ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra k134

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MODELOVÁNÍ SPOJE DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ S VLOŽENOU OCELOVOU DESKOU ZA POŽÁRU

MODELLING OF STEEL TO TIMBER JOINT OF TIMBER STUCTURES EXPOSED TO FIRE

Bc. Jaroslav Zeman

vedoucí práce Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zeman** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **438431**

Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

Studijní program: **Stavební inženýrství**

Studijní obor: **Integrální bezpečnost staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelování spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za požáru

Název diplomové práce anglicky:

Modelling of steel to timber joint of timber structures exposed to fire

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Kamila Cábová, Ph.D., katedra ocelových a dřevěných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **01.10.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Kamila Cábová, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Jiří Máca, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

S P E C I F I K A C E Z A D Á N Í

Jméno diplomanta: Jaroslav Zeman

Název diplomové práce: Modelování spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za požáru

Základní část: Modelování spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za požáru podíl: 100 %

Formulace úkolů:
Stav poznání v daném tématu
Analytický model
Numerický model konečně prvkovým softwarem
Požární zkouška svorníkového spoje

Podpis vedoucího DP:..... Datum: 1. 10. 2020

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

2. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -
-
-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

3. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -
-
-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

4. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -
-
-

Podpis konzultanta:..... Datum: .....

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. a informace jsem čerpal 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 Jihlavě dne 3.ledna 2021

Bc. Jaroslav Zeman

Poděkování

Chci poděkovat Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za odborné vedení mé práce a cenné rady, které jsem při psaní práce zužitkoval. Dále děkuji Ing. Marku Pokornému, Ph.D. a Ing. arch. Petru Hejtmánkovi, Ph.D. za rady při přípravě požární zkoušky a za pomoc při realizaci požárních zkoušek ve spolupráci s požární laboratoří na UCEEB ČVUT v Praze. A také chci poděkovat své rodině, která mě při studiu podporovala.

Obsah

Abstrakt ..... **III**
Abstract ..... **III**
Seznam použitých symbolů a zkratek ..... **IV**
1 Úvod **7**
2 Cíle práce **8**
3 Současný stav poznání **9**
3.1 Vlastnosti dřeva za zvýšené teploty 9
3.2 Posouzení spoje dle ČSN EN 1995-1-2 11
3.3 Provedené zkoušky a numerické modely 14
4 Analytický model **19**
4.1 Princip výpočtu 19
4.2 Redukce průřezu a materiálových vlastností 23
4.3 Vstupní data 25
4.4 Výsledky modelu, srovnání se zkouškami 26
4.5 Analytický model pro svorníkový spoj 27
5 Experimentální studie **29**
5.1 Experimentální zařízení 29
5.2 Zkoušený svorníkový spoj - geometrie, umístění 30
5.3 Příprava vzorků 33
5.4 Průběh zkoušky 34
5.5 Výsledky zkoušky 35
6 Numerický model **40**
6.1 ANSYS Workbench 40
6.2 Model kolíkového spoje - B 41
6.2.1 Materiálové vlastnosti 41
6.2.2 Geometrie spoje B 43
6.2.3 Teplotní zatížení 45
6.2.4 Výsledné průběhy teplot spoje B 47
6.2.5 Vyhodnocení modelu spoje B 53
6.3 Model svorníkového spoje 53
6.3.1 Materiálové vlastnosti modelu 53
6.3.2 Geometrie modelu spoje 55
6.3.3 Teplotní zatížení modelu spoje 57
6.3.4 Výsledné průběhy teplot spoje B 59
6.3.5 Vyhodnocení modelu spoje experimentu 65
7 Srovnání analytického modelu s numerickým modelem a požární zkouškou **66**
7.1 Teploty na svorníku 66
7.2 Teploty na plechu 67
7.3 Zbytkový průřez 67
7.4 Souhrnné vyhodnocení 68

8 Závěr **69**
Seznam obrázků **70**
Seznam tabulek **74**
Literatura **75**

Abstrakt

Práce je zaměřena na chování spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za požáru. Součástí práce je analytický model pro výpočet únosnosti spoje vystaveného teplotě podle normové teplotní křivky. Model je založen na metodách uvedených v ČSN EN 1995-1-1, ČSN EN 1995-1-2, a pro ocelové komponenty využívá pravidla uvedená v ČSN EN 1993-1-2. Výsledky jsou porovnány s výsledky zkoušek pěti konfigurací kolíkového spoje, převzatého z literatury. Je zhotoven numerický model spoje z literatury, zatížený normovou teplotní křivkou. V modelu je sledován vliv materiálových vlastností na výsledný průběh teplot. Pro verifikaci modelu jsou jeho výsledky porovnány s výsledky modelu z literatury. Poté byl proveden numerický model vlastního svorníkového spoje. Numerický model tohoto spoje byl zatížen teplotní křivkou získanou z požární zkoušky v požární laboratoři v UCEEB. Požární zkouška byla realizována za účelem validace numerického modelu. Výsledné teploty jsou porovnány s naměřenými teplotami termočlánků ve vzorcích.

Klíčová slova

Dřevěný spoj s ocelovou deskou; požární odolnost; normová teplotní křivka; požární zkouška; únosnost; teplotní analýza; numerický model; ANSYS Workbench

Abstract

The paper is focused on the behaviour of the steel to timber joint of timber structures exposed to fire. Part of this paper is an analytical model computing load bearing capacity of the joint exposed to the standard temperature curve. The model is based on Eurocode 5, part 1-1, with rules of Eurocode 5 part 1-2, and for steel components based on rules of Eurocode 3 part 1-2. Then, there are results of five configurations of joint, which are compared to the test results taken from the literature. A numerical model of the joint from the literature, loaded with a standard temperature curve, is made. The model is focused on the influence of material properties on the results of the temperature growth. In order to verify the model accuracy, the results of the model are compared with the model results from the literature. Then a numerical model of the bolted joint is created. The numerical model is loaded with a temperature curve obtained from a fire test executed in the fire laboratory at UCEEB. The fire test was performed to validate the numerical model. The temperature results are compared with the measured temperatures of thermocouples in the samples.

Keywords

Steel to timber joint; fire resistance; standard temperature curve; fire test; resistance; temperature analysis; numerical model; ANSYS Workbench

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

a_1	Osová vzdálenost mezi spojovacími prvky v řadě	mm
a_{fi}	Přídavná tloušťka	mm
A_m	Plocha ocelového prvku vystavená účinkům požáru	m^2
$A_{net,t}$	Čistá průřezová plocha kolmo k vláknům	mm^2
$A_{net,v}$	Čistá smyková plocha rovnoběžná se směrem vláken	mm^2
A_r	Průřezová plocha zbytkového průřezu dřeva	mm^2
c_a	Měrné teplo oceli	J/(kg·K)
d	Průměr spojovacího prvku	mm
d_{char}	Hloubka zuhelnatění dřevěného prvku	mm
$F_{ax,rk}$	Charakteristická síla pro vytažení spojovacího prvku	N
$F_{bs,Rk}$	Charakteristická únosnost při blokovém, zátkovém smyku	N
$f_{h,k}$	Charakteristická pevnost v otlačení dřevěného prvku	MPa
$f_{t,0,k}$	Charakteristická pevnost v tahu dřevěného prvku	MPa
$f_{u,k}$	Mez pevnosti spojovacího prvku	MPa
$f_{v,k}$	Charakteristická pevnost ve smyku dřevěného prvku	MPa
f_{yk}	Charakteristická mez kluzu vložené ocelové desky	MPa
$\dot{h}_{net}$	Návrhové hodnota tepelné pohltivosti	W/m^2
$\dot{h}_{net,c}$	Složka čistého konvekčního tepelného toku	W/m^2
$\dot{h}_{net,r}$	Složka čistého sálavého tepelného toku	W/m^2
h_p	Tloušťka dodatečné ochrany	mm
h_p	Výška vložené ocelové desky	mm
k	Parametr	-
k_{fi}	Parametr	-
k_{flux}	Součinitel zohledňující zvětšený tepelný tok	-
k_{sh}	Součinitel zastínění	-
l_a	Min. délka vniku spoj. prvku do nezuhelnatělého dřeva	mm
$l_{f,req}$	Délka spojovacího prvku dodatečného obložení prvku	mm

$L_{net,t}$	Čistá šířka průřezu kolmo k vláknům	mm
$L_{net,v}$	Celková čistá délka smykového lomu	mm
$M_{y,Rk}$	Charakteristický plastický moment únosnosti	Nmm
n	Počet spojovacích prvků v jedné řadě	-
n_{ef}	Účinný počet spojovacích prvků v jedné řadě	-
P	Obvod zbytkového průřezu vystavený požáru	mm
t	Čas	min
t_1	Tloušťka bočního dřevěného prvku	mm
$t_{d,fi}$	Doba požární odolnosti nechráněného spoje	min
$t_{d,fi}$	Počátek doby zuhelnatění	min
t_{ef}	Účinná výška	mm
t_p	Tloušťka vložené ocelové desky	mm
t_{req}	Požadovaná požární odolnost spoje	min
V	Objem ocelového prvku	m^3
Δt	Časový krok	min

Řecké symboly

α_c	Součinitel přestupu tepla prouděním	W/(m^2·K)
β	Rychlost zuhelnatění	mm/min
γ_M	Součinitel spolehlivosti dřeva za běžné teploty	-
$\gamma_{M,fi}$	Součinitel spolehlivosti dřeva při požáru	-
$\Delta\theta_{a,t}$	Přírůstek teploty ocelového prvku	°C
$\Delta\theta_g$	Přírůstek teploty plynu	°C
ε_f	Emisivita požáru	-
ε_m	Povrchová emisivita prvku	-
η	Převodní součinitel pro redukci únosnosti	-
η_{fi}	Redukční součinitel pro návrhové zatížení při požáru	-
θ_a	Teplota ocelového prvku	°C
θ_g	Teplota plynů v blízkosti prvku	°C
θ_m	Povrchová teplota prvku	°C
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ_a	Objemová hmotnost oceli	kg/m^3
ρ_k	Objemová hmotnost dřeva	kg/m^3
σ	Stephan-Boltzmannova konstanta	W/(m^2·K)

1 Úvod

obr. 1 Zbytkový průřez svorníkového spoje

Spoje jsou v dřevěných konstrukcích nejslabší komponentou, avšak spoje s vloženou ocelovou deskou se za běžné teploty vyznačují vyšší únosností, než spoje dřevo-dřevo. V důsledku rozsáhlé členitosti spoje je problematické stanovit přesnou dobu požární odolnosti. Únosnost nechráněného spoje ovlivňuje především redukovaná mez pevnosti svorníku zapříčiněná rychlým nárůstem teploty a dále redukovaný průřez dřevěného prvku.

V rámci studií [1] a [2] byly vyhotoveny vzorky, které byly zkoušeny za běžné teploty. Zkoušky ukázaly, že únosnost dle ČSN EN 1995-1-2 [3] je konzervativní. Vzorky o stejné konfiguraci byly podrobeny požární zkoušce podle normové teplotní křivky (ISO834) dle [4]. Jednotlivé vzorky byly během zkoušky zatěžovány konstantní silou o hodnotě 10 %, 20 % a 30 % z únosnosti vyhodnocené z testu za běžné teploty. Testy ukázaly, že při stupni využití 30 % všechny zkoušené vzorky dosahovaly vyšší požární odolnosti, než 30 minut, což odpovídá hodnotě uvedené v normě. Z jedné konfigurace dosáhl vzorek, při 10% stupni využití, požární odolnosti 90 minut. Na základě tohoto poznatku je zřejmé, že metody, uvedené v ČSN EN 1995-1-2 jsou konzervativní, a při nižším stupni využití lze dosáhnout požární odolnosti přes 30 min.

V této práci je zkoumán průběh teplot ve svorníkovém spoji. Byl vytvořen analytický model zohledňující mechanické a teplotní zatížení a numerický model řešící průběhy teplot v prvku. Výstupem analytického modelu je průběh meze únosnosti v závislosti na čase zahrnující vliv zvýšené teploty. Model je poté srovnán s výsledky již provedených testů. V rámci numerického modelu jsou řešeny dvě konfigurace spoje. První model řeší kolíkový spoj, který byl převzat z literatury. Cílem tohoto modelu je verifikovat vstupní hodnoty materiálových vlastností a přestupové konstanty teplotního zatížení porovnáním výsledků průběhu teplot s již modelovaným spojem. Po verifikaci je vytvořen model vlastního svorníkového spoje se vstupními daty modelu určeného k verifikaci. Pro validační účely byl pro model svorníkového spoje realizován experiment, ve kterém byl svorníkový spoj vystaven požárnímu zatížení. Na obr. 1 je vyobrazen zbytkový průřez po experimentu.

2 Cíle práce

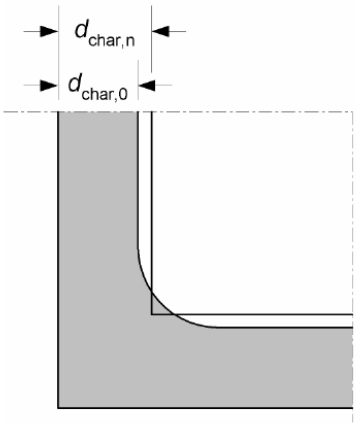
Hlavními cíli práce jsou:

1) Vytvořit analytický model svorníkového spoje dřevěných konstrukcí s vloženou ocelovou deskou za zvýšené teploty.
   - Výsledkem analytického modelu budou hodnoty únosnosti spoje a pro daný stupeň využití (požadovanou únosnost) je odhadnuta požární odolnost nechráněného spoje.
   - Stanovit v rámci analytického modelu požární odolnost dle konfigurací provedených zkoušek za běžné teploty.
   - Stanovit přesnost modelu.
2) Realizovat experiment svorníkového spoje
   - Zhotovit vzorky a umístit termočlánky
   - Provést experiment vzorků v zařízení miniFUR
   - Vyhodnotit naměřené průběhy teplot
3) Vytvořit numerický model kolíkového spoje v konečně prvkovém softwaru
4) Vytvořit numerický model svorníkového spoje z experimentu a aplikovat zatížení

3 Současný stav poznání

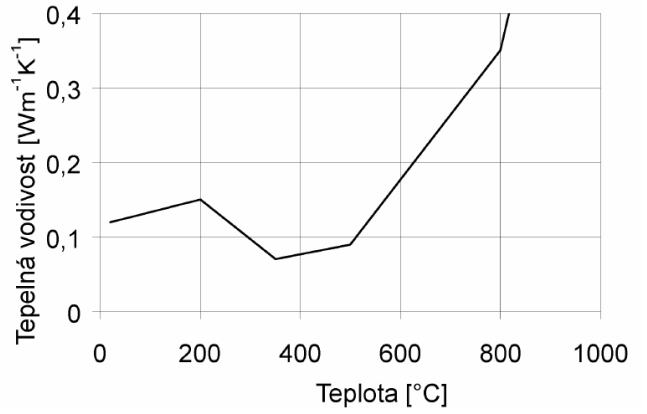
3.1 Vlastnosti dřeva za zvýšené teploty

Dřevo je heterogenní anizotropní materiál. Jeho chování je popsáno v článku [5]. Vlastnosti dřeva jsou ovlivňovány obsahem vody ve dřevě a zvyšující se teplotou. Při teplotě v rozmezí 80 °C až 150 °C ze dřeva uniká vodní pára a uvolňuje se chemicky vázaná voda trhlinami, rohy a spoji. Teplota dřeva zůstává konstantní, dokud se ze dřeva vypařuje vodní pára. Poté se při teplotě v rozmezí 150 °C až 200 °C začínají tvořit produkty pyrolýzy, kterými jsou povrchové plyny přibližně ze 70 % CO_2 a ze 30 % hořlavého CO. Do teploty 275 °C probíhá pyrolýza pomalu. Poté nastávají silně exotermické reakce spolu s rychlou tvorbou lehce zápalné směsi uhlovodíků. Při teplotách 400 °C vzniká největší množství zápalné směsi. Vzniká zuhelnatělá vrstva a tvorba směsi plynů v této vrstvě postupně klesá. Tento proces však nekončí, a tyto procesy pokračují hlouběji do dřevěného průřezu. Na prohřívání dřeva má vliv jeho povrchová úprava. Hoblovaný povrch dřeva bez prasklin se bude prohřívat pomaleji z důvodu lepšího proudění vzduchu podél povrchu než u dřeva nehoblovaného, kdy do nedokonalého povrchu vnikají horké plyny. Stejný vliv má také ostrost rohů, a také zdali je ohřívána plocha kolmá k vláknům (řezná), nebo plocha rovnoběžná s vlákny. Při teplotě dřeva do 300 °C se předpokládá pevnost a tuhost dřeva za stejnou jako za běžné teploty. Poloha izotermy 300 °C stanovuje hloubku zuhelnatění. Hloubka zuhelnatění je definována rychlostí odhořívání a časem vystavenou normovému požáru. Rozlišuje se jednorozměrová hloubka zuhelnatění a nominální hloubka zuhelnatění, která zohledňuje rychlejší odhořívání rohů, a stanovuje tak ekvivalentní hranatý průřez, viz obr. 2.



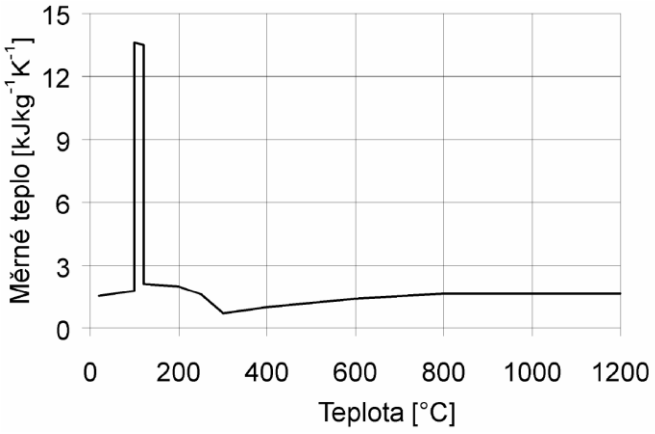
obr. 2 Jednorozměrová hloubka zuhelnatění:
$d_{char,0}$ a nominální hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$ [4]

Dřevo má výrazně nižší tepelnou vodivost než ocel. Má tak pozitivní vliv na vloženou ocelovou desku, pro kterou má funkci tepelného izolantu. Tepelná vodivost se s uvolňováním chemicky vázané vody zvyšuje. Odpařováním z dřevěného průřezu se následně snižuje. Zuhelnatělá vrstva má izolační schopnosti, díky tomu je tepelná vodivost výrazně nižší a pod touto vrstvou dochází k pomalejšímu ohřívání dřeva, viz obr. 3.



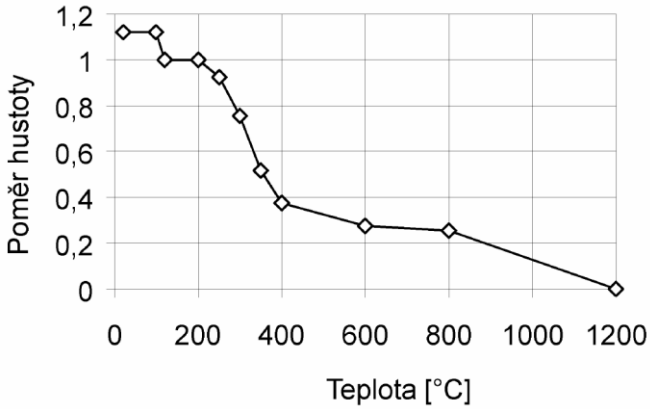
obr. 3 Závislost tepelné vodivosti na teplotě [4]

Vlhkost dřeva a chemicky vázaná voda je potenciálem pro měrnou tepelnou kapacitu. V obr. 4 je vidět vliv vlhkosti a chemicky vázané vody na měrné teplo.



obr. 4 Závislost měrného tepla na teplotě [4]

Hustota dřeva je do 100 °C konstantní. Odpařováním vody se hustota snižuje postupně rozpadem dřeva v důsledku pyrolýzy a procesu hoření až po úplnou přeměnu dřeva na teplo. Průběh poměru hustoty za požáru ku hustotě za běžné teploty v závislosti na teplotě je znázorněn na obr. 5.



obr. 5 Poměr hustoty v závislosti na teplotě [4]

3.2 Posouzení spoje dle ČSN EN 1995-1-2

Zjednodušená pravidla uvádějí pro nechráněné spoje, vyhovující požadavkům dle ČSN EN 1995-1-1 [6] za běžné teploty, přímé hodnoty požární odolnosti a opatření dosažení požární odolnosti uvedené v tab. 1. Tuto požární odolnost lze navýšit až na 30 minut zesílením průřezu o rozměr a_{fi}, který je uveden ve vztahu (1). Zejména jde o zvětšení šířky/výšky prvků, tloušťky průřezů, zvětšení vzdálenosti spojovacích komponent od kraje, viz obr. 6. Podmínkou je, že nesmí vyčnívat spojovací prostředky, jako jsou svorníky, kolíky, hřebíky a jiné.

tab. 1 Požární odolnost nechráněných spojů [3]

Typ spojovacího prvku	**Doba požární odolnosti $t_{d,fi}$ [min]**	**Opatření***
Hřebíky	15	d ≥ 2,8 mm
Vruty	15	d ≥ 3,5 mm
Svorníky	15	t_1 ≥ 45 mm
Kolíky	20	t_1 ≥ 45 mm
Hmoždíky	15	t_1 ≥ 45 mm
*d - průměr spojovacího prvku, t_1 - tloušťka bočního prvku		

Přídavná tloušťka a_{fi}:

$$a_{fi} = \beta_n \, k_{flux} \, (t_{req} - t_{d,fi}) \qquad (1)$$

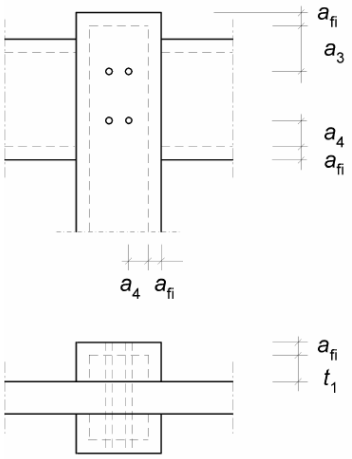
kde:

β_n je rychlost zuhelnatění, která je pro lepené lamelové dřevo s hustotou ≥ 290 kg/m^3 rovna 0,7 mm/min a pro rostlé dřevo s hustotou ≥ 290 kg/m^3 rovna 0,8 mm/min (jehličnaté dřeviny a buk)

k_{flux} je součinitel zohledňující zvětšený tepelný tok skrz spojovací prostředek, který je roven 1,5

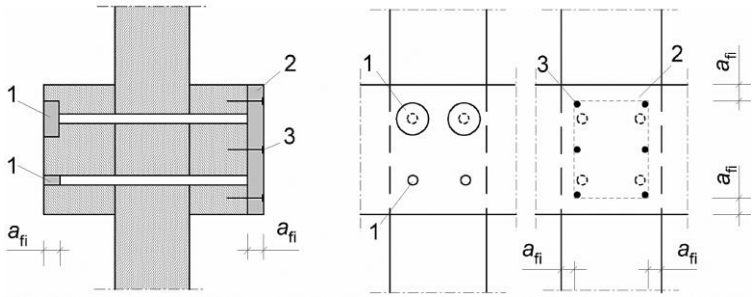
t_{req} je požadovaná požární odolnost spoje v minutách

$t_{d,fi}$ je doba požární odolnosti nechráněného spoje podle tab. 1



obr. 6 Zvětšení průřezu o přídavnou tloušťku a_{fi} [3]

Ochranu spoje lze provést zátkováním kolíku/svorníku o tloušťce a_{fi}, či dodatečným obložením kolíku/svorníku deskou v tloušťce a_{fi}, viz obr. 7. Dodatečné obložení se provádí deskami na bázi dřeva nebo sádrokartonovými deskami. Pro desky na bázi dřeva a sádrokarton typu A nebo H musí čas do počátku zuhelnatění t_{ch} splňovat podmínku uvedenou ve vztahu (2). Pro sádrokartonové desky typu F musí čas do počátku zuhelnatění t_{ch} splňovat podmínku (3). Délka připevňovacího prvku a rozmístění musí být navržena tak, aby dodatečné opláštění chránilo prvek do doby počátku zuhelnatění t_{ch} pro desky na bázi dřeva a sádrokartonové desky typu A nebo H. Dodatečné opláštění pomocí sádrokartonové desky typu F nesmí odpadnout po požadovanou dobu požární odolnosti t_{req}.



obr. 7 Ochrana spoje:
1- zátkováním; 2- dodatečným opláštěním; 3- spojovací prvek dodatečného opláštění [3]

Počátek doby zuhelnatění musí být větší:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0{,}5\, t_{d,fi} \qquad (2)$$

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1{,}2\, t_{d,fi} \qquad (3)$$

kde:

t_{req} je požadovaná požární odolnost spoje v minutách
$t_{d,fi}$ je doba požární odolnosti nechráněného spoje podle tab. 1

Pro desky na bázi dřeva se doba počátku zuhelnatění t_{ch} určí:

$$t_{ch} = h_p / \beta_0 \qquad (4)$$

Pro sádrokartonové desky typu A,F nebo H se doba počátku zuhelnatění t_{ch} vypočítá:

$$t_{ch} = 2{,}8\, h_p - 23 \qquad (5)$$

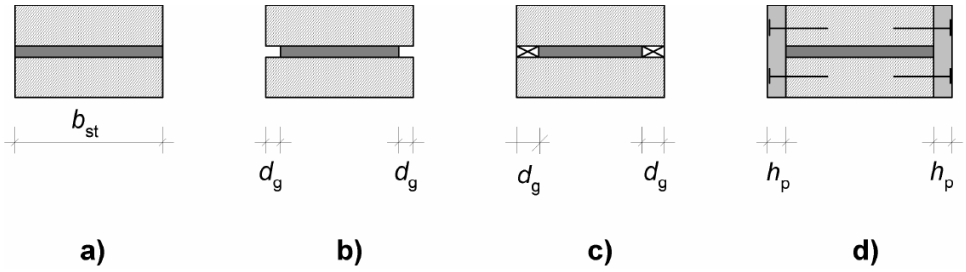
Délka spojovacího prvku dodatečného obložení prvku $l_{f,req}$ se stanoví ze vztahu:

$$l_{f,req} = h_p + d_{char,0} + l_a \qquad (6)$$

kde:

h_p je tloušťka dodatečné ochrany v mm
β_0 je rychlost zuhelnatění, která je pro dřevěné obložení rovna 0,9 mm/min
$d_{char,0}$ je hloubka zuhelnatění dřevěného prvku v mm
l_a je minimální délka vniku spoj. prvku do nezuhelnatělého dřeva, která je nejméně 10 mm.

Ochranu ocelové desky lze provést pomocí dutiny, tj. desky nižší než je dřevěný průřez. Dále lze provést ochranu vlepením zátky nebo dodatečným obložením, viz obr. 8. Ochranu dutinou lze po dobu požární odolnosti 30 minut uvažovat s hloubkou dutiny d_g větší než 20 mm a po dobu požární odolnosti 60 minut s hloubkou d_g vetší než 60 mm. Ochrany desky vlepením zátky nebo dodatečným obložením lze dosáhnout pro dobu požární odolnosti 30 minut tloušťkou pásku d_g nebo tloušťkou obložení h_p větší než 10 mm a pro dobu požární odolnosti 60 minut tloušťkou pásku d_g nebo tloušťkou obložení h_p větší než 30 mm.



obr. 8 Ochrana okrajů ocelové desky:
a) nechráněná, b) chráněná dutinami, c) chráněná vlepenými pásky, d) chráněná obložením [3]

Pro spoje s vnitřní ocelovou deskou s nechráněnými okraji musí výška ocelové desky b_{st} pro požární odolnost R 30 a R60 splňovat podmínky uvedené v tab. 2.

tab. 2 Šířky ocelových desek s nechráněnými okraji po dobu požární odolnosti [3]

		b_{st}
Nechráněné okraje všeobecně	R 30	≥ 200 mm
	R 60	≥ 280 mm
Nechráněné okraje na jedné nebo dvou stranách	R 30	≥ 120 mm
	R 60	≥ 280 mm

Pokročilým posouzením spoje na účinky požáru je metoda redukovaného zatížení. V ní je charakteristická příčná únosnost $F_{v,Rk}$ za běžné teploty redukována převodním součinitelem η, vypočteného:

$$\eta = e^{-kt_{d,fi}} \qquad (7)$$

kde:

k je parametr, který je pro kolíky a svorníky ≥ 12 mm roven 0,085 po dobu platnosti tohoto parametru 30 minut

$t_{d,fi}$ je návrhová doba požární odolnosti nechráněného spoje v minutách

Výsledná návrhová požární odolnost nechráněného spoje $t_{d,fi}$ se vypočte:

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} ln \frac{\eta_{fi}\gamma_{M,fi}}{\gamma_M k_{fi}} \qquad (8)$$

kde:

k je parametr, který je pro kolíky a svorníky ≥ 12 mm roven 0,085 po dobu platnosti tohoto parametru 30 minut

η_{fi} je redukční součinitel pro návrhové zatížení při požáru

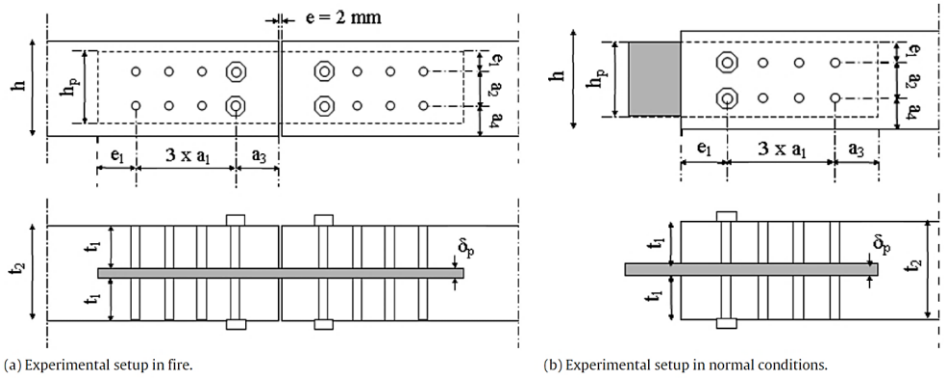
$\gamma_{M,fi}$ je dílčí součinitel spolehlivosti dřeva při požáru, roven 1,0

γ_M je dílčí součinitel spolehlivosti dřeva za běžné teploty, pro spoje roven 1,3

k_{fi} je parametr, který je pro spoje se spojovacími prostředky ve střihu s bočními prvky ze dřeva roven 1,15

