

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

DPM – Diplomová práce

**ŠROUBOVÉ PŘÍPOJE TENKOSTĚNNÝCH
KONSTRUKCÍ ZA VYSOKÝCH TEPLOT**
SCREWED CONNECTIONS OF THIN-WALLED STRUCTURES
AT HIGH TEMPERATURES

Bc. Thu Linh Hoang

vedoucí práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hoang Jméno: Thu Linh Osobní číslo: 458754

Zadávací katedra: 134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Studijní obor/specializace: _____

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Šroubové přípoje tenkostěnných konstrukcí za vysokých teplot

Název diplomové práce anglicky: Screwed connections of thin-walled structures at high temperatures


Pokyny pro vypracování: PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ, VYHODNOCENÍ, HUMERICKÝ MODEL


Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 19.9.2022 Termín odevzdání DP v IS KOS: 9.1.2023

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku



Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.9.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím uvedených zdrojů a konzultací s vedoucím práce Ing. Zdeňkem Sokolem, Ph.D.

V Praze

dne 9. ledna 2023

.....

Thu Linh Hoang

Poděkování:

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Zdeňkovi Sokolovi, Ph.D. za všechny odborné konzultace, možnost provedení experimentů, čas a trpělivost. Ing. Michalovi Strejčkovi, Ph.D. z Kovových profilů a Ing. Jaroslavu Štokovi z SFS zase za věnování zkušebnímu materiálu a jeho odbornou montáž. Dále Michalu Gschrayovi za přípravu a pomoc s experimenty. A v neposlední řadě díky patří mé malé rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá chováním šroubových přípojí tenkostěnných konstrukcí za vysokých teplot. Připevní-li se trapézový plech k rámové příčli za pomoci samořezných šroubů, získá se nosník s kloubově uloženými konci. Vystavením tohoto plechu požáru se zvýší jeho teplota, sníží se ohybová tuhost a vzniknou v něm vodorovné síly. Pokud má šroubový přípoj dostatečnou únosnost a tuhost, dokáže tyto vyvozené síly přenést díky vláknovému působení.

Klíčová slova

tenkostěnné konstrukce; střešní plášť; trapézový plech; šroubový přípoj; samořezný šroub; samovrtný šroub; požár; zvýšená teplota; Ansys Mechanical APDL

Abstract

This thesis deals with behaviour of screwed connections of thin-walled structures at high temperatures. Corrugated sheets are commonly used as load bearing elements for roofs, they are often designed as simply supported beams connected to the supports by self-tapping screws. Exposing this beam to fire leads to reduction of bending stiffness of the sheet. However, with sufficient resistance and stiffness of screwed connections, the load bearing is transferred by tensile membrane behaviour.

Keywords

thin-walled structures; roof cladding; corrugated sheet; screw connection; self-drilling screw; fire; high temperature; Ansys Mechanical APDL

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1 Úvod	10
2 Současný stav poznání	11
2.1 Tenkostěnné profily	11
2.1.1 Výroba a tvary	11
2.1.2 Trapézový plech	14
2.2 Požár	15
2.2.1 Průběh požáru	15
2.2.2 Modely požáru	16
2.2.3 Požární bezpečnost staveb	17
2.3 Materiálové vlastnosti oceli	17
2.3.1 Za běžné teploty	17
2.3.2 Za zvýšené teploty	19
2.4 Tenkostěnné konstrukce	20
2.4.1 Za běžné teploty	20
2.4.2 Za zvýšené teploty	22
2.5 Šroubové přípoje	23
2.5.1 Za běžné teploty	24
2.5.2 Za zvýšené teploty doupravit	26
3 Cíle diplomové práce	29
4 Experimenty	30
4.1 Zkoušky šroubových přípojů	30
4.1.1 Popis vzorků	30
4.1.2 Průběh zkoušek	31
4.1.3 Výsledky	39
4.2 Zkoušky materiálových vlastností oceli	43
4.2.1 Průběh zkoušky	43
4.2.2 Výsledky	45
5 Numerická analýza	46
5.1 Popis modelu	46
5.2 Materiálové vlastnosti	47
5.2.1 Trapézový plech	47
5.2.2 Šroubové přípoje	48
5.3 Výsledky	49
5.3.1 Vliv zvoleného šroubového přípoje na chování trapézového plechu	49
5.3.2 Vliv změny tuhosti šroubového přípoje chování trapézového plechu	51
6 Závěr	54
Literatura	55

Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	60
Příloha A - Fotodokumentace experimentů	61
Příloha B - Pracovní diagramy zkoušených vzorků.....	134

Seznam použitých symbolů a zkratk

Latinské symboly

A	plocha průřezu
A	tažnost pro tahovou zkoušku
A_c	plná průřezová plocha
A_{eff}	účinná plocha
A_g	celková plocha průřezu
$A_{c,eff}$	účinná plocha průřezu
$A_{c,eff,loc}$	účinná průřezová plocha pro lokální boulení
A_{se}	celková plocha všech podélných výztuh vyztužené stěny
$A_{se,eff}$	součinitel účinných průřezů všech podélných výztuh s plnou plochou A_{se}
b	šířka vyztužené nebo nevyztužené stěny
b_0	počáteční šířka zkoušené části pro tahovou zkoušku
b_u	konečná šířka zkoušené části pro tahovou zkoušku
$b_{c,loc}$	šířka tlačené části pro lokální boulení
E	modul pružnosti
F_{eH}	síla na mezi kluzu pro tahovou zkoušku
F_m	síla na mezi pevnosti pro tahovou zkoušku
e_y	vzdálenost těžiště ve směru osy y
f_u	mez pevnost
f_{ya}	zvýšená mez kluzu
f_{yb}	základní mez kluzu
h_0	počáteční tloušťka zkoušené části pro tahovou zkoušku
h_u	konečná tloušťka zkoušené části pro tahovou zkoušku
I	moment setrvačnosti
k	součinitel tvarování
L, l	rozpětí

L_0	počáteční měřená délka zkoušené části pro tahovou zkoušku
L_u	konečná měřená délka zkoušené části pro tahovou zkoušku
N	normálová síla
N_{cr}	kritická síla
k_{ϑ}	redukční součinitel
n	počet 90° ohybů v příčném řezu
q	spojité zatížení
R_e	mez kluzu pro tahovou zkoušku
R_m	mez pevnosti pro tahovou zkoušku
S_0	počáteční průřezová plocha zkoušené části pro tahovou zkoušku
S_u	konečná průřezová plocha zkoušené části pro tahovou zkoušku
t	návrhová tloušťka
w	průhyb
W_{eff}	účinný průřezový modul

Řecké symboly

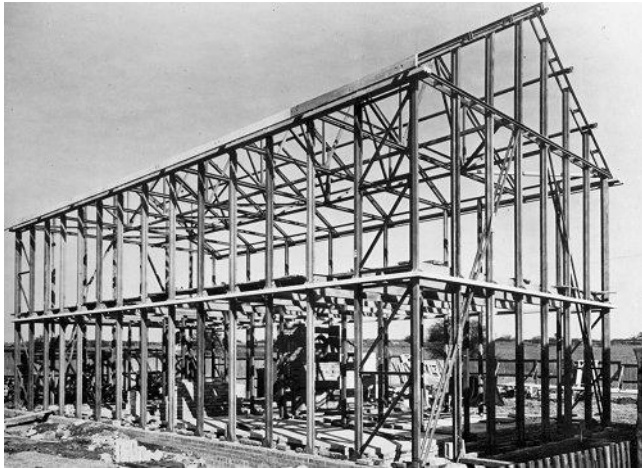
α	součinitel tepelné roztažnosti
β	součinitel účinné šířky
ε	poměrné prodloužení
ϑ	teplota
π	Ludolfovo číslo
ρ	součinitel boulení stěny
σ	napětí

Zkratky

E	celistvost
I	izolační schopnost
R	únosnost a stabilita konstrukčních prvků

1 Úvod

Navrhování z tenkostěnných ocelových konstrukcí má mnoho výhod. Jako první se o tom přesvědčili v 60. letech 20. století na Novém Zélandu a v Austrálii, kde byly postaveny první domy s tenkostěnnými ocelovými rámovými skelety, obr. 1. Na počátku 90. let 20. století pak přišlo s automatizovanou výrobou k rozšíření této technologie postupně do dalších zemí.



a) konstrukce v 90. letech [1]



b) dnešní konstrukce [2]

Obrázek 1: Lehký tenkostěnný ocelový rámový skelet v 90. letech a dnes

Výroba je dnes s přesností na milimetry, zaručuje kvalitní jakost povrchu a umožňuje velkou tvarovou variabilitu. Kromě toho mají tenkostěnné konstrukce vzhledem ke své nízké hmotnosti vysokou únosnost, tím si zajistily široké využití – od rodinných domů až po haly, obr. 2. Suchým procesem výstavby je pak i celá stavba dokončená rychleji. Ocel je také zcela recyklovatelná.



Obrázek 2: Konstrukce haly z tenkostěnných profilů [3]

Oproti všem výše uvedeným výhodám je tu vysoká cena a nižší odolnost při vysokých teplotách. Dále obtížnější návrh konstrukcí a jejich spojování. Porozuměním toho všeho se ušetří nejen peníze, ale i životní prostředí.

2 Současný stav poznání

2.1 Tenkostěnné profily

2.1.1 Výroba a tvary

Tenkostěnné profily tvarované za studena mají přesné rozměry a tvar. Požadovaný tvar se získává podélným tvarováním. Výroba začíná vstupními polotovary jako jsou pásy válcované za tepla či studena a tenkostěnné trubky. Materiál lze zvolit jak ocel, tak i neželezné kovy a jejich slitiny.

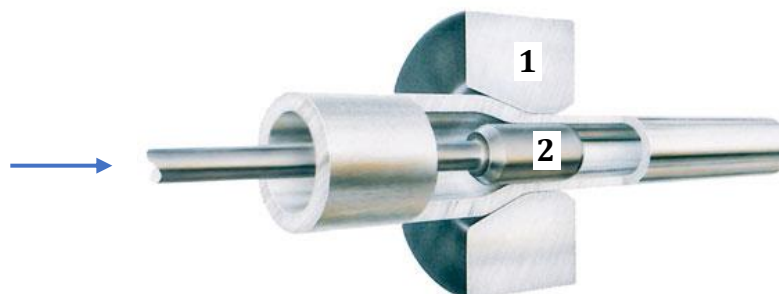
Základní technologie výroby:

- profilování – válcování, obr. 3
 - válcuje se profilových válcovacích linkách
 - otáčivé válce materiál deformují do požadovaného tvaru



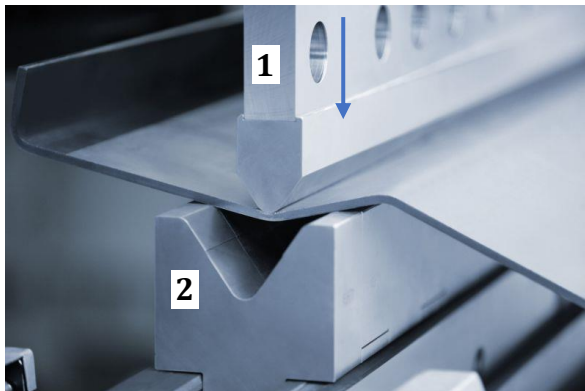
Obrázek 3: Profilování – válcovací linka s otáčivými válci

- tažení – vhodné pro uzavřené profily, obr. 4
 - tažení probíhá na tažných stolicích
 - protahováním otvorem v průvlaku se vymezuje vnější rozměr
 - protahováním trnu nebo tyče se vymezuje vnitřní rozměr



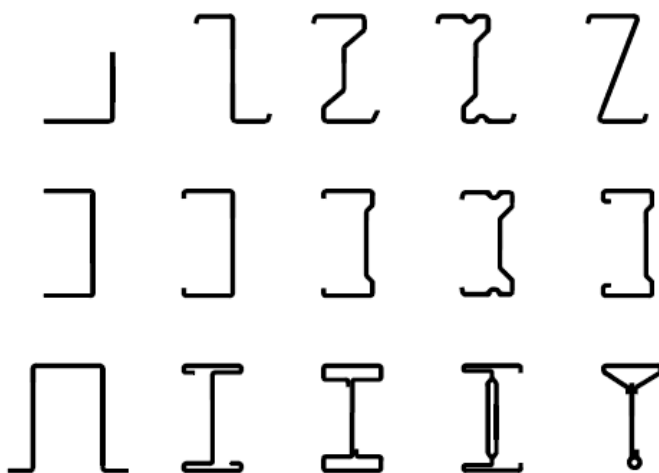
Obrázek 4: Tažení na uchyceném trnu (1 – průvlak; 2 – trn) [4]

- ohraňování na lisech – vhodné pro tvarově členité profily, obr. 5
 - ohýbá se na ohraňovacím lisu



Obrázek 5: Ohraňování (1 – pohyblivý razník; 2 – matrice) [5]

Typickými tvary tenkostěnných profilů je otevřený (obr. 6 a 7) nebo uzavřený průřez (obr. 8). Profily mohou být složené nebo i plošné (obr. 9).



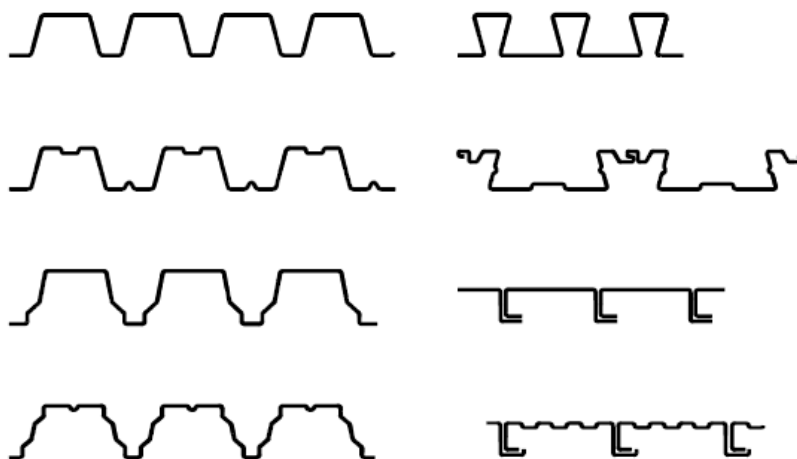
Obrázek 6: Jednoduché otevřené průřezy [6]



Obrázek 7: Složené otevřené průřezy [6]



Obrázek 8: Složené uzavřené průřezy [6]



Obrázek 9: Profilované plechy a kazety [6]

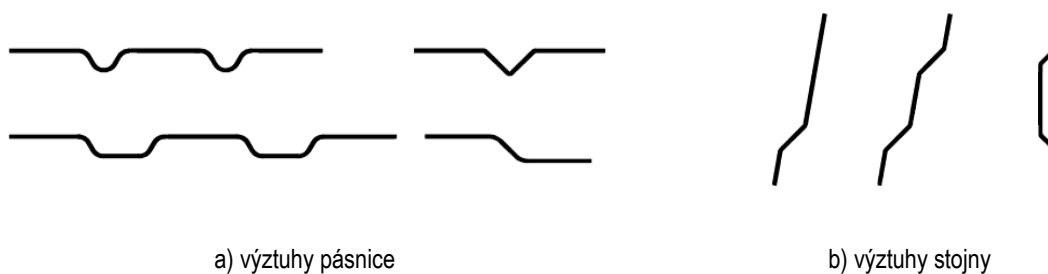
Pro vyšší tuhost a únosnost se přidávají podélné výztuhy. Výztuhy mohou být umístěné na okraji (obr. 10) nebo uvnitř (obr. 11). Vnitřní výztuhy omezují lokální boulení, zkrátí se délka vyboulených vln.



a) jednoduché zahnutí

b) dvojitě zahnutí

Obrázek 10: Typické okrajové výztuhy [6]



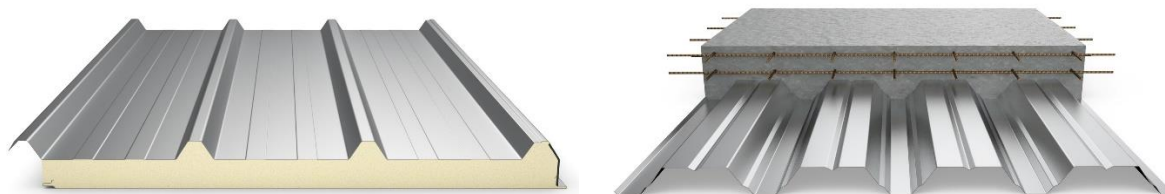
a) výztuhy pásnice

b) výztuhy stojny

Obrázek 11: Typické vnitřní výztuhy [6]

2.1.2 Trapézový plech

Možnosti využití trapézového plechu jsou široké. Jedná se o levnou volbu pro konstrukci zatepleného či nezatepleného střešního a stěnového pláště nebo ztraceného bednění, obr. 12. Má širokou škálu barev a profilů.



a) sendvičový střešní panel

b) ztracené bednění

Obrázek 12: Příklady využití trapézového plechu [7]

Materiál pro výrobu bývá pozinkovaný ocelový plech s kvalitou nejčastěji S 320 GD ($f_{yb} = 320$ MPa). Používá se ale i nižší S 280 GD nebo vyšší S 350 GD. Ocel je povlétaná duroplasty. Kromě oceli se můžeme setkat také s plechy vyrobenými z hliníku, nerezů či ušlechtilých kovů jako je např. měď. Jejich využití je však pro konstrukční prvky velmi omezené. Používají se především pro pohledové konstrukce jako jsou obklady či fasády. Výroba probíhá za studena válcováním (obr. 13) předem barevných svitků.



a) válcovací linka

b) profilovací válce

Obrázek 13: Profilová válcovací linka pro trapézové plechy [8]

Barevné svitky bývají šířky 1230 mm - 1500 mm. Výsledný profil má tloušťku 0,5 mm - 1,5 mm. Výška vlny je 4 mm - 206 mm.

Způsob využití trapézového plechu závisí na výšce profilu a to:

- nízké – výška 8 mm až 50 mm
 - nenosné
 - vhodné pro střešní či fasádní plášť, při malých rozponech i jako nosná konstrukce
- střední – výška do 135 mm
 - nosné
 - vhodné pro vaznicové systémy

- vysoké – výška do 206 mm
 - nosné
 - vhodné pro bezvaznicové střešní pláště

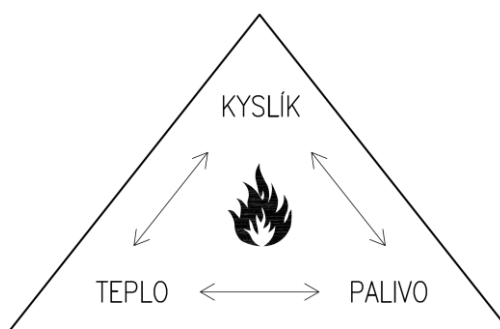
Trapézové plechy se řadí do skupiny průřezů 4. třídy s náročnějším postupem návrhu. Někteří výrobci mají k dispozici pro projektanty statické tabulky [9] propočteny dle Eurokódu 3. Na základě rozpětí a typu nosníku (prostý nebo spojitý o dvou a více polích) se dá jednoduše zjistit maximální možné zatížení vybraného trapézového plechu.

2.2 Požár

Požárem se rozumí každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení nebo zranění osob nebo zvířat, ke škodám na materiálních hodnotách nebo životním prostředí a nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata, materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy. [10]

Hoření je oxidační exotermický děj doprovázený vývinem tepla a světla, během kterého se spotřebovává kyslík a produkují zplodiny hoření.

Proces hoření probíhá při přítomnosti oxidačního prostředku (vzduch, kyslík), zdroje zapálení (teplo) a hořlavé látky (palivo). Tzv. trojúhelník hoření je znázorněn na obr. 14, narušením jakékoliv vazby se proces ukončí.

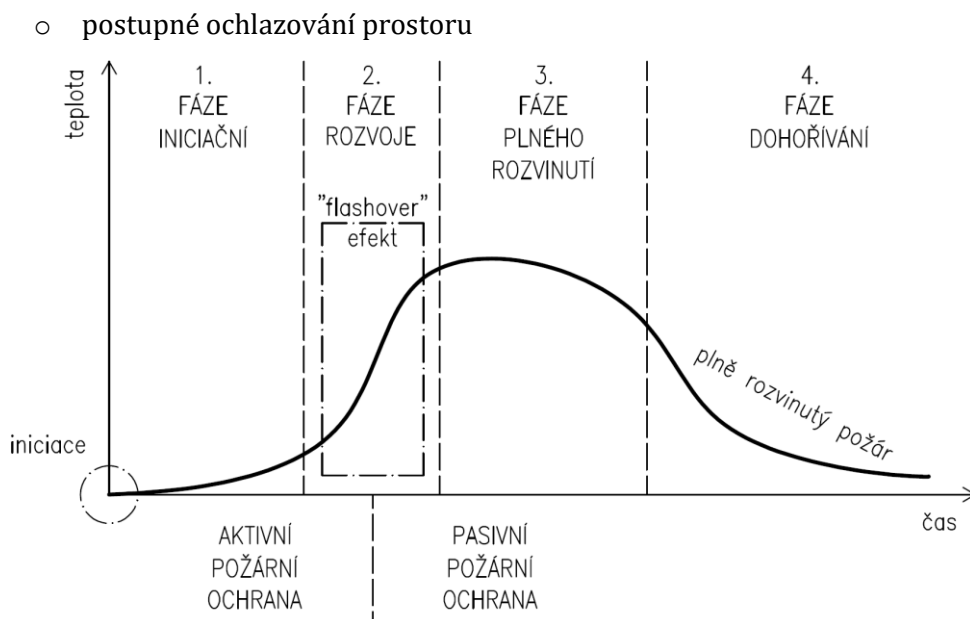


Obrázek 14: Trojúhelník hoření

2.2.1 Průběh požáru

Plně rozvinutý požár má 4 charakteristické fáze – fáze přirozeného požáru – iniciační, rozvoje, plného rozvinutí a dohořívání, obr. 15 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Tyto fáze jsou na základě reálně provedených experimentů.

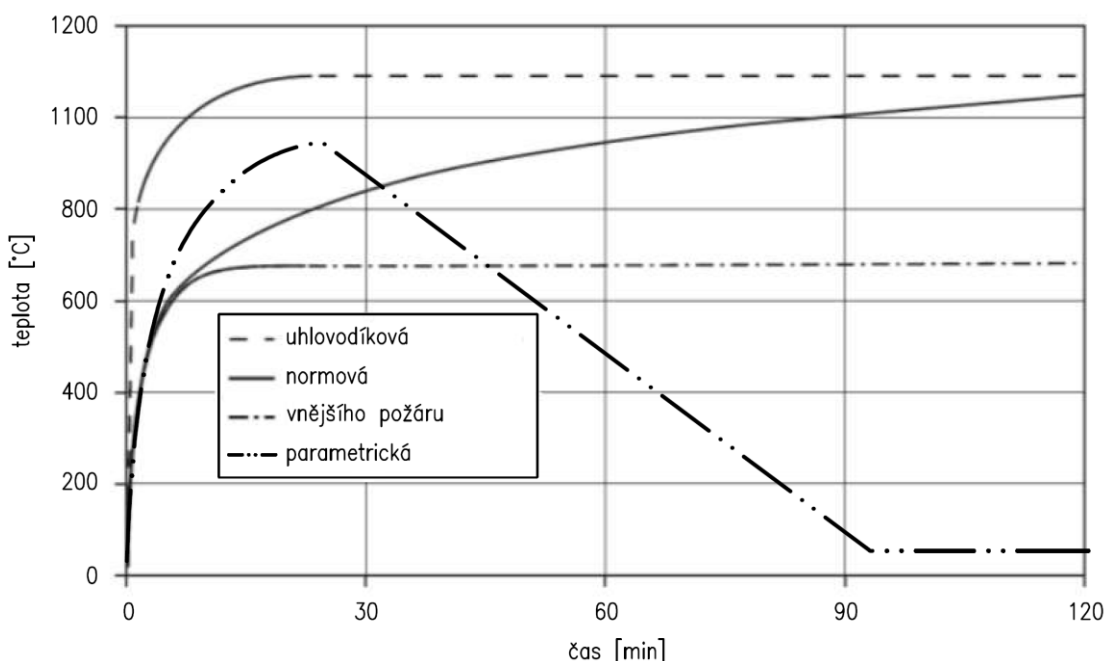
1. Fáze iniciační
 - iniciace zapálením hořlavého materiálů a jeho rozhořívání
2. Fáze rozvoje
 - „flashover“ efekt = vzplanutí
 - při teplotě cca 500 °C – 600 °C
 - hoření se rozšíří do celého požárního úseku
3. Fáze plného rozvinutí
 - maximální teploty 1000 °C – 1200 °C
 - hoří všechny hořlavé věci v prostoru
4. Fáze dohořívání
 - snižování teploty v důsledku spotřebování paliva nebo kyslíku



Obrázek 15: Schéma charakteristického průběhu plně rozvinutého požáru

2.2.2 Modely požáru

Modely popisující průběh požáru slouží ke stanovení teploty plynu v posuzovaném požárním úseku. Rozdělují se na zjednodušené (obr. 16) a zdokonalené. Zjednodušené modely řeší pouze fázi po vzplanutí, naopak zdokonalené popisují celý průběh hoření.



Obrázek 16: Teplotní křivky dle Eurokódu 1 [11]

Mezi zjednodušené modely patří:

- nominální teplotní křivky – konzervativní a nejjednodušší, nezahrnují fázi chladnutí
 - o normová teplotní křivka ISO 834
 - o uhlovodíková teplotní křivka
 - o křivka vnějšího požáru

- používá se nejen pro výpočty, ale i pro testování v laboratořích
- parametrická teplotní křivka – dle fyzikálních parametrů požáru, zahrnuje fázi chladnutí

Mezi zdokonalené modely patří:

- lokální požár
- zónové modely – jednozónový a dvojzónový
- dynamická analýza plynů

2.2.3 Požární bezpečnost staveb

Požární bezpečnost stavebních objektů je jejich schopnost bránit ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám majetku. [12]

Způsoby zajištění jsou:

- aktivní požární ochrana – aktivně reaguje na požár
 - elektrická požární signalizace, stabilní hasicí zařízení, zařízení pro odvod kouře a tepla, zařízení pro detekci hořlavých plynů a par apod.
- pasivní požární ochrana – pasivně brání šíření požáru
 - dělení na požární úseky, požární odolnost stavebních konstrukcí apod.

