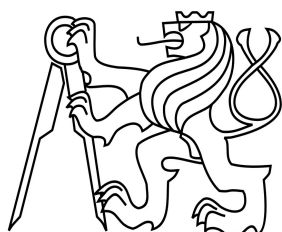


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

**Diplomová práce**

**SPOJ SENDVIČOVÉHO PANELU K NOSNÉ  
OCELOVÉ KONSTRUKCI ZA ZVÝŠENÉ  
TEPLOTY**

CONNECTION OF SANDWICH PANEL TO STEEL BEARING STRUCTURES  
AT ELEVATED TEMPERATURE

Bc. Josef Hruška

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

2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hruška Jméno: Josef Osobní číslo: 423080

Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb (Q)

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Spoj sendvičového panelu k nosné ocelové konstrukci za zvýšené teploty

Název diplomové práce anglicky: Connection of sandwich panel to steel bearing structures at elevated temperature

Pokyny pro vypracování:

1. Shrnutí problematiky
2. Experimentální studie
3. Numerický model
4. Vyhodnocení a shrnutí

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D., od 1.12.2018 prof. Ing. František Wald, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2019

*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 nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

8/10/2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Kamily Cábové, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat paní Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnovala.

---

# Obsah

<b>Abstrakt</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Shrnutí problematiky</b> .....	<b>2</b>
2.1 Aktuálnost problému.....	2
2.2 Současný stav řešeného problému .....	2
2.2.1 Chování spojů za požáru .....	2
2.2.2 Typ pláště .....	8
2.2.3 Spoj pláště a ocelové konstrukce .....	10
<b>3 Experimentální studie</b> .....	<b>12</b>
3.1 Popis experimentu.....	12
3.2 Příprava vzorku .....	15
3.3 Pilotní zkouška vzorku.....	16
3.4 Skutečné provedení .....	16
3.5 Vstupní a měřené hodnoty .....	18
3.6 Výsledky .....	21
3.6.1 Testy za běžné teploty - 20 °C .....	30
3.6.2 Testy za zvýšené teploty - 300 °C.....	32
3.6.3 Testy za zvýšené teploty - 450 °C.....	37
3.6.4 Testy za zvýšené teploty - 600 °C.....	41
3.7 Porovnání výsledků.....	46
3.7.1 Vliv teploty při stejné tloušťce panelu a plechu.....	46
3.7.2 Vlivu tloušťky panelu při shodné teplotě a shodné tloušťce plechu.....	48
3.7.3 Vliv tloušťky plechu při shodné tloušťce panelu a shodné teplotě.....	50
3.8 Tuhost přípoje .....	52
<b>4 Numerický model</b> .....	<b>54</b>
4.1 Popis modelu.....	54
4.1.1 Materiálové vlastnosti .....	54
4.1.2 Geometrie.....	60
4.1.3 Kontakty.....	61
4.1.4 Výpočetní síť.....	62
4.1.5 Zatížení.....	63
4.2 Výsledky .....	65
4.2.1 Teplotní analýza.....	65
4.2.2 Mechanické chování .....	66
<b>5 Validace numerického modelu</b> .....	<b>73</b>
5.1 Teplotní analýza.....	73
5.2 Mechanická analýza.....	74
<b>6 Závěr</b> .....	<b>76</b>

---

<b>Příloha 1 – Původní schéma experimentu .....</b>	<b>78</b>
<b>Příloha 2 – Schéma experimentu po úpravě.....</b>	<b>79</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>80</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>85</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>86</b>

---

## Abstrakt

Práce se zabývá problematikou chování spojů sendvičových panelů k nosné ocelové konstrukci při požáru. V úvodu je řešena aktuálnost problematiky a jsou stanoveny cíle práce. Dále se práce zabývá tuzemskými a zahraničními studii, které řeší problematiku spojů za požáru. Tyto studie uvádějí, jak se spoj chová za zvýšené teploty, jaké vznikají vnitřní síly, výhody a nevýhody různých spojovacích prostředků a vliv různých typů opláštění. V práci je rovněž popsán experiment, který by měl chování spoje při požáru ověřit. Kapitola o experimentální studii specifikuje typ vybraných sendvičových panelů, šrouby, ocelové plechy, způsob zahřívání vzorků a další. Dále se práce zabývá výsledky experimentů, které jsou i mezi sebou porovnávány. Práce se také zaměřuje na zkonstruování numerického modelu a následně jeho validaci. Závěrem jsou shrnuty veškeré poznatky z přípravy experimentu, průběhu experimentů, výsledků experimentů, porovnání výsledků experimentů, modelování přípoje, výsledků numerického modelu a validace.

### Klíčová slova

Sendvičový panel; ocelová nosná konstrukce; šroub; požár; šroubový spoj; zkoušky ve střihu; ocelové opláštění za požáru; požární odolnost; numerický model; ANSYS Workbench; tuhost přípoje

## Abstract

The thesis deals with a topic of behavior of a connection of sandwich panels to a steel bearing structure during fire. In the introduction the thesis discusses the topicality and objectives of the thesis. Further, the thesis deals with research studies, which solve the problem of joints in a fire. These studies indicate how the connection behaves at elevated temperatures, what internal forces originate when loaded, advantages and disadvantages of various fasteners and the influence of different types of cladding. The thesis also describes a prepared experiment, which should verify the joint behavior during fire. The chapter about an experimental study specifies type of the chosen sandwich panels, screws, steel plates, a way of heating of the samples and so on. Further, the thesis deals with the results of the experiment, which are also compared with each other. The thesis also focuses on the construction of the numerical model and its validation. In conclusion, all the knowledge from the preparation of the experiment, experimental progress, experimental results, comparison of experimental results, modeling of the connection, numerical model results and validation are summarized.

