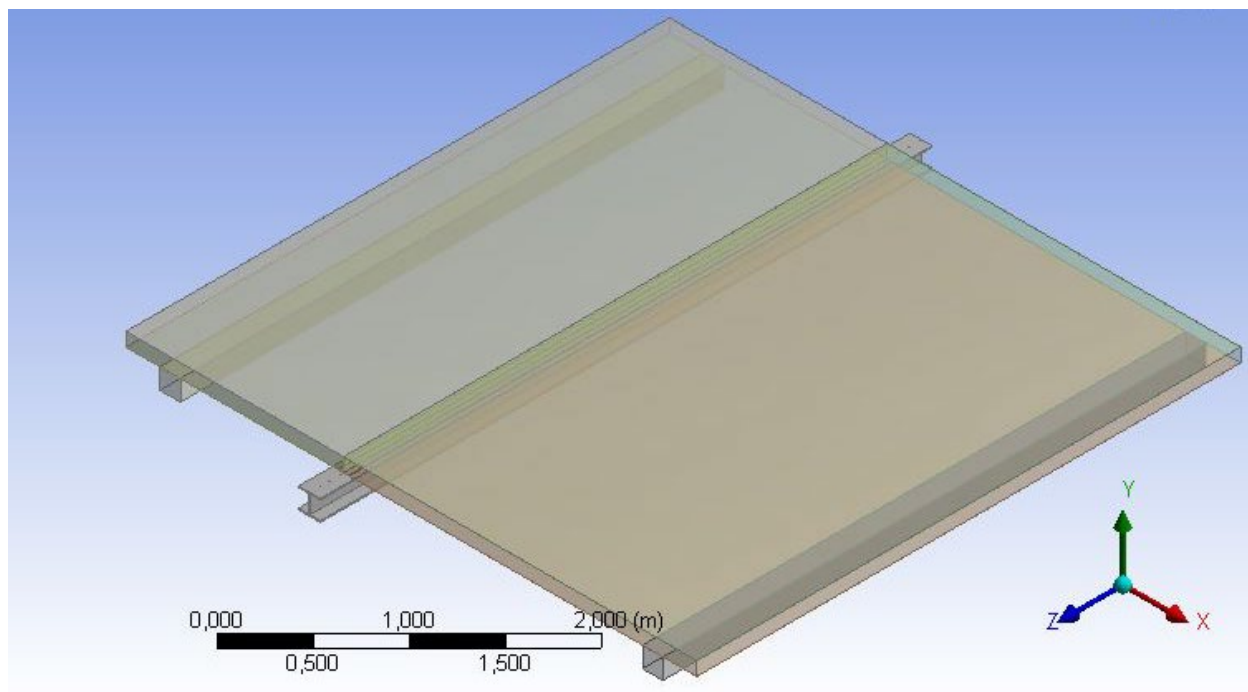
Dále byly vymodelovány sendvičové panely. Ve skutečnosti byly jednotlivé panely spojeny samořeznými šrouby na horním i dolním povrchu. V modelu je toto spojení uvažováno jako tuhé. Proto je pro zjednodušení v modelu místo čtyř panelů spojených samořeznými šrouby namodelován pouze jeden panel o rozměrech 2,6 x 4 m. Další čtyři panely byly taktéž pro zjednodušení spojeny do jednoho panelu o rozměrech 1,6 x 4 m. Jako u nosníku HEA 160 byly sendvičové panely nejprve vytvořeny ve 2D. Pomocí *Rectangle* byl vytvořen spodní plech o tloušťce 0,4 mm, výplň panelů o tloušťce 100 mm a následně i horní plech o tloušťce 0,5 mm. Dále pomocí příkazu *Extrude* byla geometrie rozvinuta do prostoru.

V geometrii dále byla vytvořena betonová stěna o rozměrech 0,15 x 0,15 m zkušební pece, na které byly sendvičové panely uloženy. Pohled v řezu na celou zkoušenou sestavu je znázorněn na obr. 51.



obr. 51 Řez zkoušenou sestavou

Model byl již v požadovaném tvaru (obr. 52) a v prostředí *Design modeler* byla práce ukončena. Další postup práce probíhal v prostředí *Mechanical*.



obr. 52 Geometrie v prostředí Design Modeler

4.1.3 Kontakty ploch

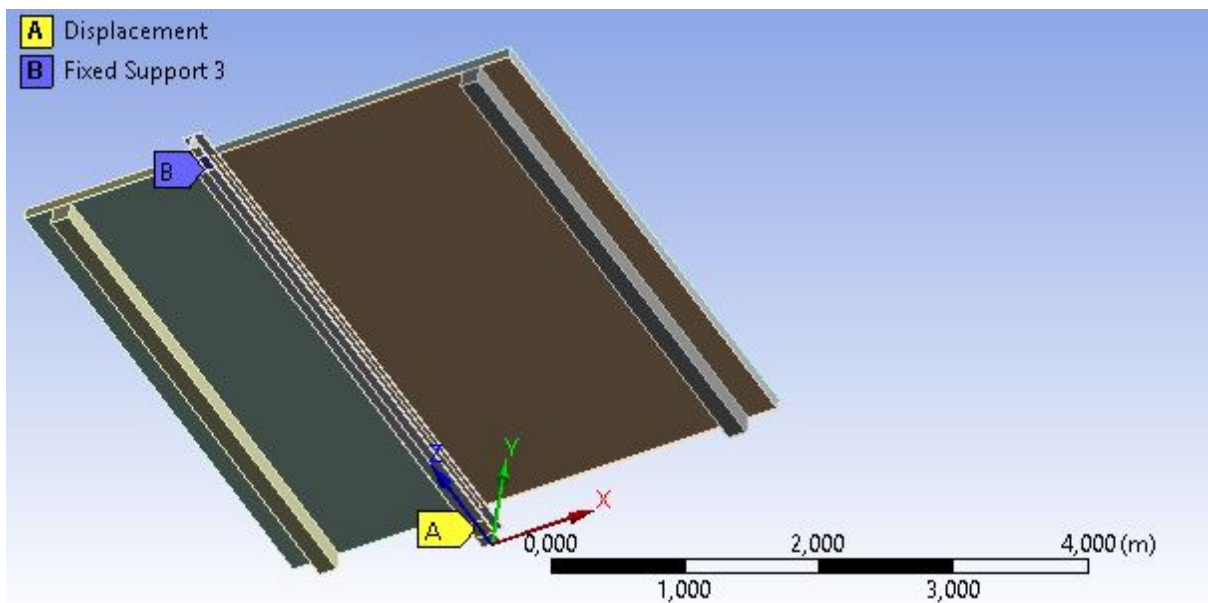
Dalším důležitým krokem bylo definovat spojení povrchů a ploch jednotlivých materiálů. V modelu byly použity celkem dva typy kontaktů, a to *bonded* a *frictional*. Kontakt *bonded* neumožňuje žádné posunutí ani oddělení mezi plochami. Druhý kontakt typu *frictional* umožňuje určité posunutí styčných ploch. U kontaktu *frictional* je nutné zadat koeficient tření.

Kontakt *bonded* byl použit mezi plechem sendvičového panelu a jádrem z PIR pěny. Jak na dolní, tak i horní plech. Dále byl kontakt aplikován v šířce 5,5 mm na horní pásnici HEA nosníku a spodní plech sendvičových panelů. Tento typ kontaktu, jak bylo uvedeno výše, neumožňuje žádný posun. Díky šroubům, které byly aplikovány v dostatečně blízkých vzdálenostech rovněž nedocházelo k posunům. Při modelování tohoto kontaktu jsou případné deformace šroubů zanedbávány.

Kontakt *frictional* byl použit mezi spodní plech sendvičových panelů a betonovou stěnu, na které byly sendvičové panely uloženy. Koeficient tření mezi materiály ocel – beton byl použit 0,2.

4.1.4 Okrajové podmínky

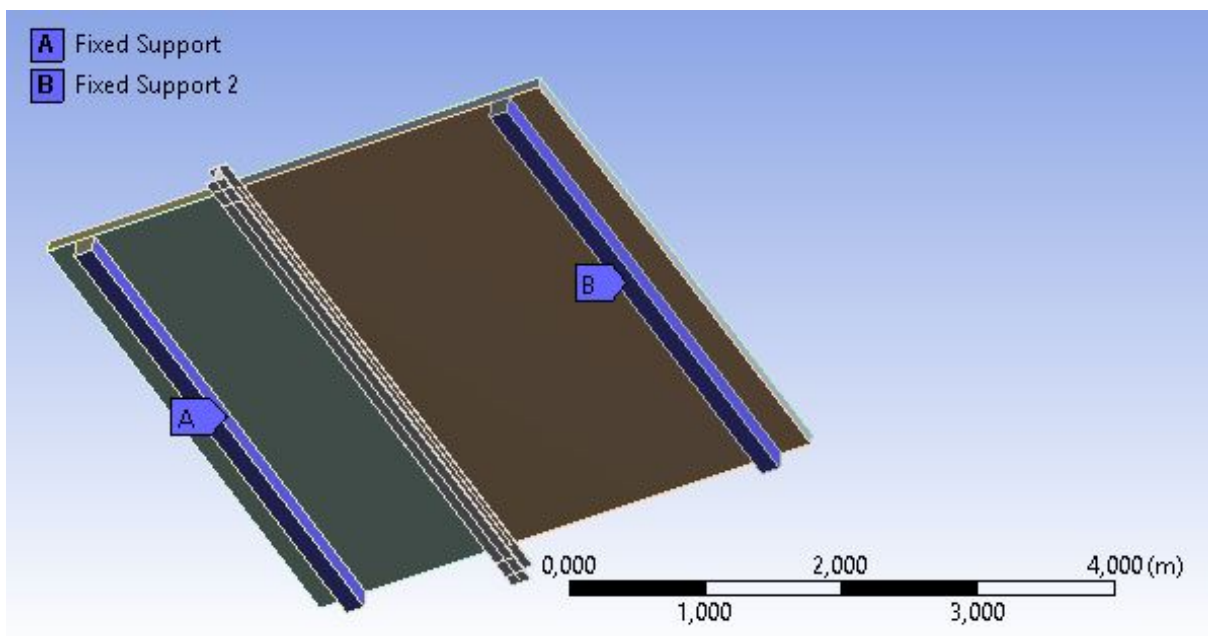
Uložení nosníku je namodelováno jako prosté, což odpovídá skutečnému uložení při experimentu (obr. 53). Díky tomuto uložení je umožněn v jedné podpoře pouze posun ve směru osy Z (na obr. 53 označeno A) a v druhé podpoře není umožněn posun ani pootočení ve všech třech směrech (na obr. 53 označeno B).



obr. 53 Uložení nosníku

Sendvičový panel byl k nosníku při experimentu připevněn pomocí samořezných šroubů, proto je v modelu použitý kontakt *bonded*, aby nedošlo k oddělení spodního plechu od nosníku.

V modelu je nadefinována fixní betonová stěna (obr. 54) z důvodu nasimulování možného pohybu panelu. Dále byla posuvná podpora aplikována na sendvičový panel v místě uložení na betonovou stěnu. U této podpory byl umožněn posun v ose x a v ose y . V záporném směru osy y je díky tuhé betonové stěně posunu zabráněno.