Požární odolnost je doba, po kterou jsou stavební konstrukce nebo požární uzávěry schopny odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce. [12]

Na konstrukční prvky jsou kladeny různé požadavky dle jejich funkce. Konstrukce většinou musí zachovat nosnost, celistvost a tepelně izolační schopnost, kterým odpovídají následující základní mezní stavy požární odolnosti:

- R = únosnost a stabilita konstrukčních prvků
- E = celistvost
 - porušení trhlinami, při kterých dojde k hoření bavlněného polštářku z neohřívané strany prvku
- I = izolační schopnost
 - omezení teploty do 180 °C na neohřívaném povrchu prvku

Tyto funkce musí plnit po celou požadovanou dobu. Pro posouzení požární odolnosti platí, že požadovaná požární odolnost daná projektovými normami musí být menší nebo rovna požární odolnosti navržené konstrukce.

Požární odolnost navržené konstrukce se stanoví:

- požární zkouškou
- výpočtem či hodnotou z normy
- kombinací zkoušky a výpočtů

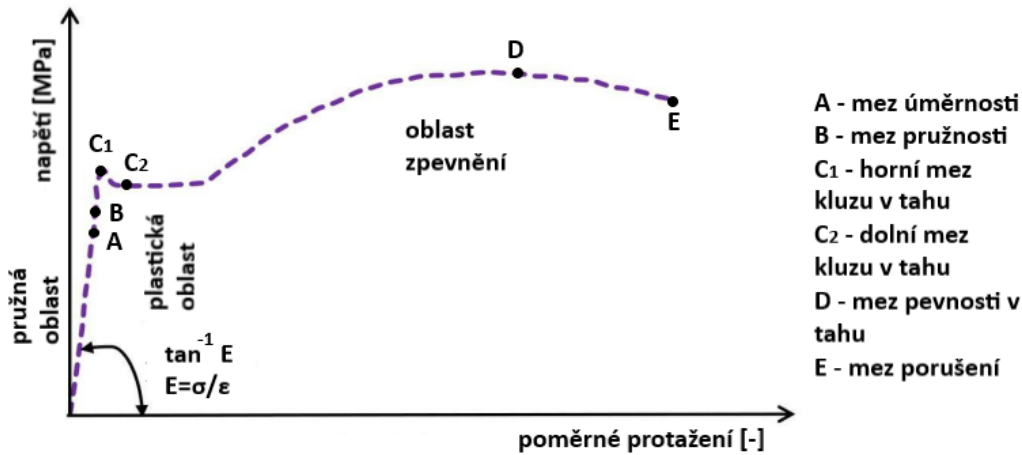
2.3 Materiálové vlastnosti oceli

2.3.1 Za běžné teploty

Ocel je slitina železa *Fe* a uhlíku *C* s přidavkem legujících prvků jako jsou například mangan *Mn*, chrom *Cr* či nikl *Ni*. Nejdůležitějším prvkem je uhlík, dává oceli její charakteristické vlastnosti

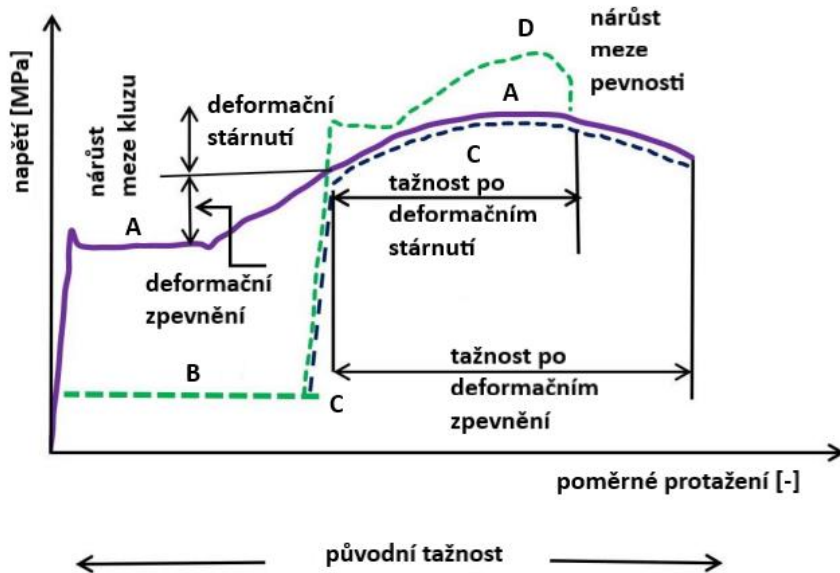
a umožňuje následné zpracování jako je válcování, kování či lisování. Pro stavební účely se běžně používá ocel s obsahem uhlíku do 0,2 %.

Základní mechanické vlastnosti oceli jsou pružnost, pevnost a plasticita. Tyto vlastnosti lze experimentálně zjistit tahovou zkouškou. Pracovní diagram oceli, obr. 17, zobrazuje závislost napětí σ a poměrného prodloužení ϵ . Až do meze úměrnosti je nárůst napětí lineární a platí Hookův zákon $\epsilon = \sigma/E$.



Obrázek 17: Pracovní diagram oceli [13]

Tváření výrobků za studena probíhá pod rekrytalizační teplotou (30 % teploty tání), během které dochází ke zpevňování materiálu. Zpevněním se zvyšují hodnoty meze kluzu a meze pevnosti a snižuje tažnost. Plastická deformace je způsobena dislokací, při které se atomy v krystalové mřížce přesouvají. Hustota dislokací má vliv na pevnost oceli.



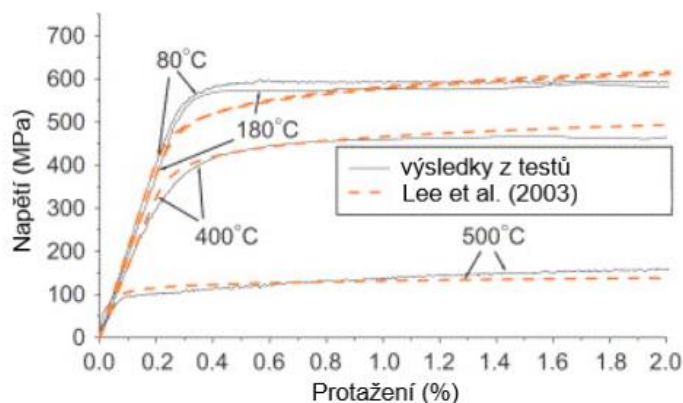
Obrázek 18: Pracovní diagram oceli – vliv deformačního zpevnění a deformačního stárnutí [13]

Na obr. 18 je pracovní diagram s vlivem deformačního zpevnění a deformačního stárnutí. Křivka A je pracovní diagram původního vzorku, křivka B představuje odtížení a křivka C opětovné okamžité zatížení. Křivka D znázorňuje znovu zatížený prvek po deformačním stárnutí. Je vidět, že mez kluzu v případech C a D je vyšší než u původního vzorku, naopak tažnost a houževnatost je zase nižší.

2.3.2 Za zvýšené teploty

Mechanické vlastnosti oceli za zvýšených teplot hrají důležitou roli při zhodnocení požární odolnosti ocelových konstrukcí. Během požáru se tyto vlastnosti zhoršují.

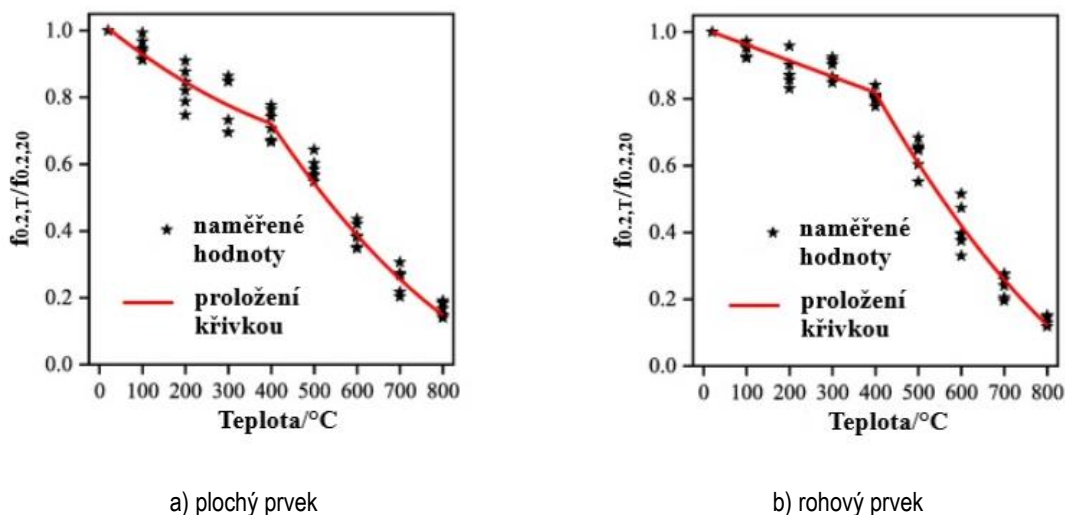
Chen a Young [14] provedli zkoušky při teplotách 20 °C až 1000 °C. Vzorky byly z oceli třídy G 550 a G 450 s tloušťkou plechu 1,0 mm až 1,9 mm. Výsledné křivky modulu pružnosti, meze kluzu, mezní pevnosti, mezního přetvoření a prodloužení zanesli do grafů a porovnali s hodnotami z australských, britských a evropských norem a s výsledky dalších experimentů. Obr. 19 srovnává výsledný pracovní diagram zkoušeného plechu tloušťky 1,0 mm oceli třídy G 550 s diagramem ze studie Lee et al. [15].



Obrázek 19: Porovnání pracovního diagramu oceli třídy G 550 [14]

Outinen [16] se zaměřil na ocel třídy S 355, S 420 M, S 420 M, S 460 M, S 350 GD+Z a S 355 J2H při teplotách 100 °C až 900 °C. Výsledky poté porovnal s EN 1993-1-2.

Liang, Wang a Wang [17] zkoušeli ocel třídy Q 345 za teplot 20 °C až 800 °C. Tloušťka plechů byla 1,5 mm a 2,5 mm. Oproti ostatním měli vzorky nejen ploché ale i rohové. Ukázali, že rozdíl mechanických vlastností mezi plochým a rohovým prvkem po dosažení 400 °C je malý, obr. 20.



a) plochý prvek

b) rohový prvek

Obrázek 20: Grafy závislosti meze kluzu na teplotě [17]

2.4 Tenkostěnné konstrukce

2.4.1 Za běžné teploty

Důležitým krokem k určení průřezových charakteristik a způsobu výpočtu je klasifikace průřezu do jedné ze čtyř tříd [18]. Klasifikace na základě štíhlosti jednotlivých stěn a způsobu namáhání se provádí pro každou stěnu zvlášť. Výsledná třída je pak ta nejvyšší. Tenkostěnné konstrukce patří do skupiny průřezů 4. třídy s charakteristickým lokálním boulením, kdy není možné dosáhnout mez kluzu v jedné nebo více částech průřezu. Kromě lokálního boulení se do návrhu zahrnuje vliv zpevnění tvarováním, vložení podélných výztuh, vliv smykového ochabnutí u širokých pásnic ohýbaných profilů a borcení stojin od lokálního břemene. [19]

Vliv zpevnění tvarováním se zavádí tzv. průměrnou zvýšenou mezí kluzu f_{ya} [6] v místech, které nebolí.

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A_g} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (1)$$

kde je

f_{yb} základní mez kluzu;

f_u mez pevnosti;

A_g celková plocha průřezu;

k součinitel, jenž závisí na způsobu tvarování;

- $k = 7$ pro válcování;

- $k = 5$ pro jiné způsoby tvarování;

n počet 90° ohybů v příčném řezu s vnitřním poloměrem $r \leq 5t$ (zlomky 90° ohybů se mají vyjádřit jako zlomky n);

t návrhová tloušťka ocelového materiálu před tvarováním, bez započítání kovových nebo organických povlaků.

Průřezy 4. třídy se posuzují na tzv. účinném průřezu $A_{c,eff}$ (resp. W_{eff}), který započítává účinek lokálního boulení.

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (2)$$

kde je

A_c plná průřezová plocha

ρ součinitel boulení stěny pro vnitřní a přečnávající tlačené části (viz [19], kapitola 4.4)

U stěn s podélnými výztuhami se účinná plocha $A_{c,eff}$ uvažuje nejen pro celý vyztužený panel, ale i pro subpanely mezi výztuhami. Účinná průřezová plocha se určuje podobně jako u nevyztužených stěn pomocí součinitele boulení ρ_c .

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t \quad (3)$$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t \quad (4)$$

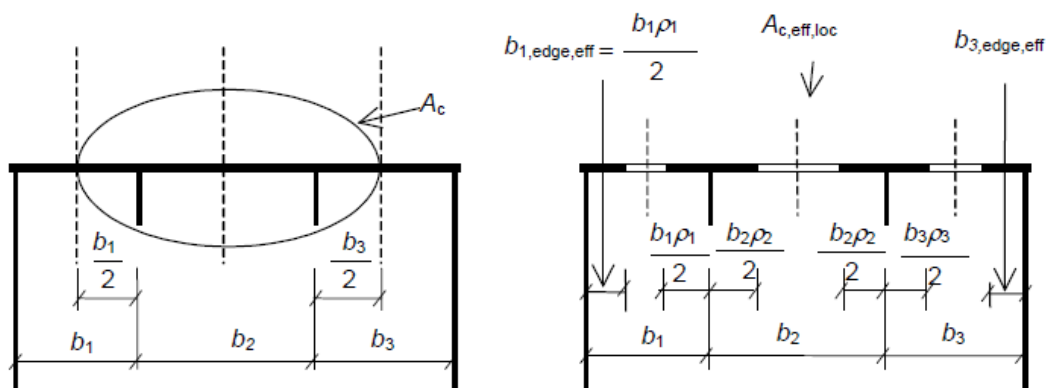
kde je

$A_{c,eff,loc}$ účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů, které jsou plně nebo částečně v tlačené zóně, s výjimkou účinných částí podepřených sousední částí stěny se šířkou $b_{edge,eff}$, obr. 21;

$A_{s\ell,eff}$ součinitel účinných průřezů všech podélných výztuh s plnou plochou $A_{s\ell}$ umístěných v tlačené zóně, obr. 21;

$b_{c,loc}$ šířka tlačené části každého subpanelu;

ρ_{loc} součinitel boulení pro každý subpanel.



Obrázek 21: Vyztužená stěna rovnoměrně tlačená – plný a efektivní průřez [19]

U širokých pásnic se účinky smykového ochabnutí stanovují jako pružnoplastické účinky smykového ochabnutí zahrnující omezené plastické deformace. Účinná plocha A_{eff} závisí na součiniteli účinné šířky β (viz [19], kapitola 3.3).

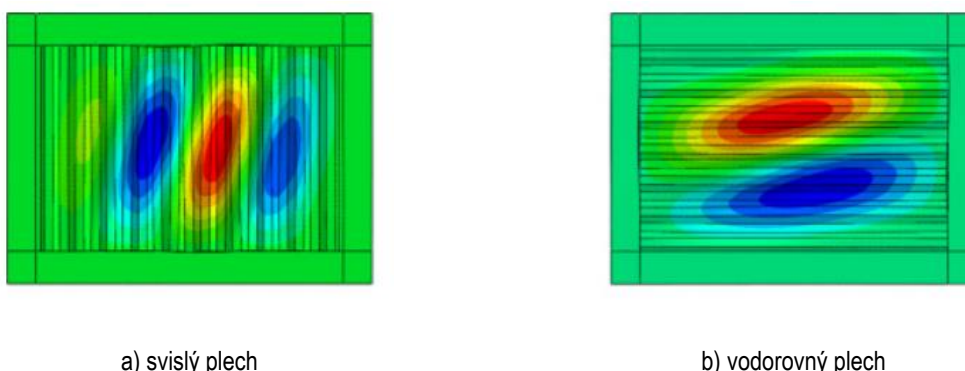
Ke zborcení stojiny od lokálního břemene dochází v důsledku velkého soustředěného tlakového namáhání. Vzniká zde kombinace normálového a smykového napětí. Stojina se deformuje v místě působení břemene a v místě lokálních podpor [20]. Příkladem mohou být vysoké nosné trapézové plechy, na které se věsí rozvody vody, vzduchotechniky apod.

Šorf [21] se zabýval lokálně a liniově zatíženými trapézovými plechy. Vytvořil několik numerických modelů nosníku z trapézového plechu zatíženého lokálně a plošně v programu Abaqus, provedl analýzu rozložení lokálního zatížení v příčném směru a navrhl možný postup pro určení podílu jednotlivých vln na roznoš zatížení. Kromě toho provedl statické zatěžovací zkoušky. Na obr. 22 je ukázka typického porušení vlny plastickou deformací.



Obrázek 22: Detail plastické deformace vlny trapézového profilu [21]

Qiu, Zhao, Wang a Yu [22] zkoumali ztužující stěny se svislými a vodorovnými trapézovými plechy. Pomocí numerického modelu v programu Abaqus popsali lokální a globální boulení této stěny. Obr. 23 ukazuje rozdíl mezi globálním boulením svislého a vodorovného plechu.



Obrázek 23: Globální boulení ztužující stěny z trapézových plechů [22]

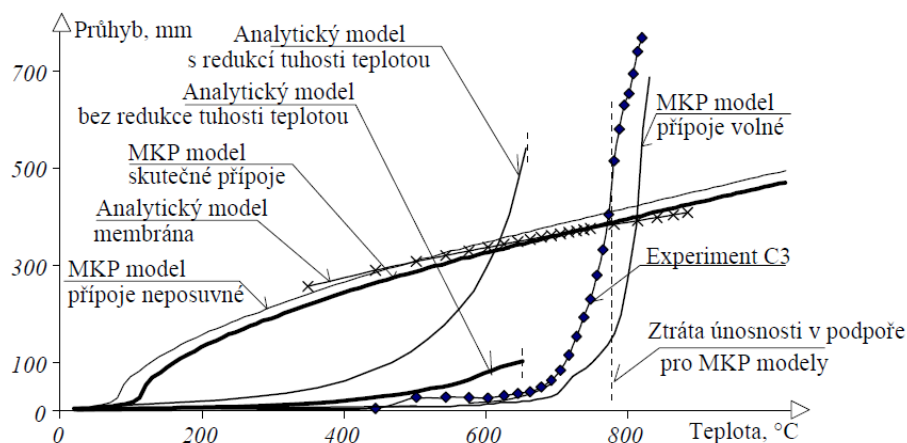
2.4.2 Za zvýšené teploty

Na rozdíl od chování a způsobu navrhování průřezů 4. třídy za běžné teploty je situace za požáru méně detailně popsána.

V ČSN EN 1993-1-2 je k dispozici jednoduchý a zpřesněný výpočetní model. Jednoduché výpočetní modely jsou založeny na konzervativních předpokladech. Účinný průřez se stanovuje stejně jako při běžné teplotě 20 °C a mez kluzu se redukuje součinitelem k_{θ} (viz [23], příloha E). Zpřesněné modely využívají vhodným způsobem inženýrské principy pro konkrétní situace. Snaží se poskytnout realistickou analýzu konstrukcí vystavených požáru (viz [23], kapitola 4.3).

Feng, Wang a Davies [24] provedli požární zkoušky za ustáleného stavu krátkých 400 mm sloupků z C a U profilů, některé opatřili otvory různých velikostí. Třída oceli vzorků byla S 350 GD+Z, tloušťka 1,2 mm, 2,0 mm a 1,5 mm a šířka 100 mm a 104 mm. Zjistili, že otvory mají vzhledem k boulení významný vliv na únosnost sloupků, ale přitom neovlivňují normálovou tuhost.

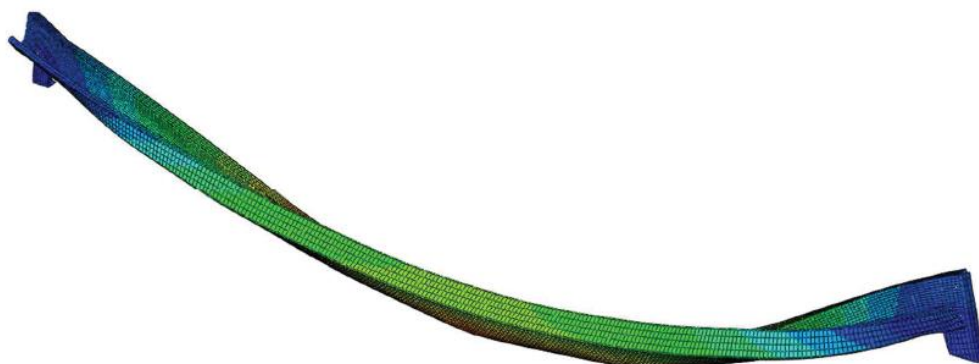
Sokol, Hřebíková, Wald a Lebr [25] na základě dat získaných z experimentů se střešním pláštěm s trapézovými plechy vytvořili numerický model v programu Ansys. Ukázali, že spolehlivost takového pláště za požáru je až 60 min. Na obr. 24 je porovnání výsledků výpočtů pro volné, neposuvné a skutečné přípoje plechu s experimentem. Vypočtený byl průhyb trapézového plechu jako membrány a prostého nosníku s uvažováním změny tuhosti průřezu vlivem teploty a bez této redukce.



Obrázek 24: Porovnání modelu MKP a analytických předpovědí s experimentem [25]

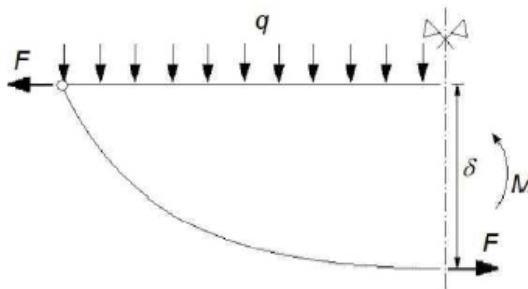
Maślak, Pazdanowski a Suchodoła [26] numericky simulovali chování obloukové konstrukce z trapezového plechu při požáru v programu Ansys. Zjištěním bylo, že velikost a tvar imperfekcí má vliv na hodnotu kritické teploty nosníku. Čím nepříznivější byly imperfekce, tím konzervativnější byl jejich odhad kritické teploty.

Schwarz [20] se věnoval tenkostěnným Z vaznicím. Provedl experimentální studii, numerické simulace v programu Abaqus a vytvořil analytické návrhové modely použitelné pro návrh tenkostěnných prvků v mezním stavu únosnosti. Zkoušené vaznice oceli třídy S 350 GD+Z výšky 200 mm a tloušťky 1,5 mm byly umístěny mezi podpory o rozpětí 6 m v peci a 2,5 m mimo zkušební pec. Závěrem numerické analýzy je, že lze skutečné chování prutu za vysokých teplot popsat zjednodušeně chováním vláknovým. Obr. 25 ukazuje tvar deformace průřezu spodní pásnice a její přechod k taženému vláknu.



Obrázek 25: Deformace průřezu – pohled na spodní pásnici [20]

Pro vláknové chování lze použít vztahy pro lanové konstrukce, protože ohybová tuhost nosníku vlivem nízkého modulu pružnosti a deformace příčného řezu klesá. Ohebné lano zavěšené ve dvou bodech ve stejné výšce a zatížené rovnoměrným spojitým zatížením se prohne do tvaru souměrné paraboly. Jelikož největší průhyb nastane uprostřed, je jednoduché určit z průhybu vodorovnou sílu působící v podpoře [27]. Na obr. 26 je schematicky znázorněné vláknové působení nosníku.

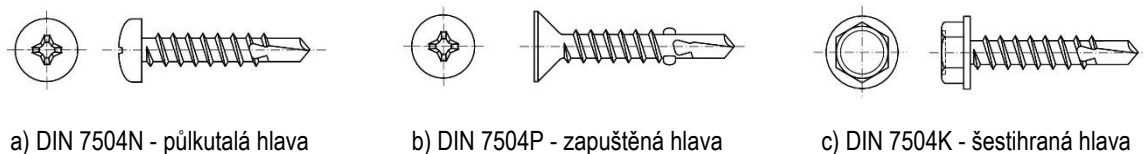


Obrázek 26: Schéma vláknového chování nosníku [20]

2.5 Šroubové přípoje

Tenkostěnné ocelové konstrukce je možné mechanicky spojit šrouby, nastřelovacími hřebíky nebo nýty. Nýty se už tolik nepoužívají, bývají nahrazovány šroubovými spoji pro jejich jednoduchou montáží a demontáží. Šrouby mohou být s maticí i bez, samořezné nebo samovrtané. Samovrtané šrouby mají schopnost si vyvrtat vlastní díru a zároveň vytvořit vlastní závit, obr. 27. Samořezné k vytvoření závitu potřebují již předem vyvrtanou díru. Samořezné šrouby se dělí na závitotvorné a závitořezné. Závitotvorný šroub má hrot zaoblený a závit vytváří tlakem vymáčknutím

bez úbytku materiálu, obr. 28. Závitořezný šroub má naopak ostré drážky, kterými si sám závit vyřízne a tím odebírá materiál, obr. 29. Výroba šroubů bývá dle německých norem DIN [28].

