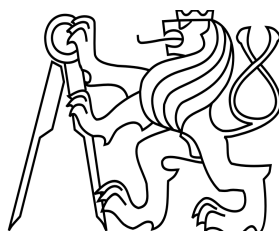


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**VLIV HLOUBKY ZAPUŠTĚNÍ SPOJOVACÍHO
PROSTŘEDKU KOLÍKOVÉHO TYPU DO SPOJE
DŘEVĚNÝCH PRVKŮ**

INFLUENCE OF THE EMBEDMENT DEPTH OF THE PIN-TYPE FASTENER
IN THE JOINT OF WOODEN ELEMENTS

Bc. Lenka Netušilová

vedoucí práce: Ing. Lukáš Velebil, Ph.D.

2023

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Lenka Netušilová

Název diplomové práce: Vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku kolíkového typu do spoje dřevěných prvků

Základní část: Vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku kolíkového typu do spoje dřevěných prvků podíl: 100 %

Formulace úkolů: Stav poznání daného tématu

Požární experiment

Numerický model

Podpis vedoucího DP: [Redacted]

Datum: 22.2.2023

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

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Lukáše Velebila, Ph.D. a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Horáždovicích dne 20. května 2023

.....
Bc. Lenka Netušilová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Velebilovi, Ph.D. za odborné vedení práce a poskytnuté cenné rady. Dále bych ráda poděkovala Ing. Martinovi Hatajovi, Ph.D. za přípravu zkušebních vzorků. Panu Ing. arch. Petrovi Hejtmánkovi, Ph.D. za rady při přípravě a provedení požární zkoušky v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Buštěhradě. A také bych velice ráda poděkovala své rodině za podporu během studia.

Obsah

Abstrakt	3
Abstract	3
Seznam použitých symbolů a zkratk	4
1 Úvod	5
1.1 Cíle práce	6
2 Současný stav poznání	7
2.1 Vlastnosti dřeva	7
2.2 Chování dřeva při zvýšených teplotách	8
2.2.1 Vlastnosti dřeva vystavené požáru	8
2.2.2 Výpočet požární odolnosti dřevěných prvků dle ČSN EN 1995-1-2	11
2.2.3 Ochrana dřeva proti účinkům požáru	11
2.3 Spoje dřevěných konstrukcí	11
2.3.1 Spojovací prostředky kolíkového typu	12
2.3.2 Posouzení spojů dle ČSN EN 1995-1-2	15
2.3.3 Ochrana spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru	15
2.3.4 Selhání spojovacích prostředků	16
2.3.5 Spoje vystavené účinkům požáru	17
3 Experimentální analýza spoje kolíkového typu dřevěných prvků	24
3.1 Popis požární zkoušky	24
3.1.1 Zkušební pec	24
3.1.2 Příprava zkušebních vzorků	25
3.1.3 Umístění termočlánků	28
3.1.4 Umístění vzorků v peci miniFUR	30
3.1.5 Průběh zkoušky	32
3.2 Výsledky zkoušky	33
3.2.1 Vliv hloubky zapuštění	40
3.2.2 Vliv velikosti spojovacího prostředku	45
3.2.3 Vliv druhu spojovacího prostředku	47
3.3 Závěr experimentální analýzy	50
4 Numerický model	51
4.1 Materiálové vlastnosti	52
4.2 Geometrie modelu	53
4.3 Model	54
4.3.1 Výpočetní síť	54
4.3.2 Teplotní zatížení	55
4.3.3 Umístění kontrolních bodů	56
5 Analýza výsledků numerického modelu	57
5.1 Jemnost výpočetní sítě	57
5.2 Porovnání modelu s hodnotami z experimentu	59
5.2.1 Svorník M16	59

5.2.2	Ocelový kolík Ø 16 mm.....	61
5.2.3	Svorník M8	63
5.2.4	Vrut Ø 8mm	65
5.3	Závěr numerického modelu	67
6	Srovnání výsledků s návrhovými postupy	68
6.1	Hloubka zuhelnatění	68
7	Závěr	70
	Seznam obrázků.....	71
	Literatura	74

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá dřevěnými spoji se spojovacími prostředky kolíkového typu vystavené účinkům požáru. V rámci této práce byl proveden požární experiment dřevěného spoje plátováním s mechanickými spojovacími prostředky kolíkového typu. Z výsledků experimentu byla provedena citlivostní analýza, v rámci které byl zkoumán vliv výsušné trhliny, hloubky zapuštění spojovacího prostředku, velikosti a druhu spojovacího prostředku. Dále byl vytvořen numerický model v programu ANSYS, který byl zatížen normovou teplotní křivkou. Numerický model byl validován s požárním experimentem.

Klíčová slova

Dřevěný spoj; spojovací prostředky kolíkového typu; požární odolnost; hloubka zapuštění; teplotní analýza; numerický model; ANSYS Workbench

Abstract

This work deals with wooden joints with pin-type fasteners exposed to the effects of fire. As part of this work, a fire experiment was performed on a wooden joint by plating with mechanical fasteners of the pin type. From the results of the experiment, a sensitivity analysis was carried out, in which the influence of the desiccation crack, the embedment depth of the fastener, the size and the type of fastener was investigated. Then was numerical model created in the ANSYS program, which was loaded with a standard temperature curve. The numerical model was validated with a fire experiment.

Keywords

Wooden joint; pin type fasteners; fire resistance; embedment depth; thermal analysis; numerical model; ANSYS Workbench

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

a_{fi}	tloušťka zesílení průřezu	mm
d	průměr	mm
d_0	tloušťka vrstvy s předpokládanou nulovou pevností	mm
d_{ef}	efektivní tloušťka	mm
$d_{char,n}$	hloubka zuhelnatění	mm
$d_{char,0}$	nominální hloubka zuhelnatění	mm
k_0	součinitel	
k_{flux}	součinitel zohledňující zvětšený tepelný tok	
$k_{mod,fi}$	modifikační součinitel pro požár	
RC	míra zuhelnatění	% min ⁻¹
t	čas	s
t_{ch}	čas do počátku zuhelnatění	min
t_{req}	požadovaná doba požární odolnosti	min
$t_{d,fi}$	doba požární odolnost nechráněného spoje	min

Řecké symboly

ρ	objemová hmotnost	kg/m ³
\emptyset	průměr	mm
β_n	návrhová nominální míra zuhelnatění	mm/min
β_0	návrhová míra zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění	mm/min

Zkratky

EC	Eurokód
TC	Termočlánek (thermocouple)

1 Úvod

Dřevo je přírodní materiál z obnovitelného zdroje, který přispívá k udržitelné výstavbě. Dřevo jako stavební materiál je využíváno již po tisíciletí. V posledních letech vzrostla popularita a poptávka po dřevostavbách. Dřevostavby mají výhodu rychlé výstavby a nižší ceny.

Nejslabším článkem celé konstrukce dřevěných staveb jsou spoje. Typ použitého spojovacího prostředku v přípojích a konstrukčních detailech značně ovlivňuje dimenze spojů a skladbu konstrukcí. Vlastnosti jako tuhost a únosnost konstrukce je závislá ve velké míře na tuhosti a únosnosti spoje. [1]

Kolíkové spojovací prostředky jsou užívané již od historie. Byly používány v konstrukcích lávek, pozemních staveb, mostů a dalších. Z průzkumů dlouhodobého působení těchto spojů bylo vyzorováno, že je vhodné je používat u sanací a rekonstrukcí. Také jsou vhodné pro novostavby. Při správném návrhu kolíkového spoje není spoj slabým místem konstrukce a je možné ho používat na velká rozpětí. Ale v případě nesprávného návrhu mohou být příčinou poruch. [3]

Existuje spousta historických systémů, které spoje se spojovacími prostředky kolíkového typu využívají. Jedná se například o nosíkový systém, rámový systém, oblouková konstrukce, krovy, rozhledny, věžové stavby a mnoho dalších. [1]

Z důvodu členitosti spojů s mechanickými spojovacími prostředky kolíkového typu je problematické předvídat chování spoje při požáru a následné stanovení požární odolnosti. Dřevo je hořlavý materiál, ale má velmi dobrou požární odolnost. Na požární odolnost spoje mají vliv různé parametry, kterými se tato práce zabývá.

1.1 Cíle práce

Hlavními cíli práce jsou:

- 1) Seznámení s problematikou
- 2) Experimentální analýza
- 3) Numerický model

Cílem diplomové práce je souhrn stávající problematiky v oblasti spojů dřevěných prvků se spojovacími prostředky kolíkového typu. V rámci této práce jsou zkoumány teploty ve spojích se spojovacími prostředky kolíkového typu a parametry, které na vývoj teplot ve spoji mají vliv. Práce je zaměřena především na zkoumání vlivu hloubky zapuštění spojovacích prostředků a vlivu zakrytí dřevěnými zátkami. Dalšími parametry, kterými se práce zabývá, je vliv výsušných trhlin, velikost spojovacích prostředků a druh použitých spojovacích prostředků.

V první části této práce je proveden souhrn stávající problematiky.

Další část se věnuje požárnímu experimentu, který se uskuteční v požární laboratoři UCEEB v Buštěhradě. V rámci požárního experimentu jsou navrženy dva zkušební vzorky, které se zatíží normovou teplotní křivkou po dobu 30 minut. Z dat z požární zkoušky bude provedena analýza zabývající se vlivy na vývoj teploty ve spojích.

Další část této práce se věnuje vytvoření numerického modelu v programu ANSYS, který bude validován s požárním experimentem. V poslední části práce budou porovnány zbytkové průřezy vypočtené dle ČSN EN 1995-1-2 [2] a zbytkové průřezy naměřené na zkušebních vzorcích po požárním experimentu.

2 Současný stav poznání

Dřevo je přírodní materiál z obnovitelného zdroje a přispívá k udržitelné výstavbě. V historii bylo jedním z nejvíce používaných stavebních materiálů. V současné době dřevěné konstrukce opět nabývají na popularitě. Problematickým místem dřevěných konstrukcí za požáru jsou spoje, jejichž porušení může vést ke kolapsu celé konstrukce. Proto je důležité se těmito spoji zabývat.

2.1 Vlastnosti dřeva

Dřevo se řadí mezi nehomogenní, anizotropní a organické materiály. Vyznačuje se rozdílnými vlastnostmi v různých směrech. Vlastnosti se výrazně liší ve směru rovnoběžně s vlákny a ve směru kolmo k vláknům. Nejlepší vlastnosti má dřevo ve směru rovnoběžně s vlákny. Jedná se především o tyto vlastnosti:

- Tuhost
- Pevnost
- Nejmenší deformace od účinku teploty
- Sesychání
- Bobtnání.

Mezi tepelné vlastnosti dřeva se řadí tepelná vodivost a teplotní délková roztažnost. Dřevo má dobré tepelně izolační vlastnosti. Je pórovité a má malou objemovou hmotnost. Z tohoto důvodu je tepelná vodivost dřeva malá. Také teplotní délková roztažnost je malá. Proto není potřeba u dřevěných konstrukcí uvažovat s účinky od teplotních změn a navrhovat dilatační spáry. [3]

2.2 Chování dřeva při zvýšených teplotách

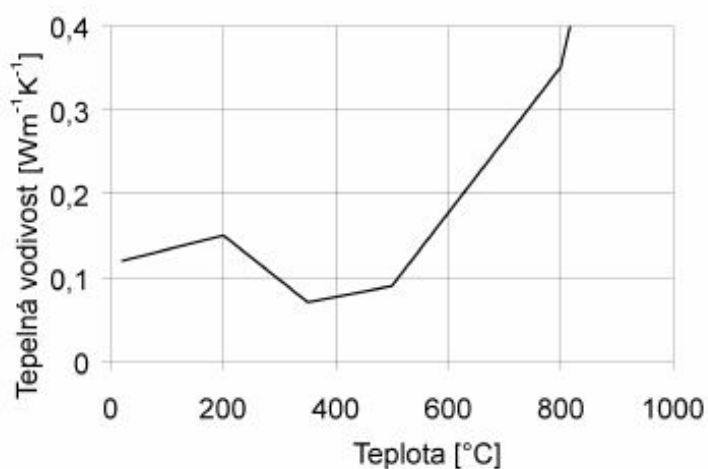
2.2.1 Vlastnosti dřeva vystavené požáru

Dřevo je hořlavý materiál, který je zápalný. Únosnost a tuhost dřeva při požáru jsou velmi dobré. Při vystavení konstrukčních prvků ze dřeva a materiálů na bázi dřeva požáru, dojde ke vzplanutí a silnému hoření, dokud se na povrchu nevytvoří zuhelnatělá vrstva. Zuhelnatělá vrstva funguje jako tepelná izolace. Tímto zuhelnatělá vrstva brání přístupu vzduchu do vnitřní části průřezu a zapříčiňuje tlumení hoření. Na Obr. 1 jsou zobrazeny vrstvy dřeva vystaveného požáru. [3]



Obr. 1- Změna dřeva vytaveného požáru [3]

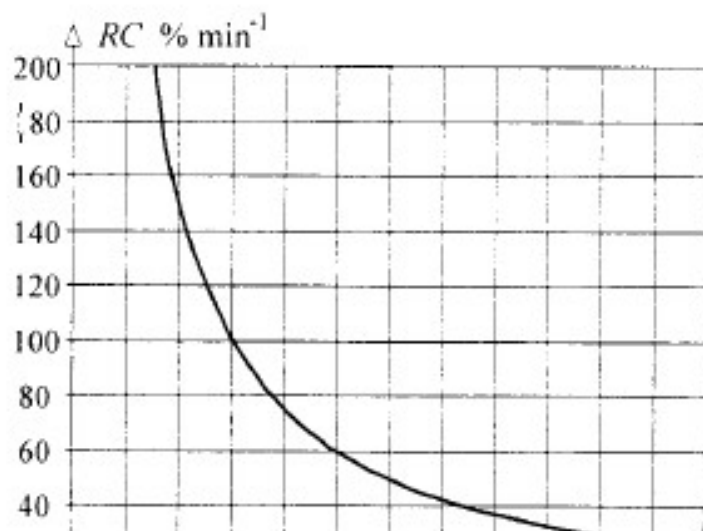
Díky izolační schopnosti zuhelnatělé vrstvy je tepelná vodivost nižší (Obr. 2), důsledkem je téměř nezměněná teplota ve zbytkovém průřezu. Změna únosnosti je dána redukcí průřezu. Odolnost dřeva a materiálů na bázi dřeva je dána hloubkou zuhelnatění a rychlostí zuhelnatění. Při požáru nedochází k praskání dřeva ani k významně zvýšenému sesychání. Z tohoto důvodu nedochází k tvorbě trhlin a povrch je uzavřený. [3]



Obr. 2- Závislost tepelné vodivosti na teplotě zuhelnatělé vrstvy [2]

Chování dřeva za požáru nelze zjednodušeně popsat. Dřevo má rozdílné chování při rozhořívání než při plně rozvinutém požáru. Rozhořívání je ovlivněné hořlavostí, stupněm zápalnosti, rychlostí šíření plamene po povrchu a mírou předávání tepla. V případě plně rozvinutého požáru jsou již všechny hořlavé materiály ovlivněny ohněm. Během této fáze je požadováno zachování mechanických vlastností materiálu. Dále je požadavkem omezení ohně na místo jeho vzniku. Schopnost odolávat plně rozvinutému požáru je označována jako požární odolnost a je udávána pro konstrukční prvek. [3]

K samovznícení rostlého dřeva je potřeba teplota vyšší než 400 °C. Rostlé dřevo není snadno zápalné. Dřevo je využíváno jako srovnávací materiál pro požární zatřídění. Vlastnosti ovlivňující chování při požáru jsou: tvar, povrch, obvod a rozměr průřezu. Dalšími parametry, které ovlivňují chování dřeva za zvýšené teploty je vlhkost a hustota dřeva. Hustota dřeva ovlivňuje dobu do zapálení ohně. Následné šíření ohně po povrchu je také ovlivněno hustotou dřeva. Na Obr. 3 je zobrazen vztah mezi hustotou a mírou zuhelnatění. Zapálení dřeva je pomalejší s rostoucí hustotou. [3]

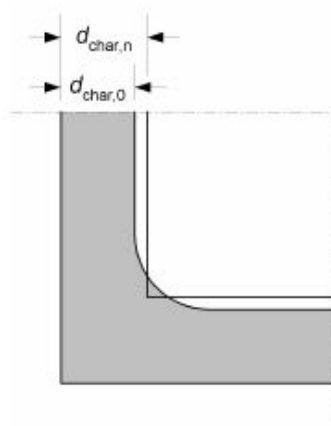


Obr. 3- Vztah mezi hustotou ρ a mírou zuhelnatění RC [3]

Během hoření dřeva dochází k fyzikálně-chemickému rozkladu. Při teplotě mezi 20°C - 80°C je teplý vzduch přiváděn do dřeva a dochází k jeho vysoušení. Za teploty mezi 80°C - 150°C dochází k unikání vodní páry a uvolňování chemicky vázané vody z trhlín, rohů a spojů. Než dojde k odpaření vodní páry, zůstává teplota stálá. Následně se začínají tvořit produkty pyrolýzy při teplotě 150 °C- 200 °C. Tvoří se povrchové plyny složené z 70% nehořlavého CO₂ a 30% hořlavého CO. Než dřevo dosáhne 275°C probíhá pyrolýza pomalu, následně dochází k silné exotermické reakci a dochází k uvolňování zápalné směsi uhlovodíků s výhřevností 8 374 kJ/m³. Po dosažení 400 °C dochází k největšímu uvolňování zápalné směsi s výhřevností až 18 840 kJ/m³. Na dřevě se začne vytvářet zuhelnatělá vrstva a množství vytvořené zápalné směsi klesá. Povrchová úprava má vliv na prohřívání dřeva, např. hladký (ohoblovaný) povrch je zahříván pomaleji než nedokonalý (neohoblovaný) povrch z důvodu snazšího proudění vzduchu kolem průřezu. Dále je prohřívání průřezu ovlivněno ostrotí rohů, nebo zda li je ohřívána plocha kolmá nebo rovnoběžná s vlákny. [3]

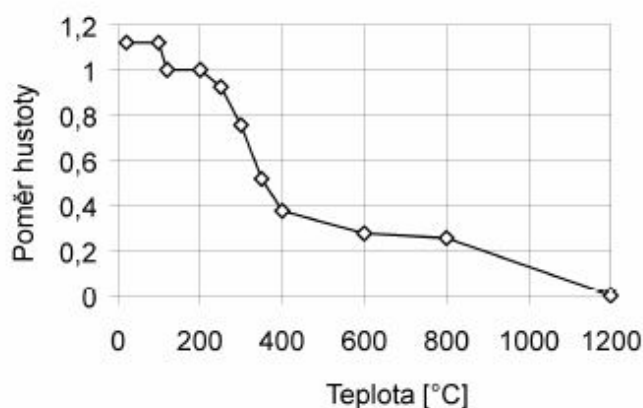
Pevnost a tuhost dřeva je do 300 °C považována za stejnou jako za normální teploty. Hloubka zuhelnatění je stanovena polohou izotermy 300 °C a je definována časem, kdy je

prvek vystaven normovému požáru a rychlostí odhořívání. Hloubka zuhelnatění se dělí na jednorozměrovou hloubku zuhelnatění a nominální hloubku zuhelnatění (Obr. 4). Nominální hloubka zuhelnatění zohledňuje odhořívání rohů a stanovuje ekvivalentní hranatý průřez. [2]



Obr. 4 - Hloubka zuhelnatění $d_{char,0}$ a nominální hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$ [2]

Na Obr. 5 je znázorněn poměr hustoty za požáru k hustotě za běžné teploty v závislosti na teplotě. Do 100 °C je hustota dřeva konstantní. Následně se hustota snižuje vlivem odpařování vody. S rostoucí teplotou dochází k rozpadu dřeva důsledkem pyrolýzy, následně dojde k úplné přeměně na teplo. [2]



Obr. 5 - Závislost poměru hustoty na teplotě [2]

Faktory ovlivňující průběh hoření:

- Průběh požáru
- Druh dřeva
- Rozměry prvku
- Povrchová úprava (protipožární nátěry)
- Typ prvku (rostlé dřevo nebo materiál na bázi dřeva)
- Spoje (tesařské, nebo s ocelovými prvky) [2]

2.2.2 Výpočet požární odolnosti dřevěných prvků dle ČSN EN 1995-1-2

ČSN EN 1995-1-2 [2] stanovuje dvě metody pro výpočet požární odolnosti dřevěných prvků vystavených účinkům požáru. Metoda redukovaného průřezu posuzuje účinný průřez, který je stanoven ze zbytkového průřezu a zmenšený o povrchovou vrstvu 7 mm, která je tvořena během prvních 20 minut požáru. Pevnost prvku je spočtena pomocí mechanických vlastností dřeva za běžné teploty. Další metodou je metoda redukovaných vlastností. U této metody jsou mechanické vlastnosti zbytkového průřezu redukovány součinitelem $k_{mod,fi}$ a je závislý na poměru obvodu a průřezové plochy. [2]

2.2.3 Ochrana dřeva proti účinkům požáru

Dřevo a materiály na bázi dřeva se řadí mezi hořlavé materiály. K ochraně dřeva před účinky požáru se používají protipožární nátěry. Jedná se o chemické prostředky, které snižují hořlavost dřeva nebo zamezují šíření plamene po povrchu. Dělí se do dvou skupin:

- Amonné soli
- Pěnotvorné vícesložkové systémy

Amonné soli vytváří plynné zplodiny a tím zabraňují přístupu vzduchu. Pěnotvorné prostředky jsou vícesložkové systémy, které se skládají z pojiva, nadouvala a retardéru hoření. Při vyšších teplotách se vytvoří vrstva pěny, která funguje jako izolant. Nejúčinnější jsou pěnotvorné prostředky. Mají nejdelší životnost a vzhled ošetřeného dřeva je přijatelný. Mezi retardéry hoření patří bór, který má také biocidní účinky. Z důvodu vlivu na vzhled dřeva jsou některé typy retardéru nevhodné u památkových objektů. Jedná se především o amonné soli, které způsobují korozi dřeva. [3]

Dřevěné konstrukce je možné chránit pomocí pláště požární ochrany. Požární odolnost dřevěných konstrukcí je možné zvýšit pomocí předimenzováním průřezu, kdy je vytvořena statická rezerva. Dále ochranou vnějšího povrchu obklady, nátěry, protipožárními nástříky nebo omítkovinami. Nebo zakrytím prvků konstrukcemi, například zabudování nosného prvku do konstrukce, nebo ochrana zavěšeným podhledem. [3]

2.3 Spoje dřevěných konstrukcí

Prvky dřevěných konstrukcí jsou nejčastěji spojovány mechanickými spojovacími prostředky, tesařskými spoji a lepidlem. Z mechanických spojovacích prostředků se jedná o hřebíky, kolíky, svorníky, vruty a hmoždíky.[3]

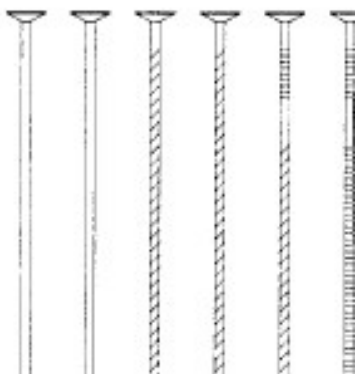
Spoje je možné dělit podle druhu spojovacího prostředku a charakteru působení: spoje poddajné (tesařské spoje, spoje s mechanickými spojovacími prostředky) a spoje nepoddajné (lepené spoje). Dále se mechanické spojovací prostředky dělí na spojovací prostředky kolíkového typu a povrchového typu. [3]

2.3.1 Spojovací prostředky kolíkového typu

Mezi spojovací prostředky kolíkového typu se řadí hřebíky, sponky, svorníky, kolíky a vruty. Při přenášení sil dochází u těchto spojovacích prostředků ohýbání a zatlačování do dřeva. Hmoždíky a desky s prolisovanými trny jsou řazeny mezi spojovací prostředky povrchového typu. U těchto spojovacích prostředků dochází k přenosu sil na povrchu konstrukčních prvků, jelikož jsou do dřevěných prvků zalisovány nebo vkládány. [3]

2.3.1.1 Hřebíky

Nejpoužívanějším spojovacím prostředkem dřevěných konstrukcí jsou hřebíky (Obr. 6). Výroba probíhá různými způsoby, například kování, lisováním, válcováním nebo taháním. Dle způsobu namáhání jsou děleny na namáhané ve smyku a namáhané na vytažení. Hřebíky namáhané na vytažení není možné používat pro hlavní nosné prvky. Využívají se pro pomocné konstrukce, například podhledy. Hřebíky, které jsou namáhány ve smyku, zabraňují vzájemnému posunu spojovaných prvků. Jsou používány v různých délkách, průřezích a úpravách povrchu. Používány jsou bez povrchové úpravy, nebo s povrchovou úpravou (např. galvanizací proti korozi), leptání, cementový povlak nebo plast. Tyto povrchové úpravy zlepšují chování hřebíku. Hřebíky jsou zaráženy ručně, nebo přenosnými pneumatickými hřebíkovačkami. U rostlého dřeva může docházet vlivem zaražení hřebíku k rozštípnutí dřeva. Tomu lze předcházet otupením špičky, nebo předvrtáním otvoru. Podobným spojovacím prvkem jsou sponky, ty mají dva dřívky menšího průměru a jsou zaráženy do dřeva pomocí mechanických nebo pneumatických sponkovaček. Rozmístění hřebíků je dáno normou dle konkrétního spoje. [3]



Obr. 6 - Hřebíky [3]

2.3.1.2 Kolíky a svorníky

Kolíky (Obr. 7a) jsou ocelové tyče, které mohou mít hladký nebo drážkovaný povrch. Minimální průměr kolíku je 6 mm. Předvrtání otvoru se provádí o šířce kolíku. Kolíkový spoj je vhodný pro přenášení sil, je hospodárný a oproti svorníkovému spoji je tužší. [3]

Svorníky (Obr. 7b) jsou kolíky, které jsou na koncích zajištěny hlavou a maticí. Jsou osazovány do předvrtaných otvorů o šířce svorníku (maximálně o 1 mm větší) a následně jsou utahovány, aby došlo k těsnému kontaktu dřevěných prvků. Každý svorníkový spoj je nutné opatřit oboustrannými podložkami o průměru minimálně $3d$ a tloušťce minimálně $0,3d$ (d = průměr svorníku). [3]

Parametry, které mají významný vliv na únosnost spojů, jsou: geometrie spoje, plastický moment únosnosti spojovacího prostředku a pevnost v otláčení dřeva. Pevnost v otláčení je závislá na hustotě dřeva, průměru spojovacího prostředku a úhlem mezi silou a směrem vláken. [3]



a) Ocelový kolík [3]



b) Svorník

Obr. 7 – Svorník a kolík [3]

2.3.1.3 Vrutý

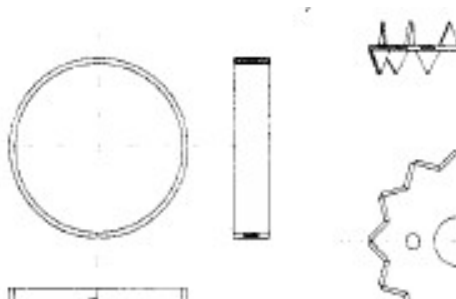
Vrutý (Obr. 8) jsou vhodné pro připojení prvků, které jsou namáhány na odtržení, jelikož mají vyšší únosnost na vytažení než hřebíky. Tyto spoje jsou většinou jedностřížné. Pokud je vrut o větším průměru než 5 mm je nutné jej zašroubovat, aby nedošlo k rozštípnutí dřeva. Při namáhání na střih mají vrutý nižší únosnost než hřebíky nebo kolíky. Únosnost vrutý v ohybu závitové části je menší než únosnost plného dřívku. [3]



Obr. 8 – Vrutý

2.3.1.4 Spoje s hmoždíky

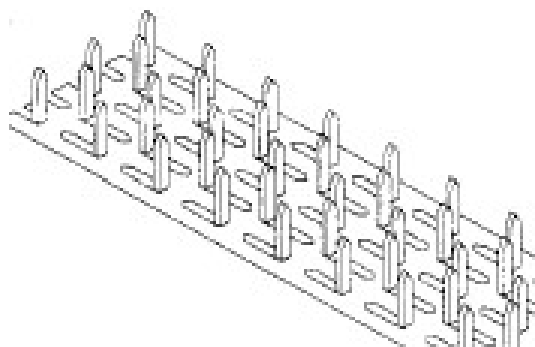
Hmoždíky (Obr. 9) jsou vkládány nebo zatlačovány do spár mezi dřevěnými prvky. Používají se především se svorníky, které prvky vzájemně spínají. [3]



Obr. 9 – Vložený hmoždík [3]

2.3.1.5 Spoje s deskami s prolisovanými trny

Nejefektivnějším způsobem náhrady klasického tesařského spoje a sbíjené příhradové konstrukce je spoj s deskami s prolisovanými trny (Obr. 10). Tento spoj je ekonomičtější a také lépe využívá pevnost dřeva. Proto dochází k snížení spotřeby dřeva a konstrukce mohou být levnější. Spoje jsou známe pod názvem Gang nail. Návrh a posouzení spoje probíhá pomocí počítačových programů. Tento druh spoje nemá dobré chování při požáru. [3]



Obr. 10 – Deska s prolisovanými trny [3]

2.3.2 Posouzení spojů dle ČSN EN 1995-1-2

V normě ČSN EN 1995-1-2 [2] jsou pro nechráněné spoje, které vyhovují požadavkům ČSN EN 1995-1-1 [4] za běžné teploty, uvedena zjednodušená pravidla pro posouzení požární odolnosti. Jsou zde uvedené přímé hodnoty a opatření pro dosažení požární odolnosti. Tyto požární odolnosti je možné navýšit až o 30 minut, pokud je zesílen průřez o rozměr a_{fi} dle vztahu:

$$a_{fi} = \beta_n k_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}) [2]$$

Kde:

β_n	rychlost zuhelnatění
k_{flux}	součinitel zohledňující zvětšený tepelný tok skrz spojovací prostředek, je roven 1,5
t_{req}	požadovaná požární odolnost spoje v minutách
$t_{d,fi}$	doba požární odolnosti nechráněného spoje.