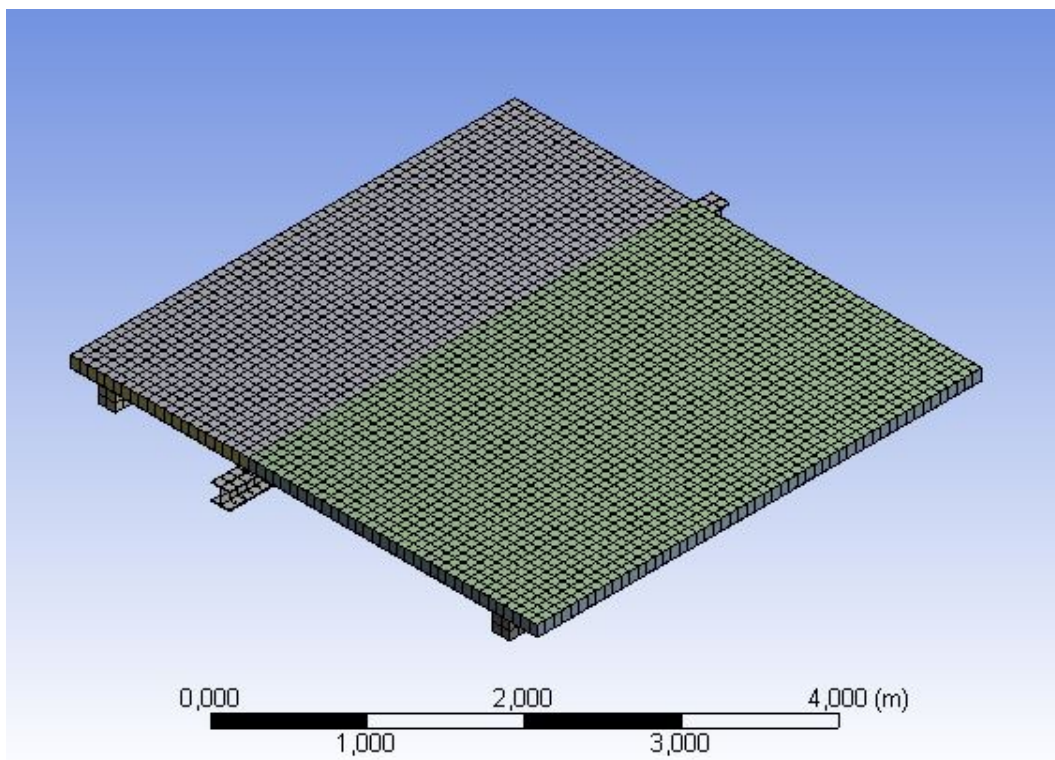
obr. 54 Fixní podpory betonové stěny

4.1.5 Výpočetní síť

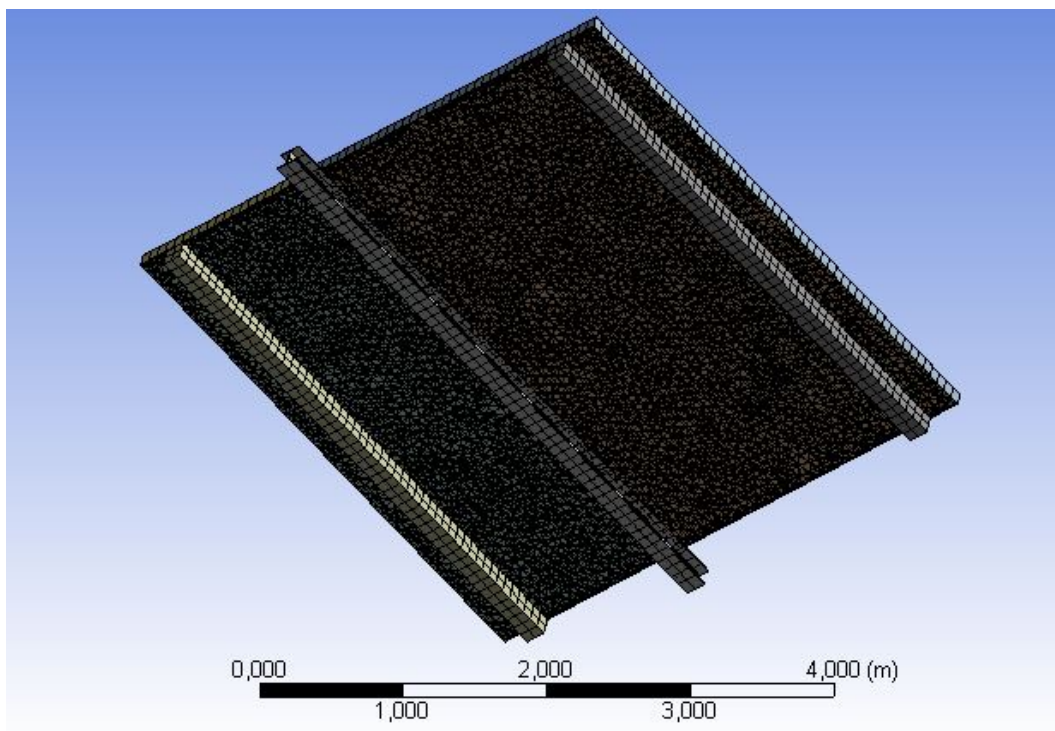
Výpočetní síť (angl. mesh), je řešena v tzv. Ansys Mesh, který je součástí Ansysu Workbench. Jedná se o programovou vestavbu, která si sama dokáže vytvořit výpočetní oblast. Pokud ale uživatel vyžaduje vlastní nastavení, program se dokáže přizpůsobit. V programu se lze dostat ke všem hlavním částem modelu a operacemi, při kterých byla vytvářena síť. [11]

Přesnost analýzy se odvíjí právě od kvality sítě. Jedná se o síť kontrolních objemů, pro které model provádí výpočty. Od velikosti sítě se odvíjí přesnost výpočtu, kdy při větším rozměru kontrolního objemu nejsou výsledky přesné. Na druhou stranu výhodou větších rozměrů je krátký výpočetní čas. [11]

Pro tento model byly vytvořeny dva základní druhy sítě, oba dva s rozměrem kontrolního objemu o straně velikosti 75 mm (při nastavené maximální hodnotě do 150 mm). U nosníků, byla tato síť definována jako pravoúhlá čtvercová síť kontrolních objemů (obr. 55). Síť je rozdílná z důvodu volby jemnější sítě v oblastech, kde dochází ke změně prostředí. V této oblasti je tedy hustota sítě zjemněná. Výpočetní síť v místě, kde se nachází panel, je tvořena jsou lineárními trojúhelníkovými elementy (obr. 56). Celkový počet elementů v modelu je 66 0004, s 99 318 uzly.



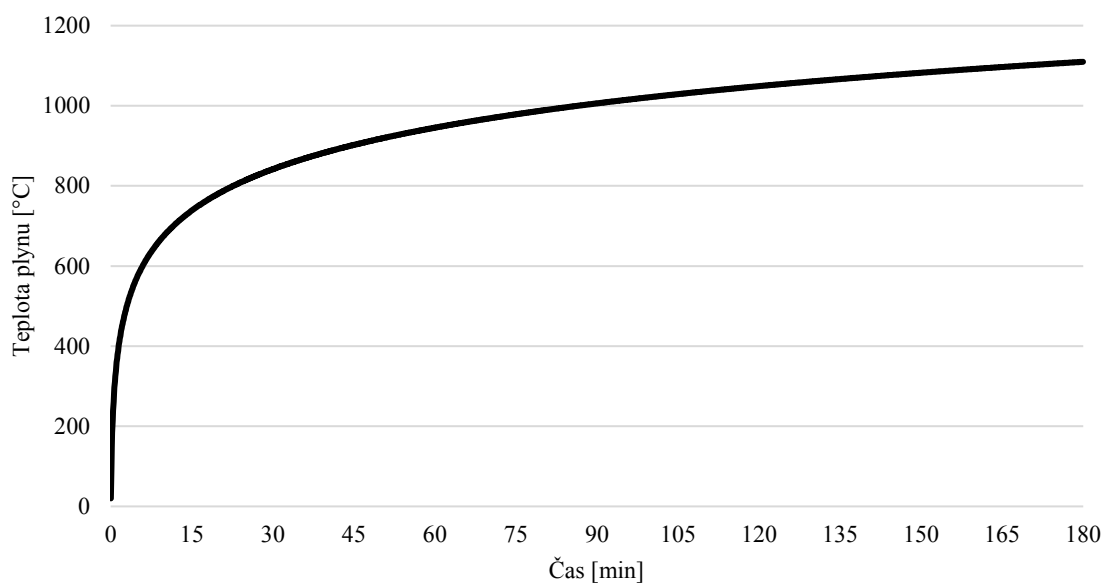
obr. 55 Čtvercová síť



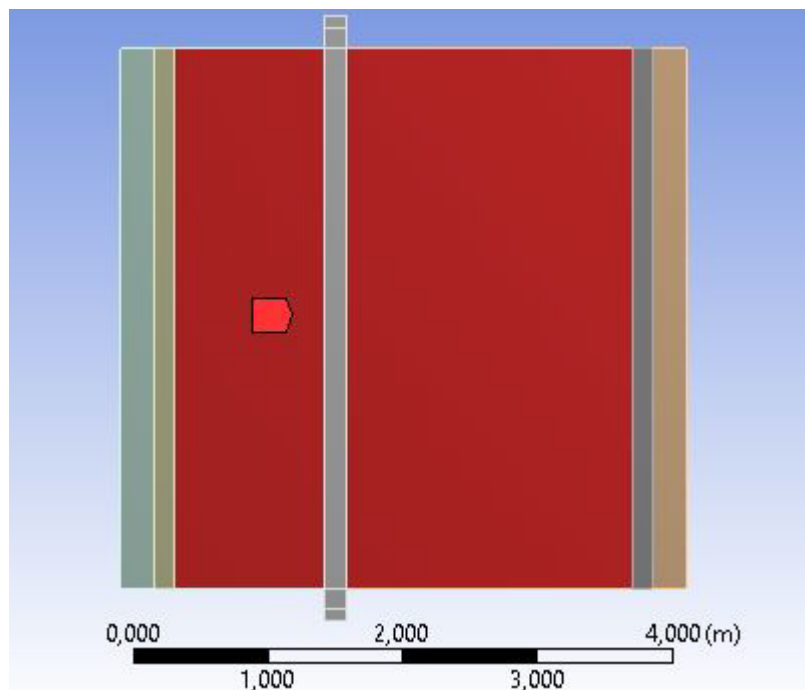
obr. 56 Trojúhelníková síť

4.1.6 Teplotní zatížení

Během experimentu bylo teplotní zatížení aplikováno na zkoušenou konstrukci podle normové teplotní křivky (obr. 57). Teplotní normová křivka byla zadána na spodní plech sendvičových panelů, viz. obr. 58.