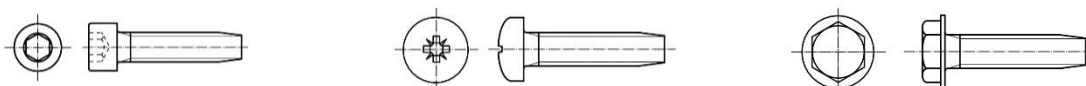


a) DIN 7504N - půlkulatá hlava

b) DIN 7504P - zapuštěná hlava

c) DIN 7504K - šestihraná hlava

Obrázek 27: Příklady samovrtných šroubů [29]

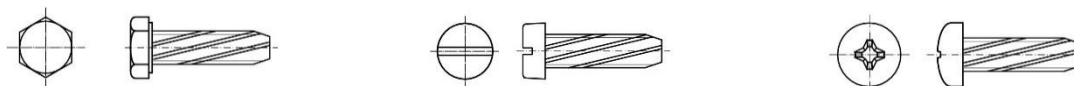


a) DIN 7500E – válcová hlava

b) DIN 7500C – půlkulatá hlava

c) DIN 7500D – šestihraná hlava

Obrázek 28: Příklady samořezných závitotvorných šroubů [29]



a) DIN 7513A – šestihranná hlava

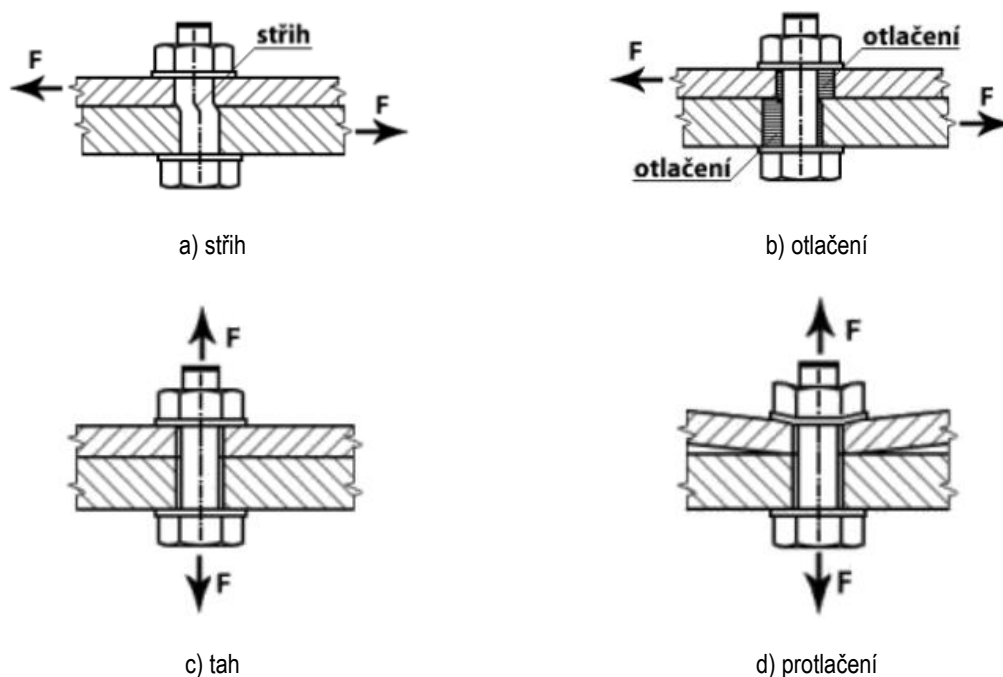
b) DIN 7513B – válcová hlava

c) DIN 7516A – půlkulatá hlava

Obrázek 29: Příklady samořezných závitořezných šroubů [29]

2.5.1 Za běžné teploty

Návrh šroubových spojů je podrobně popsán v ČSN EN 1993-1-8. Základní případy návrhu namáhání jsou na stříh, otláčení, tah, protlačení a kombinaci stříhu a tahu, obr. 30. Výpočty návrhové únosnosti pro jednotlivé případy spojovacích prostředků namáhaných smykem nebo tahem viz [30], tabulka 3.4.



a) stříh

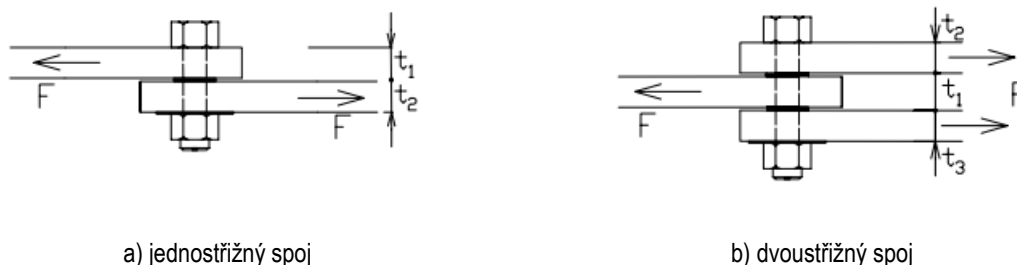
b) otláčení

c) tah

d) protlačení

Obrázek 30: Schémata namáhání šroubového připoje [31]

Porušení stříhem a otláčením vzniká v důsledku namáhání smykem v rovině šroubového přípoje. Podle počtu tzv. stříhových rovin se rozlišuje spoj jednostřížný a dvou a vícestřížný, obr. 31. Únosnost ve stříhu je závislá na pevnosti šroubu, průřezové ploše šroubu, resp. dřívku a počtu rovin stříhu. K otláčení spojovaného prvku dochází v případě, kdy je jeho pevnost materiálu nižší než pevnost šroubu. Únosnost v otláčení závisí na pevnosti spojovaného prvku a šroubu, tloušťce spojovaného prvku, průměru dřívku šroubu a vzdáleností šroubů od sebe. [25]



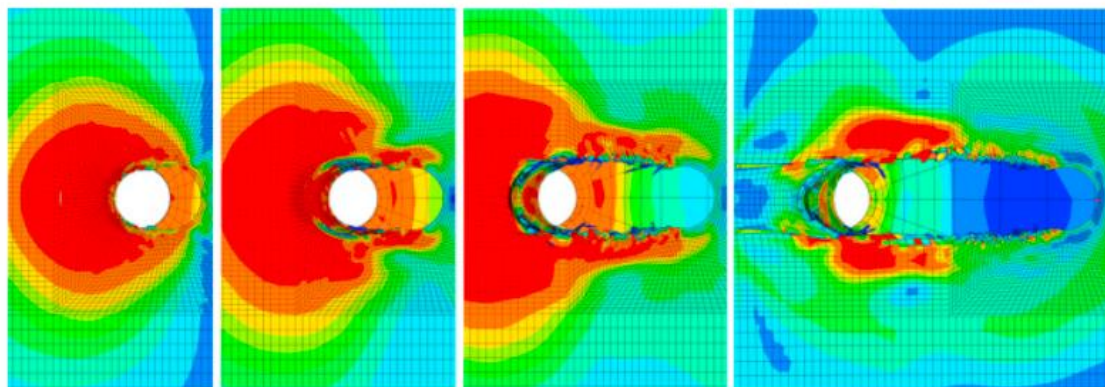
Obrázek 31: Rozlišení spojů [25]

Porušení tahem a protlačení vzniká při působení silových účinků kolmo k rovině přípoje. Únosnost v tahu závisí na pevnosti a průměru šroubu, u protlačení navíc na menší tloušťce připojovaného prvku a na středním průměru kružnice opsané a vepsané do šestihranu hlavy nebo matice. [25]

Rovnice pro návrh šroubových přípojů ocelových konstrukcí dle Evropského sdružení ocelových konstrukcí (ECCS) [32] z roku 1987 byly na základě studie Pekoze [33] zahrnující výsledky z více než 3500 zkoušek pozměněny. Evropské doporučení obsahovalo rovnice založené na mezi kluzu oceli, tloušťce spojovaných prvků a průměru šroubů. Pekozeva změna byla v použití meze pevnosti ocelových plechů na místo původní meze kluzu.

Pham a Moen [34] udělali sérii smykových testů jednostřížných šroubových spojů. Pomocí bezkontaktní optické techniky měřili relativní posun spojovaných ocelových plechů tloušťky 0,88 mm až 2,58 mm a úhel naklonění šroubu o průměru 4,17 mm až 5,49 mm. Zkoušky potvrdily zásadní vliv poměru tloušťky plechů na chování přípoje.

Huynh, Pham a Hancock [35] se zaměřili na experimenty se samořeznými šrouby spojujícími ocelové plechy oceli třídy G 450, G 500 a G 550 tloušťky 1,5 mm až 3,0 mm. Výsledky použili k simulaci chování šroubového spoje v programu Abaqus. Na obr. 32 je zobrazena simulace otláčení plechu šroubem.



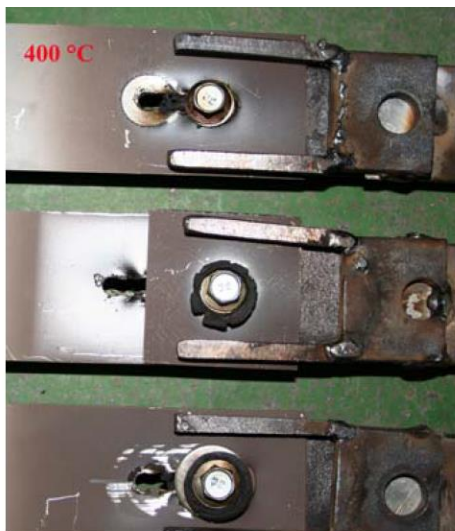
Obrázek 32: Otláčení plechu šroubem – pohled z vrchu [35]

2.5.2 Za zvýšené teploty

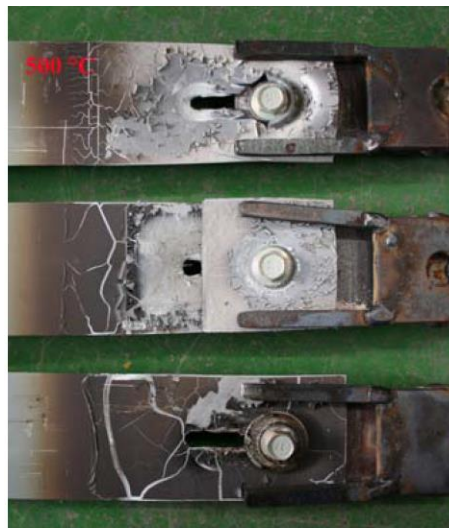
Připevní-li se trapézový plech k rámové příčli pomocí samovrtných šroubů, získá se nosník s kloubově uloženými konci. Vystavením nosníku požáru se zvýší jeho teplota, sníží ohybová tuhost a vzniknou v něm vodorovné síly. Vodorovné síly vznikají vlivem tepelné roztažnosti, kdy se plech rozpíná a zvětšuje svůj průhyb. Pokud má šroubový přípoj dostatečnou tuhost, dokáže tyto vyvozené síly přenést. Během tohoto působení šrouby rozpínání brání, tím ve spoji vznikají smykové síly, které namáhají šroub na stříh a plech na otláčení.

Při vysokých teplotách dále dochází k tzv. vláknovému působení, kdy ohybová tuhost plechu výrazně klesne a plech už není schopný přenášet zatížení ohybem. Díky pevnému připevnění šroubu je ale zatížení přeneseno. Je to podobné například jako hamaky, dráty elektrického vedení nebo nosné lano lanovky.

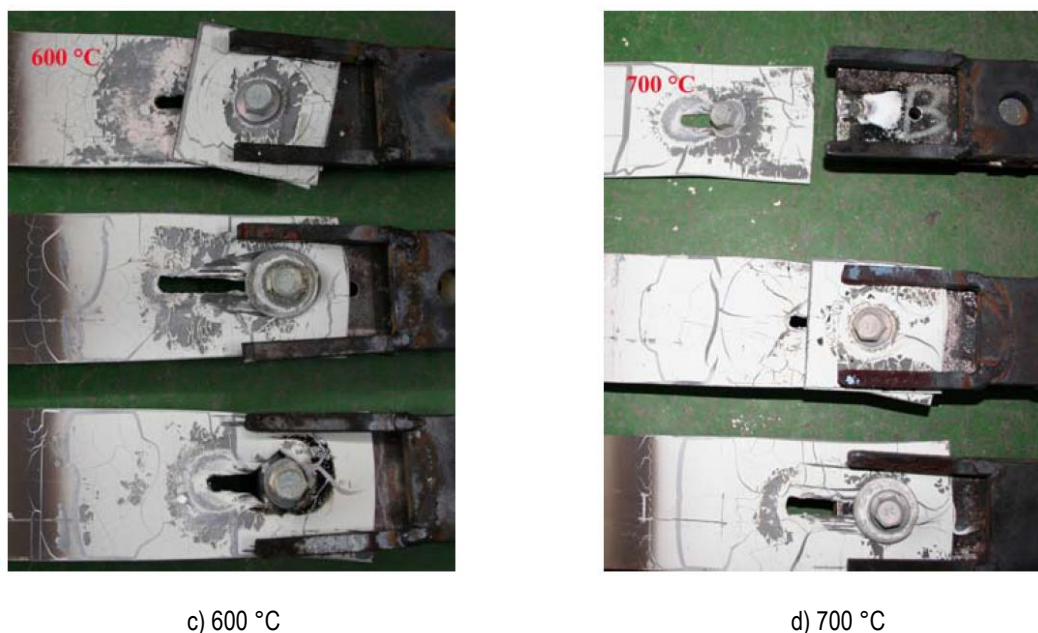
Kallerová [27] se zabývala požární odolností samovrtných šroubů v trapézovém plechu, který je součástí střešní konstrukce. Na základě provedených experimentů navrhla opatření zvyšující odolnost šroubového přípoje při požáru – zdvojení tenkého plechu po celé délce a šířce podpory a oválné otvory pro šrouby v plechu. Obr. 33 ukazuje zkoušené vzorky šroubového přípoje s plechem tloušťky 1,2 mm pro tři varianty připevnění tenkého plechu k nosnému podkladu při zvýšené teplotě. První varianta je bez úpravy, druhá je zdvojený plech a třetí plech s oválným otvorem.



a) 400 °C



b) 500 °C

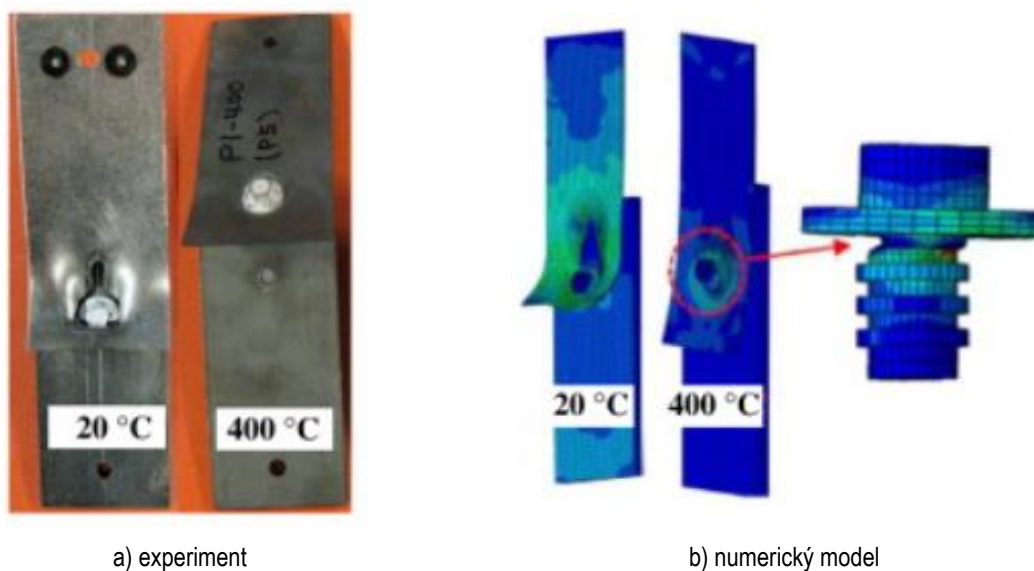


c) 600 °C

d) 700 °C

Obrázek 33: Šroubové přípoje s plechem tloušťky 1,2 mm při vysokých teplotách [27]

Lu, Ma, Mäkaläinen a Outinen [36] ke spojení trapézového plechu s nosníkem použili samořezných šroubů a nastřelovacích hřebíků. Určili čtyři hlavní síly ovlivňující únosnost přípoje – síla mezi plechem a dříkem šroubu, mezi plechem a podložkou, mezi spojenými plechy navzájem a síla v plechu při jeho natočení. Experimenty proběhly při teplotách 20 °C až 600 °C, spojované plechy třídy oceli S 350 GD+Z a S 355 byly tloušťky 0,8 mm a 5,0 mm. Výsledky zkoušek posloužily k vytvoření numerického modelu přípojů v programu Abaqus. Porovnání experimentu šroubového přípoje a modelu je na obr. 34. Lze vidět, že simulace předvídala chování spoje poměrně přesně.



a) experiment

b) numerický model

Obrázek 34: Porovnání experimentu šroubového přípoje s numerickým modelem [36]

Yan a Young [37] ve své studii předvedli výsledky zkoušek šroubových přípojů s různou tloušťkou plechů, průměrem a uspořádáním šroubů za ustáleného stavu při teplotách 22 °C až 900 °C. Poukázali na to, že únosnost jednostřížného šroubového přípoje je podhodnocená. Na obr. 35 je deformace přípoje ocelových plechů tloušťky 0,42 mm a 1,9 mm při teplotě 594 °C.



Obrázek 35: Šroubový přípoj při teplotě 594 °C [37]

He a Wang [38] pomocí numerického modelu vytvořeného pro výpočet při běžné teplotě provedli parametrickou studii, ve které měnili okolní teplotu, vlastnosti materiálů a geometrii. Výsledky porovnávali s experimenty Hirashimi a Uesugi [39]. Ověřili, že model při běžné teplotě lze využít i za zvýšených teplot při změně mechanických vlastností oceli.

Cho, Teh, Young a Ahmed [40] provedli tahové zkoušky ultra-vysokopevnostního ocelového plechu Docal 1400 M při teplotách 20 °C až 700 °C, dále od 700 °C do 1000 °C zkoušeli pouze vliv ochlazení vodou či vzduchem. Zjistili, že americké a evropské normy nadhodnocují pevnost oceli v tahu za zvýšených teplot. Při 700 °C byla pevnost v tahu zkoušených vzorků pouze 5 % původní pevnosti. Ochlazení plechu vystaveného teplotě 1000 °C vodou pak vedlo k obnovení pevnosti v tahu o skoro 90 %.

3 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je prozkoumání chování střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji za běžné a zvýšené teploty. Pro jeho naplnění jsou stanoveny následující dílčí cíle:

- provedení experimentů se šroubovými přípoji za běžné a zvýšené teploty
 - zkoušky při teplotách 20 °C – 600 °C
 - dva typy šroubů a jedna tloušťka plechu
 - výsledné odvození redukčních součinitelů tuhosti a únosnosti přípojů
- numerická analýza
 - vytvoření numerického modelu střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji
 - charakteristiky šroubového přípoje z provedených experimentů
 - sledování vlivu tuhosti přípoje na chování střešního pláště při požáru
 - svislý průhyb plechu
 - osová síla ve šroubech
 - vodorovný posun přípoje
 - napětí v krajních vláknech plechu

4 Experimenty

Cílem provedených experimentů je zjištění tuhosti a únosnosti šroubových přípojí za normální a zvýšené teploty. Zkoušky byly provedeny v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

4.1 Zkoušky šroubových přípojí

4.1.1 Popis vzorků

Celkem proběhlo 19 zkoušek se šroubovými přípoji, 16 jich bylo se samořeznými závitotvornými šrouby nonut® TDBL-T-10,6x23 a zbylé 3 se samovrtnými šrouby EJOT® JT2-12-6,3-35 s těsnící podložkou V16 průměru 16 mm, obr. 36.



a) samořezný závitotvorný šroub (Ø závitů 10,6 mm)



b) samovrtný šroub (Ø závitů 6,3 mm)



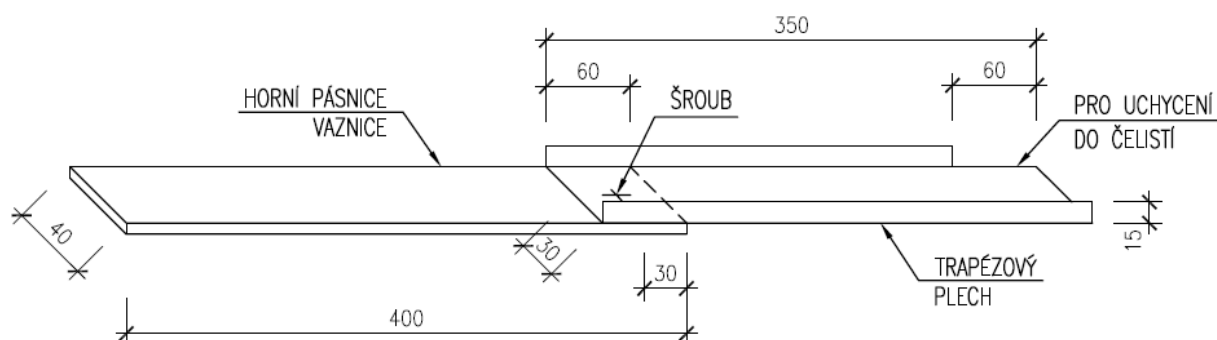
c) šroubové přípoje – horní pohled



d) šroubové přípoje – boční pohled

Obrázek 36: Zkušební vzorky

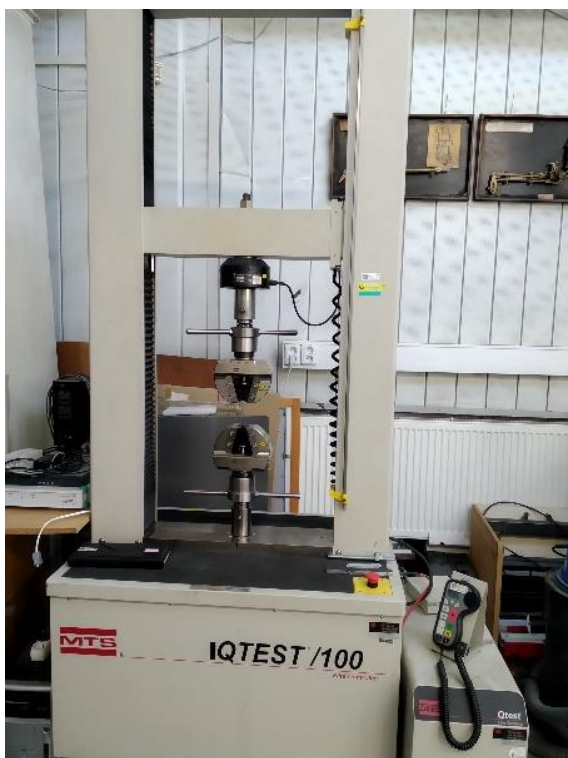
Simulovala se spodní vlna nejběžnějšího trapézového plechu TR 150/280 třídy oceli S 320 GD tloušťky 1,5 mm. Plech byl vybraným šroubem přimontován k ocelové části představující horní pásnici vaznice válcované za tepla třídy oceli S 235 tloušťky 8 mm s předvrtaným otvorem pro šroub ve vzdálenosti 30 mm od okraje. V případě přípoje se samořezným šroubem byl připravený otvor i v trapézovém plechu. Utažení šroubů bylo rázovým aku utahovákem. Schéma zkušebního vzorku je na obr. 37. Spodní vlna byla vytvořena ohnutím rovného plechu po obou stranách. Z důvodu možného uchycení do čelistí zkušebního stroje nepokračuje přehnutí na jedné straně až do konce.



Obrázek 37: Schéma vzorku šroubového přípoje

4.1.2 Průběh zkoušek

Zkoušky šroubových přípojí byly provedeny jak za běžné teploty 20 °C, tak i za zvýšených teplot 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C a 600 °C na zkušebním stroji MTS Elite Qtest 100, obr. 38. Požadovaných teplot se dosáhlo elektrickou pecí Elsklo OCEP RH1, obr. 39. Průměrná rychlost zahřívání byla 20 °C/min. Šroubové přípoje byly zatěžovány posunem 1 mm/mim. Vzorky byly v místě šroubu opatřeny pláštovým termočlánkem typu K napojeným na teploměr Voltcraft IR 900-30S, kterým se sledovala teplota přípoje, obr. 40. Případný prokluz z čelistí zkušebního stroje byl měřený 4 inductivními snímači dráhy s rozsahem 25 mm napojenými na ústřednu Spider 8. Snímače byly upevněny k čelistem magnetickými stojánky. Zkušební sestava a její schéma jsou na obr. 41 a obr. 42. Softwary použité na zaznamenání dat byly TestWorks® 4, verze 4.08 A (MTS) a Catman®, verze 3.1 (Spider).



a) zkušební stroj

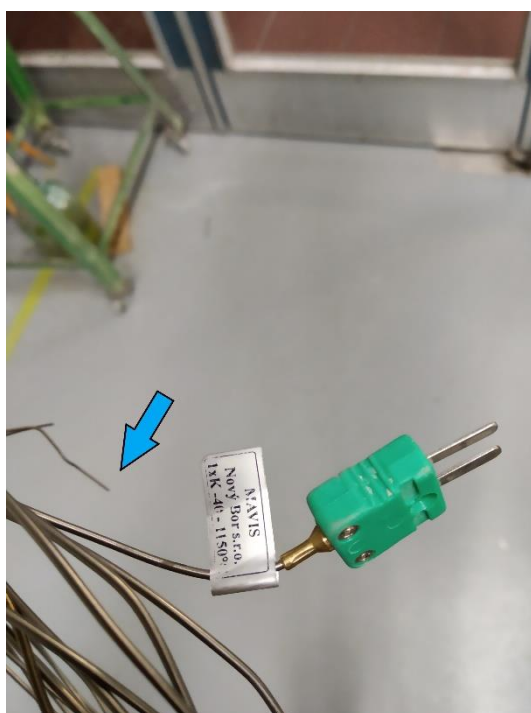


b) čelisti zkušebního stroje

Obrázek 38: Zkušební stroj MTS Elite Qtest 100



Obrázek 39: Elektrická pec Elsklo OCEP RH1 s ovládací panelem

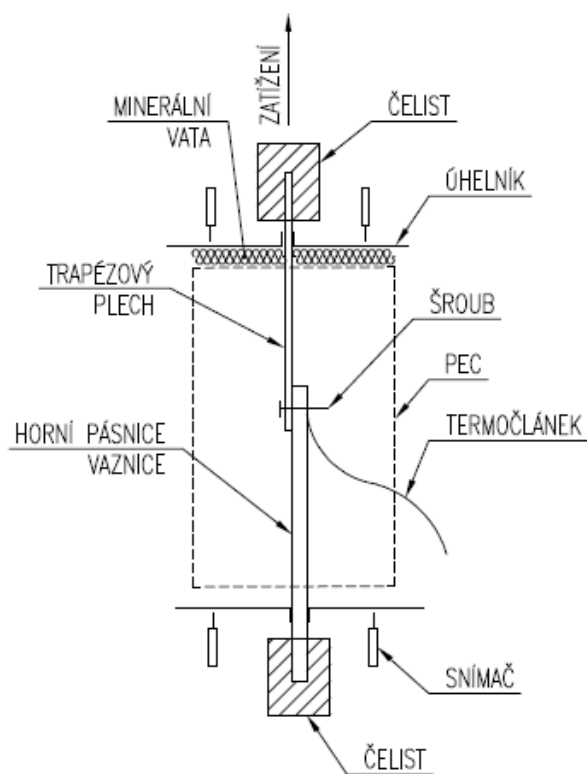


a) plášťový termočlánek typ K



b) termočlánek upevněný v místě šroubu

Obrázek 40: Termočlánek a jeho umístění



Obrázek 41: Schéma zkušební sestavy



a) zkušební sestava



b) zkušební sestava – zahřívání

Obrázek 42: Zkušební sestava

4.1.2.1 Značení zkušebních vzorků

Každý zkoušený vzorek má své vlastní označení *XX-Y-ZZZ*, kde je

XX pořadí vzorku;

Y typ šroubu;

- A = samořezný šroub nonut[®] TDBL-T-10,6x23;

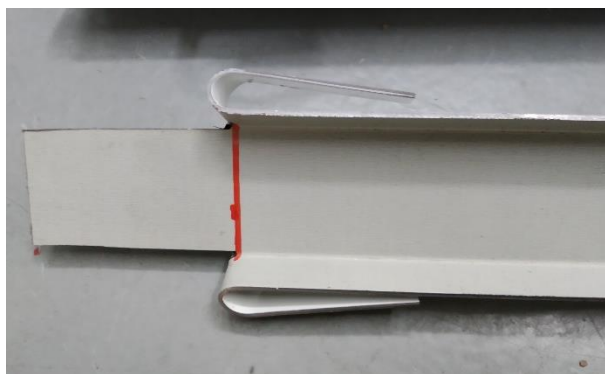
- B = samovrtný šroub EJOT[®] JT2-12-6,3-35 s těsnicí podložkou V16;

ZZZ teplota vzorku.