### Keywords

Sandwich panel; steel bearing structure; connection; screw; fastener; fire; screwed connection; shear tests; steel sheeting in fire; fire resistance; numerical model; ANSYS Workbench; stiffness of the connection

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

$m$	Plošná hmotnost	$\text{kg/m}^2$
$U$	Součinitel přestupu tepla	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$T$	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
$t$	Čas	min
$K_t$	Tuhost přípoje	$\text{kN}/\text{mm}$
$F_{\text{uit}}$	Síla potřebná k výpočtu $K_t$	$\text{kN}$
$\Delta d_{(\text{ult})}$	Protažení odpovídající síle $F_{\text{uit}}$	mm

### Zkratky

MKP	Metoda konečných prvků
PIR	Polyisokyanurát
ČVUT	České vysoké učení technické
ČR	Česká Republika
RFCS	Research Fund for Coal and Steel
TCx	Termočlánek číslo x



# 1 Úvod

Diplomová práce je zaměřena na přípoj sendvičových panelů a jeho chování za zvýšené teploty. Již mnohé studie prokázaly, že lze při návrhu ocelových konstrukcí dosáhnout značné úspory, a to s využitím plášťových systémů – sendvičových panelů a trapézových plechů, kdy jsou tyto systémy využity ke stabilizaci celé konstrukce namísto běžných konstrukčních řešení. Tyto studie bohužel opomíjejí chování takto využitých plášťových systémů za požáru. Míra stabilizace nosné konstrukce pomocí plášťových systémů je dána tuhostí přípojů plášťových systémů k nosné konstrukci a tuhostí samotných sendvičových panelů. Práce je zaměřena na problematiku přípojů sendvičových panelů na ocelovou nosnou konstrukci za zvýšené teploty. Výsledky by měly vést k detailním poznatkům, jak se přípoje za zvýšené teploty chovají. Na základě těchto nových poznatků by v navazujících pracích mohl být modifikován způsob navrhování těchto konstrukcí, čímž by se zvýšilo efektivní využití ocelových konstrukcí.

Cílem práce je stanovit příspěvek přípoje plášťového systému ke stabilizaci ocelové konstrukce za požáru. A to pomocí výsledků tuhosti přípoje získaných zkouškami a pomocí validovaných pokročilých výpočetních modelů.

## 2 Shrnutí problematiky

### 2.1 Aktuálnost problému

Nedávné studie prokázaly, že lze při návrhu ocelových konstrukcí dosáhnout značné úspory, a to s využitím plášťových systémů – sendvičových panelů a trapézových plechů. Tyto plášťové systémy mohou být využity ke stabilizaci celé konstrukce namísto běžných konstrukčních řešení, jako jsou dodatečné ztužující ocelové prvky. Příspěvek plášťových systémů ke stabilizaci konstrukce byl prokázán při běžné teplotě. Studie bohužel opomíjí chování takto využitých plášťových systémů za požáru. Tato práce je proto zaměřena na využití této inovace i při požáru, což by mělo vést k hospodárnějšímu navrhování ocelových konstrukcí. V současnosti je toto téma řešeno v rámci evropského projektu RFCS v konzorciu několika evropských univerzit a výrobců ocelových plášťových systémů. I v ČR je toto téma považováno za velice aktuální a přínosné pro zvýšení konkurenceschopnosti ocelových konstrukcí vůči jiným materiálům. V České republice se na výzkumu s fakultou stavební podílí přední výrobce plášťových systémů Kingspan a.s. a Ruukki s.r.o.

### 2.2 Současný stav řešeného problému

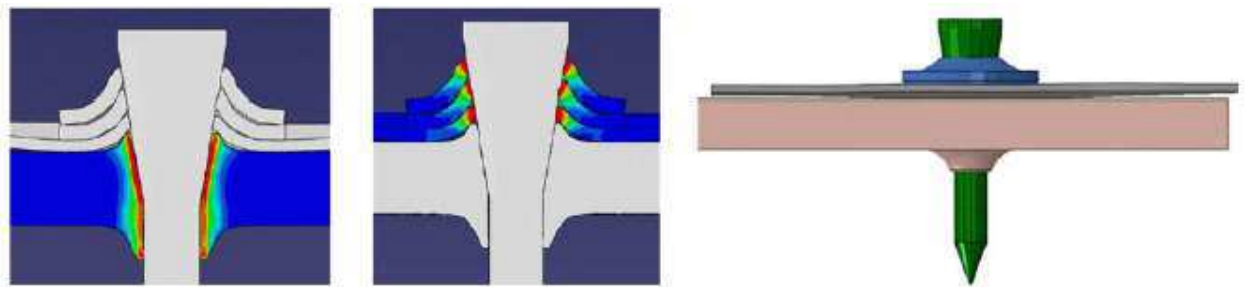
V současné době se požární odolnost konstrukcí určuje pomocí zkoušek v pecích, kdy je zkoušena vždy jen malá část konstrukce či samostatný prvek. Tento způsob určení požární odolnosti ale opomíjí spolupůsobení zatíženého prvku s celou konstrukcí, a proto je považován za příliš konzervativní. V nedávno vydaných studiích Národní institut pro normalizaci a technologii (NIST) v USA a Britská společnost The Institution of Structural Engineers (IStructE) doporučují vypracování metodiky pro navrhování konstrukcí založené na spolupůsobení celé konstrukce. V současné metodice navrhování konstrukcí mají systémy opláštění pouze funkci izolační a samonosnou. Avšak případy dvou požárů halových objektů v Německu z roku 2016, kde nedošlo ke kolapsu konstrukce právě díky chování sendvičových panelů, prokazují důležitou funkci opláštění při stabilizaci ocelových konstrukcí. Tyto požáry a studie ze zahraničí potvrzují aktuálnost a potřebnost řešení této problematiky.

Stabilizace ocelové konstrukce pláštěm je dána ohybovou tuhostí pláště a chováním přípoje. Tato práce se zaměřuje na chování přípoje za požáru. Vliv tuhosti pláště není v této práci řešen.