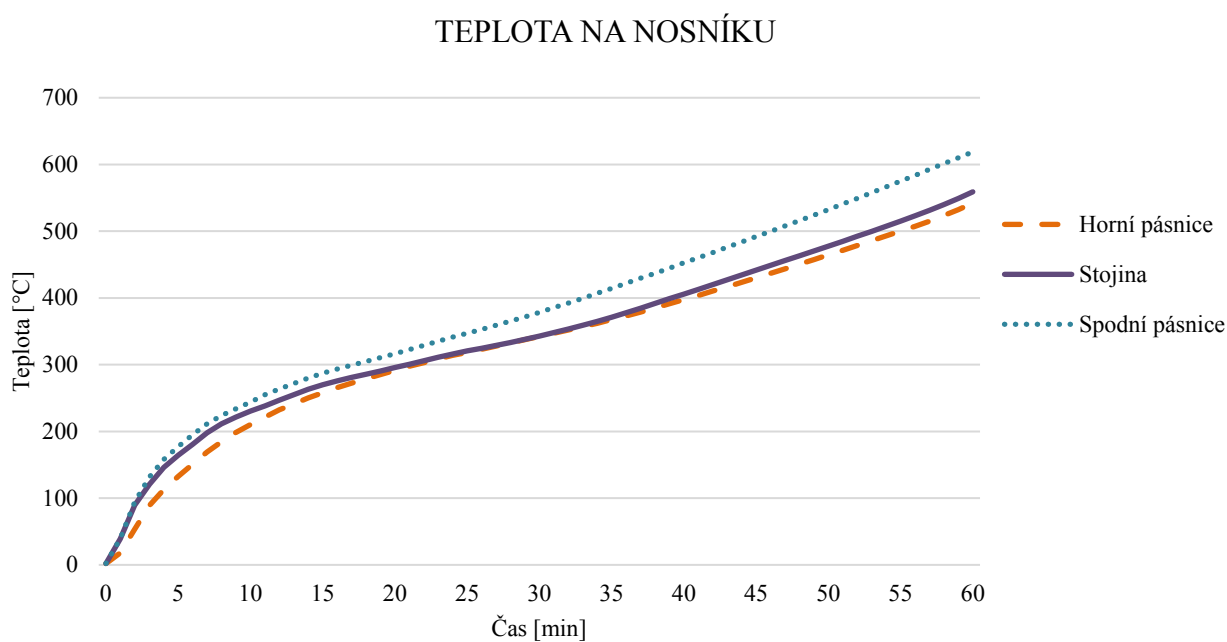


obr. 57 Normová teplotní křivka aplikována na spodní plech sendvičového panelu



obr. 58 Plocha zatížená normovou teplotní křivkou

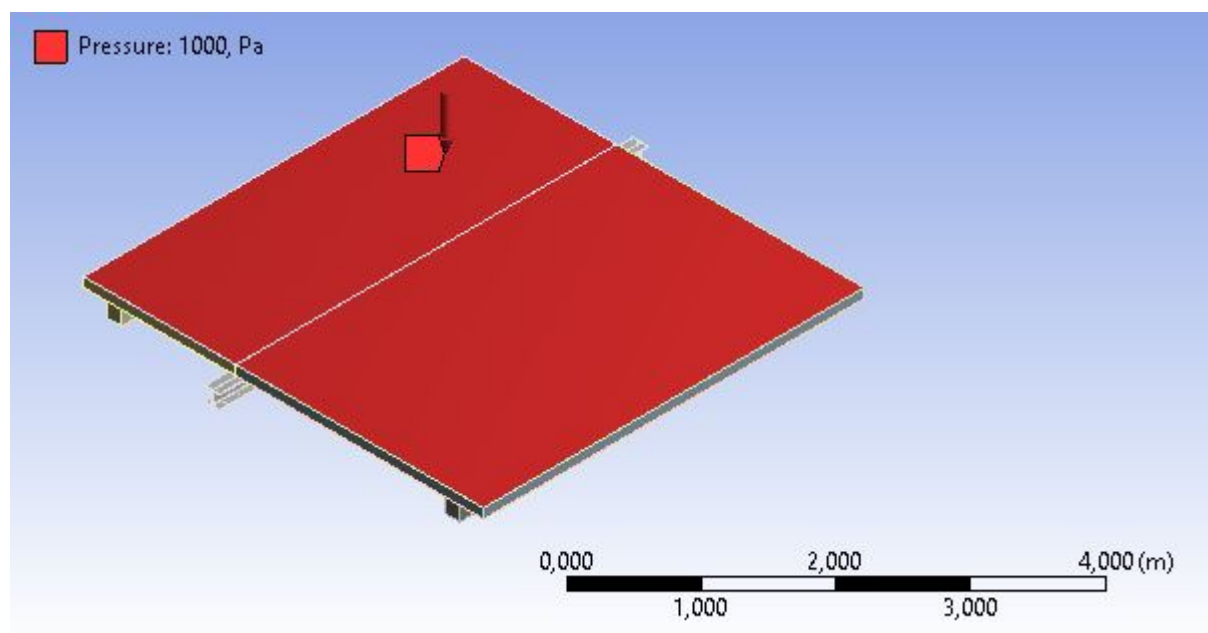
Ocelový nosník byl při experimentu chráněn požárním nátěrem. Z důvodu nedostatečných informací o vlastnostech požárního nátěru nebyl přestup tepla do nosníku simulován pomocí modelu. Teplota nosníku byla pro model převzata přímo z výsledků z experimentu a tato teplota byla na nosník v modelu aplikována. Teplota nosníku byla při experimentech měřena po výšce nosníku, což umožňuje detailní popis teploty nosníku pro účely modelu. Na obr. 59 je teplota, která byla aplikována na jednotlivé části nosníku (horní pásnice, stojina a spodní pásnice).



obr. 59 Teplota nosníku aplikována v modelu

4.1.7 Mechanické zatížení

Mechanické zatížení bylo zvoleno tak, aby odpovídalo zatížení použitým při experimentu. Horní plech sendvičových panelů byl zatížen rovnoměrně rozloženým zatížením o velikosti 1 kN/m^2 pomocí příkazu *Pressure* o velikosti 1000 Pa . Na obr. 60 je vidět zjednodušené zatížení v modelu, které bylo aplikováno na celou plochu panelu. Během experimentu byly použity ocelové plechy, viz kapitola 3.4.



obr. 60 Mechanické zatížení v modelu

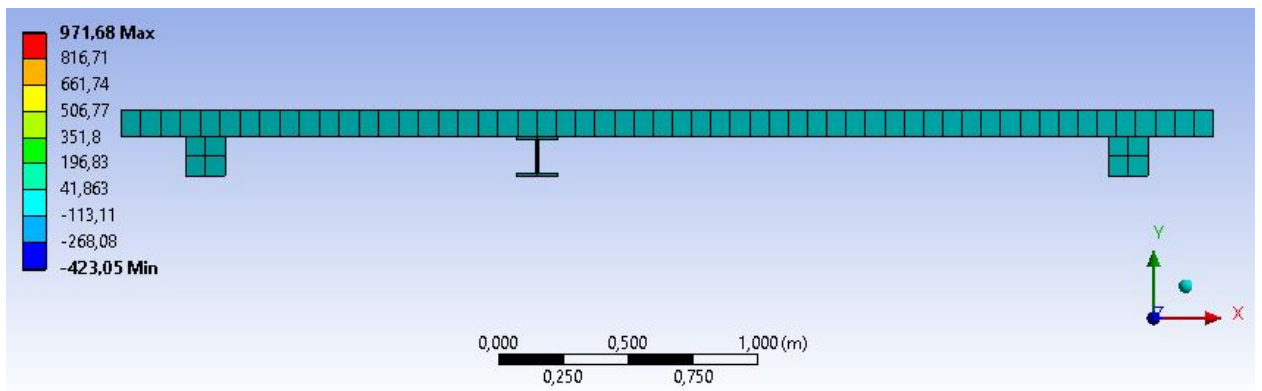
4.2 Teplotní analýza

Při tvorbě teplotní analýzy byla nastavena počáteční teplota okolí a teplota modelu na 5 °C . Tato teplota byla naměřena v den experimentu. Celkový výpočtový čas byl nastaven na 3600 sekund, což bylo jedním z kritérií experimentů. Velikost výpočetního kroku byla nastavena automaticky pomocí softwaru.

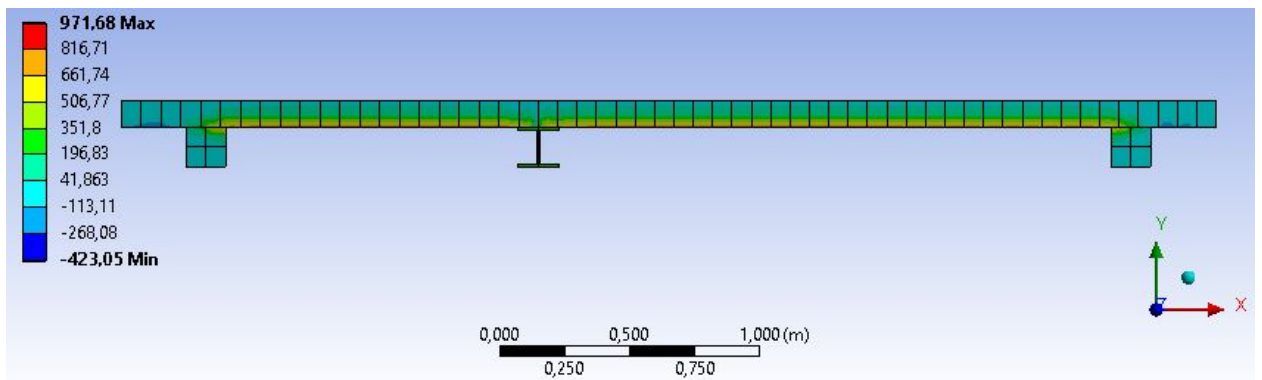
4.2.1 Výsledky teplotní analýzy

V *Solutions* byla přidána záložka *Temperature*, která sloužila pro získání přestupu tepla pro celou konstrukci modelu. A dále vložená záložka *Probe* neboli teplotní sonda, která umožňuje zjištění teploty v určitém bodě.

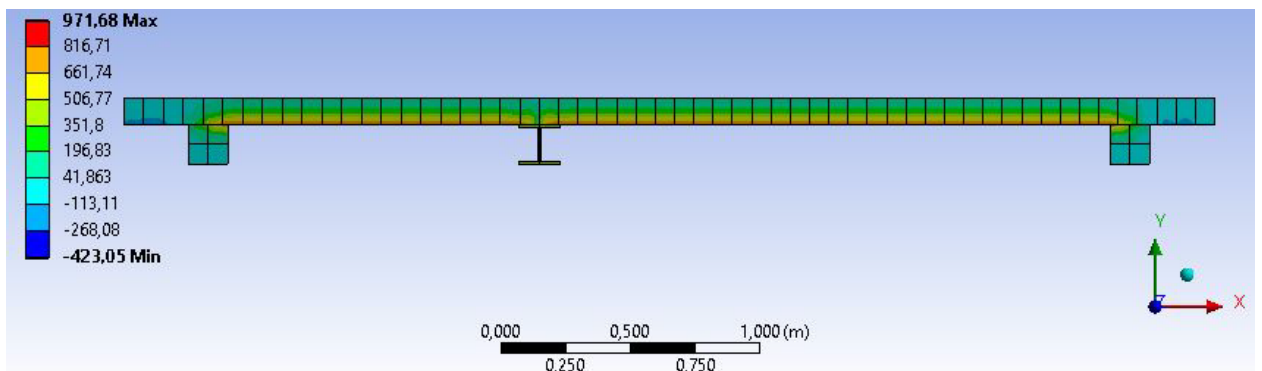
Na obr. 61 - obr. 65 jsou vidět teplotní přestupy v čase 0 – 60 min. Teploty na barevné škále jsou uvedeny v $^{\circ}\text{C}$. Záporná teplota na škále vznikla při prudkém zahřátí panelu. Pro odstranění záporné teploty by byla potřeba zjemnit výpočetní krok, tak i výpočetní síť. Záporné hodnoty vznikly na začátku výpočtu. Po 5 minutách se záporné hodnoty nevyskytovaly.