3.3 Provedené zkoušky a numerické modely

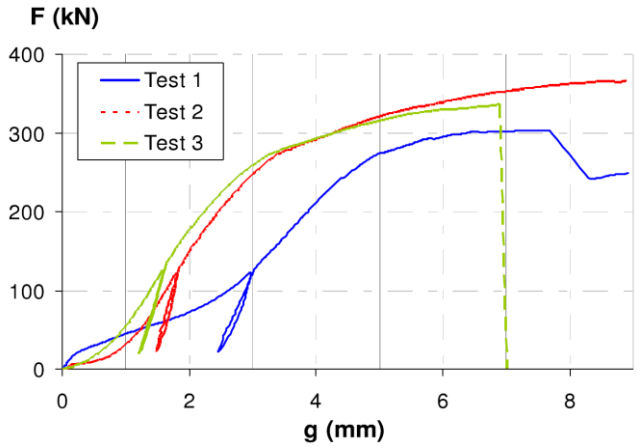
Zdrojem dat pro ověření analytického modelu této práce je studie termo-mechanických vlastností spoje s vloženou ocelovou deskou vystavené účinkům požáru [1] a studie termomechanická analýza a požární odolnost dřevěného spoje [2]. V těchto studiích jsou uvedeny data konfigurací spojů (uvedené rovněž v kapitole 3.3 této práce) a dále jsou uvedeny výsledky z provedených zkoušek dřevěných spojů s vloženou ocelovou deskou [7]. Pro validaci numerických modelů byly zrealizovány zkoušky několika konfigurací spojů v tahu za běžné teploty a za zvýšené teploty podle normové teplotní křivky. Geometrie spoje na obr. 9 spočívala v sestavě tří kolíků a jednoho svorníku ve dvou řadách osově souměrného spoje s různou konfigurací rozměrů jak průřezu dřevěného prvku, tak kolíků/svorníků a vložené desky. Byly také rozhodující vzájemné vzdálenosti mezi spojovacími prvky a krajem dřevěného průřezu. Rozměry konfigurací jsou uvedeny v tab. 3. Za běžné teploty byly sledovány deformace spoje během zatěžování a výsledná zatěžovací síla při dosažení meze únosnosti. Průběh deformace při zvyšujícím se zatížením konfigurace A´ je ukázán na obr. 10. Výsledky sil testovaných konfigurací jsou uvedené v tab. 4. Vzorky o stejných konfiguracích byly vystaveny účinkům požáru a zatíženy konstantními silami o hodnotě 10 %, 20 % a 30 % meze únosnosti za běžné teploty. Hlavní sledovanou hodnotou byla deformace v čase a následně čas kdy dojde k porušení spoje, a tím stanovení požární odolnosti dané konfigurace spoje s určitým stupněm využití. Průběh deformace konfigurace A´ je znázorněn na obr. 11. Výsledné požární odolnosti testovaných konfigurací jsou uvedeny v tab. 5.



obr. 9 Geometrická konfigurace spoje s vloženou ocelovou deskou [1]

tab. 3 Rozměry konfigurací testovaných spojů [1]

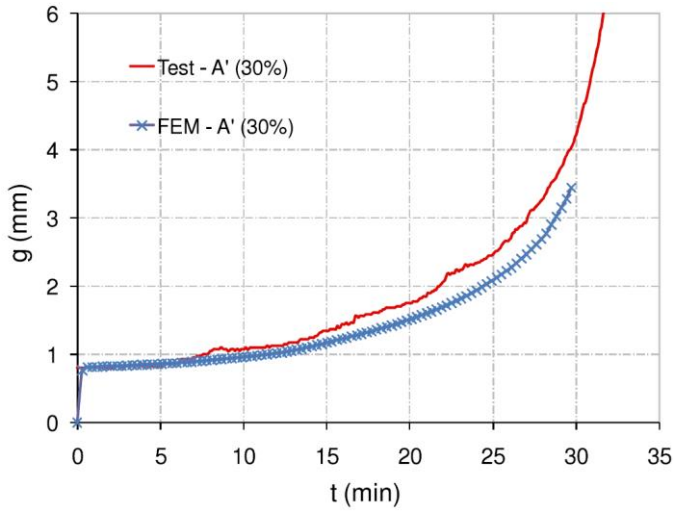
Ozn.	d mm	t_1 mm	δ_p mm	h mm	h_p mm	a_1 mm	a_2 mm	a_3 mm	a_4 mm	e_1 mm
A´	16	76	8	252	114	112	64	159	95	25
A´13d	16	76	8	254	114	208	64	255	95	25
B´	20	75	10	292	143	140	80	167	107	32
C´	12	77	6	212	87	84	48	131	83	20
D´	20	100	10	288	143	140	80	187	107	32



obr. 10 Deformace spoje A´ za běžné teploty [1]

tab. 4 Dosažené únosnosti testovaných vzorků a vypočtené meze únosnosti [1]

Označení	$F_{u,test}$ [kN]	ČSN EN 1995-1-1 [kN]
A´	335,1	271,0
A´13d	374,0	316,4
B´	456,3	339,7
C´	198,4	211,3
D´	450,0	415,2

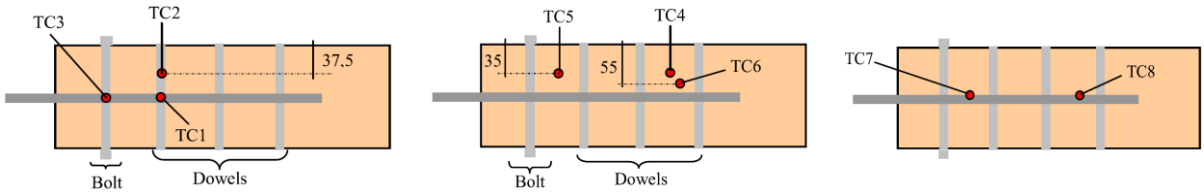


obr. 11 Deformace spoje A´ vystavené účinkům požáru [1]

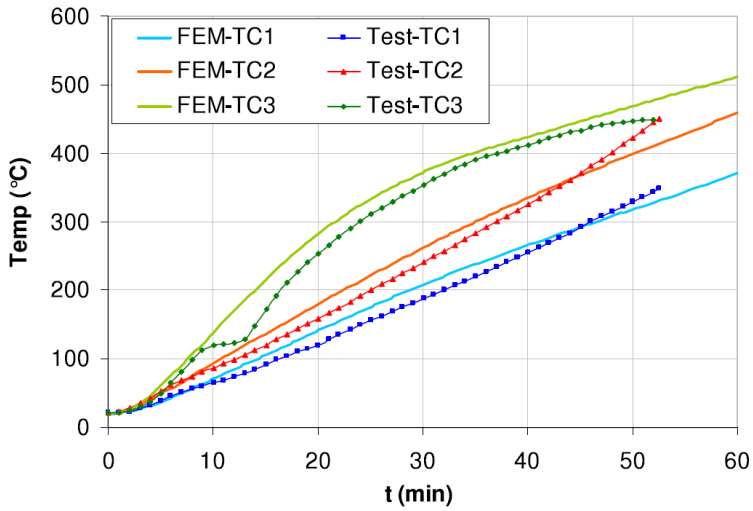
tab. 5 Výsledné požární odolnosti jednotlivých konfigurací při stupni využití η [1]

Označení	$t_{fi,test}$ [min]		
	η = 10 %	η = 20 %	η = 30 %
A´	55,5	41	36
A´13d	-	-	36
B´	52	-	37
C´	54	-	39
D´	90	-	45

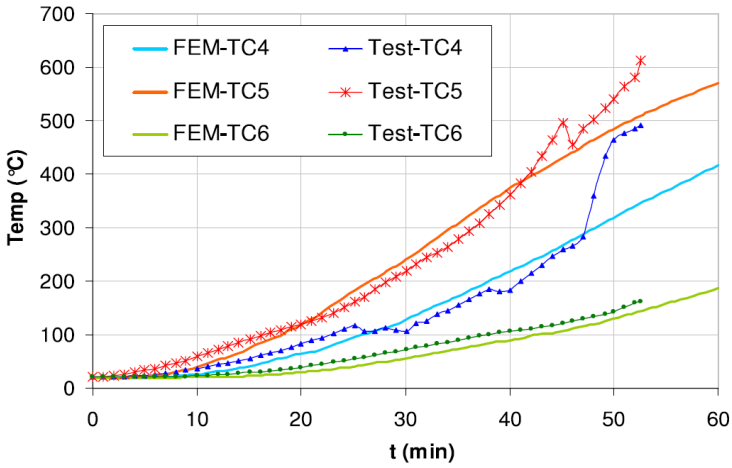
Na vzorcích byly instalovány termočlánky měřící teplotu na kolíku/svorníku, vložené desce a několik termočlánků v dřevěném průřezu v různých hloubkách. Jejich rozmístění je uvedeno na obr. 12. Ve studii [1] je vypracován 3D numerický model simulující termo-mechanické chování spoje zatíženého tahovou silou. Model byl validován na základě zmiňovaných zkoušek se střední odchylkou 14 %. Výsledky z numerického modelu vždy vycházely nižší než z provedených zkoušek. Na obr. 13, obr. 14 a obr. 15 jsou uvedeny průběhy teplot termočlánků na jednotlivých komponentách ve srovnání s numerickým modelem. Ve všech testovaných prvků došlo k porušení dřevěných prvků blokovým smykem, ačkoliv byly kolíky/svorníky značně deformovány.



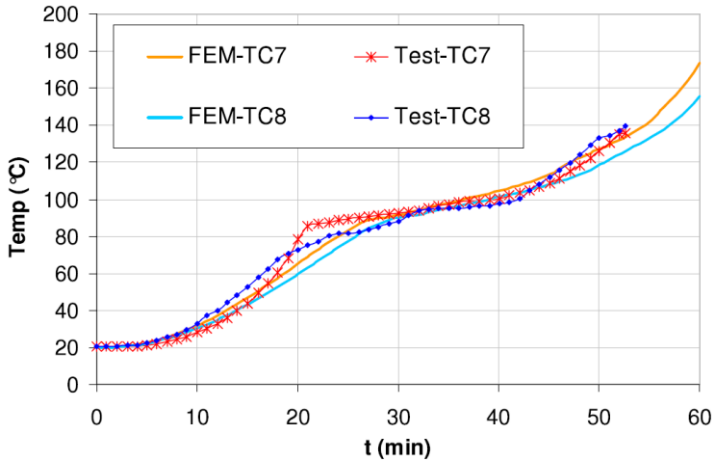
obr. 12 Poloha termočlánků ve spoji;
TC1, TC2 a TC3 - termočlánky na svorníku/kolíku; TC4, TC5 a TC6 - termočlánky ve dřevěném průřezu; TC7 a TC8 - termočlánky na vložené desce [1].



obr. 13 Průběhy teplot z termočlánků TC1, TC2 a TC3 [1].



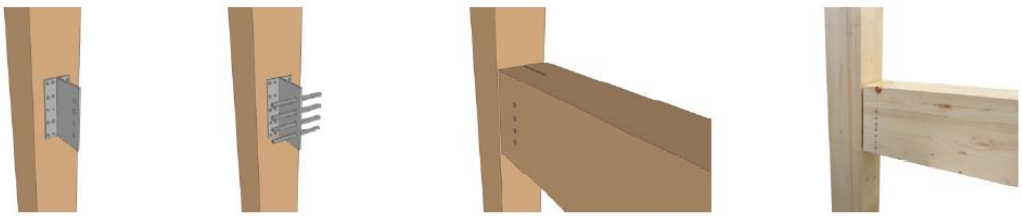
obr. 14 Průběhy teplot z termočlánků TC4, TC5 a TC6 [1].



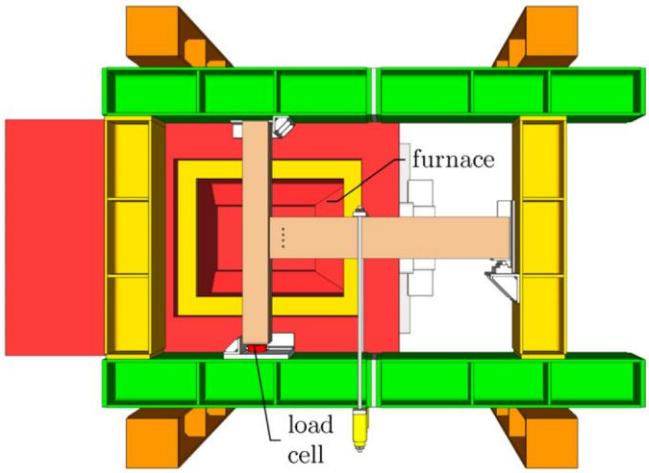
obr. 15 Průběhy teplot z termočlánků TC7 a TC8 [1].

Bylo provedeno několik dalších studií a zkoušek v této problematice.

Ve studii [8] a studii [9] se autoři zabývali požární odolností spoje průvlaku se sloupem s vloženou ocelovou deskou. Typický tvar spoje je znázorněn na obr. 16. Několik vzorků spoje byly zkoušené za běžné teploty a poté vzorky o stejné konfiguraci byly vystaveny účinkům normové teplotní křivky. Spoje byly současně zatížené konstantní silou odpovídající 30 % únosnosti za běžné teploty. Schéma zatěžování je znázorněno na obr. 17. Celkem bylo zkouškám podrobeno 11 konfigurací spoje. Výsledkem toho jsou požární odolnosti získané z testů. Ty se pohybují v rozmezí 33 až 83 minut. Nejčastěji docházelo k porušení odhořením dřeva mezi kolíky. Rozměry konfigurací a jejich výsledné konfigurace jsou podrobněji popsané ve zmiňované studii.

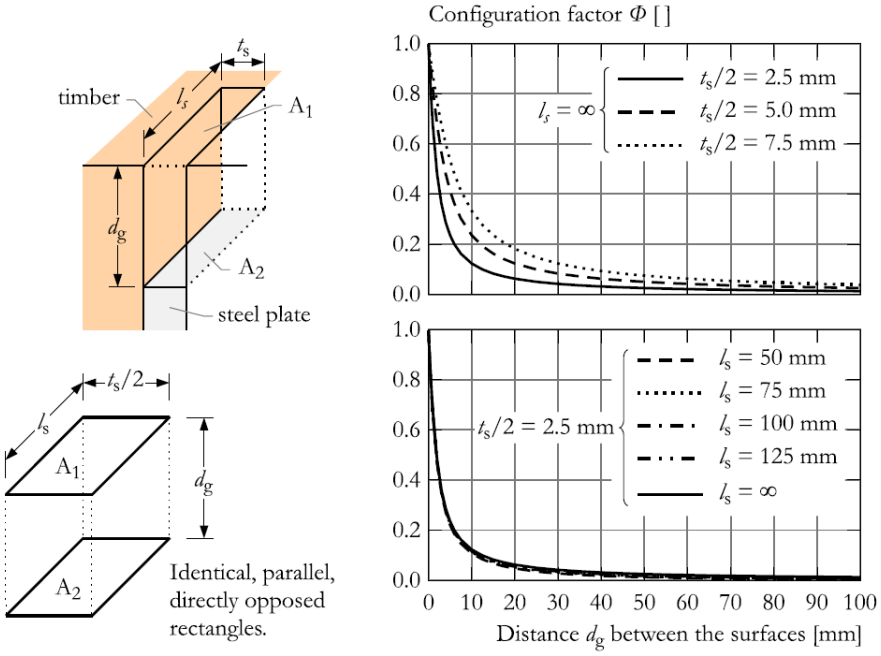


obr. 16 Geometrie testovaného spoje sloup-průvlak [8]



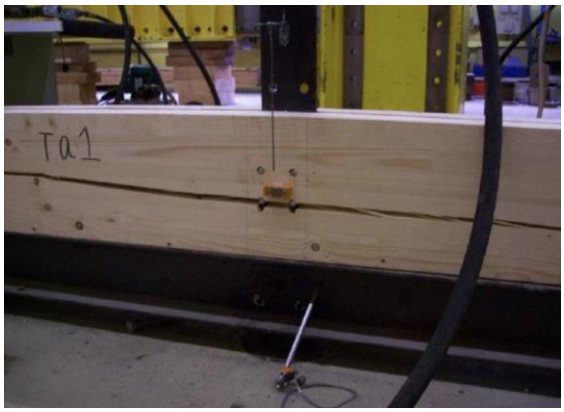
obr. 17 Schéma provedené zkoušky [8]

V této studii se autoři také zabývali vlivem rozmístění spojovacích prostředků a hloubkou zuhelnatění mezi kolíky. Uvádějí také vliv polohového faktoru na hloubce zapuštění vložené desky do dřevěného průřezu. Vliv polohového faktoru na vzdálenosti je započítán v analytickém modelu uvedeném v této práci. Jeho průběh je znázorněn na obr. 18.



obr. 18 Polohový faktor vložené ocelové desky závislý na hloubce zapuštění [9]

V další studii [10] jsou uvedeny zkoušky dvou konfigurací spoje zatíženého kolmo k vláknům. Jako u předchozích zmiňovaných zkoušek byly vzorky zkoušeny za běžné teploty, viz obr. 19. Z výsledků zkoušek byly stanoveny zatěžovací síly se stupněm využití 10 %, 30 % a 45 % únosnosti pro požární zkoušky. Sledována byla deformace spoje a následné porušení v čase, z čehož byla poté stanovena požární odolnost. Pro další využití v numerických modelech byly ve vzorcích instalovány termočlánky. Požární odolnost se u testovaných vzorků pohybovala v rozmezí 48 až 71 minut. K porušení došlo podélnou prasklinou v jedné linii kolíků. Konfigurace spojů a výsledky testů za běžné teploty a za požáru jsou uvedeny ve zmiňované studii.

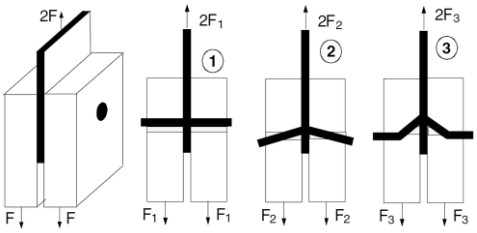


obr. 19 Porušený vzorek po zkoušce za běžné teploty [10]

4 Analytický model

4.1 Princip výpočtu

Analytický model vychází z principů posouzení spoje za běžné teploty dle ČSN EN 1995-1-1 [6], kde je únosnost kolíkového/svorníkového spoje počítána ze tří možných stavů porušení znázorněných na obr. 20. První stav porušení je způsoben otlačením dřevěného průřezu pod kolíkem/svorníkem, viz vzorec (9). V případě druhého stavu nastává porušení v důsledku otlačení dřevěného průřezu a vzniku plastického kloubu kolíku/svorníku v úrovni vložené spojovací desky, viz vzorec (10). Ve třetím stavu porušení dochází ke vzniku plastických kloubů na kolíku/svorníku v úrovni spojovací vložené desky a v oblasti dřevěného průřezu, viz vzorec (11). V průřezu může nastat také porušení blokovým zátkovým smykem, viz níže. Za zvýšené teploty má na výslednou únosnost také vliv únosnost oslabeného průřezu spojovací desky, viz vzorec (12). Pro výpočet únosnosti je uvažováno vystavení požáru dle normové teplotní křivky (ISO834) dle ČSN EN 1991-1-2 [4]. Jsou zde redukovány materiálové charakteristiky jako jsou mez pevnosti svorníku a mez kluzu spojovací desky. Současně jsou redukovány geometrie průřezu a materiálové charakteristiky dřeva za zvýšené teploty.



obr. 20 Stavy porušení;
1- porušení otlačením, 2- porušení otlačením v kombinaci vzniku plastického kloubu kolíku, 3- porušení vznikem plastických kloubů kolíku [6]

Pro spoje s tenkou ocelovou dekou se vypočítá mezní hodnota únosnosti, které je dosaženo vlivem otlačení dle vzorce:

$$F_{v,Rk,f} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \qquad (9)$$

kde:

$f_{h,1,k}$ je charakteristická pevnost v otlačení dřevěného prvku v MPa

t_1 je tloušťka bočního dřevěného prvku v mm

d je průměr spojovacího prvku v mm

Mez únosnosti dosažená vlivem otlačení a vzniku plastického kloubu se pro desky s tenkou ocelovou deskou vypočte dle vzorce:

$$F_{v,Rk,g} = f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \qquad (10)$$

kde:

$f_{h,1,k}$ je charakteristická pevnost v otlačení dřevěného prvku v MPa

t_1 je tloušťka bočního dřevěného prvku v mm

d je průměr spojovacího prvku v mm

$M_{y,Rk}$ je charakteristický plastický moment únosnosti v Nmm

$F_{ax,rk}$ je charakteristická síla pro vytažení spojovacího prvku v N

Mez únosnost dosažena vlivem vzniku plastických kloubů na kolíku/svorníku se vypočte:

$$F_{v,Rk,h} = 2{,}3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \qquad (11)$$

kde:

$f_{h,1,k}$ je charakteristická pevnost v otlačení dřevěného prvku v MPa.

d je průměr spojovacího prvku v mm.

$M_{y,Rk}$ je charakteristický plastický moment únosnosti v Nmm.

$F_{ax,rk}$ je charakteristická síla pro vytažení spojovacího prvku v N.

Únosnost $F_{ax,Rk}$ při vytržení spojovacího prvku ze dřeva je při výpočtech zanedbána.

Plastický moment únosnosti $M_{y,Rk}$ se pro kolíkové/svorníkové spoje vypočítá:

$$M_{y,Rk} = 0{,}3 f_{u,k} d^{2,6} \qquad (12)$$

kde:

$f_{u,k}$ je mez pevnosti spojovacího prvku v MPa

d je průměr spojovacího prvku v mm

Charakteristická pevnost otlačení dřeva rovnoběžně s vlákny pro kolíkové/svorníkové spoje s průměrem d do 30 mm se určí ze vzorce:

$$f_{h,0,k} = 0{,}082\,(1-0{,}01d)\rho_k \qquad (13)$$

kde:

ρ_k je objemová hmotnost dřeva kg/m^3

d je průměr spojovacího prvku v mm

Únosností je minimální hodnota ze tří stavů porušení vynásobená počtem střihů kolíků/svorníků, počtem řad a účinným počtem kolíků/svorníků jedné řady. Účinný počet svorníků jedné řady n_{ef} je:

$$n_{ef} = min\,\{n;\, n^{0,9}\sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}}\} \qquad (14)$$

kde:

n je počet spojovacích prvků v jedné řadě

a_1 je osová vzdálenost mezi spojovacími prvky v řadě v mm

d je průměr spojovacího prvku v mm

Únosnost vložené spojovací desky se vypočítá z oslabeného průřezu otvory pro kolíky/svorníky:

$$F_{v,Rk,deska} = f_{y,k}\,.\,t_p\,.\,(h_p - n\,.\,d) \qquad (15)$$

kde:

f_{yk} je charakteristická mez kluzu vložené ocelové desky v MPa

t_p je tloušťka vložené ocelové desky v mm

h_p je výška vložené ocelové desky v mm

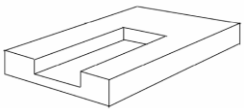
n je počet řad spojovacích prvků

d je průměr spojovacího prvku v mm

Porušení blokovým a zátkovým smykem:

Porušení je způsobeno namáháním skupiny kolíků/svorníků konce dřevěného prvku. Dojde k lomu po obvodu plochy spojovacích prostředků, znázorněné na obr. 21 - blokový smyk a na obr. 22 - zátkový smyk.

obr. 21 Porušení blokovým smykem [6]



obr. 22 Porušení zátkovým smykem [6]

Charakteristická únosnost při blokovém či zátkovém smyku $F_{bs,Rk}$ *se vypočte:*

$$F_{bs,Rk} = max\{1{,}5A_{net,t}f_{t,0,k};\ 0{,}7A_{net,v}f_{v,k}\} \quad (16)$$

Plocha $A_{net,t}$ se vypočítá:

$$A_{net,t} = L_{net,t} \cdot t_1 \quad (17)$$

Pro způsob porušení otlačením se plocha $A_{net,v}$ vypočítá:

$$A_{net,v} = L_{net,v} \cdot t_1 \quad (18)$$

Pro způsob porušení otlačením se vznikem plastického kloubu kolíku/svorníku a s porušením vznikem plastických kloubů kolíku/svorníku se plocha $A_{net,v}$ vypočítá:

$$A_{net,v} = L_{net,v}/2 \cdot (L_{net,t} + 2t_{ef}) \quad (19)$$

Účinná výška t_{ef} se pro způsob porušení otlačením a vznikem plastického kloubu vypočítá:

$$t_{ef} = t_1\left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1\right] \quad (20)$$

Účinná výška t_{ef} se pro způsob porušení vznikem plastických kloubů vypočítá:

$$t_{ef} = 2\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k}d}} \quad (21)$$

kde:

$F_{bs,Rk}$ je charakteristická únosnost při blokovém nebo zátkovém smyku v N
$A_{net,t}$ je čistá průřezová plocha kolmo k vláknům v mm^2
$A_{net,v}$ je čistá smyková plocha rovnoběžná se směrem vláken v mm^2
$L_{net,t}$ je čistá šířka průřezu kolmo k vláknům v mm
$L_{net,v}$ je celková čistá délka smykového lomu v mm
t_{ef} je účinná výška závislá na způsobu porušení spojovacího prostředku v mm
t_1 je tloušťka bočního dřevěného prvku v mm
$M_{y,Rk}$ je charakteristický plastický moment únosnosti v Nmm
d je průměr spojovacího prvku v mm
$f_{t,0,k}$ je charakteristická pevnost v tahu dřevěného prvku v MPa
$f_{v,k}$ je charakteristická pevnost ve smyku dřevěného prvku v MPa
$f_{h,k}$ je charakteristická pevnost v otlačení dřevěného prvku v MPa

Výsledná únosnost je minimální hodnotou únosnosti ze tří stavů porušení (otlačením, otlačením + vznikem plastického kloubu kolíku/svorníku, vznikem plastických kloubů kolíku/svorníku), únosnosti vložené desky a únosnosti při blokovém/zátkovém porušení.

4.2 Redukce průřezu a materiálových vlastností

Spoj je posuzován na účinky požáru podle zatížení normové teplotní křivky (22) dle ČSN EN 1991-1-2 [4]. Dřevěný průřez je v důsledku účinků požáru redukován tloušťkou zuhelnatění $d_{char,n}$ (23) a $d_{char,0}$ (24). Materiálové vlastnosti dřeva jsou redukovány metodou redukovaných vlastností dle ČSN EN 1995-1-2 [3]. Redukční součinitel pevnosti v tlaku $k_{mod,fi}$ se poté získá z obvodu vystaveného požáru a plochy zbytkového průřezu (25).

$$\Delta\theta_g = 345\log(8t + 1) \tag{22}$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \tag{23}$$

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \tag{24}$$

$$k_{mod,fi} = 1{,}0 - (1/125) \cdot (P/A_r) \tag{25}$$

kde:

$\Delta\theta_g$ je přírůstek teploty plynu podle normové teplotní křivky ve °C

t je čas v minutách

β_n je rychlost zuhelnatění, která je pro lepené lamelové dřevo s hustotou ≥ 290 kg/m^3 rovna 0,7 mm/min a pro rostlé dřevo s hustotou ≥ 290 kg/m^3 rovna 0,8 mm/min (jehličnaté dřeviny a buk)

β_0 je rychlost zuhelnatění, která je pro dřevěné obložení s tl. desky 20 mm a hustotou 450 kg/m^3 rovna 0,9 mm/min

P je obvod zbytkového průřezu vystavený požáru v mm

A_r je průřezová plocha zbytkového průřezu dřeva v mm^2

Vlastnosti ocelových prvků za zvýšené teploty jsou redukovány dle normy ČSN EN 1993-1-2 [11]. Charakteristické vlastnosti jako je mez kluzu, mez pevnosti se se zvýšením teploty snižují, viz obr. 23. Vývoj teplot ocelového prvku je stanoven dle přírůstkové metody (26).

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot (A_m/V) / (c_a \cdot \rho_a) \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \tag{26}$$

kde:

$\Delta\theta_{a,t}$ je přírůstek teploty ocelového prvku ve °C

k_{sh} je součinitel zastínění roven 1,0

A_m je plocha ocelového prvku vystavená účinkům požáru v mm^2

V je objem ocelového prvku v mm^3

c_a je měrné teplo oceli v J/kgK

ρ_a je objemová hmotnost oceli rovna 7 850 kg/m^3

$\dot{h}_{net}$ je návrhové hodnoty tepelné pohltivosti na jednotku plochy ve W/m^2

Δt je časový krok v minutách

Měrné teplo oceli c_a se se zvyšující teplotou mění následovně:

pro 20 °C ≤ Θ_a < 600 °C

$$c_a = 425 + 7{,}73 \times 10^{-1}\,\theta_a - 1{,}69 \times 10^{-3}\,\theta_a^2 + 2{,}22 \times 10^{-6}\,\theta_a^3 \text{ J/kgK} \qquad (27)$$

pro 600 °C ≤ Θ_a < 735 °C

$$c_a = 666 + 13\,002/(738 - \theta_a) \text{ J/kgK} \qquad (28)$$

pro 735 °C ≤ Θ_a < 900 °C

$$c_a = 545 + 17\,820/(\theta_a - 731) \text{ J/kgK} \qquad (29)$$

pro 900 °C ≤ Θ_a ≤ 1200 °C

$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \qquad (30)$$

kde:

θ_a je teplota ocelového prvku ve °C

Výpočet návrhové hodnoty tepelné pohltivosti na jednotku plochy $\dot{h}_{net}$ se vypočte dle [4]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \qquad (31)$$

kde:

$\dot{h}_{net,c}$ je složka čistého konvekčního tepelného toku ve W/m^2

$\dot{h}_{net,r}$ je složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy ve W/m^2

Složka čistého konvekčního tepelného toku $\dot{h}_{net,c}$ se vypočte:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c\,(\theta_g - \theta_m) \qquad (32)$$

kde:

α_c je součinitel přestupu tepla prouděním ve W/m^{2}K, který je pro normovou teplotní křivku roven 25 W/m^{2}K

θ_g je teplota plynů v blízkosti prvku ve °C

θ_m je povrchová teplota prvku ve °C

Složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy $\dot{h}_{net,r}$ se vypočte:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \,.\, \varepsilon_m \,.\, \varepsilon_f \,.\, \sigma\,[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \qquad (33)$$

kde:

Φ je polohový faktor

ε_m je povrchová emisivita prvku, která je pro ocel rovna 0,7

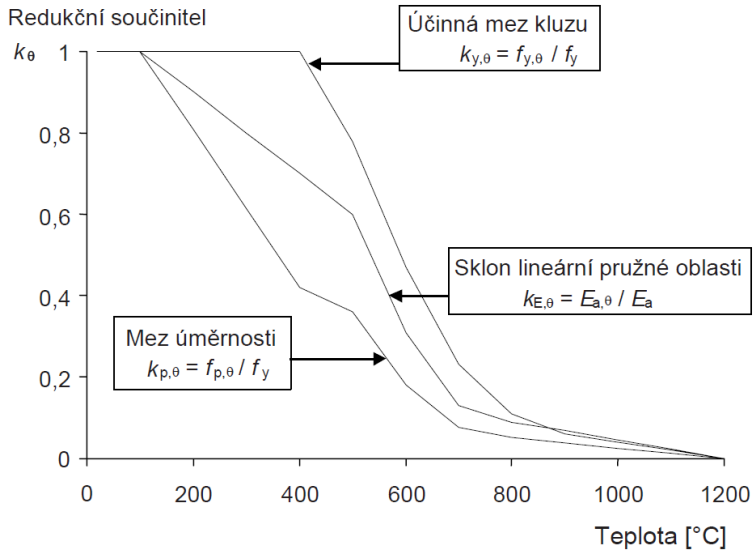
ε_f je emisivita požáru, která je rovna 1,0