Například *03-A-500* znamená třetí vzorek šroubového přípoje se samořezným šroubem s průměrem závitu 10,6 mm zkoušený při teplotě 500 °C.

4.1.2.2 Zkoušky za běžné teploty

První zkouška za běžné teploty 20 °C byla zároveň i první zkouškou celého experimentu. Zkušební vzorek 01-A-020 měl v místě uchycení do čelistí rovný plech bez ohybu, obr. 43(a). To mělo za následek přetržení plechu v místě nejmenšího průřezu pod čelistí stroje, obr. 44(b). Aby se zabránilo opětovnému utrnutí, pokračoval u dalších vzorků ohnutý plech po jedné straně až do konce, obr. 37 a obr. 43(b). Tím se zvýšila pevnost v kritickém místě a plech se stále dal uchytit do čelistí.



a) rovný plech

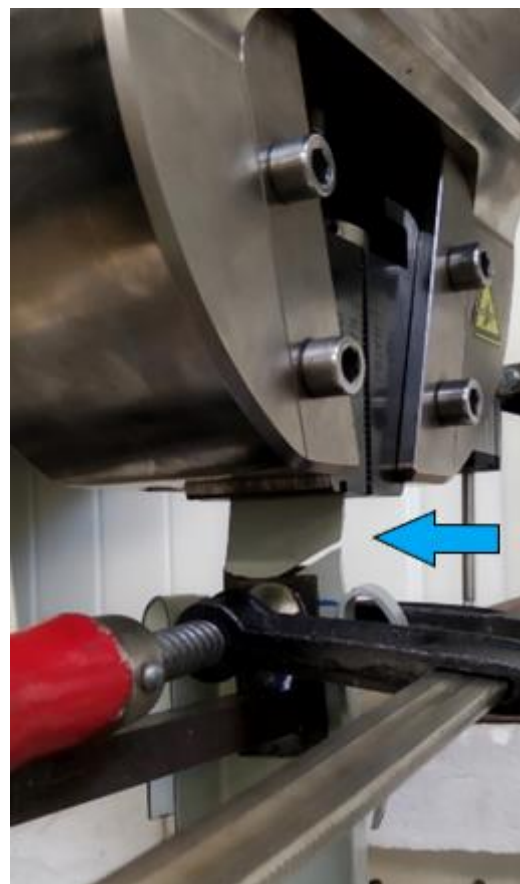


b) plech s ohnutím po jedné straně

Obrázek 43: Úprava plechu v místě uchycení do čelistí stroje



a) otláčení plechu



b) přetrhnutí plechu pod čelistí

Obrázek 44: Porušení zkušebního vzorku 01-A-020

Předpokládané porušení přípoje se samořezným šroubem s průměrem závitu 10,6 mm bylo otláčení plechu. U samovrtného šroubu s průměrem závitu 6,3 mm naopak ustřížení pod hlavou. Na první pohled se zdálo, že byly oba předpoklady naplněny, obr. 45 a obr. 47. Splnilo se ale pouze ustřížení pod hlavou samovrtného šroubu. Po rozebrání přípoje se samořezným šroubem se totiž ukázalo, že místo otláčení plechu zde došlo k přetržení plechu v oslabeném průřezu, obr. 46. Protažení otvoru bylo vlivem plastické deformace plechu, kdy se trhliny objevily za šroubem a zvětšovaly se. Nedošlo tak k žádnému hromadění plechu pod hlavou šroubu, jak by tomu bylo v případě porušení otláčením plechu. Oproti ostatním byly na vzorku 01-A-020 vidět pouze malé začínající plastické deformace, obr. 44(a).



a) horní pohled



b) boční pohled

Obrázek 45: Porušení otláčením plechu při 20 °C – samořezný šroub



a) horní pohled



b) spodní pohled

Obrázek 46: Rozebraný spoj zkoušený při 20 °C – samořezný šroub



a) horní pásnice vaznice se zbylým dřívkem – boční pohled



b) horní pásnice vaznice – horní pohled



c) trapézový plech se zbylou hlavou šroubu – horní pohled



d) otláčený trapézový plech – shodní pohled

Obrázek 47: Porušení ustřížením šroubu při 20 °C – samovrtný šroub

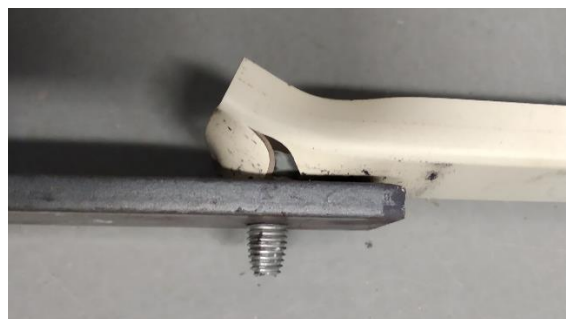
4.1.2.3 Zkoušky za zvýšené teploty

Zkoušky šroubových přípojí za zvýšené teploty proběhly při 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C a 600 °C. Na rozdíl od zkoušení za běžné teploty 20 °C se vzorky nejprve ohřály na požadovanou teplotu (20 °C/min) a až poté, co byla teplota uvnitř pece a teplota zkušební vzorku vyrovnána, se začalo zatěžovat posunem (1 mm/min).

I zde nebylo dosaženo očekávaného porušení přípoje otláčením plechu u samořezného šroubu s průměrem 10,6 mm, obr. 48 a obr. 49. Vzniklé trhliny za šroubem byly podobné jako při běžné teplotě. Splnil se opět pouze předpoklad ustříhnutí pod hlavou samovrtného šroubu s průměrem 6,3 mm, obr. 50. Pryžová část těsnící podložky V16 samovrtného šroubu při teplotě 500 °C zcela shořela a rozpadla na prach. Také bylo vidět, jak se s narůstající teplotou mění pozinkování plechu. Prvně se objevil jen rozdíl v barvě, nakonec se nátěr začal odlupovat.



a) 200 °C – horní pohled



b) 200 °C – boční pohled



c) 300 °C – horní pohled



d) 300 °C – boční pohled



e) 500 °C – horní pohled



f) 500 °C – boční pohled

Obrázek 48: Porušení otláčením plechu při 300 °C a 500 °C – samořezný šroub



a) 200 °C – horní pohled



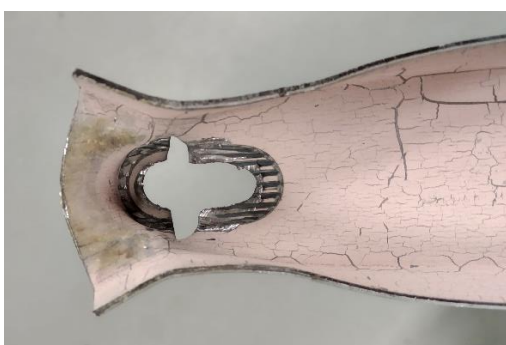
b) 200 °C – spodní pohled



c) 300 °C – horní pohled



d) 300 °C – spodní pohled



e) 500 °C – horní pohled



f) 500 °C – spodní pohled

Obrázek 49: Rozebrané přípoje zkoušené při 300 °C a 500 °C – samořezný šroub



a) horní pásnice vaznice se zbylým dříkem – boční pohled



b) horní pásnice vaznice – horní pohled



c) trapézový plech se zbylou hlavou šroubu – horní pohled



d) otláčený trapézový plech – shodní pohled

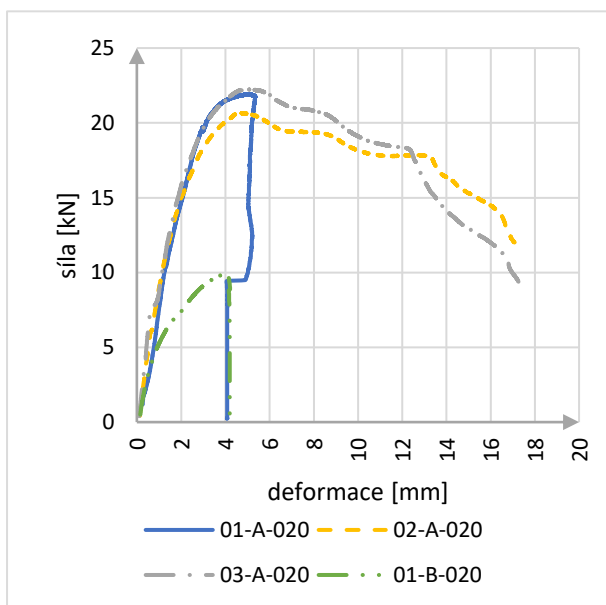
Obrázek 50: Porušení ustřížením šroubu při 500 °C – samovrtný šroub

Fotodokumentace experimentů viz příloha A.

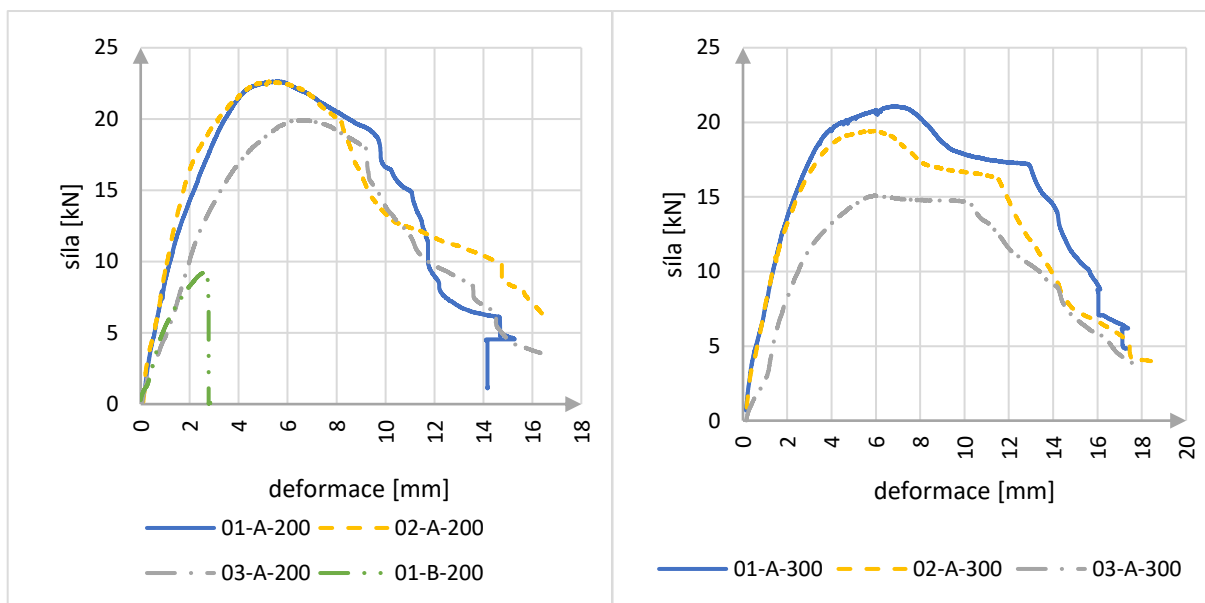
4.1.3 Výsledky

Následujícími pracovními diagramy lze popsat chování zkoušených šroubových přípojů za běžné a zvýšené teploty. Ve všech případech je možné pozorovat počáteční lineární nárůst síly v přípojích, která po dosažení maxima začne náhle nebo pozvolna klesat. Náhlý pokles je způsobený ustřížením šroubu. Občasné kolísání je zase následkem objevujících se trhlin, obr. 51 a obr. 52.

I přestože se zkouška vzorku 01-A-020 zcela nepovedla, je část pracovního diagramu před porušením pro zjištění počáteční tuhosti a maximální únosnosti stále k použití. Jeho chování je až do přetrhnutí plechu obdobné jako u ostatních dvou se samořeznými šrouby při běžné teplotě.

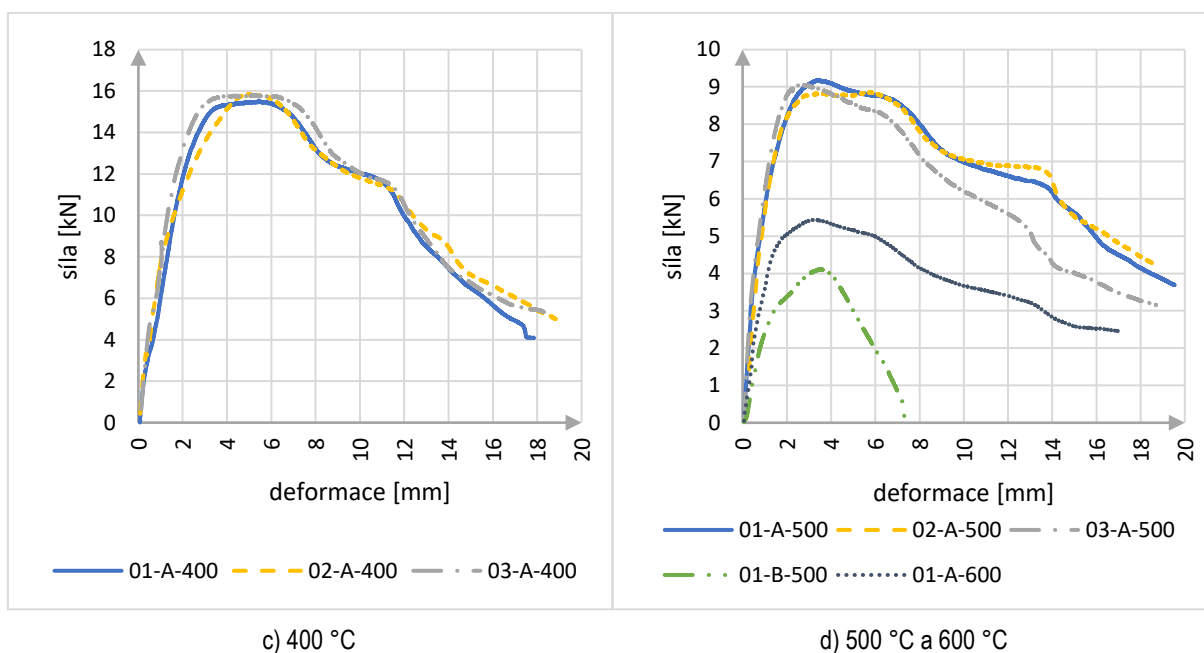


Obrázek 51: Pracovní diagram vzorků při 20 °C



a) 200 °C

b) 300 °C

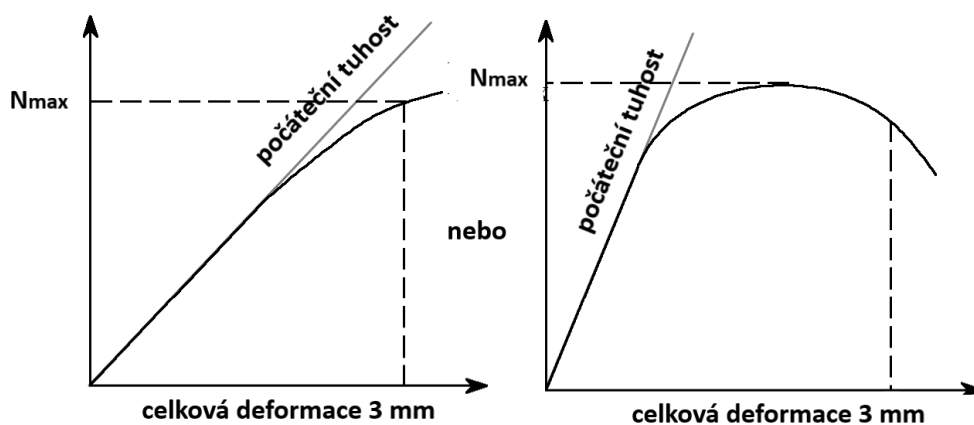


Obrázek 52: Pracovní diagramy vzorků při 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C a 600 °C

Jednotlivé pracovní diagramy všech vzorků viz příloha B.

4.1.3.1 Únosnost a tuhost šroubových přípojí

Únosnost šroubového přípoje byla stanovena podle doporučení ECCS [41] jako hodnota síly při celkové deformaci 3 mm, obr. 53. Deformace otláčením plechu se zjistila odečtením snímači naměřeného prokluzu od zatížení posunem čelisti. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 1. a tab. 2. Na obr. 54 je vidět, jak se únosnost a tuhost přípoje s narůstající teplotou mění.



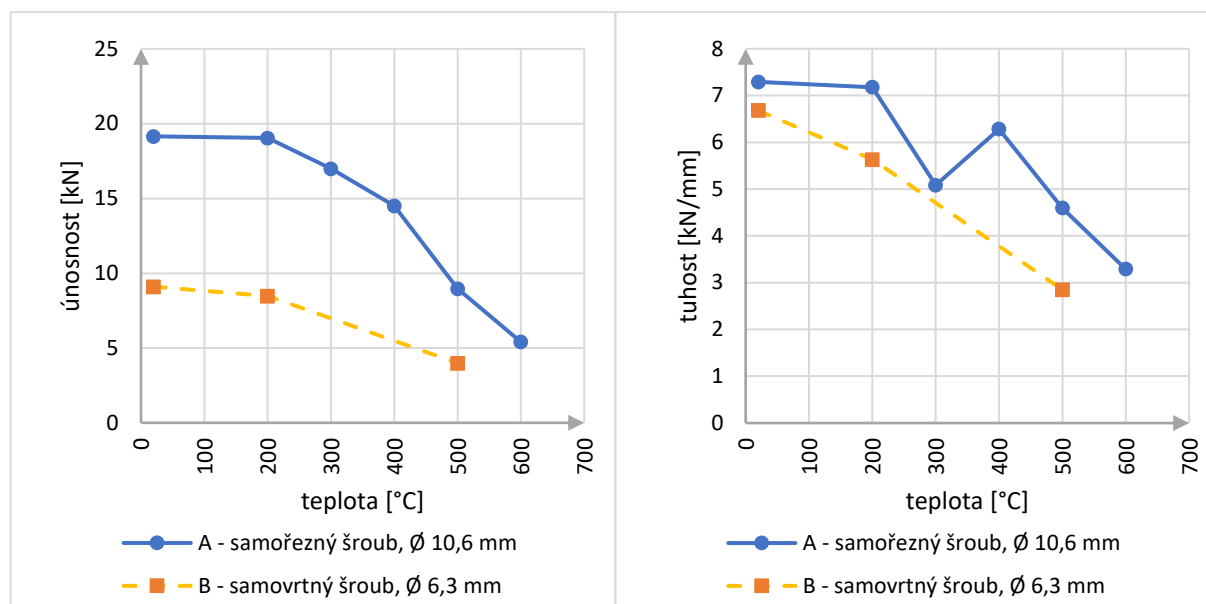
Obrázek 53: Způsob stanovení únosnosti přípoje dle ECCS [41]

Tabulka 1: Hodnoty maximální únosnosti a počáteční tuhosti šroubových přípojů

Označení vzorku	Únosnost (při deformaci 3 mm) [kN]	Únosnost (zprůměrováno) [kN]	Tuhost [kN/mm]	Tuhost (zprůměrováno) [kN/mm]
01-A-020	19,46	19,15	7,03	7,29
02-A-020	18,33		7,50	
03-A-020	19,65		7,34	
01-A-200	18,48	19,05	6,57	7,18
02-A-200	19,61		7,79	
03-A-200	14,16 ¹⁾		4,70 ¹⁾	
01-A-300	17,40	16,99	5,24	5,08
02-A-300	16,58		5,64	
03-A-300	11,48 ¹⁾		4,37	
01-A-400	14,61	14,51	5,52	6,28
02-A-400	13,54		6,87	
03-A-400	15,37		6,46	
01-A-500	9,07	8,97	4,70	4,60
02-A-500	8,78		4,41	
03-A-500	9,06		4,68	
01-A-600	5,41	5,41	3,29	3,29
01-B-020	9,10	9,10	6,68	6,68
01-B-200	8,48	8,48	5,63	5,63
01-B-500	3,98	3,98	2,85	2,85

Poznámky:

¹⁾ Dále není uvažováno z důvodu velké odchylky od ostatních naměřených hodnot při dané teplotě. Pro lepší výsledky by bylo třeba provést více zkoušek.



a) závislost únosnosti na teplotě

b) závislost tuhosti na teplotě

Obrázek 54: Grafy s průměrnými hodnotami únosnosti a tuhosti šroubových přípojů

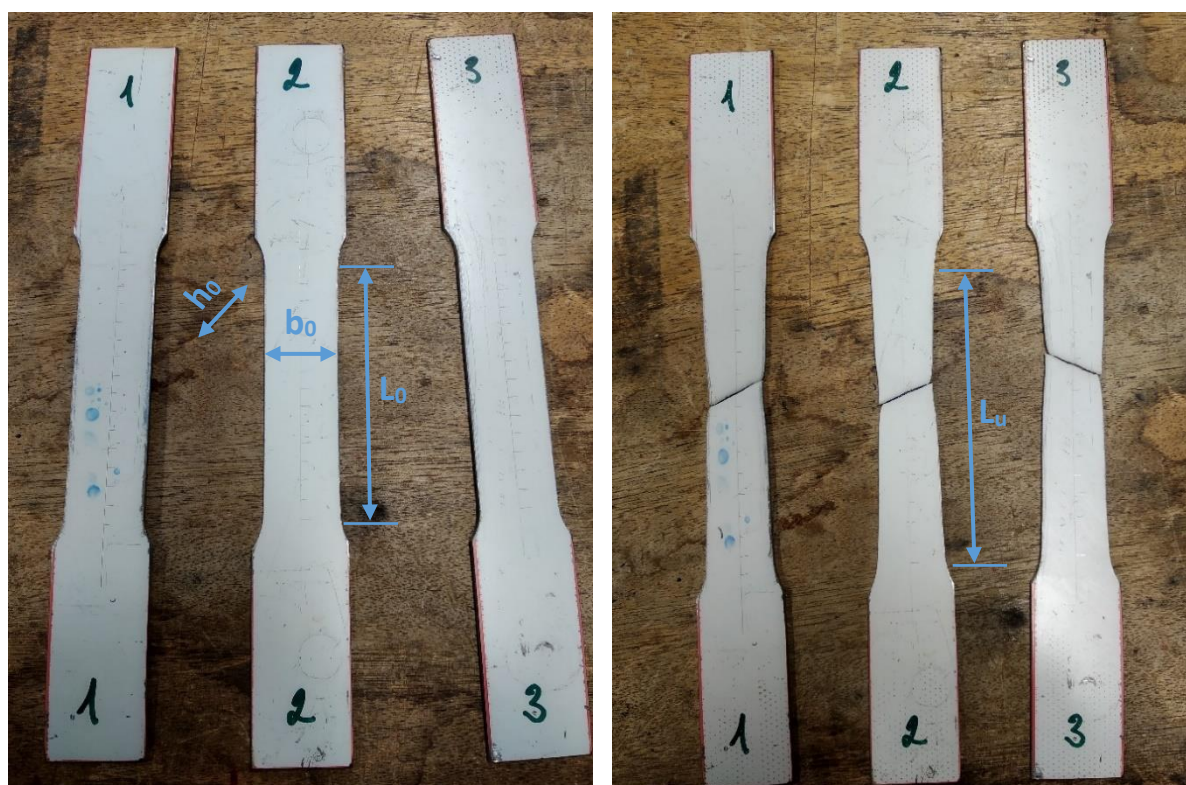
Tabulka 2: Výsledné hodnoty redukčních součinitelů pro jednotlivé teploty

Typ šroubového přípoje	Teplota [°C]	Redukční součinitel pro únosnost	Redukční součinitel pro tuhost
A – samořezný šroub, Ø 10,6 mm	20	1,00	1,00
	200	0,99	0,98
	300	0,89	0,70
	400	0,76	0,86
	500	0,47	0,63
	600	0,28	0,45
B – samovrtný šroub, Ø 6,3 mm	20	1,00	1,00
	200	0,93	0,84
	500	0,44	0,43

4.2 Zkoušky materiálových vlastností oceli

4.2.1 Průběh zkoušky

Pro ověření materiálových vlastností oceli za běžné teploty proběhly celkem 3 tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 6892-1 [42]. Vzorky byly vyříznuty z nepoškozeného a vysokým teplotám nevystaveného trapézového plechu oceli třídy oceli S 320 GD. Tvar zkušebního tělesa je krátká poměrná tyč se součinitelem proporcionality $k = 5,56$. Stejně jako u předchozích experimentů byl zkušebním strojem MTS Elite Qtest 100. Rychlost zatěžování posunem byla 1 mm/min. Neporušené vzorky před zkouškou a přetržené po zkoušce jsou na obr. 55.



a) před zkouškou

b) po zkoušce - přetržené

Obrázek 55: Zkušební vzorky před a po zkoušce

Délka, šířka a tloušťka zkoušených částí včetně pozinkování se měřily posuvným měřidlem, tab. 3. Aktuální prodloužení vzorku zaznamenával axiální extenzometr Epsilon 3542, obr. 56.