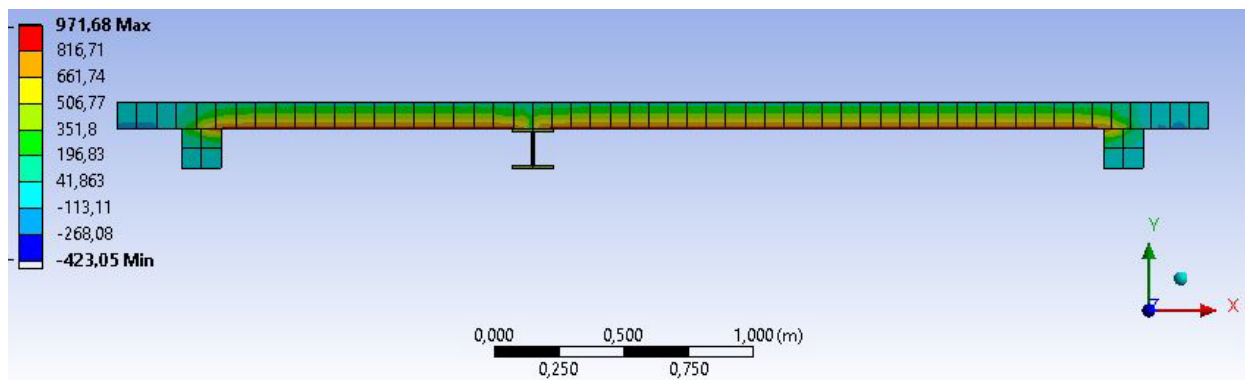
obr. 61 Průběh teplot v čase 0 min



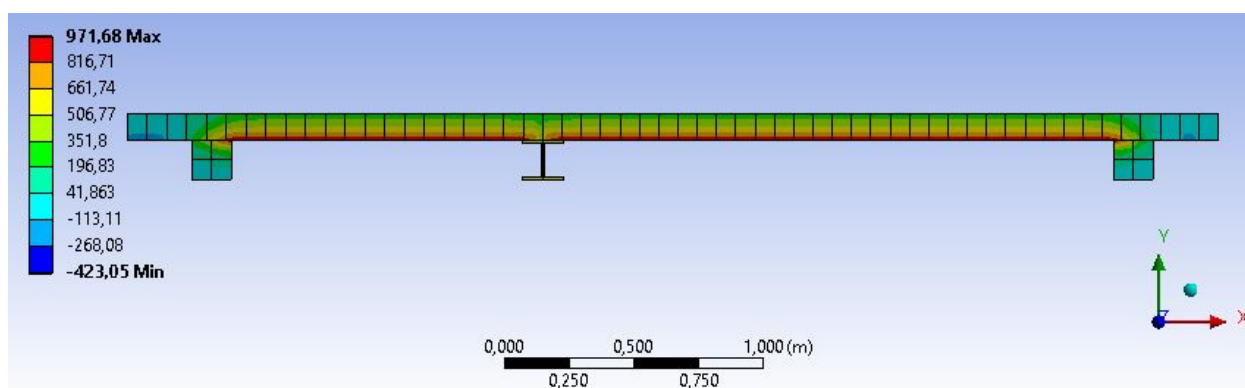
obr. 62 Průběh teplot v čase 15 min



obr. 63 Průběh teplot v čase 30 min



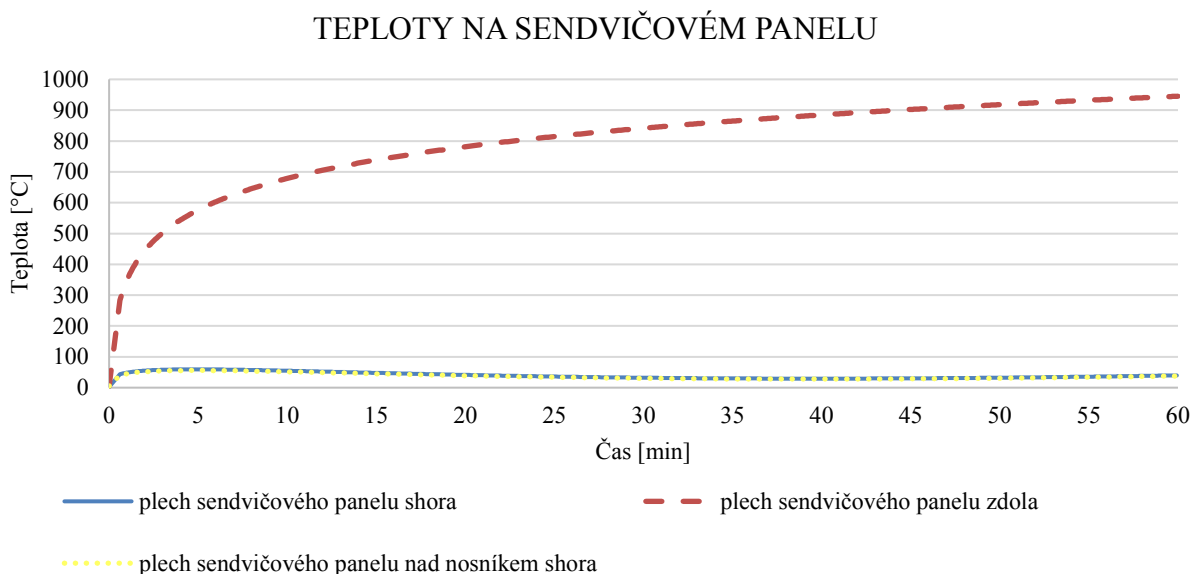
obr. 64 Průběh teplot v čase 45 min



obr. 65 Průběh teplot v čase 60 min

Teploty v modelu byly měřeny na stejných místech jako při experimentu. Pomocí teplotní sondy přidané do modelu do požadovaného bodu byl získán následující graf na obr. 66. Teplota plechu na spodní části, vystavená normové teplotní křivce, kopíruje její průběh.

Teploty na sendvičovém panelu shora byly v modelu zkoumány na dvou místech. A to nad nosníkem a uprostřed sendvičového panelu. Teploty jsou téměř totožné. Rozdíl teplot je maximálně 2 °C, viz. obr. 66.



obr. 66 Teploty na sendvičovém panelu

4.3 Statická analýza

Při nastavení výpočtu statické analýzy byl brán ohled na geometrickou nelinearitu. Při geometrické nelinearitě nelze předpokládat malá posunutí/deformace. Proto při nastavení výpočtu je klíčovým bodem *Large Deflection*. Automaticky jsou velké deformace vypnuty a v tom případě počítají lineárně. Velké deformace byly tedy zapnuty a výpočet proběhl nelineárně.

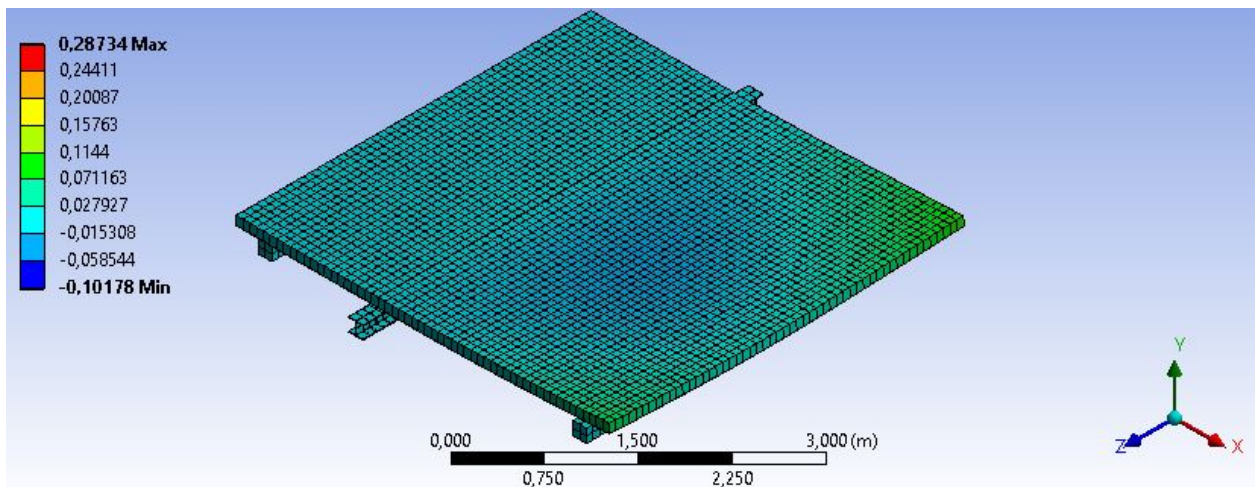
Řešení nelineární úlohy probíhá pomocí Newton-Raphsonovi metody, kdy se každá iterace koriguje pomocí matice tuhosti. Konvergenci je možno podpořit pomocí doplňujícího nástroje. Zatěžování bylo rozděleno do několika pod-kroků. Bylo nastaveno automatické rozdělování do výpočetních kroků a program si podle potřeby upravoval rozdělení na pod-kroky. Při prudkých změnách výstupních hodnot došlo automaticky k jemnějšímu rozdělení na větší počet menších pod-kroků a naopak při pomalých změnách se délka pod-kroků natáhla a řešení proběhlo v menších počtech pod-kroků. Výpočet byl ukončen po 3600 sekundách.

4.3.1 Výsledky statické analýzy

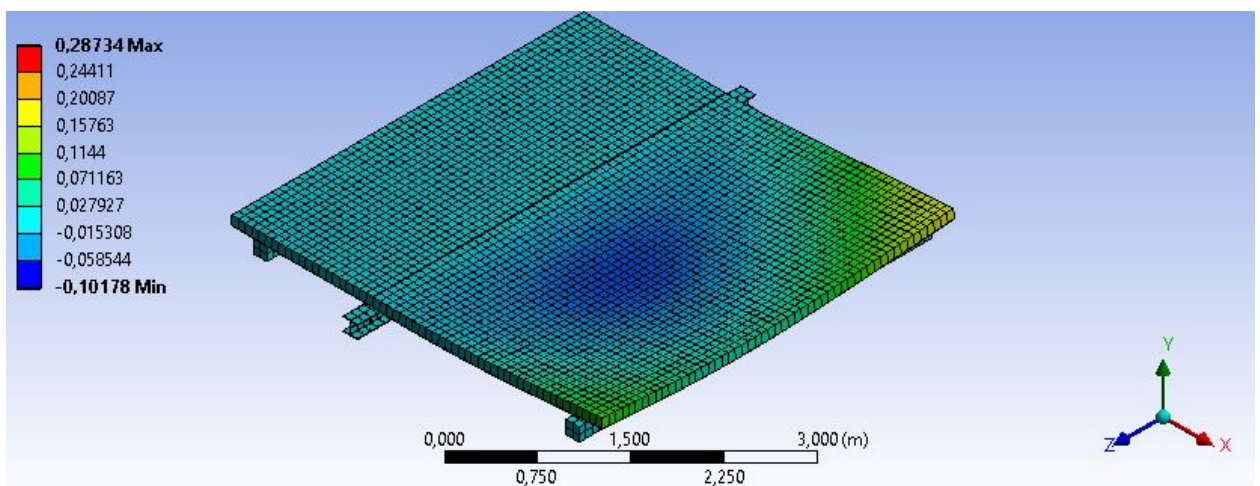
V softwaru Ansys bylo vypočítáno mechanické chování modelovaného vzorku ve smyslu deformací. Jako u teplotní analýzy byly v *Solutions* vybrány záložky, které byly pro výpočet zajímavé, jako *Directional deformation* a *Probe*. Záložka *Probe* (sonda) byla pro statickou analýzu použita pro zjištění deformace v určitém bodě.