Dále musí být splněna podmínka, že spojovací prostředky nesmí vyčnívat. [2]

2.3.3 Ochrana spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru

Požární odolnost dřevěných konstrukcí je z velké míry ovlivněna chováním spojů při požáru. Pravidla pro návrh a posouzení dřevěných spojů uvedené v ČSN EN 1995-1-2 jsou založeny na empirických pravidlech, které byly získány omezeným počtem provedených zkoušek odolnosti dřeva na zatížení rovnoběžně s vlákny. [2]

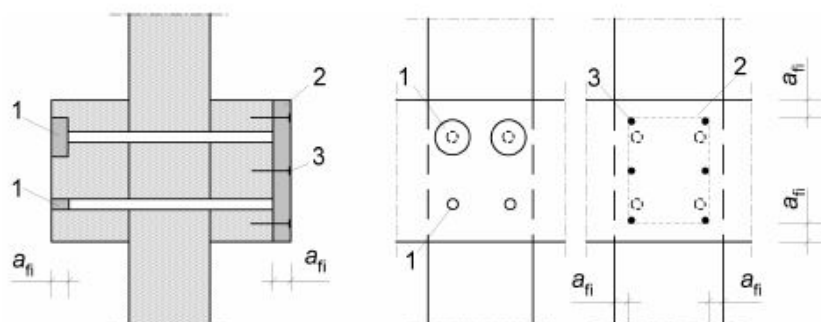
Na Obr. 11 je možné vidět ochranu kolíkového spoje na účinky požáru. Spoje dřevěných konstrukcí lze chránit pomocí zakrytí kolíku nebo svorníku dřevěnou zátkou o tloušťce a_{fi} . Obložení je prováděno sádrokartonovými deskami nebo deskami na bázi dřeva. V případě, kdy je spoj chráněn dřevěným obložением, deskou na bázi dřeva nebo sádrokartonovou deskou typu A nebo H je nutné, aby čas do počátku zuhelnatění splňoval požadavek:

$$t_{ch} \leq t_{req} - 0,5t_{d,fi},$$

kde $t_{d,fi}$ je požární odolnost nechráněného spoje a t_{req} je požadovaná normová požární odolnost.

V případě, kdy je spoj chráněn sádrokartonovou deskou typu F, nesmí opláštění odpadnout po požadované dobu požární odolnosti a čas do počátku zuhelnatění musí splňovat:

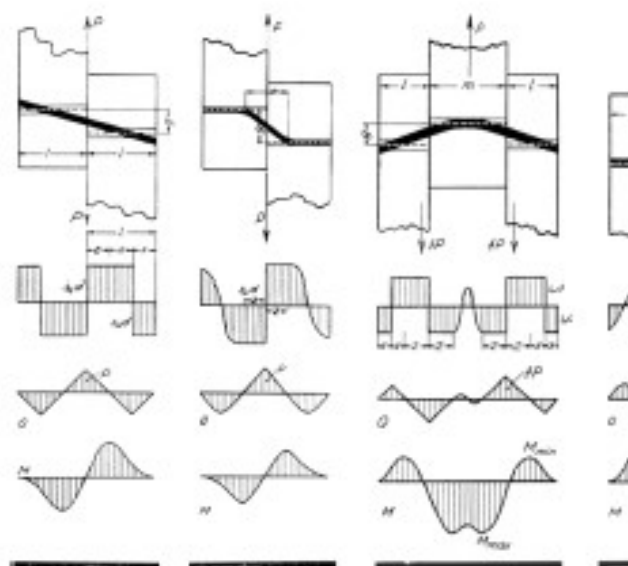
$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2t_{d,fi} [2]$$



Obr. 11- Ochrana kolíkového spoje na účinky požáru [2]

2.3.4 Selhání spojovacích prostředků

K selhání ukotvení spoje dochází v případě, kdy je napětí ve spoji pod spojovacím prvkem vyšší než pevnost dřeva. Pevnost ukotvení spoje je závislá na průměru spojovacího prostředku, úhlu zatížení a hustotě dřeva. Porušení spojovacího prostředku, například vytvoření plastického kloubu, může vést k selhání spoje nejčastěji v případě štíhlých spojovacích prvků. Tento typ způsobu porušení je tvárný a nastává, pokud je dosaženo momentu kluzu spojovacího prvku a je překročena pevnost dřeva. Pro odhad nosnosti spojovací prostředků, jejich selhání a uložení je využíván model typu Johansen [5] (Obr. 12). [6]



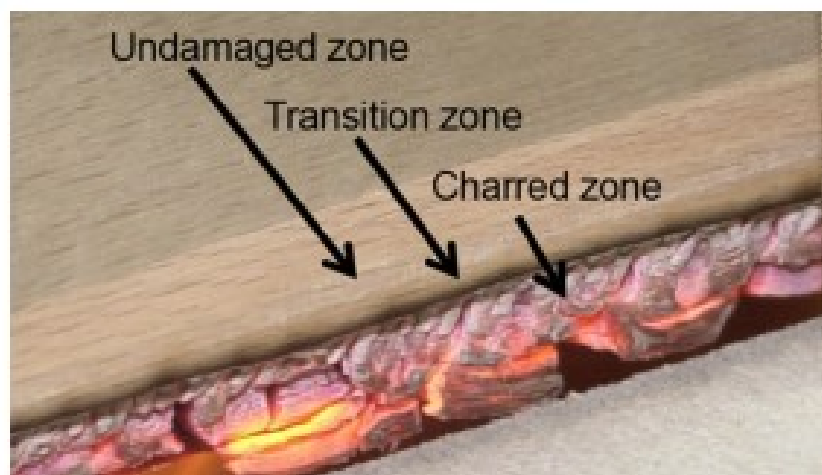
Obr. 12- Model Johansen 1949 [6]

2.3.5 Spoje vystavené účinkům požáru

2.3.5.1 Materiálové vlastnosti ovlivňující spoje s ocelovými spojovacími prvky

Spoje jsou nejslabším článkem dřevěných konstrukcí. Jejich selhání při požáru může vést k progresivnímu kolapsu. Způsoby porušení spojů jsou složité, jelikož je dřevo ortotropní materiál. Vykazuje teplotní a vlhkostní závislost na vlastnostech dřeva. Kovové spojovací prvky komplikují rozložení napětí a přenos tepla do dřevěných prvků. Kovové spojovací prvky vedou hluboko do dřeva teplo, což způsobuje rychlejší zuhelnatění. [7]

Na problematiku šíření tepla v dřevěném prvku s kovovými spojovacími prostředky byla provedena studie ve Švýcarsku v roce 2013. V této studii byl zkoumán přenos tepla a hmoty ve vzorku ze smrkového dřeva s vloženou ocelovou kotvou do předvrtaného otvoru. V studii byl napodoben středový řez spoje dřevo-dřevo a byl vystaven teplotě 523 K z jedné strany. Teplo rozložilo hydroskopickou vlhkost ve dřevě, ta byla vizualizována pomocí neutronové radiografie. Uvnitř vzorku byl měřen teplotní gradient, v různých vzdálenostech od povrchu vystaveného požáru. Se zvyšující se teplotou docházelo k vytlačování vody k zdroji tepla. Bylo zjištěno, že ocelový spojovací prvek má vliv na přenos tepla a vlhkosti ve spoji. Změna vlhkosti způsobuje bobtnání nebo smršťování dřeva. Ve dřevě vznikají trhliny, které mají vliv na zhoršení mechanických vlastností dřeva a uvolnění spojovacích prvků. Tyto jevy, které se vyskytují během přechodného stavu, ovlivňují pevnost ukotvení dřeva a únosnost dřevěného spoje za požáru. S rostoucí teplotou klesají mechanické vlastnosti přechodové vrstvy. Na Obr. 13 je zobrazena zuhelnatělá vrstva, přechodná vrstva a nepoškozené dřevo při požární zkoušce. [7]



Obr. 13- Zuhelnatělá vrstva, přechodná vrstva a nepoškozené dřevo při požární zkoušce [7]

Dalšími parametry, které ovlivňují šíření tepla a hmoty ve dřevě je hustota, propustnost, velikost pórů, sorpce a konektivita. Transportní jevy ve dřevě ovlivňuje tepelná vodivost. Tepelná vodivost je vyšší rovnoběžně s vlákny než kolmo na vlákna. Dle White a Schaffera [8] se hydroskopická voda dřeva šíří ze zdroje tepla dovnitř desky. Výsledný obsah vlhkosti je uvnitř desky 1,2 - 2 x vyšší než v původním stavu. Redistribuci vlhkosti v porézním materiálu je možné studovat pomocí vizualizačních technik, mezi které se řadí například neutronová radiografie. Z experimentu bylo zjištěno, že přenos vlhkosti je nerovnoměrný a je

lokálně ovlivněný ocelovými spojovacími prvky. Teplo a koncentrovaná vlhkost dřeva zhoršují mechanické vlastnosti dřeva kolem spojovacích prostředků a může docházet k prasklinám během vysychání a smršťování dřeva. Těmito změnami jsou ovlivněny spoje, zejména jejich nosnost a pevnost dřeva. [7]

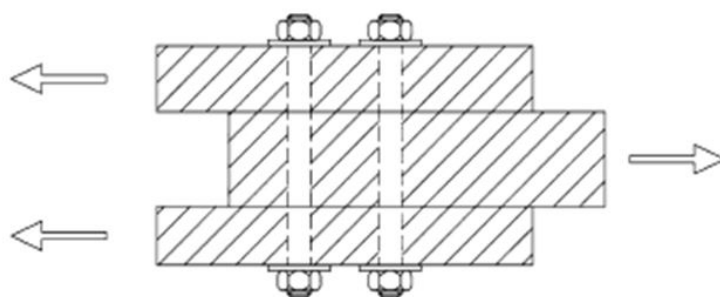
2.3.5.2 Chování šroubového spoje vystaveného požáru

Pevnost šroubových a kolíkových spojů za běžné teploty byla v Evropě a USA posuzována pomocí Johansenových rovnic [5]. Za účelem výzkumu pevnosti při porušení šroubových spojů za požáru byl proveden experiment na univerzitě v Canterbury. Pro účely experimentu byly vytvořeny vzorky šroubových spojů s ocelovými bočními deskami. Tyto vzorky byly zahřívány na konstantní teplotu po dobu několika hodin. Následně byly vzorky zatíženy do selhání. Tento experiment měl určit pevnost spoje v rozmezí teplot do 300 °C. [9]

V roce 2008 Moss a Buchanan [10] provedli experiment, který měl vést ke stanovení axiální pevnosti v tahu šroubového spoje za požáru. Spoje využívají ocelovou nebo dřevěnou spojovací desku vyrobenou z LVL (laminovaného dýhovaného dřeva). Účelem experimentu bylo zjistit vztah mezi pevností ukotvení dřeva LVL a časem selhání spoje. Návrh spoje byl v minulosti testován, rozměry dřevěných prvků byli 150 x 63 mm a šrouby byli o průměru 12 mm. Z experimentu bylo zjištěno, že pevnost spoje z borovice LVL může být popsána kvadratickým vztahem. Pevnost lineárně klesá ze 45 MPa za 20 °C na 25 MPa za 110 °C, dále stoupá na 27,5 MPa při 200 °C a klesá na 10 MPa při 270 °C. Zjištěná pevnost uložení byla použita s Johansonovými rovnicemi [5] pro zjištění zatížení při porušení. Předpověď času do selhání je obtížná z důvodu nejistoty z důvodu skutečné teploty šroubu a pevnosti uložení za teploty 250 °C. [9]

2.3.5.3 Požární odolnost spoje WWW (dřevo-dřevo-dřevo)

Tento spoj se skládá ze tří dřevěných prvků, dva boční a jeden středový. Tyto prvky jsou k sobě spojeny různými typy spojovacích prvků, například šrouby, hřebíky, svorníky a další. Na Obr. 14 je zobrazen typický spoj WWW. Pro tento typ spojů byla zkoumána požární odolnost. Pro experimenty byly použity různé druhy a uspořádání spojovacích prvků a také různé tloušťky dřevěných prvků. Ve většině případů byly použity dřevěné prvky z LVL. Pro několik případů bylo použito lepené lamelové dřevo Gl28h. Pro poměr zatížení byly uváděny hodnoty až 65 %. Na spoje nebyla aplikována žádná protipožární ochrana. [11]



Obr. 14- Spoj WWW (dřevo-dřevo-dřevo) [11]

Bylo zjištěno, že tloušťka dřevěných prvků je jedním z hlavních parametrů, které ovlivňují chování tohoto spoje při požáru. Spoje s dřevěnými prvky, které měly větší šířku, dosáhly vyšší požární odolnosti. Na snížení požární odolnosti mělo vliv zuhelnatění dřeva a snížení pevnosti zbytkového průřezu. Tento poznatek je v souladu se současnými konstrukčními návrhy dle ČSN EN 1995-1-2 [2]. Dle ČSN EN 1995-1-2 [2] je možné uvažovat vyšší požární odolnost za splněné podmínky zvětšení tloušťky prvku. [11]

Dalším parametrem je vliv poměru zatížení. Při sníženém poměru zatížení je dosažena vyšší požární odolnost. Z nashromážděných dat bylo zjištěno, že poměr zatížení se snižuje téměř lineárně s požární odolností. [11]

Na Obr. 15 jsou zobrazeny typy porušení spoje WWW. K selhání spoje došlo v důsledku prodloužení otvorů pro spojovací prostředky (Obr. 15a). Dochází k tomu v kombinaci s rozštěpením dřeva kolem spojovacích prostředků (Obr. 15b). [11]



a)

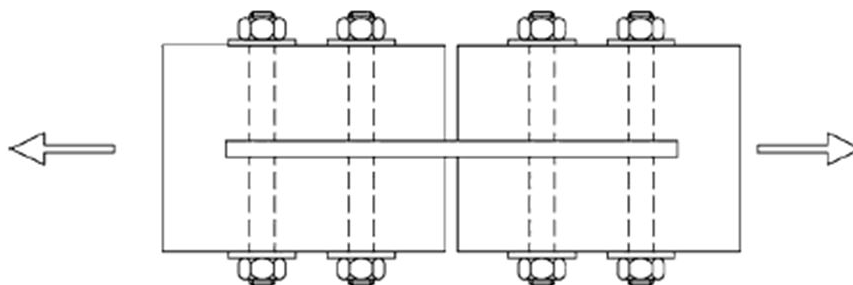


b)

Obr. 15 – Porušení připojení a) šroub s podložkou b) šroub [11]

2.3.5.4 Požární odolnost spoje WSW (dřevo-ocel-dřevo)

Spoj se skládá ze dvou dřevěných prvků spojených tenkou ocelovou deskou. Spojovací prostředky mohou být použity různé typy. Typický spoj je zobrazen na Obr. 16. [11]



Obr. 16 – Spoj WSW (dřevo-ocel-dřevo) [11]

Důležitým parametrem ovlivňujícím požární odolnost je tloušťka dřevěných prvků. Tento poznatek vyplývá z provedených experimentů, kdy větší tloušťka prvku o 25 mm zvýšila požární odolnost o 38 minut. Toto navýšení bylo pro poměr zatížení 0,1. Pro vyšší poměry zatížení nemá tloušťka prvku významný vliv na požární odolnost. [11]

V případě, kdy je ocelový plech chráněn dřevěnými prvky po stranách, teplota v plechu je nízká. Tloušťka ocelového prvku nemá vliv na požární odolnost. Požární odolnost je stanovena z části dřeva. [11]

Mezi další parametry ovlivňující požární odolnost patří:

- Rozteče mezi spojovacími prostředky
- Uspořádání spojovacích prostředků
- Druh spojovacího prostředku [11]

Velikost spojovacího prostředku nemá zásadní vliv na požární odolnost. V experimentu byly použity šrouby o průměrech 12,7 mm a 19,1 mm. Rozdíl v požární odolnosti byl zanedbatelný, jednalo se o rozdíl 2-3 minut. [11]

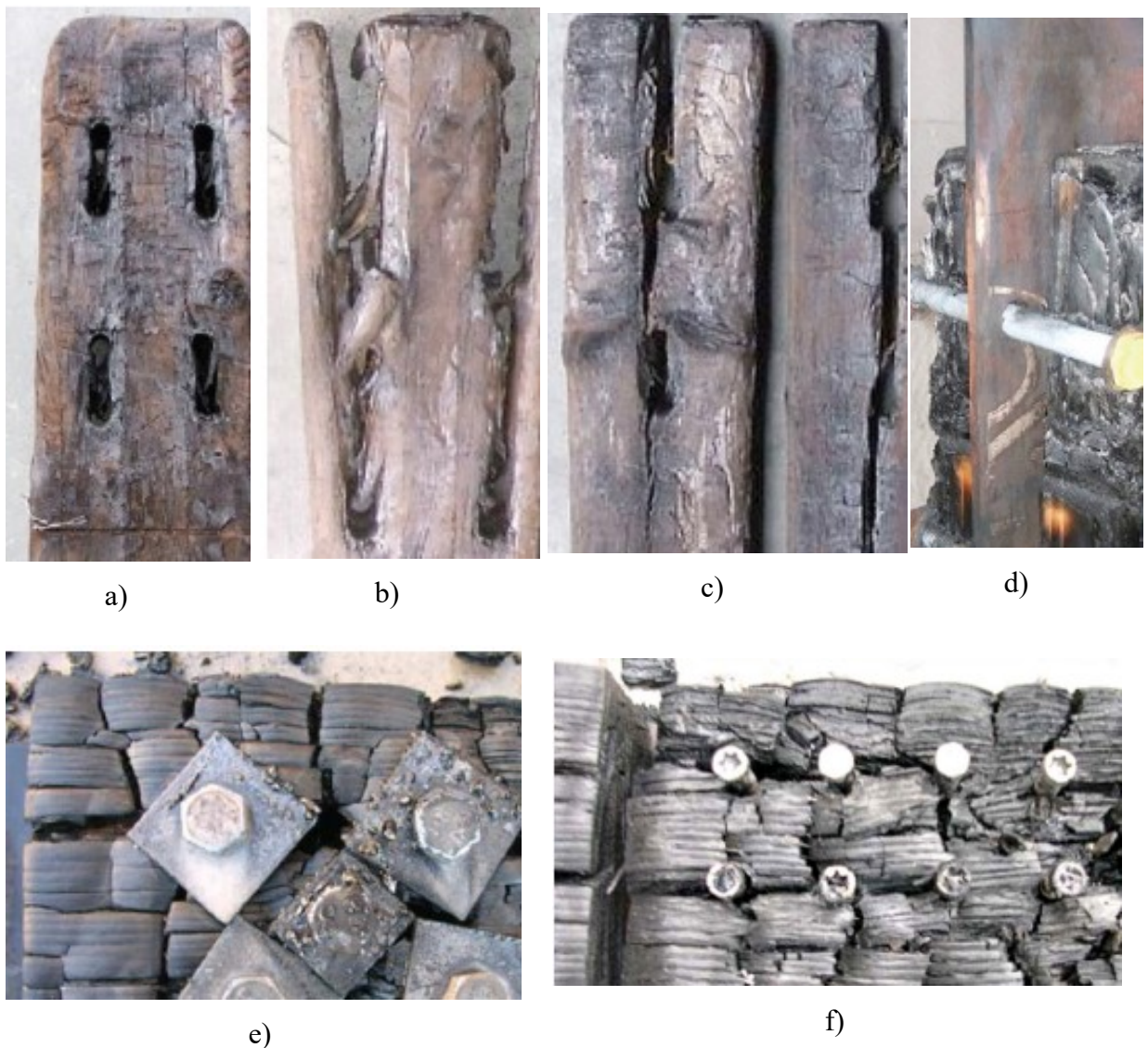
Dalším parametrem ovlivňujícím požární odolnost je vzdálenost spojovacích prostředků od okraje. S vyšší vzdáleností od okraje roste požární odolnost. Při zvýšení vzdálenosti o 40 % došlo ke zlepšení požární odolnosti o 20 %. K tomuto jevu dochází z důvodu zvětšení vzdálenosti od okraje zuhelnatění. [11]

Typ spojovacího materiálu je dalším parametrem ovlivňujícím požární odolnost spojů. V provedených experimentech byly použity šrouby a hmoždinky. V případě použití hmoždinek byla požární odolnost při zatížení o 9 minut delší než v případě šroubů. Šrouby se rychleji zahřívají z důvodu větší plochy vystavené vysokým teplotám, například hlava šroubu, matice, podložky atd. [11]

Také protipožární ochrana spoje má významný vliv na požární odolnost. Při experimentální analýze bylo zjištěno, že při použití sádrové desky se požární odolnost zvýšila o 37 minut. Jedná se o nárůst o 250 %. V případě, kdy byla použita překližka, došlo ke zvýšení požární odolnosti o 15 minut, jedná se o nárůst 130 %. Naopak použití

intumescentní barvy na ocelový plech nemělo významný efekt, jelikož ocelový plech byl z většiny zakryt dřevěnými prvky. [11]

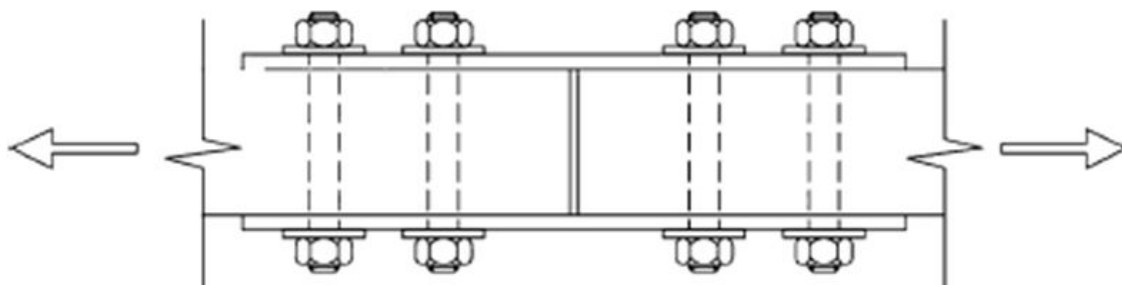
Na Obr. 17 jsou zobrazeny druhy porušení spoje WSW. Selhání spoje nejčastěji nastává prodloužením otvorů pro šrouby (Obr. 17a). V některých případech dochází k tomuto selhání v kombinaci s porušením ve smyku (Obr. 17b), nebo štípáním dřeva (Obr. 17c). Dále může dojít k vytržení materiálu (Obr. 17d). V případě kolíků (Obr. 17f) a šroubů (Obr. 17e) dochází k porušení rozštípnutím dřeva v oblasti spojovacích prostředků. Další typ porušení může nastat posunutím bloku dřeva podél vloženého ocelového plechu. [11]



Obr. 17 – Typy porušení spoje WSW [11]

2.3.5.5 Požární odolnost spoje SWS (ocel-dřevo-ocel)

Dalším typem spoje využívaného u dřevostaveb je spoj, kdy je dřevěný prvek vložen mezi dva ocelové prvky (Obr. 18). Tyto typy spojů bez protipožární ochrany mají nízkou požární odolnost. [11]