Tabulka 3: Záznam ze zkoušky

Označení zkušebních tyčí: poměrná tyč, $k = 5,65$			Popis zkušební tyče: obdélníkový průřez		Rychlost: 1 mm/min			
Před zkouškou					Po zkoušce			
Ozn. vzorku	b_0 [mm]	h_0 [mm]	$L_0^{1)}$ [mm]	S_0 [mm ²]	b_u [mm]	h_u [mm]	L_u [mm]	S_u [mm ²]
1	21,10	1,56	30,0	32,92	-	-	43,33	-
2	20,70	1,45	30,0	30,02	-	-	42,83	-
3	20,90	1,47	30,0	30,72	-	-	43,15	-

Poznámky:
¹⁾ Počáteční měřená délka L_0 byla zvolena jako zkušební délka $L_c = 5,65 \cdot A^{1/2}$.

kde je

- b_0 počáteční šířka zkoušené části;
- h_0 počáteční tloušťka zkoušené části;
- L_0 počáteční měřená délka zkoušené části;
- S_0 počáteční průřezová plocha zkoušené části;
- b_u konečná šířka zkoušené části;
- h_u konečná tloušťka zkoušené části;
- L_u konečná měřená délka zkoušené části;
- S_u konečná průřezová plocha zkoušené části.

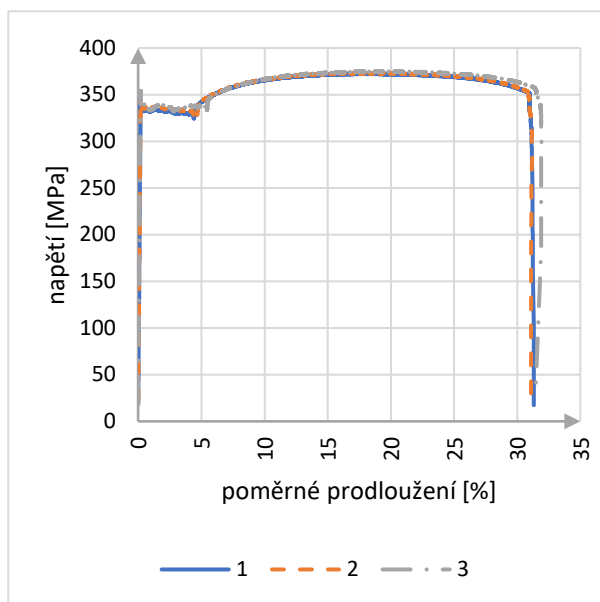


Obrázek 56: Zkušební sestava

Fotodokumentace experimentu viz příloha A.

4.2.2 Výsledky

Na obr. 57 je vidět, že všechny 3 zkušební vzorky trapézového plechu mají dosti podobný pracovní diagram. Podle viditelné výrazné mezi kluzu se jedná o plech z měkké oceli, u které nebylo třeba vyhodnocovat tzv. smluvní mez kluzu. Výsledné hodnoty a jejich průměr jsou v tab. 4. Ve všech případech byla splněna udávaná minimální mez kluzu 320 MPa.



Obrázek 57: Pracovní diagramy vzorků

Jednotlivé pracovní diagramy vzorků viz příloha B.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty

Ozn. vzorku	F_e [kN]	F_m [kN]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	E [MPa]
1	11,04	12,27	335,4	372,7	44,4	173120
2	11,13	12,29	370,9	409,6	42,8	173250
3	11,21	12,35	364,7	402,0	43,8	210700
						185690

kde je

F_{eH} síla na mezi kluzu;

F_m síla na mezi pevnosti;

R_e mez kluzu;

R_m mez pevnosti;

A tažnost;

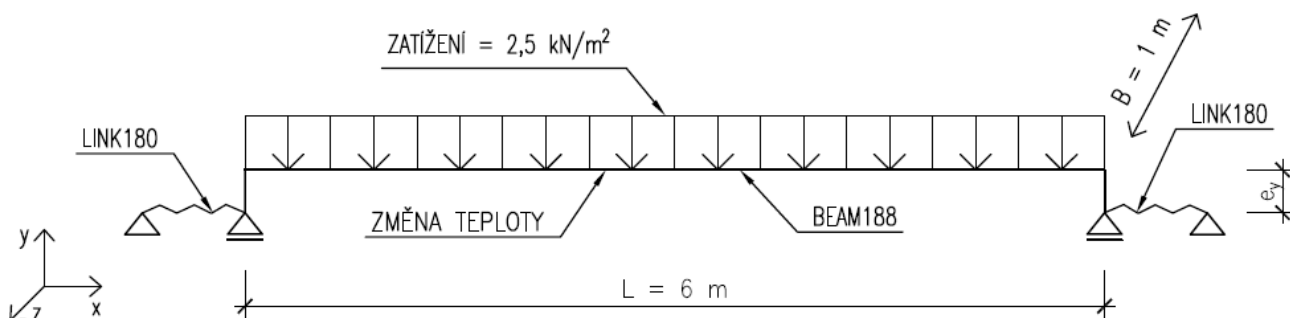
E modul pružnosti.

5 Numerická analýza

Cílem numerické analýzy je vytvoření numerického modelu střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji a zjištění vlivu tuhosti přípoje na chování střešního pláště za normálních a zvýšených teplot. Byl sledován vliv na svislý průhyb plechu, osovou sílu ve šroubech, vodorovný posun v přípoji a napětí v krajních vláknech plechu. Simulace byly provedeny ve výpočetním programu Ansys Mechanical APDL verzi 2022 R1 [43], který je založený na řešení numerických modelů metodou konečných prvků.

5.1 Popis modelu

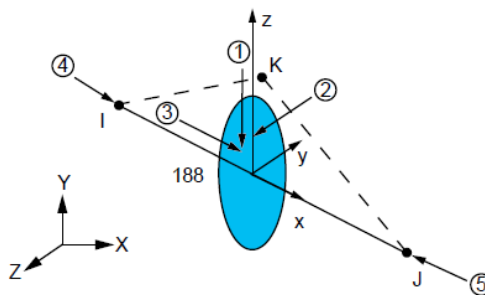
Střešní plášť z trapézových plechů se šroubovými přípoji se dá modelovat různými způsoby, zde byl zvolen jednoduchý 2-D prutový model bez lokálního boulení, obr. 58. Jedná se o nosník rozpětí 6 m s excentricitou e_z a pružnými konci představujícími šroubové přípoje. Tyto konce jsou podepřeny pevnými a posuvnými klouby umožňujícími vodorovný posun. Excentricita představuje vzdálenost těžiště a je vytvořena nekonečně tuhým prvkem, obr. 61. Konstrukce je zatížena spojitým zatížením pro 1 m široký plech $2,5 \text{ kN/m}^2$, které odpovídá skladbě střechy spolu se sněhem a například fotovoltaice nebo jiné technologii. Dále je vystavena teplotě od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ až $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato teplota je rovnoměrná po celé délce nosníku i po jeho průřezu. Součinitel tepelné roztažnosti α oceli je $14 \times 10^{-6} \text{ m/(m}^\circ\text{K)}$ a model počítá pružnoplasticky podle teorie II. řádu.



Obrázek 58: Schéma modelu

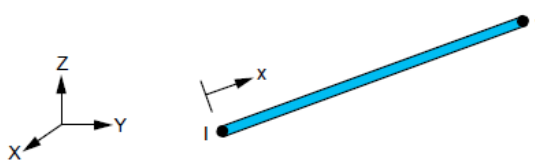
2-D globální model střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji se skládá ze dvou typů prutových prvků:

- BEAM188 – trapézový plech
 - 3-D dvouuzlový prutový prvek (obr. 59) s tuhostí v ohybu a kroucení
 - každému uzlu lze odebrat 6 stupňů volnosti (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)
 - vhodný na analýzy štíhlých až středně tlustých rámových konstrukcí
 - může mít libovolný průřez
 - umí řešit velké nelineární deformace



Obrázek 59: Geometrie prvku BEAM188 [44]

- LINK180 – šroubový přípoj
 - 3-D dvouuzlový prutový prvek (obr. 60) bez ohybové tuhosti – přenáší pouze osové síly
 - každému uzlu lze odebrat 3 stupně volnosti (UX, UY, UZ)
 - vhodný na modelování příhradových vazníků, lan, táhel či pružin



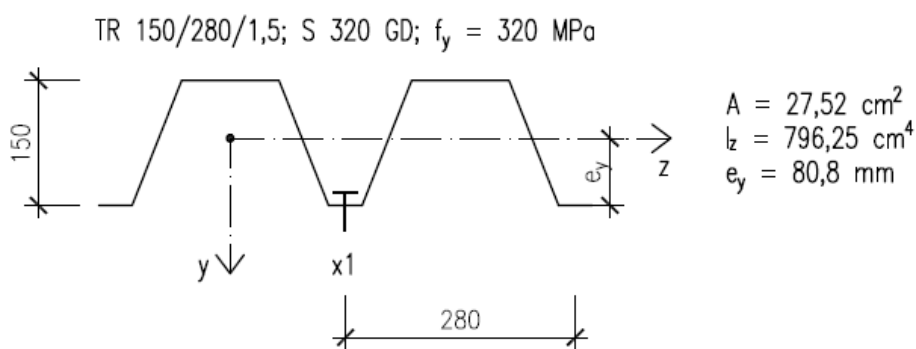
Obrázek 60: Geometrie prvku LINK180 [44]

Oba použité prvky jsou sice 3-D, ale díky vhodnému podepření lze vytvořit 2-D model. V tomto případě se jednalo o zabránění rotace kolem osy x , rotace kolem osy y a posun po ose z . Orientace souřadného systému je na obr. 23.

5.2 Materiálové vlastnosti

5.2.1 Trapézový plech

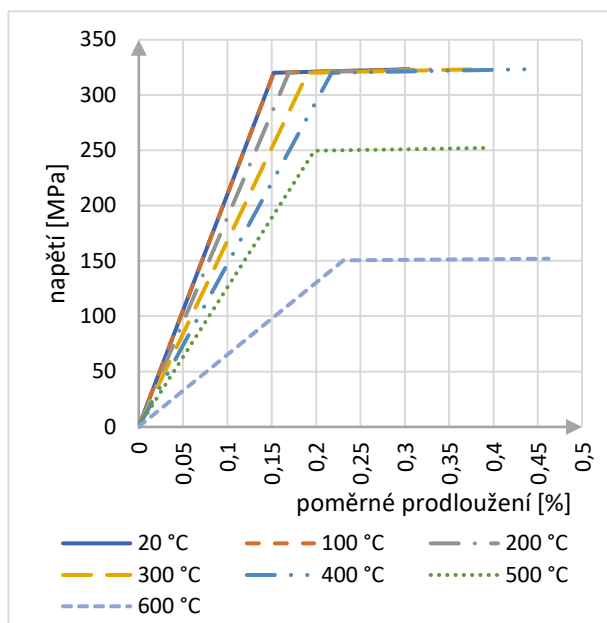
Vybraným trapézovým plechem je TR 150/280 třídy oceli S 320 GD tloušťky 1,5 mm. Jeho průřezové charakteristiky jsou na obr. 61, plocha průřezu A , moment setrvačnosti k ose z I_z a vzdálenost těžiště e_y . Pro účely numerického modelu je uvažována mez kluzu 320 MPa a modul pružnosti při 20 °C 210 GPa. Na obr. 62 jsou pracovní diagramy pro jednotlivé teploty, redukční součinitele v tab. 5 jsou převzaty z ČSN EN 1993-1-2 [23].



Obrázek 61: Průřezové charakteristiky

Tabulka 5: Hodnoty redukčních součinitelů pro jednotlivé teploty [23]

Teplota [°C]	Redukční součinitel pro mez kluzu	Redukční součinitel pro modul pružnosti
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	1,00	0,90
300	1,00	0,80
400	1,00	0,70
500	0,78	0,60
600	0,47	0,31



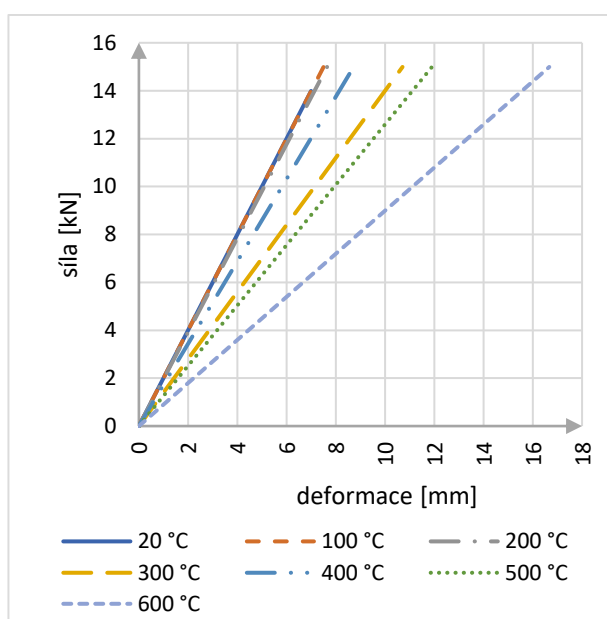
Obrázek 62: Pracovní diagramy trapézového plechu pro jednotlivé teploty

5.2.2 Šroubové přípoje

Zvolený je šroubový přípoj se samořezným šroubem s průměrem závitu 10,6 mm. Pro účely numerického modelu je uvažováno pružné chování přípoje. Tuhost přípoje při běžné teplotě je 2 kN/mm a únosnost přípoje je neomezená, obr. 63. Redukční součinitele tuhosti pro jednotlivé teploty v tab. 6 jsou převzaty z předchozího experimentu.

Tabulka 6: Hodnoty redukčních součinitelů tuhosti pro jednotlivé teploty

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500	600
Redukční součinitel pro tuhost	1,00	1,00	0,98	0,70	0,86	0,63	0,45



Obrázek 63: Pracovní diagram šroubového přípoje pro jednotlivé teploty

Numerická analýza je rozdělená na dvě části:

- vliv zvoleného šroubového přípoje na chování trapézového plechu
 - jeden šroub ve vlně, obr. 61
 - uvažovaná tuhost přípoje při běžné teplotě je 2 kN/mm
 - únosnost přípoje je neomezená
 - redukční součinitele tuhosti pro jednotlivé teploty jsou převzaty z předchozího experimentu, tab. 6
- vliv změny tuhosti šroubového přípoje na chování trapézového plechu
 - jeden šroub ve vlně, obr. 61
 - simulace tuhosti přípoje od „nuly“ do „nekonečna“
 - tuhost „nula“ je 0,00001 násobek tuhosti z obr. 63
 - tuhost „nekonečno“ je 100000 násobek tuhosti z obr. 63
 - únosnost přípoje je neomezená

5.3 Výsledky

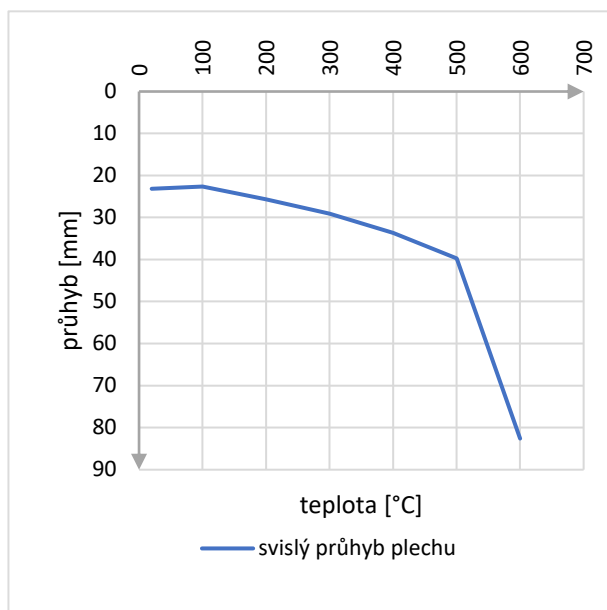
5.3.1 Vliv zvoleného šroubového přípoje na chování trapézového plechu

Následující výsledné grafy popisují vliv zvoleného šroubového přípoje na chování nosníku představujícího střešní plášť z trapézových plechů za běžné a zvýšené teploty, obr. 64 a obr. 65.

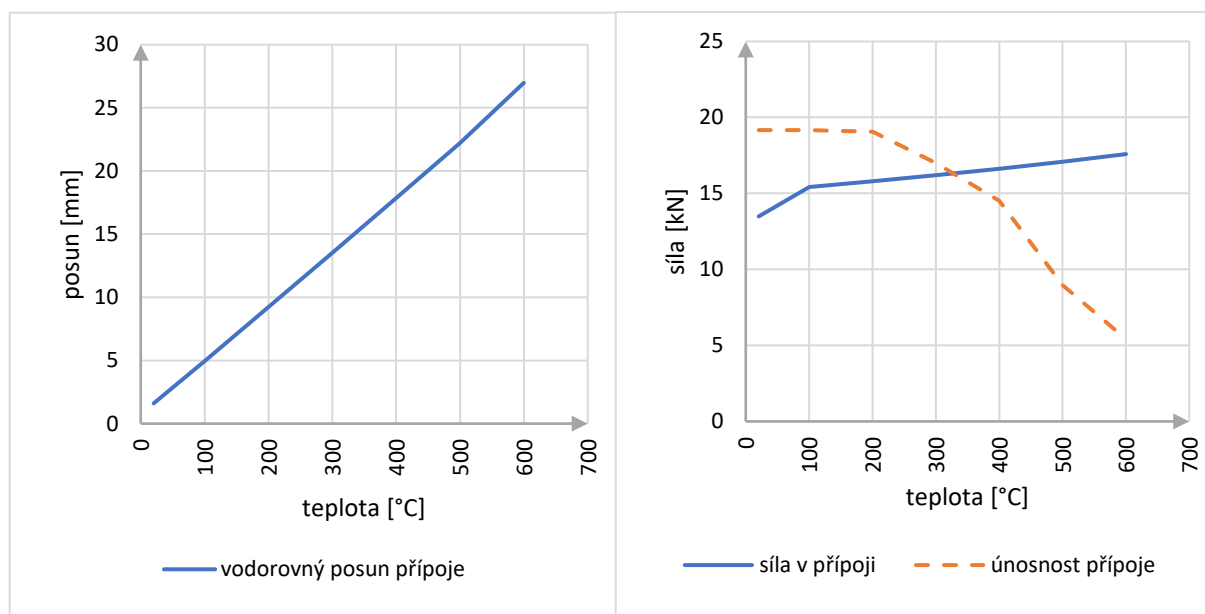
Jako první lze pozorovat průběh svislého průhybu plechu. Na začátku se po zatížení trapézový plech prohne dolů, při 100 °C se díky excentrickému uložení zvedne lehce nahoru a poté opět zpět dolů. Hodnoty svislého průhybu se překročením teploty 500 °C výrazně navýší.

Dále jsou vidět vodorovné posuny v podpoře a síla ve šroubech. Vodorovný posun je vzhledem k rovnoměrné tepelné roztažnosti oceli lineární a s teplotou roste. Síla ve šroubech se po dosažení teploty 100 °C též lineárně zvětšuje. Pro představu je v grafu naznačena únosnost přípoje z předchozího experimentu, která je v tomto případě po dosažení teploty 300 °C překročena. Jelikož deformační kapacita šroubových přípojů bývá velká [27], nemusí překročení únosnosti znamenat okamžitý kolaps konstrukce.

Poslední grafy ukazují průběh napětí v plechu, kdy jsou spodní vlákna tlačena a horní vlákna jsou tažena. V grafech je navíc naznačena mez kluzu posuzovaného trapézového plechu, které je dosaženo kolem teploty 600 °C.

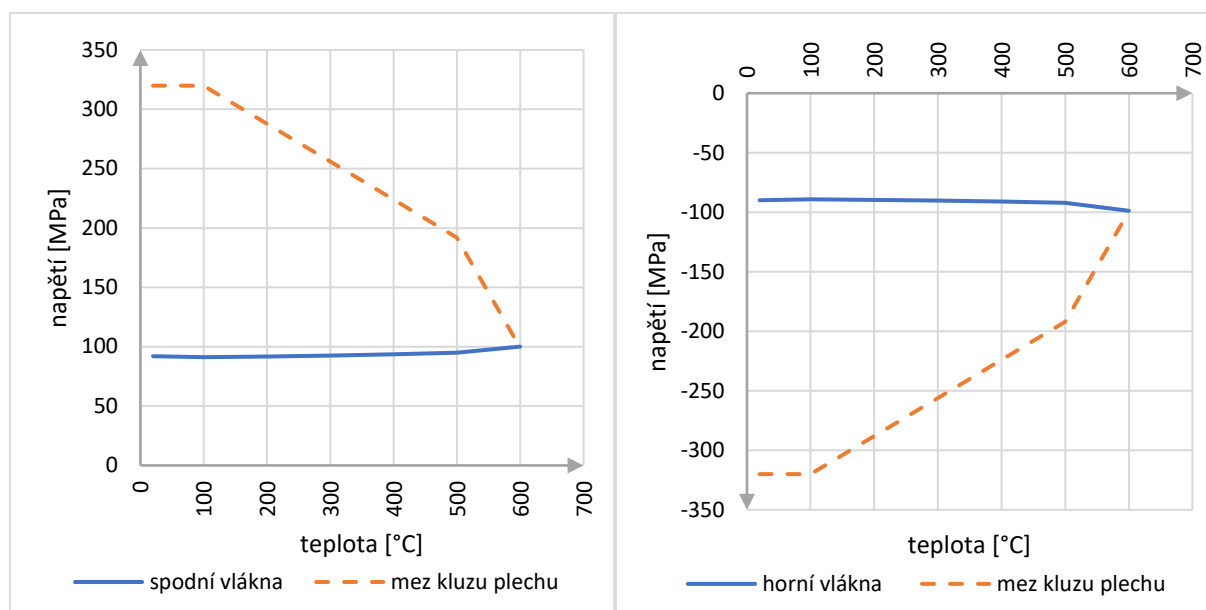


Obrázek 64: Graf závislosti svislého průhybu na teplotě



a) závislost vodorovného posunu v podpoře na teplotě

b) závislost síly ve šroubech na teplotě



c) závislost napětí ve spodních vláknech plechu na teplotě

d) závislost napětí v horních vláknech plechu na teplotě

Obrázek 65: Grafy závislosti vodorovného posunu, síly ve šroubech a napětí v plechu na teplotě

5.3.2 Vliv změny tuhosti šroubového přípoje chování trapézového plechu

Během této parametrické studie proběhlo celkem 50 simulací, při kterých se postupně měnila tuhost přípoje. Následujícími výslednými grafy lze popsat chování za běžné a zvýšené teploty nosníku představujícího střešní plášť z trapézových plechů se šroubovými přípoji, obr. 66 a obr. 67.

Na všech grafech jsou na první pohled vidět 3 zóny:

- volný posun
- pružné uložení
- zabráněný posun

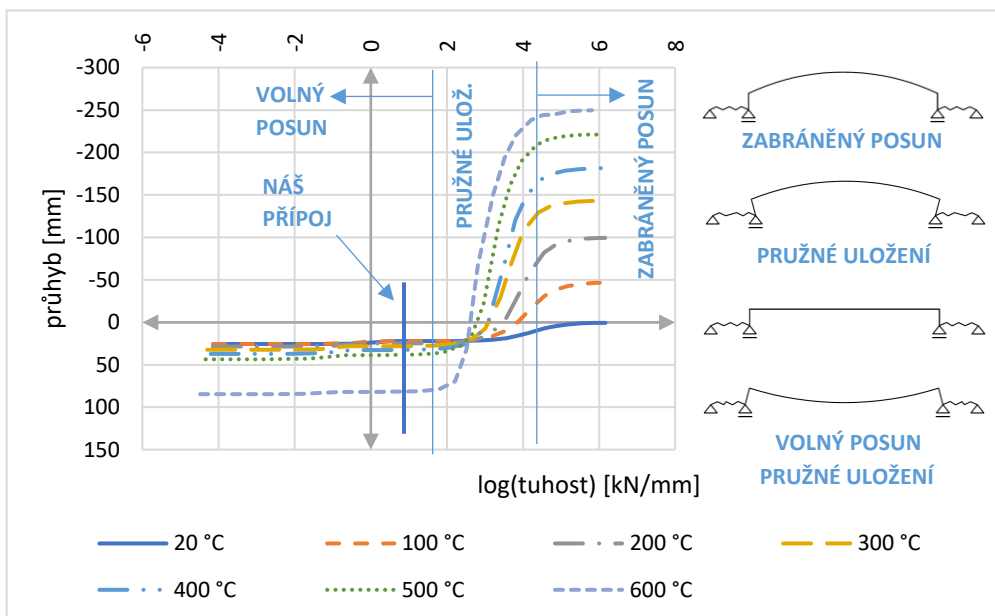
Zvolený šroubový přípoj s materiálovými vlastnostmi na obr. 63 označený jako *náš přípoj* se nachází v oblasti volného posunu. Zde se svislý průhyb, síla ve šroubech a napětí v plechu nijak výrazně s teplotou nemění. Až při 600 °C je znát větší rozdíl svislého průhybu způsoben tepelnou roztažností ocelového plechu a poklesu modulu pružnosti oceli. Naopak vodorovný posun je s každou teplotou jiný, a to díky nízké tuhosti kloubového přípoje.