σ je Stephan-Boltzmannova konstanta, rovna 5,67 x 10^{-8} W/m^{2}K

θ_g je teplota plynů v blízkosti prvku ve °C

θ_m je povrchová teplota prvku ve °C

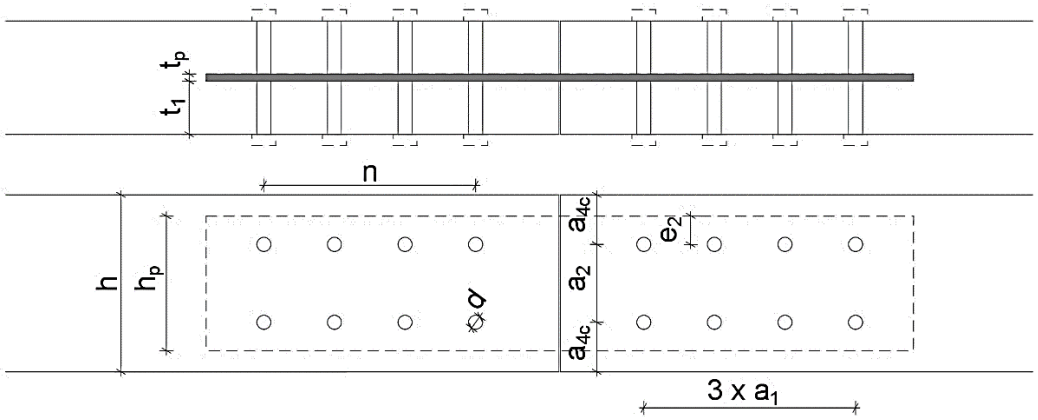
Dle studie [9] je polohový faktor pro určení teploty vložené desky závislý na vzdálenosti desky od povrchu. Ten se se zvyšující vzdáleností od povrchu blíží k nule. Díky tomu se deska, jejíž výška je nižší než výška průřezu spoje, prohřívá pomaleji než deska, která je stejně vysoká jako dřevěný průřez. Plocha A_m vystavená účinkům požáru není v modelu konstantní. Při odhořívání dřeva se zvětšuje v důsledku snižování tloušťky dřeva o hodnotu $d_{char,0}$. U svorníků je při přestupu tepla počítáno s nechráněnou maticí.



obr. 23 Redukční součinitele materiálových vlastností oceli

4.3 Vstupní data

Pro ověření analytického modelu jsou vypočteny únosnosti spoje na základě provedených zkoušek [7], uvedených ve studii [1]. Na obr. 24 je znázorněna geometrická konfigurace spoje. V tab. 6 jsou uvedeny parametry jednotlivých konfigurací zadávané do analytického modelu. Testované vzorky byly zhotoveny ze dřeva GL28h s objemovou hmotností 450 kg/m^3. Mez kluzu spojovací desky byla v testu f_{yk} = 360 MPa. Kolíky/svorníky byly z oceli s mezí kluzu 336 MPa.



obr. 24 Geometrická konfigurace spojů

tab. 6 Geometrická konfigurace testovaných spojů vložená do analytického modelu

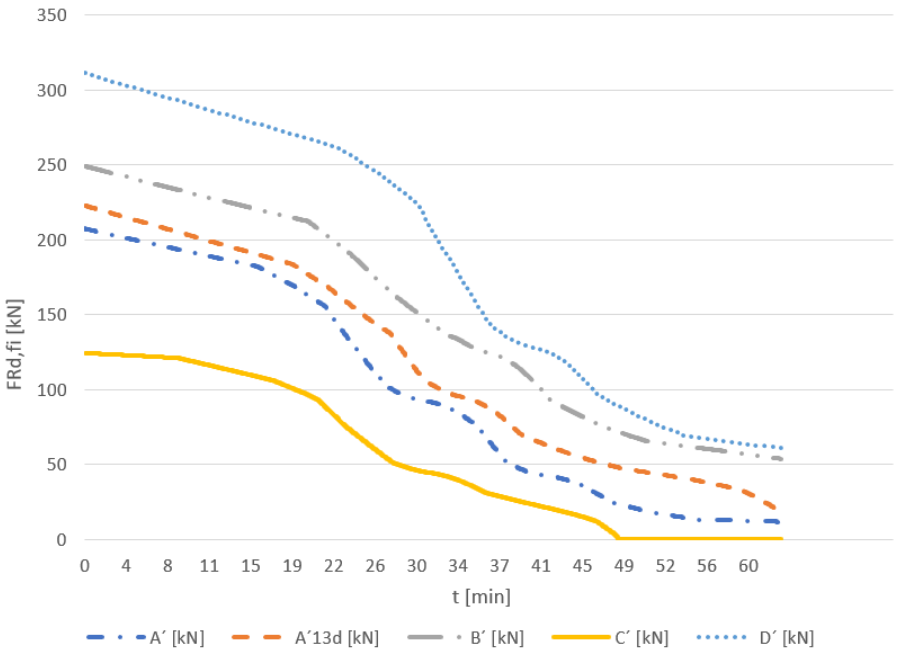
Ozn.	d mm	t_1 mm	t_p mm	h mm	h_p mm	a_1 mm	a_2 mm	a_{4c} mm	e_2 mm	n -
A´	16	76	8	252	114	112	64	95	25	4
A´13d	16	76	8	254	114	208	64	95	25	4
B´	20	75	10	292	143	140	80	107	32	4
C´	12	77	6	212	87	84	48	83	20	4
D´	20	100	10	288	143	140	80	107	32	4

4.4 Výsledky modelu, srovnání se zkouškami

V tab. 7 jsou znázorněny výsledné požární odolnosti stanovené z analytického modelu pěti konfigurací, které byly zároveň podrobené zkoušce popsané v [1]. V rámci zkoušky byly vzorky zatěžovány konstantní silou o velikosti 10 %, 20 % a 30 % své únosnosti za běžné teploty. Pro tyto zatěžovací síly byla v rámci každé konfigurace dohledána doba, kdy došlo k poklesu únosnosti pod hodnotu zatěžovací síly. Výsledky jsou porovnány, a je určena chyby analytického modelu oproti provedeným zkouškám. Průběh výsledné únosnosti jednotlivých konfigurací v čase je znázorněn na obr. 25. Průměrná odchylka analytického modelu od výsledků zkoušek je 11,6 %. Požární odolnost dle analytického modelu je ve většině případů nižší než požární odolnost stanovená z požárních zkoušek. Vyšší požární odolnost dle analytického modelu je pravděpodobně zapříčiněna omezeními, jež je nutné brát v úvahu. Model především nezohledňuje vedení tepla z kolíků/svorníků do dřeva, a tím rychlejší odhořívání v oblasti kolíků/svorníků. To může vést k poruše blokovým nebo zátkovým smykem. Dále není zohledněn přestup tepla z kolíku/svorníku do spojovací desky.

tab. 7 Srovnání požární odolnosti dle analytického modelu s experimenty [7]

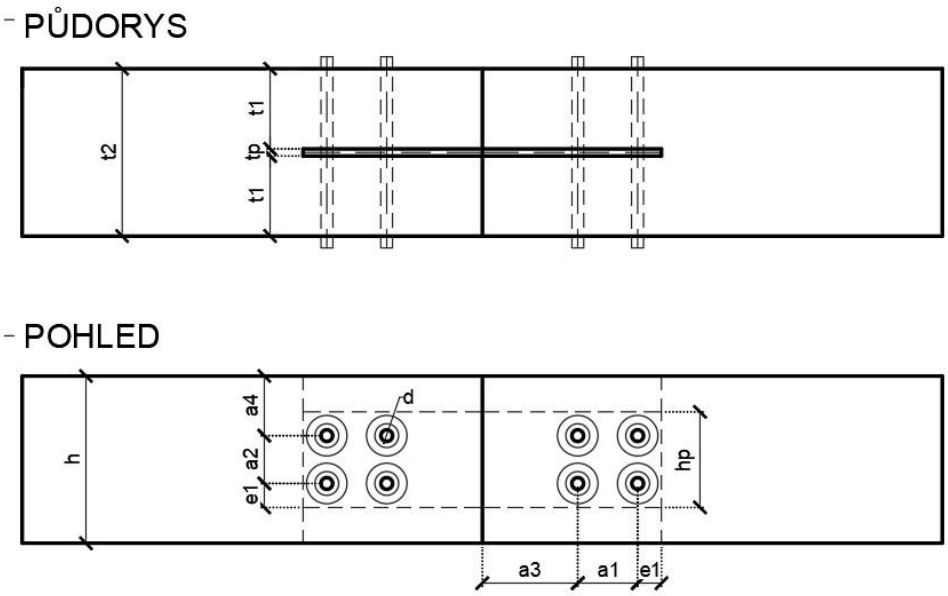
Označení	η_{fi} [%]	$t_{fi,test}$ [min]	$t_{fi,analytický}$ [min]	Odchylka [%]
A´	10	55	48	14,6
	20	41	39	5,1
	30	36	36	0,0
A´ 13d	30	36	34	5,9
B´	10	52	72	27,8
	30	37	41	9,8
C´	10	54	45	20,0
	30	39	32	21,9
D´	10	90	83	8,4
	30	45	46	2,2
Průměrná odchylka				11,6



obr. 25 Průběh výsledné únosnosti jednotlivých konfigurací v čase

4.5 Analytický model pro svorníkový spoj

Na konfiguraci svorníkového spoje, který byl zhotoven v rámci experimentální studie, je aplikován analytický model. Konfigurace spoje je uvedena na obr. 26 a její rozměry v tab. 8 . Spoj je dimenzován na požární odolnost R30 s navýšením tloušťky a_{fi} = 18 mm. Bylo použito hoblované řezivo s deklarovanou pevností C24 průřezu 140x140 mm. Ocelová vložená deska s rozměrem 6x80 mm a závitové tyče byly z oceli S235, vše bez povrchové úpravy.

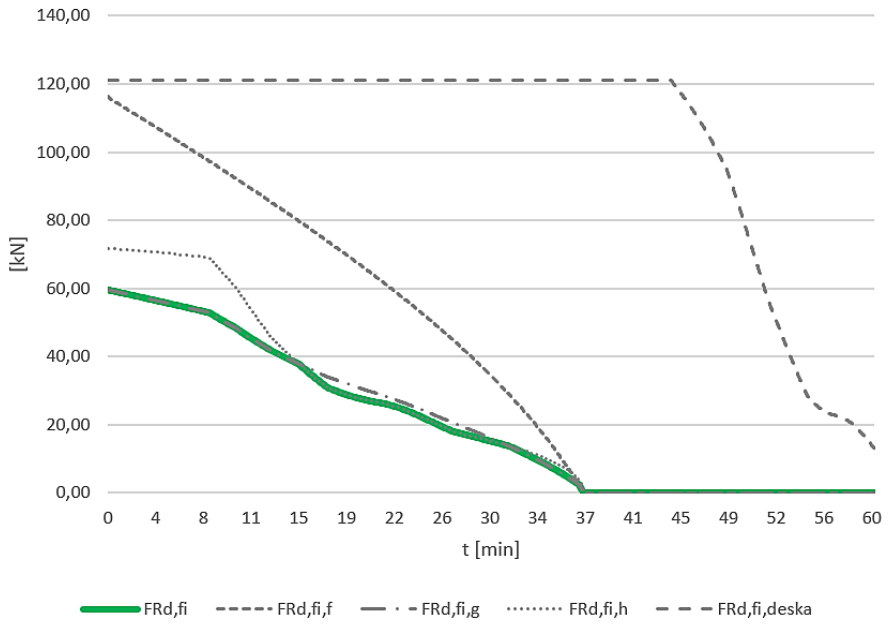


obr. 26 Schéma konfigurace spoje experimentu

tab. 8 Rozměry konfigurace spoje experimentu

d mm	t_1 mm	t_p mm	h mm	h_p mm	a_1 mm	a_2 mm	a_4 mm	e_1 mm	n -
10	67	6	140	80	50	40	50	20	2

Výsledná návrhová únosnost za běžné teploty dle analytického modelu je rovna 47,1 kN. Průběh únosnosti za zvýšené teploty je znázorněn na obr. 27



obr. 27 Průběh únosnosti spoje experimentu v závislosti na čase

Průběh únosnosti $F_{RD,fi,f}$ zachycuje mezní stav porušení otlačením dřevěného průřezu pod svorníkem v závislosti na čase požárního zatížení. U průběhu únosnosti $F_{RD,fi,g}$ v závislosti na čase požárního zatížení je mezním stavem porušení otlačení dřevěného průřezu a vznik plastického kloubu svorníku v úrovni vložené spojovací desky. U průběhu únosnosti $F_{RD,fi,h}$ v závislosti na čase požárního zatížení je mezním stavem porušení vznik plastických kloubů na svorníku v úrovni spojovací vložené desky a v oblasti dřevěného průřezu. $F_{RD,fi,deska}$ je tahovou únosností oslabeného průřezu vložené desky v závislosti na čase požárního zatížení. Výsledná mez únosnosti je poté minimální hodnotou ze čtyř mezních stavů únosnosti.

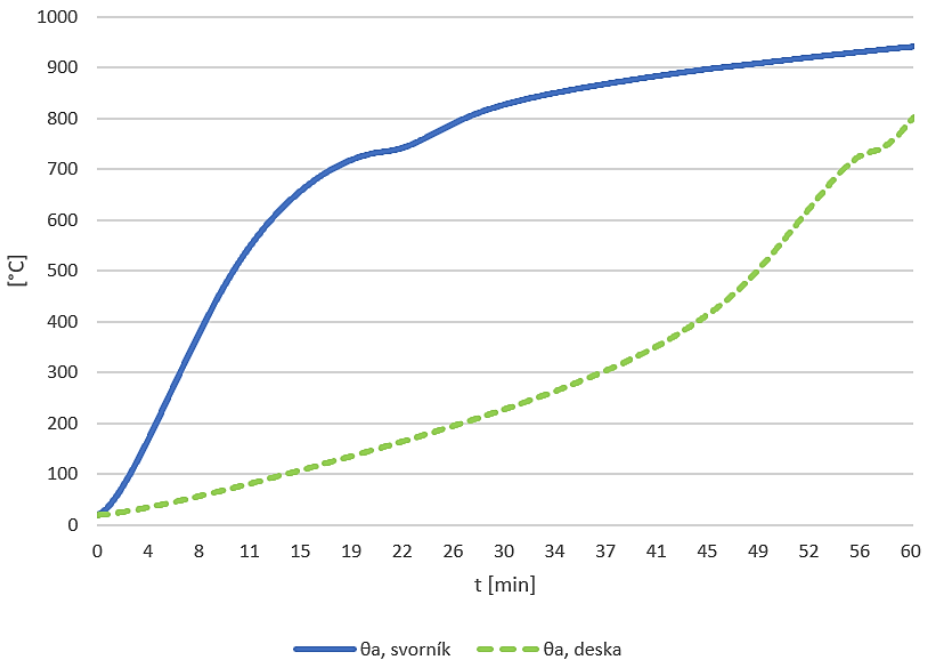
Z grafu je viditelné, že na únosnosti má do 15 minuty vliv plastické únosnosti svorníku v kombinaci s otlačením dřevěného průřezu. Po patnácté minutě je únosnost ovlivněna plastickým momentem svorníku. Dle analytického modelu vložená deska nepříznivě neovlivňuje únosnost až do 45 minuty, kdy už je únosnost celého prvku jako celku nulová.

Požární odolnost spoje navýšením tloušťkou a_{fi} je stanovena dle ČSN 1995-1-2 na R30, avšak za předpokladu krytí hlavy svorníku též tloušťkou a_{fi}. V analytickém modelu je počítáno s exponovanou hlavou svorníku. Požární odolnosti spoje v závislosti na stupni využití jsou uvedeny v tab. 9.

tab. 9 Požární odolnost spoje v závislosti na stupni využití

η_{fi} -	$F_{Rd,req}$ kN	t_{fi} min
0,7	**33,0**	**16**
0,5	**23,6**	**24**
0,3	**14,1**	**31**
0,2	9,4	34
0,1	4,7	36

Z grafu na obr. 28 je viditelné, že dle analytického modelu se prohřívá svorník mnohem více než vložená deska. Nižší teploty na desce jsou způsobeny zahrnutím vlivu vzduchové dutiny.



obr. 28 Teplota svorníků a ocelové desky dle analytického modelu

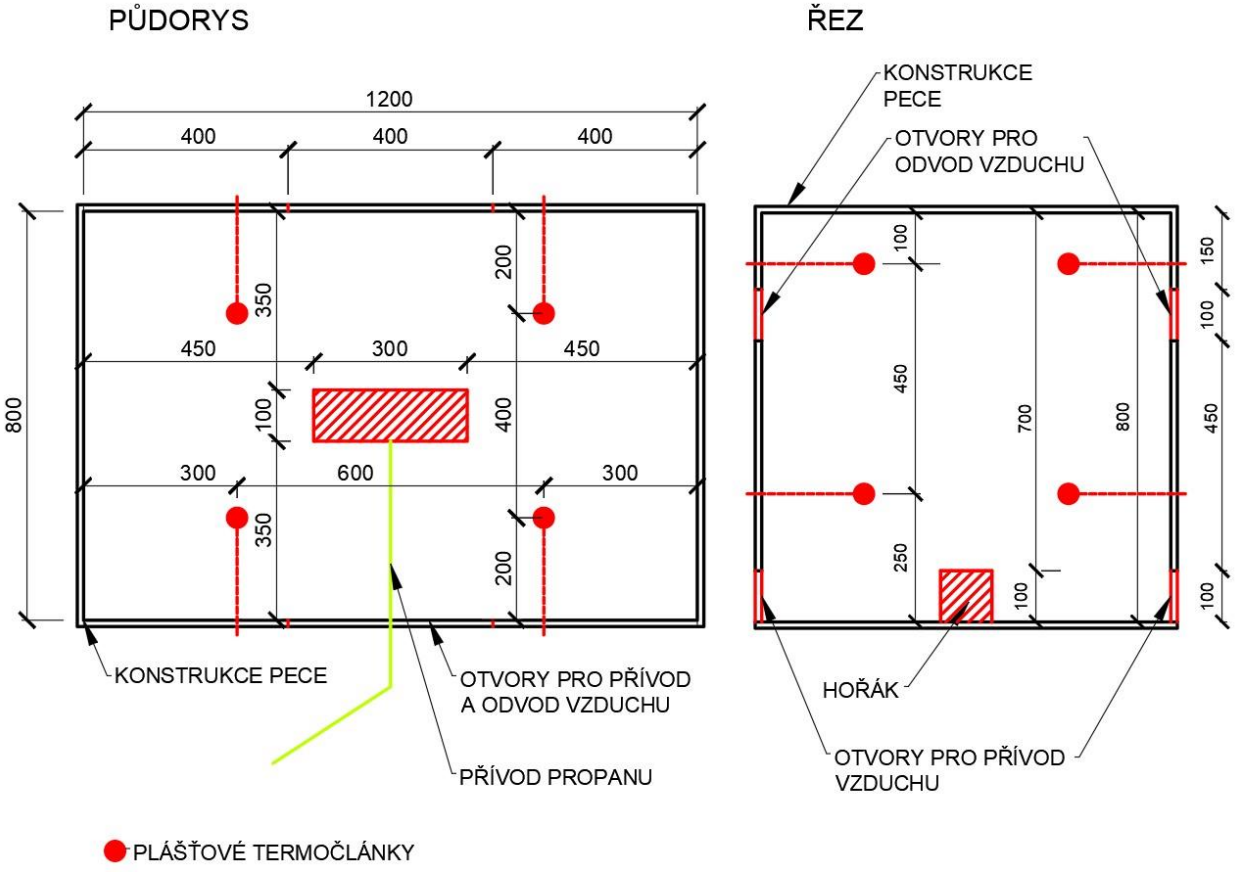
5 Experimentální studie

Experimentální studie byla realizována za podpory požární laboratoře UCEEB ČVUT v Praze. V rámci studie je sledován průběh teplot ve spoji zatíženém teplotní křivkou blízké normové teplotní křivce. Výsledky experimentu jsou porovnány s numerickým modelem níže.

5.1 Experimentální zařízení

Experimenty byly provedeny v zařízení miniFUR. MiniFUR slouží pro indikativní středněrozměrové zkoušky, díky kterým je možné ověřit chování vzorku a poté je optimálně připravit jak finančně, tak časově pro velkorozměrovou požární zkoušku v akreditované požární laboratoři. V horní polovině pece je možné docílit teplotního zatížení blízkému normové teplotní křivce. Pec je zkonstruována z ocelového rámu opláštěného deskami Fermacell. Palivem pro hořák

pece je topný plyn propan, který se používá při požárních zkouškách. Teplota v peci je řízena systémem ústředny, která má nastavený program na řízení výkonu hořáku. O odtah spalin se stará odsávací zvon s odtahovým potrubím, které je řízeno též systémem. Při iniciaci zkoušky je nastaven výkon odtahové ventilace na 30%, která se v pokročilé fázi zvyšuje na 50-60%. Díky tomuto nastavení by nemělo docházet k ovlivnění proudění plynů. Přívod vzduchu a obvod spalin zajišťují otvory v bočních stranách pece. Geometrie pece je znázorněna na obr. 29.



obr. 29 Geometrie zařízení miniFUR

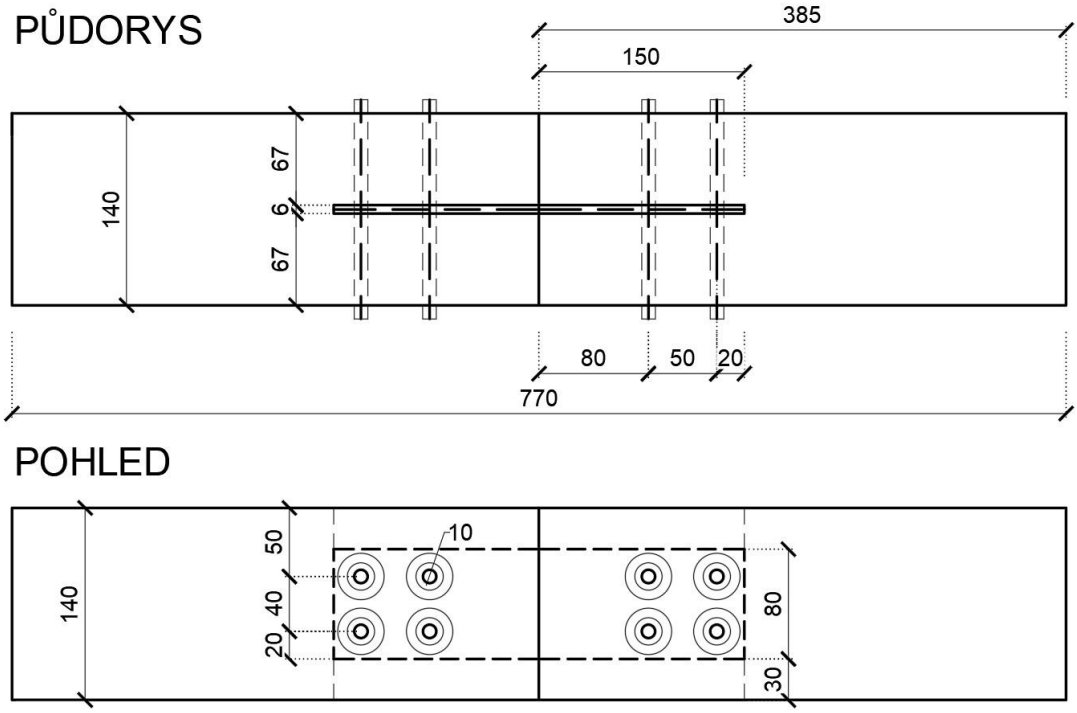
Pro optimální proudění plynů v peci byly respektovány podmínky umístění vzorku v peci.

Požadavky jsou:

- vzdálenost vzorku od stěny pece min 100 mm
- umístění vzorku min. 600 mm nad podlahou
- umístění vzorků mimo půdorys od hořáku a minimálně 100 mm od hrany hořáku
- omezení narušení proudění vlivem překážek v peci

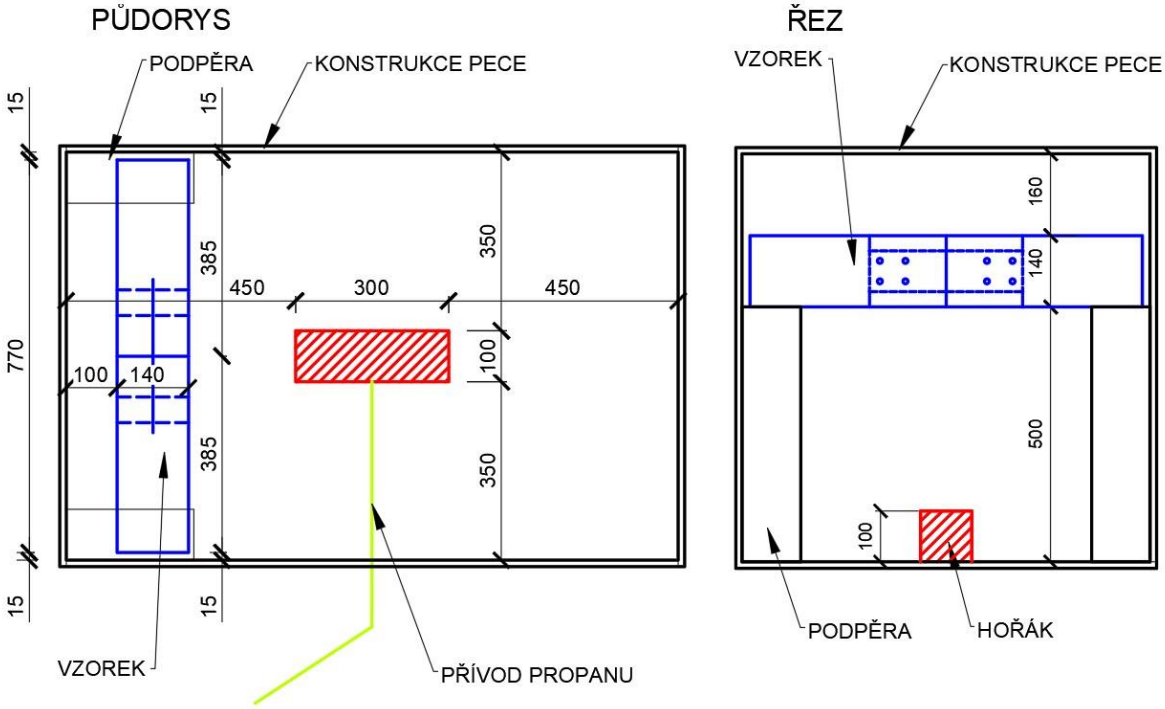
5.2 Zkoušený svorníkový spoj - geometrie, umístění

Na základě možností pece byl navržen svorníkový spoj, který je menší než běžné svorníkové spoje konstrukcí, avšak stále využitelný v praxi. Svorníkový spoj respektuje požadavky EC5 a je dimenzován na PO R30, viz obr. 30.



obr. 30 Schéma spoje experimentu

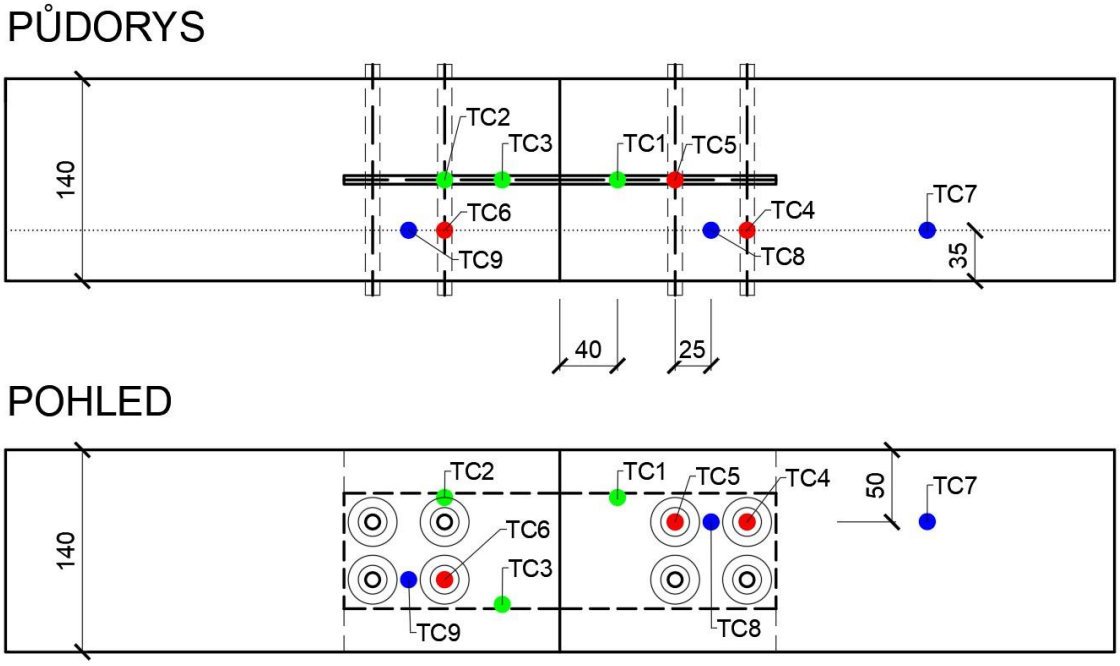
Umístění vzorku splňuje výše uvedené požadavky, pouze výška umístění vzorku v peci byla po uvážení rozvoje teplot v peci snížena na 500 mm, aby byla zachována mezera pod stropem. Díky snížení výšky umístění vzorku je zajištěno proudění plynů kolem vzorku ze čtyř stran. Vzorky byly v peci uloženy na tvárnicích Ytong. Schéma uložení vzorků v peci je na obr. 31 a umístění v peci na obr. 32.



obr. 31 Schéma uložení vzorku v peci

obr. 32 Uložení vzorku v peci

Ve vzorcích byl měřen průběh teplot pomocí plášťových termočlánků typu K, průměru 2 mm, s konektorem MTC10, délky 2m (MTC10-C1-2000-40_1xK-40-1150°C). Měřeny byly teploty na svorníku v hloubce 35 mm od povrchu hranolu a v ose průřezu. V plechu byly umístěny termočlánky měřící teploty v oblasti u svorníku a mimo svorník. Ve dřevě byly umístěny termočlánky v hloubce 35 mm v oblasti mezi svorníky a jeden mimo oslabenou oblast. Poloha termočlánků je znázorněna na obr. 33. Ve zkušebním vzorku bylo umístěno celkem 9 termočlánků.



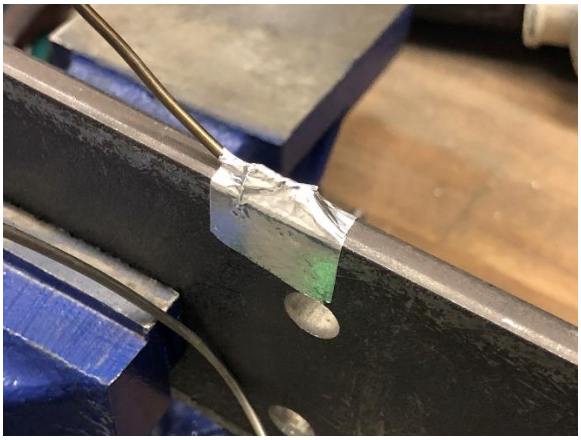
obr. 33 Umístění termočlánku ve vzorku

5.3 Příprava vzorků

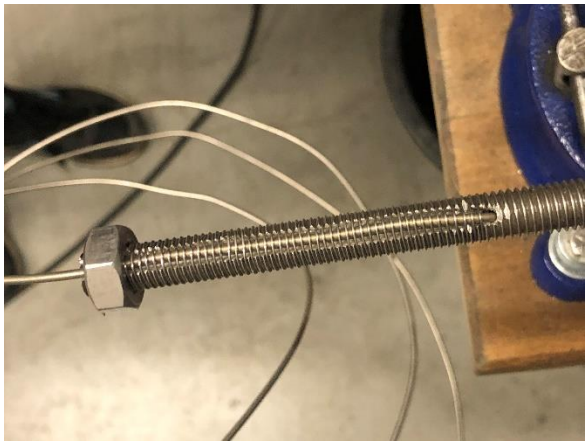
Na přípravu vzorků byl použit KVH hranol 140x140 mm s certifikovanými materiálovými vlastnostmi konstrukčního řeziva C24. Při krácení hranolu na požadovanou délku byl kladen důraz na použití části hranolu bez vad především suky, které by negativně ovlivnily chování, z důvodu vyšší objemové hustoty suku a okolí. Ocelová vložená deska byla zhotovena z plechu tloušťky 6 mm, šířky 8 mm. Ocel je třídy S235. Pro svorníky byly užity závitové tyče 10 mm, matice a konstrukční podložky bez povrchové úpravy.