Na obr. 67 - obr. 70 jsou vidět deformace v čase 15, 30, 45 a 60 min. Škála průhybů je v základní jednotce a to v metrech. Na obr. 70 je vidět, jak se okrajová část sendvičového panelu zdvihá a oddaluje se od horního povrchu betonové stěny, na kterou byl panel volně uložen. Postupně dochází k výraznějšímu zvedání rohových částí panelu. Ve středu rozpětí delší strany

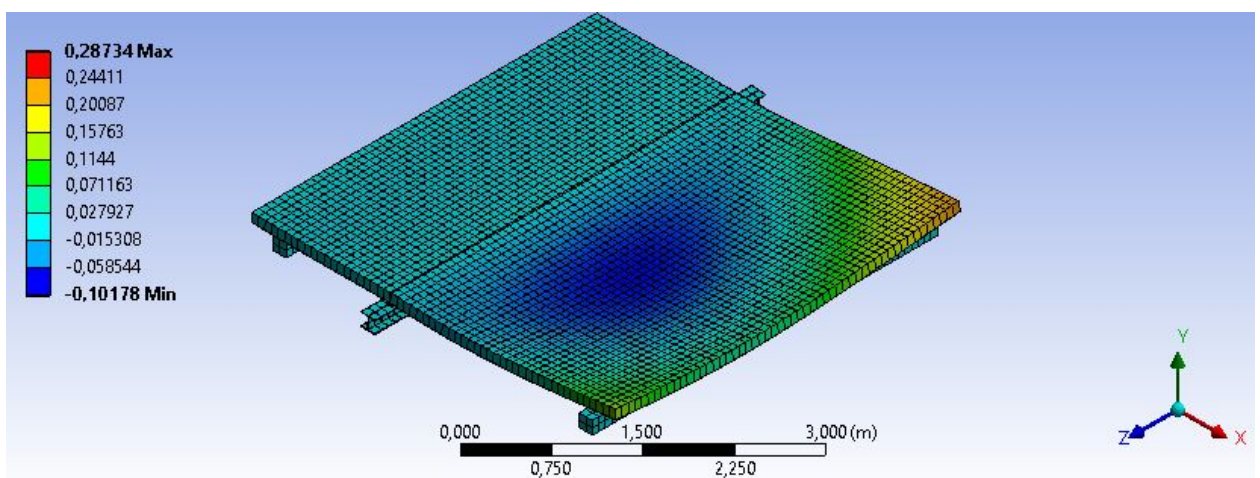
toto zdvižení cca 70 mm v čase 60 min výpočtu. V porovnání k tloušťce modelovaného panelu není tato deformace příliš výrazná.



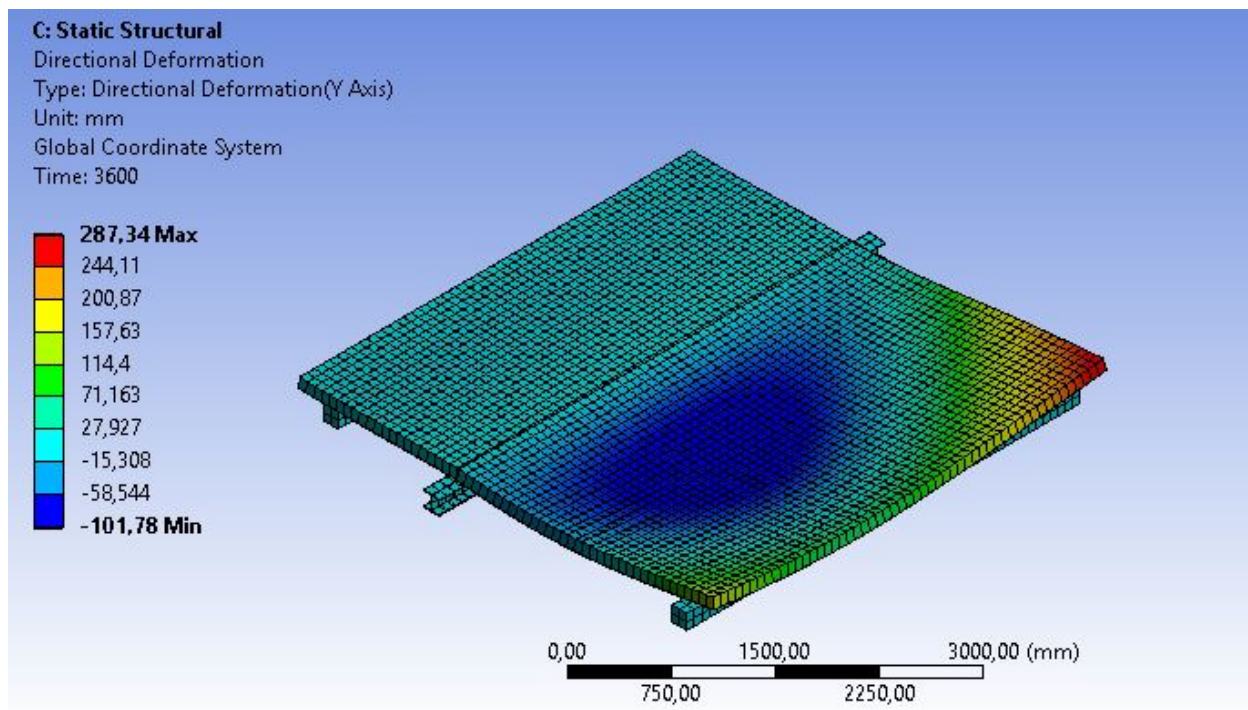
obr. 67 Průběh deformací v čase 15 min



obr. 68 Průběh deformací v čase 30 min

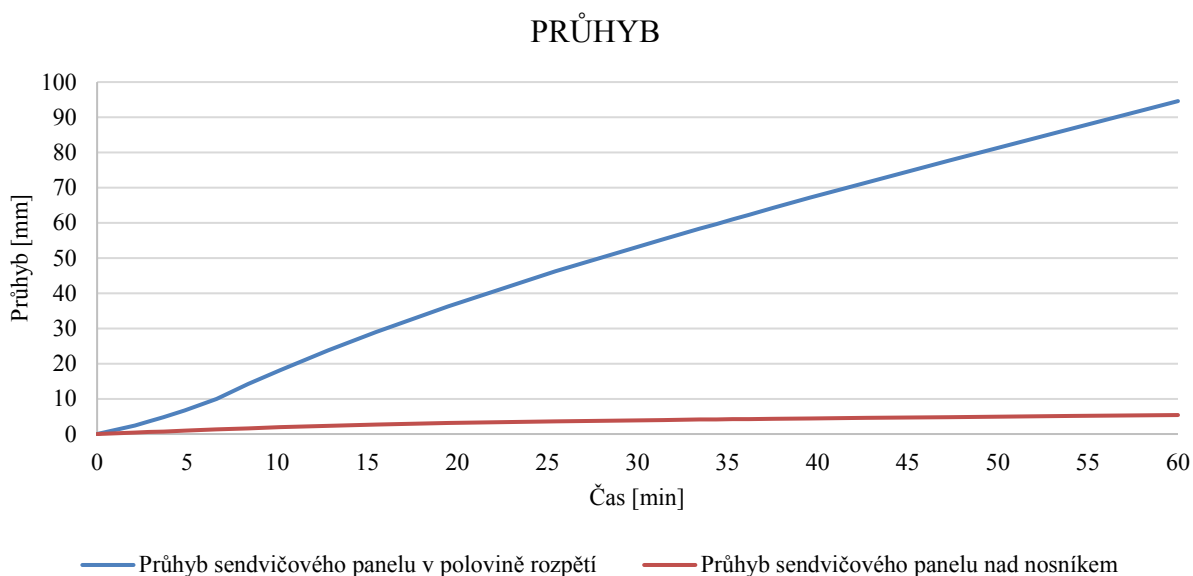


obr. 69 Průběh průhybu v čase 45 min



obr. 70 Průběh průhybu v čase 60 min

Na obr. 71 je vidět průběh průhybů v čase vypočítaných ve dvou místech modelu. Vybranými místy byl průhyb uprostřed nosníku a průhyb sendvičového panelu v polovině rozpětí. Průhyb v polovině rozpětí sendvičového panelu dosahuje větších hodnot než průhyb měřený nad nosníkem. Průhyb ve 30 min dosahuje na sendvičovém panelu 55 mm oproti průhybu nad nosníkem, u kterého je průhyb pouze 4 mm. Na konci výpočtu, v 60 min dosahuje maximální průhyb sendvičového panelu 94,5 mm.



obr. 71 Průběh průhybů v modelu

5 Validace numerického modelu

V poslední době se stále častěji využívají tzv. numerické modely. S tím souvisí používání počítačových programů, pomocí kterých je možné řešit výpočty daných modelů. Do programu je potřeba zadat velké množství vstupních údajů, jimiž se simuluje realita. Jelikož se nikdy nemůže podařit nasimulovat 100 % stejných podmínek, musí se vždy uvažovat s modelem jako se zjednodušenou variantou skutečnosti. Proto je důležité, aby pravdivost výsledků byla ověřena. V nejlepším případě by měly odpovídat výsledkům z experimentů. Proto pokud je provedena i reálná zkouška, je potřeba daný numerický model validovat.

Validace je proces, při kterém se ověřuje, jak přesně dokáže model nasimulovat reálnou situaci. Existuje tedy abstraktní návrh modelu a pomocí validace je zkoumán reálný systém. Ověřuje se shodnost údajů získaných z experimentů s údaji z numerických modelů. Cílem validace je nastavit program tak, aby si tyto údaje odpovídaly. Získané výsledky by pak měly sloužit pro vylepšení základního nastavení počítačového programu. Data zadávané do počítačových programů jsou velmi konkrétní a odvíjejí se od dat získaných z proběhlých experimentů. To tedy znamená, že je program validován již při svém vzniku a že se nám nikdy nepovedete provést stoprocentní validace.

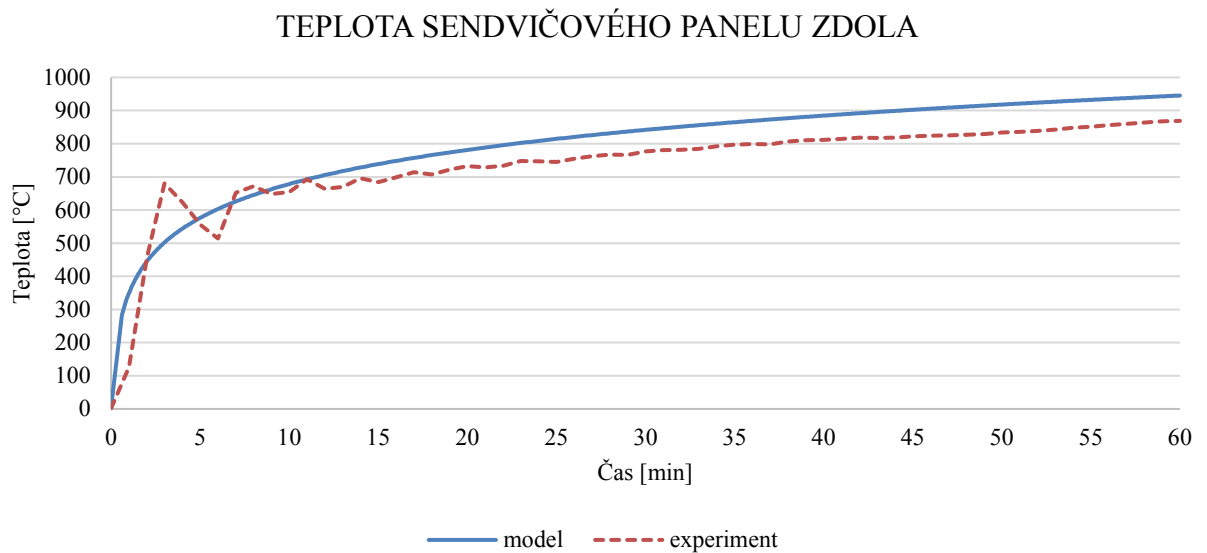
V tomto případě se bude jednat o porovnání výše popsaných proběhlých experimentů s výsledky modelu z programu Ansys Workbench. Co je potřeba posuzovat? Vhodnou reprodukci modelu vůči chování reálného systému, realistické chování modelu při extrémních podmínkách, strukturu modelu a zdali odpovídá struktuře reálného systému. Je také potřeba umět dokonale rozpoznat a kvantifikovat zdroje nejistot. Modely jsou zejména citlivé vůči nejistotám vstupních parametrů. Při snaze klasifikovat nejistoty je zaměřeno tedy na nejistoty měření, nejistoty vstupních parametrů a jejich vzájemnou kombinaci.