Jelikož má posuzovaný šroubový přípoj malou tuhost, umožňuje volné roztahování plechu a nemá na jeho svislý průhyb výrazný vliv. Aby se vliv přípoje projevil, musela by být jeho tuhost 100krát větší, než má teď. Pak by se objevily o něco málo větší rozdíly ve svislém průhybu, síle ve šroubech a napětí v trapézovém plechu. Trapézový plech se také začíná místo prohýbání dolů zvedat postupně s čím dál větší tuhostí přípoje vzhůru. I napětí plechu se ve spodních vláknech mění z tahu na tlak a v horních vláknech z tlaku na tah.

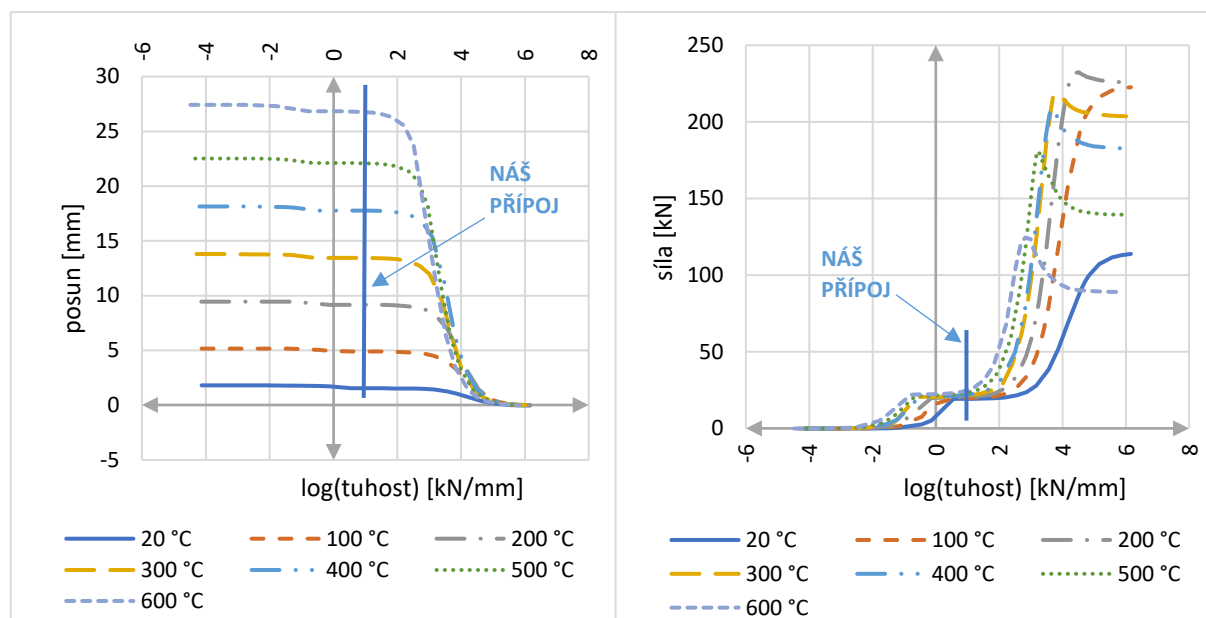
S tuhostí přípoje 100000krát větší spadá *náš přípoj* do zóny zabráněného posunu. V této chvíli je tuhost šroubového přípoje tak velká, že jsou vodorovné posuny v podporách vzhledem k prodloužení plechu od přírůstku teploty zanedbatelné. Plech se dále díky excentrickému uložení prohýbá i přes gravitaci vzhůru. Svislý průhyb se s rostoucí teplotou zvětšuje. Stejně jako v předchozí analýze je v grafech s napětím znázorněná mez kluzu trapézového plechu pro jednotlivé teploty. Po dosažení teploty 200 °C dochází v zóně zabráněného posunu k vyčerpání této meze při

spodních vláken plechu a začínají se tvořit trvalé deformace. U horních vláken k tomu dochází až při teplotě 400 °C.

Největší hodnoty svislého průhybu vzhůru a napětí v plechu vznikají při dokonale tuhém uložení, kdy je zcela zabráněno vodorovnému posunu přípoje. Napětí v plechu je způsobeno osovou tlakovou silou a ohybovým momentem od excentricity s účinkem druhého řádu.

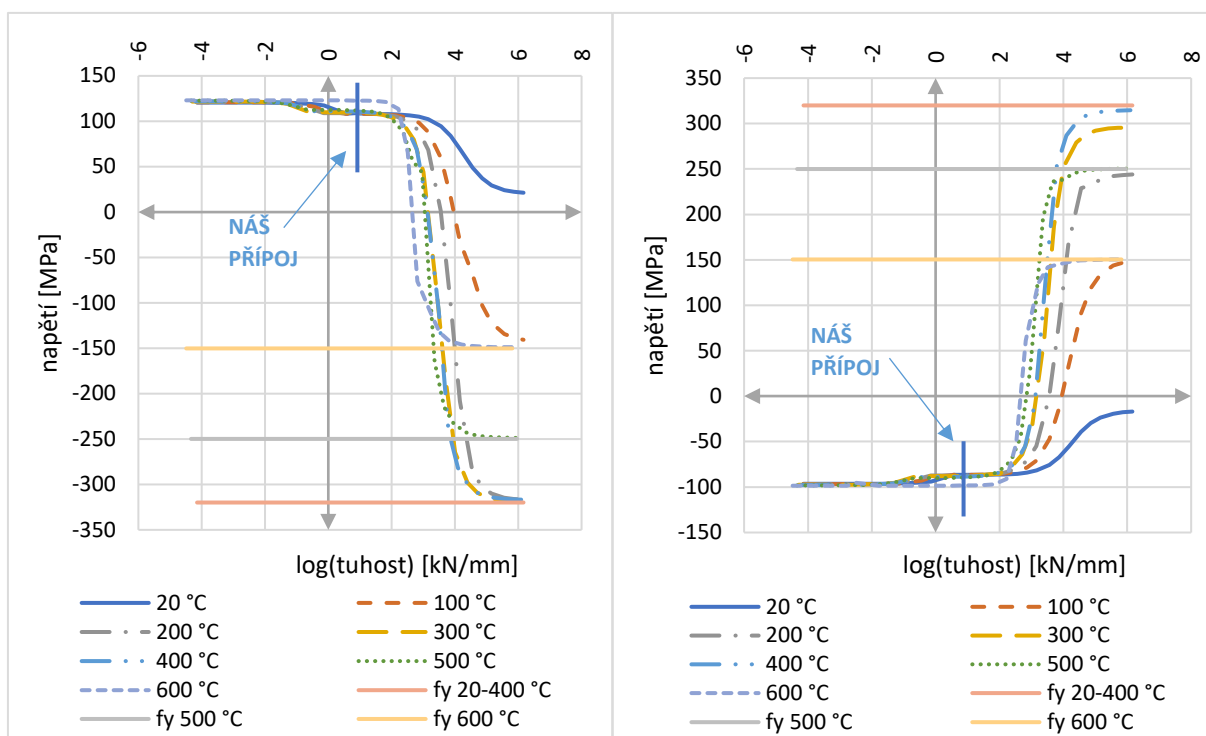


Obrázek 66: Graf závislosti svislého průhybu na tuhosti s vyznačenými zónami



a) závislost vodorovného posunu v podpoře na tuhosti

b) závislost síly ve šroubech na tuhosti



c) závislost napětí ve spodních vláknech plechu na tuhosti

d) závislost napětí v horních vláknech plechu na tuhosti

Obrázek 67: Grafy závislosti vodorovného posunu, síly ve šroubech a napětí v plechu na tuhosti

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo prozkoumání chování střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji za běžné a zvýšené teploty.

Pro splnění tohoto cíle byly provedeny experimenty se šroubovými přípoji při teplotách 20 °C až 600 °C. Jednalo se o přípoje se samořeznými šrouby nonut® TDBL-T-10,6x23 a samovrtné šrouby EJOT® JT2-12-6,3-35 s těsnicí podložkou V16 průměru 16 mm. Tyto šrouby spojovaly spodní vlnu nejběžnějšího trapézového plechu TR 150/280/1,5 třídy oceli S 320 GD s ocelovou částí představující horní pásnici vaznice válcované za tepla třídy oceli S 235 tloušťky 8 mm.

Z experimentálně určených hodnot byly následně odvozeny redukční součinitele tuhosti a únosnosti šroubových přípojů pro jednotlivé teploty. Vzhledem k malému počtu zkoušených vzorků se některé výsledné hodnoty zdály ne zcela přesné. Pro další výzkum se proto doporučuje provést těchto zkoušek více.

Dále byl v programu Ansys vytvořen numerický model střešního pláště z trapézových plechů se šroubovými přípoji, na kterém se zkoumal vliv tuhosti přípoje na chování střešního pláště při teplotách 20 °C až 600 °C. Použit byl jednoduchý 2-D prutový model, nosník o rozpětí 6 m s excentricitou a pružnými konci představujícími šroubové přípoje. Výsledky simulací ukázaly závislost svislého průhybu, síly ve šroubech, vodorovného posunu v podpoře a napětí v plechu na tuhosti přípoje. Posuzovaný šroubový přípoj se díky své tuhosti nacházel v oblasti volného posunu.

Vzhledem k jednoduchosti má zvolený model omezení, kterým je zanedbání lokálního boulení. Pro přesnější výsledky by bylo nutné použít 3-D model celého trapézového plechu. A jelikož nebyly k dispozici na porovnání žádné experimenty, správnost modelu zůstává neověřena.

Literatura

- [1] Rubery Owen „Prefabs“ [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <http://www.historywebsite.co.uk/articles/DarlastonHouses/Prefabs.htm>
- [2] CASE, PENSIUNI, VILE, CASE DE VACANȚĂ – Structura Usoara MEXI® [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://structurausoara.ro/tip-constructii/case/>
- [3] Z profily. Halový systém [online]. [vid. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.halovysystem.sk/konstrucne-profily/z-profily/>
- [4] Seamless vs. Welded. Tubing Central [online]. 5. březen 2018 [vid. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://tubingcentral.com/articles/seamless-vs-welded/>
- [5] Zpracování plechů ohraňovacím lisem / FERRUM s.r.o. [online]. [vid. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.ferrum-mb.cz/cnc-ohrnovaci-lis/>
- [6] ČSN EN 1993-1-3. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-3: Obecná pravidla - Doplňující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily. Praha: Český normalizační institut, 2008. Třídící znak 731401.
- [7] CONSTRUCTION, ArcelorMittal. Inteligentní řešení staveb. ArcelorMittal Construction [online]. [vid. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://construction.arcelormittal.com/cz-cz>
- [8] GLETON. Galerie / Trapézysoukup [online]. [vid. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://trapezysoukup.cz/galerie/>
- [9] Tabulky únosnosti. Kovové profily – Váš partner pro opláštění budov [online]. [vid. 2022-06-08]. Dostupné z: <https://kovprof.cz/hlavni-stranka/trapezove-profily/technicke-informace/tabulky-unosnosti/>
- [10] 246/2001 Sb. Vyhláška o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)
- [11] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, 2004. Třídící znak 730035.
- [12] ČSN 73 0802 ED. 2. Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Třídící znak 730802.
- [13] BILLAH, Moushtakim, Mofizul ISLAM a Rubieyat Bin ALI. Cold formed steel structure: An overview. 2019, 15.
- [14] CHEN, Ju a Ben YOUNG. Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2007, **45**(1), 96–110. ISSN 0263-8231. Dostupné z: [doi:10.1016/j.tws.2006.11.003](https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.11.003)
- [15] LEE, Jung Hoon, Mahen MAHENDRAN a Pentti MAKELAINEN. Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2003, **59**(12), 1517–1532. ISSN 0143-974X. Dostupné z: [doi:10.1016/S0143-974X\(03\)00087-7](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00087-7)
- [16] OUTINEN, Jyri. *Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down* [online]. B.m.: Helsinki University of Technology, 2007 [vid. 2022-05-21].

ISBN 978-951-22-8608-9.
Dostupné z: <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/2857>

Dostupné

z: <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/2857>

- [17] LIANG, Zhanshuo, Weiyong WANG a Ziqi WANG. Effect of cold-form and tensile strain rate on mechanical properties of Q345 steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2022, **191**, 107192. ISSN 0143-974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2022.107192
- [18] ČSN EN 1993-1-1 ED. 2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 731401.
- [19] ČSN EN 1993-1-5 ED. 3. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Třídící znak 731401.
- [20] SCHWARZ, Ivo. *Chování tenkostěnných Z-vaznic za požáru*. Praha, 2020. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [21] ŠORF, Marek. *Lokálně a liniově zatížené trapézové plechy*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [22] QIU, Jing, Qihong ZHAO, Zhiyu WANG a Cheng YU. Lateral behavior of trapezoidally corrugated wall plates in steel plate shear walls, Part 1: Elastic buckling. *Thin-Walled Structures* [online]. 2022, **174**, 109104. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2022.109104
- [23] ČSN EN 1993-1-2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2006. Třídící znak 731401.
- [24] FENG, M, Y. C WANG a J. M DAVIES. Structural behaviour of cold-formed thin-walled short steel channel columns at elevated temperatures. Part 1: experiments. *Thin-Walled Structures* [online]. 2003, **41**(6), 543–570. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/S0263-8231(03)00002-8
- [25] KARMAZÍNOVÁ, Marcela. *Prvky kovových konstrukcí* [online]. Brno, 2005. VUT v Brně, Fakulta stavební. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BO02-Prvky%20kovovych%20konstrukci/M02-Spoje%20kovovych%20konstrukci.pdf>
- [26] MAŚLAK, Mariusz, Michał PAZDANOWSKI a Maciej SUCHODOŁA. Influence of geometrical imperfection on critical temperature evaluation for steel corrugated arch sheets exposed to fire. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2019, **262**, 09007. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201926209007
- [27] KALLEROVÁ, Petra. *Požární odolnost šroubového připoje trapézových plechů vystavených požáru*. Praha, 2011. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [28] NORMY, Technické. Německé normy DIN, VDE, VDI - v tištěné i elektronické podobě. <https://www.technickenormy.cz> [online]. [vid. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/nemecke-normy-din/>
- [29] STÝL, ATILA. Atila Shop – Spojovací materiál a kotevní technika. atilashop.cz [online]. [vid. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://www.atilashop.cz/>

-
- [30] ČSN EN 1993-1-8 ED. 2. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčnicků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 731401.
- [31] HORÁČEK, Martin. Prvky kovových konstrukcí. 2019, 32.
- [32] THOMASSON, Per O. The New European Recommendations for the Design of Light Gauge Steel Members. 1986, 17.
- [33] PEKOZ, Teoman. Design of Cold-formed Steel Screw Connections. 1990, 15.
- [34] PHAM, Hong S. a Cristopher D. MOEN. Stiffness and Strength of Single Shear Cold-Formed Steel Screw-Fastened Connections [online]. 2015 [vid. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/55125>
- [35] HUYNH, Minh Toan, Cao Hung PHAM a Gregory J. HANCOCK. Experimental behaviour and modelling of screwed connections of high strength sheet steels in shear. *Thin-Walled Structures* [online]. 2020, **146**, 106357. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2019.106357
- [36] LU, Wei, Zhongcheng MA, Pentti MÄKELÄINEN a Jyri OUTINEN. Behaviour of shear connectors in cold-formed steel sheeting at ambient and elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2012, **61**, Recent research advances on thin-walled structures, 229–238. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2012.04.008
- [37] YAN, Shu a Ben YOUNG. Screwed connections of thin sheet steels at elevated temperatures – Part I: Steady state tests. *Engineering Structures* [online]. 2012, **35**, 234–243. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2011.10.030
- [38] HE, Y. C. a Y. C. WANG. Load–deflection behaviour of thin-walled bolted plates in shear at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2016, **98**, Elevated temperature performance of thin-walled structures, 127–142. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2015.02.027
- [39] HIRASHIMA, Takeo a Hideki UESUGI. Experimental study on shear strength of friction-type high-tension bolted joints at elevated temperature. In: *Proceedings of the 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Daegu*. 2004.
- [40] CHO, YongHyun, Lip H. TEH, Ben YOUNG a Aziz AHMED. Net section tension strength of bolted connections in ultra-high strength sheet steel during and after fire. *Journal of Constructi-onal Steel Research* [online]. 2020, **172**, 106237. ISSN 0143-974X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcsr.2020.106237
- [41] PEDRESCHI, Remo. *The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections*. 2009.
- [42] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 420310.
- [43] *Ansys / Engineering Simulation Software* [online]. [vid. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [44] *ANSYS Help Viewer 2022 R1*. B.m.: ANSYS, Inc, nedatováno.
-

Seznam obrázků

Obrázek 1: Lehký tenkostěnný ocelový rámový skelet v 90. letech a dnes.....	10
Obrázek 2: Konstrukce haly z tenkostěnných profilů [3]	10
Obrázek 3: Profilování – válcovací linka s otáčivými válci.....	11
Obrázek 4: Tažení na uchyceném trnu (1 – průvlak; 2 – trn) [4]	11
Obrázek 5: Ohraňování (1 – pohyblivý razník; 2 – matrice) [5]	12
Obrázek 6: Jednoduché otevřené průřezy [6]	12
Obrázek 7: Složené otevřené průřezy [6].....	12
Obrázek 8: Složené uzavřené průřezy [6]	12
Obrázek 9: Profilované plechy a kazety [6].....	13
Obrázek 10: Typické okrajové výztuhy [6].....	13
Obrázek 11: Typické vnitřní výztuhy [6].....	13
Obrázek 12: Příklady využití trapézového plechu [7].....	14
Obrázek 13: Profilová válcovací linka pro trapézové plechy [8]	14
Obrázek 14: Trojúhelník hoření	15
Obrázek 15: Schéma charakteristického průběhu plně rozvinutého požáru.....	16
Obrázek 16: Teplotní křivky dle Eurokódu 1 [11].....	16
Obrázek 17: Pracovní diagram oceli [13]	18
Obrázek 18: Pracovní diagram oceli – vliv deformačního zpevnění a deformačního stárnutí [13]	18
Obrázek 19: Porovnání pracovního diagramu oceli třídy G 550 [14]	19
Obrázek 20: Grafy závislosti meze kluzu na teplotě [17]	19
Obrázek 21: Vyztužená stěna rovnoměrně tlačená – plný a efektivní průřez [19].....	21
Obrázek 22: Detail plastické deformace vlny trapézového profilu [21].....	21
Obrázek 23: Globální boulení ztužující stěny z trapézových plechů [22].....	22
Obrázek 24: Porovnání modelu MKP a analytických předpovědí s experimentem [25].....	22
Obrázek 25: Deformace průřezu – pohled na spodní pásnici [20]	23
Obrázek 26: Schéma vláknového chování nosníku [20]	23
Obrázek 27: Příklady samovrtných šroubů [29]	24
Obrázek 28: Příklady samořezných závitotvorných šroubů [29]	24
Obrázek 29: Příklady samořezných závitorezných šroubů [29]	24
Obrázek 30: Schémata namáhání šroubového přípoje [31]	24
Obrázek 31: Rozlišení spojů [25]	25
Obrázek 32: Otláčení plechu šroubem – pohled z vrchu [35]	25
Obrázek 33: Šroubové přípoje s plechem tloušťky 1,2 mm při vysokých teplotách [27]	27
Obrázek 34: Porovnání experimentu šroubového přípoje s numerickým modelem [36].....	27
Obrázek 35: Šroubový přípoj při teplotě 594 °C [37]	28
Obrázek 36: Zkušební vzorky.....	30
Obrázek 37: Schéma vzorku šroubového přípoje.....	31
Obrázek 38: Zkušební stroj MTS Elite Qtest 100.....	31

Obrázek 39: Elektrická pec Elsklo OCEP RH1 s ovládací panelem.....	32
Obrázek 40: Termočlánek a jeho umístění	32
Obrázek 41: Schéma zkušební sestavy	33
Obrázek 42: Zkušební sestava.....	33
Obrázek 43: Úprava plechu v místě uchycení do čelistí stroje	34
Obrázek 44: Porušení zkušební vzorku 01-A-020.....	35
Obrázek 45: Porušení otláčením plechu při 20 °C – samořezný šroub.....	36
Obrázek 46: Rozebraný spoj zkoušený při 20 °C – samořezný šroub	36
Obrázek 47: Porušení ustřížením šroubu při 20 °C – samovrtný šroub.....	37
Obrázek 48: Porušení otláčením plechu při 300 °C a 500 °C – samořezný šroub	38
Obrázek 49: Rozebrané přípoje zkoušené při 300 °C a 500 °C – samořezný šroub	38
Obrázek 50: Porušení ustřížením šroubu při 500 °C – samovrtný šroub	39
Obrázek 51: Pracovní diagram vzorků při 20 °C	40
Obrázek 52: Pracovní diagramy vzorků při 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C a 600 °C.....	41
Obrázek 53: Způsob stanovení únosnosti přípoje dle ECCS [41]	41
Obrázek 54: Grafy s průměrnými hodnotami únosnosti a tuhosti šroubových přípojů	42
Obrázek 55: Zkušební vzorky před a po zkoušce	43
Obrázek 56: Zkušební sestava.....	44
Obrázek 57: Pracovní diagramy vzorků.....	45
Obrázek 58: Schéma modelu.....	46
Obrázek 59: Geometrie prvku BEAM188 [44].....	46
Obrázek 60: Geometrie prvku LINK180 [44].....	47
Obrázek 61: Průřezové charakteristiky	47
Obrázek 62: Pracovní diagramy trapézového plechu pro jednotlivé teploty	48
Obrázek 63: Pracovní diagram šroubového přípoje pro jednotlivé teploty	48
Obrázek 64: Graf závislosti svislého průhybu na teplotě.....	50
Obrázek 65: Grafy závislosti vodorovného posunu, síly ve šroubech a napětí v plechu na teplotě	51
Obrázek 66: Graf závislosti svislého průhybu na tuhosti s vyznačenými zónami	52
Obrázek 67: Grafy závislosti vodorovného posunu, síly ve šroubech a napětí v plechu na tuhosti	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty maximální únosnosti a počáteční tuhosti šroubových přípojů.....	42
Tabulka 2: Výsledné hodnoty redukčních součinitelů pro jednotlivé teploty	43
Tabulka 3: Záznam ze zkoušky	44
Tabulka 4: Výsledné hodnoty	45
Tabulka 5: Hodnoty redukčních součinitelů pro jednotlivé teploty [23].....	47
Tabulka 6: Hodnoty redukčních součinitelů tuhosti pro jednotlivé teploty.....	48

Příloha A – Fotodokumentace experimentů



Obrázek A1: Zkušební sestava při běžné teplotě – přední pohled



Obrázek A2: Zkušební sestava při běžné teplotě – boční pohled

Následující fotografie dokumentují průběh zkoušky jednotlivých vzorků až do jeho porušení při běžné teplotě