Obr. 18 – Typický spoj SWS zatížený tahem [11]

Poměr zatížení je hlavním parametrem, který ovlivňuje požární odolnost spoje. V provedených experimentech byl v případě snížení poměru zatížení z 0,3 na 0,1 nárůst požární odolnosti o 65 %. [11]

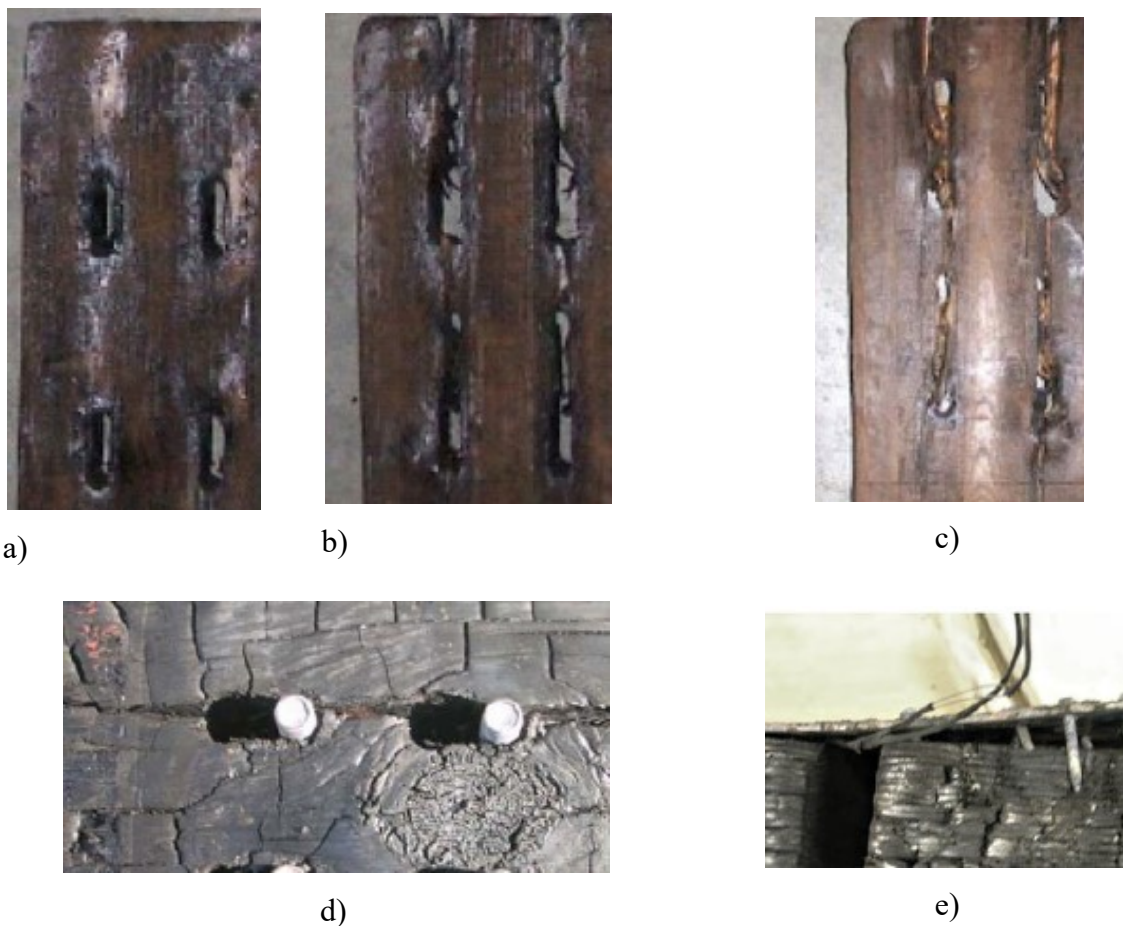
U tohoto typu spoje má na požární odolnost také jako u předešlých dvou spojů velký vliv tloušťka dřevěného prvku. S rostoucí šířkou roste požární odolnost. Dle výsledků z provedených experimentů je nárůst požární odolnosti vůči tloušťce prvku lineární. Ocelové plechy nemají na požární odolnost výrazný vliv, jelikož mají malou tloušťku materiálu. Také změny v tloušťce dřevěných prvků nemají na ohřívání dřevěného profilu významný vliv. [11]

Vzdálenost spojovacích prvků od okraje má vliv na požární odolnost. S vyšší vzdáleností spojovacích prostředků od okraje dochází k nárůstu požární odolnosti, než dojde k rozštípnutí dřeva. [11]

Na rozdíl od spojů dřevo-dřevo-dřevo nebo dřevo-ocel-dřevo, nemá druh spojovacího prostředku významný vliv na požární odolnost. Předpokládá se, že je to zapříčiněno tím, že vliv na přenos tepla do dřevěného prvku mají ocelové desky. [11]

V tomto typu spoje má příznivý vliv na požární odolnost použití protipožární ochrany. Z experimentů bylo zjištěno, že v případě použití obkladu ze sádkokartonu se požární odolnost zvýšila o 390 %. Při použití intumescentní barvy nebyl nárůst požární odolnosti tak významný, jednalo se o nárůst o 110 %. Pokud byly spoje nechráněny, jejich chování při požáru bylo špatné. [11]

Na Obr. 19 jsou zobrazeny způsoby porušení spoje SWS. Jedná se o prodloužení otvoru (Obr. 19a), proříznutí dřevěného prvku (Obr. 19b), štípání dřeva (Obr. 19c), štípání dřeva kolem spojovacích prostředků (Obr. 19d) a nadměrná deformace spojovacích prostředků a ztráta pevnosti (Obr. 19e).



Obr. 19 – Způsoby porušení spoje SWS [11]

2.3.5.6 Požární experimenty

Požární experimenty dřevěných spojů probíhaly od konce 70. let a na začátku 80. let převážně v Německu, Švédsku a Finsku. Výsledky experimentů je složité dohledat. V případě, že jsou dostupné je náročné je interpretovat. Nebo byly prováděny na spojkách, které již v praxi nejsou využívány. Na základě výsledků těchto experimentů byly vytvořeny normativní postupy, které stanovují geometrii prvků. K nim jsou stanoveny příslušné výkonnostní třídy F30 nebo F60. [6]

Experimenty, ze kterých vychází norma ČSN EN 1995-1-2 [2] byly prováděny koncem 90. let. Jednalo se o zkoušky spojů, které byly zatíženy tahem. Konkrétně se jednalo o spoje typu dřevo-dřevo a ocel-dřevo. Spoje byly vystavené požáru ze všech stran. Podobné experimenty, které byly prováděny, jsou experimenty Fleichera et al. (2002) [12], dále Scheer a kol. (2004) [13] a další. V experimentech Fleischer et al. (2002) [12] bylo po dosažení cílové odolnosti zvýšené zatížení až do kolapsu. U ostatních experimentů bylo zatížení udržováno konstantní až do kolapsu. V experimentu Oksanen et al. (2005) [14] byl testován spoj s nerezovými spojovacími prvky. Experiment Lau (2006) [15] a Chuo (2007) [16] byl prováděn na spoji z vrstveného dýhového dřeva. Experiment byl prováděn v elektrické peci bez možnosti sledovat čas a teplotu. [6]

3 Experimentální analýza spoje kolíkového typu dřevěných prvků

Pro tento požární experiment byl vybrán dřevěný spoj plátováním, který byl spojen několika spojovacími prostředky kolíkového typu. V rámci experimentu byl sledován průběh teplot ve spoji zatíženém teplotní normovou křivkou. Výsledky experimentu byly porovnány s výsledky numerického modelu v kapitole níže.

Experiment byl proveden 26. 04. 2023 v Buštěhradě v požární laboratoři fireLAB UCEEB. Byl proveden odbornými pracovníky požární laboratoře pod vedením Ing. Arch. Petra Hejtmánka, Ph.D, s asistencí vedoucího této práce, Ing. Lukáše Velebila, Ph.D.

3.1 Popis požární zkoušky

3.1.1 Zkušební pec

Zkušební pec miniFUR (Obr. 20) slouží pro středněrozměrové zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí, například stěny, stropy apod. Je tvořena demontovatelným mobilním boxem o rozměrech 1,2 x 0,8 m a výšce 0,8 m. Konstrukce pece jsou tvořené ocelovými jekly a opláštění je z cementovláknitých desek Fermacell tloušťky 12,5 mm a třídou reakce na oheň A1.

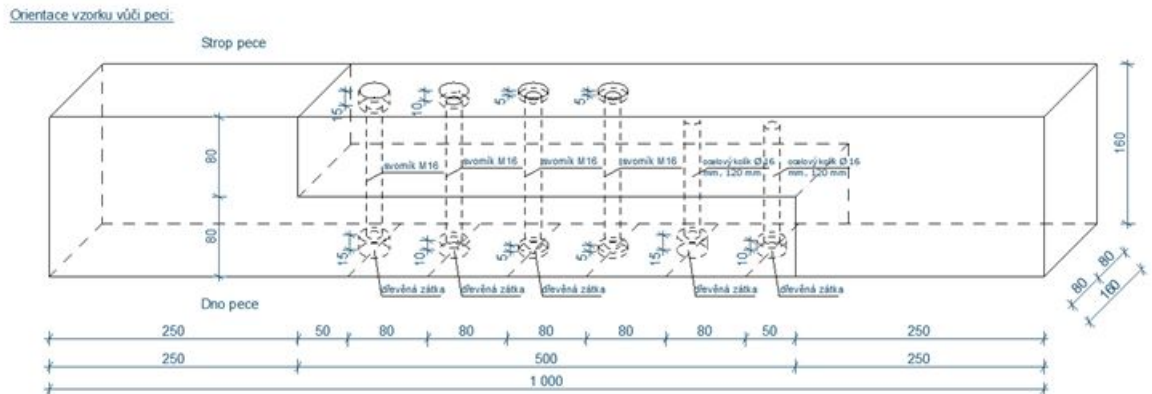
Pec je větrána otvory v bočních stěnách. Tyto otvory umožňují přirozený přívod vzduchu a odvod kouře a spalin. Požár zajišťuje plynový hořák s narůstajícím tepelným výkonem. Palivem je topný plyn propan. Díky tomu je možné v peci docílit normového požáru (normové teplotní křivky ISO 834 [17]), především v horní části pece. Teplota je řízena systémem ústředny pomocí programu pro řízení výkonu hořáku. Je možné měřit teploty na odvrácené straně požáru, uvnitř vzorku a teplotu v peci. Pec splňuje požadavky normy ČSN EN 1361-1: Zkoušky požární odolnosti- Část 1: Obecné požadavky [18].



Obr. 20- Zkušební pec miniFUR

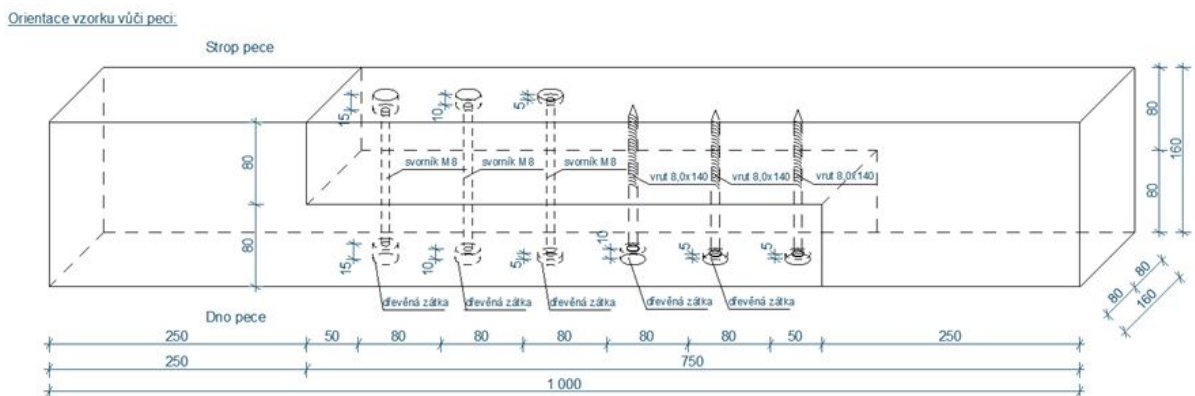
3.1.2 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky připravil Ing. Martin Hataj, PhD na UCEEBu v Buštěhradě. Zkušební vzorky byly vyrobeny dva o celkových rozměrech 1 000 x 160 x 160 mm. Vzorky byly vyrobeny ze smrkového dřeva s výsušnými trhlinami. Spoje byly navrženy tesařské přeplátováním a spojené mechanickými spojovacími prostředky kolíkového typu. Pro spojovací prostředky byly vybrány svorníky ze závitových tyčí 16 mm a 8 mm s maticemi a konstrukčními podložkami bez povrchové úpravy. Dále byly použity vruty \varnothing 8 mm a ocelové kolíky \varnothing 16 mm.



Obr. 21- Zkušební vzorek 1

První spoj obsahoval 4x svorník M16 v délkách 130 mm, 140 mm a 2x 150 mm. Dále 2x ocelový kolík \varnothing 16 mm v délce 120 mm. Otvory pro svorníky a kolíky byly zakryty dřevěnými zátkami v tloušťkách 5 mm, 10 mm a 15 mm (Obr. 21).



Obr. 22- Zkušební vzorek 2

V druhém zkušebním vzorku byl použit 3x svorník M8 v délkách 130 mm, 140 mm a 150 mm. Dále 3x vrut \varnothing 8 mm o délce 120 mm (Obr. 22).

Zkušební vzorky obsahovaly výsušné trhliny po celé délce vzorků, které jsou vidět na Obr. 23 – Průřez vzorkem 1 a na Obr. 24. První vzorek obsahoval dvě výsušné trhliny do hloubky 65 mm a 50 mm. Výsušné trhliny měly po délce proměnnou šířku. Průměrná šířka trhliny byla 6 mm (Obr. 25). Druhý vzorek obsahoval jednu výsušnou trhlinu průměrné šířky 7 mm a hloubky 40 mm (Obr. 26).



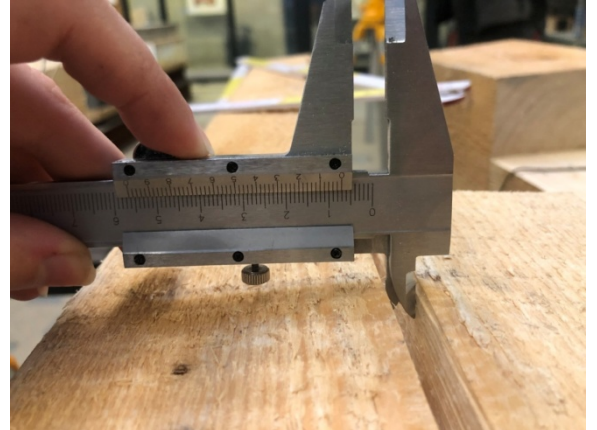
Obr. 23 – Průřez vzorkem 1



Obr. 24 – Průřez vzorkem 2



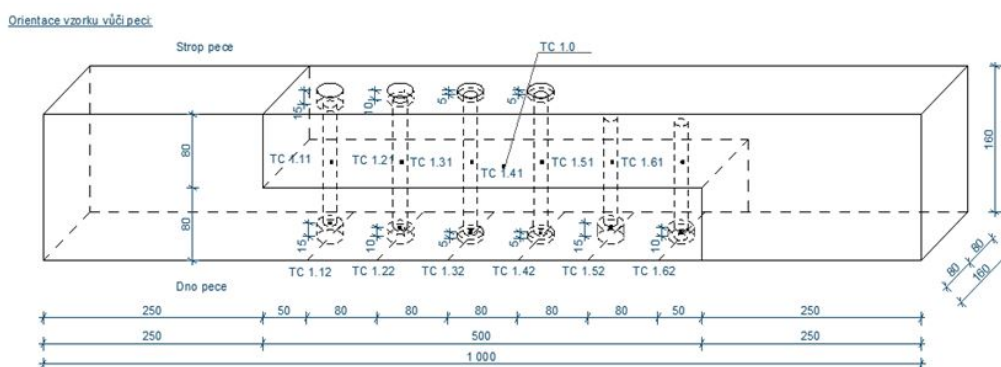
Obr. 25 – Šířka výsušné trhliny vzorku 1



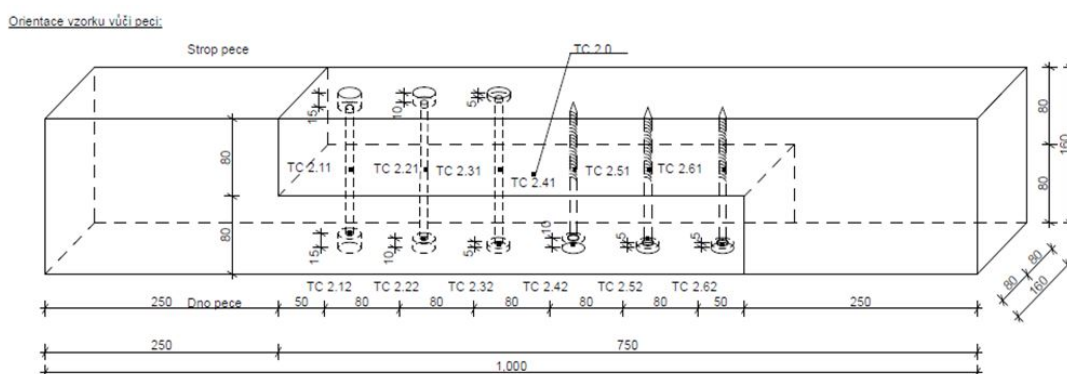
Obr. 26 - Šířka výsušné trhliny vzorku 2

3.1.3 Umístění termočlánků

Termočlánky byly osazeny vždy na konec spojovacího prvku pod dřevěnou zátku a do spoje dřevěného prvku v blízkosti spojovacího prostředku. Termočlánky jsou značeny např. TC 1.00, TC je označení pro název termočlánku (thermocouple). První číslice značí vzorek 1 nebo vzorek 2. Druhá číslice označuje spojovací prvek a třetí číslice polohu termočlánku (polovina spojovacího prostředku - 1; konec spojovacího prostředku - 2). Rozmístění veškerých termočlánků vzorku č. 1 je zobrazeno na Obr. 27 a vzorku č. 2 na Obr. 28. Termočlánek TC 1.0 a TC 2.0 jsou umístěné v trhlínách.



Obr. 27- Vzorek 1- rozmístění termočlánků



Obr. 28- Vzorek 2- rozmístění termočlánků

Termočlánky byly nejdříve popsány pro pozdější identifikaci získaných hodnot a následně osazeny v příslušných pozicích pomocí ruční sponkovačky. Nejdříve byla osazena první část termočlánků ve spoji dřevěných prvků v blízkosti spojovacích prostředků. Na Obr. 29 je vidět rozmístění první části termočlánků ve spoji u vzorku č. 1. Po umístění termočlánků byly dřevěné prvky spojeny spojovacími prostředky. Následně byly osazeny termočlánky na konci spojovacích prostředků. Termočlánky byly zakryty vlepenými dřevěnými zátkami (Obr. 30). Dřevěné zátky byly lepeny lepidlem Rakoll GXL4 (Obr. 31). Pro termočlánky byly v dřevěných zátkách vyříznuty drážky.



Obr. 29 – Umístění termočlánků v blízkosti spojovací prostředků ve spoji- Vzorek 1



a) Vzorek 1



b) Vzorek 2

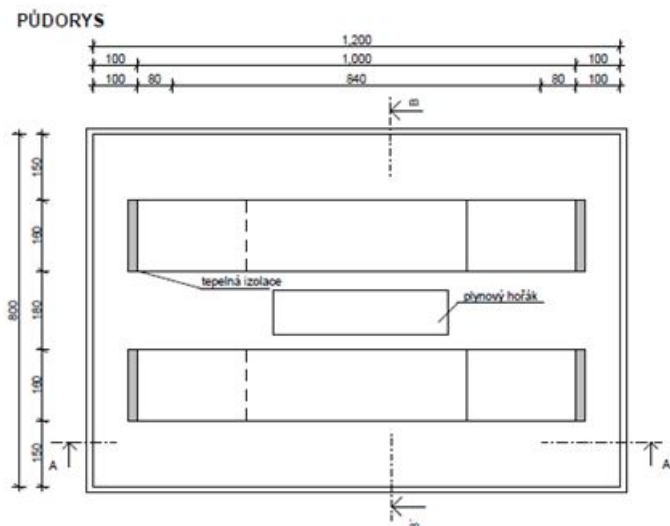
Obr. 30 - Umístění termočlánků a dřevěných zátek



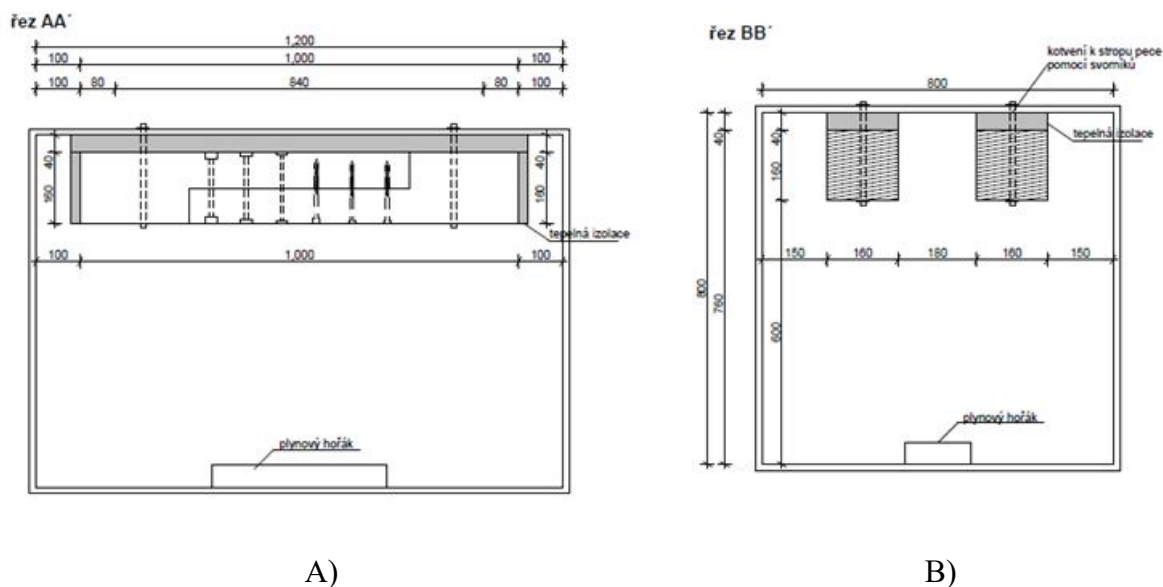
Obr. 31 – Lepidlo použité pro lepení dřevěných zátek

3.1.4 Umístění vzorků v peci miniFUR

Na Obr. 32 a Obr. 33 je schéma rozložení zkušebních vzorků v peci. Zkušební vzorky byly připevněny pomocí ocelových svorníků M10 ke stropu pece. Matice svorníků byly zakryty vlepými dřevěnými zátkami.



Obr. 32- Schéma uložení zkušebních vzorků v peci- půdorys



Obr. 33- Schéma uložení zkušebních vzorků v peci- A) podélný řez A-A'; B) příčný řez B-B'



Obr. 34 – Umístění v peci miniFUR

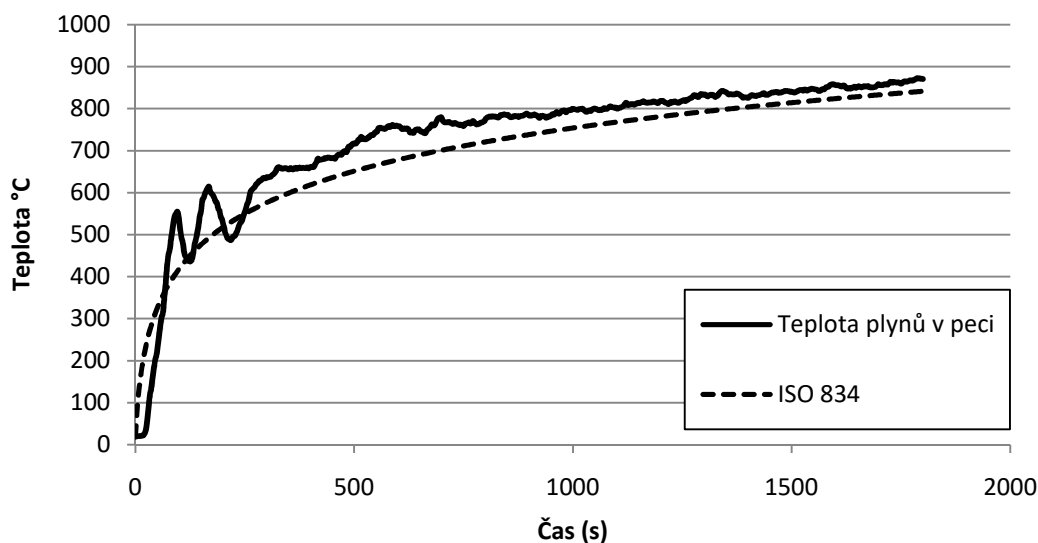
Na Obr. 34 je uložení vzorků ve zkušební peci. Mezi stropem pece a zkušebními vzorky byla umístěna tepelná izolace v tloušťce 40 mm, konce zkušebních vzorků byly obloženy tepelnou izolací v tloušťce 20 mm (Obr. 35). Vzorky byly vystaveny účinkům požáru ze tří stran a orientovány výsušnými trhlinami blíže k hořáku.