#### 2.2.1 Chování spojů za požáru

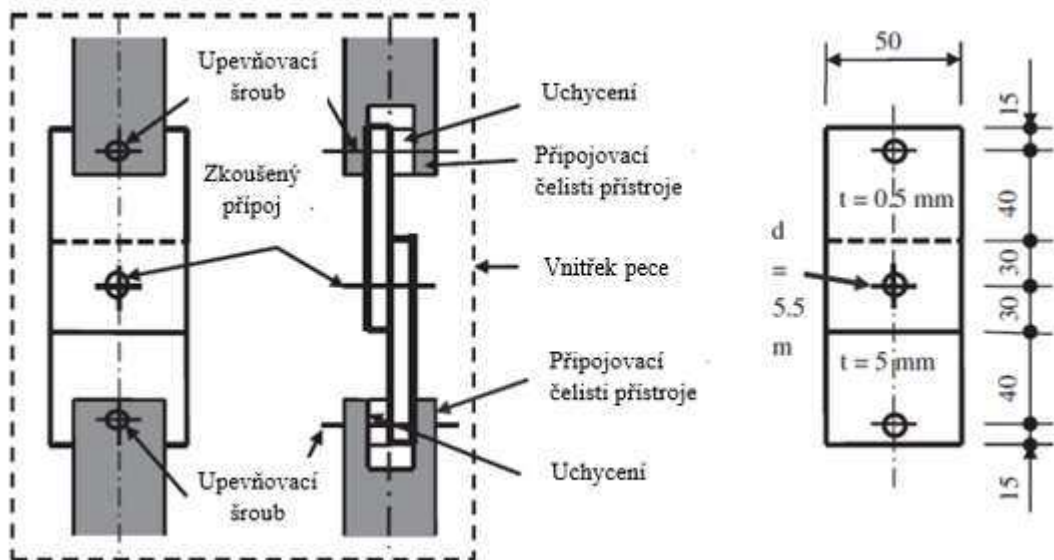
Střešní plášť ze studeně tvarovaných plechů může být přímo spojen s horním povrchem ocelového vazníku samořeznými šrouby nebo nastřelovacími hřebíky. Ve studii [1] je zkoumáno chování spojů s nastřelovacími hřebíky a samořeznými šrouby namáhaných smykem jak MKP analýzou, tak i zkouškami za běžné a za zvýšené teploty. Tato studie popisuje čtyři komponenty ovlivňující únosnost spoje. Jedná se o sílu mezi plechem sendvičového panelu a dřikem šroubu,

třecí sílu mezi podložkou a plechem panelu, třecí sílu mezi plechem panelu a pásnicí nosné konstrukce a únosnost při natočení stojiny. Všechny tyto komponenty jsou ve studii identifikovány a kvantifikovány. Studie s hřebíkovými spojovacími prostředky ukazuje, že velký vliv má interakční síla působící mezi podložkou, hřebíkem, plechem a pásnicí. Deformace materiálu v okolí hlavy hřebíku viz obr. 1 způsobené během nastřelení hřebíku, které způsobuje, že materiál pásnice je vlivem zatlačování hřebíku vytlačován nahoru, má významný pozitivní vliv na únosnost spoje.[1]



obr. 1 Deformace materiálu v okolí hřebíku [1]

Ocelové profily tvářené za studena můžou být přímo spojeny s horním povrchem ocelového střešního nosníku pomocí samořezných šroubů. Pro tento typ přípoje za běžné teploty nelze použít pravidla v normě EN 1993-1-8 ani EN 1993-1-3. Pro navrhování šroubových spojů za zvýšené teploty nejsou k dispozici žádná pravidla ani v normě EN 1993-1-2. Studie [2] popisuje 3D model konečných prvků pro jednotřížné smykem namáhané šroubové spoje pomocí softwaru ABAQUS. Na obr. 2 je uvedeno schéma spoje.



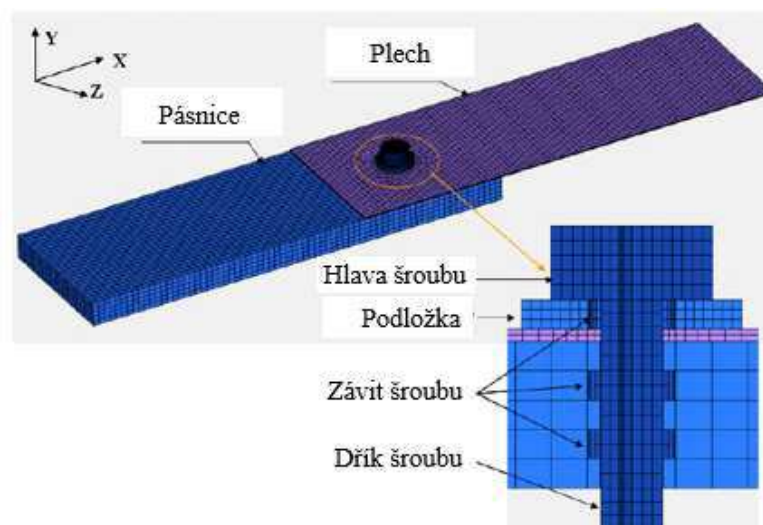
obr. 2 Schéma spoje [2]

Po ověření modelu pomocí zkoušek lze model ze studie [2] použít k předpovědi únosnosti spoje při běžné teplotě i při zvýšené teplotě. Dále jsou ve studii zkoumány účinky roztečí na únosnost spoje. Na základě analýzy výsledků jsou navrženy revidované návrhové rovnice

pro předpověď únosnosti tohoto spoje. Návrhové únosnosti jsou zde validovány pomocí zkoušek a pro výsledky MKP analýz je podle postupu uvedeného v EN 1990 odvozen dílčí bezpečnostní součinitel. [2]