Pro osazení termočlánků do závitových tyčí v hloubce 35mm (35 + matice s podložkou a přesahem) byly centricky vyvrtány otvory. Pro termočlánek v ose průřezu byla vyříznuta drážka. Termočlánek byl poté po celé délce závitové tyče přidrátován a zaizolován hliníkovou páskou pro zamezení ovlivnění termočlánku prouděním plynů. Termočlánky v plechu byly osazeny v předvrtané díře v tupém úhlu a přidrátované k plechu. Následně byly též izolovány hliníkovou páskou. Termočlánky ve dřevě byly ukotveny drátem mezi závitovými tyčemi. V okolí vzorku byly termočlánky izolovány vatou ze skelných vláken. Fotodokumentace přípravy vzorků je na obr. 34 níže.

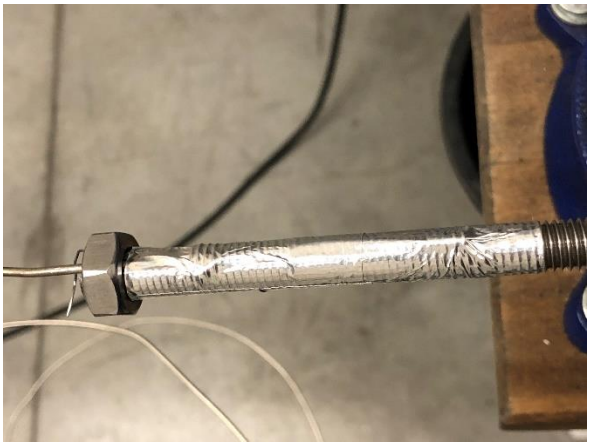
a) Připevnění termočlánku v plechu



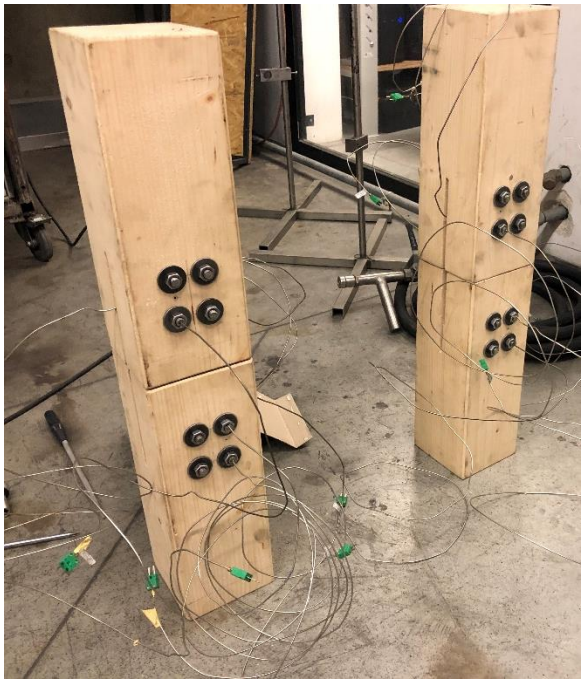
b) Izolace termočlánku v plechu



c) Připevnění termočlánku ve svorníku



d) Izolace termočlánku ve svorníku



e) Vzorek osazený termočlánky

f) Izolace pláště termočlánku

obr. 34 Fotodokumentace přípravy vzorků

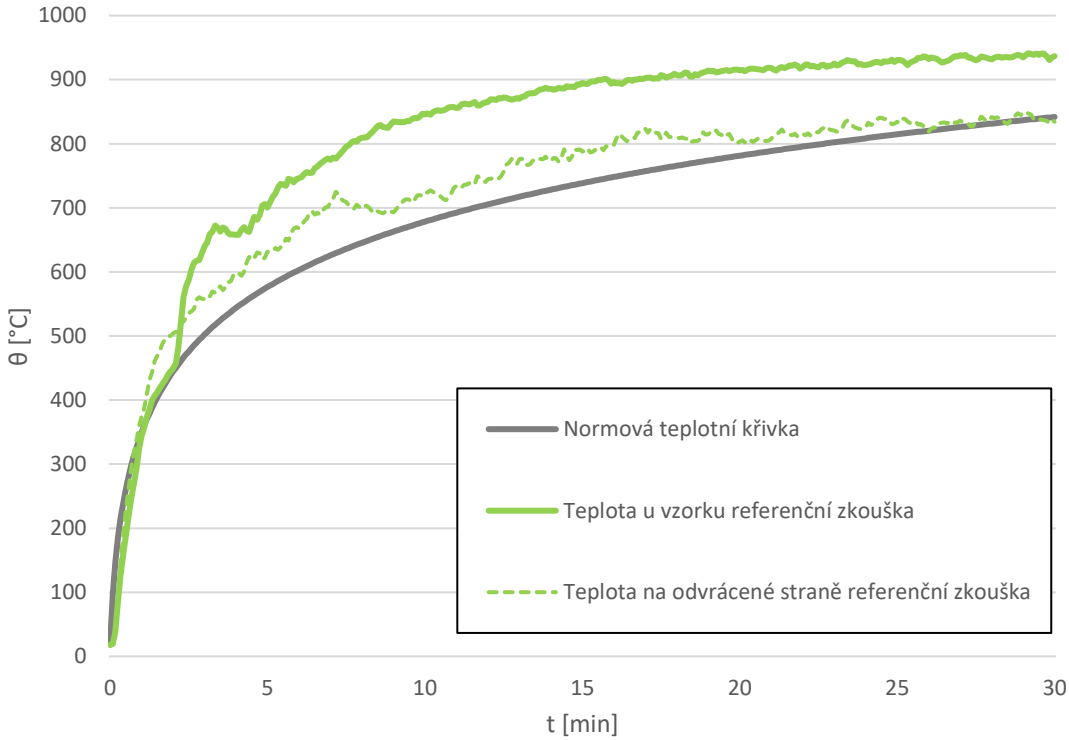
5.4 Průběh zkoušky

Průběh normové teplotní křivky je nastaven v peci za předpokladu, že je hořák jediným zdrojem tepla v peci. Z tohoto důvodu byla realizována referenční zkouška.

Referenční zkouška spočívala v umístění dřevěného průřezu téhož materiálu do zkušební polohy vzorků svorníků na obr. 32 a spuštění zkoušky po dobu 30 minut s defaultním nastavením výkonu hořáku. Cílem bylo zjistit odchylku od normové teplotní křivky v důsledku teplotního přírůstku hoření dřevěného prvku. Při výrazné odchylce by se upravil výkon hořáku pro následovnou zkoušku, tak aby průběh teplot odpovídal normové teplotní křivce.

Z naměřených hodnot termočlánků pece je v grafu na obr. 35 viditelné, že teploty v horní polovině pece na odvrácené straně jsou blízké normové teplotní křivce. Termočlánky v blízkosti vzorku jsou ovlivněny teplotním přírůstkem od hořícího vzorku. I když byly teploty v blízkosti vzorku vyšší, zůstala regulace výkonu hořáku pro další experimenty nezměněna.

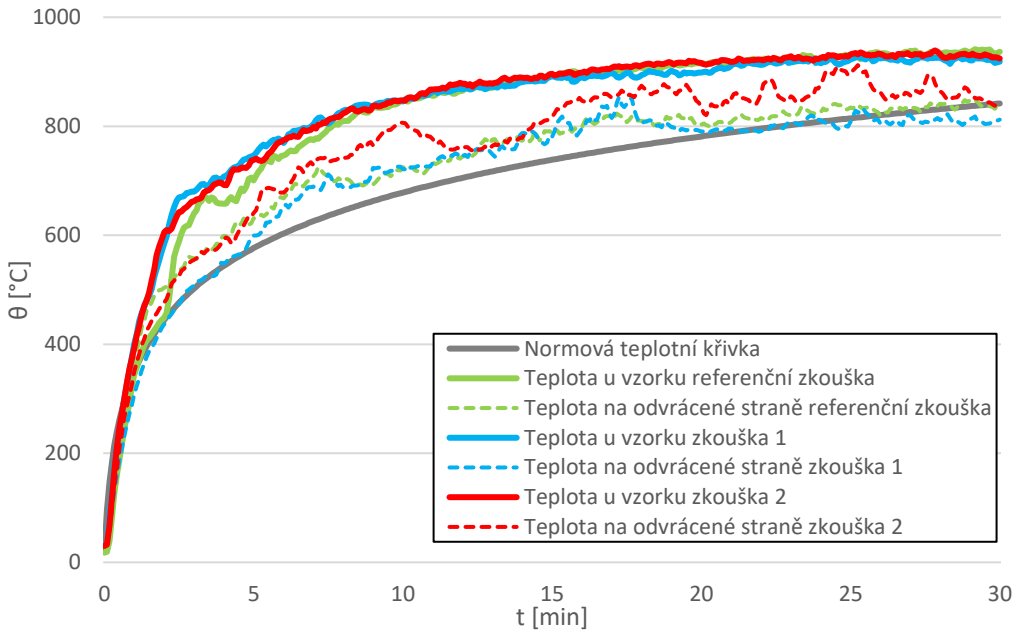
Po referenční zkoušce proběhly jednotlivé zkoušky dvou vzorků. Po ukončení zkoušky byl vždy vzorek vyjmut z pece a schlazen v kádi s vodou. Vzorky byly poté zkoumány po vizuální stránce.



obr. 35 Průběh teplot plynů v peci z referenční zkoušky a normové teplotní křivky

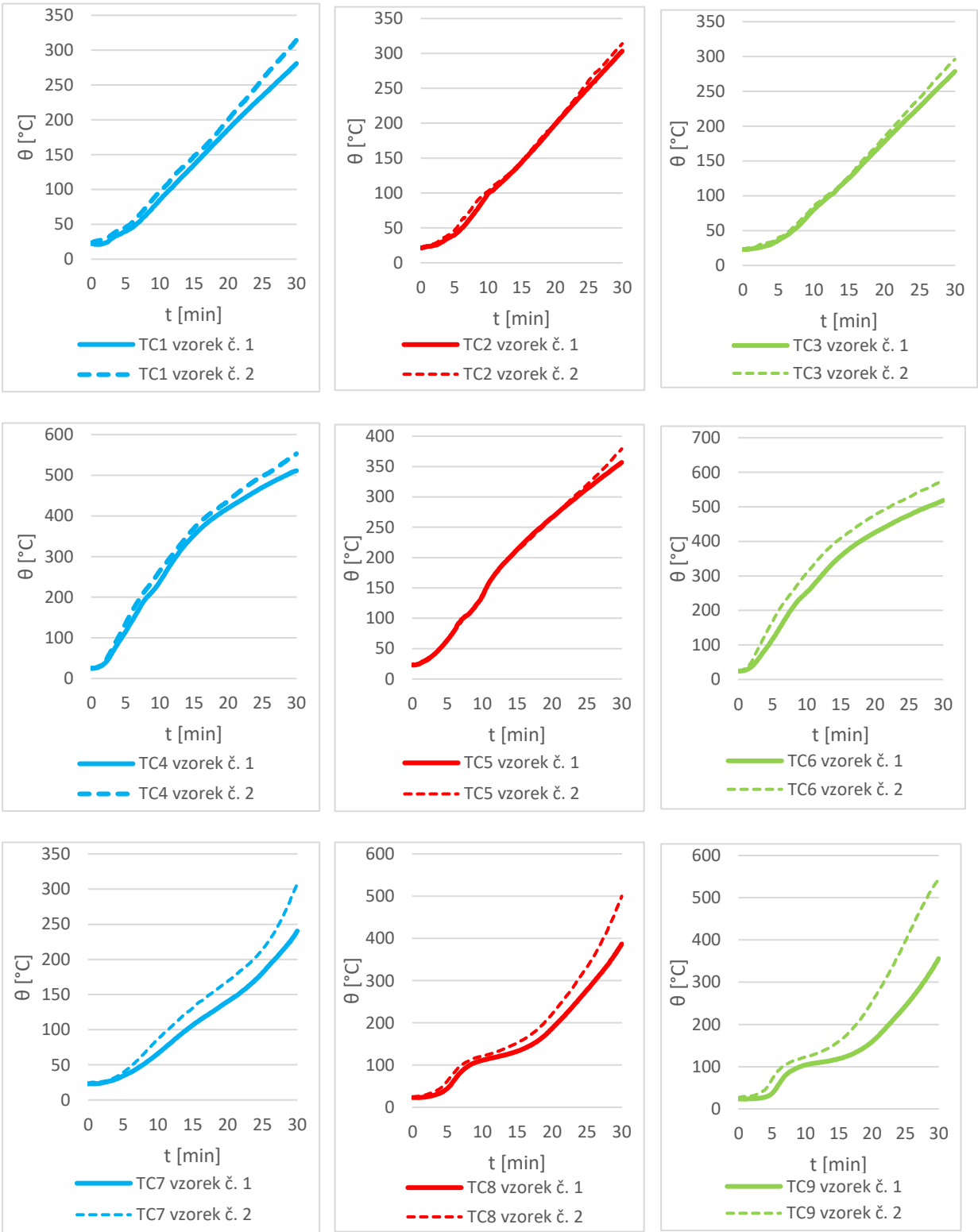
5.5 Výsledky zkoušky

Výsledkem zkoušky jsou naměřené hodnoty teplot v průběhu zkoušky. Z grafu průběhu teplot plynů v peci jednotlivých zkoušek na obr. 36 je viditelné, že teploty v okolí vzorku se téměř shodují. U zkoušky vzorku č. 2 docházelo během zkoušky k teplotním výkyvům v peci na odvrácené straně.



obr. 36 Průběh teplot plynů v peci

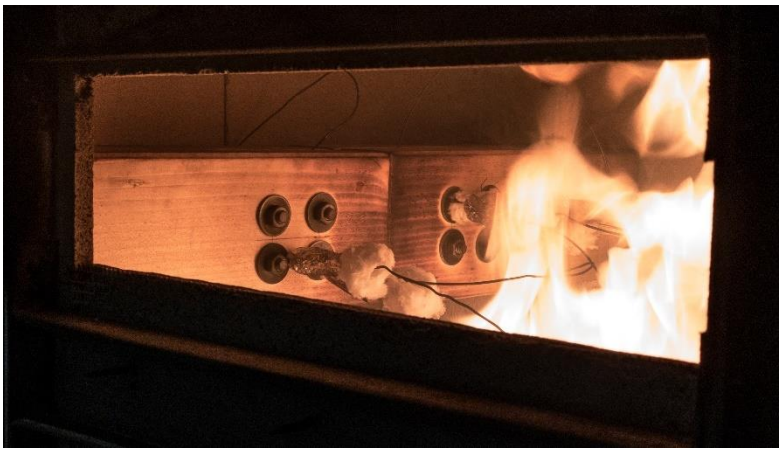
Na obr. 37 jsou zobrazeny průběhy teplot na termočláncích vzorku č.1 a č.2. Umístění termočlánků je uvedeno na obr. 33.



obr. 37 Průběh naměřených teplot z termočlánků vzorku č.1 a č.2

Teploty v peci jsou u referenční zkoušky a vzorku č. 1 podobné. U vzorku č. 2 docházelo k teplotním výkyvům na odvrácené straně pece. Při pozorování průběhu zkoušky docházelo u vzorku č. 2 k výraznějšímu odhořívání než u referenční zkoušky a zkoušky vzorku č. 1. Naměřené teploty na termočláncích měřících teploty v ocelových prvků vzorku č. 2 jsou vyšší cca o 50 °C. Na termočláncích umístěných ve dřevě mezi svorníky je teplota ve 30 minutě výrazně vyšší něž u zkoušky vzorku č. 1. Vysoký rozdíl teplot byl pravděpodobně způsoben degradací dřeva v měřené hloubce, a tím k proudění horkých plynů v měřeném místě. Termočlánky pak měřili teplotu plynu, nikoliv teplotu ve dřevěném průřezu. Mezi zkouškou vzorku č.1 a 2 došlo ke změně počátečních podmínek, které mohli mít na výsledky vliv. Došlo k instalaci nové plynové bomby a výkon odtahové ventilace byl po iniciaci zkoušky navýšen namísto 30% na 50%. Pravděpodobněji ale rozdíl teplot a rychlejší odhořívání vzorku způsobila možná jiná orientace vláken ve dřevěném průřezu.

Na obr. 38 je viditelný vzorek před vzplanutím. Na termočlánku TC8 a TC9 dochází ke strmějšímu nárůstu teplot v čase 5 minut. Přibližně v této době došlo ke vzplanutí dřevěného průřezu, viz obr. 39, pořízený během cca 5 minut po iniciaci zkoušky. Na obr. 40 je poté zachycen vzorek při ukončení zkoušky. Po ukončení byl vzorek zchlazen. Z obr. 41 je zřetelné, že zuhelnatělá vrstva do ukončení zkoušky neodpadnula. Zuhelnatělá vrstva pod hlavou svorníku nebyla výrazně narušena, viz obr. 42. Tento jev měl pozitivní vliv na průběh teplot ve dřevěném průřezu.



obr. 38 Vzorek před vzplanutím v čase cca 4 minuty

obr. 39 Vzorek v 5 minutě od iniciace zkoušky

obr. 40 Vzorek při ukončení zkoušky

obr. 41 Vzorek po vyjmutí z pece

obr. 42 Zuhelnatělá vrstva pod svorníkovou hlavou

Na obr. 43 je ukázán zbytkový průřez vzorku č. 1 a 2. U vzorku č. 2 je viditelné rychlejší odhořívání a nepravidelné proudění kolem dřevěného prvku oproti vzorku č. 1, u kterého je zbytkový průřez téměř symetrický. Odchylky teplot ve dřevěném průřezu vzorku č. 2 budou při validaci modelu zohledněny.

a) Vzorek č. 1 *b) Vzorek č. 2*

obr. 43 Zbytkový průřez vzorku po ukončení zkoušky ve 30 minutě

Zbytkové průřezy na obr. 44 ukázaly, že dřevo v oblasti svorníků odhořívalo rychleji, než v oblasti mimo svorník. Tento jev je způsoben teplotním přírůstkem od svorníku uvnitř průřezu. Zuhelnatělá vrstva byla pod podložkou celistvá. Zabránila přísunu vzduchu a proudění horkých plynů. Díky tomu nedocházelo k odhořívání dřeva ve spáře svorníku a otvor nebyl zvětšen. Při teplotách nad 100 °C dochází k úniku vodních par a uvolnění chemicky vázané vody. Únik vody je zpomalen přítomností vložené ocelové desky, která mimo nosné funkce funguje jako parozábrana. V okolí plechu se tím akumuluje ve dřevěném průřezu vodní pára, která zpomaluje nárůst teplot. U obou vzorků bylo ze zbytkového průřezu viditelné, že 30 minutě se výška dřevěného průřezu nebyla nižší než výška ocelové desky.

Průřez v rovině řezu neovlivněnou ocelovou deskou, svorníky (referenční vzorek)

Průřez v rovině styčné plochy dvou trámů ovlivněn ocelovou deskou (vzorek č.1)

Průřez v rovině řezu osy svorníků ovlivněn svorníky, ocelovou deskou (vzorek č.1)

obr. 44 Zbytkové průřezy

6 Numerický model

Numerický model je v této práci sestaven za účelem teplotní analýzy dřevěného spoje s ocelovou vloženou deskou. Jsou modelovány dva spoje. Pro numerické modelování byl použit software ANSYS 19.R3.

Prvním případem je model kolíkového spoje B ze studie [1], ve které byl zhotoven numerický model, který byl následně validován podle požární zkoušky. Výsledky numerického modelu z programu ANSYS jsou porovnány níže s průběhy teplot modelu ze studie.

Druhý případ je zaměřen na modelování svorníkového spoje, který byl podroben požární zkoušce, viz kapitola 4. Validace modelu pomocí vlastního experimentu je provedena níže.

6.1 ANSYS Workbench

Americká veřejná společnost ANSYS, Inc. se sídlem v Pensylvánii, která byla založena roku 1970 Johnem Swansonem, vyvíjí a poskytuje inženýrské simulační softwary, na principu metody konečných prvků. Primárním produktem je obecný nelineární program ANSYS, který se věnuje mnoha typům analýz. Mezi nimi je například strukturální, termodynamická, analýza založená na proudění kontinua a jiné. V programu je možné provádět multifyzikální analýzu sloučením jednotlivých analýz do jedné komplexní, a řešit tak zároveň například teplotní analýzu se statickou. Většina simulací se v ANSYSU přes rozhraní Workbench, které je jedním z hlavních produktů společnosti. Modely vytvořené v této práce byly zhotoveny v tomto rozhraní. Na rozdíl od výchozího prostředí APDL (ANSYS Parametric Design Language) nevyužívá programování pomocí vlastních skriptů. APDL prostředí je vhodné spíše pro programátorské účely. [12]

Výhodou programu ANSYS je výpočetní síť konečných prvků, která může být tvořena pomocí různých typů konečných prvků. Díky tomu může co nejvíce odpovídat skutečnému chování modelovaných konstrukcí. Další výhodou je možnost modelovat nelineární problémy (např.

plasticity) a dále definovat vlastní materiál pomocí zadání vlastních hodnot od základních fyzikálních (hustota, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, délková teplotní roztažnost…) či mechanických až po složitě měřitelné (například Poissonova čísla). [12]

Pro modelování byla užita analýza přestupu tepla (transient thermal). V rámci analýzy byly nadefinovány vlastní materiály s objemovou hmotností, tepelnou vodivostí a měrnou tepelnou kapacitou.

Na geometrii modelu je nastavena čtyřstěnná výpočetní síť, u které lépe dochází k prostorovému rozvoji teplot než u sítě liniové.

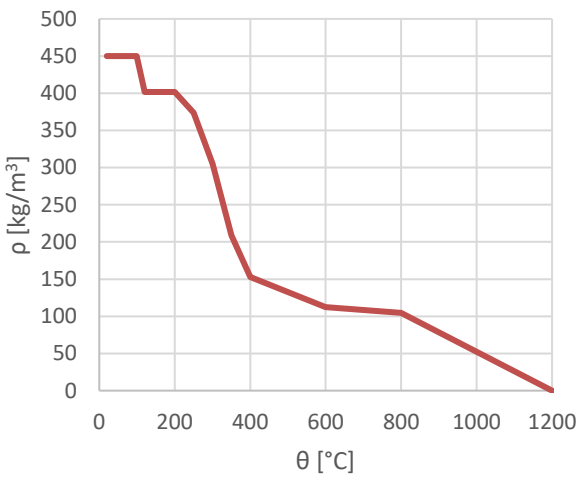
Model je zatížen normovou teplotní křivkou, a v případě modelu podle vlastního experimentu je zatížen teplotou, která byla naměřena během tohoto experimentu. Dle ČSN EN 1991-1-2 se teplotní zatížení skládá z tepelného toku prouděním a radiace. Pro přestup tepla prouděním u normové teplotní křivky je doporučen součinitel přestupu tepla prouděním α_c= 25 W/m^{2}K. Pro tepelný tok radiací je počítáno s emisivitou oceli bez povrchové úpravy ε = 0,7 dle [11]. U dřeva je emisivita stanovena na ε = 0,94 dle [13]. Program ANSYS v prostředí Workbench má již předdefinované vztahy pro přestup tepla.

6.2 Model kolíkového spoje - B

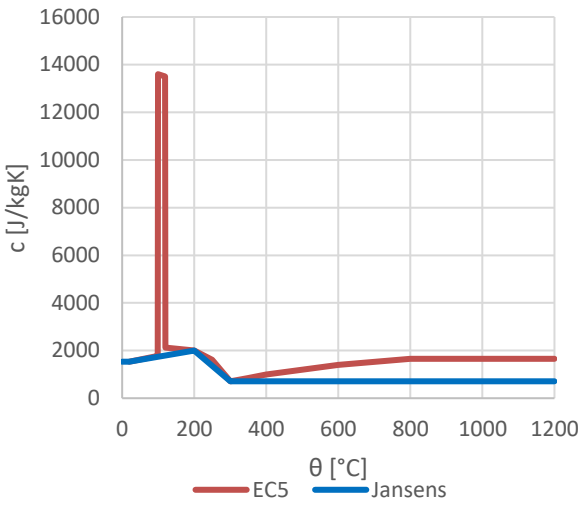
Modelován byl spoj B ze studie [1]. Dřevěný průřez byl z materiálu GL28h s objemovou hmotností 450 kg/m^3. Ve studii [1] bylo zjištěno, že teploty ve dřevě podle materiálových vlastností EC5 jsou výrazně nižší, než naměřené teploty z provedeného experimentu studie. Po tomto zjištění vytvořili model s materiálovými vlastnostmi dřeva podle Jansense [14]. Měrná tepelná kapacita podle Jansense nezohledňuje strmý nárůst měrné tepelné kapacity při 100°C, způsobenou odpařováním vody z dřevěného prvku. Vložená ocelová deska funguje ve dřevěném průřezu jako parozábrana. Při experimentech studie bylo zjištěno, že v okolí plechu dřevo dosahuje teploty okolo 100°C po dlouhou dobu. To je zapříčiněno akumulací vodních par a uvolněné vázané vody u plechu. Tento jev byl v modelu zohledněn nárůstem měrné tepelné kapacity na 100kJ/kgK ve dřevěném pruhu tloušťky 3 mm v kontaktu s plechem.

6.2.1 Materiálové vlastnosti

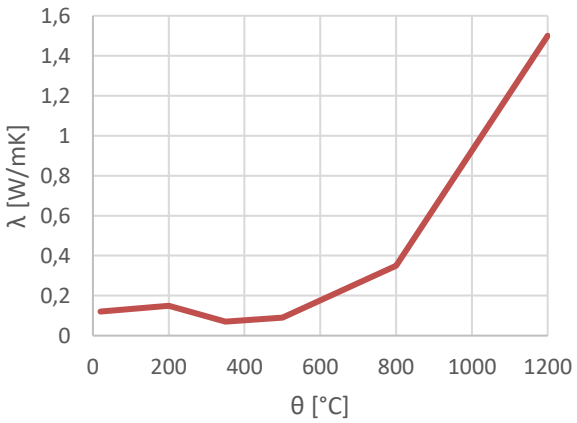
Objemová hmotnost je v numerickém modelu nastavena v závislosti na teplotě podle EC5, viz obr. 45. Shodná geometrie modelu byla provedena se čtyřmi variantami materiálových vlastností dřeva, a to za účelem porovnání vlivu materiálových vlastností na výsledky. V první variantě model počítá s měrnou tepelnou kapacitou a vodivostí dle EC5, ve druhé podle Jansense (materiálové vlastnosti uvedené též v [1]), ve třetí dle Jansense s nárůstem měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu shodné s EC5. Ve čtvrté variantě je počítáno s charakteristikami podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100kJ/kgK, viz výše. Měrná tepelná kapacita je znázorněna na obr. 46, tepelná vodivost dle EC na obr. 47 a tepelná vodivost dle Jansense na obr. 48.



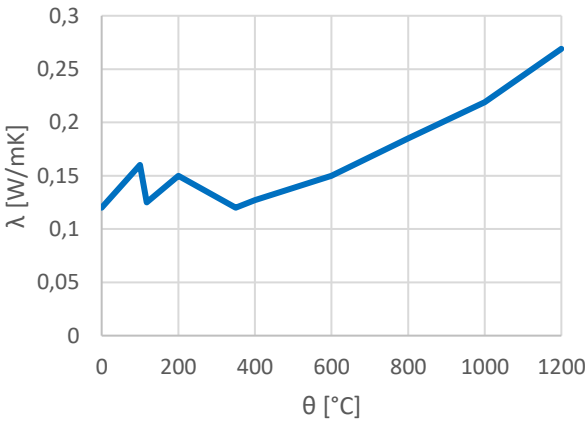
obr. 45 Objemová hmotnost GL28h



obr. 46 Měrná tepelná kapacita

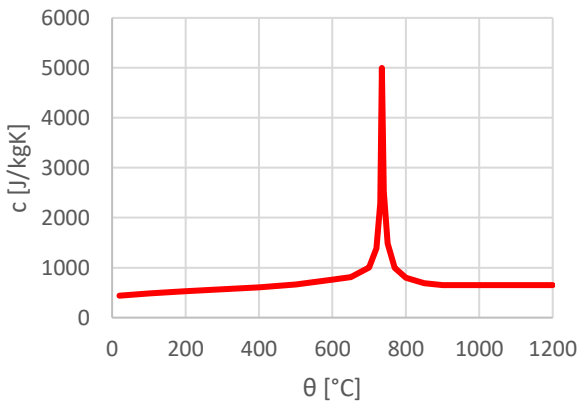


obr. 47 Tepelná vodivost dle EC5

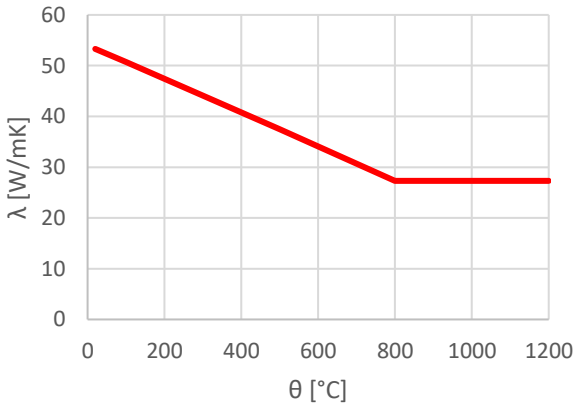


obr. 48 Tepelná vodivost dle Jansense

Ocelové prvky jsou z materiálu S235 bez povrchové úpravy o objemové hmotnosti 7850 kg/m^3. Tepelná vodivost oceli a měrná tepelná kapacita je převzata z EC3. Graf měrné tepelné kapacity je na obr. 49 a tepelné vodivosti na obr. 50.



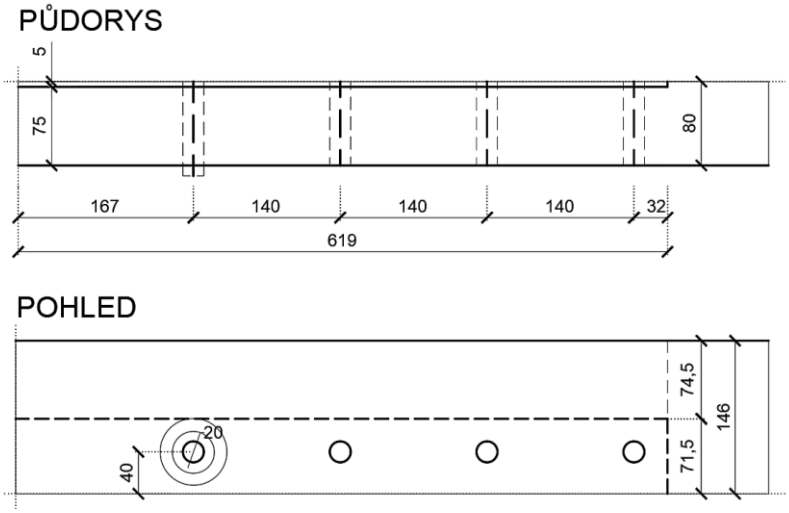
obr. 49 Měrná tepelná kapacita oceli



obr. 50 Tepelná vodivost oceli

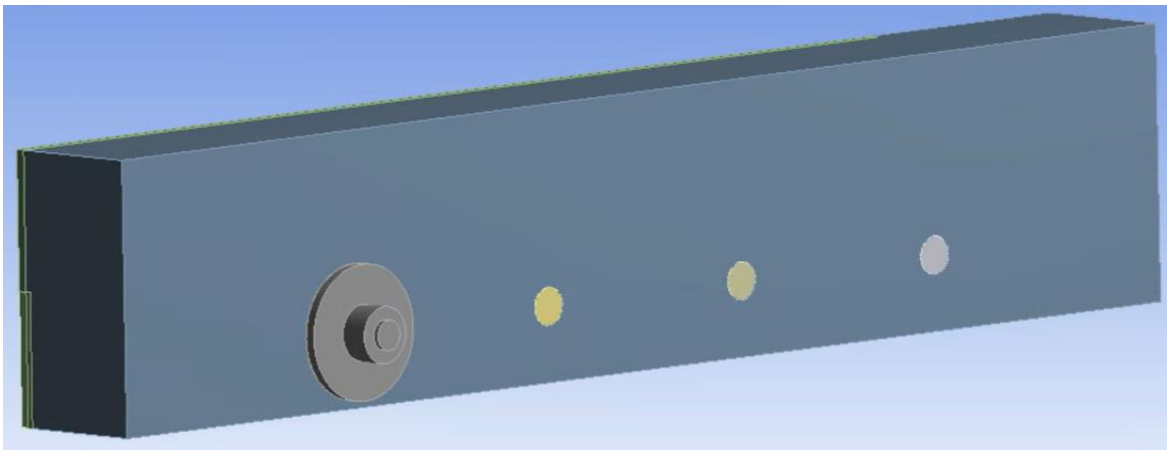
6.2.2 Geometrie spoje B

V modelu je využito osy symetrie pro optimalizaci výpočtu. Ve schématu na obr. 51 je okótována konfigurace kolíkového spoje B.