Obr. 35 – Obložení vzorku tepelnou izolací

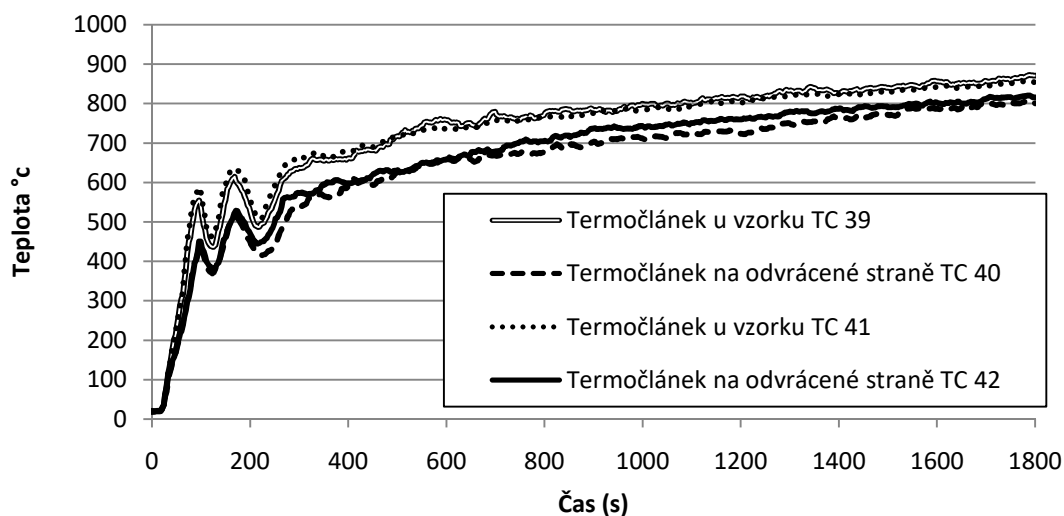
3.1.5 Průběh zkoušky

Vzorky nebyly v průběhu zkoušky mechanicky zatěžovány. Teplotní zatížení bylo řízeno hořákem přes systém ústředny, kde byla nastavena normová teplotní křivka ISO 834 [17] po dobu 30 minut. V grafu na Obr. 36 je zobrazeno porovnání normové teplotní křivky a skutečné teploty v peci změřené pomocí termočlánku. Na křivce výkonu hořáku jsou vidět zvýšené hodnoty kolem 100 s. V tomto čase začalo hořet dřevo a došlo ke zvýšení teploty vlivem teplotního přírůstku hoření dřevěných prvků. Po ukončení zkoušky byly vzorky vyjmuty z pece a zchlazeny v kádi s vodou. Vzorky byly dále rozříznuty v několika místech a zkoumány vizuálně.



Obr. 36 - Průběh teplot plynů v peci z požární zkoušky a normové teplotní křivky

Měření teploty probíhalo pomocí plášťových termočlánků. Na každém vzorku bylo rozmístěno 13 termočlánků, a další 4 termočlánky snímaly teplotu uvnitř pece. V grafu na Obr. 37 jsou vyneseny teploty plynů v peci během požární zkoušky. Teploty naměřené v blízkosti vzorků jsou vyšší a ovlivněny přírůstkem teplot od hoření dřevěných prvků.



Obr. 37 - Průběh teplot plynů v peci měřené na termočláncích

3.2 Výsledky zkoušky

Výsledkem zkoušky byly naměřené hodnoty teplot. Data byla zpracována v programu Excel. Na Obr. 38 jsou vidět vzorky po vyjmutí ze zkušební pece. Vzorky byly následně zchlazeny vodou ve vaně. Po uhašení byly vzorky přeneseny na parkoviště před budovou, kde byly opticky zkoumány. Na Obr. 39 je vzorek před rozebráním, je vidět zuhelnatělá vrstva. Některé dřevěné zátky odpadly v průběhu zkoušky a zbytek odpadl v průběhu chlazení.



Obr. 38 – Vzorky po ukončení zkoušky a vyjmutí z pece



Obr. 39 – Vzorek po uhašení v kádi s vodou

Na Obr. 40 jsou ukázány zbytkové průřezy vzorku č. 1 a vzorku č. 2. Obložení z tepelné izolace vydrželo po celou dobu zkoušky. U vzorku č. 2 došlo k odloupení části tepelné izolace z boku a rozsáhlejší ploše zuhelnatění. Na fotografii vzorku č. 2 je vidět zbytková část obložení z tepelné izolace. U vzorku č. 1 došlo v průběhu zkoušky k rozšíření výsušné trhliny a zuhelnatění plochy trhliny.



a) Vzorek 1



b) Vzorek 2

Obr. 40 - Zbytkový průřez vzorků po ukončení zkoušky ve 30 minutě

Zbytkový průřez na Obr. 41 ukázal, že dřevo v oblasti svorníků odhořívalo rychleji. Hloubka zuhelnatění je v oblasti svorníků větší než v části mimo svorník. Pod podložkou byla zuhelnatělá vrstva celistvá. Došlo k zabránění prostupu horkých plynů do spáry svorníku a díky tomu nedošlo k odhořívání dřeva ve spáře a otvor kolem svorníků se nezvětšil. Dále je možné pozorovat větší úbytek průřezu v oblasti trhliny orientované k požáru. Na odlehlé straně, která nebyla přímo vystavena účinkům požáru, je také vidět zvýšený úbytek průřezu v oblasti trhliny. Při srovnání těchto dvou úbytků průřezů, je zuhelnatění v blízkosti trhliny orientované k hořáku výrazně větší.



a) Detail hrany vystavené blíže hořáku



b) Řez průřezem



c) Úbytek průřezu vertikálně



d) Úbytek průřezu horizontálně

Obr. 41 – Řez otvorem pro svorník M16- Vzorek 1

Na Obr. 42 je zbytkový průřez vzorku č. 2. Řez vzorkem byl veden mimo spoj dřevěných prvků. Na fotografiích je zobrazen řez prvkem a tloušťka zuhelnatělé vrstvy. Vlivem manipulace došlo k částečnému poškození a odpadnutí zuhelnatělé vrstvy. Z fotografie řezu je patrné, že v oblasti trhliny je úbytek průřezu větší než ve zbytku průřezu.



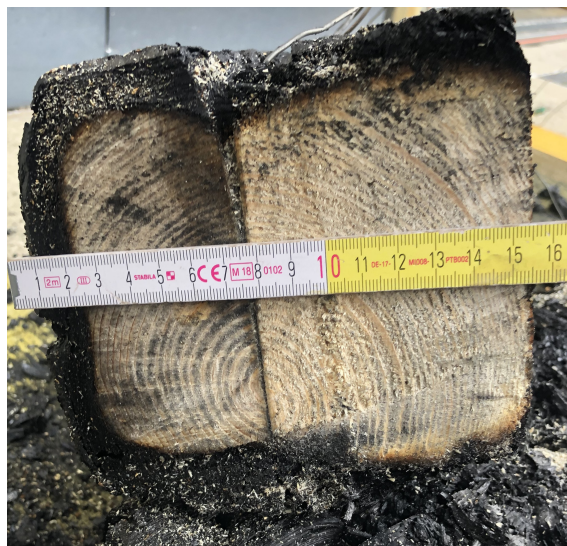
a) Řez vzorkem



b) Hloubka zuhelnatění

Obr. 42 – Řez mimo spoj- Vzorek 2

Další řez (Obr. 43) byl veden ve spoji dřevěných prvků vzorku č. 2. Trhlina procházela v blízkosti spoje. Opět je možné pozorovat zvětšenou hloubku zuhelnatění v blízkosti trhliny. V tomto případě je navíc ovlivněna spojem. Na fotografii je možno pozorovat větší úbytek průřezu u části spoje, který byl vystaven požáru. Úbytek je výrazně větší než v části spoje, jehož hrana byla zakryta tepelnou izolací a chráněna před účinky požáru.



a) Řez vzorkem



b) Hloubka zuhelnatění

Obr. 43 – Řez spojem – Vzorek 2

Na fotografiích na Obr. 44 byl řez veden otvorem pro vrut \varnothing 8 mm. Stejně jako v případě řezu otvorem pro svorník M16 je vidět rychlejší odhořívání v oblasti vrutu. Hlava vrutu bránila prostupu horkých plynů do spáry kolem vrutu a díky tomu nedošlo k odhořívání dřeva ve spáře mezi vrutem a dřevěným prvkem. Otvor kolem vrutu se nezvětšil. Dále je na fotografiích vidět podélný profil v místě spoje a rozdíl v úbytku průřezu na části vystavené hořáku a na části odlehlé. Orientace vzorku vůči účinkům požáru má také významnou roli.



Obr. 44 – Řez v místě svorníku vrutu \varnothing 8 mm – Vzorek 2

Na Obr. 45 jsou fotografie vyjmutých spojovacích prostředků. Na Obr. 45a jsou vedle sebe porovnány vruty zapuštěné v různých hloubkách. Vrut na fotografii vlevo byl zapuštěn 5 mm pod povrch dřevěného prvku a nebyl zakryt dřevěnou zátkou. U tohoto vrutu je největší změna barvy materiálu. Vrut na fotografii uprostřed byl zapuštěn 5 mm pod povrch dřevěného prvku a byl zakryt dřevěnou zátkou výšky 5 mm. Změna barvy materiálu vrutu je v menší ploše vrutu. Vpravo na fotografii je vrut zapuštěný 10 mm pod povrch dřevěného prvku a zakrytý zátkou. V případě tohoto vrutu je změna barvy materiálu v nejmenší ploše vrutu. Na Obr. 45b jsou vedle sebe porovnány dva svorníky M16. Svorník na fotografii vlevo byl zapuštěn 10 mm pod povrch dřevěného prvku a byl zakryt dřevěnou zátkou. Svorník

na fotografii vpravo byl zapuštěn 5mm pod povrch dřevěného prvku a byl zakryt dřevěnou zátkou. U svorníku s větší hloubkou zapuštění došlo ke změně barvy materiálu v menší ploše.



a) *Vruty Ø 8 mm*



b) *Svorník Ø 16 mm*

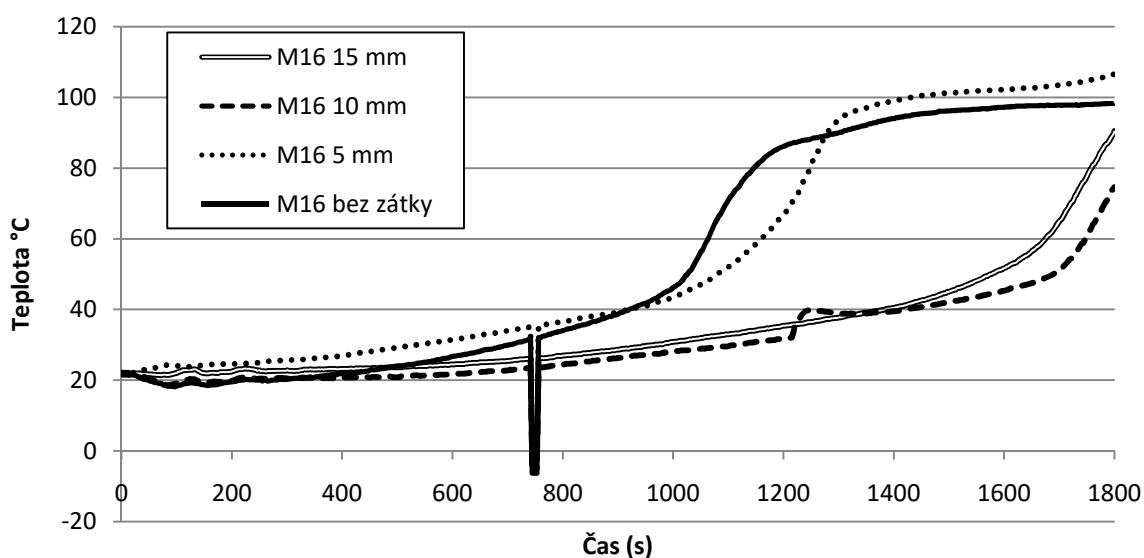
Obr. 45 – Vyjmuté spojovací prostředky ze zkušebních vzorků

3.2.1 Vliv hloubky zapuštění

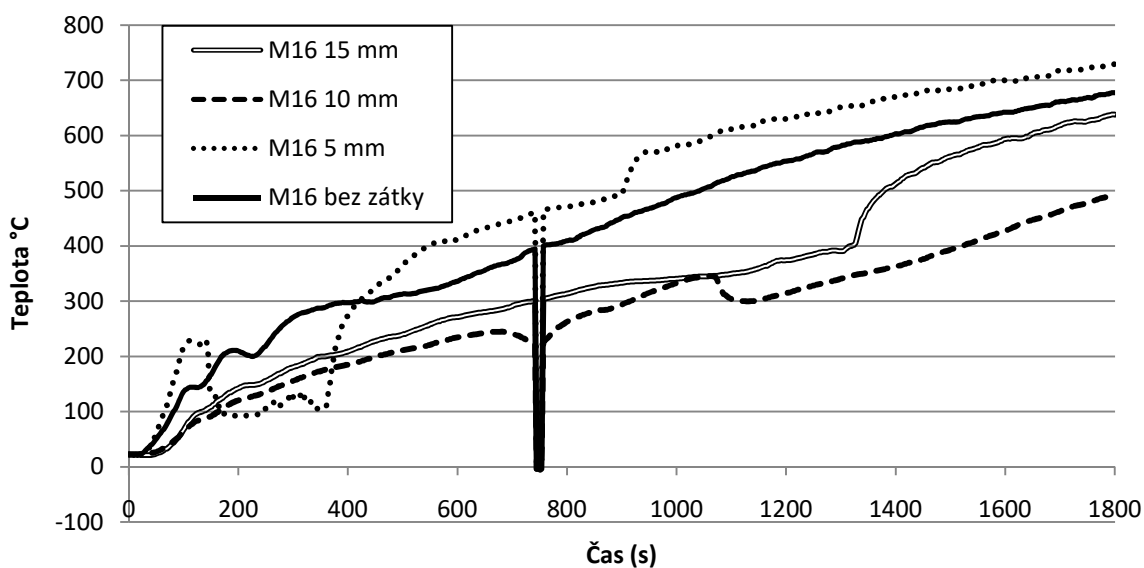
První analýza sleduje vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku na přestup tepla ve spojih vystavených požáru. Hloubky zapuštění jsou: 15 mm, 10 mm a 5 mm. V těchto hloubkách byly spojovací prostředky zakryty dřevěnými zátkami. Svorník M16 a ocelový vrut Ø 8 mm, v případě hloubky zapuštění 5 mm, nebyl zakryt dřevěnými zátkami.

3.2.1.1 Svorník M16

Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z termočlánků umístěných na konci svorníků pod krycí dřevěnou zátkou (Obr. 47) a průběhy teplot z termočlánků ve spoji u svorníků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou. Podobný průběh teploty byl také u svorníku zakrytého 10 mm dřevěnou zátkou. Největší nárůst teploty byl v případě svorníku bez dřevěné zátky.



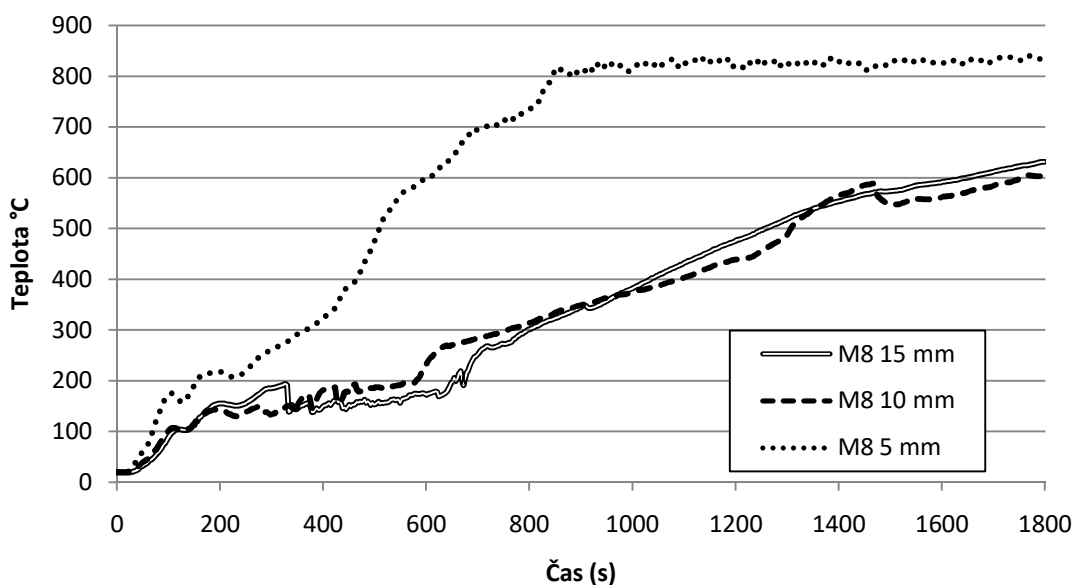
Obr. 46 – Vývoj teplot ve spoji v blízkosti svorníků M16



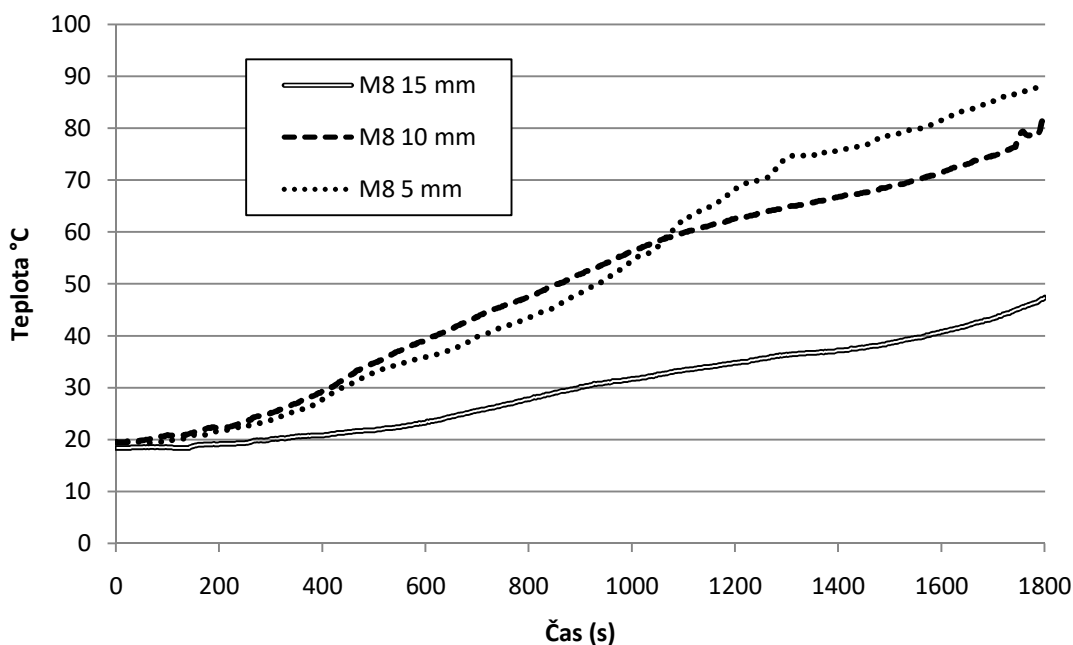
Obr. 47 - Vývoj teplot na koncích svorníků M16 pod dřevěnými zátkami

3.2.1.2 Svorník M8

Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z termočlánků umístěných na konci svorníků pod krycí dřevěnou zátkou (Obr. 48) a průběhy teplot z termočlánků umístěných ve spoji v blízkosti svorníků (Obr. 49). U teplot naměřených pod dřevěnými zátkami byla naměřena největší teplota v případě 5 mm dřevěné zátky. Dřevěná zátka nejspíš odpadla již na začátku ve 250 s, v tomto okamžiku byl nárůst teploty strmý. Nejnižších teplot dosahoval termočlánek ve spoji u svorníku s 15 mm dřevěnou zátkou.



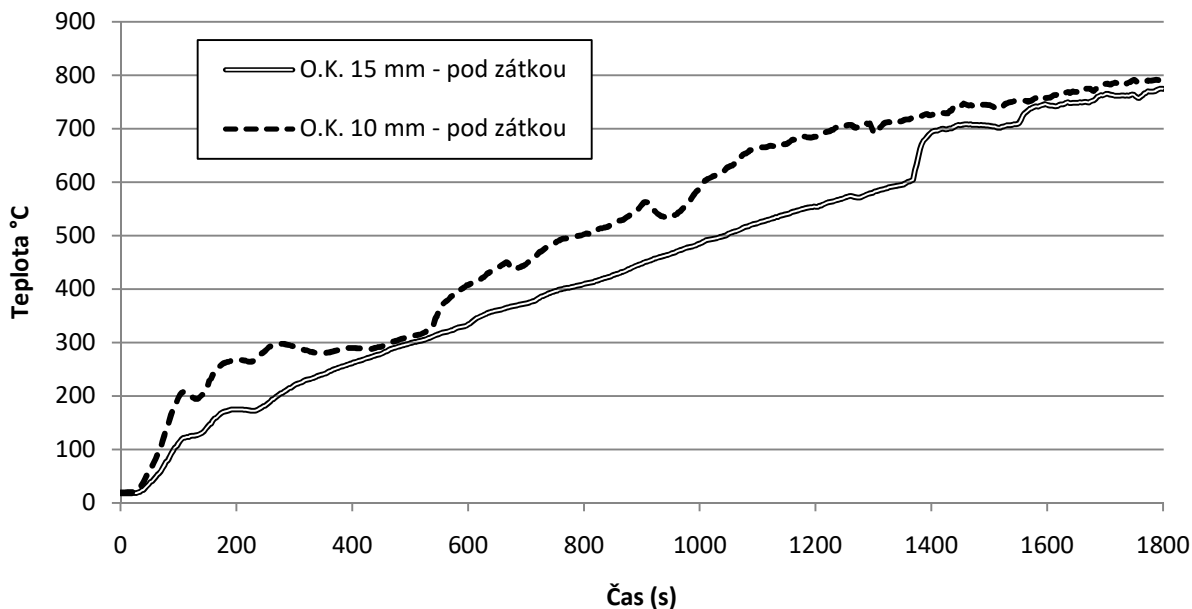
Obr. 48 - Vývoj teplot na koncích svorníků M8 pod dřevěnými zátkami



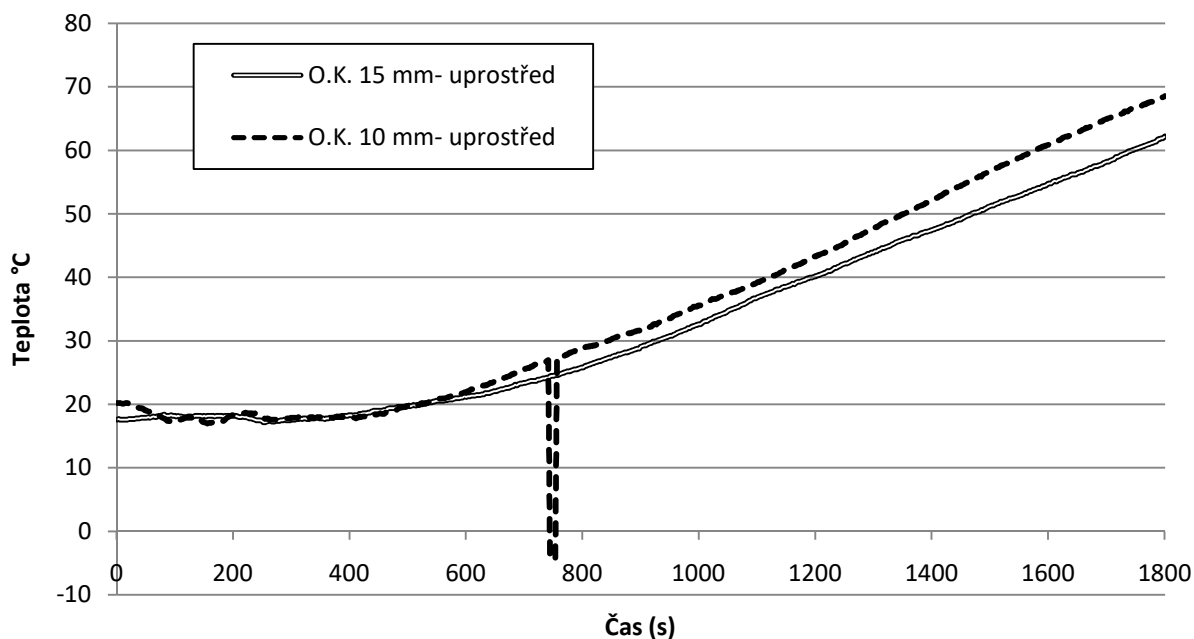
Obr. 49 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti svorníků M8

3.2.1.3 Ocelový kolík Ø 16 mm

Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z termočlánků umístěných na konci ocelových kolíků Ø 16 mm pod krycími dřevěnými zátkami (Obr. 50) a ve spoji v blízkosti ocelových kolíků Ø 16 mm (Obr. 51). Nejvyšší teploty byly naměřeny ocelového kolíku s menší hloubkou zapuštění. Maximální rozdíl teplot naměřený ve spoji byl 5°C.