V dokumentu [3] je zkoumáno smykové napětí šroubových spojovacích prostředků, které jsou obvykle používány pro lehké sendvičové panely. Studie uvádí možnost použití obkladových panelů v budovách s ocelovou nosnou konstrukcí jako membránové konstrukce. Dále uvádí požadavky na spojovací prostředky a výsledky experimentálních analýz z několika typů přípoju namáhaných monotónně a cyklicky. Jsou zde navrženy matematické modely, které předpovídají chování spojů jak při monotónním, tak cyklickém namáhání. Matematické modely jsou validovány pomocí experimentů.[3]

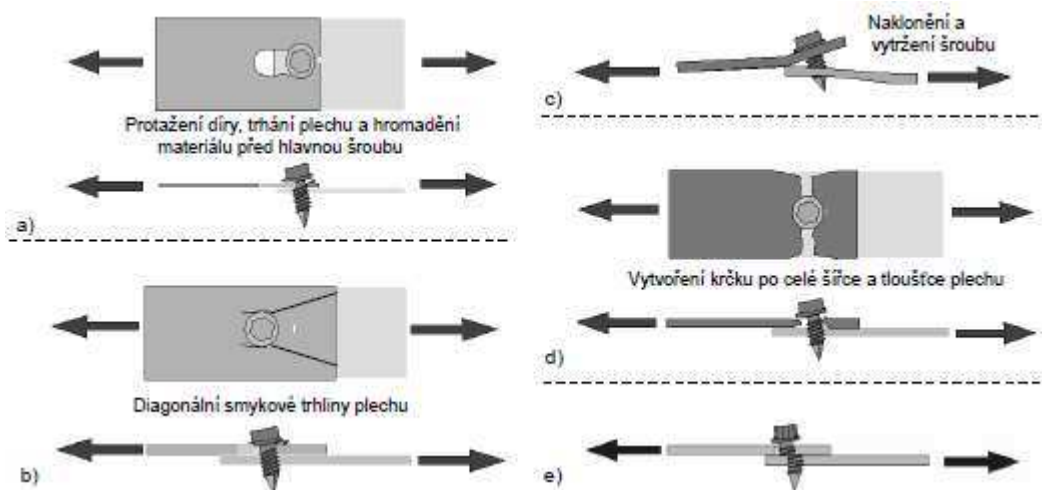
Ocelová nosná konstrukce je používána v izolačních střešních krytinách pro průmyslové budovy s nízkými šikmými střechami. Ocelové plechové profily jsou vyráběny tvářením za studena z tenkých ocelových pásů a jsou připevněny k podkladovým vaznicím nebo běžněji přímo k ocelovým vazníkům pomocí samořezných nebo samovrtných šroubů. Chování opláštění je důležité při požáru, zvláště když je opláštění uloženo jako spojitý nosník a tahové síly jsou v místě podpor, kde jsou umístěny šroubové spojovací prostředky. Studie [4] uvádí 3D MKP model, který je vytvořen v softwaru ABAQUS viz obr. 3. Model simuluje jednostržný šroubový spoj, který spojuje tenký plech s tlustým plechem při namáhání ve stříhu i při vysokých teplotách. Tento model zahrnuje materiálovou nelinearitu, velkou deformaci a kontaktní chování. Model spoje je analyzován pro elastickou a plastickou fázi až po selhání. Analýza odhaduje, že módy přerušení přípoje za běžné i za zvýšené teploty vznikají při překročení únosnosti tenčího plechu. Únosnost spoje závisí na tření mezi podložkou a tenčí vrstvou, přímým uložením hlavy šroubu na tenčí plech a únosností tenčí vrstvy ve vzpěru. Degradace materiálu při zvýšené teplotě dále snižuje pevnost a tuhost spojů. Tento model přípoje může být používán jako model komponent při analýze chování ocelového pláště za zvýšené teploty, který je vysoce nelineární, aby se ušetřila výpočetní doba.[4]



obr. 3 Model jednostržného šroubového spoje [4]

V disertační práci [5] je popsán vliv trapézového plechu na ztužení ocelové konstrukce za zvýšené teploty. Trapézový plech, který se chová jako kloubově připevněný nosník k podporující konstrukci, ztrácí s nárůstem teploty ohybovou tuhost. Způsob uložení nosníku v podporách má zásadní vliv na chování celého nosníku. Jestliže je nosník připevněn k podpůrné konstrukci pomocí šroubů s dostatečnou tuhostí a únosností a podpůrná konstrukce je schopna přenášet tahové síly, dojde vlivem vláknového působení k přenosu zatížení tahem. Běžně se jako mechanické spojovací prostředky trapézových plechů ke konstrukci z tenkostěnných nebo válcovaných profilů používají šrouby bez matic, tzn. samovrtné nebo samořezné šrouby. [5]