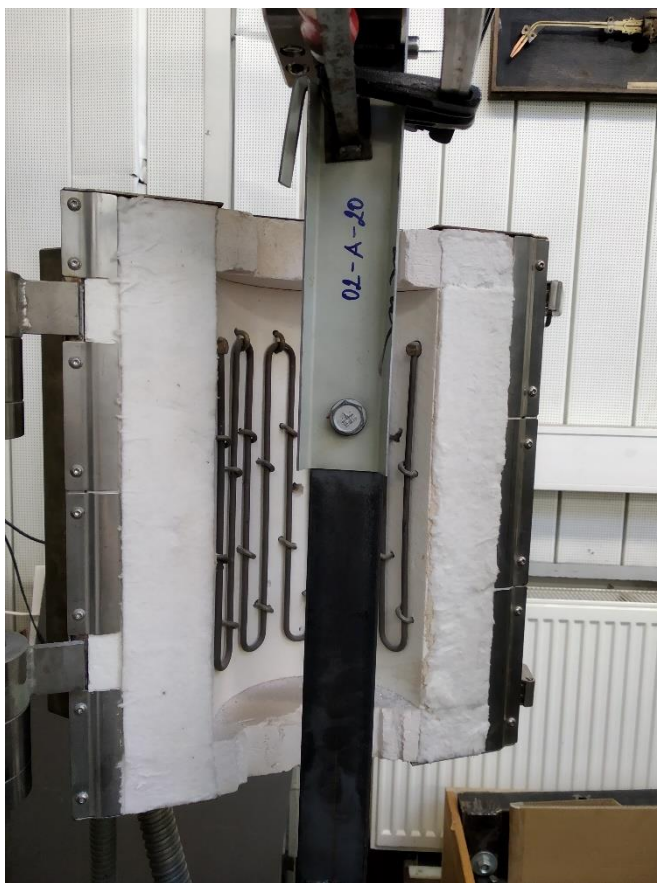








Obrázek A3: Průběh zkoušky vzorku 01-A-20













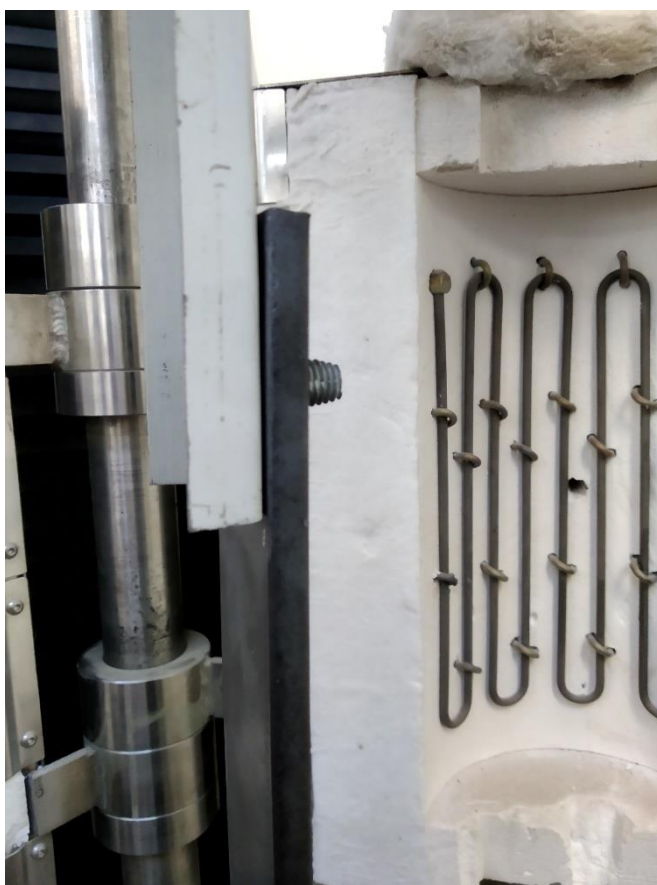


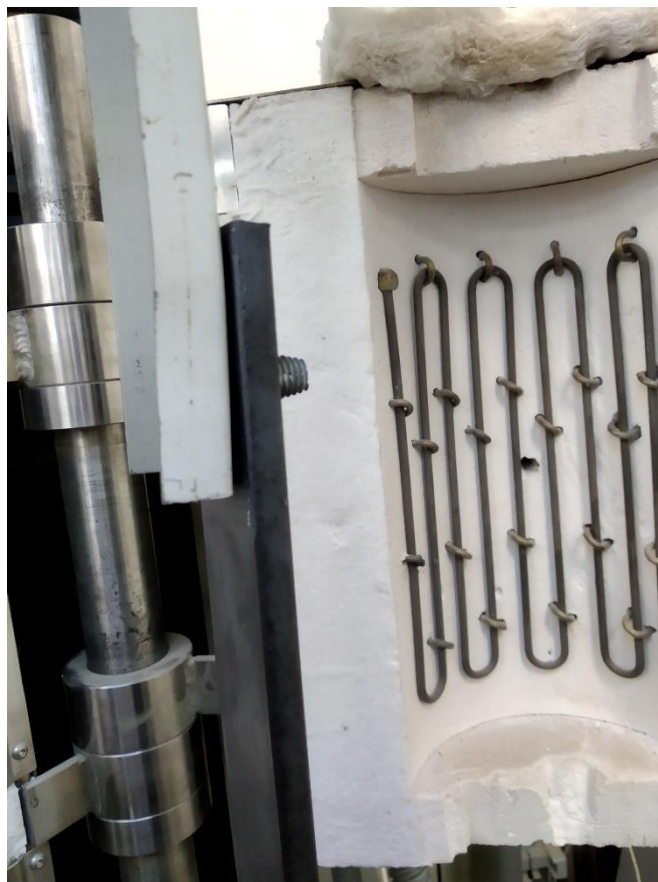


Obrázek A4: Průběh zkoušky vzorku 02-A-20



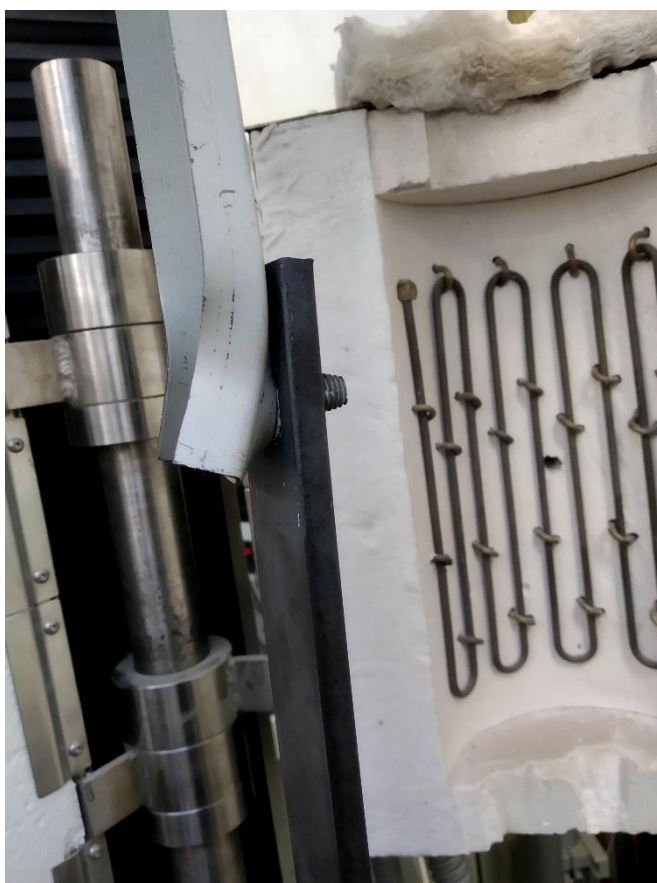


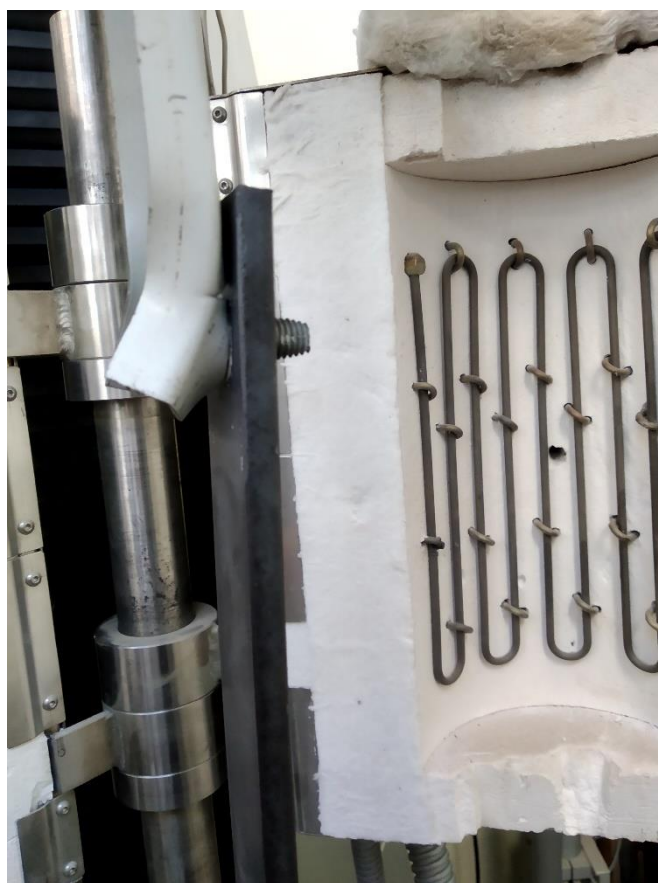






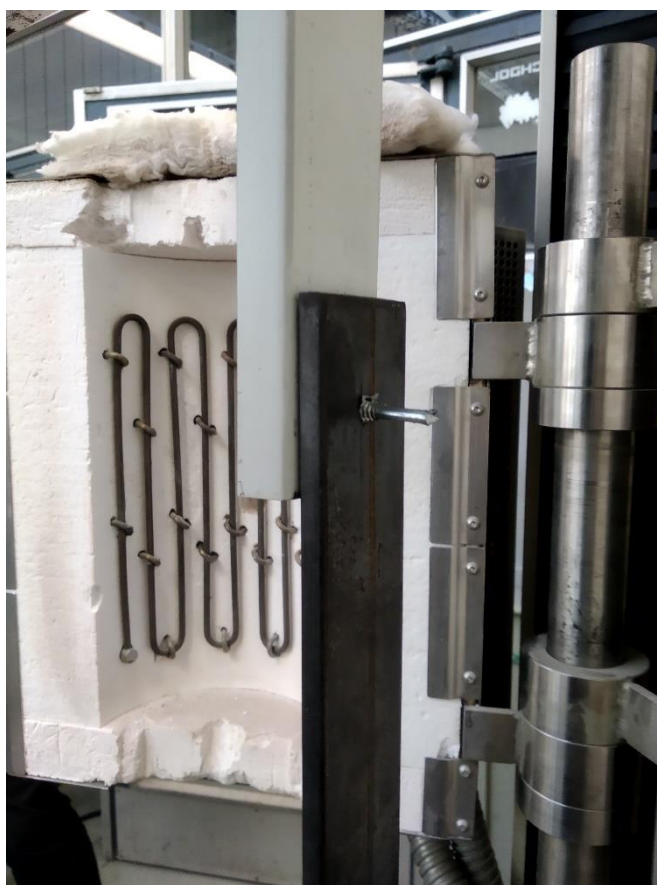


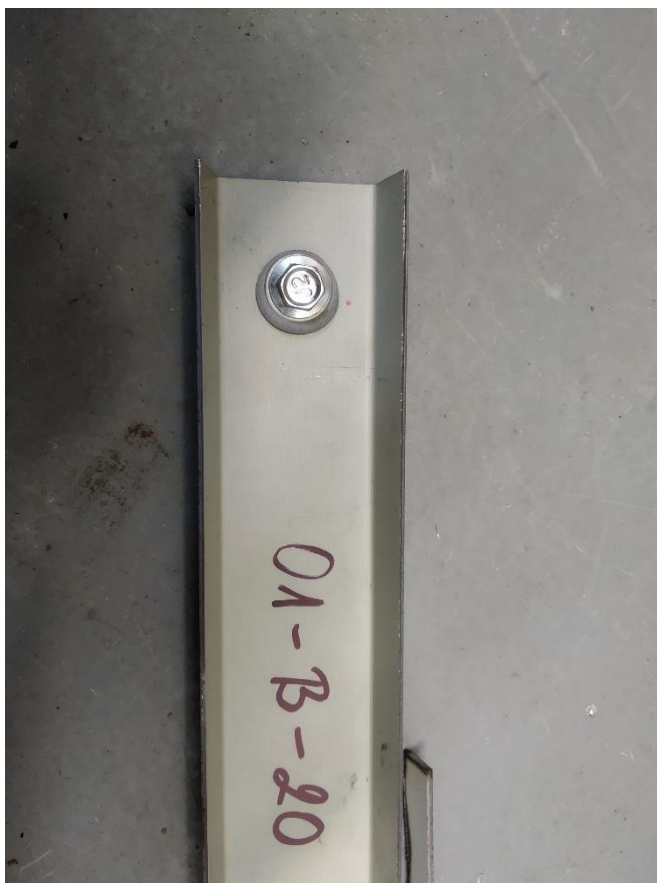




Obrázek A5: Průběh zkoušky vzorku 03-A-20









Obrázek A6: Průběh zkoušky vzorku 01-B-20

Následující fotografie dokumentují průběh zkoušky vzorků za zvýšené teploty.

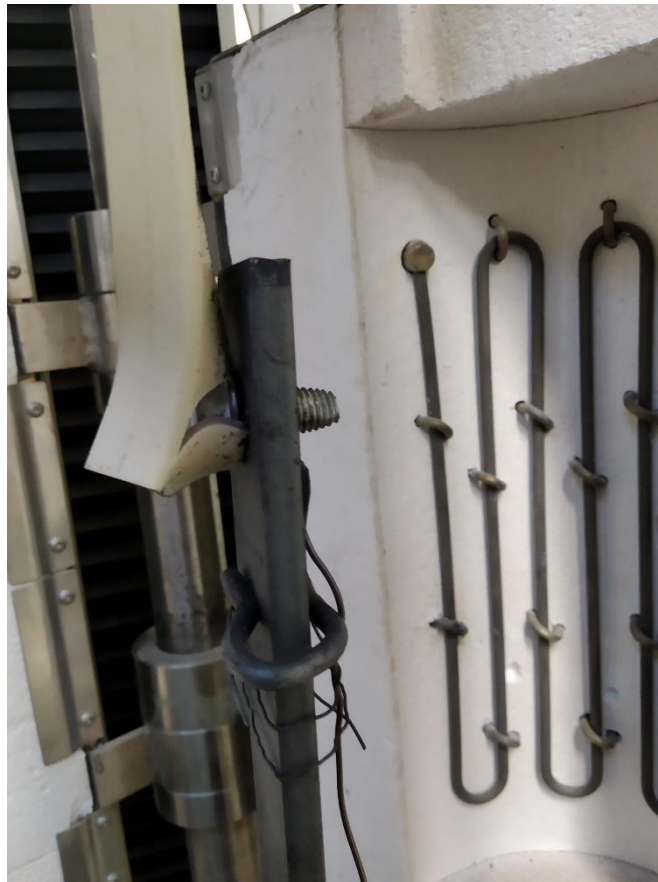


Obrázek A7: Zkušební sestava při zvýšených teplotách – umístěný termočlánek



Obrázek A8: Zkoušený vzorek 01-A-200 po zkoušce





Obrázek A9: Zkušební vzorek 02-A-200 před a po zkoušce





Obrázek A10: Zkušební vzorek 03-A-200 před a po zkoušce





Obrázek A11: Zkušební vzorek 01-A-300 před a po zkoušce





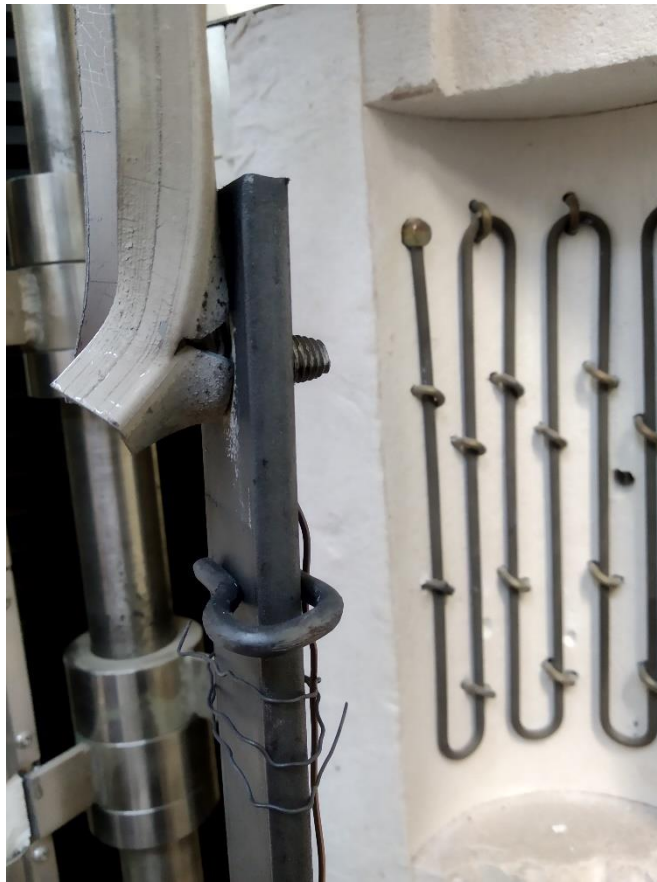
Obrázek A12: Zkušební vzorek 02-A-300 před a po zkoušce





Obrázek A13: Zkušební vzorek 03-A-300 před a po zkoušce





Obrázek A14: Zkušební vzorek 01-A-400 před a po zkoušce





Obrázek A15: Zkušební vzorek 02-A-400





Obrázek A16: Zkušební vzorek 03-A-400 před a po zkoušce





Obrázek A17: Zkušební vzorek 01-A-500 před a po zkoušce





Obrázek A18: Zkušební vzorek 02-A-500 před a po zkoušce





Obrázek A19: Zkušební vzorek 03-A-500 před a po zkoušce

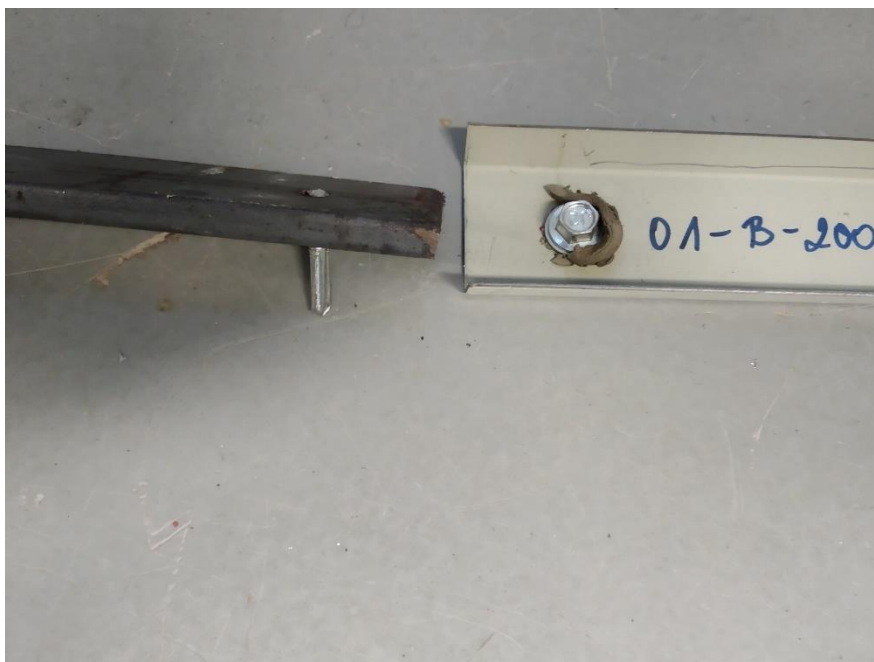




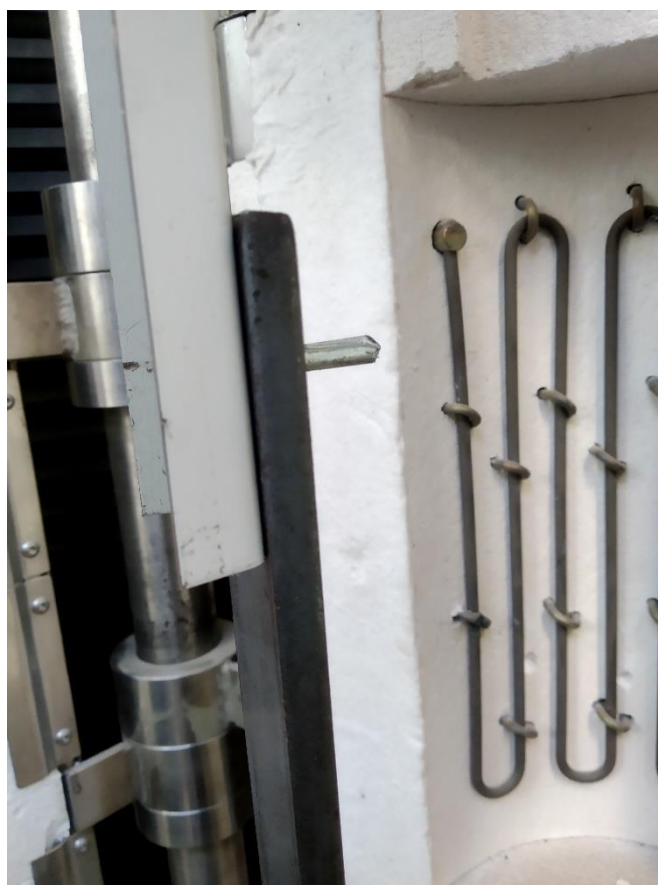
Obrázek A20: Zkušební vzorek 01-A-600 před a po zkoušce







Obrázek A21: Zkušební vzorek 01-B-200 před a po zkoušce











Obrázek A22: Zkušební vzorek 01-B-500 před a po zkoušce

Následující fotografie dokumentují zkušební vzorky po rozmontování.





Obrázek A23: Rozmontovaný zkušební vzorek 03-A-20



Obrázek A24: Rozmontovaný zkušební vzorek 03-A-200



Obrázek A25: Rozmontovaný zkušební vzorek 01-A-300



Obrázek A26: Rozmontovaný zkušební vzorek 03-A-400



Obrázek A27: Rozmontovaný zkušební vzorek 01-A-500



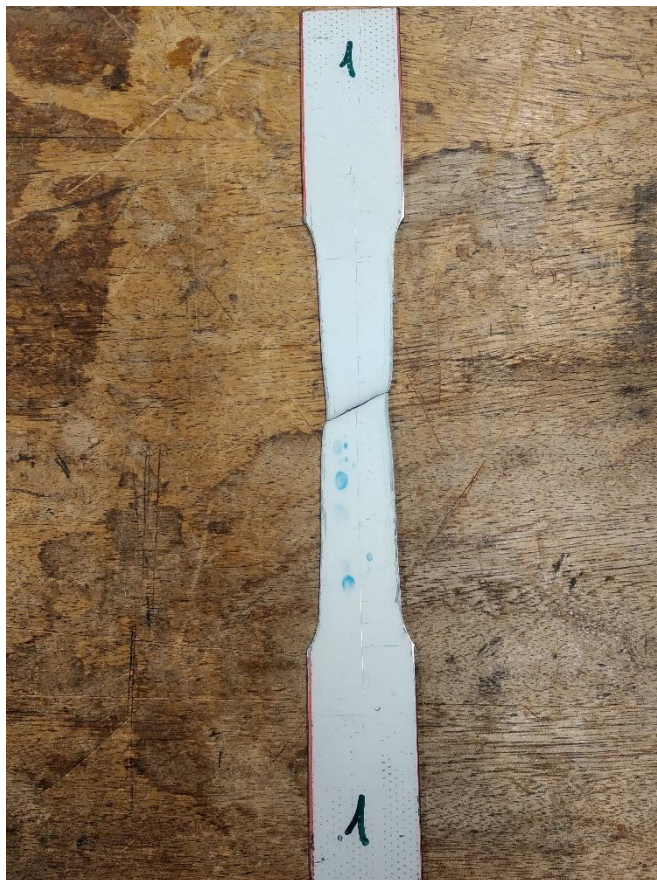
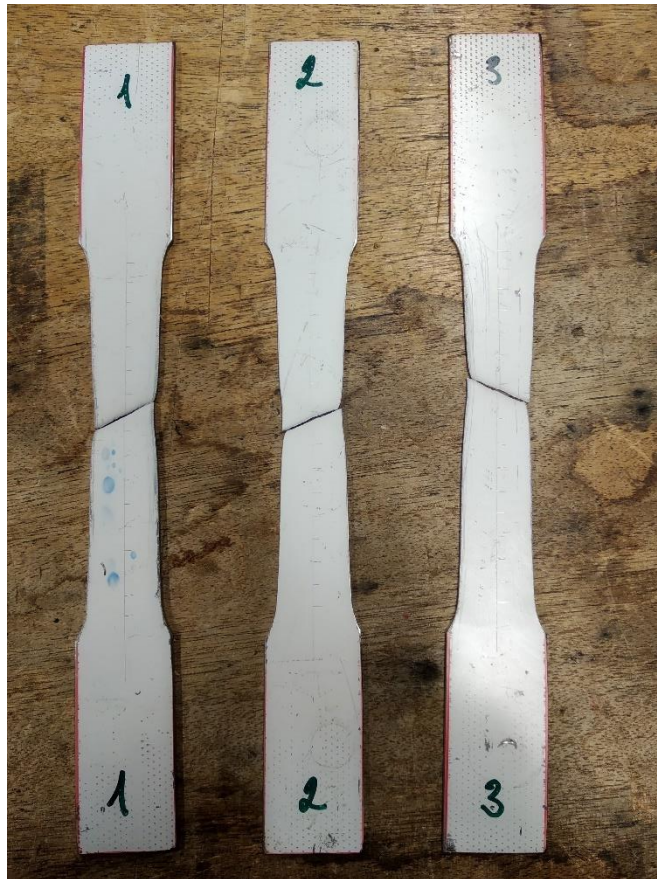
Obrázek A28: Rozmontovaný zkušební vzorek 01-A-600

Následující fotografie dokumentují materiálové zkoušky trapézového plechu.