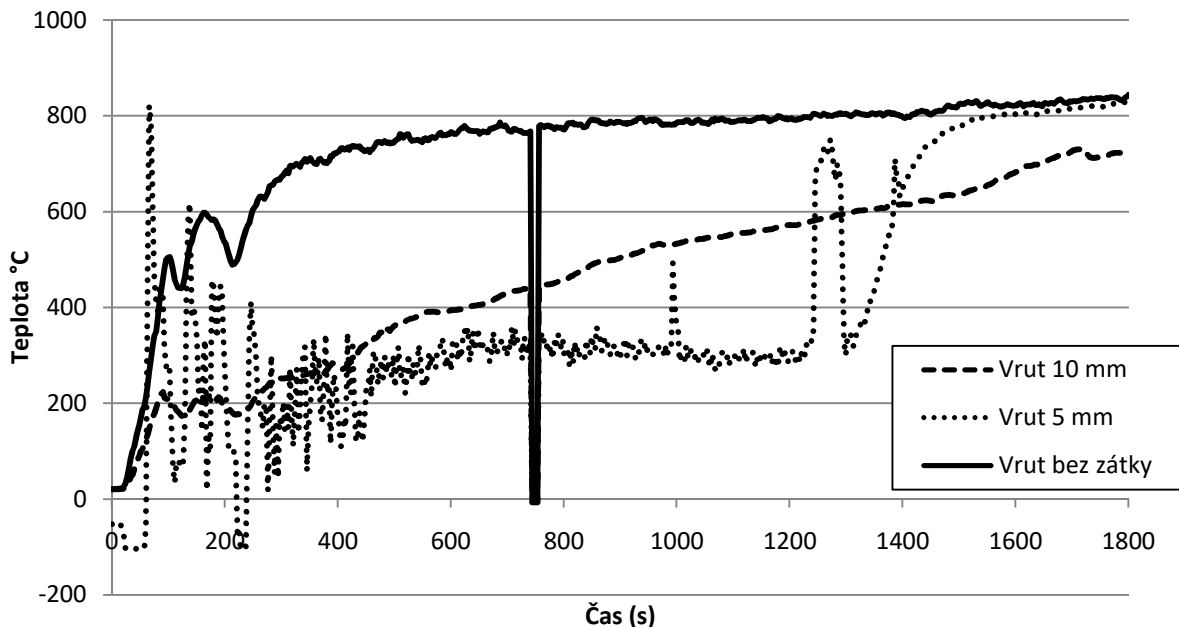
Obr. 50 - Vývoj teplot na konci ocelových kolíků Ø 16 mm pod dřevěnými zátkami



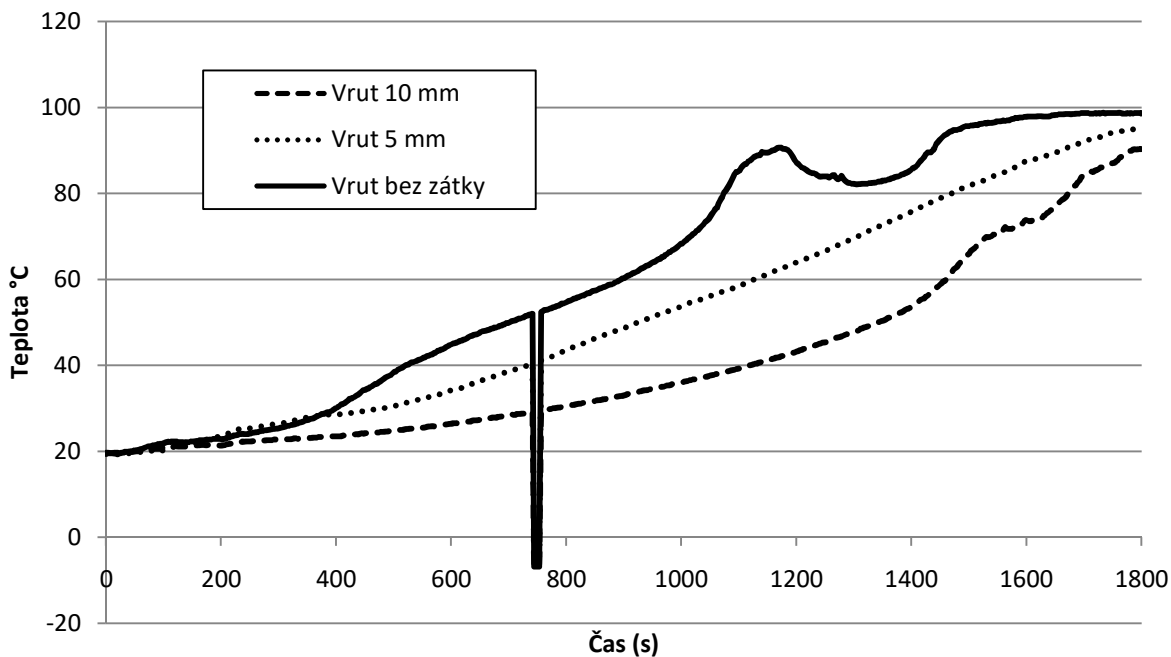
Obr. 51 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti ocelových kolíků Ø 16 mm

3.2.1.4 Vrut Ø 8 mm

Ve vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z termočlánků umístěných na konci vrutu pod krycí dřevěnou zátkou (Obr. 52) a průběhy teplot z termočlánků umístěných ve spoji v blízkosti vrutů (Obr. 53). Teploty u vrutu bez zátky jsou nejvyšší, s rostoucí hloubkou zapuštění klesá teplota. Maximální rozdíl teplot naměřený ve spoji je 30 °C mezi vrutem s 10 mm dřevěnou zátkou a 5 mm dřevěnou zátkou.



Obr. 52 - Vývoj teplot na konci vrutů Ø 8 mm pod dřevěnými zátkami



Obr. 53 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti vrutů Ø 8 mm

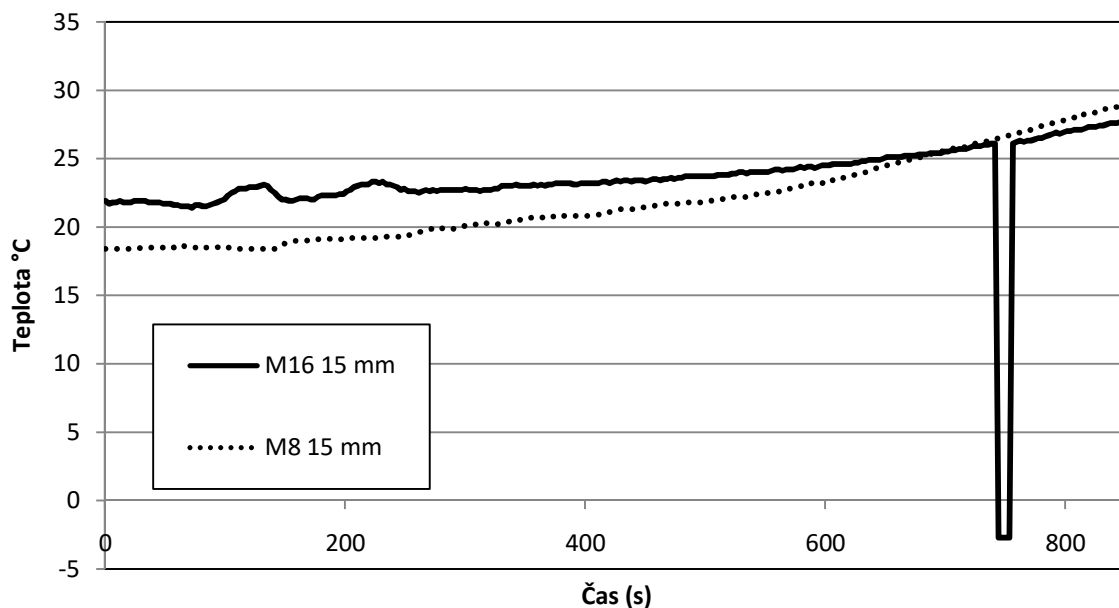
3.2.1.5 Závěr

Zakrytí spojovacích prostředků dřevěnými zátkami výrazně snižuje nárůst teploty uvnitř dřevěných prvků a má příznivý vliv na zvyšování teploty spojovacích prostředků. S vyšší hloubkou zapaštění spojovacích prostředků se výrazně snižuje nárůst teploty uvnitř spoje a dochází ke zpomalení ohřívání spojovacích prostředků.

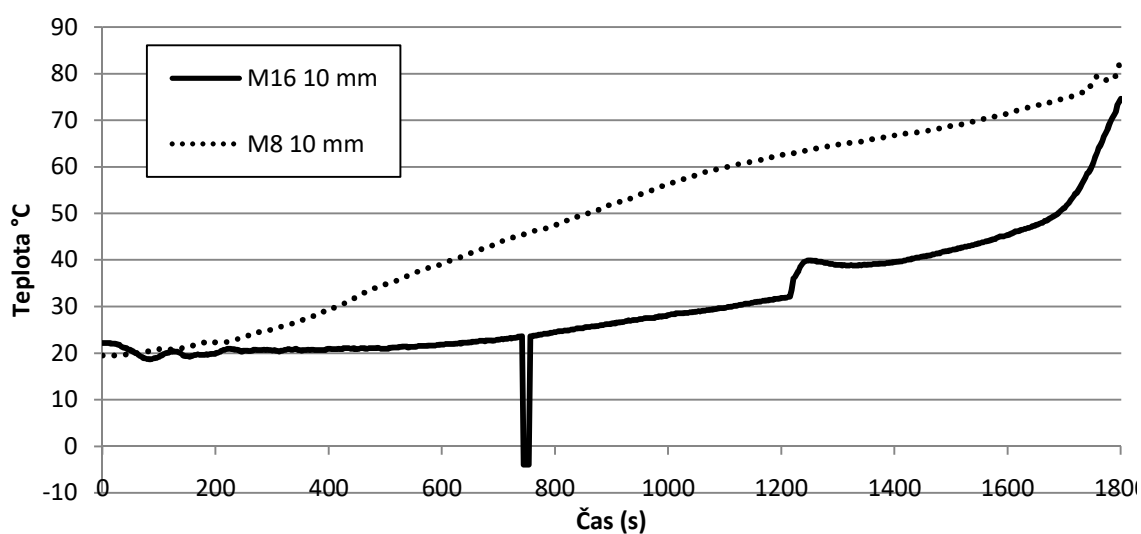
3.2.2 Vliv velikosti spojovacího prostředku

V další analýze je sledován vliv velikosti spojovacích prostředků na přestup tepla ve spoji za zvýšených teplot. Analýza je provedena na svornících M8 a M16.

Na vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z termočlánků umístěných ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků. Na Obr. 55 je graf sledující vývoj teplot u svorníků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou a na grafu na Obr. 56 je vývoj teplot u svorníků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou.

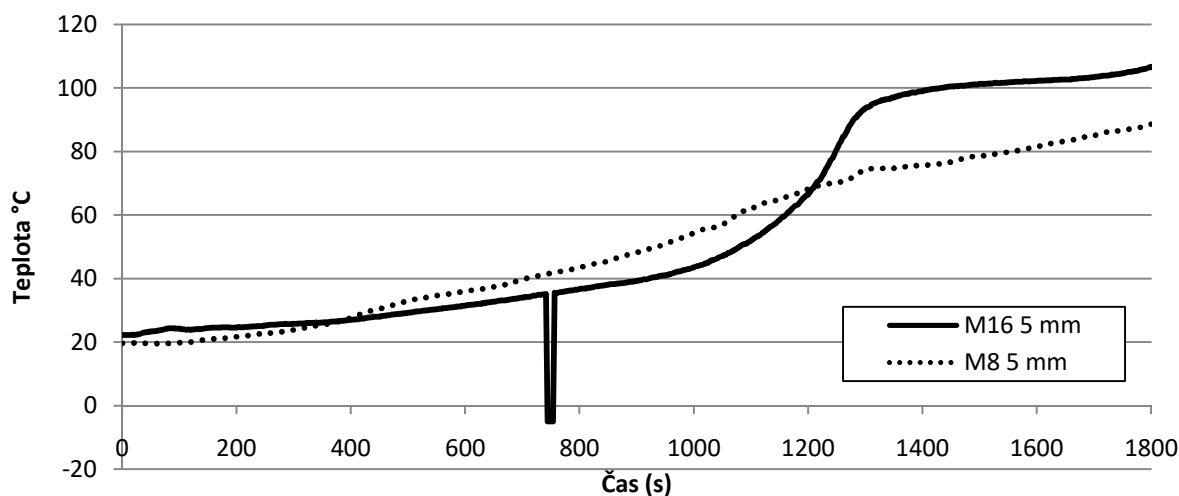


Obr. 54 -Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou



Obr. 55 – Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou

V grafu (Obr. 55) můžeme pozorovat, že v případě menšího průměru svorníku došlo k většímu nárůstu teploty. Toto chování je odlišné od zbylých dvou grafů (Obr. 56, Obr. 54).



Obr. 56 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou

V grafu (Obr. 56) je možné do 1 000 s pozorovat menší nárůst teploty u většího spojovacího prostředku. V této době začala teplota většího spojovacího prostředku výrazně narůstat. K této změně nárůstu teploty nejspíš došlo z důvodu odpadnutí krycí dřevěné zátky. Spojovací prostředek již nebyl chráněn a rychleji se zahříval.

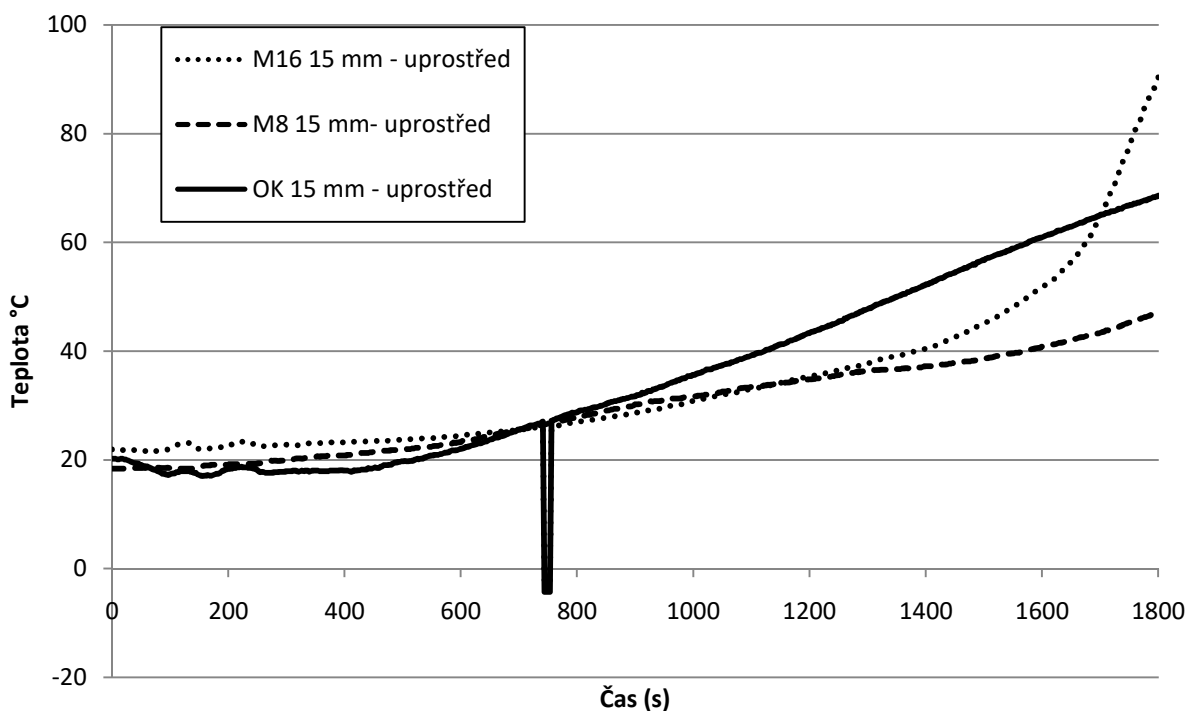
Ze získaných výsledků je možné říci, že velikost spojovacího prostředku má vliv na vývoj teploty ve spoji. Při zvětšení průměru spojovacího prostředku dochází k většímu nárůstu teploty. Tento jev lze vysvětlit větší ohřivanou plochou svorníku s rostoucí velikostí. V případě spojovacích prostředků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou byl rozdíl v průběhu teplot přibližně 10 °C do chvíle, kdy došlo k odpadnutí dřevěné zátky. V případě spojovacích prostředků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou byl rozdíl v průběhu teplot v rozmezí 5 °C. V případě spojovacích prostředků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou byl rozdíl v průběhu teplot až 30 °C. Menší svorník M8 vykazoval vyšší nárůst teploty než svorník o větším průměru. Teplota na termočlátku mohla být ovlivněna trhlinou v oblasti spoje a naměřit vyšší teploty.

Pro přesnější závěr by bylo vhodné otestovat širší škálu vzorků.

3.2.3 Vliv druhu spojovacího prostředku

Vliv na šíření tepla ve spoji mají také použité druhy spojovacích prostředků. Spojovací prostředky se mohou lišit velikostí, materiálem, únosností a tvarem.

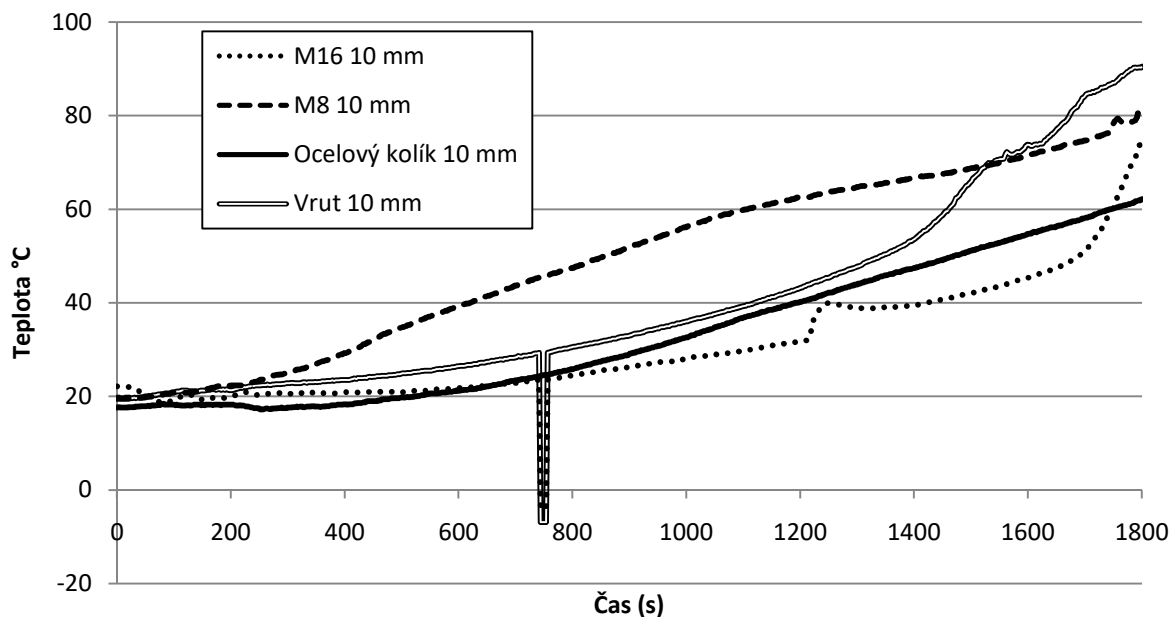
Na vybraných grafech jsou znázorněny průběhy teplot z kontrolních bodů spojovacích prostředků zapuštěných 15 mm od okraje (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), 10 mm od okraje (Obr. 58) 5 mm od okraje (Obr. 59) a 5 mm bez zátky (Obr. 60).



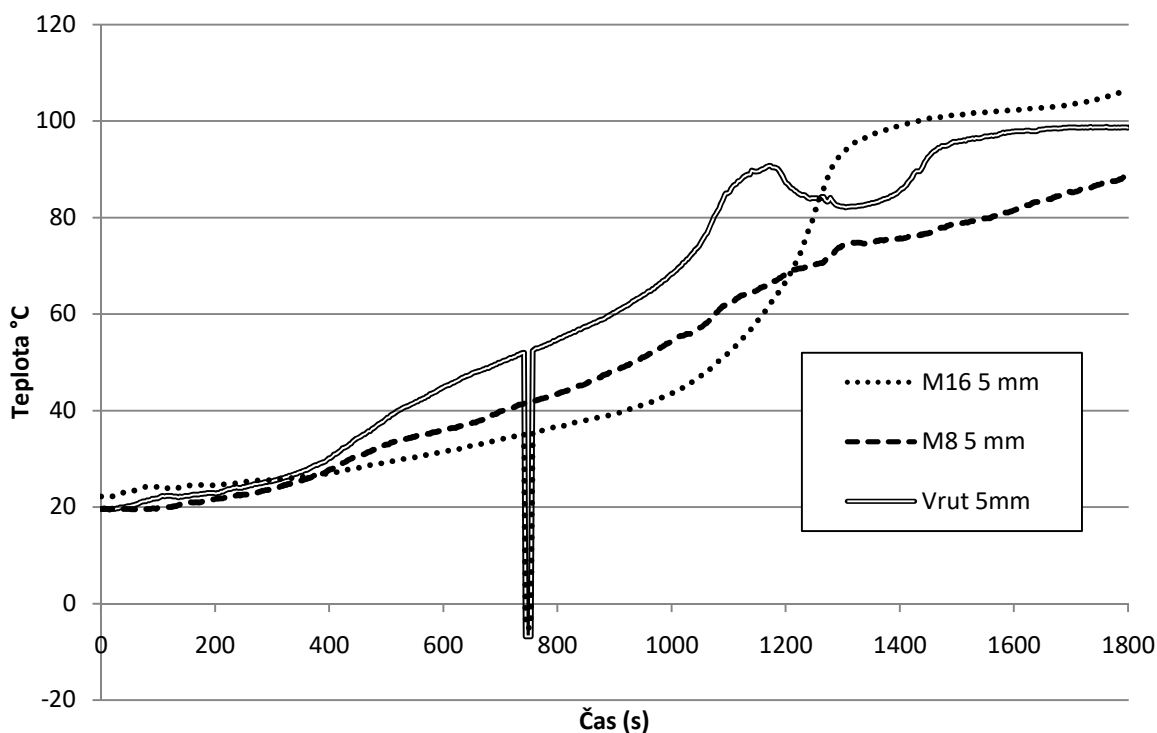
Obr. 57 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou

V případě, kdy spojovací prostředky byly zakryty 15 mm dřevěnou zátkou (Obr. 57), byl největší nárůst teploty v blízkosti ocelového kolíku. V čase 1 700 s došlo ke skokovému nárůstu teploty u svorníku M16. Nejspíš v důsledku odpadnutí dřevěné zátky. Nejnižší teploty byly naměřeny na termočlánek u svorníku M8. Svorník M8 má nejmenší ohříváný objem, proto byl nárůst teplot nejmenší. Rozdíl v teplotách se pohyboval okolo 20 °C.

V případě, kdy spojovací prostředky byly zakryty 10 mm dřevěnou zátkou (Obr. 58), byl největší nárůst teploty v blízkosti svorníku M8 a v blízkosti ocelového vrutu. Tyto naměřené hodnoty mohly být ovlivněny výsušnou trhlinou v blízkosti termočláneků. Data proto mohou být zkreslená. V čase 1 700 s došlo ke skokovému nárůstu teploty u svorníku M16. Nejspíš v důsledku odpadnutí dřevěné zátky. Nejnižší teploty byly naměřeny na termočlánek u svorníku M16. V blízkosti ocelového kolíku byly naměřené vyšší teploty než v blízkosti svorníku M16 jako v předchozím případě.

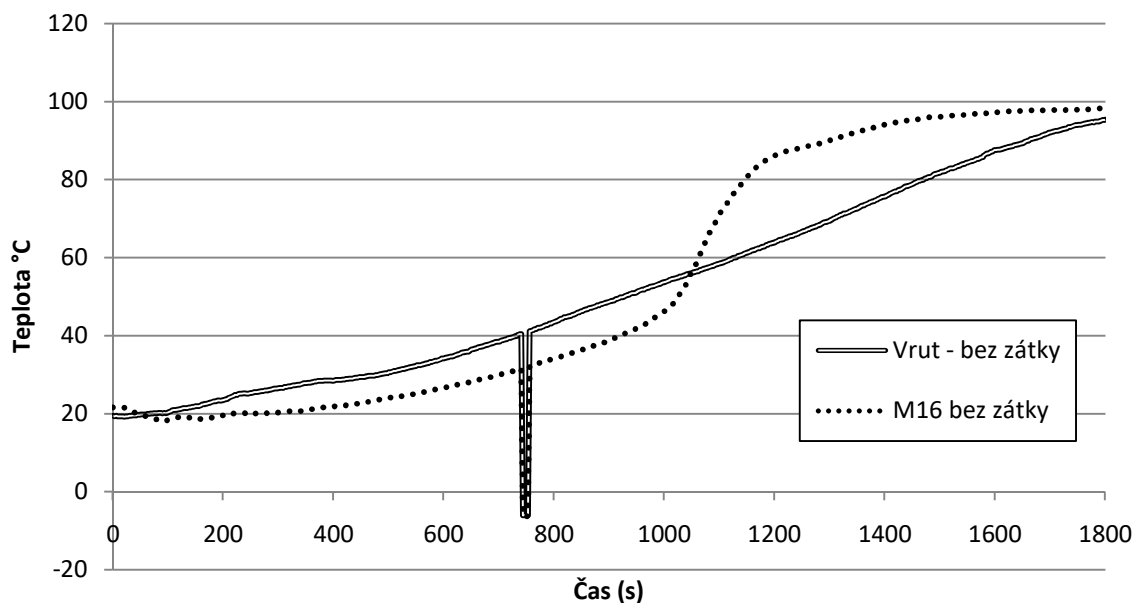


Obr. 58 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou



Obr. 59 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou

V případě, kdy spojovací prostředky byly zakryty 5 mm dřevěnou zátkou (Obr. 57), byl největší nárůst teploty v blízkosti ocelového vrutu. V čase 1 300 s došlo ke skokovému nárůstu teploty u svorníku M16. Svorník M8 měl nejmenší nárůst teploty.



Obr. 60 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků bez dřevěné zátky

Na grafu (Obr. 60) je vidět, že kolem 1 100 s došlo k výraznému nárůstu teploty v případě ocelového svorníku M16. Do tohoto času byl nárůst teploty u svorníku menší než v případě ocelového vrutu.

Spoje s ocelovými kolíky mají oproti svorníkům M16 vyšší nárůst teplot. Tento jev lze vysvětlit větším objemem ohřívání hmoty.

U svorníků M16 dochází k menšímu nárůstu teplot než v případě svorníku M8 a vrutu. Naměřené teploty mohou být ovlivněny větším růstem teplot v důsledku výsušné trhliny. Vzorek č. 2, který obsahoval vruty a svorníky M8, měl výsušnou trhlinu situovanou v blízkosti spoje.

3.3 Závěr experimentální analýzy

Z požárního experimentu byly získány hodnoty teplot naměřených termočlánky. Z těchto hodnot byly v programu Excel vytvořeny grafy, na základě nichž byla provedena analýza.

Zkoumanými vlivy byla hloubka zapuštění spojovacího prostředku, velikost spojovacího prostředku a druh spojovacího prostředku. Analýza byla provedena na základě výsledků z požárního experimentu do 30 minut. Závěry, které vyplývají z výsledků, nemusí platit pro všechny situace. Pro přesnější závěry by bylo nutné použít širší soubor testovaných vzorků.

Významný vliv na průběh teplot ve spoji měla hloubka zapuštění spojovacího prostředku. S rostoucí hloubkou zapuštění byl nárůst teplot ve spojovacích prostředcích pomalejší. Zásadní vliv na růst teplot ve spojovacích prostředcích mělo zakrytí spojovacích prostředků dřevěnými zátkami. V případech, kdy nebyly spojovací prostředky chráněny dřevěnými zátkami, docházelo k největšímu nárůstu teplot.

Dalším zkoumaným vlivem byla velikost a druh použitého spojovacího prostředku. Tyto dva vlivy spolu úzce souvisely. Spojovací prostředky se mohou lišit velikostí, tvarem, materiálem a únosností. Tyto vlivy významně ovlivňují růst teplot. Z provedené analýzy lze konstatovat, že s větším ohříváním objemem spojovacího prostředku je nárůst teplot větší. Při porovnání stejných délek svorníků M8 a M16, byl svorník s větším průměrem M16 ohříván rychleji. Ohřívání objem byl větší.