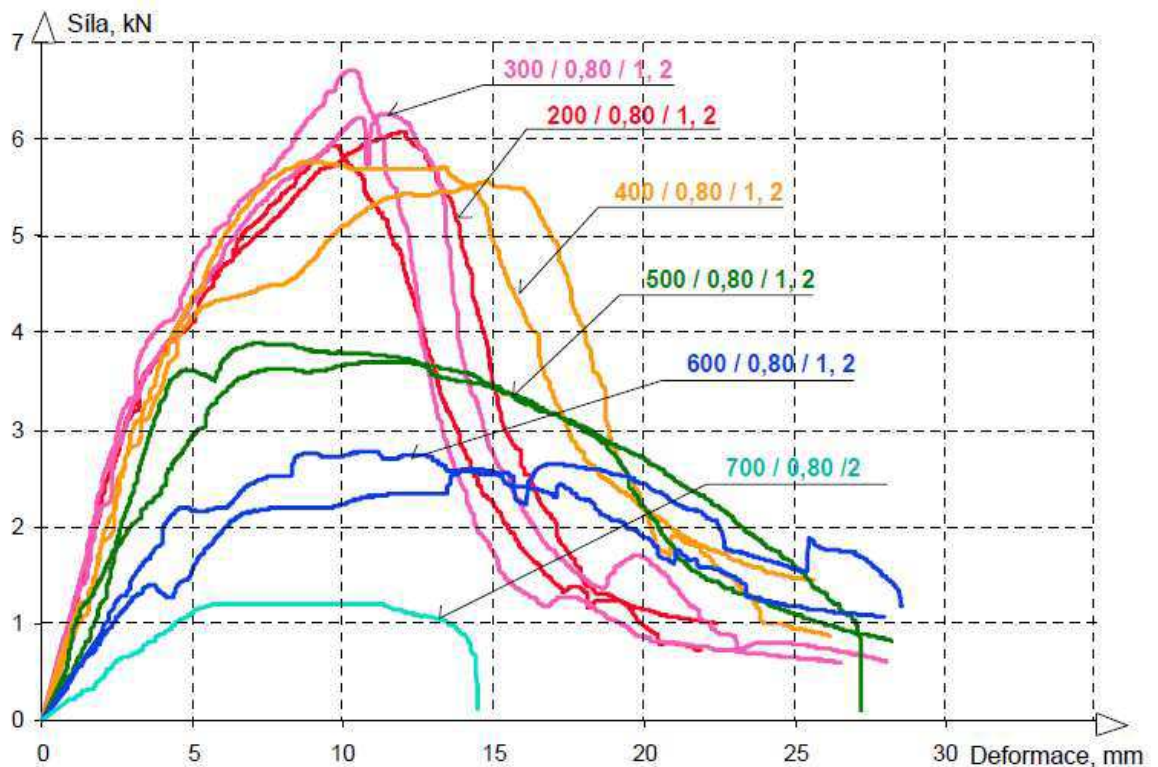
Přípoje trapézových plechů se zpravidla zkouší jako jednostranný přeplátovaný spoj s jednou řadou šroubů. Tento spoj je jednostřížný, nesymetrický přípoj namáhaný tahem, přičemž spojovací prostředky jsou namáhány smykem. O způsobu porušení rozhoduje průměr šroubu, tloušťka a únosnost spojovaných prvků a poloha krajního šroubu vzhledem k okrajům spojovaných prvků. [5] Typickým porušením přípoje v oslabeném průřezu plechu je vytvoření krčku přes celou šířku i tloušťku spojovaného plechu viz obr. 4. [5]



obr. 4 Porušení přípoje [5]

a) otlacením plechu, b) otlacením plechu s vytvořením dvou smykových trhlin, c) zešikmením a vytržením šroubu, d) v oslabeném průřezu plechu, e) stříhem šroubu [5]

Výsledky zkoušek šroubových spojů prokazují, že chování přípoje, tzn. tvar pracovního diagramu (viz obr. 5) a způsob porušení, se s rostoucí teplotou prakticky nemění. S rostoucí teplotou klesá únosnost přípoje. Při teplotách kolem 500 °C je únosnost přípoje o 40 % nižší než únosnost stejného přípoje za běžné teploty. S dalším nárůstem teploty je pokles únosnosti výraznější. Při teplotách 600 °C, resp. 700 °C činí únosnost přípoje 40 %, resp. 20 % únosnosti přípoje za běžné teploty. [5] Na obr. 5 jsou uvedeny křivky pracovního diagramu spojů při různých teplotách. Z popisu vzorků v grafech lze vyčíst, při jaké teplotě byla zkouška provedena, jaká byla tloušťka trapézového plechu a zda se jedná o první nebo druhý vzorek při dané teplotě.



obr. 5 Pracovní diagramy šroubových přípojů pro tloušťku plechu 0,8 mm [5]

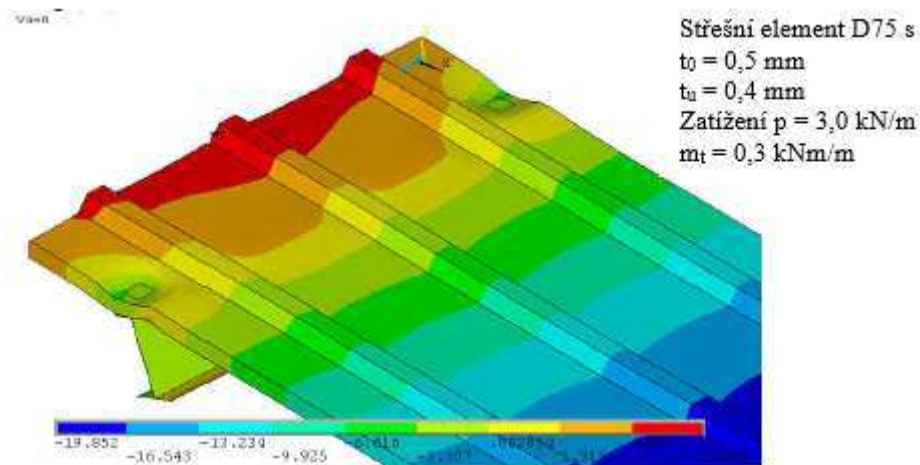
Ve studii [6] jsou prezentovány výsledky experimentálního a numerického výzkumu teplotního vývoje v sendvičových panelech sestávajících z ocelových plechů a PIR jádra. Požární experimenty byly provedeny na jednotlivých PIR sendvičových panelech a PIR sendvičových panelech s přípojem. Výsledky požárních zkoušek byly použity k ověření modelu tepelné vodivosti závislé na teplotě pro PIR pomocí numerického modelování přestupu tepla metodou MKP s využitím softwaru ABAQUS. Výsledky požárních zkoušek ukazují, že teplota na spoji na neexponované straně sendvičového panelu je zpočátku nižší než teplota na panelu. Avšak při vysokých teplotách ablace<sup>1</sup> PIR jádra způsobuje velké mezery do 25 mm. Kvůli vysokému prostupu tepla v mezeře se teplota spoje výrazně zvýší oproti teplotě panelu. Výsledek numerické parametrické studie naznačuje, že jestliže může být spára u spoje regulována tak, aby nebyla větší než 5 mm, teplota spoje a panelu na neexponovaném povrchu by byla podobná. Mezery u spojů o velikosti 10 mm nebo větší by měly za následek teploty spojů mnohem vyšší než teploty panelů a snížily by izolační výkon systému sendvičových panelů o méně než 60 min, i když panel může dosahovat mnohem delší standardní požární odolnosti. [6]