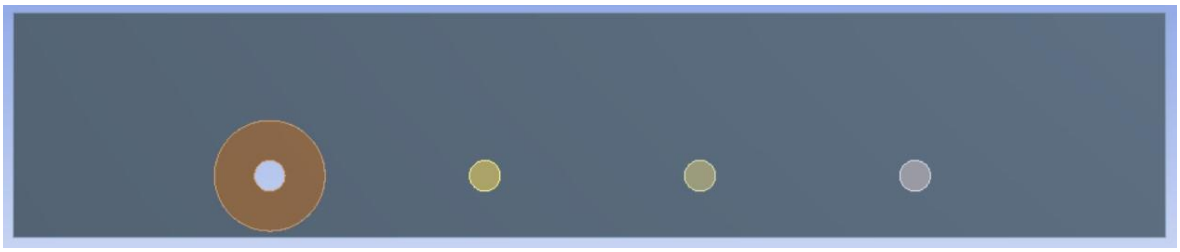


obr. 51 Schéma geometrie spoje B pro model

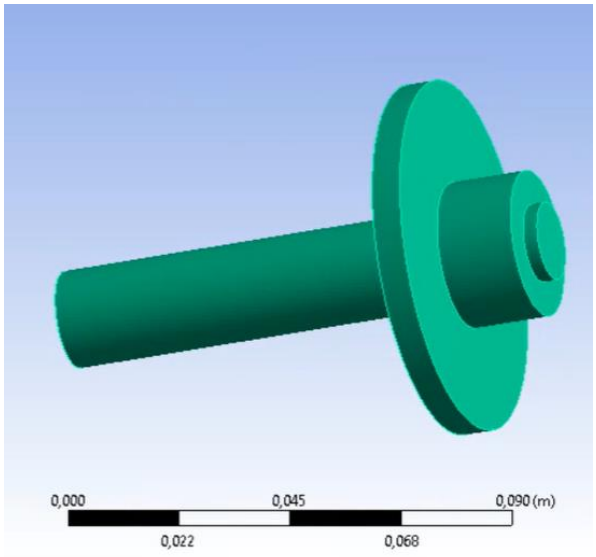
Geometrie spoje je v modelu tvořena několika komponenty na obr. 52 a obr. 53. Samostatný komponent tvoří ocelový plech. Další komponenty tvoří kolíky o průměru 20 mm a svorník skládající se ze závitové tyče (v modelu zjednodušena), konstrukční podložky průměru 72 mm výšky 6 mm. Svorník je držen maticí výšky 16 mm. Matice je v modelu zjednodušena na válec průměru 30 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. Svorník je znázorněn na obr. 54. Dřevěný prvek je rozdělen na několik dalších objektů. Jeden z nich se vyskytuje pod hlavou svorníku, z důvodu eliminace duplicity teplotního zatížení. U plechu se jedná o 3 mm vrstvu dřeva pro lokální úpravu materiálových vlastností dřeva za účelem započítání vlivu zadržených vodních par parozábranou tvořenou plechem. Pro započítání vlivu zapuštění plechu na rozvoj teplot je nad vloženou ocelovou deskou modelována vzduchová mezera s defaultním nastavením vlastností programu pro vzduch.



obr. 52 Model geometrie spoje B - Axonometrie



obr. 53 Model geometrie spoje B - Pohled (viditelnost svorníku vypnuta)



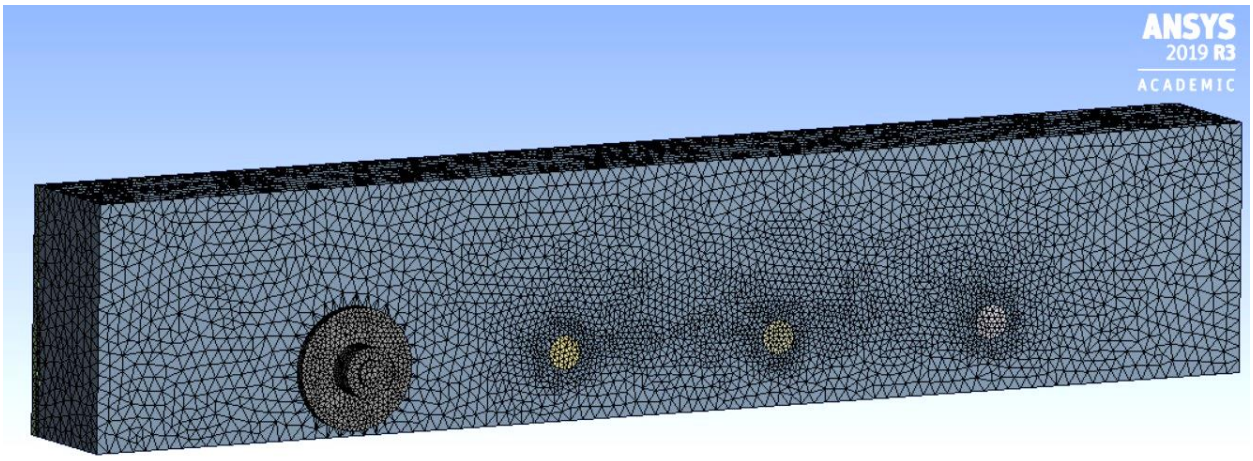
obr. 54 Geometrie svorníku

V modelu, jak již bylo zmíněno, byla použita tetrahedrální výpočetní síť. Velikost sítě je pro každý objekt nastavena s optimalizací výpočetního času bez ovlivnění výsledných hodnot. Z počátku byla síť nastavena jemnější a postupně byla velikost elementu zvětšována do chvíle přijatelné doby výpočetního času, aniž by síť ovlivňovala výsledky oproti předchozím hodnotám.

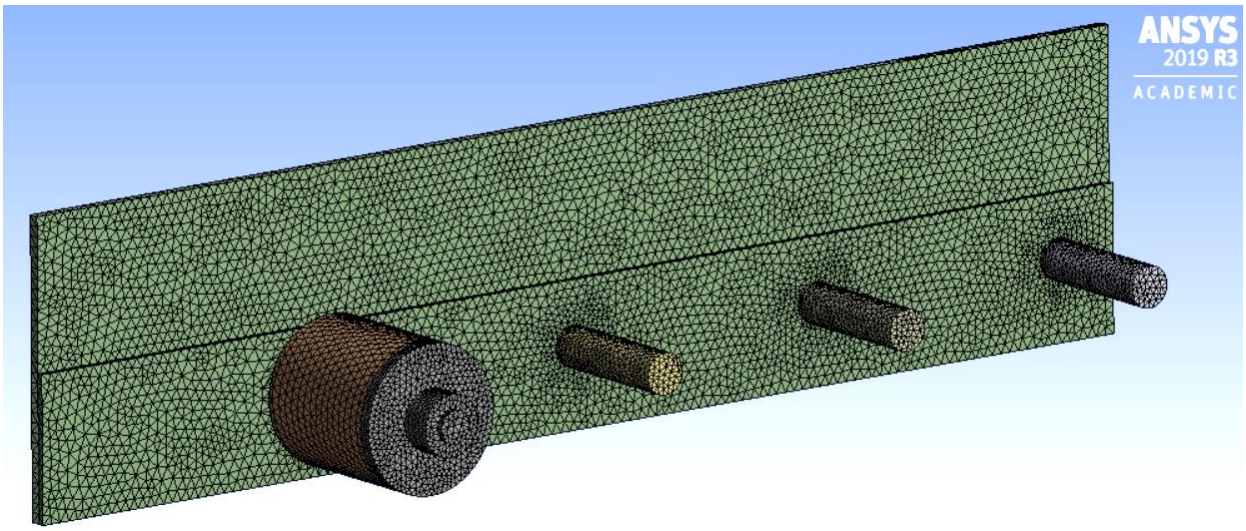
<u>Finální nastavení sítě bylo následovné:</u>

- objekt plechu s velikostí elementu 5 mm
- kolíky a svorník s velikostí elementu 3 mm
- objekt vzduchové mezery s velikostí elementu 5 mm
- objekt dřevěné vrstvy u plechu tloušťky 3 mm s velikostí elementu 5 mm
- dřevěný objekt pod hlavou svorníku s velikostí elementu 5 mm
- dřevěný hranol s velikostí elementu 8 mm

Síť objektů je na sebe v kontaktu vzájemně napojena a velikost sítě je lokálně upravena, tak aby docházelo k pozvolnému přechodu mezi sítěmi a nedocházelo tak k velkému zkreslení výsledného průběhu teplot, viz obr. 55 a obr. 56.



obr. 55 Výpočetní síť modelu spoje B



obr. 56 Výpočetní síť modelu spoje B - viditelnost plechu a svorníku/kolíku

6.2.3 Teplotní zatížení

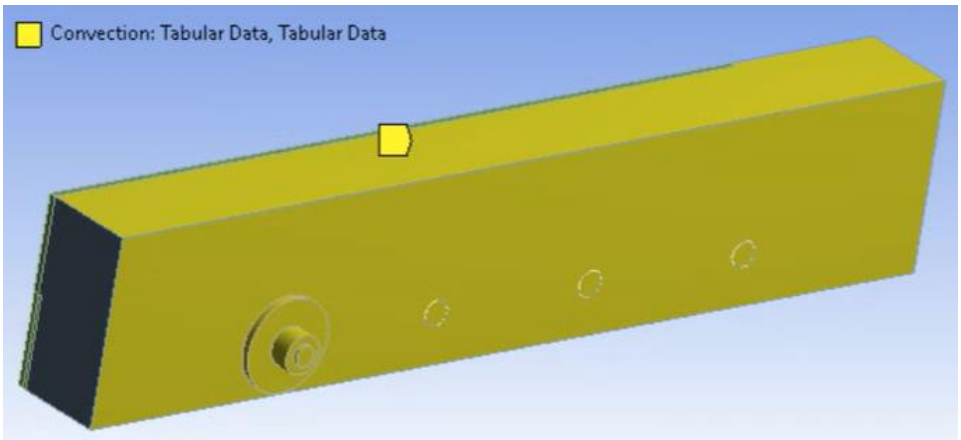
Model je zatížen teplotou dle normové teplotní křivky, viz (34). Součinitel přestupu tepla proudění je uvažován 25 W/m^{2}K. Zatěžovaná plocha prouděním je na obr. 57. U zatížení radiací model počítá s emisivitou dřeva 0,94 (zatěžovaná plocha na obr. 58) a u oceli s emisivitou 0,7 (zatěžovaná plocha na obr. 59). Vzduchová mezera je zatížena přímo teplotou, viz obr. 60. U nezatížených ploch je nastaven nulový tepelný tok.

$$\Delta\Theta_g = 345\log(8t + 1) \qquad (34)$$

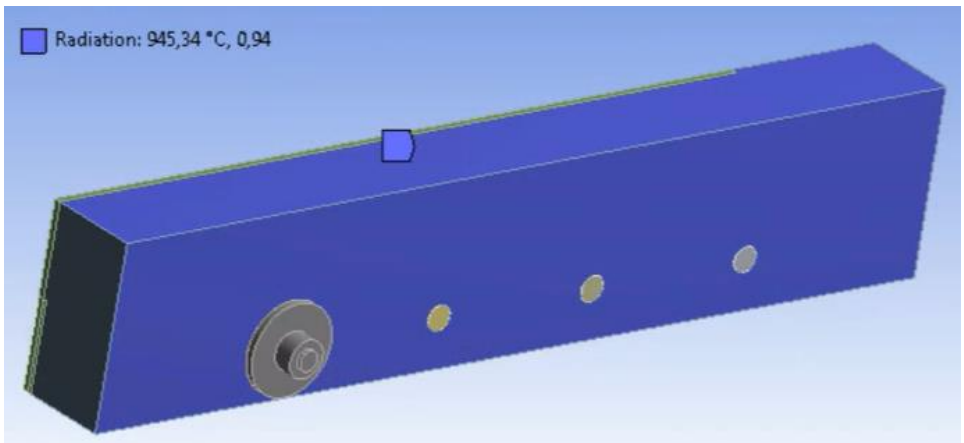
kde:

$\Delta\Theta_g$ je přírůstek teploty plynu podle normové teplotní křivky ve °C

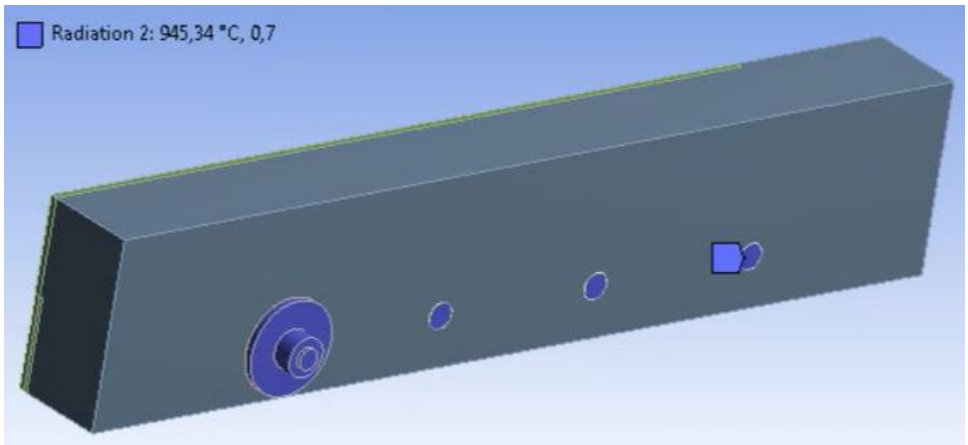
t je čas v minutách



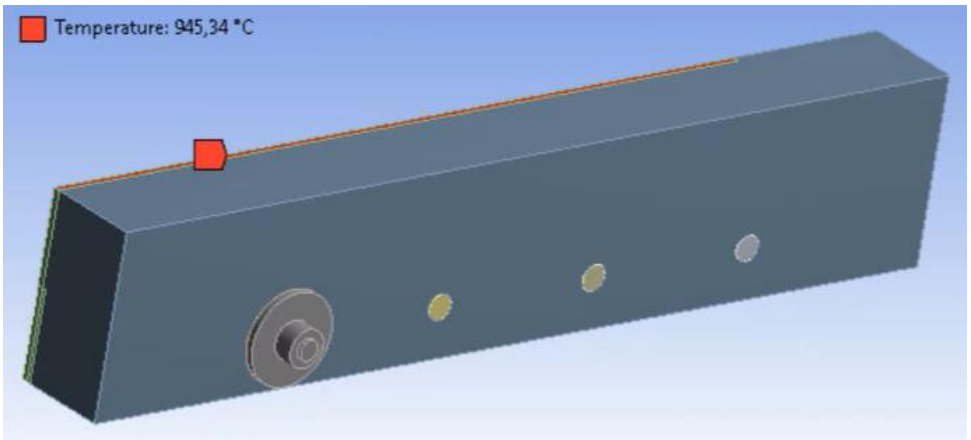
obr. 57 Plocha zatížena prouděním (v 60 minutě)



obr. 58 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,94 (v 60 minutě)



obr. 59 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,7 (v 60 minutě)



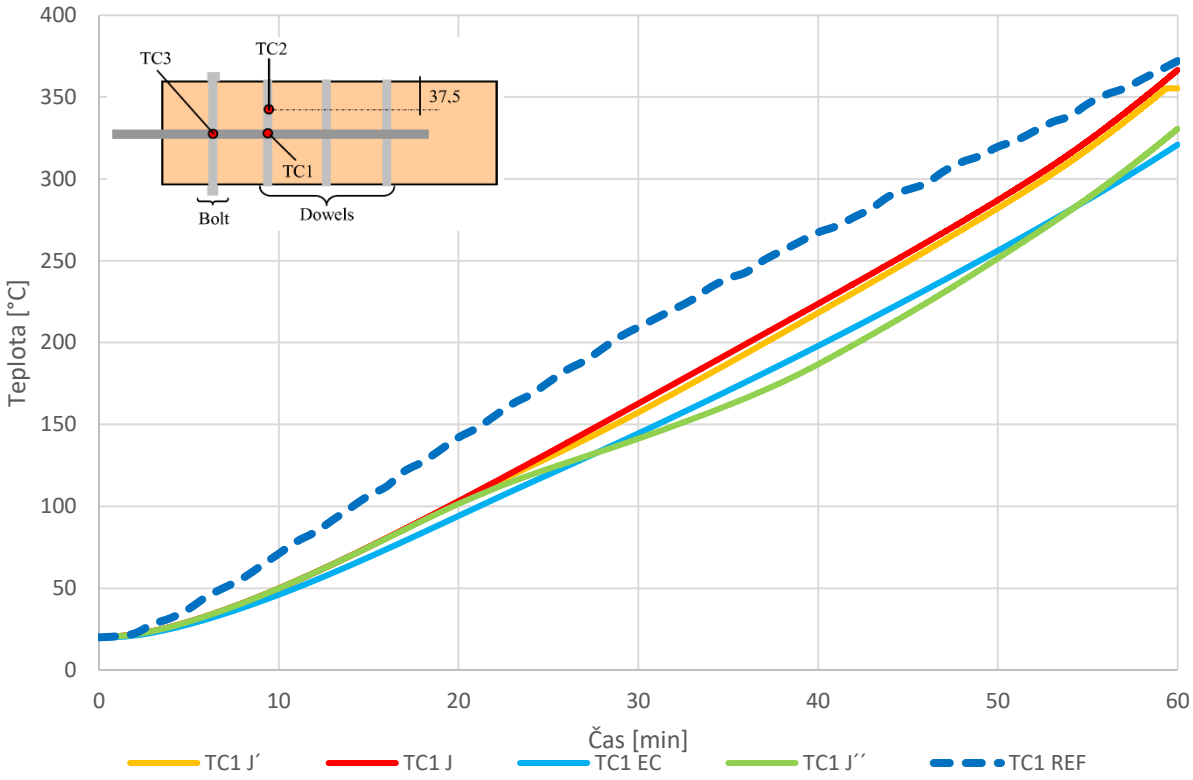
obr. 60 Plocha zatížena přímo teplotou (v 60 minutě)

6.2.4 Výsledné průběhy teplot spoje B

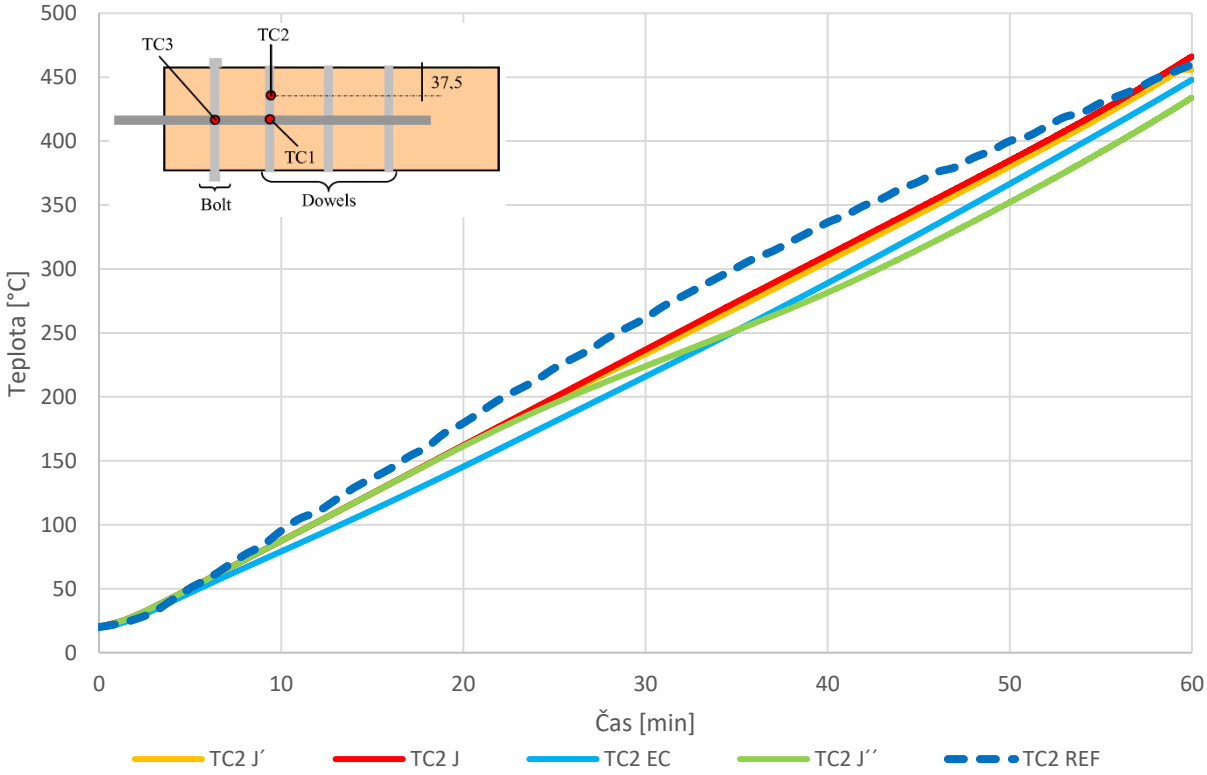
V poloze termočlánků TC1, TC2 a TC3 není ve variantách 1-4, ve kterých jsou změněny materiálové vlastnosti dřeva, znatelný rozdíl. TC1 a TC2 je umístěn na kolících, kdežto TC3 je na svorníku. Rozdílná tepelná vodivost dřeva v kombinaci s měrnou tepelnou kapacitou neovlivnila významně průběh teplot v měřených místech svorníku/kolíků. Teploty z modelu v programu ANSYS jsou u TC1 cca o 50 °C nižší oproti modelu ze studie [1], viz obr. 61. Průběh teplot se u TC2 téměř shoduje s modelem zmiňované studie, viz obr. 62. Oproti tomu jsou teploty u TC3 z modelu programu ANSYS výrazně nižší než z modelu studie cca 100-150 °C, viz obr. 63. Nižší teplota u TC3 může být způsobena možnou rozdílnou geometrií svorníkové hlavy (podložka, matice, přesah tyče) modelu z literatury a modelu v programu ANSYS, u které může být rozdílná plocha vystavená účinkům zatížení. Teplotám na TC1, TC2 a TC3 modelu z literatury se nejvíce přibližuje model s materiálovými charakteristikami Jansense. Lokální úprava měrné tepelné kapacity z EC5 v modelu s charakteristikami Jansense neměla u TC1-TC3 žádný vliv.

<u>Vysvětlivky ke grafům:</u>

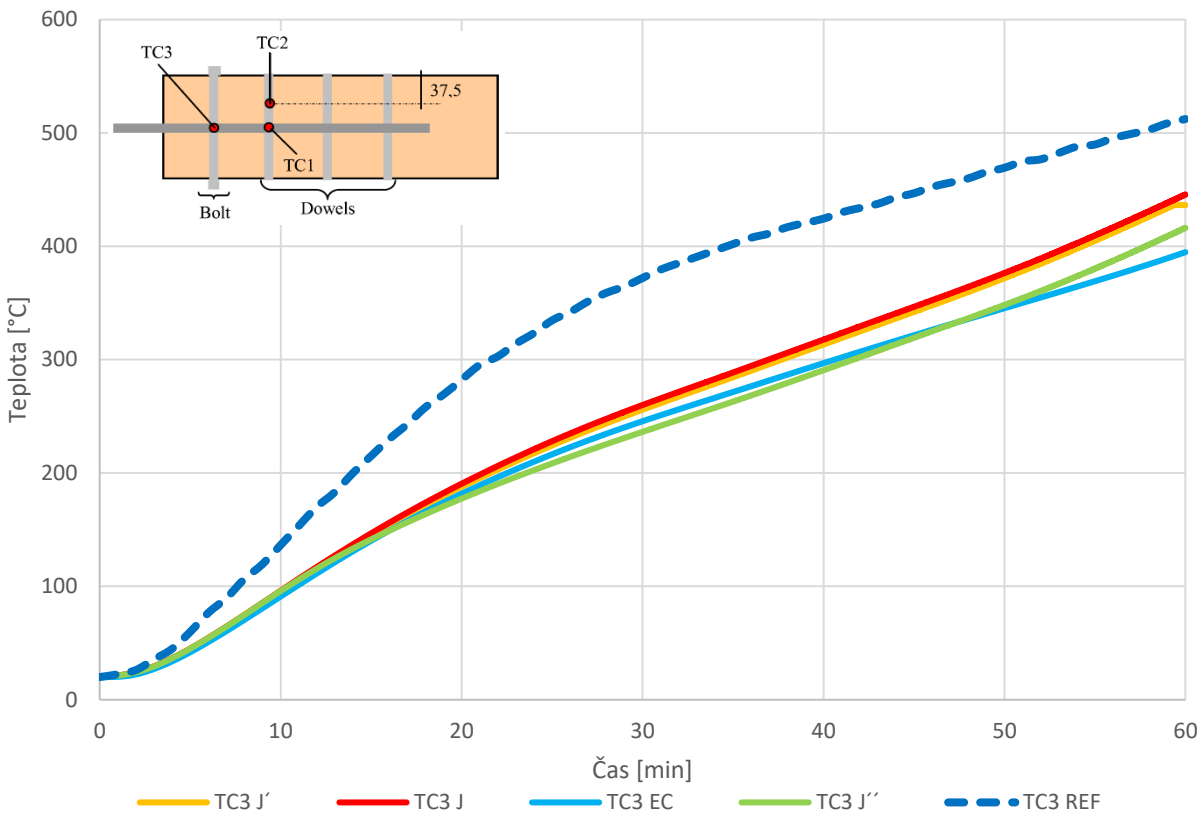
REF - teploty z modelu studie [1];
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense;
J´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dle EC5 při 100 °C dřeva u plechu;
J´´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 61 Průběh teplot na TC1 - model B



obr. 62 Průběh teplot na TC2 - model B

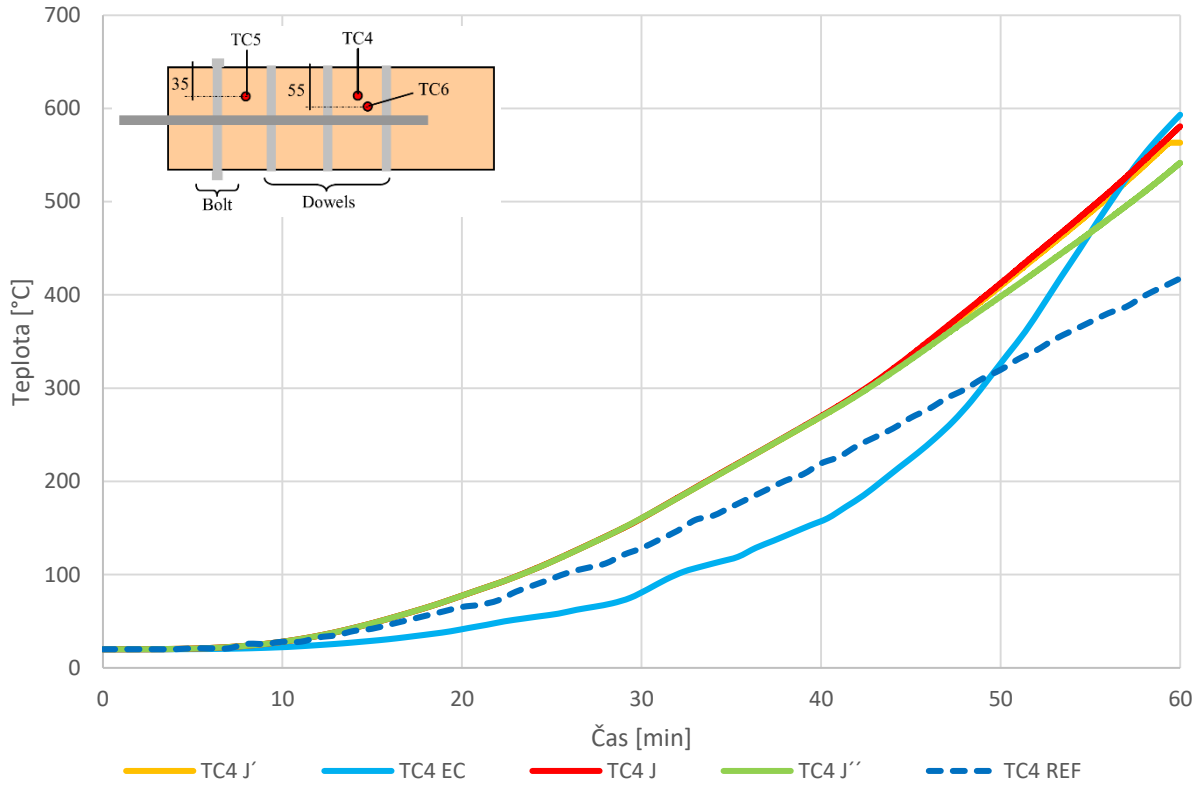


obr. 63 Průběh teplot na TC3 - model B

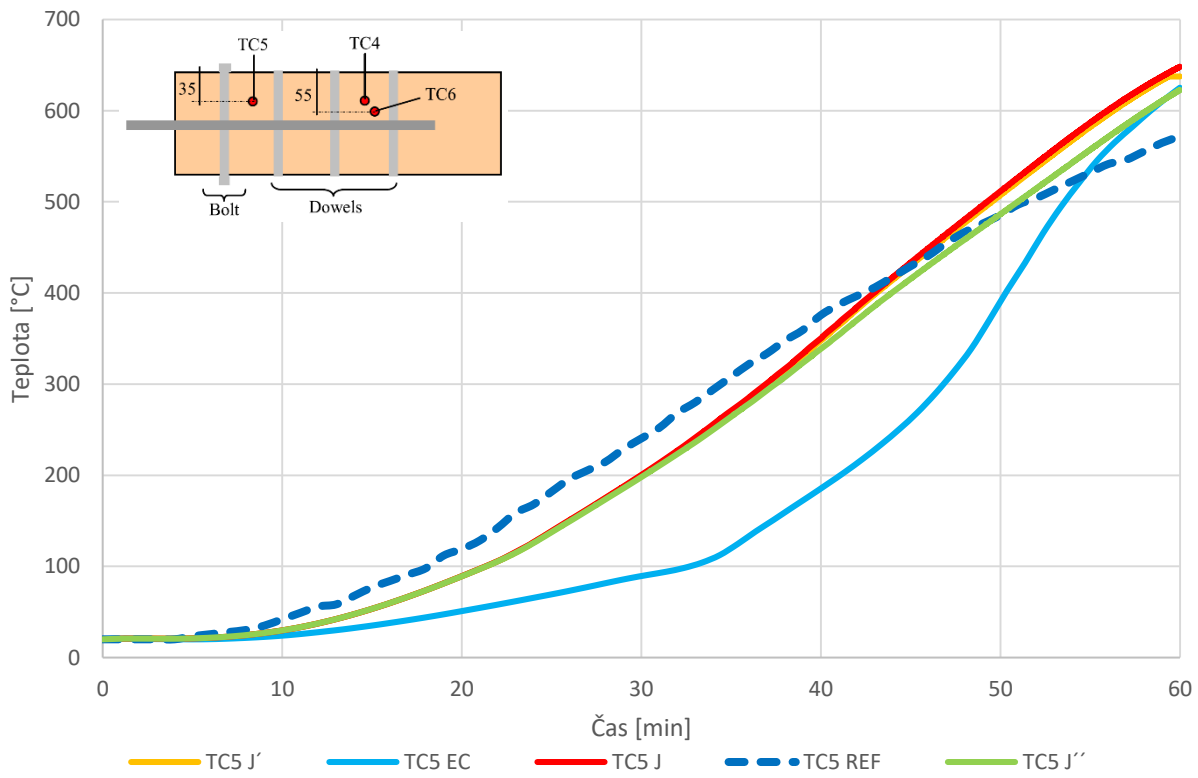
Termočlánky TC4, TC5 a TC6 jsou umístěny ve dřevěném průřezu. Jejich vypočítaný průběh teplot je znázorněn na grafech obr. 64, obr. 65 a obr. 66. Průběh teplot podle materiálových charakteristik EC5 je výrazně nižší a neodpovídá průběhu teplot dle referenčního modelu studie. Nejvíce je rozdíl viditelný na TC5, viz obr. 65. Nejblíže se hodnotám teplot referenčního modelu blíží křivka teplot podle materiálových vlastností podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dřeva u plechu na hodnotu 100kJ/kgK při 100 °C. Odchylka referenčního modelu se pohybuje +- 50 °C. Od 45 minuty dochází k většímu odchýlení a tím k vyššímu nárůstu teplot. Největší odchýlení je viditelné u TC6.