Co je neméně důležité, je při validační studii dodržet určitý odstup od záměrného připodobění předpovědi numerického modelu s výsledky zkoušek. Nezáleží tedy jen na aspektech simulovaného problému a typu modelu, ale také právě na osobě vytvářející model a provádějící validaci. Validací dokážeme vytvořit všeobecný přehled o všech silných a slabých stránkách programu.[12]

Model je ovlivňován dvěma typy základních proměnných – vnitřními a vnějšími. Mezi vnitřní proměnné patří hodnoty nastavované v rozhraní programu, jedná se například o hrubost/jemnost výpočetní síť (meshe), či počet výpočtových kroků. Vnější proměnné pak definují geometrii modelovaného prostoru, okolní podmínky, použité materiálové vlastnosti a charakteristiku požáru. Tyto vstupní údaje jsou uvedeny v předešlé kapitole. [13]

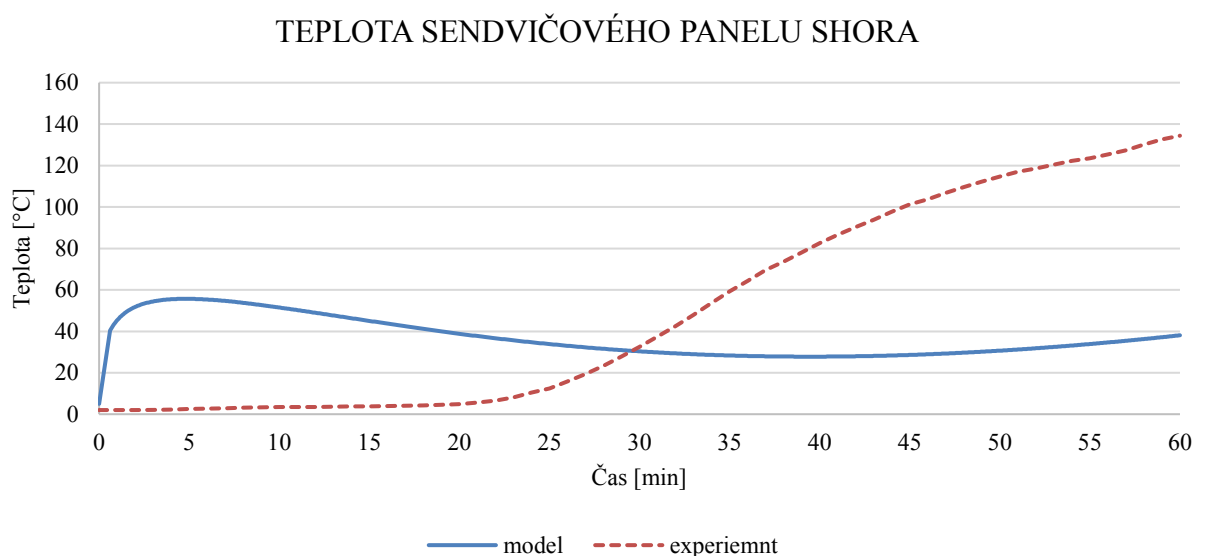
5.1 Validace teplotní analýzy

Pro validaci teplotní analýzy byla vybrána dvě místa, ve kterých byla teplota měřena při experimentu a stejně tak i vypočítána v modelu. Měřená teplota na spodním povrchu plechu sendvičového panelu (obr. 72) je velmi podobná.



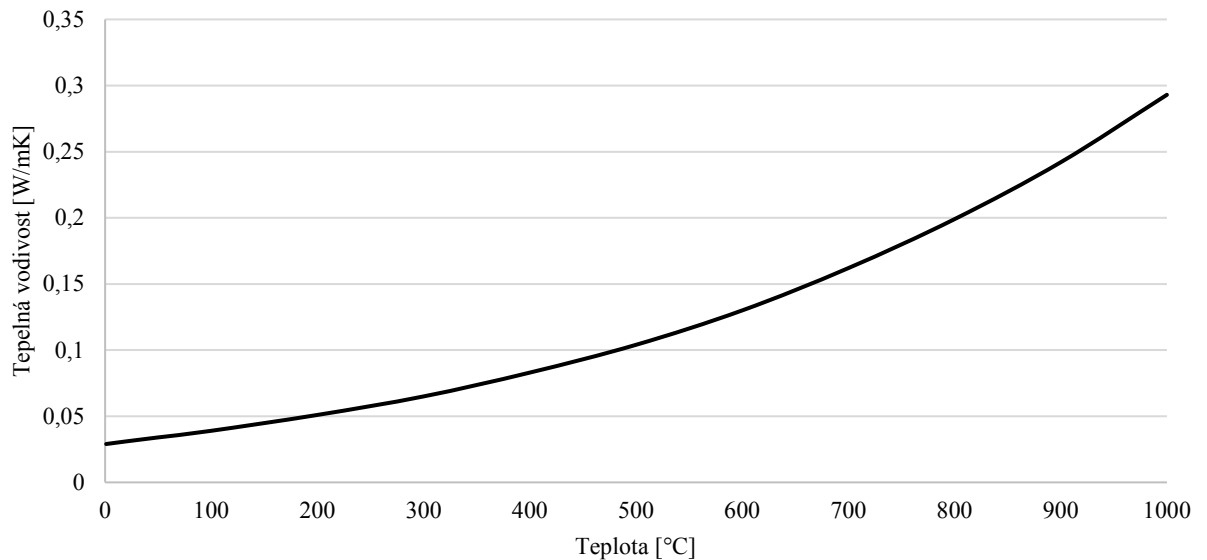
obr. 72 Teplota sendvičového panelu zdola

Dalším místem pro porovnání teplot byl vybrán horní plech u sendvičového panelu. Porovnání vypočtených hodnot z modelu a změřených během experimentu je uvedeno na obr. 73. Z obrázku je patrné, že jsou teploty velice odlišné. Toto je způsobeno nedostatečným popisem tepelných vlastností výplně panelů. I přes obrovské vynaložené úsilí, nebyly vlastnosti výrobcem poskytnuty.



obr. 73 Teplota sendvičového panelu shora

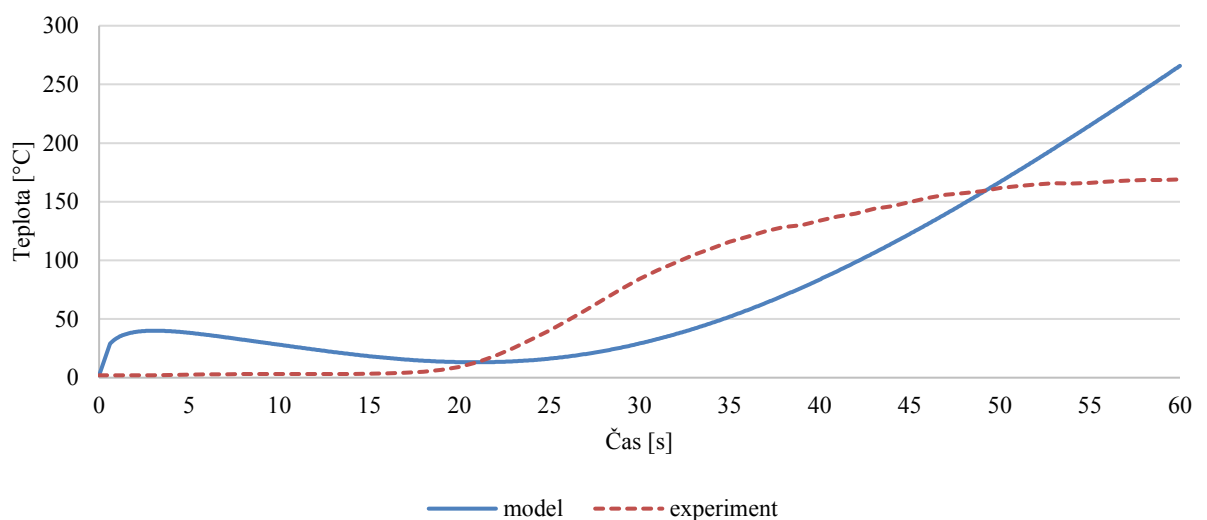
Odlišně teploty shora sendvičového panelu jsou způsobené nedostatečnými tepelně technickými vlastnostmi materiálu. Pro ukázkou vlivu tepelně technických vlastností materiálu na výsledky numerického modelu, byla použita tepelná vodivost PIR pěny proměnná s teplotou (uvedena na obr. 74). Tepelná vodivost převzata od výrobce má při 20 °C hodnotu 0,018 W/mK. Tato nově použitá tepelná vodivost pocházející z [14] má při 20 °C hodnotu 0,031 W/mK.



obr. 74 Tepelná vodivost PIR pěny [14]

Při porovnání teploty s použitou vodivostí závislou na čase, teploty jsou bližší hodnotám z experimentu, viz obr. 75. Teplota při experimentu začala narůstat po 20 min a teplota v modelu začala narůstat v 25 min. Po 50 min se teplota z experimentu ustálila, ale v modelu stále rostla.