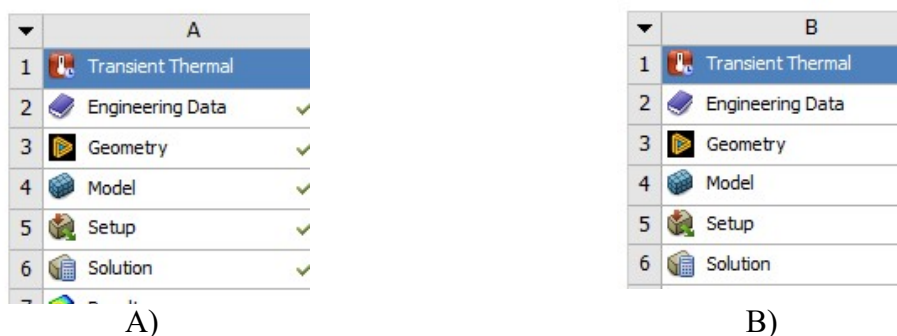
V případě vlivu spojovacího prostředku výsledky nejsou jednoznačné. Vliv na výsledky měly v tomto případě výsušné trhliny v blízkosti spoje, kde byly umístěny termočlánky. Jednalo se o svorník M8 a ocelový vrut. Nejvyšších teplot dosahovaly termočlánky umístěné v blízkosti svorníku M8 v případě hloubky zapuštění 10 mm. V případě hloubky zapuštění 5 mm dosahovaly nejvyšších hodnot termočlánky v blízkosti ocelového vrutu Ø 8 mm. Teploty v blízkosti ocelového kolíku dosahovaly vyšších hodnot než v blízkosti svorníku M16. V případě nechráněných spojovacích prostředků dosahoval termočlánek u vrutu větších hodnot do času 1 100 s. Po tomto čase termočlánek v blízkosti svorníku M16 dosahoval vyšších hodnot. Z analýzy vlivu spojovacího prostředku nelze vyvodit jednotný závěr. Chování bylo ovlivněno mnoha faktory, například vliv trhliny, hloubka zapuštění a zakrytí dřevěnou zátkou. Pro přesnější závěr by bylo vhodné otestovat širší škálu vzorků.

4 Numerický model

Numerický model byl vytvořen v programu ANSYS v rozhraní Workbench metodou konečných prvků. ANSYS Workbench je platforma, která kombinuje softwarové balíčky produktů ANSYS a přenáší mezi nimi data.

Byly vytvořeny dva modely vzorků (Obr. 61). Modely dřevěných spojů s ocelovými spojovacími prvky kopírují geometrii a materiálové vlastnosti zkušebních vzorků z experimentální studie popsané v kapitole 3.

Výpočetní čas byl nastaven na 30 minut (1 800 s).



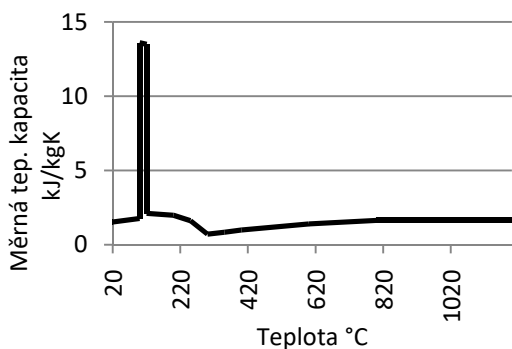
Obr. 61- Pracovní prostředí ANSYS Workbench- A) Teplotní analýza vzorku 1; B) Teplotní analýza vzorku 2

Program ANSYS byl vyvinut americkou společností ANSYS, Inc. Společnost sídlí v Pensylvánii. Hlavním produktem je program ANSYS, který řeší mnoho typů analýz. Například termodynamickou, strukturální a analýzu založenou na proudění kontinua. V programu je možné využít sloučení více analýz a provádět multifyzikální analýzu. Například je možné řešit statickou a teplotní analýzu. Simulace se většinou provádějí v rozhraní Workbench. Model byl vytvořen v tomto rozhraní s využitím analýzy přestupu tepla Transient Thermal. [19]

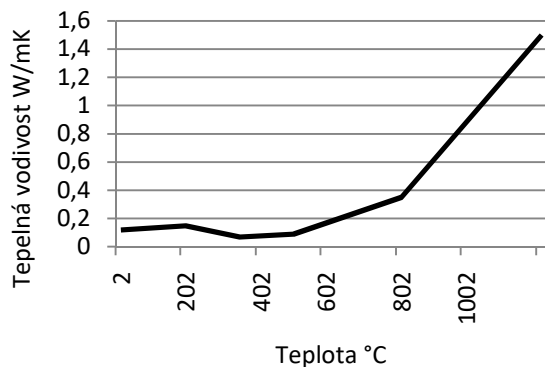
4.1 Materiálové vlastnosti

V programu Engineering data byl použit materiál Structural steel a vytvořen nový materiál Wood. Vlastnosti dřeva byly zadány dle EC5 [4] v závislosti na teplotě. Na Obr. 62 jsou zobrazeny hodnoty materiálových vlastností, které byly zadány do programu.

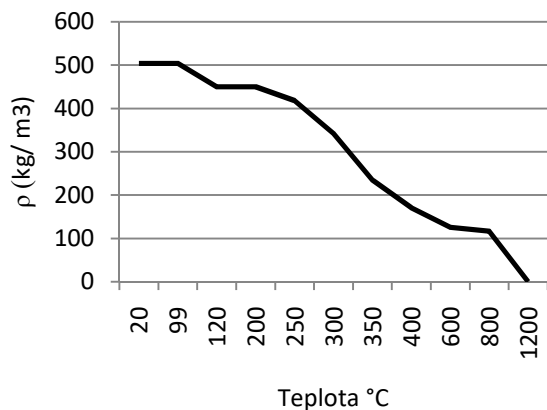
A) Dřevo



Měrná tepelná kapacita

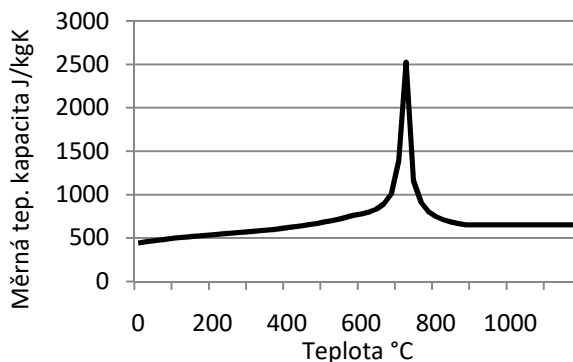


Tepelná vodivost

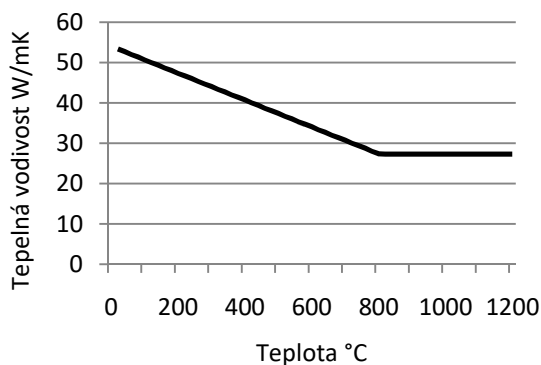


Objemová hmotnost

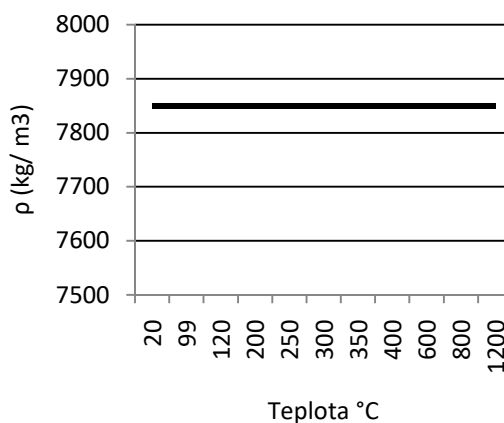
B) Ocel



Měrná tepelná kapacita



Tepelná vodivost



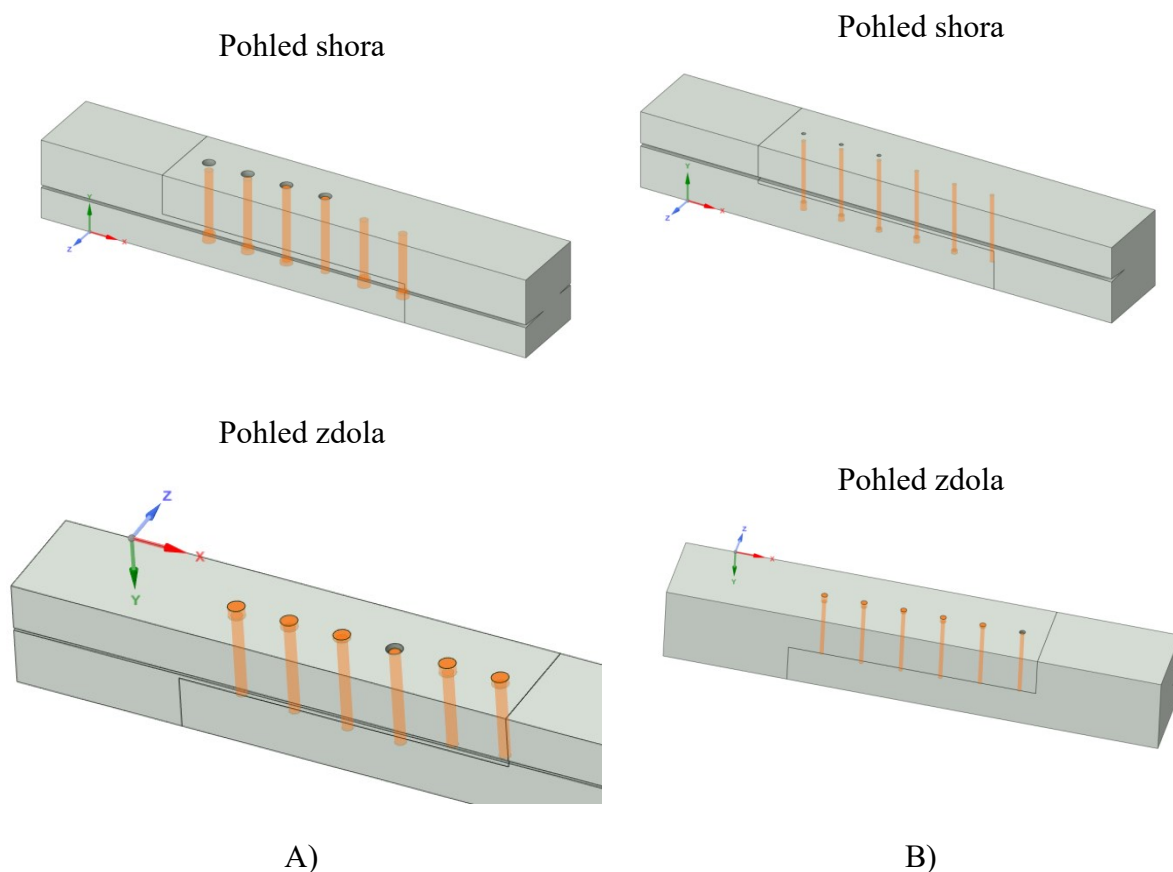
Objemová hmotnost

Obr. 62- Materiálové vlastnosti: A) Dřevo [4]; B) Ocel [20]

4.2 Geometrie modelu

Geometrie modelu byla vytvořena v programu SpaceClaim na základě navržených zkušebních vzorků, viz kapitola 3.1.2 Zkušební vzorky.

Modely byly vytvořeny dva o rozměrech 160 x 160 x 1 000 mm. Každý model je tvořen několika komponenty. Hlavní modelované komponenty jsou části dřevěného spoje, tedy dva pláty. Další komponenty jsou tvořeny ocelovými spojovacími prostředky. V případě modelu prvního zkušebního vzorku se jedná o 4x svorník M16 v délkách 130 mm, 140 mm a 2x 150 mm. Dále 2x ocelový kolík Ø 16 mm v délce 120 mm. Otvory pro svorníky a kolíky jsou zakryty dřevěnými zátkami v tloušťkách 5 mm, 10 mm a 15 mm. V případě modelu druhého zkušebního vzorku se jedná o 3x svorník M8 v délkách 130 mm, 140 mm a 150 mm. Dále 3x vrut Ø 8 mm o délce 120 mm. Na Obr. 63 jsou zobrazeny modelované vzorky. Svorníky, kolíky a vruty jsou modelovány jako hladké válce. Netěsnost, která je způsobena vroubkováním svorníků a vrutů, je zanedbána. Vliv na prostup tepla je minimální. Dále jsou v modelu vytvořeny trhliny podle skutečných rozměrů.



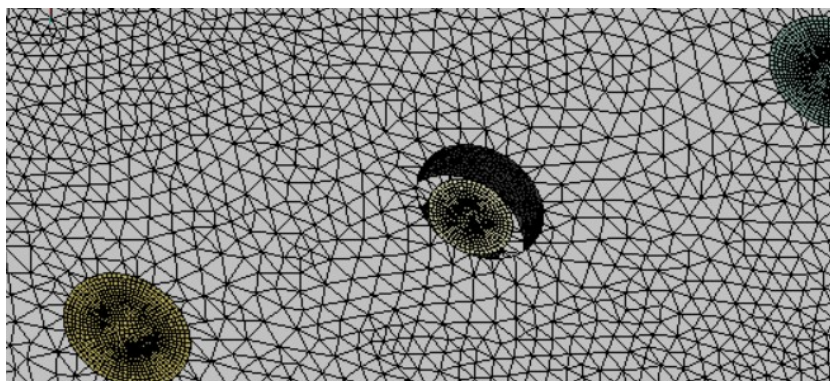
Obr. 63- A) model vzorku č. 1; B) model vzorku č. 2

4.3 Model

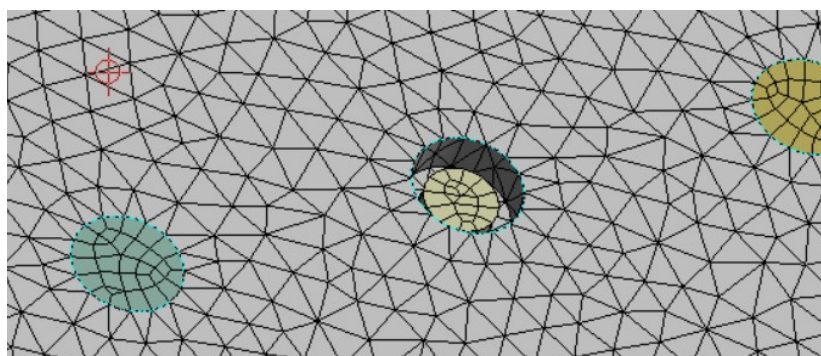
Model byl vytvořen v programu Mechanical.

4.3.1 Výpočetní síť

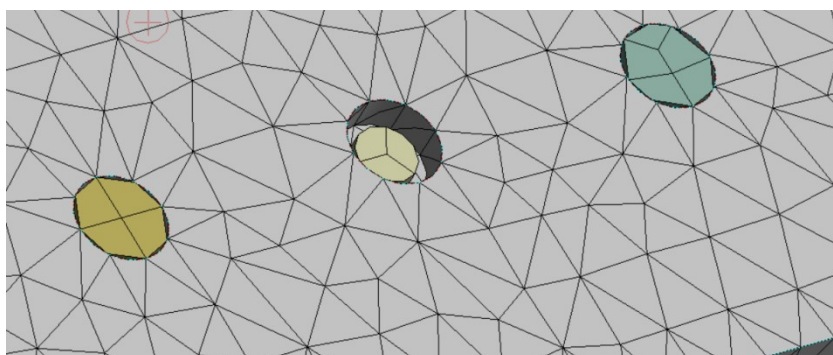
Dále byla nastavena výpočetní síť modelu. Výpočetní síť byla nastavena na 0,001 m (Obr. 64), 0,005 m (Obr. 65) a 0,01 m (Obr. 66). Byl sledován rozdíl ve výsledcích a vliv jemnosti výpočetní sítě na přesnost výpočtu.



Obr. 64- Výpočetní síť 0,001 m



Obr. 65- Výpočetní síť 0,005 m



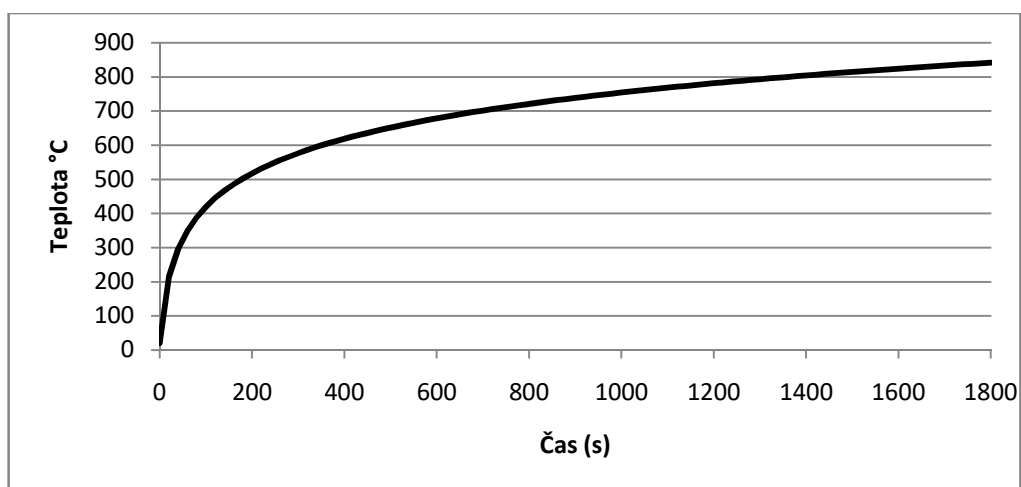
Obr. 66- Výpočetní síť 0,01 m

4.3.2 Teplotní zatížení

Modely byly vystaveny normové teplotní křivce ISO 834 [17] (Obr. 67). Nominální normová teplotní křivka je univerzální křivka pro všechny objekty. Na základě této křivky jsou stanoveny tabulkové hodnoty součinitele odhořívání, požární odolnosti, atd. Pro přestup tepla prouděním byl použit součinitel přestupu tepla $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ [17], pro tepelný tok radiací byla použita emisivita oceli $\varepsilon = 0,7$ [20].

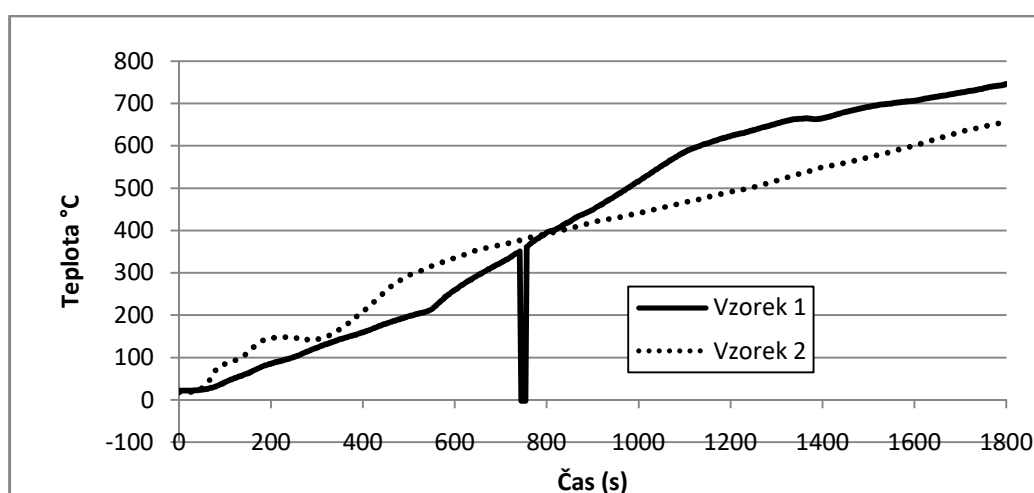
Rovnice nominální normové teplotní křivky:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) [17] \quad [^\circ\text{C}]$$



Obr. 67 - Normová teplotní křivka ISO 834 [17]

Plochy uvnitř výsušné trhliny byly vystaveny naměřeným teplotám na termočláncích (Obr. 68).

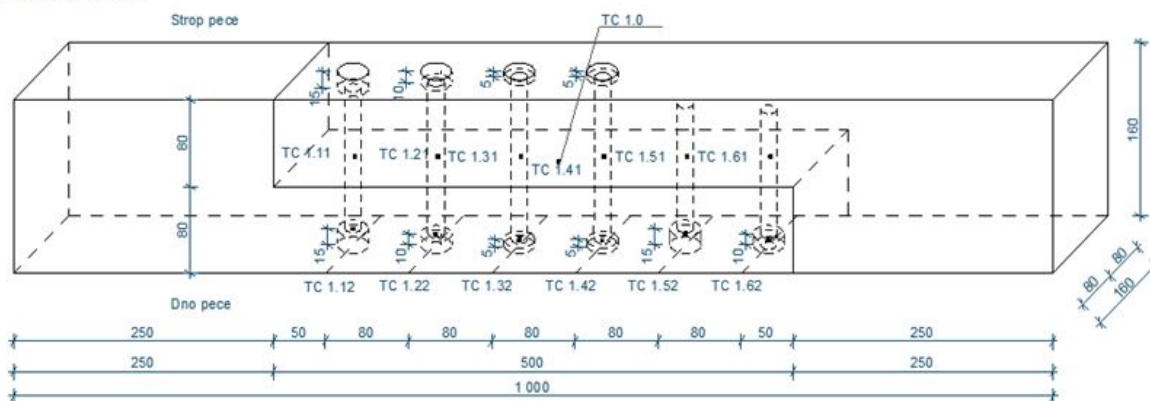


Obr. 68 – Naměřené teploty uvnitř výsušných trhlin vzorků

4.3.3 Umístění kontrolních bodů

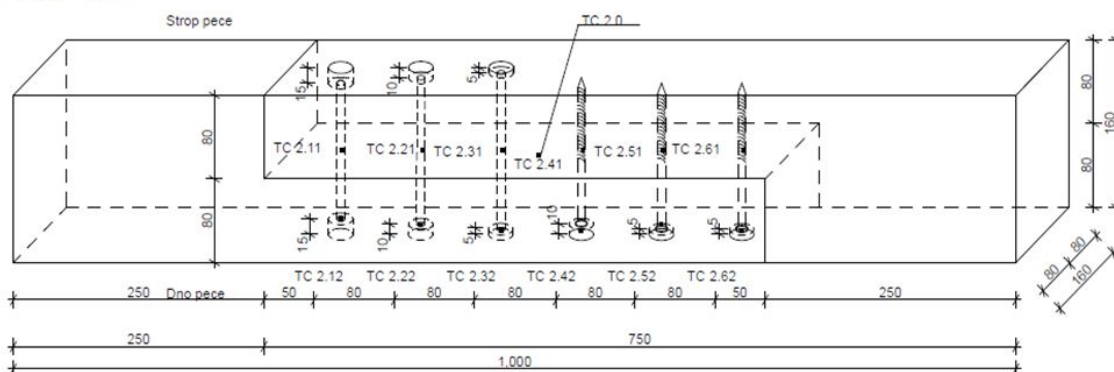
Umístění kontrolních bodů bylo voleno tak, aby co nejvíce odpovídalo umístění termočlánků z experimentální studie (Obr. 69, Obr. 70).

Orientace vzorku vůči peci



Obr. 69 - Model 1- rozmístění kontrolních bodů

Orientace vzorku vůči peci



Obr. 70 - Model 2- rozmístění kontrolních bodů

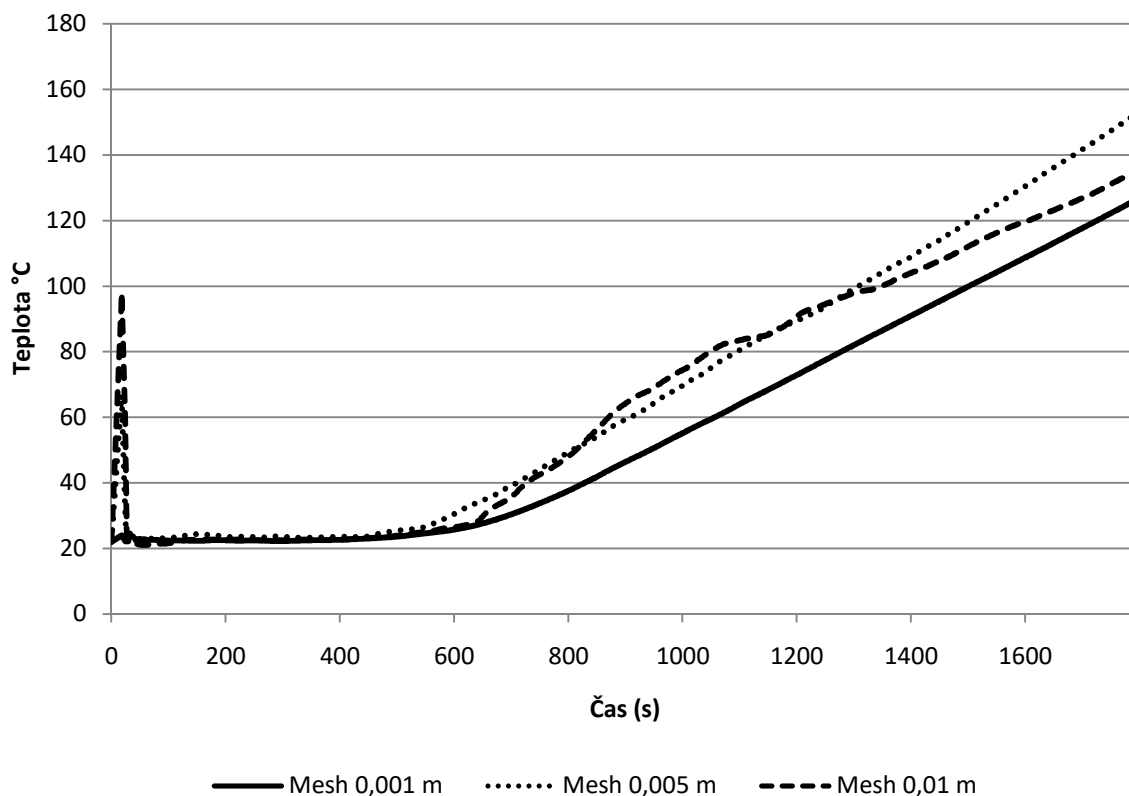
5 Analýza výsledků numerického modelu

V této kapitole jsou výsledky numerického modelu porovnány s hodnotami získanými z požárního experimentu.