<u>Vysvětlivky ke grafům:</u>

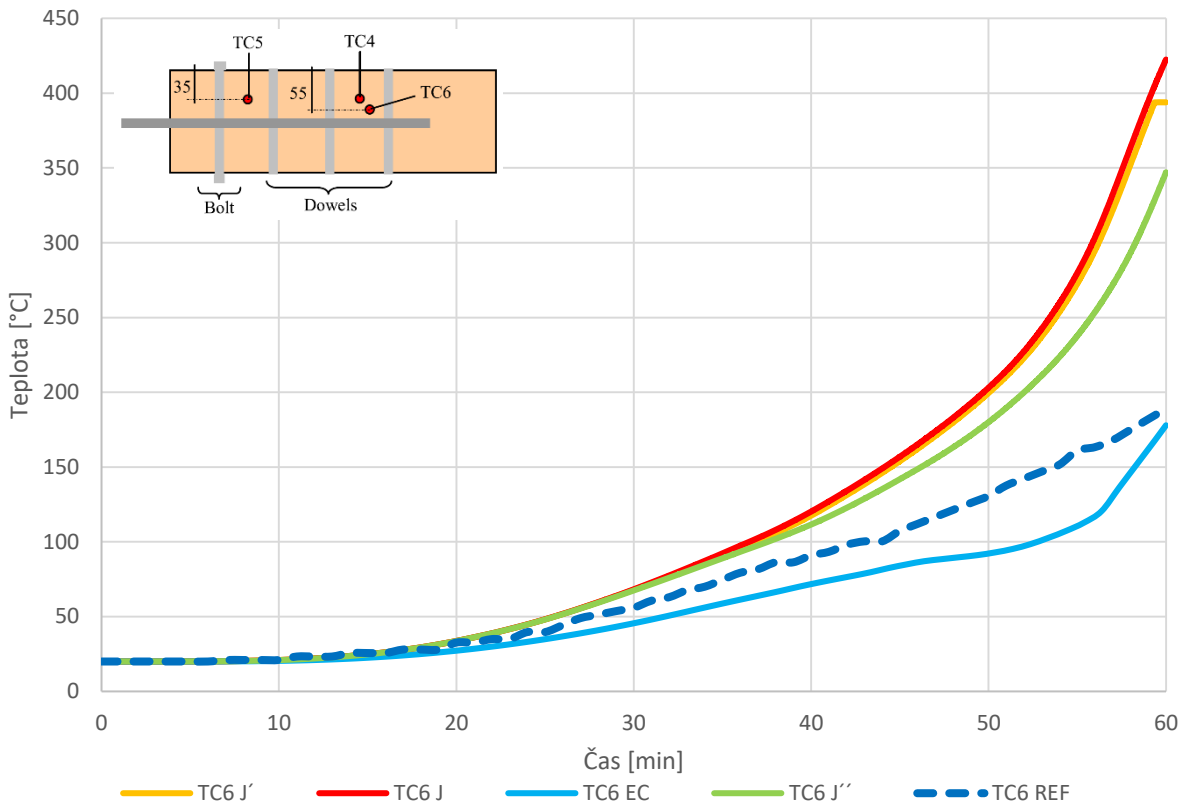
REF - teploty z modelu studie [1];
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense;
J´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dle EC5 při 100 °C dřeva u plechu;
J´´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 64 Průběh teplot na TC4 - model B



obr. 65 Průběh teplot na TC5 - model B

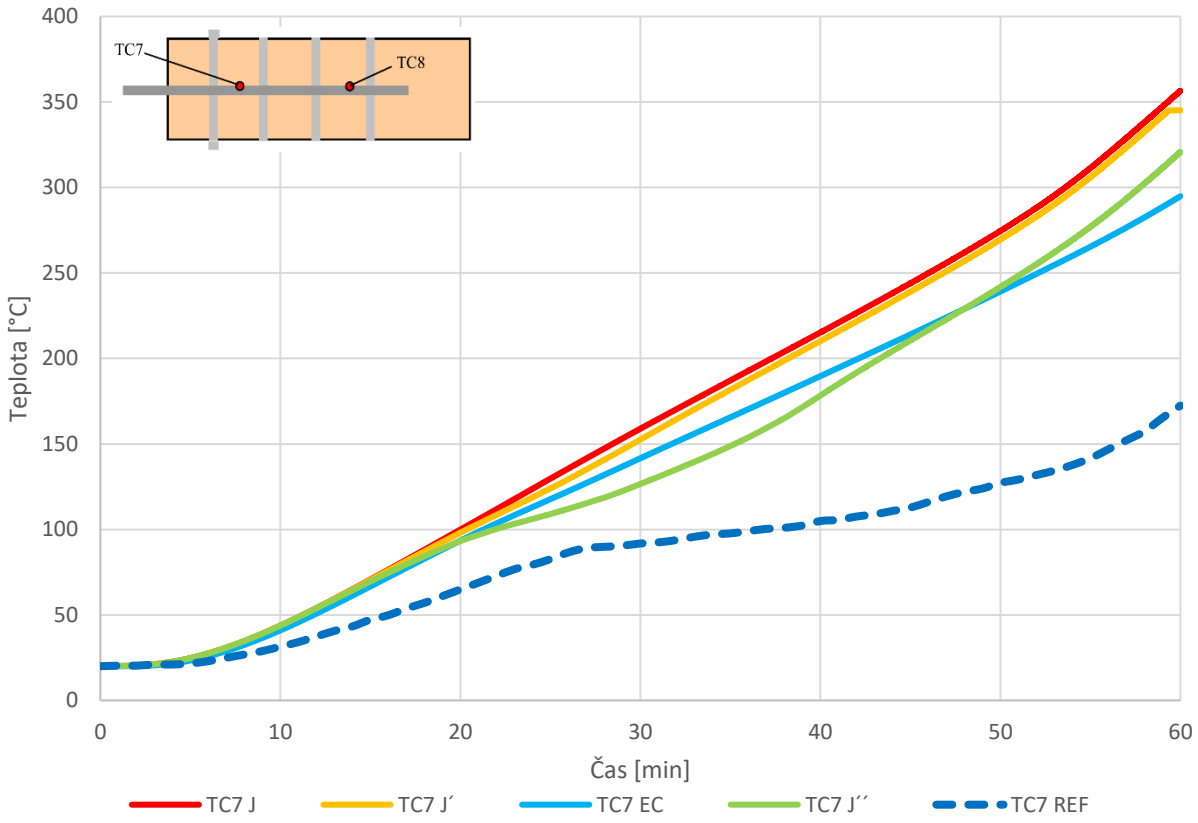


obr. 66 Průběh teplot na TC6 - model B

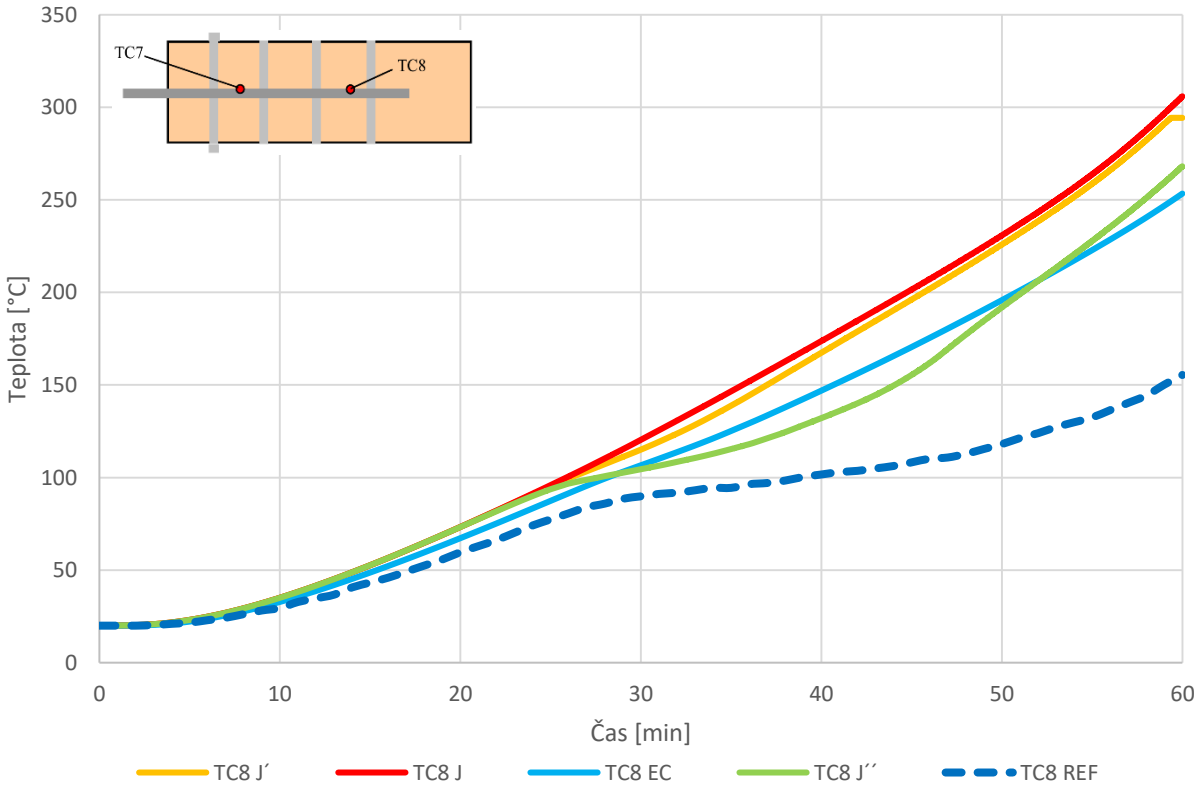
Na TC 7 a TC8 dochází ke zpomalení prohřívání plechu. Tento jev je způsoben akumulací vodních par v důsledku působení plechu jako parozábrany. Model podle materiálových vlastností dle EC5 a Jansense bez úpravy tuto akumulaci vodních par nezohledňuje. Modifikace měrné tepelné kapacity na 100 kJ/kgK při 100 °C podle Jansense lépe interpretuje zpomalený nárůst teploty. Tvar křivky teploty podle Jansense s upravenou měrnou tepelnou kapacitou je podobný referenčnímu modelu s rozdílem teplot o cca 50 °C do 45 minuty. U TC7, který je mezi svorníkem a kolíkem, jsou teploty vyšší po 45 minutě o více než 100 °C. Rozdíl je patrně způsoben možnou odlišnou geometrií hlavy svorníku, která nebyla podrobně popsána ve studii.

<u>Vysvětlivky ke grafům:</u>

REF - teploty z modelu studie [1];
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense;
J´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dle EC5 při 100 °C dřeva u plechu;
J´´ - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 67 Průběh teplot na TC7 - model B



obr. 68 Průběh teplot na TC8 - model B

6.2.5 Vyhodnocení modelu spoje B

Z výsledků je viditelné, že model podle materiálových vlastností Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dřeva u plechu na 100kJ/kgK do 45 minuty odpovídá referenčnímu modelu s přesností do 50 °C. Tento model částečně zahrnuje vliv akumulace vlhkosti u plechu. Naproti tomu teploty modelu s materiálovými vlastnostmi EC5 jsou při této geometrii výrazně nižší. U modelu podle Jansense není zpoždění nárůstu teplot u plechu dostačující, a teploty jsou zde vyšší o více než 50 °C. Model nepočítá s transportem vodních par, pouze s materiálovými vlastnostmi dřeva. Pro zpřesnění výsledků by bylo nutné provést analýzu vlivu tloušťky upravené oblasti dřeva u plechu a následně její optimalizaci.

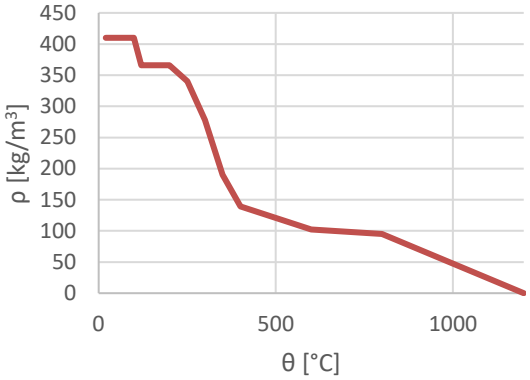
Referenční model byl validován na základě již provedených zkoušek. Podle referenčního modelu byl vytvořen model v programu ANSYS. Vzhledem k nestejnorodosti dřeva a složitému chování dřeva při zahřívání je 50 °C rozdíl přijatelný. Vstupní parametry modelu dle materiálových vlastností Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dřeva u plechu budou aplikovány na model vlastního spoje. Model vlastního spoje bude dále validován na experimentech popsaných v této práci.

6.3 Model svorníkového spoje

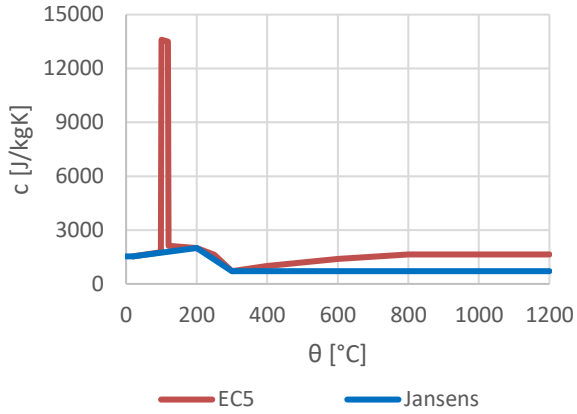
Na základě provedeného experimentu byl zhotoven numerický model zachycující rozvoj teplot ve svorníkovém spoji. Vypočtené průběhy teplot jsou porovnány s naměřenou teplotou na termočláncích spoje.

6.3.1 Materiálové vlastnosti modelu

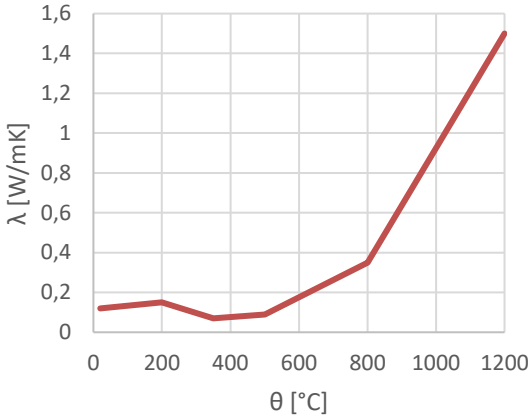
Rozdílem materiálových vlastností oproti modelu spoje B je objemová hmotnost dřeva, kdy u GL28h je rovna 450 kg/m^3 a C24 (z experimentu) kde je rovna 410 kg/m^3 dle [17]. Objemová hmotnost v numerickém modelu experimentu je nastavena v závislosti na teplotě podle EC5, viz obr. 69. Po verifikaci modelu spoje B, kdy se ukázaly některé materiálové vlastnosti dřeva vhodnější, byly provedeny dva výpočty se dvěma variantami materiálových vlastností dřeva na modelu experimentu. V prvním výpočtu je počítáno s charakteristikami podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity ve vrstvě u plechu na 100kJ/kgK při 100 °C. Pro porovnání rozdílů od normových materiálových vlastností byl proveden výpočet s materiálovými vlastnostmi podle EC5. Měrná tepelná kapacita je znázorněna na obr. 70, tepelná vodivost dle EC5 na obr. 71 a tepelná vodivost dle Jansense na obr. 72.



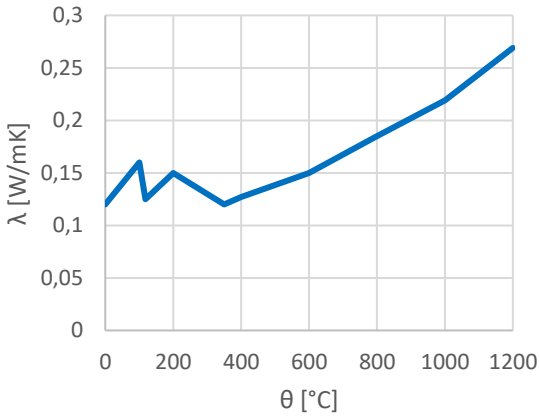
obr. 69 Objemová hmotnost C24



obr. 70 Měrná tepelná kapacita

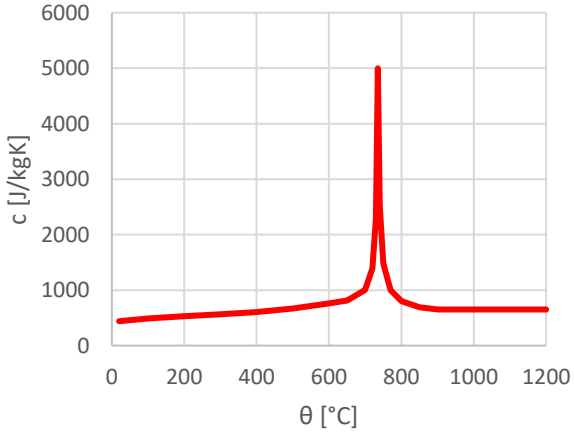


obr. 71 Tepelná vodivost EC5

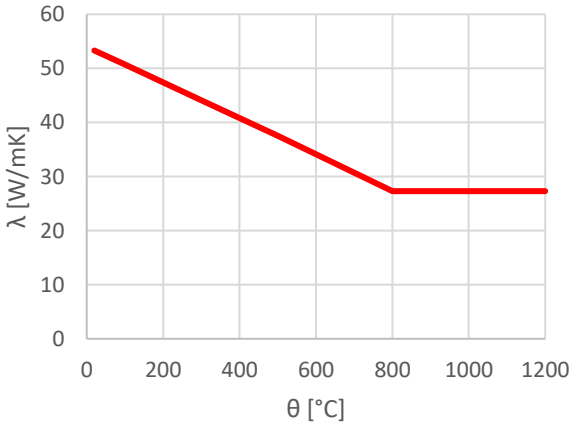


obr. 72 Tepelná vodivost Jansens

V modelu byla použita objemová hmotnost oceli 7850 kg/m^3. Graf měrné tepelné kapacity oceli je na obr. 73 a tepelné vodivosti oceli na obr. 74.



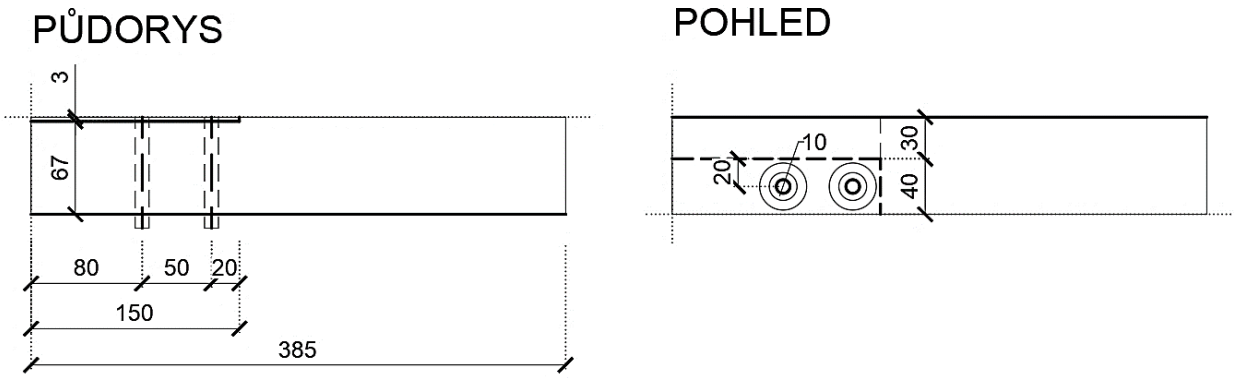
obr. 73 Měrná tepelná kapacita oceli



obr. 74 Tepelná vodivost oceli

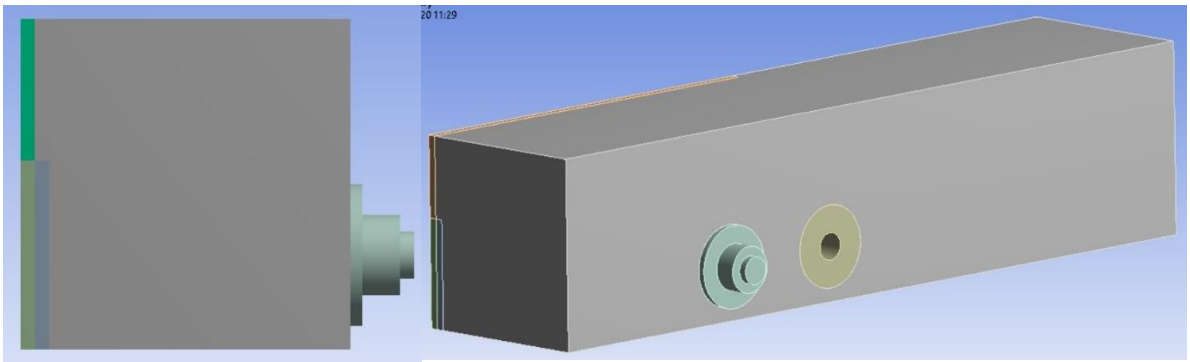
6.3.2 Geometrie modelu spoje

Pro optimalizaci výpočetního času je využito osy symetrie. Ve schématu na obr. 75 je okótována konfigurace svorníkového spoje experimentu pro model.



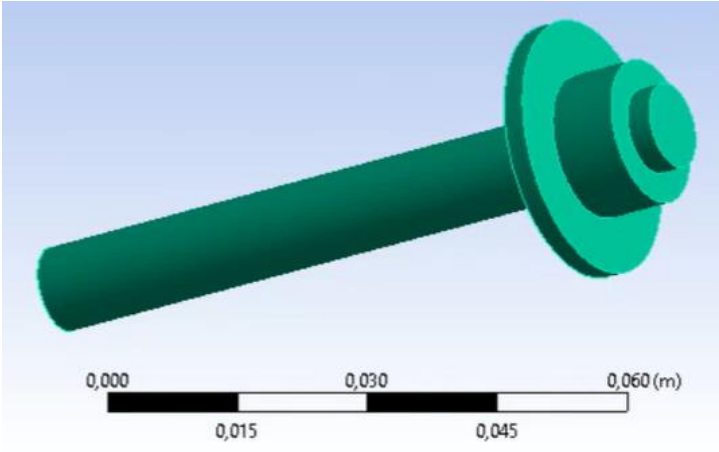
obr. 75 Schéma geometrie experimentu pro model

Geometrie spoje je v modelu tvořena několika komponenty na obr. 76. Samostatný komponent tvoří ocelový plech. Další komponenty tvoří svorníky skládající se ze závitové tyče průměru 10 mm (v modelu zjednodušena), konstrukční podložky průměru 30 mm výšky 2,5 mm. Svorník je držen maticí výšky 8 mm. Matice je v modelu zjednodušena na válec průměru 17 mm. Přesah závitové tyče je v modelu nastaven na 3 mm. Svorník je znázorněn na obr. 77. Dřevěný prvek je rozdělen na několik dalších objektů. Z důvodu eliminace duplicity teplotního zatížení je dřevěný objekt rozdělen na objekt pod svorníkovou hlavou a objekt vystaven teplotnímu zatížení. U plechu se jedná o 3 mm vrstvu dřeva pro lokální úpravu materiálových vlastností dřeva za účelem započítání vlivu akumulovaných vodních par díky parozábraně tvořenou plechem. Tato vrstva je vidět na obr. 76a. Pro započítání vlivu zapuštění plechu na rozvoj teplot je nad vloženou ocelovou deskou modelována vzduchová mezera s defaultním nastavením vlastností programu pro vzduch.



a) Pohled b) Axonometrie modelu

obr. 76 Geometrie modelu - Experiment



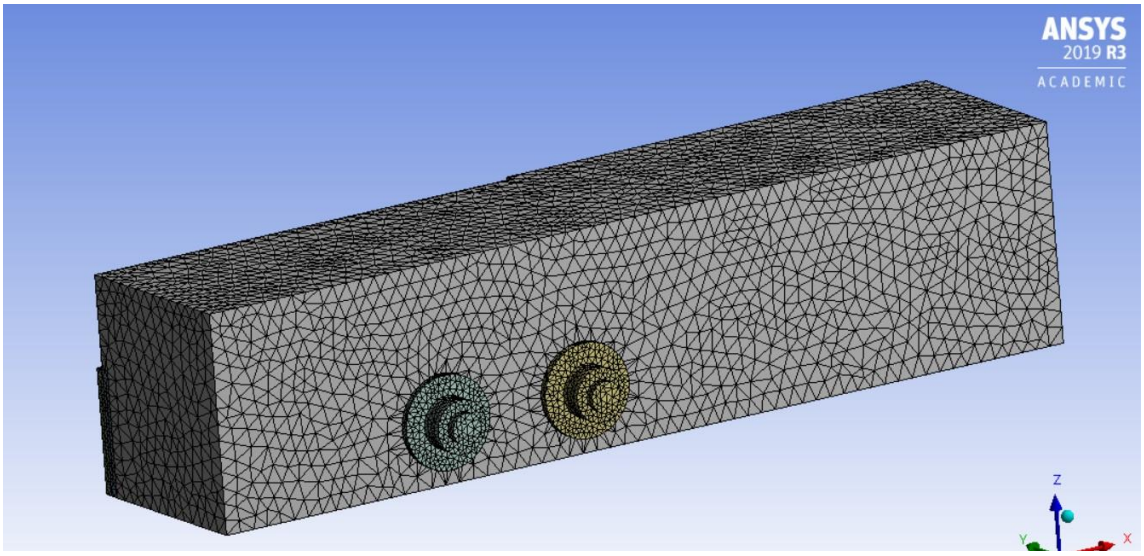
obr. 77 Geometrie svorníku

V tomto modelu byla stejně jako u verifikačního modelu použita tetrahedrální výpočetní síť. Velikost sítě je pro každý objekt nastavena s optimalizací výpočetního času bez ovlivnění výsledných hodnot. Z počátku byla síť nastavena jemnější a postupně byla velikost elementu zvětšována do chvíle přijatelné doby výpočetního času, aniž by síť ovlivňovala výsledky oproti předchozím hodnotám.

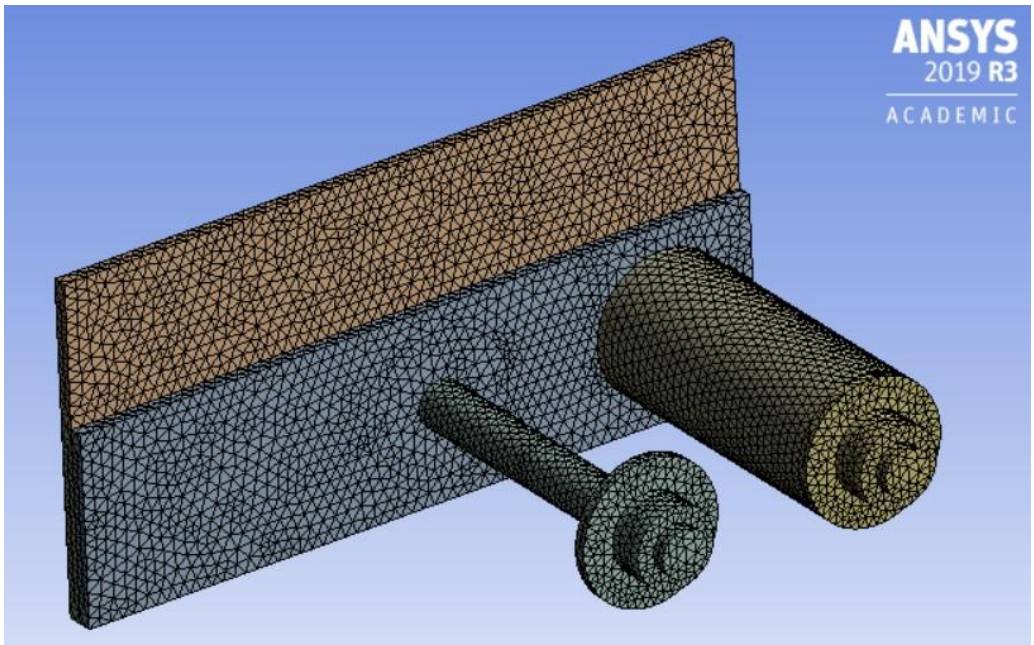
Finální nastavení sítě bylo následovné:

- plech s velikostí elementu 2,5 mm
- svorník s velikostí elementu 2 mm
- vzduchová mezera s velikostí elementu 2,5 mm
- dřevěná vrstva u plechu tloušťky 3 mm s velikostí elementu 2,5 mm
- dřevěný objekt pod hlavou svorníku s velikostí elementu 2,5 mm
- dřevěný hranol s velikostí elementu 5 mm

Síť objektů je na sebe v kontaktu vzájemně napojena a velikost sítě je lokálně upravena, tak aby docházelo k pozvolnému přechodu mezi sítěmi a nedocházelo tak k velkému zkreslení výsledného průběhu teplot, viz obr. 78 a obr. 79.



obr. 78 Nastavení sítě modelu - Experiment



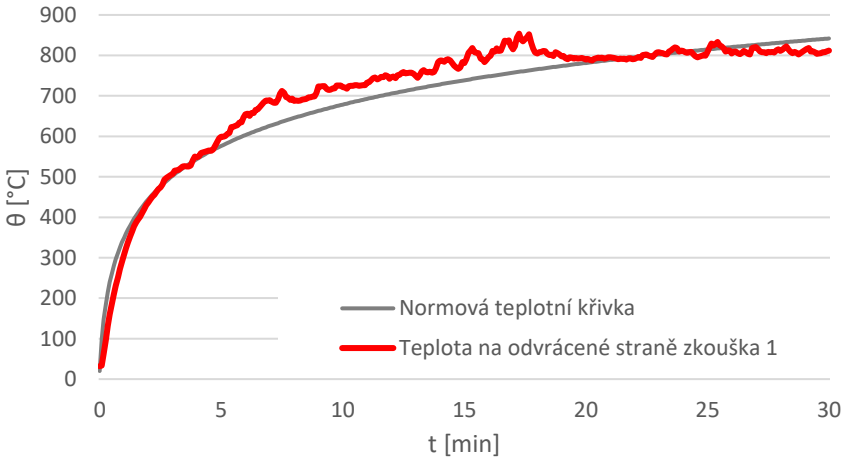
obr. 79 Nastavení sítě modelu - viditelnost plechu a svorníku - Experiment

6.3.3 Teplotní zatížení modelu spoje

Teplotní zatížení bylo aplikováno s přestupovými konstanty pro proudění a sálání uvedenými výše. Jako teplotní zatížení byl v modelu aplikován průběh teplot, naměřený na termočláncích na protější straně pece v úrovni vzorků.