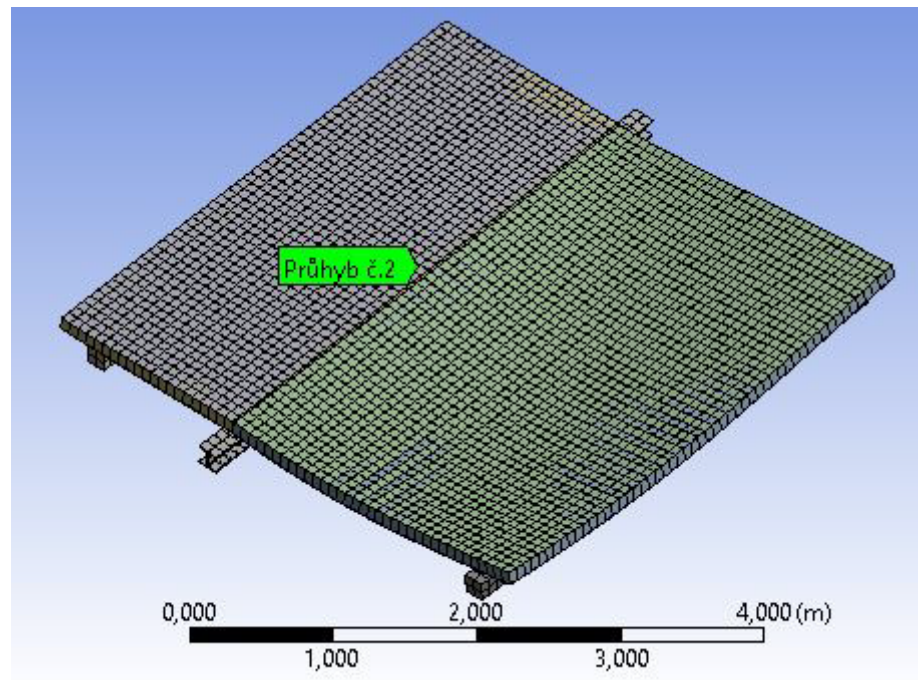
TEPLOTA SENDVIČOVÉHO PANELU SHORA



obr. 75 Teplota sendvičového panelu shora s tepelnou vodivostí závislou na teplotě

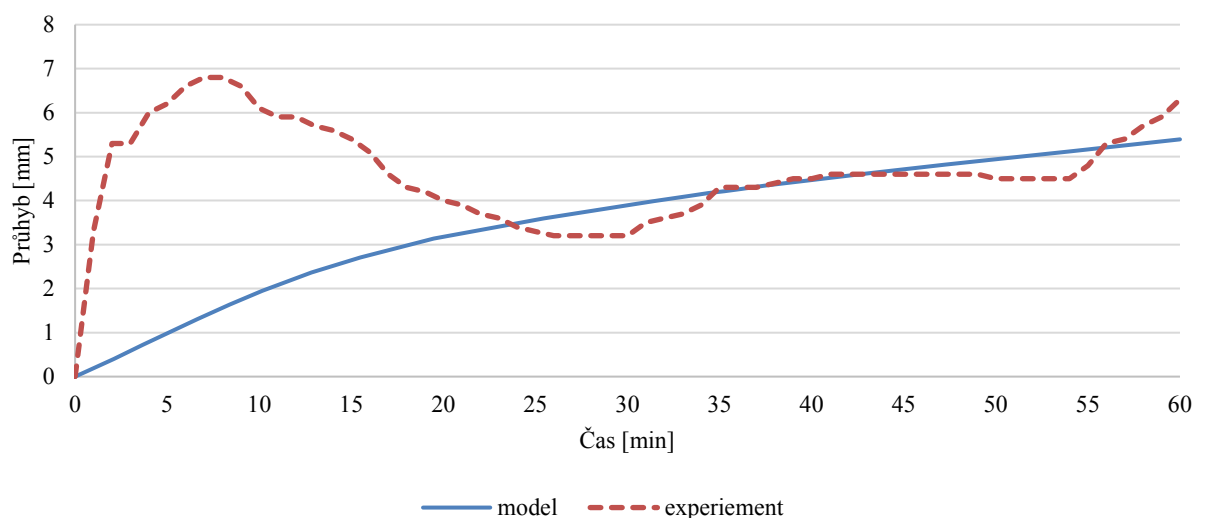
5.2 Validace statické analýzy

Na obr. 77 je porovnán průhyb uprostřed sendvičového panelu nad nosníkem v polovině rozpětí, viz obr. 76. Při experimentu bylo toto místo označováno průhybem číslo 2. Průhyb do 25 min má odlišné průhyby. Při experimentu došlo na začátku zkoušky k rychlému nárůstu průhybu v místě nosníku a pak následnému poklesu. V modelu se toto chování nepotvrdilo. Průhyb narůstal pozvolně bez výraznější výkyvů. Od 23 min je průhyb podobný. V 35 min je průhyb shodný až do 45 min.



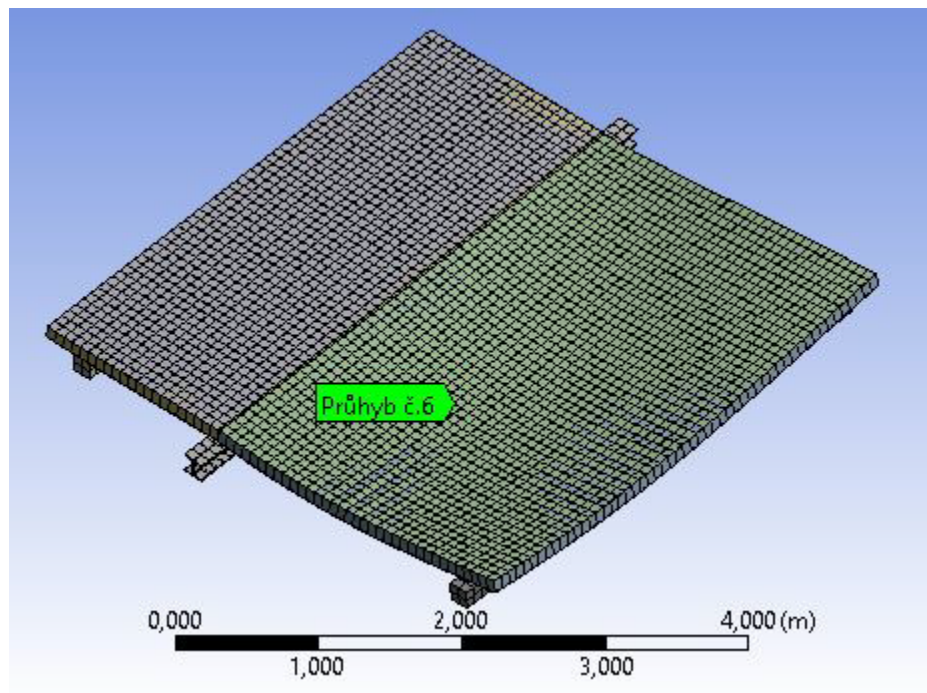
obr. 76 Umístění sondy pro měření deformace nad nosníkem

PRŮHYB SENDVIČOVÉHO PANELU NAD NOSNÍKEM



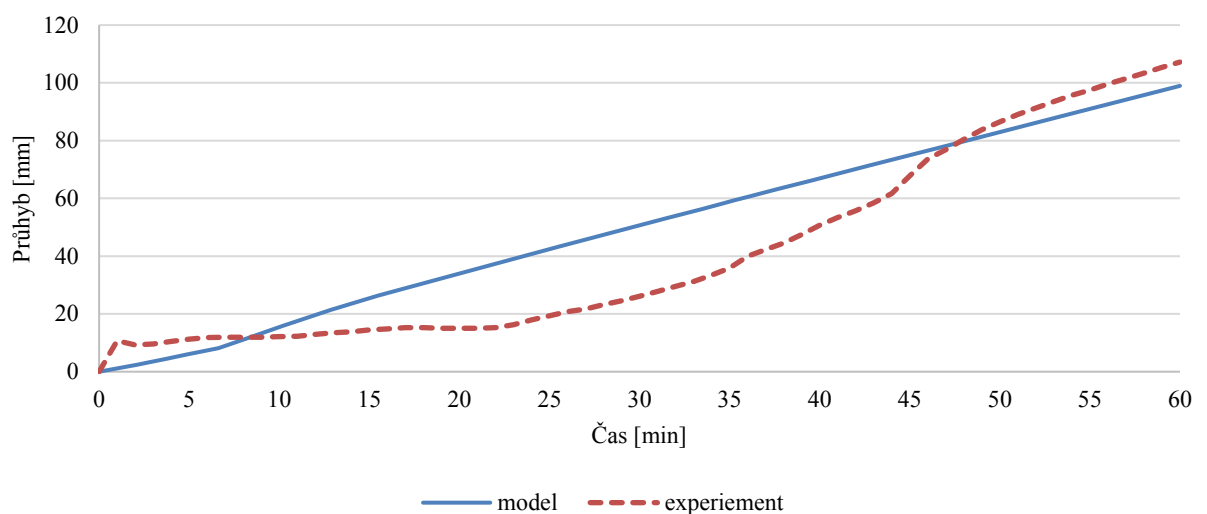
obr. 77 Porovnání průhybů na sendvičovém panelu nad nosníkem

Porovnání průhybů na obr. 79 zobrazuje průhyb v bodě 6, viz obr. 78. Pro porovnání nebyl použit průhyb č. 5 (v polovině rozpětí sendvičového panelu) z důvodu nadzvednutí plechu při experimentu. Zatížení v experimentu bylo aplikováno pomocí ocelových plechů, které nebyly vzájemně propojeny a v modelu bylo zatížení aplikováno na celou plochu. Nemohlo tedy v modelu k nadzvednutí dojít. Průhyb v 8 min v modelu je totožný s průhybem naměřeným při experimentu. Poté průhyb v modelu narůstal lineárně, zatímco průhyb z experimentu dosahoval menších hodnot. Průhyb ve 47 min byl opět shodný, viz obr. 79.



obr. 78 Umístění sondy pro měření deformace na sendvičovém panel

PRŮHYB SENDVIČOVÉHO PANELU



obr. 79 Porovnání průhybů na sendvičovém panelu

S uvážením omezených informací o materiálových vlastnostech a s ohledem na jistá zjednodušení modelu, která vedla ke zkrácení výpočetního času a snížení počtu buněk výpočetní sítě, je možné konstatovat, že model vykazuje shodu s výsledky z experimentů. Pro získání přesnějších hodnot z numerického modelu by byla potřeba zadat detailnější materiálové vlastnosti ať už za běžné teploty tak za zvýšené, namodelovat jednotlivé části vzorku podrobněji a dále by byla potřeba nastavit jemnější výpočetní síť.

6 Závěr

Cílem diplomové práce je ověřit chování nosníku stabilizovaného sendvičovými panely za zvýšené teploty.

V první části práce je shrnuta problematika zabývající se vlivem sendvičových panelů na chování nosných ocelových konstrukcí při běžné i zvýšené teplotě. Práce uvádí výsledky několika tuzemských a zahraničních studií. Dále jsou v úvodní části práce popsány jednotlivé prvky studovaného typu konstrukce (nosník, sendvičový panel, upevňovací prvky) a jejich vliv na chování konstrukce se sendvičovými panely.

V druhé části této práce je podrobně popsán průběh experimentů chování nosné konstrukce stabilizované sendvičovými panely za zvýšené teploty. Experimenty byly provedeny jako velkorozměrové zkoušky v peci požární zkušebny PAVUS a.s. ve Veselí nad Lužnicí. Pro první experiment byl použit sendvičový panel tloušťky 100 mm s výplní z PIR pěny, upevněný na horní pásnici nosníku HEA 160, který byl chráněn požárním nátěrem. Druhý experiment se lišil pouze tloušťkou sendvičového panelu. V tomto případě byl využit panel tloušťky 160 mm. Sledovanými parametry během experimentů byly teploty plynu uvnitř pece, teploty na nosníku a teploty na panelu. U panelu byla měřena teplota plechu na odvrácené straně, teplota uvnitř panelu a dále teplota na ohřívané straně panelu. Teploty byly také zaznamenávány po výšce šroubů. Zaznamenávány byly také průhyby jak na nosníku, tak na sendvičových panelech.