Studie [7] představuje komplexní výzkumné výsledky o chování šroubového přípoje jedné nebo více desek ve stříhu za běžné a zvýšené teploty. V této studii bylo provedeno celkem 18 testů, které poskytly podrobné experimentální informace o chování přípoje s jedním šroubem. Byla provedena řada parametrických studií s využitím MKP metody v programu ABAQUS,

<sup>1</sup> Ablace – obecně odtavování neboli vypařování hmoty.

pro zkoumání účinků různých konstrukčních parametrů na chování propojených desek, včetně počáteční tuhosti, maximální únosnosti a deformace při maximální únosnosti. MKP modely byly ověřeny porovnáním simulovaných výsledků s výsledky z testů provedenými autorem v rámci výzkumu a výsledky ostatních výzkumných pracovníků. Na základě výsledků parametrických studií byl navržen analytický model, který předpovídá vztah zatížení-deformace šroubových spojů desky při stříhu. Bylo zjištěno, že tuhost a maximální únosnost lze přesně předpovědět pomocí stávajících metod. Hlavním přínosem analytické studie bylo vytvoření jednoduché metody výpočtu maximální deformace desky (prodloužení díry šroubu) při maximální únosnosti, založené na navrhování rozložení napětí podle různých režimů selhání. Tato metoda byla ověřena na základě výsledků parametrických studií a bylo zjištěno, že jsou vhodné pro aplikace za běžné a zvýšené teploty. [7]

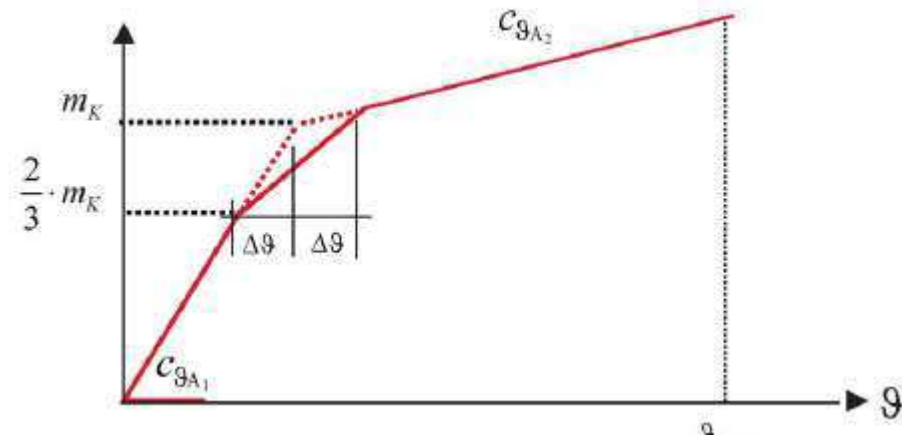
Ve studii [8] je zkoumán stabilizační efekt sendvičových prvků a trapézových profilů na torzní namáhání nosníků viz obr. 6.



obr. 6 Deformovaný tvar z MKP modelu [8]

Na jedné straně se zkoumá pevnost ve smyku oboustranně namontovaných ocelových trapézových profilů s ohledem na omezení možnosti bočního vychylování a na druhé straně vliv sendvičových prvků vzhledem k obstrukci stojiny nosníku ohrožujícího stabilitu. Obě stabilizační pravidla, která jsou v rámci studie vyvíjena, jsou stanovována pomocí experimentálních výzkumů a číselných výpočtů. Přístupy umožňují přiblížit stabilizační efekt při dimenzování. Statistické vyhodnocení experimentálních výsledků a doprovodné parametrické studie s ověřeným MKP modelem ukazují, že rotačně stabilizační účinek sendvičových prvků s jádrovými vrstvami z polyuretanové tvrdé pěny nebo minerálních vláken lze zjistit trilineární idealizací krouťícího momentu viz obr. 7. U různých typů profilů a sendvičových prvků ve všech běžných implementacích a aplikacích jsou uvedeny jednoduché vzorce, s nimiž lze určit parametry popisující vztah krouťícího momentu. Z tohoto vztahu může být tuhost spojení určena v závislosti na zatížení nosníku jako sečná tuhost a při ní určena torzní tuhost potřebná pro posouzení ohybové únosnosti. Stabilizační účinek dvojstranně namontovaných tahových polí z ocelových trapézových profilů je určen na základě parametrických výpočtů MKP, který byl dříve ověřen porovnáním

s analytickými hodnotami a experimentálními zkouškami. Číselné výpočty berou v úvahu pružnost spojovacích prostředků na příčné hraně, jakož i jejich počet a konstrukci podélných spojů. [8]