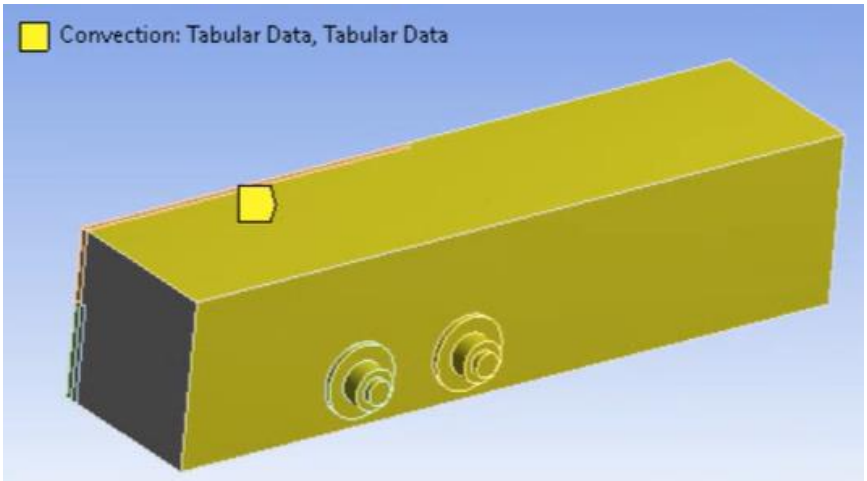
Prvotně byl model zatížen teplotou naměřenou na termočláncích u vzorku. Termočlánky v prostoru pece u vzorku byly ale ovlivněny teplotním přírůstkem z exotermických reakcí dřeva, a byly tak vystaveny plamenům hoření. V důsledku toho se naměřené teploty na termočláncích lišily o více než 200 °C oproti protější straně pece. V důsledku toho vycházely teploty ve vzorku výrazně vyšší než ve vzorku experimentu.

Následně aplikovaný průběh zatížení na obr. 80 se více podobá normové teplotní křivce. Od 5 do 20 minuty je v grafu vidět zvýšení teplot oproti normové teplotní křivce, které bylo způsobeno hořením vzorku.

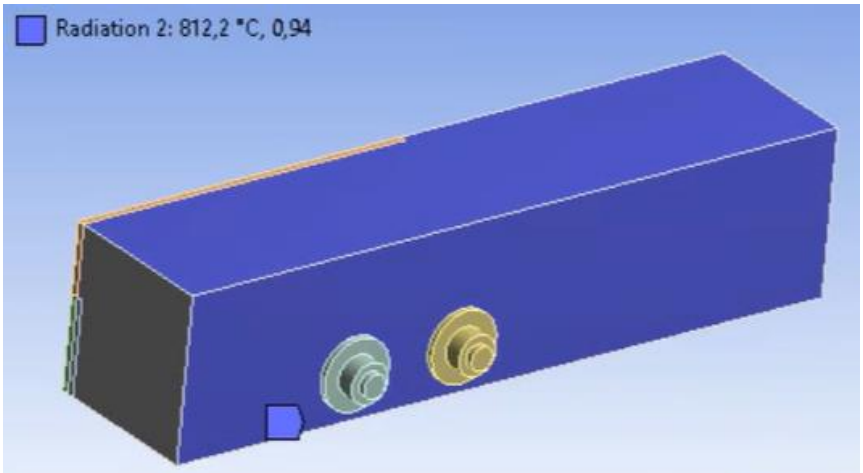


obr. 80 Teplota na protější straně pece - zatížení pro model

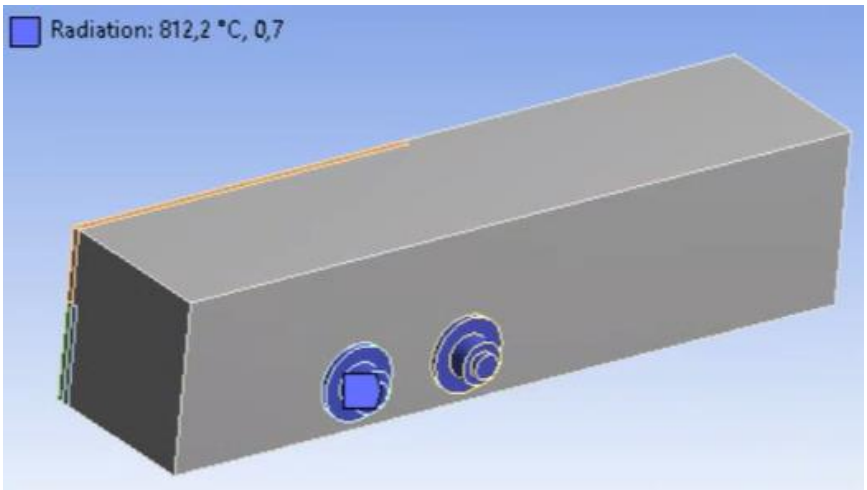
Součinitel přestupu tepla proudění je uvažován 25 W/m^{2}K. Zatěžovaná plocha prouděním je na obr. 81. U zatížení radiací model počítá s emisivitou dřeva 0,94 (zatěžovaná plocha na obr. 82) a u oceli s emisivitou 0,7 (zatěžovaná plocha na obr. 83). Vzduchová mezera je zatížena přímo teplotou, viz obr. 84. U nezatížených ploch je nastaven nulový tepelný tok.



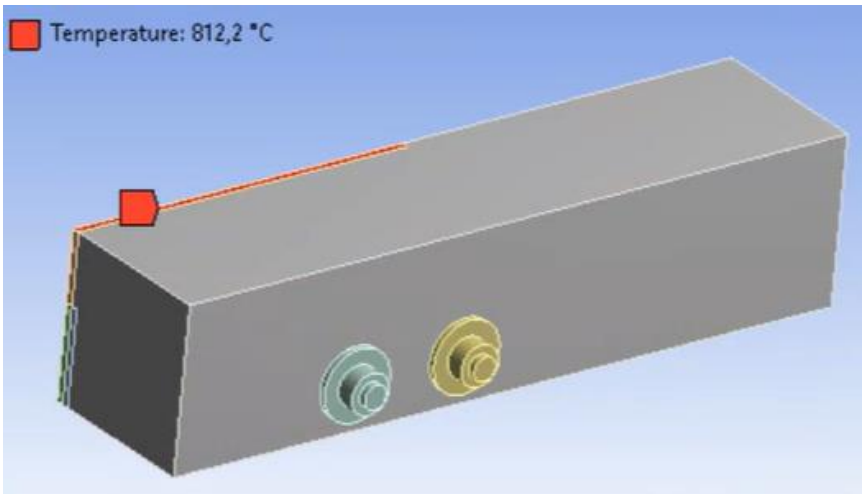
obr. 81 Plocha zatížena prouděním (v 30 minutě)



obr. 82 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,94 (v 30 minutě)



obr. 83 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,7 (v 30 minutě)



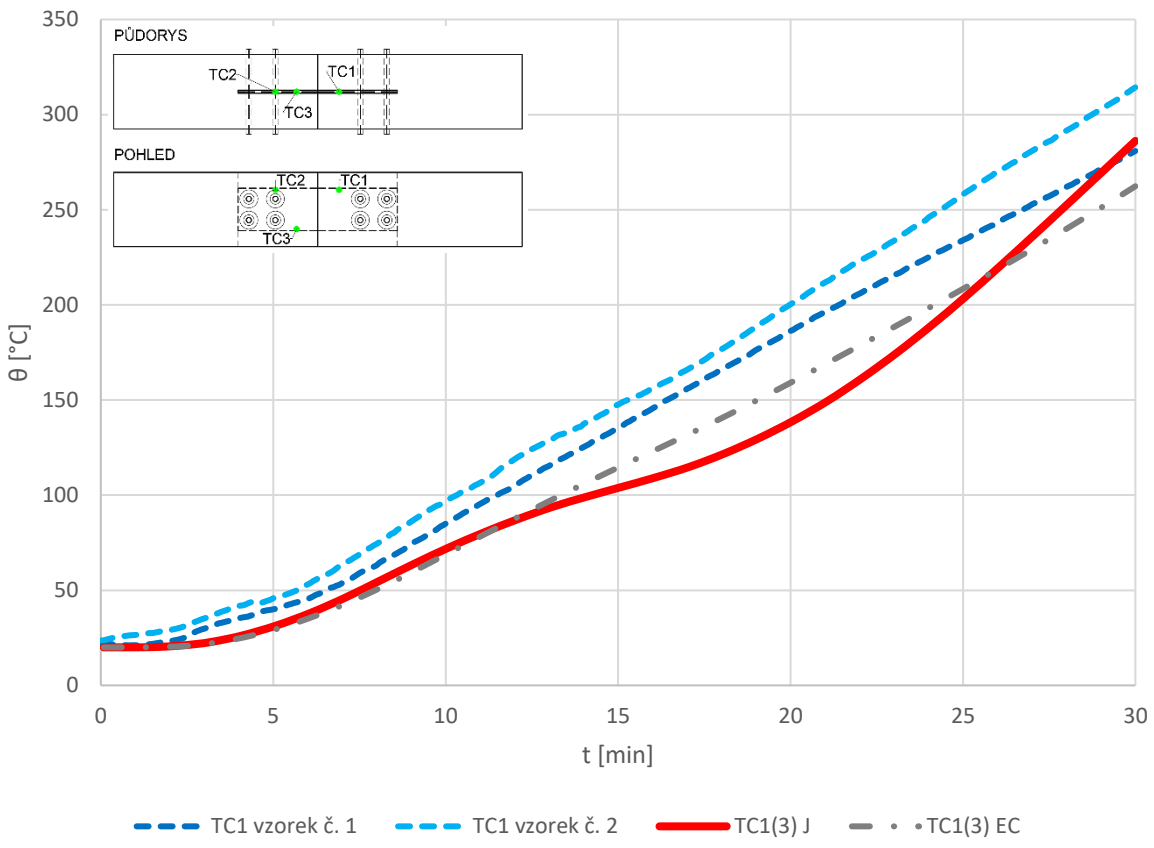
obr. 84 Plocha zatížena přímo teplotou (v 30 minutě)

6.3.4 Výsledné průběhy teplot spoje B

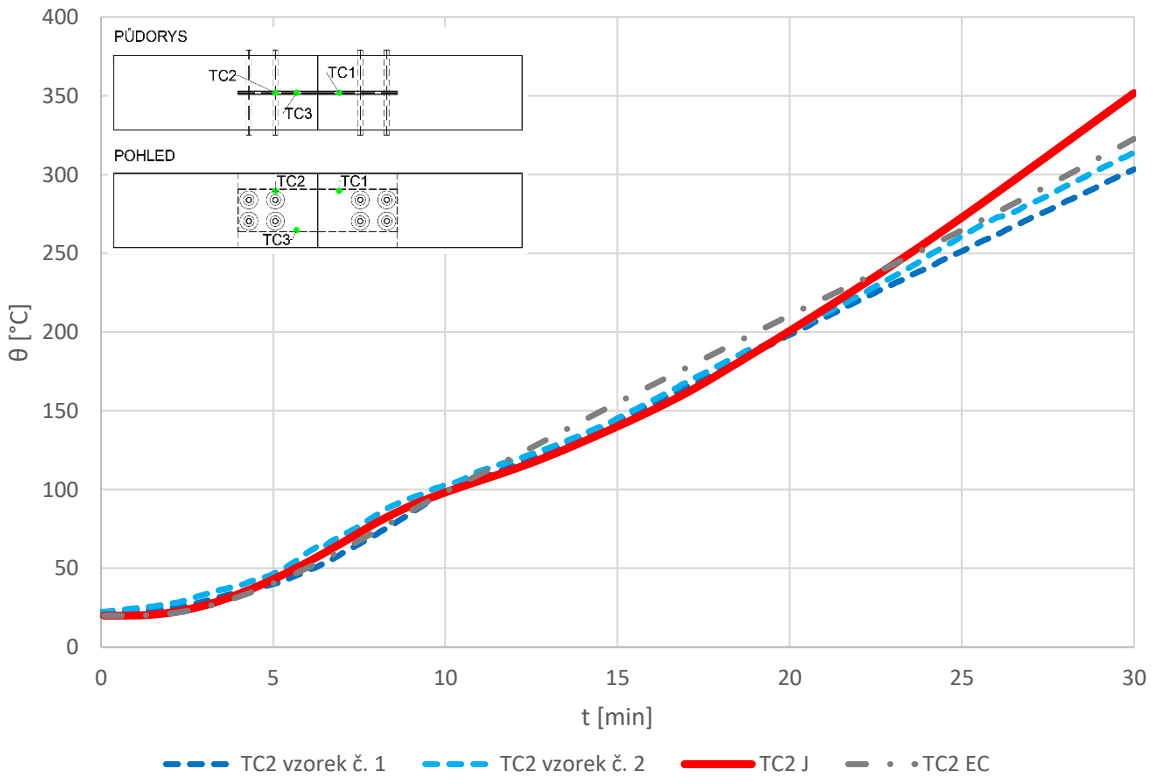
Termočlánek TC1, TC2 a TC3 měří teploty na plechu. Výsledné průběhy teplot v místě termočlánků jsou uvedeny pro TC1 na obr. 85, pro TC2 na obr. 86 a pro TC3 na obr. 87. Dle modelu s materiálovými vlastnostmi Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity dřeva u plechu dochází ke zpomalení nárůstu teplot vlivem započítání akumulace vlhkosti. Zároveň je znatelný vliv zapuštění ocelové desky do plechu, kdy se po 30 minutě pohybuje teplota ocelové desky kolem 300 °C. V modelu v 30 minutě nedochází k odchylce vůči naměřeným teplotám při experimentu. Pro zpřesnění zpoždění nárůstu teploty by bylo potřeba provést analýzu vlivu tloušťky dřeva s modifikací měrné tepelné kapacity v závislosti na velikosti vzorku. Ani průběh teplot dle materiálových vlastností dřeva podle EC5 nevykazuje výrazné odchýlení od neměřených teplot. Pouze nepromítá vliv vodních par. Maximální odchýlení od naměřených teplot je 50°C.

Vysvětlivky ke grafům:

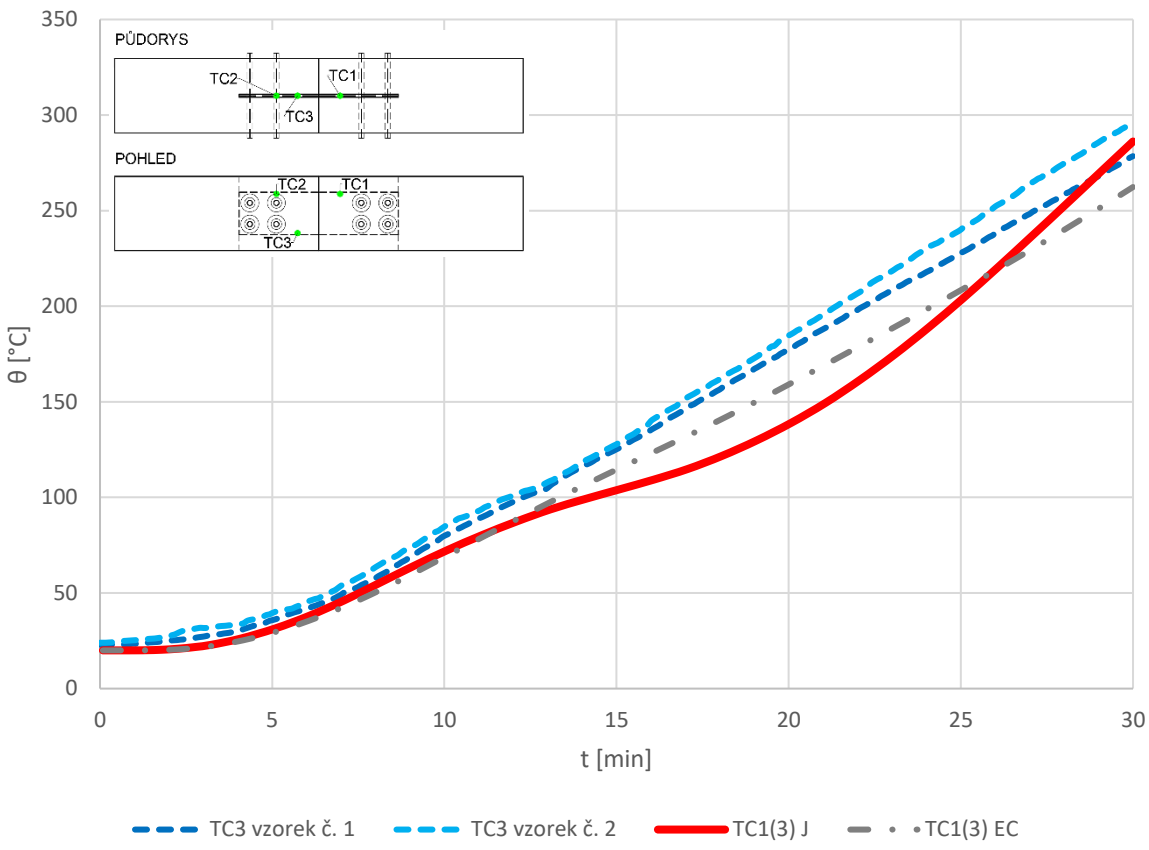
vzorek č. 1 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 1
vzorek č. 2 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 2
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 85 Průběh teplot na TC1 - model Experiment



obr. 86 Průběh teplot na TC2 - model Experiment

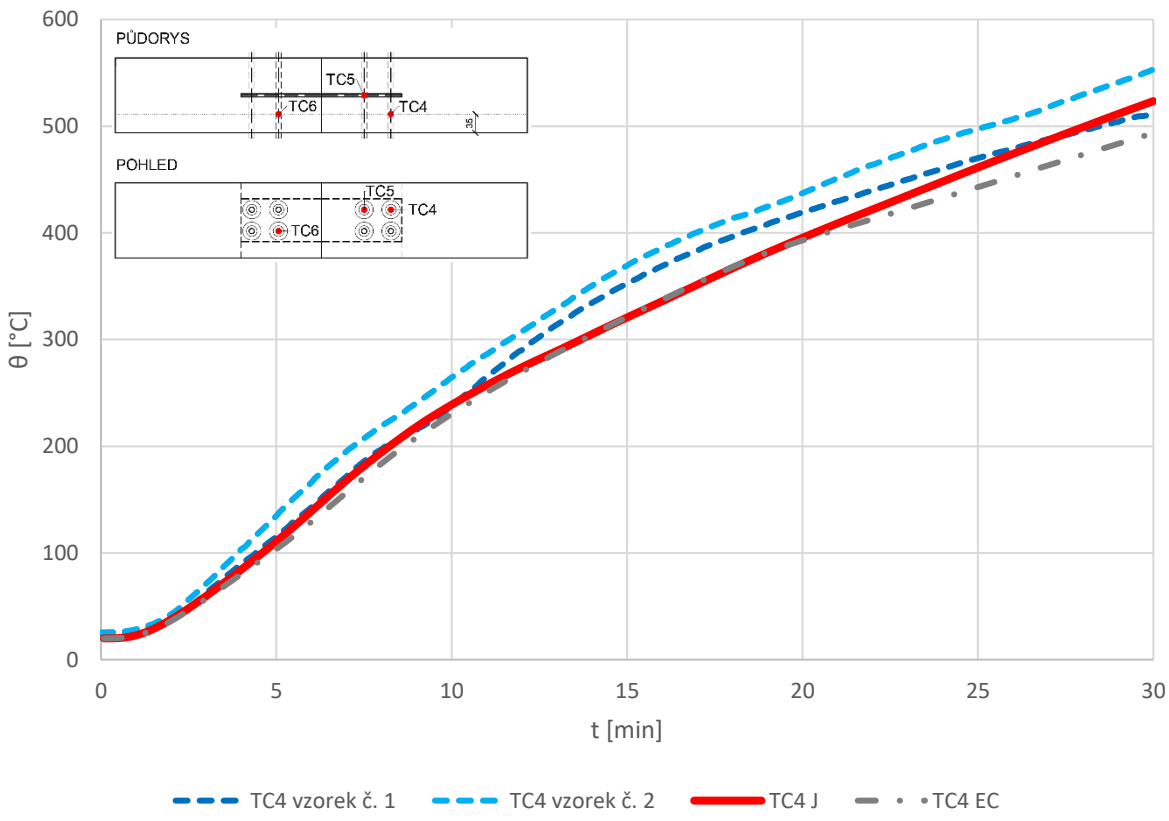


obr. 87 Průběh teplot na TC3 - model Experiment

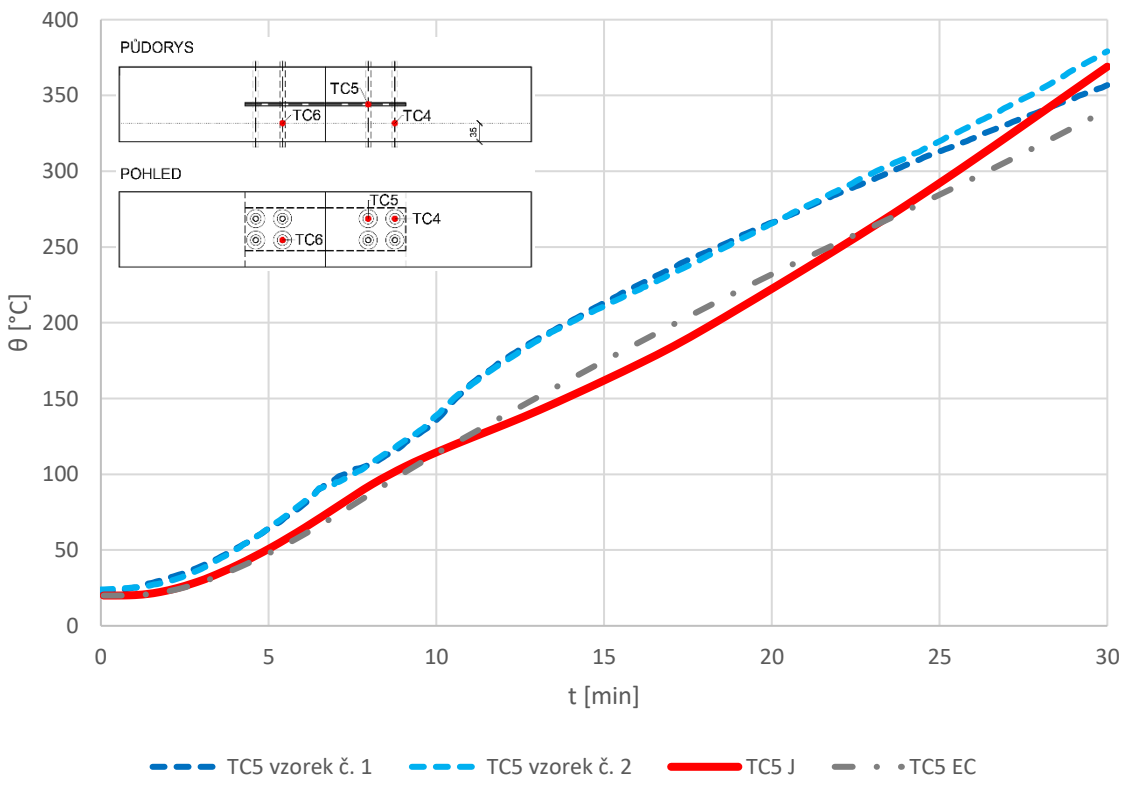
Termočlánek TC4, TC5 a TC6 měří teploty na svorníkách. Výsledné průběhy teplot v místě termočlánků jsou uvedeny pro TC4 na obr. 88, pro TC5 na obr. 89 a pro TC6 na obr. 90. Průběhy teplot podle materiálových vlastností Jansense a EC5 jsou u teplot na svorníku téměř shodné. Oba průběhy jsou blízké naměřeným hodnotám, v několika úsecích téměř shodné. Maximální odchýlení od naměřených hodnot je 50 °C.

<u>Vysvětlivky ke grafům:</u>

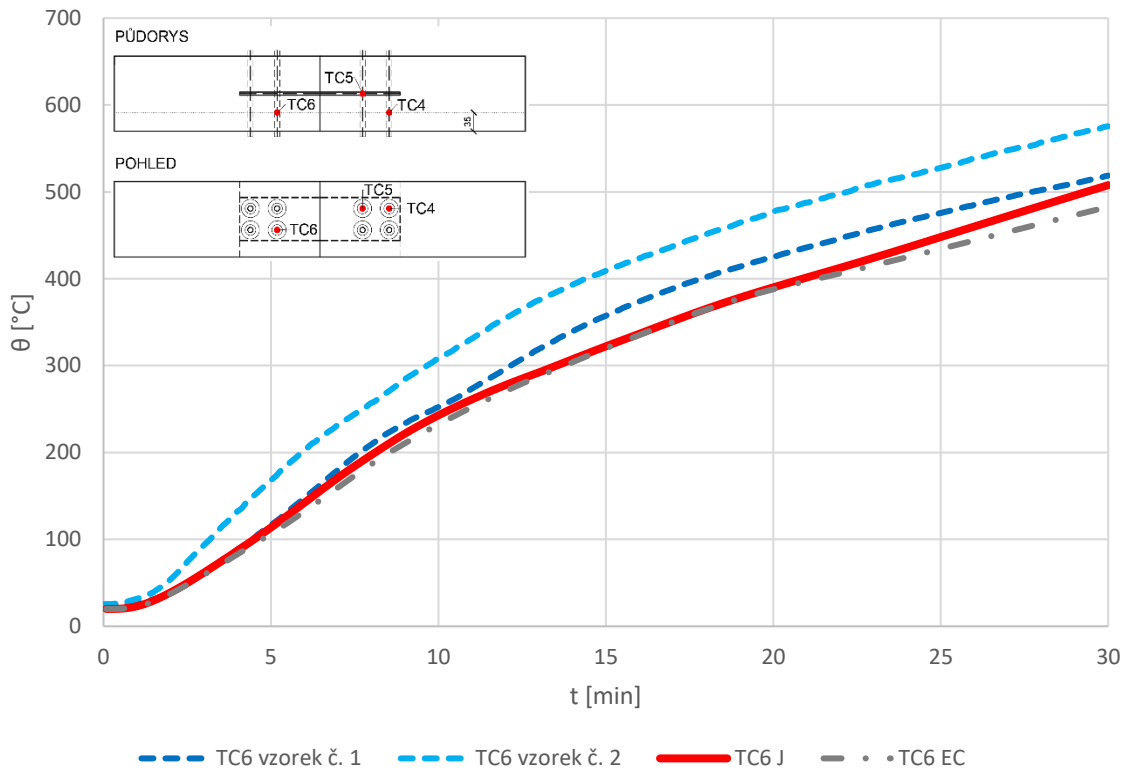
vzorek č. 1 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 1
vzorek č. 2 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 2
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 88 Průběh teplot na TC4 - model Experiment



obr. 89 Průběh teplot na TC5 - model Experiment

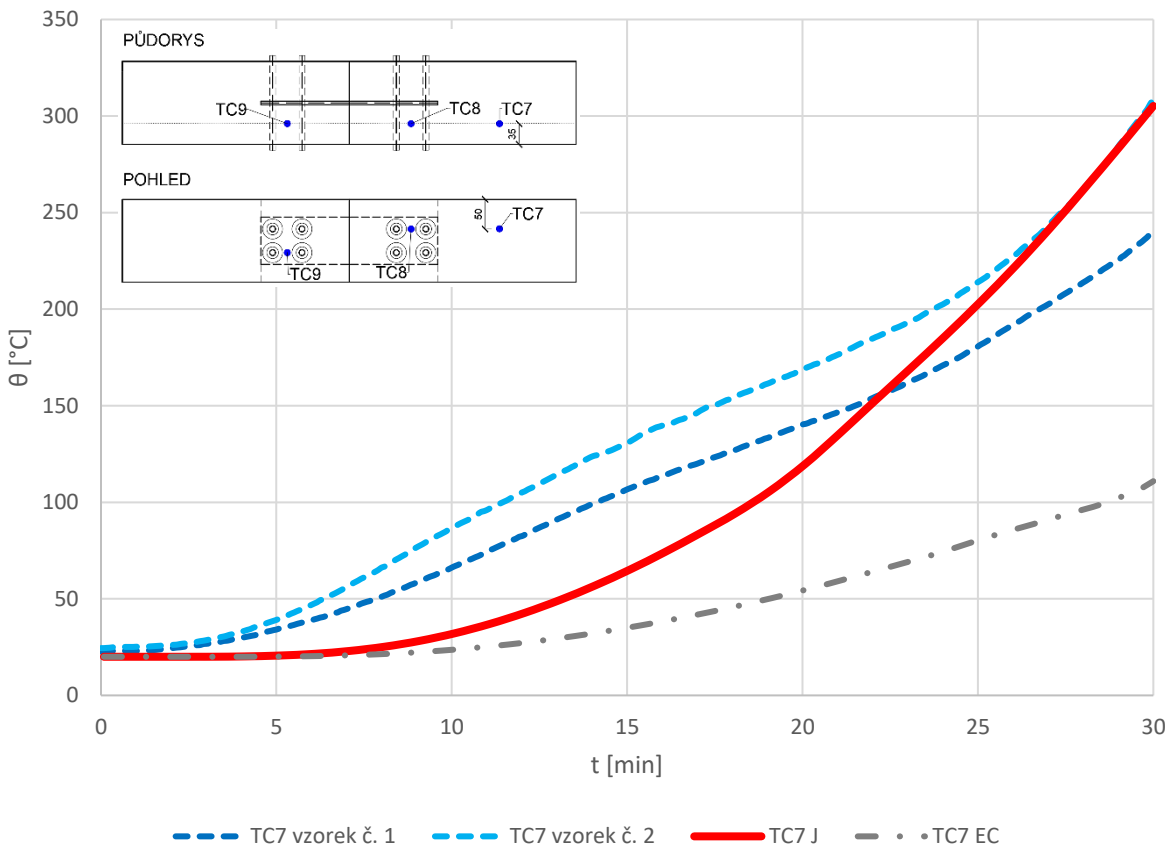


obr. 90 Průběh teplot na TC6 - model Experiment

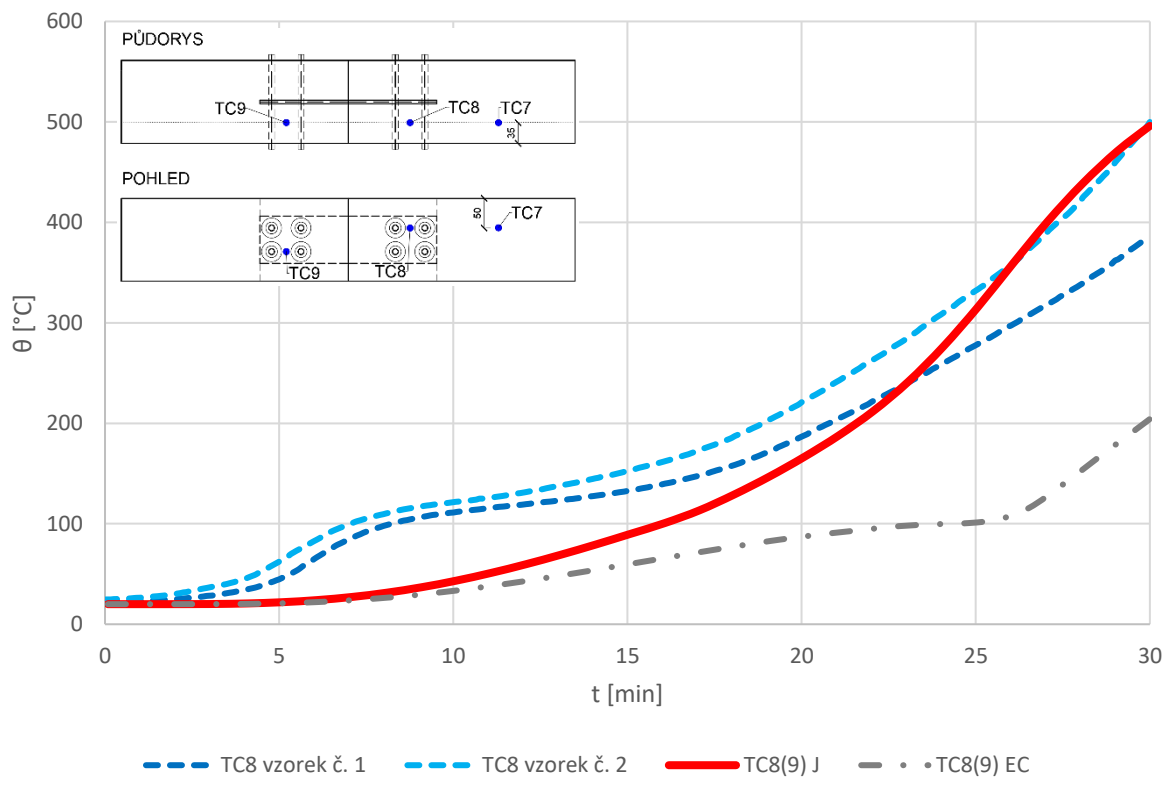
Termočlánek TC7 je umístěn ve dřevě mimo ovlivněnou oblast svorníky. Výsledné průběhy teplot z modelu v oblasti TC7 jsou vyobrazeny na obr. 91. Termočlánky TC8 a TC9 měří teploty ve dřevě mezi svorníky. Výsledné průběhy teplot v místě termočlánků jsou uvedeny pro TC8 na obr. 92 a pro TC9 na obr. 93. V páté minutě experimentu došlo ke vzplanutí vzorku, což mělo za následek vyšší nárůst teplot ve vzorku v důsledku exotermických reakcí dřeva. Nejvíce je tento jev viditelný na TC8 a TC9. Model v programu ANSYS nezohledňuje chemické reakce, které způsobují teplotní přírůstek k teplotnímu zatížení. Model je zatížen pouze teplotním zatížením bez teplotního přírůstku vzorku. U teplot modelu tak nedochází v čase pěti minut ke strmějšímu nárůstu. Průběhy teplot podle materiálových vlastností EC5 jsou v tomto případě výrazně nižší a neodpovídají skutečnosti. Jejich maximální rozdíl oproti experimentu je cca 200 °C. Model podle materiálových vlastností Jansense lépe odpovídá naměřeným teplotám s výjimkou teplotního přírůstku. Od 20 minuty je teplotní nárůst strmější. Vzhledem k rozptylu teplot mezi zkoušeným vzorkem č.1 a č.2 lze konstatovat, že se nejedná o významnou odchylku, jelikož nikterak nepřesahuje teploty vzorku č.2.