Při prvním experimentu, byl naměřen průhyb nad nosníkem v 60 min 16,2 mm a na sendvičovém panelu 34,1 mm. Teplota na odvrácené straně panelu vzrostla při 20 min. Při měření teplot na spodní pásnici bylo dosaženo v 60 min teploty 602,7 °C. V druhém experimentu, byl naměřen průhyb uprostřed nosníku v 60 min 6,3 mm a na sendvičovém panelu 46,1 mm. Teplota na odvrácené straně sendvičového panelu vzrostla až po 30 min. Při měření teplot na spodní pásnici bylo dosaženo v 60 min 577,6 °C.

Z výsledků zkoušek je vidět, že panel tloušťky 160 mm stabilizuje nosník lépe než panel tloušťky 100 mm, protože nosník dosáhl nižšího průhybu.

V další části práce je popsán numerický model vytvořený v softwaru ANSYS Workbench. Geometrie a uvažované okrajové podmínky modelu odpovídají provedeným a v této práci popsaným experimentům. V modelu byl zkoumán přestup tepla do modelovaného vzorku a mechanické chování vzorku ve smyslu deformací.

Modelovaným vzorkem byl sendvičový panel tl. 100 mm. Průhyb nad nosníkem v 60 min byl naměřen 5,4 mm a na sendvičovém panelu 94,6 mm. Teplota na odvrácené straně panelu 60 min dosahuje 38 °C. Při změně tepelné vodivosti, která je závislá na teplotě, odvrácená strana panelu dosahovala 265 °C.

Model vytvořený v programu ANSYS Workbench byl validován pomocí experimentů popsaných v druhé části práce. Z představení výsledků v rámci této práce je vidět, že některé

zjednodušení či nedostatečné znalosti o materiálových vlastnostech, mají výrazný vliv na dosaženou přesnost řešení numerického modelu. V části teplotní analýzy byl předveden vliv tepelně technických vlastností na výsledky. Při změně tepelné vodivosti závislé na čase se hodnoty na konci modelovaného času, tedy v 60 min lišily o 227 °C. Na základě porovnání výsledků mechanického chování je možné konstatovat, že model dobře reprezentuje chování sendvičového panelu v místě nad nosníkem a to v čase od 25 min. V polovině rozpětí sendvičového panelu bylo dosaženo stejných hodnot průhybu v 8 a 47 min. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba zjemnit výpočetní síť a nastavit více výpočetních podkroků. S uvážením omezených informací o materiálových vlastnostech a s ohledem na jistá zjednodušení modelu, která vedla ke zkrácení výpočetního času a snížení počtu buněk výpočetní sítě, je možné konstatovat, že model vykazuje shodu s výsledky experimentů.

Pro další práci by bylo možné zdokonalit již namodelovaný model. Zdokonalení je možné provést např. skutečným namodelováním 4 sendvičových panelů spojených pomocí samořezných šroubů tak, jak tomu bylo ve skutečnosti. Dále spojení nosníku HEA 160 se sendvičovými panely také pomocí samořezných šroubů. Díky tomu by bylo možné porovnat další hodnoty z experimentů jako je např. teplota ve spojích sendvičových panelů či teplota samotných šroubů. Kromě toho by bylo možné dosáhnout lepší shody s chováním vzorku během experimentu. Je potřeba ale mít na paměti, že každé zdokonalení numerického modelu je na úkor výpočetního času.

Seznam obrázků

obr. 1 Schéma sestavy 1 (přeloženo z [2]).....	11
obr. 2 Řešený konstrukční systém [4].....	13
obr. 3 Závislosti zatížení a deformace [4].....	13
obr. 4 Zatížení - deformace na horní straně příruby (přeloženo z [5]).....	14
obr. 5 Vhodný způsob upevnění panelů na střešní konstrukci (přeloženo z [6]).....	15
obr. 6 Dotažení upevňovacích prvků [7].....	18
obr. 7 Příčný spoj sendvičového panelu KS 1000 RW [7]	19
obr. 8 Podélný spoj panelu KS 1000 RW [7].....	19
obr. 9 Horizontální pec ve Veselí nad Lužnicí PAVUS a.s. [8]	20
obr. 10 Řez průřezem HEA 160.....	21
obr. 11 Řez sendvičovým panelem Kingspan KS 1000 RW	21
obr. 12 Samořezný šroub se závitem pod hlavou.....	22
obr. 13 Postup montáže panelu na nosník [7]	22
obr. 14 Normová teplotní křivka.....	23
obr. 15 Mechanické zatížení s nezatíženou mezerou.....	24
obr. 16 Mechanické zatížení s propojením plechů.....	24
obr. 17 Půdorysné schéma uložení nosníku a sendvičových panelů na peci	25
obr. 18 Řez A-A'	26
obr. 19 Řez B-B'	26
obr. 20 Pohled na stropní konstrukci před zkouškou.....	26
obr. 21 Vyvedení termočlánků.....	27
obr. 22 Datalogger.....	27
obr. 23 Průběh zkoušky v 1. minutě.....	28
obr. 24 Průběh zkoušky ve 21. minutě.....	28
obr. 25 Ukončení zkoušky v 78. minutě	29
obr. 26 Stropní konstrukce po zkoušce	29
obr. 27 Pohled z pece na nosník a sendvičové panely po zkoušce	30
obr. 28 Pozice měření průhybů	30
obr. 29 Průběh průhybu nad nosníku	31
obr. 30 Průběh průhybu na sendvičovém panelu	32

obr. 31 Umístění termočlánků na nosníku	32
obr. 32 Průběh teplot na nosníku	33
obr. 33 Průběh teplot na sendvičovém panelu	33
obr. 34 Prošlehnutí plamene v 63. minutě	34
obr. 35 Prošlehnutí plamene na více místech.....	34
obr. 36 Pohled z pece na vyhořelý sendvičový panel	35
obr. 37 Průběh průhybů nad nosníku	36
obr. 38 Průběh průhybu na sendvičovém panelu	36
obr. 39 Průběh teplot na nosníku	37
obr. 40 Průběh teplot na sendvičovém panelu	37
obr. 41 Porovnání průhybu nad nosníkem	38
obr. 42 Porovnání průhybu na sendvičovém panelu	38
obr. 43 Porovnání teploty na sendvičových panelech na odvrácené straně	39
obr. 44 Porovnání teplot na spodní pásnici nosníku	40
obr. 45 Schéma propojení prostředí v ANSYS Workbench	42
obr. 46 Idealizovaný materiálový model oceli S355.....	43
obr. 47 Idealizovaný materiálový model oceli S250GD.....	43
obr. 48 Součinitel tepelné vodivosti oceli v závislosti na teplotě[10].....	44
obr. 49 Měrná tepelná kapacita oceli v závislosti na teplotě [10].....	44
obr. 50 Idealizovaný materiálový model PIR pěny.....	45
obr. 51 Řez zkoušenou sestavou	46
obr. 52 Geometrie v prostředí Design Modeler	47
obr. 53 Uložení nosníku	48
obr. 54 Fixní podpory betonové stěny.....	48
obr. 55 Čtvercová síť.....	49
obr. 56 Trojúhelníková síť	50
obr. 57 Normová teplotní křivka aplikována na spodní plech sendvičového panelu	50
obr. 58 Plocha zatížená normovou teplotní křivkou	51
obr. 59 Teplota nosníku aplikována v modelu.....	51
obr. 60 Mechanické zatížení v modelu	52
obr. 61 Průběh teplot v čase 0 min.....	53
obr. 62 Průběh teplot v čase 15 min.....	53

obr. 63 Průběh teplot v čase 30 min.....	53
obr. 64 Průběh teplot v čase 45 min.....	54
obr. 65 Průběh teplot v čase 60 min.....	54
obr. 66 Teploty na sendvičovém panelu	55
obr. 67 Průběh deformací v čase 15 min.....	56
obr. 68 Průběh deformací v čase 30 min.....	56
obr. 69 Průběh průhybu v čase 45 min.....	56
obr. 70 Průběh průhybu v čase 60 min.....	57
obr. 71 Průběh průhybů v modelu.....	57
obr. 72 Teplota sendvičového panelu zdola.....	59
obr. 73 Teplota sendvičového panelu shora.....	59
obr. 74 Tepelná vodivost PIR pěny [14].....	60
obr. 75 Teplota sendvičového panelu shora s tepelnou vodivostí závislou na teplotě.....	60
obr. 76 Umístění sondy pro měření deformace nad nosníkem.....	61
obr. 77 Porovnání průhybů na sendvičovém panelu nad nosníkem.....	61
obr. 78 Umístění sondy pro měření deformace na sendvičovém panel	62
obr. 79 Porovnání průhybů na sendvičovém panelu	62

Seznam tabulek

tab. 1 Tabulka rozměrů a hmotnosti sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7]	16
tab. 2 Tepelně izolační vlastnosti sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7].....	17
tab. 3 Akustické vlastnosti sendvičových panelů KINGSPAN KS 1000 RW [7].....	17
tab. 4 Požární odolnost sendvičových panelů Kingspan KS 1000 RW [7].....	18
tab. 5 Vlastnosti oceli S355.....	42
tab. 6 Vlastnosti oceli S250GD.....	43
tab. 7 Vlastnosti PIR pěny.....	45

Literatura

- [1] CIB WORKING COMMISSION W056 SANDWICH PANELS, EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK, COMMITTEE TC7, WORKING GROUP TWG 7.9 a INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND

- INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. *European recommendations on the stabilisation of steel structures by sandwich panels*. 2013. ISBN 978-90-6363-081-2.
- [2] HEDMAN-PÉTURSSON, Eva. *Column Buckling with Restraint from Sandwich Wall Elements*. B.m., 2001. Luleå University of Technology.
- [3] HAVULA, Jarmo, Markku HEINISUO a Zhongcheng MA. Numerical analysis of steel columns stabilized by sandwich panels. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*. 2017, (2).
- [4] BALÁZS IVAN. Ocelové tenkostěnné nosníky stabilizované sendvičovými panely - parametrická studie. *JUNIORSTAV*. nedatováno, **2014**.
- [5] BALÁZS, Ivan a Jindřich MELCHER. Stabilization of steel beams by sandwich panels. In: *EUROSTEEL 2014*. 2014.
- [6] COOKE, Gordon M. E. Stability of lightweight structural sandwich panels exposed to fire. *Fire and Materials* [online]. 2004, **28**(24), 299–308. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.851
- [7] KINGSPAN GROUP. *Střešní izolační panel KS100RW* [online]. 25. říjen 2018. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs-cz/produkty/izolacni-sendvicove-panely/stresni-izolacni-panely/stresni-sendvicovy-panel-ks1000-rw>
- [8] BC. FILIP ZEMAN. *Virtuální pec pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí*. 2018
- [9] ING. JIŘÍ DROZDA, ING. VÁCLAV JIRSÁK, ING. EVA MAŠOVÁ a ING. HANA HASNÍKOVÁ. *Příručka ANSYS Workbench*. B.m.: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2012
- [10] *EN 1993-1-2, Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-2: General rules -Structural fire design*. 2005.
- [11] BC. JAN PETŘÍK. *Návrh indukčního trakčního motoru 15 kW s vnějším rotorem v SW prostředí ANSYS Electronics ver. 17.0*. 2017
- [12] RADEK PELÁNEK. Modelování: obecné principy. In: . B.m.
- [13] BC. LUKÁŠ JUŘENČÁK. *Validace výsledků experimentálních zkoušek požáru ve výcvikovém zařízení Zbiroh*
- [14] ASHKAN SHOUSHARIAN MOFRAD , DARITA SHLYCHKOVA , YVONNE CIUPACK , HARTMUT PASTERNAK. *SHEAR TEST FE MODELLING OF SANDWICH PANELS SCREW JOINT IN FIRE*. 2018