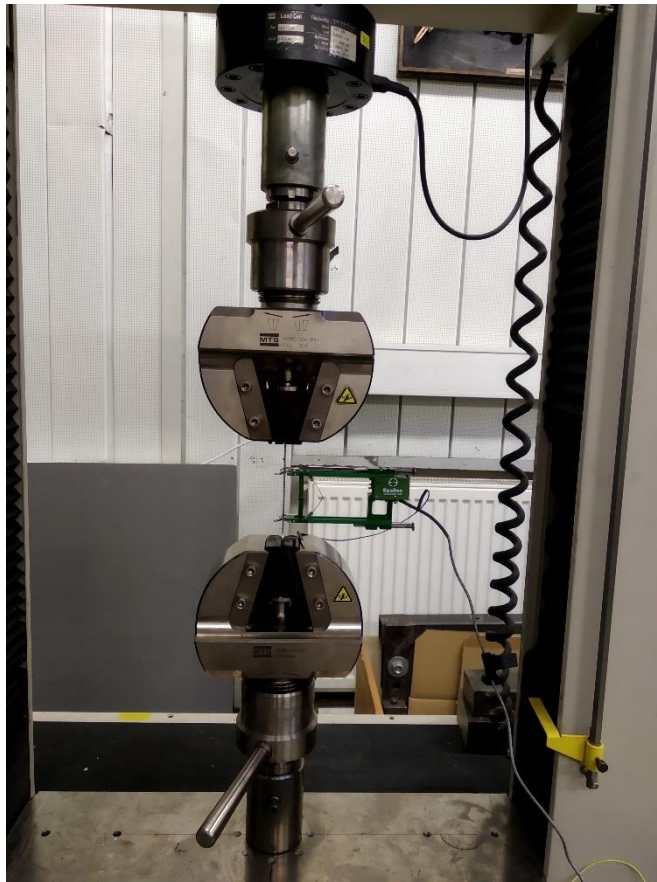


Obrázek A29: Zkušební vzorky před zkouškou





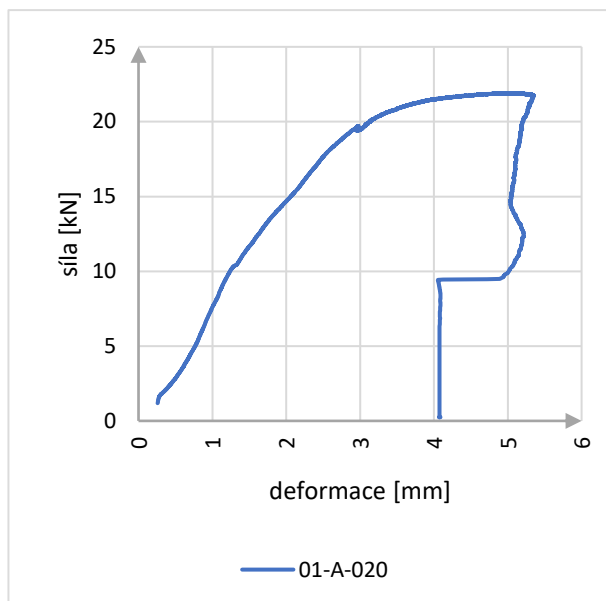
Obrázek A30: Zkušební vzorky po zkoušce



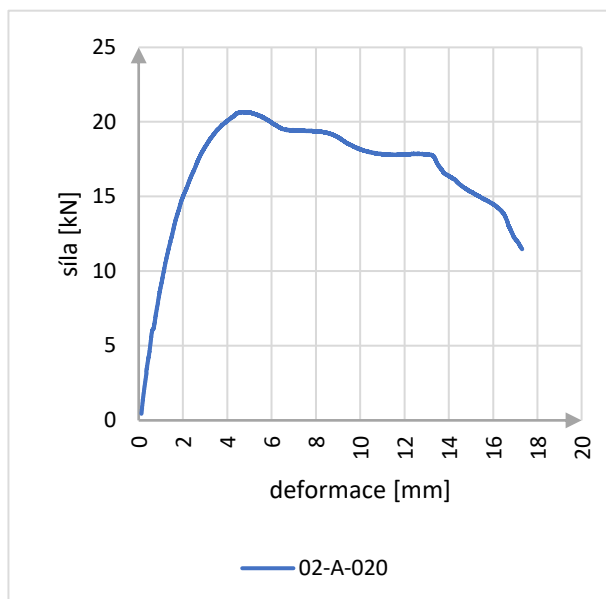
Obrázek A31: Zkušební sestava pro materiálové zkoušky

Příloha B – Pracovní diagramy zkoušených vzorků

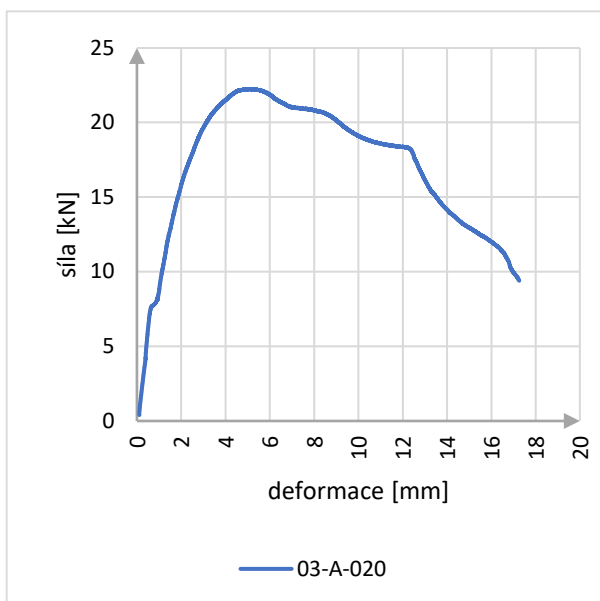
Následující pracovní diagramy jsou přílohou ke zkouškám šroubovým přípojů při 20 °C až 600 °C.



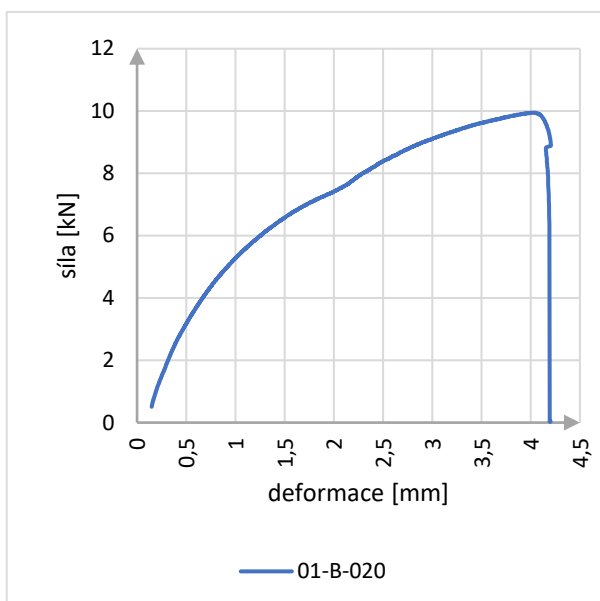
Obrázek B1: Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-A-020



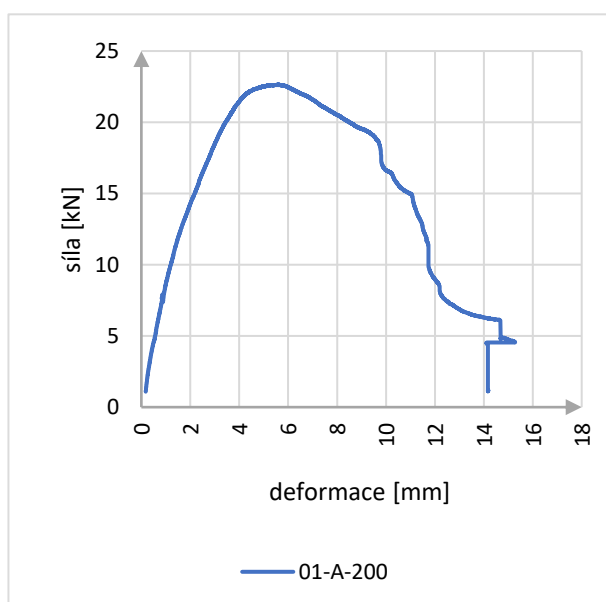
Obrázek B2: Pracovní diagram zkušebního vzorku 02-A-020



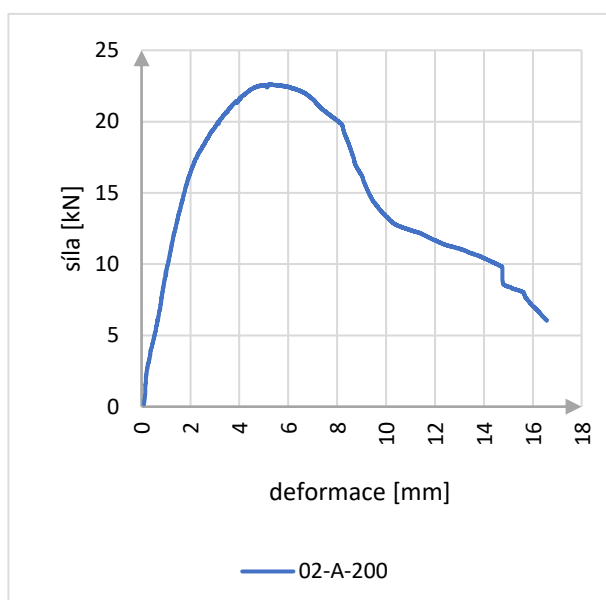
Obrázek B3: Pracovní diagram zkušebního vzorku 03-A-020



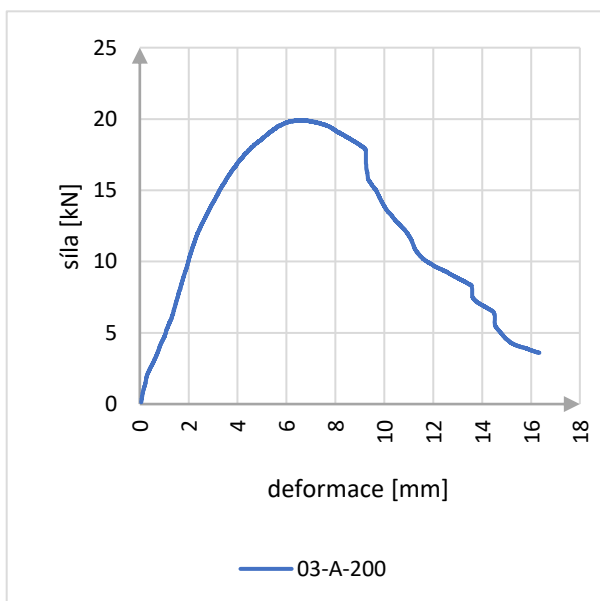
Obrázek B4: Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-B-020



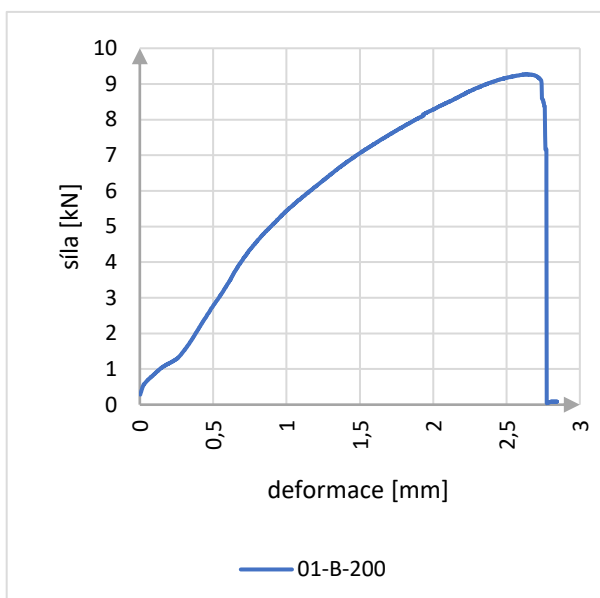
Obrázek B5: Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-A-200



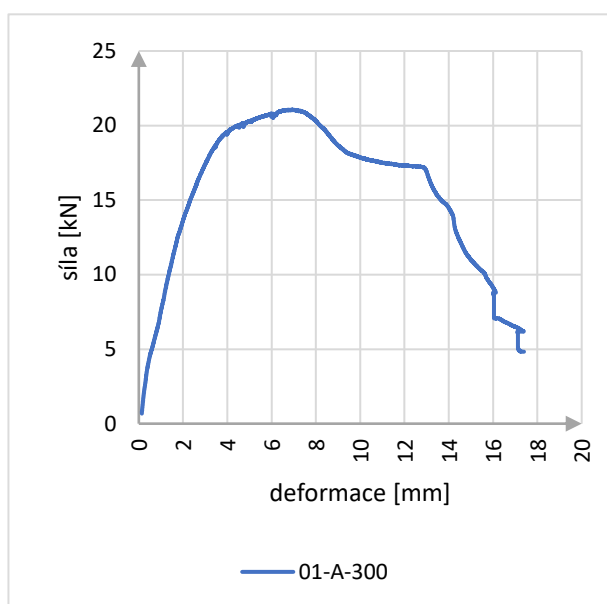
Obrázek B6: Pracovní diagram zkušebního vzorku 02-A-200



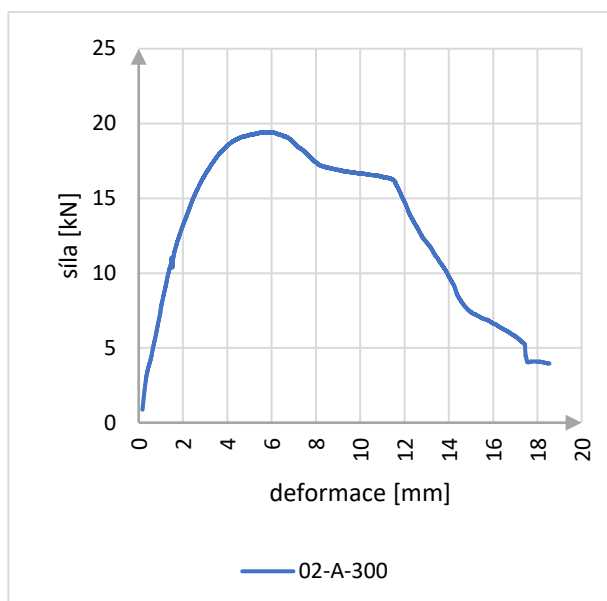
Obrázek B7: Pracovní diagram zkušebního vzorku 03-A-200



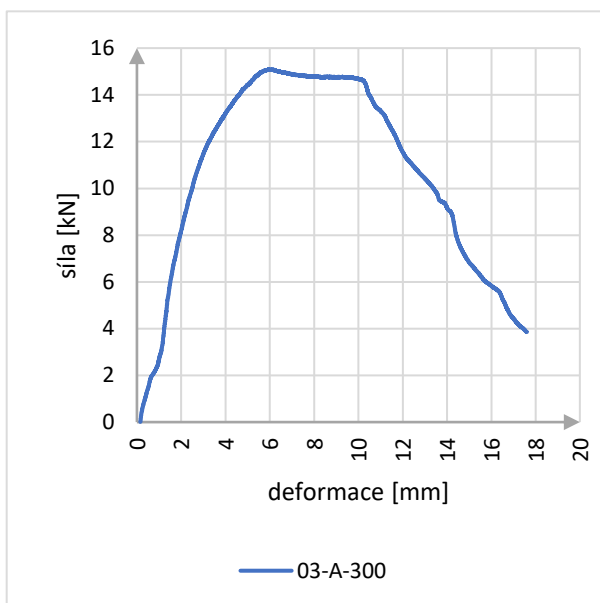
Obrázek B8: Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-B-200



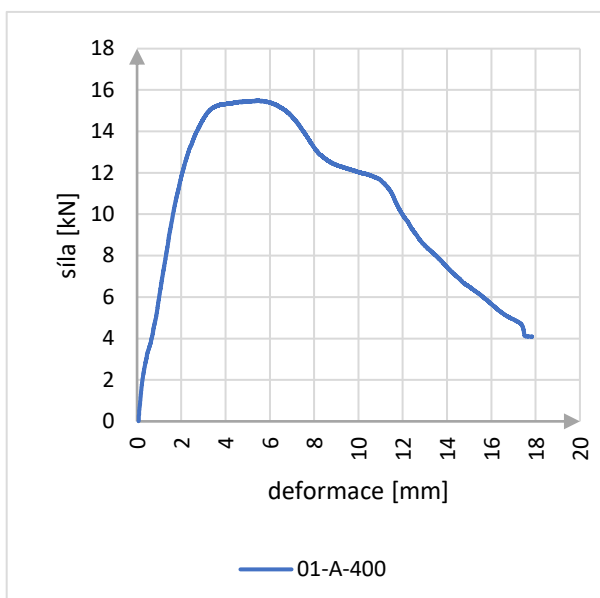
Obrázek B9: Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-A-300



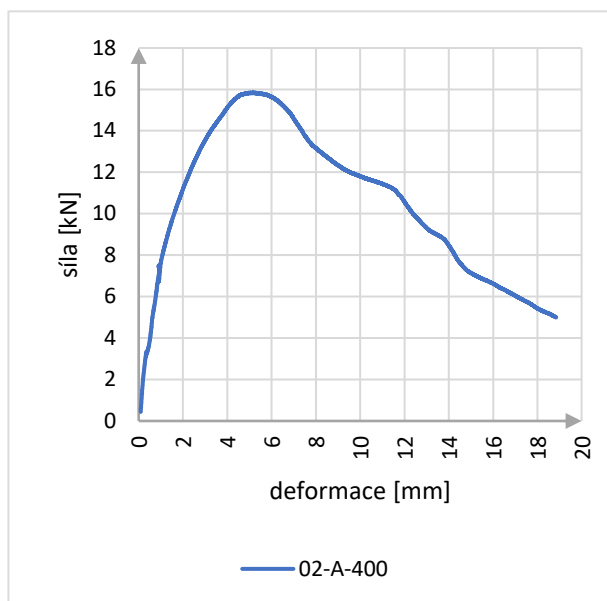
Obrázek B10: Pracovní diagram zkušebního vzorku 02-A-300



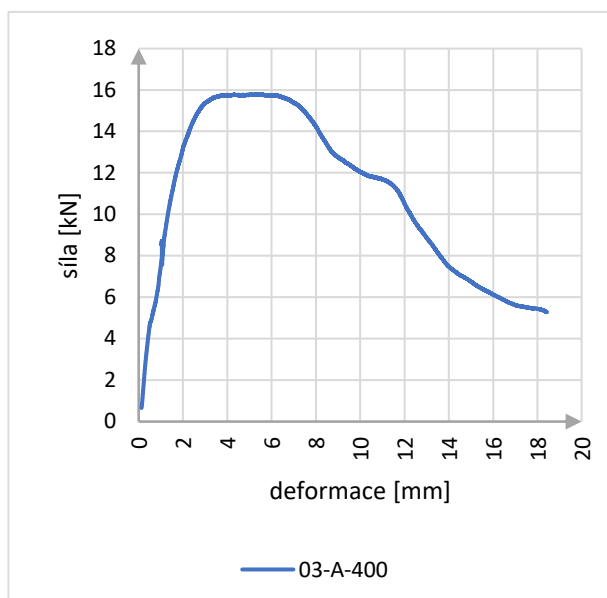
Obrázek B11: Pracovní diagram zkušební vzorky 03-A-300



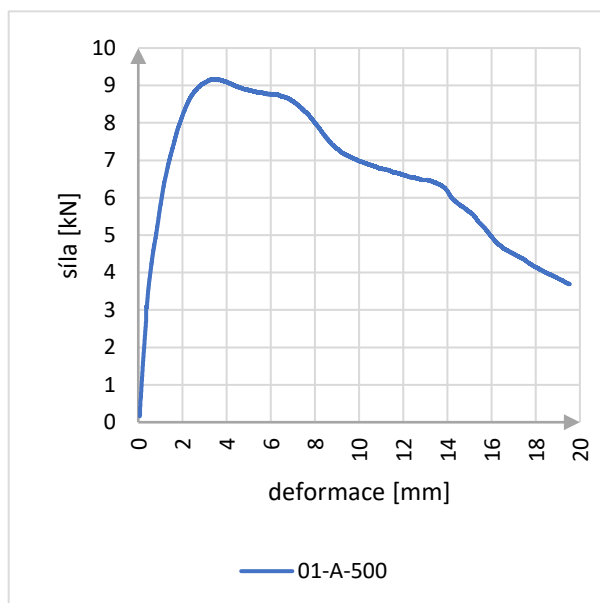
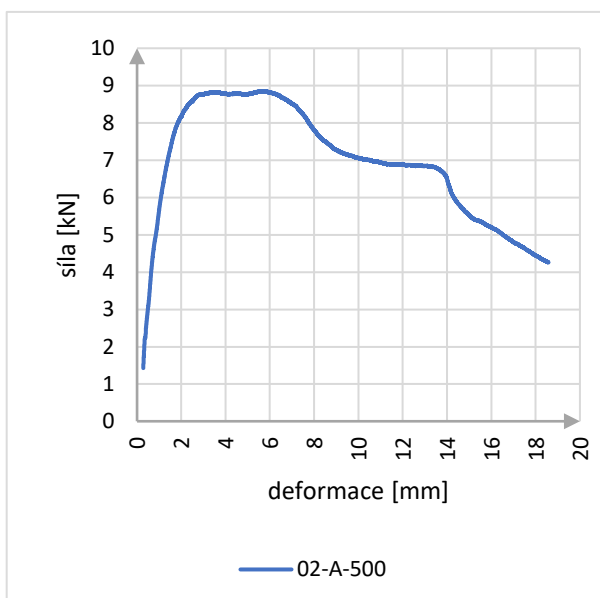
Obrázek B12: Pracovní diagram zkušební vzorky 01-A-400

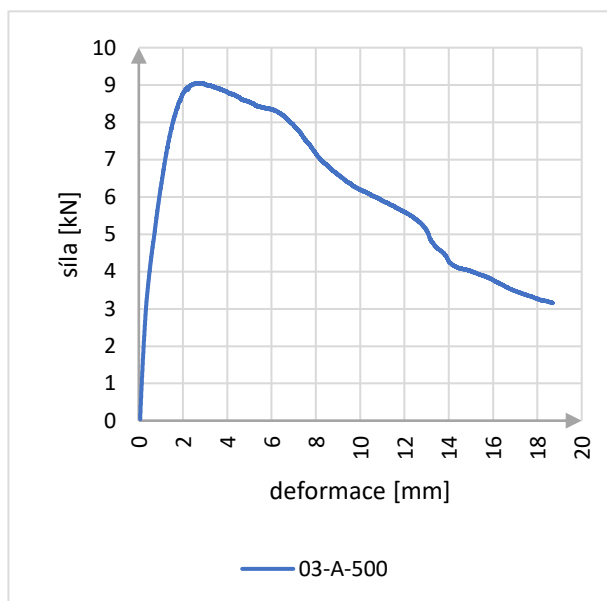


Obrázek B13: Pracovní diagram zkušební vzorku 02-A-400

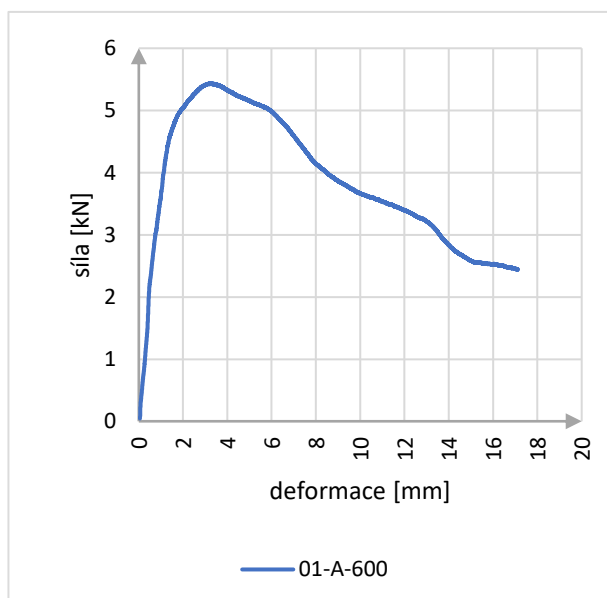


Obrázek B14: Pracovní diagram zkušební vzorku 03-A-400

**Obrázek B15:** Pracovní diagram zkušebního vzorku 01-A-500**Obrázek B16:** Pracovní diagram zkušebního vzorku 02-A-500

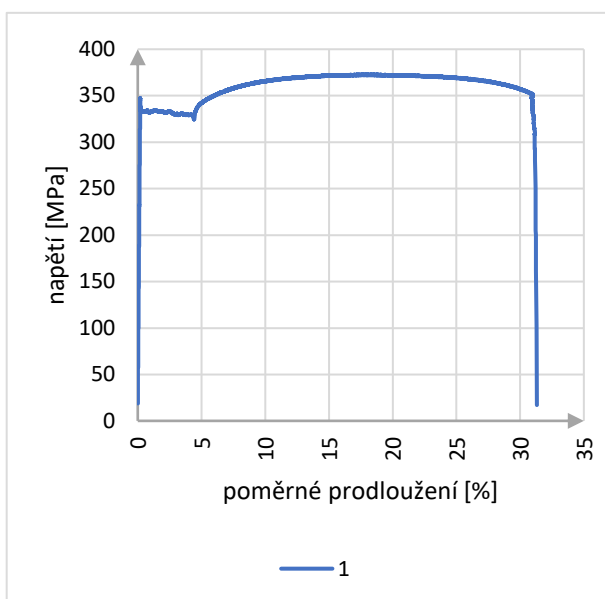


Obrázek B17: Pracovní diagram zkušební vzorku 03-A-500

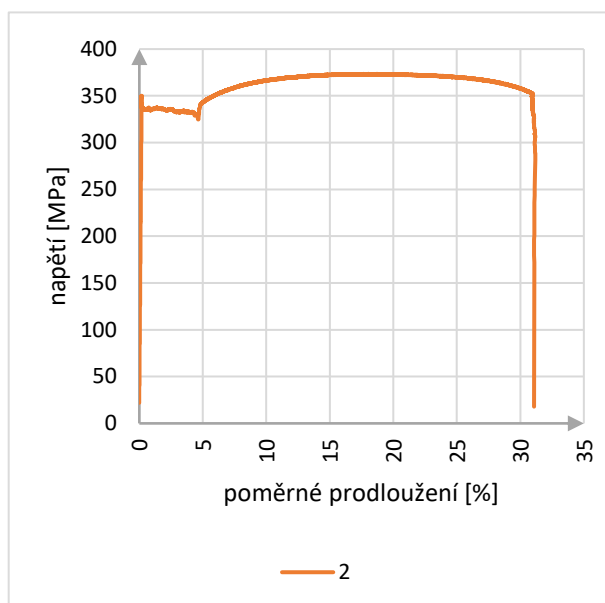


Obrázek B18: Pracovní diagram zkušební vzorku 01-A-600

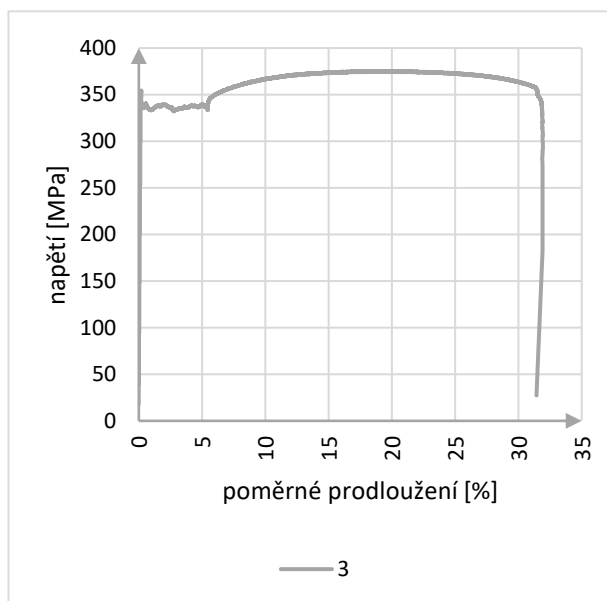
Následující pracovní diagramy jsou přílohou k materiálovým zkouškám trapézového plechu.



Obrázek B19: Pracovní diagram zkušebního vzorku č. 1



Obrázek B20: Pracovní diagram zkušebního vzorku č. 2



Obrázek B21: Pracovní diagram zkušebního vzorku č.3