<u>Vysvětlivky ke grafům:</u>

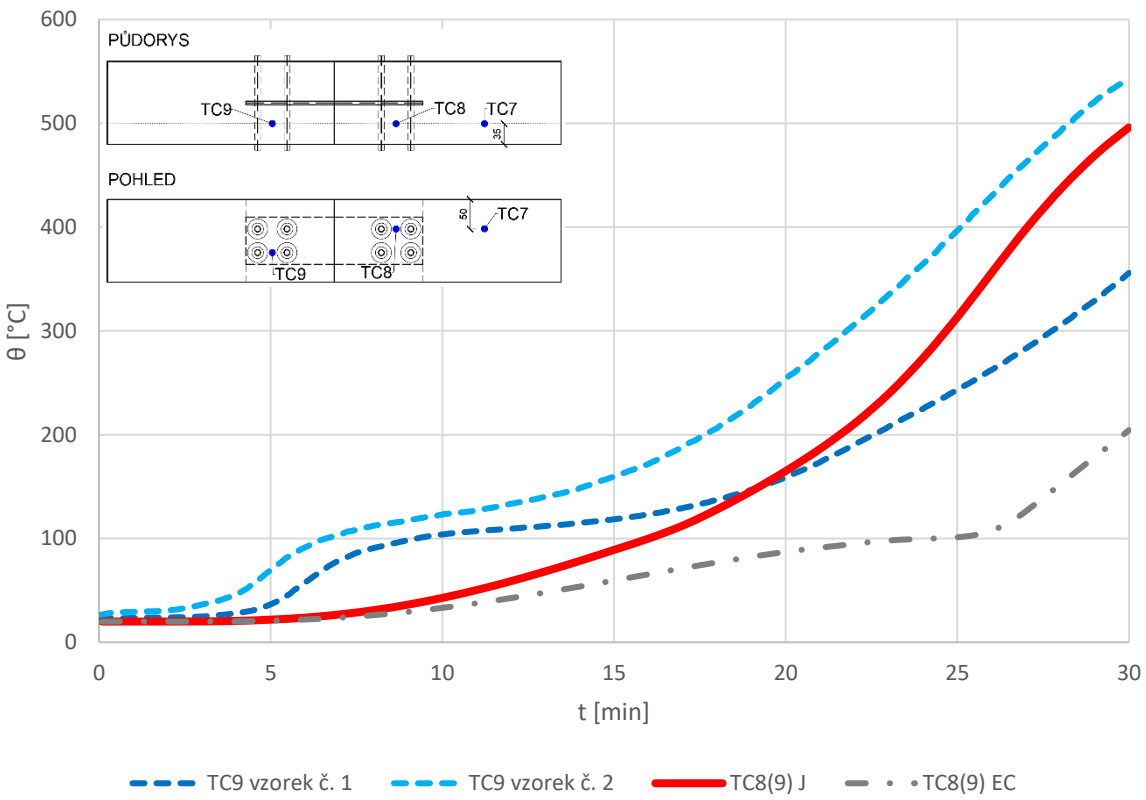
vzorek č. 1 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 1
vzorek č. 2 - teploty z experimentu při zkoušce vzorku č. 2
EC - materiálové vlastnosti dřeva podle EC5;
J - materiálové vlastnosti dřeva podle Jansense s úpravou měrné tepelné kapacity 100 kJ/kgK při 100 °C dřeva u plechu



obr. 91 Průběh teplot na TC7 - model Experiment



obr. 92 Průběh teplot na TC8 - model Experiment



obr. 93 Průběh teplot na TC9 - model Experiment

6.3.5 Vyhodnocení modelu spoje experimentu

Model dobře vystihuje teploty naměřené během experimentu. Rozdíly teplot jsou v rozmezí 50 °C. U této konfigurace spoje vychází teploty plechu a svorníku s materiálovými vlastnostmi dřevěného průřezu podle Jansense podobně jako teploty s materiálovými vlastnostmi dřevěného průřezu dle EC5. Rozdíl nastává ve vypočtených teplotách v dřevěném průřezu, kdy teploty ve dřevě s materiálovými vlastnostmi dle EC5 jsou nižší než teploty ve dřevě s materiálovými vlastnostmi dle Jansense a teploty naměřené v experimentu. Model s materiálovými vlastnostmi dle Jansense tak lépe popisuje chování dřevěného průřezu při teplotním zatížení.

Model má pár omezení, které je nutné zohlednit a při modelování dalších konfigurací svorníkových spojů s vloženou ocelovou deskou je nutné tyto omezení brát v úvahu. Především model nezohledňuje transport vodních par, uvolnění vázané vody a následné kondenzace u plechu. Počítá pouze s materiálovými vlastnostmi v závislosti na teplotě. Akumulované vodní páry a jejich kondenzace u plechu je v modelu započtena modifikací měrné tepelné kapacity dřeva v tloušťce 3 mm u ocelové desky. Měrná tepelná kapacita byla upravena na 100kJ/kgK při 100 °C. Z výsledných průběhů teplot se ukázalo, že v modelu docházelo k většímu zpoždění teplot oproti naměřeným teplotám z experimentu. V modelu spoje B pro změnu bylo zpoždění nedostatečné. Důvodem této nepřesnosti je pravděpodobně měřítko rozměru průřezu, kdy spoj B byl průřezu 160 x 292 mm a spoj experimentu byl průřezu 140 x 140 mm. Tloušťka modifikované vrstvy dřeva byla pro model spoje B a spoje experimentu nastavena na 3 mm. Pro zpřesnění výsledků by bylo nutné provést analýzu vlivu tloušťky upravené oblasti dřeva u plechu a následně její optimalizaci.

Model zároveň nepočítá s exotermickými reakcemi a tím teplotním přírůstkem k zatěžovací křivce. Z toho důvodu jsou teploty dle modelu nižší oproti teplotám naměřených z experimentu. To lze pozorovat především v 5 minutě v grafu TC8 a TC9.

7 Srovnání analytického modelu s numerickým modelem a požární zkouškou

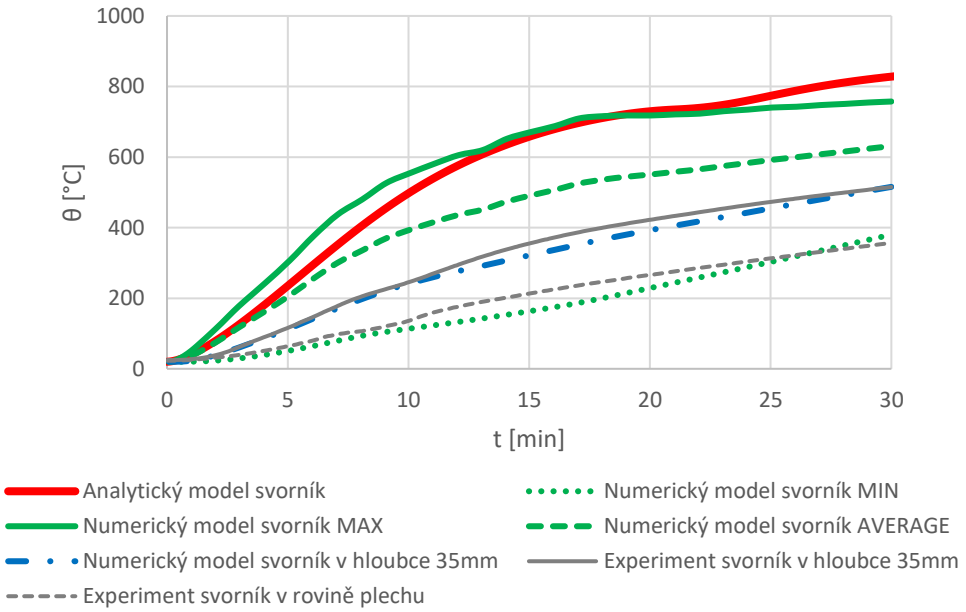
V analytickém modelu má na únosnost velký vliv teplota svorníků. V této kapitole je srovnán analytický model s numerickým modelem.

7.1 Teploty na svorníku

Na únosnosti spoje se podílí únosnost svorníku, která je překročena vznikem plastických kloubů na závitové tyči v místě spojovací desky a ve dřevěném průřezu.

Průběh teplot z analytického modelu pomocí přírůstkové metody odpovídá průběhu maximální teploty ve svorníku vypočteného numerickým modelem na obr. 94. Tyto maximální teploty se vyskytují na povrchu svorníku, na ploše vystavené teplotnímu zatížení. Teplota svorníku v ose průřezu tj. v ose plechu je v numerickém modelu poloviční, i dle naměřených teplot z experimentu. Teploty svorníku, měřené v hloubce 35 mm, jsou dle experimentu a numerického modelu o cca 300 °C nižší než teploty analytického modelu. Plastické klouby by vznikly ve větší hloubce od povrchu než 35 mm.

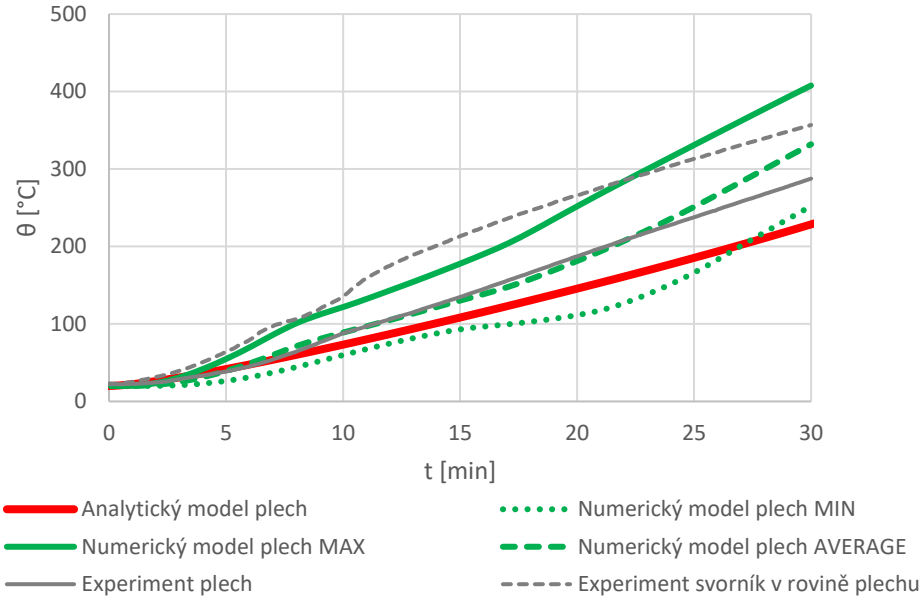
Vypočítaný průběh teplot na svorníku dle analytického modelu je konzervativní.



obr. 94 Srovnání průběhu teplot na svorníku s analytickým modelem

7.2 Teploty na plechu

Teploty na plechu na obr. 95 dle analytického modelu jsou ve 30 minutě nižší o cca 180 °C, než jsou odpovídající teploty v oslabeném řezu plechu, získané z experimentu a numerického modelu. Teploty plechu z analytického modelu jsou počítány přírůstkovou metodou. Podle ní je spočtena teplota oceli na vystavené ploše. Teploty na povrchu plechu dle numerického modelu (numerický model plech MIN) jsou srovnatelné s teplotami analytického modelu. Analytický model nepočítá s teplotním přírůstkem od svorníku. I když jsou teploty v oslabeném místě ve skutečnosti vyšší, nemá to velký vliv na celkové únosnosti. Pouze se únosnost plechu poté bude blížit k celkové únosnosti z kombinace jednotlivých stavů porušení.



obr. 95 Srovnání průběhu teplot na plechu s analytickým modelem

7.3 Zbytkový průřez

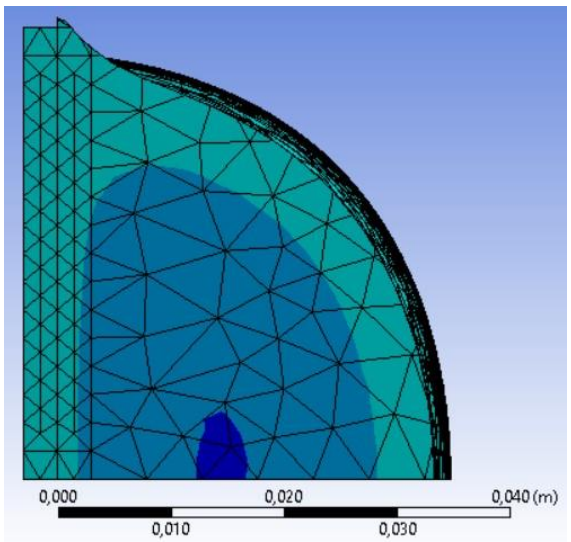
V analytickém modelu je počítáno s konstantní rychlostí odhořívání. Dle analytického modelu odhoří ve 30 minutě 24 mm. Tloušťka zbytkového průřezu t_1 dle analytického modelu ve 30 minutě je rovna 43 mm. Na zkoušeném vzorku, který měřil před zkouškou 140x140 mm (obr. 96), byla po zkoušce naměřena tloušťka t_1 rovna 38 mm mimo svorník (obr. 96) a u svorníku rovna 32 mm (obr. 97). V numerickém modelu je zbytkový průřez uvažován s teplotou dřevěného prvku pod 300 °C. Na obr. 98 je vyobrazena isoterma 300 °C ve 30 minutě mimo svorník. Z toho je odvozena tloušťka t_1 rovna 35 mm mimo svorník. V řezu svorníků je teplota dřevěného průřezu od 20 minuty vyšší než 300 °C. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena dokonalejším přestupem tepla ze svorníků do dřeva. V tab. 10 je porovnána tloušťka zuhelnatělé vrstvy.

tab. 10 Tloušťka t_1 zbytkového průřezu a tloušťka zuhelnatělé vrstvy

Zdroj	Zuhelnatělá vrstva [mm]	Zbytková tloušťka t_1 [mm]
Analytický model	24	43
Numerický model	32	35
Experiment	29(35)	38(32)

obr. 96 Průřez před zkouškou a po zkoušce

obr. 97 Průřez po zkoušce v rovině řezu svorníků



obr. 98 Hranice isotermy 300 °C modelovaného spoje

7.4 Souhrnné vyhodnocení

Analytický model počítá únosnost s teplotou svorníku výrazně vyšší, než jsou naměřené teploty z požární zkoušky. Naopak zbytkový průřez dřeva u svorníku je o 11 mm větší než zbytkový průřez po skončení zkoušky. I když je průřez ve skutečnosti menší než v analytickém modelu, je model na straně bezpečnosti, vzhledem k vysoké odchylce teplot svorníku oproti požární zkoušce.

8 Závěr

V diplomové práci je popsán přístup navrhování spojů podle ČSN EN 1995-1-2 na účinky požáru, který je pro nechráněné spoje omezen na požární odolnost 30 minut. Z důvodu zjištění, že spoje mohou dosahovat vyšší požární odolnosti než 30 minut, byl v rámci této práce vytvořen analytický model pracující na principech přístupu návrhu za běžné teploty, avšak s redukovanými materiálovými charakteristikami jednotlivých komponent. Pro redukční součinitele jsou v modelu teploty ocelových komponent vypočteny dle přírůstkové metody ČSN EN 1993-1-2. Dřevěné prvky jsou redukovány metodou redukovaných vlastností dle ČSN EN 1995-1-2. Výsledné hodnoty analytického modelu jsou porovnány s provedenými zkouškami z předchozích studií. Průměrná odchylka analytického modelu od výsledků zkoušek je 11,6 %. Ta je pravděpodobně zapříčiněna omezeními analytického modelu, jež je nutné brát v úvahu. Model především nezohledňuje vedení tepla z kolíků/svorníků do dřeva, a tím rozdílné odhořívání v oblasti kolíků/svorníků. Dále není zohledněn přestup tepla z kolíku/svorníku do spojovací desky. Toto je nejvíce viditelné na konfiguracích s větším průměrem svorníku a větší hloubkou hrany desky od povrchu, což má vliv na polohový faktor.

Pro zjištění chování spoje při teplotním zatížení byla provedena teplotní analýza pomocí numerického modelu v programu ANSYS. Pro určení přesnosti modelu byl nejdříve modelován kolíkový spoj dostupný z literatury, který byl již modelován a validován. Nejpřesnější výsledky byly dosaženy s materiálovými vlastnostmi dřeva podle Jansense zároveň s lokální úpravou měrné tepelné kapacity na 100kJ/kgK při 100 °C. Teploty z modelu v ANSYSU vycházejí oproti výsledkům z literatury vyšší. Teplotní odchylka se pohybuje v rozsahu 50 °C.

V rámci této práce byl vytvořen numerický model svorníkového spoje s integrovanými poznatky z modelu kolíkového spoje. Pro validační účely modelu svorníkového spoje byla realizována vlastní požární zkouška. Odchylky teplot v modelu jsou od naměřených teplot při požární zkoušce na ocelových komponentech v rozmezí do 50 °C. Nárůst teplot ve dřevěném průřezu modelu byl v počátku nižší než při zkoušce. Model nezohledňuje exotermické reakce dřeva a zároveň transport vodní páry.

Ukázalo se, že vrstva dřeva s lokální úpravou měrné tepelné kapacity měla vliv na průběh teplot. Simulovala přítomnost akumulované vodní páry a její kondenzaci u plechu. Z výsledných průběhů teplot svorníkového spoje se ukázalo, že v modelu docházelo k většímu zpoždění teplot oproti naměřeným teplotám z experimentu. V modelu spoje z literatury pro změnu bylo zpoždění nedostatečné. Důvodem této nepřesnosti je pravděpodobně měřítko rozměru průřezu. Tloušťka modifikované vrstvy dřeva byla pro model spoje z literatury a spoje experimentu nastavena shodně na 3 mm.

Pro zpřesnění modelu by bylo vhodné provést analýzu vlivu tloušťky dřeva u plechu s úpravou měrné tepelné kapacity a následně její optimalizaci.

Analytický model může sloužit k předběžnému určení požární odolnosti. Porovnání analytického modelu s experimentem a numerickým modelem je popsáno v kapitole 7. Numerický model s teplotní analýzou může poskytnout podklad pro budoucí modelování svorníkového spoje s účinky požárního zatížení v kombinaci se silovým zatížením.

Seznam obrázků

obr. 1 Zbytkový průřez svorníkového spoje 7
obr. 2 Jednorozměrová hloubka zuhelnatění:..... 9
obr. 3 Závislost tepelné vodivosti na teplotě [4] 10
obr. 4 Závislost měrného tepla na teplotě [4]..... 10
obr. 5 Poměr hustoty v závislosti na teplotě [4]..... 10
obr. 6 Zvětšení průřezu o přídavnou tloušťku a_{fi} [3]..... 11
obr. 7 Ochrana spoje: 12
obr. 8 Ochrana okrajů ocelové desky:..... 13
obr. 9 Geometrická konfigurace spoje s vloženou ocelovou deskou [1] 14
obr. 10 Deformace spoje A´ za běžné teploty [1] 15
obr. 11 Deformace spoje A´ vystavené účinkům požáru [1] 15
obr. 12 Poloha termočlánků ve spoji;..... 16
obr. 13 Průběhy teplot z termočlánků TC1, TC2 a TC3 [1]. 16
obr. 14 Průběhy teplot z termočlánků TC4, TC5 a TC6 [1]. 17
obr. 15 Průběhy teplot z termočlánků TC7 a TC8 [1]..... 17
obr. 16 Geometrie testovaného spoje sloup-průvlak [8] 17
obr. 17 Schéma provedené zkoušky [8] 18
obr. 18 Polohový faktor vložené ocelové desky závislý na hloubce zapuštění [9]..... 18
obr. 19 Porušený vzorek po zkoušce za běžné teploty [10] 19
obr. 20 Stavy porušení; 19
obr. 21 Porušení blokovým smykem [6] 21
obr. 22 Porušení zátkovým smykem [6] 21
obr. 23 Redukční součinitele materiálových vlastností oceli 25
obr. 24 Geometrická konfigurace spojů 25
obr. 25 Průběh výsledné únosnosti jednotlivých konfigurací v čase 27
obr. 26 Schéma konfigurace spoje experimentu 27
obr. 27 Průběh únosnosti spoje experimentu v závislosti na čase..... 28
obr. 28 Teplota svorníků a ocelové desky dle analytického modelu 29
obr. 29 Geometrie zařízení miniFUR..... 30
obr. 30 Schéma spoje experimentu 31
obr. 31 Schéma uložení vzorku v peci 31

obr. 32 Uložení vzorku v peci ... 32
obr. 33 Umístění termočlánku ve vzorku ... 32
obr. 34 Fotodokumentace přípravy vzorků ... 34
obr. 35 Průběh teplot plynů v peci z referenční zkoušky a normové teplotní křivky ... 35
obr. 36 Průběh teplot plynů v peci ... 35
obr. 37 Průběh naměřených teplot z termočlánků vzorku č.1 a č.2 ... 36
obr. 38 Vzorek před vzplanutím v čase cca 4 minuty ... 37
obr. 39 Vzorek v 5 minutě od iniciace zkoušky ... 37
obr. 40 Vzorek při ukončení zkoušky ... 38
obr. 41 Vzorek po vyjmutí z pece ... 38
obr. 42 Zuhelnatělá vrstva pod svorníkovou hlavou ... 39
obr. 43 Zbytkový průřez vzorku po ukončení zkoušky ve 30 minutě ... 39
obr. 44 Zbytkové průřezy ... 40
obr. 45 Objemová hmotnost GL28h ... 42
obr. 46 Měrná tepelná kapacita ... 42
obr. 47 Tepelná vodivost dle EC5 ... 42
obr. 48 Tepelná vodivost dle Jansense ... 42
obr. 49 Měrná tepelná kapacita oceli ... 42
obr. 50 Tepelná vodivost oceli ... 42
obr. 51 Schéma geometrie spoje B pro model ... 43
obr. 52 Model geometrie spoje B - Axonometrie ... 43
obr. 53 Model geometrie spoje B - Pohled (viditelnost svorníku vypnuta) ... 44
obr. 54 Geometrie svorníku ... 44
obr. 55 Výpočetní síť modelu spoje B ... 45
obr. 56 Výpočetní síť modelu spoje B - viditelnost plechu a svorníku/kolíku ... 45
obr. 57 Plocha zatížena prouděním (v 60 minutě) ... 46
obr. 58 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,94 (v 60 minutě) ... 46
obr. 59 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,7 (v 60 minutě) ... 46
obr. 60 Plocha zatížena přímo teplotou (v 60 minutě) ... 47
obr. 61 Průběh teplot na TC1 - model B ... 48
obr. 62 Průběh teplot na TC2 - model B ... 48
obr. 63 Průběh teplot na TC3 - model B ... 49
obr. 64 Průběh teplot na TC4 - model B ... 50

obr. 65 Průběh teplot na TC5 - model B ... 50
obr. 66 Průběh teplot na TC6 - model B ... 51
obr. 67 Průběh teplot na TC7 - model B ... 52
obr. 68 Průběh teplot na TC8 - model B ... 52
obr. 69 Objemová hmotnost C24 ... 54
obr. 70 Měrná tepelná kapacita ... 54
obr. 71 Tepelná vodivost EC5 ... 54
obr. 72 Tepelná vodivost Jansens ... 54
obr. 73 Měrná tepelná kapacita oceli ... 54
obr. 74 Tepelná vodivost oceli ... 54
obr. 75 Schéma geometrie experimentu pro model ... 55
obr. 76 Geometrie modelu - Experiment ... 55
obr. 77 Geometrie svorníku ... 56
obr. 78 Nastavení sítě modelu - Experiment ... 56
obr. 79 Nastavení sítě modelu - viditelnost plechu a svorníku - Experiment ... 57
obr. 80 Teplota na protější straně pece - zatížení pro model ... 57
obr. 81 Plocha zatížena prouděním (v 30 minutě) ... 58
obr. 82 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,94 (v 30 minutě) ... 58
obr. 83 Plocha zatížena radiací s emisivitou 0,7 (v 30 minutě) ... 58
obr. 84 Plocha zatížena přímo teplotou (v 30 minutě) ... 59
obr. 85 Průběh teplot na TC1 - model Experiment ... 60
obr. 86 Průběh teplot na TC2 - model Experiment ... 60
obr. 87 Průběh teplot na TC3 - model Experiment ... 61
obr. 88 Průběh teplot na TC4 - model Experiment ... 62
obr. 89 Průběh teplot na TC5 - model Experiment ... 62
obr. 90 Průběh teplot na TC6 - model Experiment ... 63
obr. 91 Průběh teplot na TC7 - model Experiment ... 64
obr. 92 Průběh teplot na TC8 - model Experiment ... 64
obr. 93 Průběh teplot na TC9 - model Experiment ... 65
obr. 94 Srovnání průběhu teplot na svorníku s analytickým modelem ... 66
obr. 95 Srovnání průběhu teplot na plechu s analytickým modelem ... 67
obr. 96 Průřez před zkouškou a po zkoušce ... 68
obr. 97 Průřez po zkoušce v rovině řezu svorníků ... 68

obr. 98 Hranice isotermy 300 °C modelovaného spoje 68

Seznam tabulek

tab. 1 Požární odolnost nechráněných spojů [3] 11
tab. 2 Šířky ocelových desek s nechráněnými okraji po dobu požární odolnosti [3]..... 13
tab. 3 Rozměry konfigurací testovaných spojů [1] 15
tab. 4 Dosažené únosnosti testovaných vzorků a vypočtené meze únosnosti [1] 15
tab. 5 Výsledné požární odolnosti jednotlivých konfigurací při stupni využití η [1] 16
tab. 6 Geometrická konfigurace testovaných spojů vložená do analytického modelu 26
tab. 7 Srovnání požární odolnosti dle analytického modelu s experimenty [7] 26
tab. 8 Rozměry konfigurace spoje experimentu..... 28
tab. 9 Požární odolnost spoje v závislosti na stupni využití..... 29
tab. 10 Tloušťka t_1 zbytkového průřetu a tloušťka zuhelnatělé vrstvy 67

Literatura

[1] M. AUDEBERT, D. DHIMA, M. TAAZOUNT a A. BOUCHAIR. Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire. Engineering Structures [online]. **2011**. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029611003361?via%3Dihub

[2] P. RACHER, K. LAPLANCHE, D. DHIMA a A. BOUCHAIR. Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection. Engineering Structures [online]. **2010**. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029609004350

[3] ČSN EN 1995-1-2 Eurokód 5: *Navrhování dřevěných konstrukcí* - Část 1-2: *Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, 2006*

[4] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí* - Část 1-2: *Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených požáru.* 2004

[5] DOC ING. PETR KUKLÍK, CSC. Navrhování dřevěných konstrukcí podle ČSN EN 1995-1-2:2006. 2006

[6] ČSN EN 1995-1-1 Eurokód 5: *Navrhování dřevěných konstrukcí* - Část 1-1: *Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006*

[7] J. Kruppa, T. Lamadon, P. Racher. Fire resistance tests of timber connections. Final report. CTICM, Ref. INC-00/187-JK/NB, Paris; 2000.

[8] P. PALMA, A. FRANGI, E. HUGI, P. CACHIM a H. CRUZ. Fire resistance tests on beam-to-column shear connections. In: 8th International Conference on Structures in Fire [online]. 2014. Dostupné z: https://doi.org/10.3929/ethz-a-010189159

[9] P. PALMA a A. FRANGI. Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain [online]. **2017**. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711217307257?via%3Dihub

[10] M. AUDEBERT, D. DHIMA, M. TAAZOUNT a A. BOUCHAIR. Experimental andnumericalanalysisoftimberconnectionsintension perpendicular tograinin fire. *Fire Safety Journal* [online]. **2014**. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711213002270?via%3Dihub

[11] ČSN EN 1993-1-2 Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí* - Část 1-2: *Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, 2006*

[12] Ing. Jiří Drozda, Ing. Václav Jirsák, Ing. Eva Mašová a Ing. Hana Hasníková. Příručka ANSYS Workbench. B.m.: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2012

[13] TESTO. (2020). *Hodnoty emisivit nejdůležitějších materiálů.* Dostupné 6. 11. 2020 z: https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table

[14] Janssens M. Thermo-physical properties for wood pyrolysis models. Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast, Australia, 1994.

[15] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti, 2016