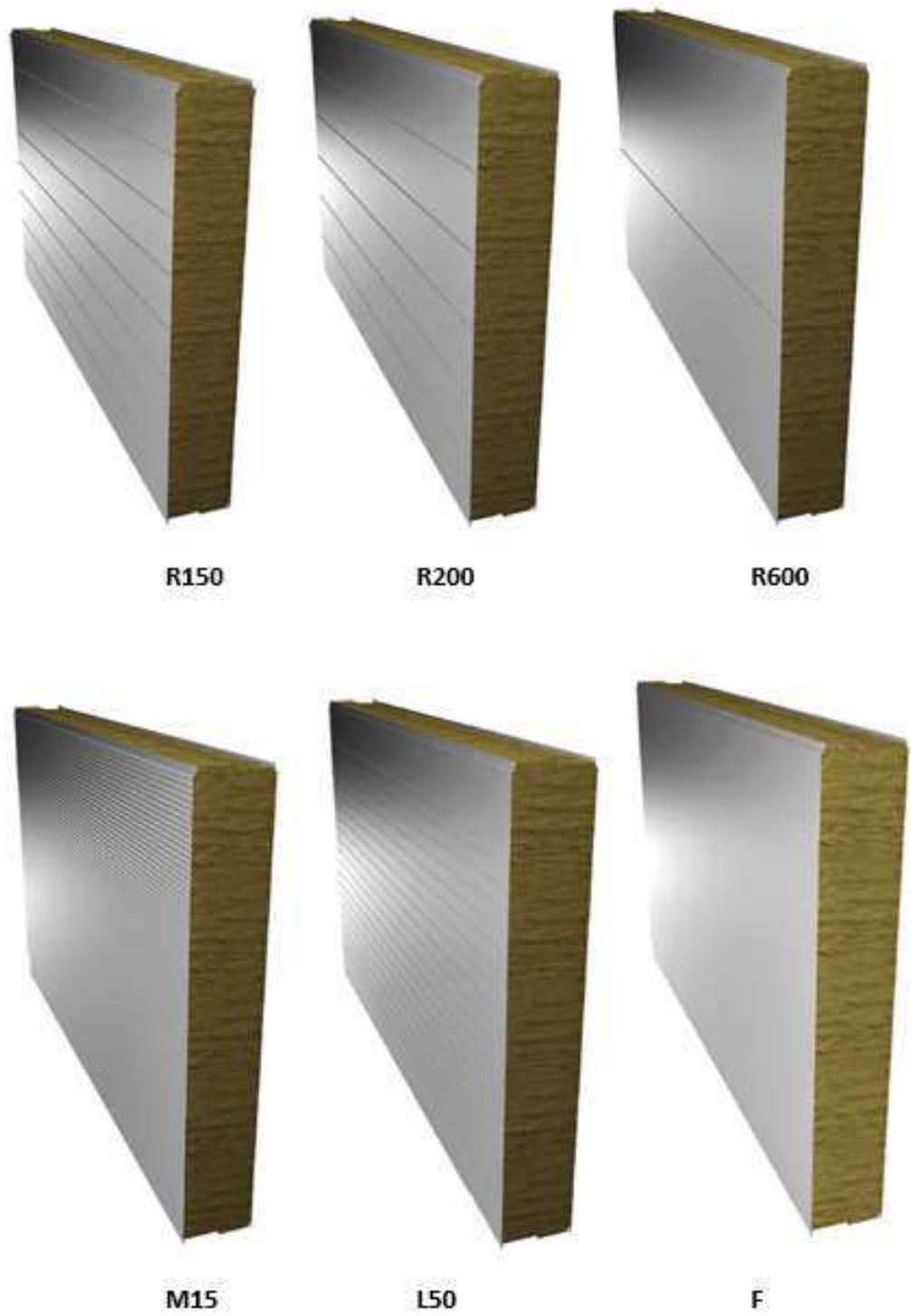


obr. 7 Trilineární idealizace kroutícího momentu [8]

### 2.2.2 Typ pláště

Pro účely této práce bude posuzováno chování spoje sendvičového panelu s výplní z minerální vaty, viz obr. 8 [9]. Panel se skládá z 2x profilovaného plechu tloušťky 0,5 mm na vnitřní straně a 0,6 mm na vnější straně a minerální vaty tloušťky 230 mm pro SPA230E a 100 mm pro SPA100E. Jedná se o stěnový panel pro obvodové stěny. Technické charakteristiky: pro SPA100E  $U = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $m = 19 \text{ kg/m}^2$ , pro SPA230E  $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $m = 30,4 \text{ kg/m}^2$ . Panely se mezi sebou spojují pomocí šroubů, průměr a délka šroubu se liší podle tloušťky panelu a tloušťky konstrukce, na kterou se panely připojují. Profilované plechy (povrchy) se vyrábí v 6 alternativních typech, které mohou být různé pro vnitřní a vnější povrch. Jsou to profily typu R150, R200, R600, M15, L50 a F viz obr. 8. Obložení panelů je z pozinkovaného plechu s barevným povlakem.