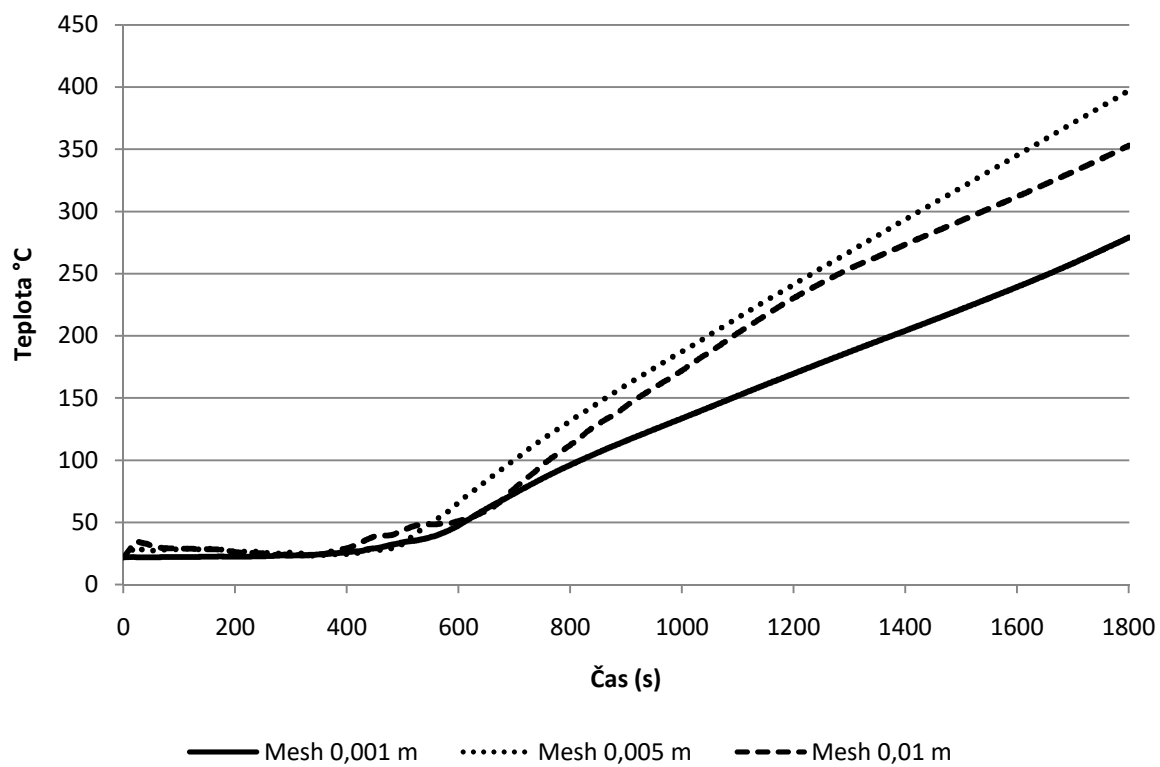
5.1 Jemnost výpočetní sítě

První provedenou analýzou je citlivostní analýza jemnosti výpočetní sítě. Na Obr. 71 je graf, který znázorňuje průběhy teplot v čase na termočlátku 1.11 (ve spoji v blízkosti spojovacího prostředku M16). Na dalším grafu (Obr. 72) jsou znázorněny průběhy teplot v čase na termočlátku 1.12 (ve spoji v blízkosti spojovacího prostředku M16 pod dřevěnou zátkou).

U výpočetní sítě 0,005 m a 0,01 m vznikaly minusové teploty. Tento jev se nazývá teplotní šok. Dochází k němu při rozdělení modelu do příliš velkých částí, tedy při nastavení příliš hrubé výpočetní sítě. V případě výpočetní sítě 0,001 m již k teplotním šokům nedochází. S ohledem na limity studentské licence a výpočetní čas nebyla výpočetní síť dále zjemňována. Pro potřeby modelu byla použita výpočetní síť 0,001 m.



Obr. 71- Vývoj teplot v čase v kontrolním bodě TC 1.11

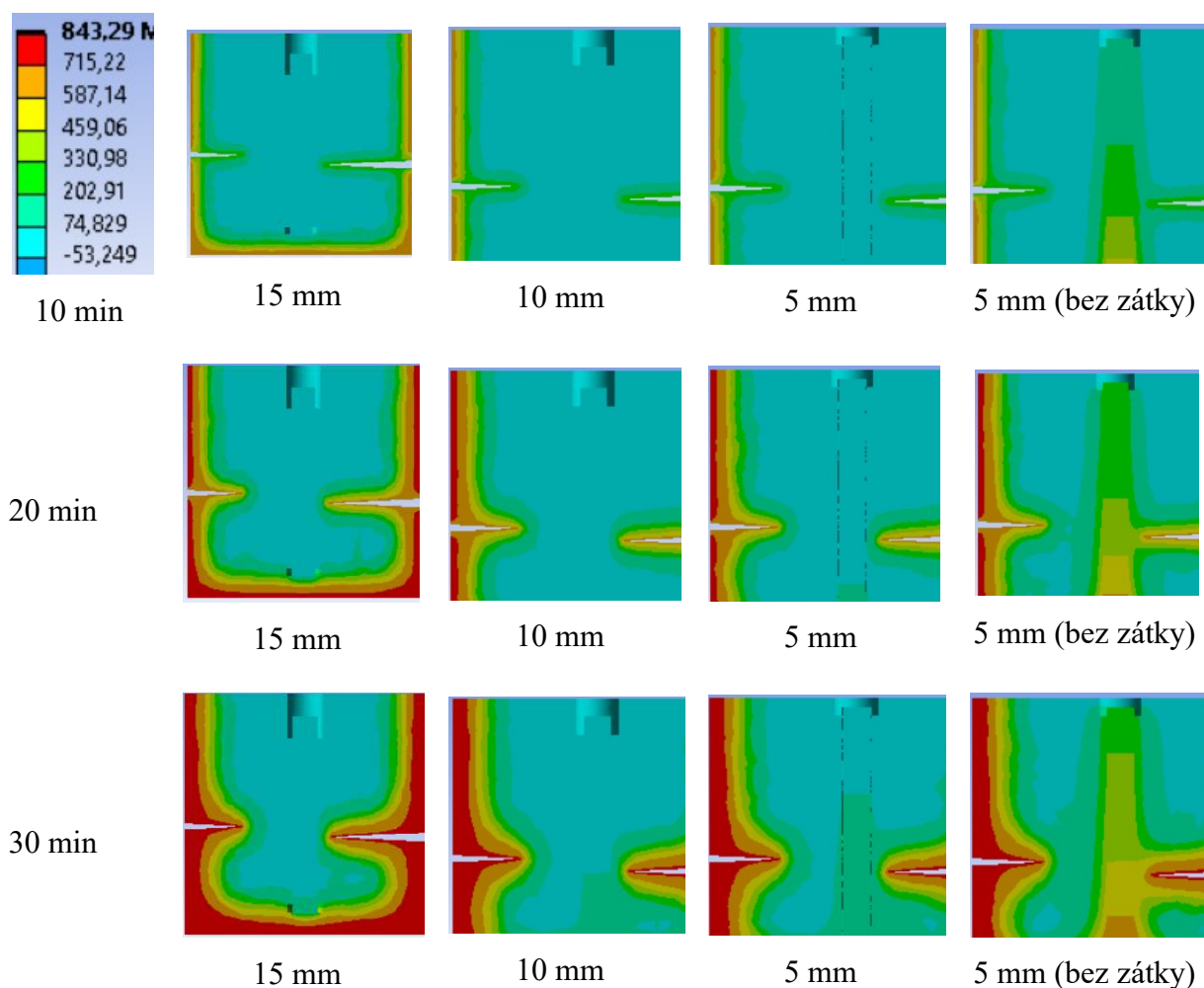


Obr. 72- Vývoj teplot v čase v kontrolním bodě TC 1.12

5.2 Porovnání modelu s hodnotami z experimentu

5.2.1 Svorník M16

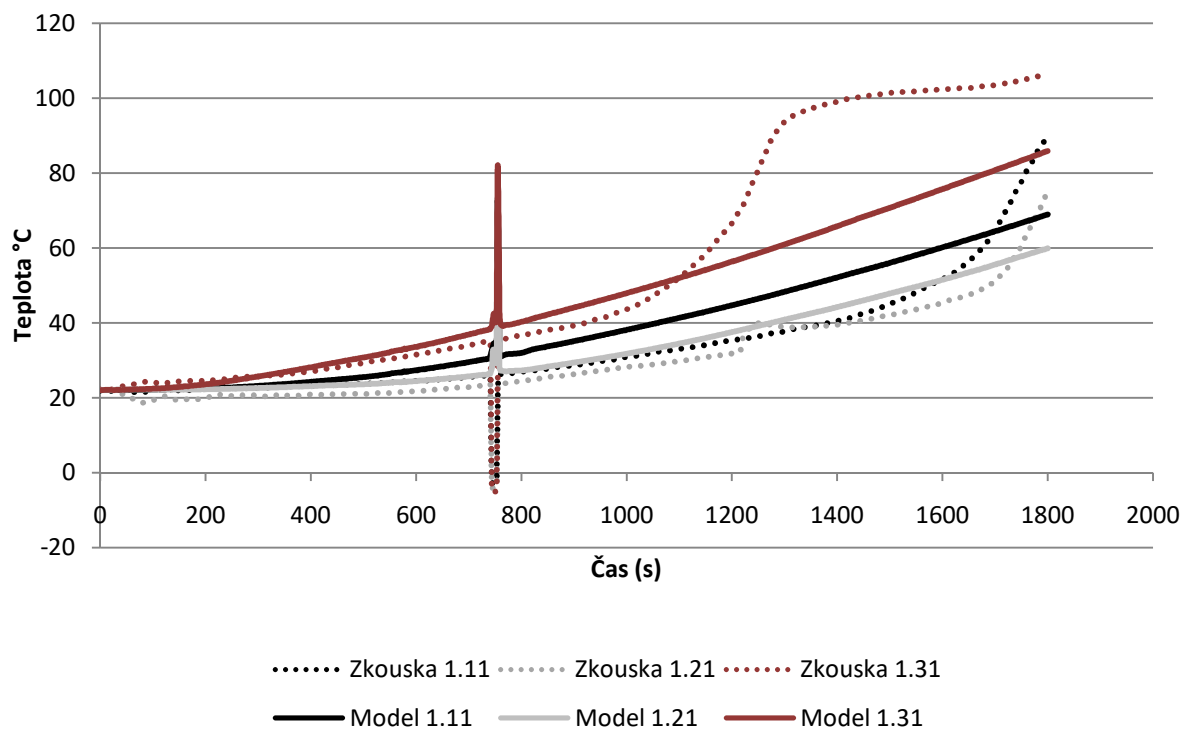
Na Obr. 73 je znázorněno rozložení teploty získané z modelu vytvořeném v programu ANSYS. V modelu byly vedeny řezy v místech se svorníky M16. Výsledky teplotní analýzy jsou v časech 10, 20 a 30 minut. Na řezu spojem je vidět vliv trhliny na ohřívání průřezu. U trhliny o větší hloubce došlo k negativnímu vlivu na spojovací prostředky. Vlivem trhliny došlo k výraznému nárůstu teploty ve spojovacím prostředku. Na řezech je také vidět vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku a zakrytí dřevěnou zátkou. V případě, kdy nebyl spojovací prostředek zakryt dřevěnou zátkou, docházelo k největšímu nárůstu teploty ve spojovacím prostředku. Nejmenší nárůst teploty ve spojovacím prostředku byl v případě hloubky zapuštění 15 mm. S menší hloubkou zapuštění dochází k vyššímu nárůstu teploty ve spojovacím prostředku.



Obr. 73 – Teplota v průřezu se svorníkem M16 v časech 600, 1200, 1800 s

Na grafu (Obr. 74) jsou vyneseny hodnoty z požárního experimentu a hodnoty získané z programu ANSYS. Průběhy teplot získaných z modelu jsou blízké naměřeným hodnotám z požárního experimentu. Odchýlení teplot od naměřených hodnot se pohybuje kolem 20°C. U průběhu teploty termočlánek 1.31 došlo v čase 1 200 s k výraznému nárůstu teploty. Pravděpodobně k tomu došlo v důsledku odhoření či odpadnutí dřevěné zátky, spojovací prostředek byl nechráněný. V modelu tato změna stavu zahrnuta nebyla. Maximální odchýlení od naměřené teploty bylo 40 °C.

M16 - termočláanky ve spoji



Obr. 74 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti svorníku M16

Vysvětlivky ke grafu:

Model - teploty z modelu studie

Zkouška - teploty získané z požárního experimentu

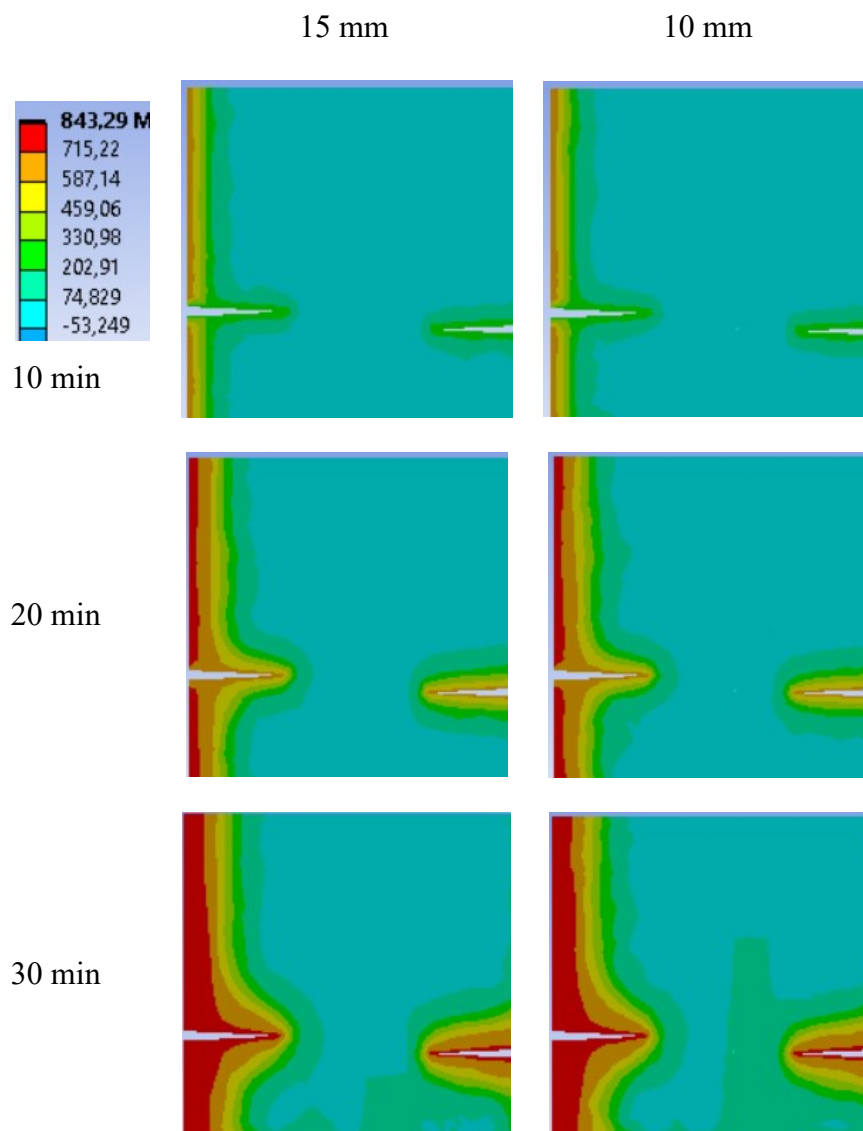
1.11 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 15 mm+ dřevěná zátka)

1.21 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 10 mm+ dřevěná zátka)

1.31 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 5 mm+ dřevěná zátka)

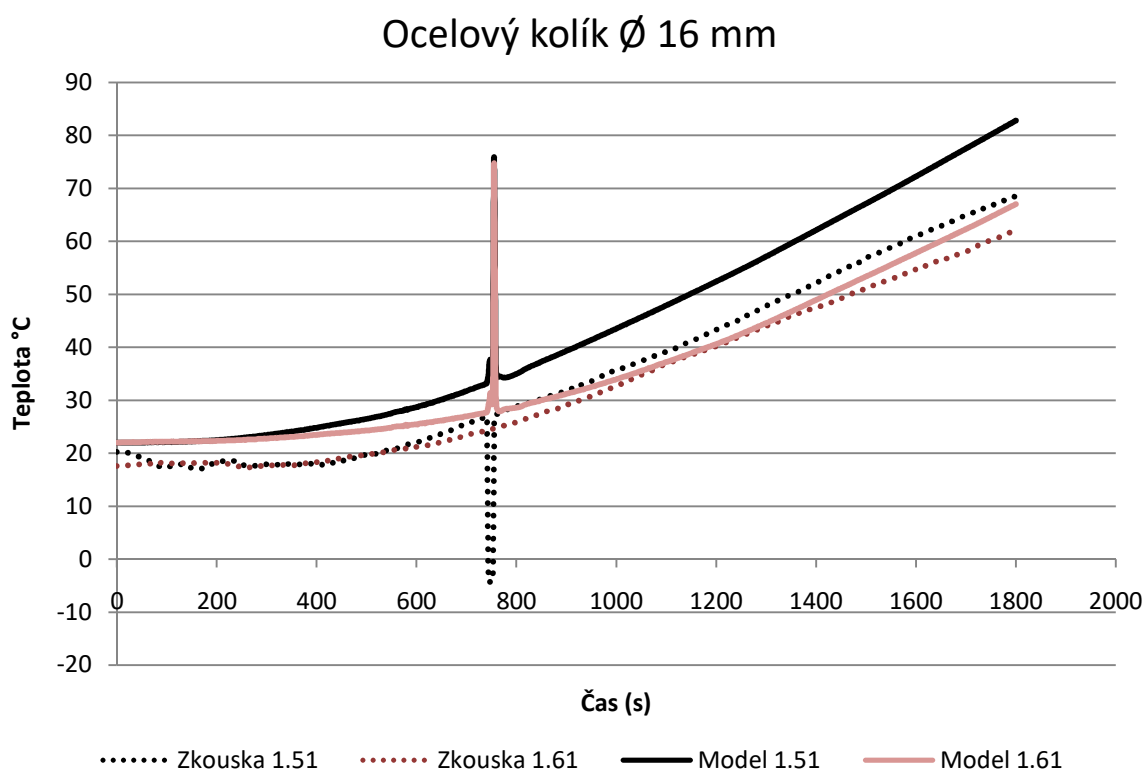
5.2.2 Ocelový kolík Ø 16 mm

Na Obr. 75 je znázorněno rozložení teploty získané z modelu vytvořeném v programu ANSYS. V modelu byly vedeny řezy v místech s ocelovými kolíky Ø16 mm. Výsledky teplotní analýzy jsou v časech 10, 20 a 30 minut. Z řezů je patrné, že větší hloubka zapuštění spojovacího prostředku pozitivně ovlivňuje nárůst teploty spojovacího prostředku. Na řezu spojem je vidět vliv trhlin na růst teploty v průřezu. U trhliny o větší hloubce došlo k negativnímu vlivu na nárůst teploty spojovacích prostředků.



Obr. 75 - Teplota v průřezu ocelovým kolíkem Ø 16 mm v čase 1800 s

Na grafu (Obr. 76) jsou vyneseny hodnoty z požárního experimentu a hodnoty získané z programu ANSYS. Průběhy teplot získaných z modelu jsou blízké naměřeným hodnotám z požárního experimentu. Odchýlení teplot od naměřených hodnot se pohybuje kolem 5°C v případě hloubky zapuštění 10 mm. Maximální odchýlení od naměřené teploty bylo 20 °C v případě hloubky zapuštění 15 mm. U průběhu teploty došlo v čase 750 s k výraznému poklesu teploty. V tomto čase došlo při požární zkoušce k výpadku měření termočlánku a nastal teplotní šok, kdy se naměřené teploty dostaly do záporných hodnot. V modelu byly pro teplotní zatížení trhliny použity teploty naměřené na termočláncích v trhlinách. Tyto hodnoty také měly v čase 750 s záporné hodnoty. Tento teplotní šok se projevil ve výsledcích z modelu zvýšenými teplotami.



Obr. 76 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti ocelového kolíku Ø 16 mm

Vysvětlivky ke grafu:

Model - teploty z modelu studie

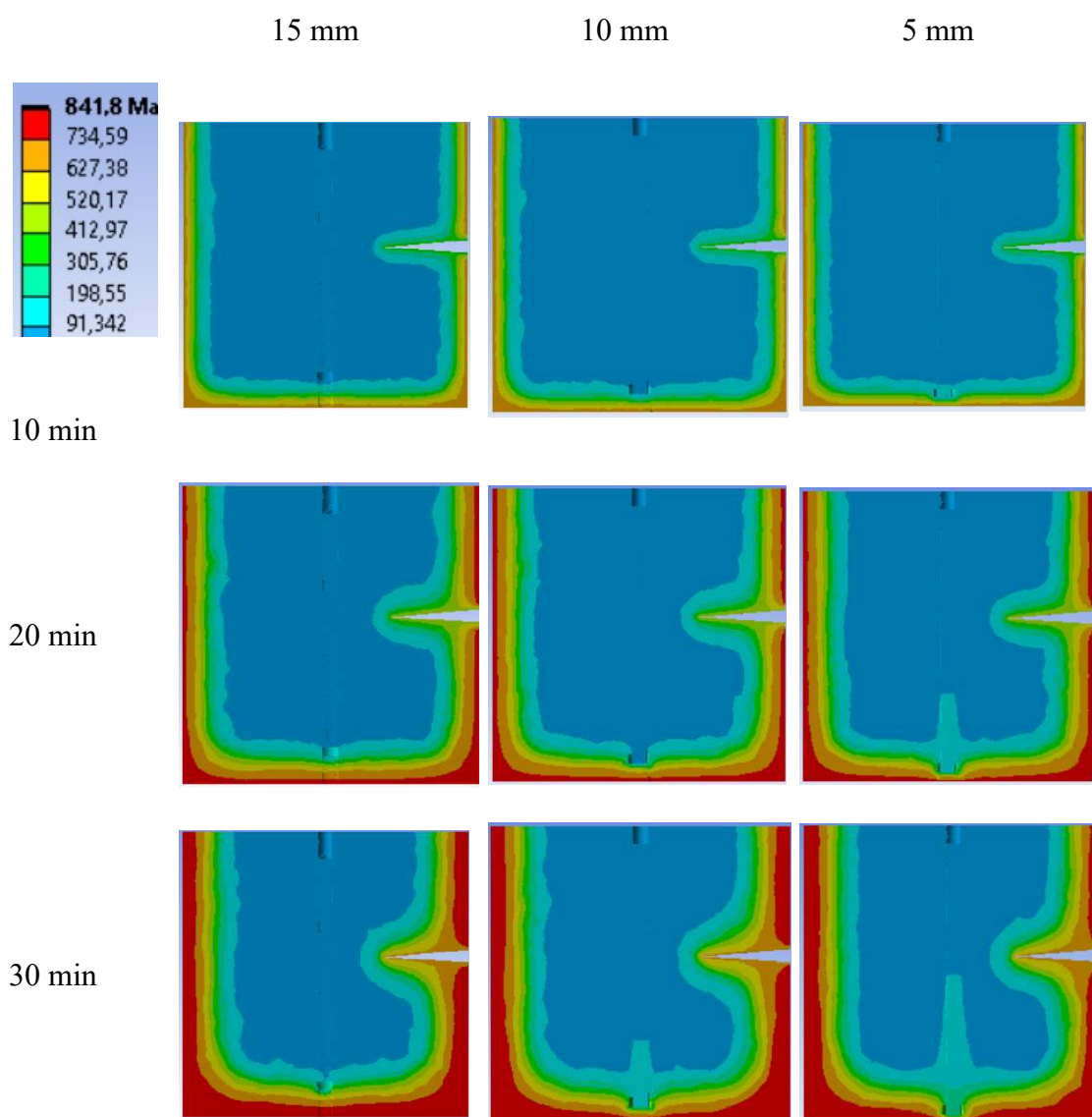
Zkouška - teploty získané z požárního experimentu

1.51 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 15 mm+ dřevěná zátka)

1.61 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 10 mm+ dřevěná zátka)

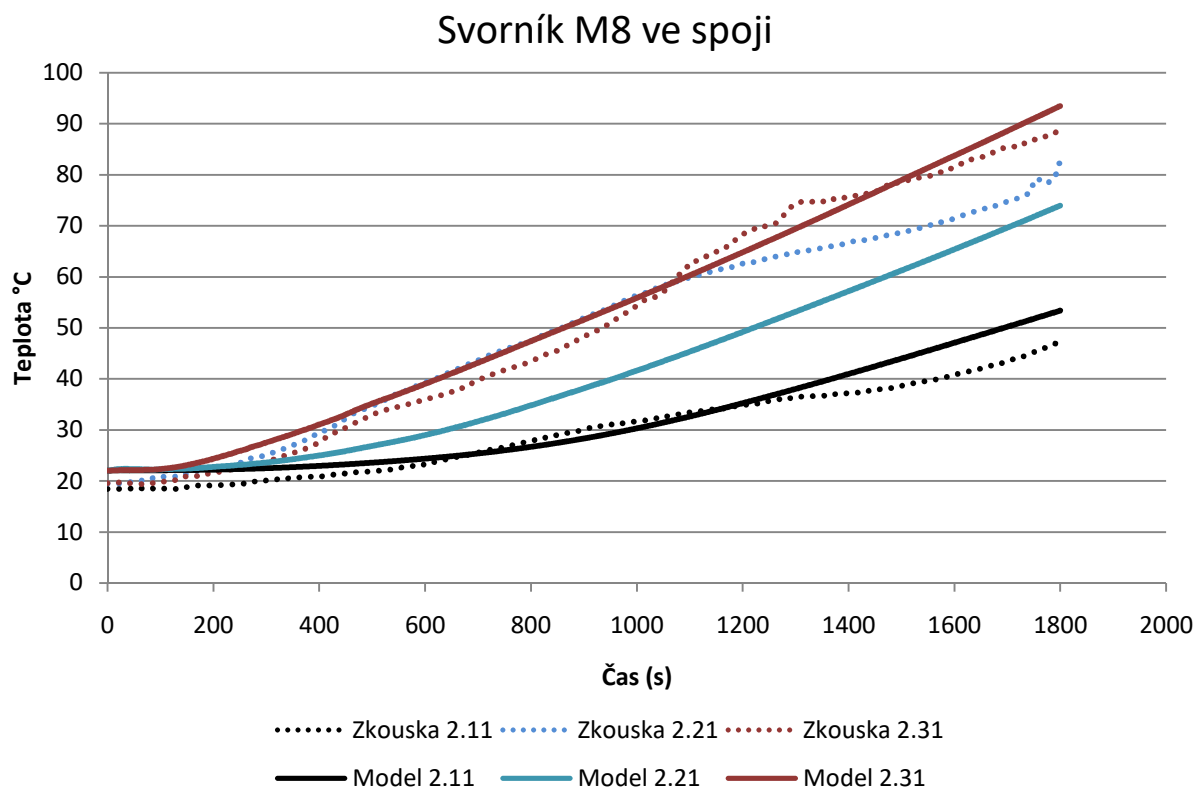
5.2.3 Svorník M8

Na Obr. 77 je znázorněno rozložení teploty získané z modelu vytvořeném v programu ANSYS. V modelu byly vedeny řezy v místech se svorníky M8. Výsledky teplotní analýzy jsou v časech 10, 20 a 30 minut. Stejně jako v předchozích případech je na řezu vidět vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku na teplotu ve spojovacích prostředcích. S rostoucí hloubkou zapuštění je nárůst teploty nižší. Na řezu spoje je vidět, že výsušná trhлина ovlivňuje nárůst teploty uvnitř spoje. Výsušná trhлина nebyla o hloubce, která by výrazně ovlivnila nárůst teploty ve spojovacích prostředcích. Trhлина je v blízkosti spoje, kde byly umístěny termočlánky a kontrolní body. Z tohoto důvodu mohlo dojít k naměření vyšších hodnot, než v případě bez trhliny.



Obr. 77 - Teplota v průřezu svorníkem M8 v čase 1800 s

Na grafu (Obr. 78) jsou vyneseny hodnoty z požárního experimentu a hodnoty získané z programu ANSYS. Průběhy teplot získaných z modelu jsou blízké naměřeným hodnotám z požárního experimentu. Odchýlení teplot od naměřených hodnot se pohybuje mezi 5-20 °C. Průběh teploty termočlánek 2.21 je větší než průběh teploty získaný z modelu. Maximální odchýlení od naměřené teploty bylo 40 °C.



Obr. 78 – Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti svorníku M8

Vysvětlivky ke grafu:

Model - teploty z modelu studie

Zkouška - teploty získané z požárního experimentu

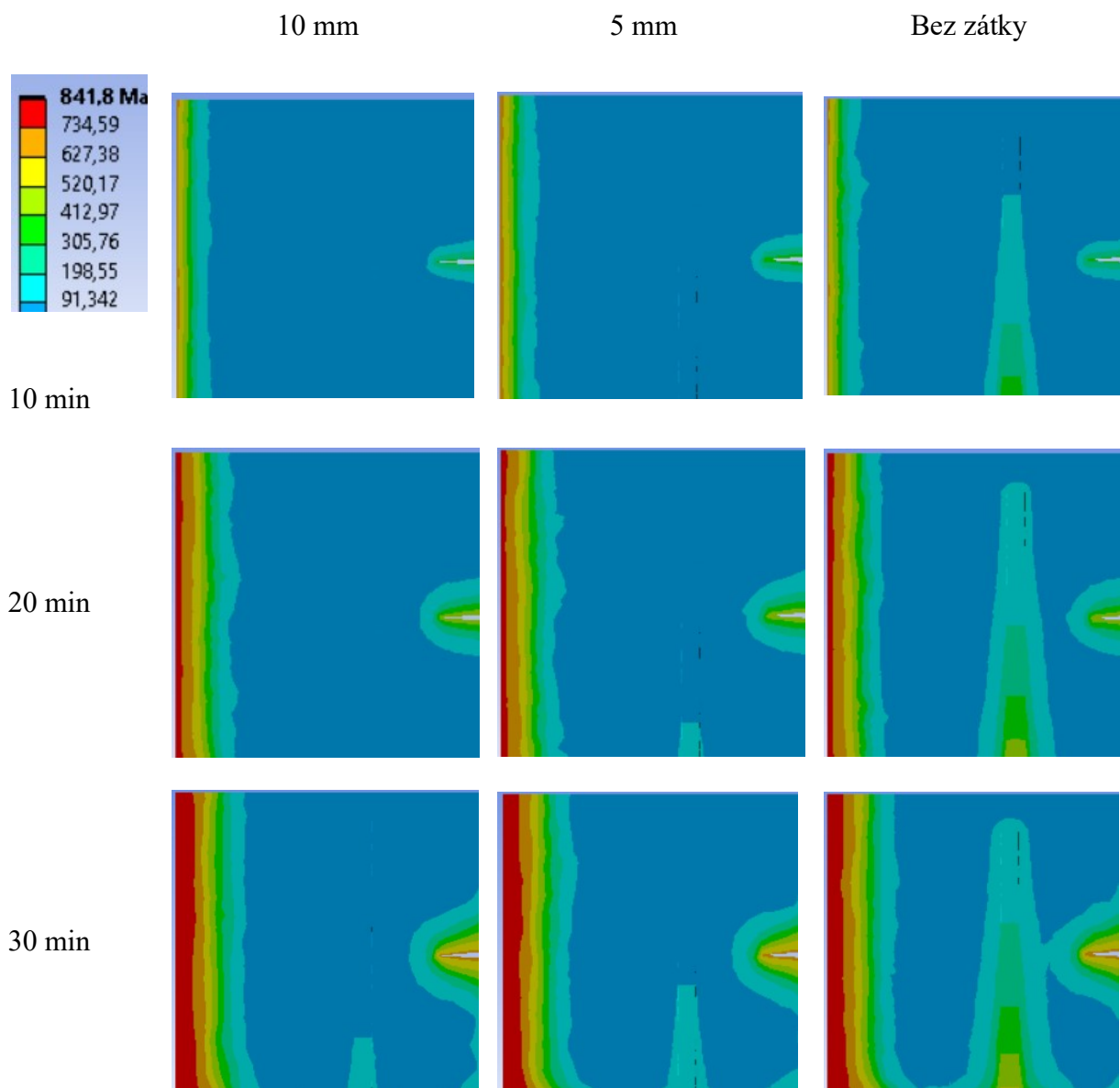
2.11 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 15 mm+ dřevěná zátka)

2.21 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 10 mm+ dřevěná zátka)

2.31 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 5 mm+ dřevěná zátka)

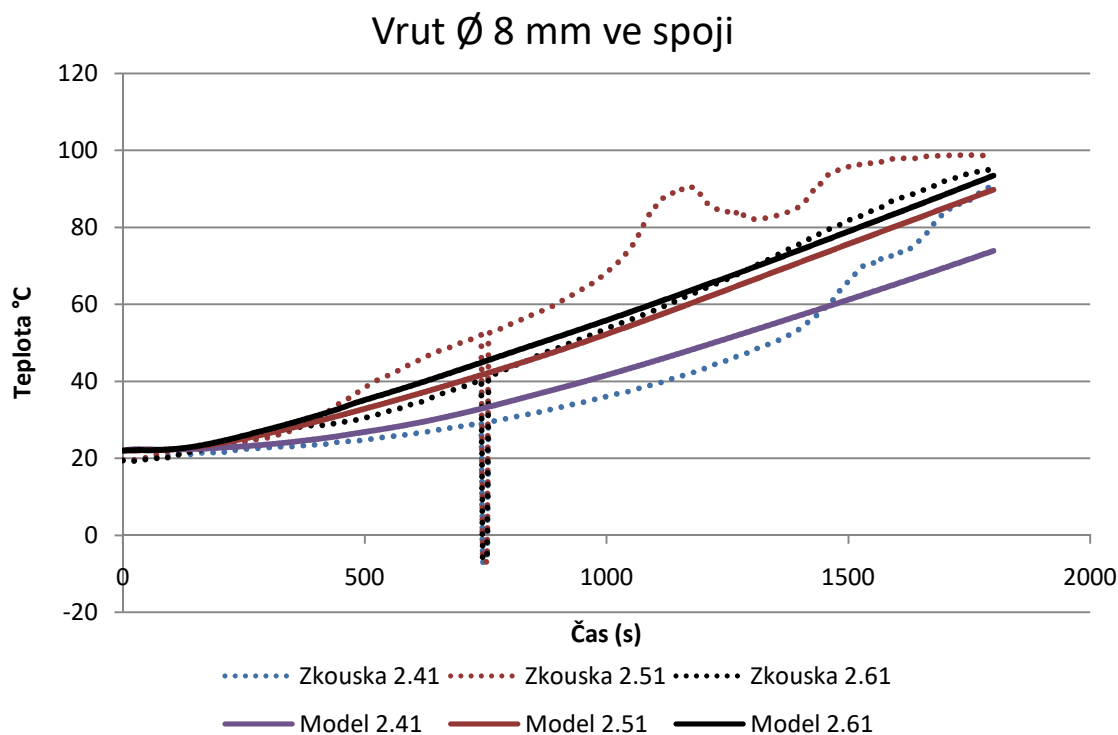
5.2.4 Vrut \varnothing 8mm

Na Obr. 79 je znázorněno rozložení teploty získané z modelu vytvořeném v programu ANSYS. V modelu byly vedeny řezy v místech s vruty \varnothing 8 mm. Výsledky teplotní analýzy jsou v časech 10, 20 a 30 minut. Z obrázku je patrné, že výsušná trhlina ovlivňuje nárůst teploty uvnitř spoje. Výsušná trhlina nebyla o hloubce, která by výrazně ovlivnila nárůst teploty ve spojovacích prostředcích. Trhlina je v blízkosti spoje, kde byly umístěny termočlánky a kontrolní body. Z tohoto důvodu mohlo dojít k naměření vyšších hodnot, než v případě bez trhliny. Dále je možné pozorovat vliv hloubky zapuštění a zakrytí dřevěnými zátkami na růst teplot ve spojovacích prostředcích.



Obr. 79 - Teplota v průřezu vrutem \varnothing 8 mm v čase 1800 s

V grafu (Obr. 80) jsou znázorněny průběhy teplot z kontrolních bodů v modelu a průběhy teplot z termočlánků umístěných ve spojích v blízkosti vrutů. Průběhy teplot získaných z modelu jsou blízké naměřeným hodnotám z požárního experimentu. Odchýlení teplot od naměřených hodnot se pohybuje v rozmezí 5-20 °C. Maximální odchýlení od naměřené teploty bylo v čase 1 200 s o 30 °C.



Obr. 80 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti vrutu Ø 8 mm

Vysvětlivky ke grafu:

Model - teploty z modelu studie

Zkouška - teploty získané z požárního experimentu

2.41 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 10 mm+ dřevěná zátka)

2.51 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 5 mm+ dřevěná zátka)

2.61 - termočlánek/ kontrolní bod (hloubka zapuštění 5 mm, bez dřevěné zátky)

5.3 Závěr numerického modelu

V programu ANSYS byla provedena teplotní analýza. Data získaná z programu byla porovnána s daty získanými z požárního experimentu. V modelu byla velikost výpočetní sítě nastavena na 0,001 m.

Z řezů vedených spojovacími prostředky bylo patrné, že výsušná trhlina negativně ovlivňuje nárůst teploty ve spoji. S větší hloubkou narůstala teplota ve spojovacích prostředcích. Dále bylo možné pozorovat pozitivní vliv hloubky zapuštění spojovacích prostředků na růst teploty ve spoji.

Model dobře vystihl teploty naměřené během experimentu. Rozdíly teplot byly v rozmezí 20 °C. Vytvořený model má několik omezení, které je nutné brát v úvahu. Model nezohledňuje uvolnění vázané vody a transport vodních par. Dále není v modelu zahrnuto odhořívání dřeva a zuhelnatělá vrstva, která následně slouží jako tepelná izolace. Z tohoto důvodu jsou hodnoty teplot z modelu vyšší než teploty naměřené při experimentu. Dále v modelu nebylo zohledněno odpadnutí dřevěných zátek, důsledkem toho došlo u některých spojovacích prostředků ke skokovému nárůstu teploty. Model také nepočítá s teplotním přírůstkem od hoření dřevěných prvků k zatěžovací křivce.

6 Srovnání výsledků s návrhovými postupy

6.1 Hloubka zuhelnatění

Hloubka zuhelnatění výpočet dle ČSN EN 1995-1-2 [2]:

$$d_{char} = \beta_0 * t = 0,65 * 30 = 19,5 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 * d_0 = 19,5 + 1,0 * 7 = 26,5 \text{ mm}$$

Zbytkový průřez:

$$D_{ef} = d - 2 * d_{ef} = 160 - 2 * 26,5 = 107 \text{ mm}$$

Naměřený zbytkový průřez v místě výsušných trhlin po provedeném experimentu:

- Vzorek č. 1- d= 90 mm
- Vzorek č. 2- d= 100 mm

Naměřený zbytkový průřez mimo výsušné trhliny po provedeném experimentu:

- Vzorek č. 1- d= 110 mm
- Vzorek č. 2- d= 105 mm



Vzorek 1



Vzorek 2

Obr. 81 – Zbytkový průřez

Zbytkové průřezy změřené po 30minutové požární zkoušce jsou v místě výsušných trhlin menší než vypočtené dle normy ČSN EN 1995-1-2 [2]. V místě mimo výsušnou trhlinu jsou naměřené hodnoty zbytkového průřezu větší než vypočtené dle normy ČSN EN 1995-1-2 [2]. Hodnoty vypočtené z normy jsou na straně bezpečnosti. Ale ve vzorci dle normy není zahrnut vliv výsušné trhliny, která odhořívání urychlila.

7 Závěr

V diplomové práci byla řešena problematika chování spojů dřevěných prvků se spojovacími prostředky kolíkového typu při požáru. V rámci této práce byl proveden požární experiment sledující vlivy, které ovlivňují vývoj teplot ve spojích. Výsledky z požárního experimentu jsou popsány v kapitole 3.

Požární experiment byl proveden ve středně-rozměrové požární peci miniFUR v Buštěhradě. Byl proveden na dvou zkušebních vzorcích. Spojen byl mechanickými spojovacími prostředky kolíkového typu: svorník M16, svorník M8, ocelový kolík Ø 16 mm a vrut Ø 8 mm. Na zkušebních vzorcích byly rozmístěny plášťové termočlánky pro měření teploty. Experiment trval 30 minut.

Prvním sledovaným parametrem ovlivňující průběh teplot ve spoji byl vliv hloubky zapuštění spojovacího prostředku. Spojovací prostředky byly zapuštěny v hloubkách 15 mm, 10 mm a 5 mm. Spojovací prostředky byly zakryty zátkami. Ze získaných dat bylo zjištěno, že s větší hloubkou zapuštění klesá rychlost zahřívání spojovacích prostředků. Velký vliv na průběh teplot má také zakrytí spojovacího prostředku. V případech, kdy nebyly spojovací prostředky chráněny dřevěnými zátkami, docházelo k největšímu nárůstu teplot.

Dalším sledovaným parametrem byl vliv druhu spojovacího prostředku a velikosti spojovacího prostředku. Ze získaných dat byla provedena analýza. S růstem velikosti spojovacího prostředku docházelo k růstu teploty. Z provedené analýzy lze konstatovat, že s větším ohříváním objemem spojovacího prostředku je nárůst teplot větší. Při porovnání stejných délek svorníků M8 a M16, byl svorník s větším průměrem M16 ohříván rychleji. Ohřívání objem byl větší.

V případě vlivu druhu spojovacího prostředku byl závěr ze získaných dat nejednoznačný. Předpokladem je vliv výsušné trhliny, která byla v blízkosti spoje, kde byly umístěny termočlánky. Vlivem trhlin docházelo k naměření vyšších hodnot teplot u svorníku M8 a vrutu Ø 8 mm.

Vliv na vývoj teploty v průřezu mají také výsušné trhliny, jejich velikost a hloubka zasahující do dřevěného prvku. Také orientace výsušné trhliny vůči požáru.

Dále byl vytvořen numerický model v programu ANSYS. Odchyly teplot naměřených při požární zkoušce vůči teplotám získaným z modelu se pohybují v rozsahu do 20°C. Nárůst teplot při požárním experimentu byl nižší než v modelu. Model nezohledňuje transport vodních par, exotermické reakce a izolační schopnost zuhelnatělé vrstvy. Pro vyšší přesnost modelu by bylo vhodné v modelu zohlednit odhořívání dřeva a zuhelnatělou vrstvu. Porovnání numerického modelu s výsledky z experimentální studie jsou popsány v kapitole 4.

V poslední kapitole byl porovnán zbytkový průřez spočtený dle normy ČSN EN 1995-1-2 [2] a zbytkový průřez změřený po požární zkoušce. V místě výsušné trhliny, kde dřevo odhořívало rychleji, byl naměřený zbytkový průřez menší než vypočtený dle normy ČSN EN 1995-1-2 [2]. V místech mimo výsušné trhliny byl naměřen větší zbytkový průřez v porovnání s vypočteným dle normy ČSN EN 1995-1-2 [2].

Seznam obrázků

Obr. 1- Změna dřeva vytaveného požáru [3]	8
Obr. 2- Závislost tepelné vodivosti na teplotě zuhelnatělé vrstvy [2]	8
Obr. 3- Vztah mezi hustotou ρ a mírou zuhelnatění RC [3]	9
Obr. 4 - Hloubka zuhelnatění $d_{char,0}$ a nominální hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$ [2]	10
Obr. 5 - Závislost poměru hustoty na teplotě [2].....	10
Obr. 6 - Hřebíky[3]	12
Obr. 7 – Svorník a kolík [3]	13
Obr. 8 – Vrutky	13
Obr. 9 – Vložený hmoždík [3]	14
Obr. 10 – Deska s prolisovanými trny [3].....	14
Obr. 11- Ochrana kolíkového spoje na účinky požáru [2]	16
Obr. 12- Model Johansen 1949 [6].....	16
Obr. 13- Zuhelnatělá vrstva, přechodná vrstva a nepoškozené dřevo při požární zkoušce [7] ...	17
Obr. 14- Spoj WWW (dřevo-dřevo-dřevo) [11].....	18
Obr. 15 – Porušení připojení a) šroub s podložkou b) šroub [11].....	19
Obr. 16 – Spoj WSW (dřevo-ocel-dřevo) [11].....	20
Obr. 17 – Typy porušení spoje WSW [11]	21
Obr. 18 – Typický spoj SWS zatížený tahem [11].....	22
Obr. 19 – Způsoby porušení spoje SWS [11]	23
Obr. 20- Zkušební pec miniFUR.....	24
Obr. 21- Zkušební vzorek 1	25
Obr. 22- Zkušební vzorek 2	25
Obr. 23 – Průřez vzorkem 1	26
Obr. 24 – Průřez vzorkem 2	26
Obr. 25 – Šířka výsušné trhliny vzorku 1.....	26
Obr. 26 – Šířka výsušné trhliny vzorku 2.....	27
Obr. 27- Vzorek 1- rozmístění termočlánků.....	28
Obr. 28- Vzorek 2- rozmístění termočlánků.....	28
Obr. 29 – Umístění termočlánků v blízkosti spojovací prostředků ve spoji- Vzorek 1.....	29
Obr. 30 - Umístění termočlánků a dřevěných zátek.....	29
Obr. 31 – Lepidlo použité pro lepení dřevěných zátek	29
Obr. 32- Schéma uložení zkušebních vzorků v peci- půdorys	30
Obr. 33- Schéma uložení zkušebních vzorků v peci- A) podélný řez A-A'; B) příčný řez B-B'	30

Obr. 34 – Umístění v peci miniFUR	31
Obr. 35 – Obložení vzorku tepelnou izolací.....	31
Obr. 36 - Průběh teplot plynů v peci z požární zkoušky a normové teplotní křivky.....	32
Obr. 37 – Průběh teplot plynů v peci měřené na termočláncích.....	32
Obr. 38 – Vzorky po ukončení zkoušky a vyjmutí z pece.....	33
Obr. 39 – Vzorek po uhašení v kádi s vodou.....	33
Obr. 40 - Zbytkový průřez vzorků po ukončení zkoušky ve 30 minutě.....	34
Obr. 41 – Řez otvorem pro svorník M16- Vzorek 1.....	35
Obr. 42 – Řez mimo spoj- Vzorek 2	36
Obr. 43 – Řez spojem – Vzorek 2.....	37
Obr. 44 – Řez v místě svorníku vrutu \varnothing 8 mm – Vzorek 2.....	38
Obr. 45 – Vyjmuté spojovací prostředky ze zkušebních vzorků.....	39
Obr. 46 – Vývoj teplot ve spoji v blízkosti svorníků M16.....	40
Obr. 47 - Vývoj teplot na koncích svorníků M16 pod dřevěnými zátkami	40
Obr. 48 - Vývoj teplot na koncích svorníků M8 pod dřevěnými zátkami	41
Obr. 49 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti svorníků M8.....	41
Obr. 50 - Vývoj teplot na konci ocelových kolíků \varnothing 16 mm pod dřevěnými zátkami	42
Obr. 51 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti ocelových kolíků \varnothing 16 mm.....	42
Obr. 52 - Vývoj teplot na konci vrutů \varnothing 8 mm pod dřevěnými zátkami	43
Obr. 53 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti vrutů \varnothing 8 mm.....	43
Obr. 54 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou.....	45
Obr. 55 – Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou.....	45
Obr. 56 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou.....	46
Obr. 57 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 15 mm dřevěnou zátkou.....	47
Obr. 58 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 10 mm dřevěnou zátkou.....	48
Obr. 59 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků zakrytých 5 mm dřevěnou zátkou.....	48
Obr. 60 - Vývoj teplot ve spoji v blízkosti spojovacích prostředků bez dřevěné zátky	49
Obr. 61- Pracovní prostředí ANSYS Workbench- A) Teplotní analýza vzorku 1; B) Teplotní analýza vzorku 2.....	51
Obr. 62- Materiálové vlastnosti: A) Dřevo [4]; B) Ocel [20].....	52

Obr. 63- A) model vzorku č. 1; B) model vzorku č. 2.....	53
Obr. 64- Výpočetní síť 0,001 m.....	54
Obr. 65- Výpočetní síť 0,005 m.....	54
Obr. 66- Výpočetní síť 0,01 m.....	54
Obr. 67 - Normová teplotní křivka ISO 834 [17].....	55
Obr. 68 – Naměřené teploty uvnitř výsušných trhlin vzorků.....	55
Obr. 69 - Model 1- rozmístění kontrolních bodů.....	56
Obr. 70 - Model 2- rozmístění kontrolních bodů.....	56
Obr. 71- Vývoj teplot v čase v kontrolním bodě TC 1.11.....	57
Obr. 72- Vývoj teplot v čase v kontrolním bodě TC 1.12.....	58
Obr. 73 – Teplota v průřezu se svorníkem M16 v časech 600, 1200, 1800 s.....	59
Obr. 74 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti svorníku M16.....	60
Obr. 75 - Teplota v průřezu ocelovým kolíkem Ø 16 mm v čase 1800 s.....	61
Obr. 76 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti ocelového kolíku Ø 16 mm.....	62
Obr. 77 - Teplota v průřezu svorníkem M8 v čase 1800 s.....	63
Obr. 78 – Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti svorníku M8.....	64
Obr. 79 - Teplota v průřezu vrutem Ø 8 mm v čase 1800 s.....	65
Obr. 80 - Průběh teplot na termočláncích umístěných ve spoji v blízkosti vrutu Ø 8 mm.....	66
Obr. 81 – Zbytkový průřez.....	68

Literatura

- [1] STRAKA, Bohumil a Milan ŠMAK. Kolíkové spoje v dřevěných konstrukcích, výsledky experimentů a využití v praxi. *Stavebnictví*. 2017, **2017**(06–07).
- [2] ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí- Část 1-2: Obecná pravidla- Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. B.m.: ČNI. 2006
- [3] DOC. ING. KUKLÍK, PETR CSC. *Navrhování dřevěných konstrukcí podle ČSN EN 1995-1-2:2006*. 2006
- [4] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. B.m.: ČNI. 2006
- [5] JOHANSEN. Theory of timber connections. *International Association of Bridge & Structure Engineering. Publ No. 9:249–262. Bern, Switzerland*. 1949.
- [6] PALMA, Pedro. *Fire behaviour of timber connections* [online]. B.m., 2016 [vid. 2023-03-04]. ETH Zurich. Dostupné z: doi:10.3929/ETHZ-A-010836621
- [7] GILANI, Marjan Sedighi, Erich HUGI, Stephan CARL, Pedro PALMA a Peter VONTOBEL. Heat Induced Desorption of Moisture in Timber Joints with Fastener During Charring. *Fire Technology* [online]. 2015, **51**(6), 1433–1445. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-014-0416-3
- [8] WHITE a SCHAFFER. *Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab*. B.m.: Wood Fiber Sci 13(1):17–38. 1981
- [9] MOSS, Peter, Andrew BUCHANAN, Massimo FRAGIACOMO a Carla AUSTRUY. Experimental Testing and Analytical Prediction of the Behaviour of Timber Bolted Connections Subjected to Fire. *Fire Technology* [online]. 2010, **46**(1), 129–148. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-009-0096-6
- [10] MOSS, BUCHANAN, FRAGIACOMO a AUSTRUY. On the design of timber bolted connections subjected to fire. In: *international conference on structures in fire*. 2008.
- [11] MARAVEAS, C., K. MIAMIS a Ch. E. MATTHAIIOU. Performance of Timber Connections Exposed to Fire: A Review. *Fire Technology* [online]. 2015, **51**(6), 1401–1432. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-013-0369-y
- [12] FLEISCHER ET AL. *Gro_brandversuchsreihe 1 - GBV 1 - Versuche an Holz-Stahlblech Verbindungen mit Stabd ubeln, p. 54*. 2002
- [13] SCHEER ET AL. *Tragf ahigkeit von Holzverbindungen mit stiftf ormigen Verbindungsmitteln im Brandfall. Teil 2: Brandversuche zur Best atigung der theoretischen Erkenntnisse*. B.m.: DGfH, E-2002/03, p. 148. 2004
- [14] OKSANEN ET AL. *Ruostumattomasta teräksestävalmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys (Fire resistance of timber connections with stainless steels fasteners)*. B.m.: VTT Working Papers 29, p. 104. 2005

-
- [15] LAU. *Fire resistance of connections in laminated veneer lumber (LVL)*. B.m.: Master Thesis. University of Canterbury. 2006
- [16] CHUO. *Fire performance of connections in laminated veneer lumber*. B.m.: Master Thesis. University of Canterbury. 2007
- [17] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. B.m.: ČNI. 2004
- [18] ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. B.m.: ÚNMZ. 2011
- [19] DROZDA, Jiří Ing., Ing. Václav JIRSÁK, Ing. Eva MAŠOVÁ a Ing. Hana HASNÍKOVÁ. *Průručka ANSYS Workbench*. B.m.: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2012
- [20] ČSN EN 1993-1-2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. B.m.: ČNI. 2006