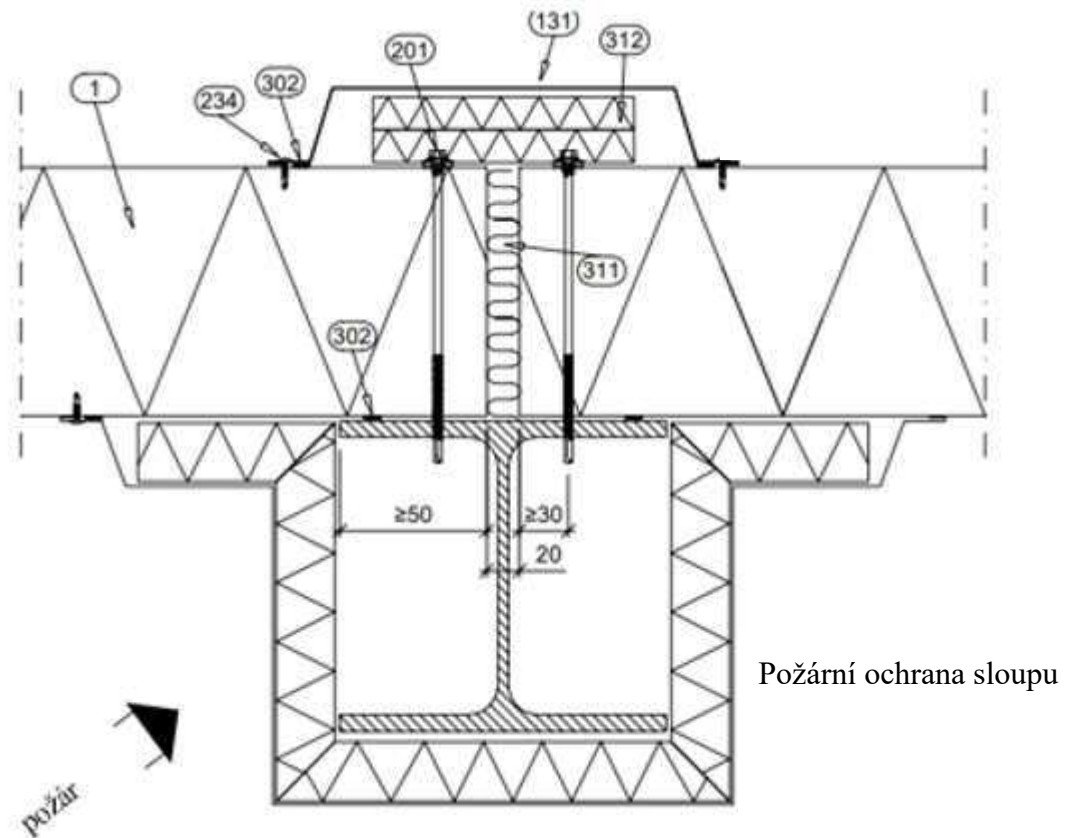




*obr. 8 Ruukki: Stěnový panel SPA230E a SPA100E a typy povrchových úprav [9]*

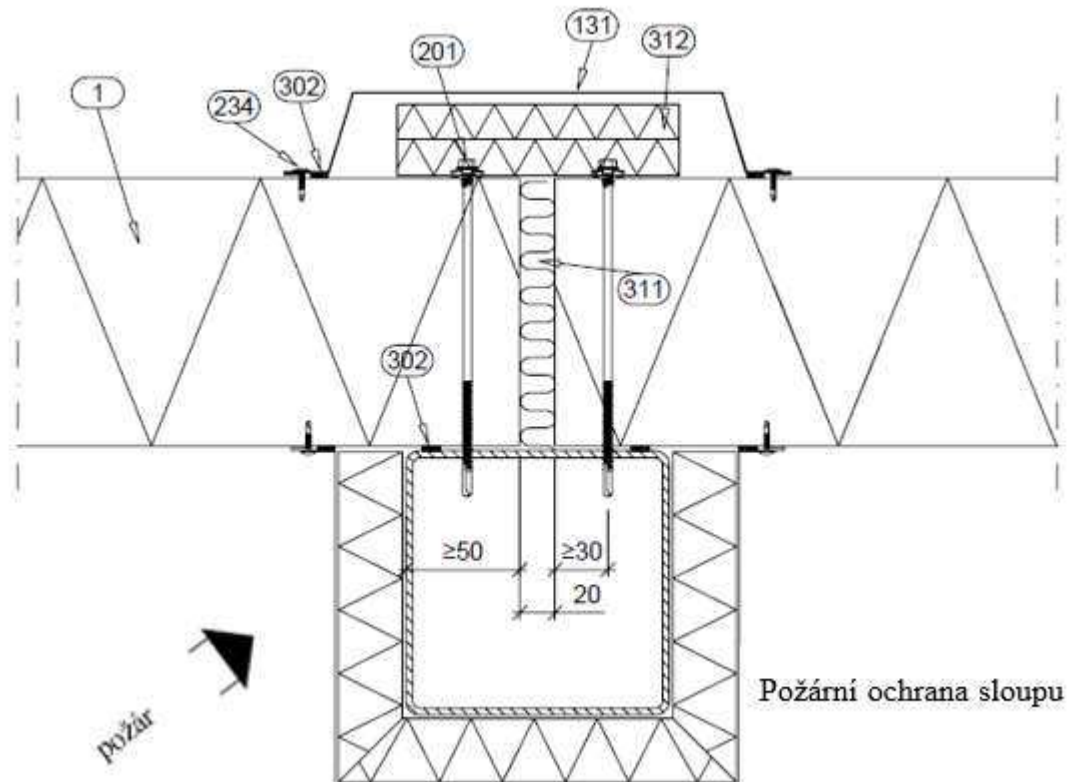
### 2.2.3 Spoj pláště a ocelové konstrukce

Na obr. 9 je uveden přípoj sendvičového panelu se sloupem otevřeného průřezu. Přípoj sendvičového panelu ke sloupu uzavřeného průřezu je vidět na obr. 10 [10]. Požární ochrana sloupu je z minerální vaty tloušťky takové, aby sloup vyhovoval na požadovanou požární odolnost. Požární ochrana může být rovněž tvořena nátěrem, nástřikem či sádkokartonovými deskami.



obr. 9 Detail sendvičového panelu spojeného se sloupem otevřeného profilu [10]

1 – sendvičový panel SPA, 131 – ochranný plech, 201 – samořezný panelový šroub, 234 – připojovací šroub, 302 – těsnící páska, 311 – minerální vlna, 312 – požární ochranná minerální vlna.



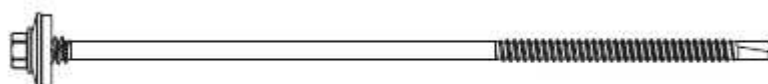
obr. 10 Detail sendvičového panelu spojeného se sloupem uzavřeného profilu [10]

1 – sendvičový panel SPA, 131 – ochranný plech, 201 – samořezný panelový šroub, 234 – připojovací šroub, 302 – těsnící páska, 311 – minerální vlna, 312 – požární ochranná minerální vlna.

Pro kotvení panelů do sloupu se nejčastěji používají samořezné šrouby tloušťky 5,5 mm a délky potřebné podle tloušťky panelu (138 mm pro SPA100E, 288 mm pro SPA230E), které dokáží ukotvit panel do pásnice tloušťky 4-16 mm, viz obr. 11. Dále se používají samořezné šrouby, také o průměru 5,5 mm pro kotvení do pásnice tloušťky 1,5 - 5 mm, které jsou o 10 mm kratší pro každou tloušťku panelu, viz obr. 12 [11].



obr. 11 Samořezný šroub do ocele tloušťky 4 - 14 mm [11]

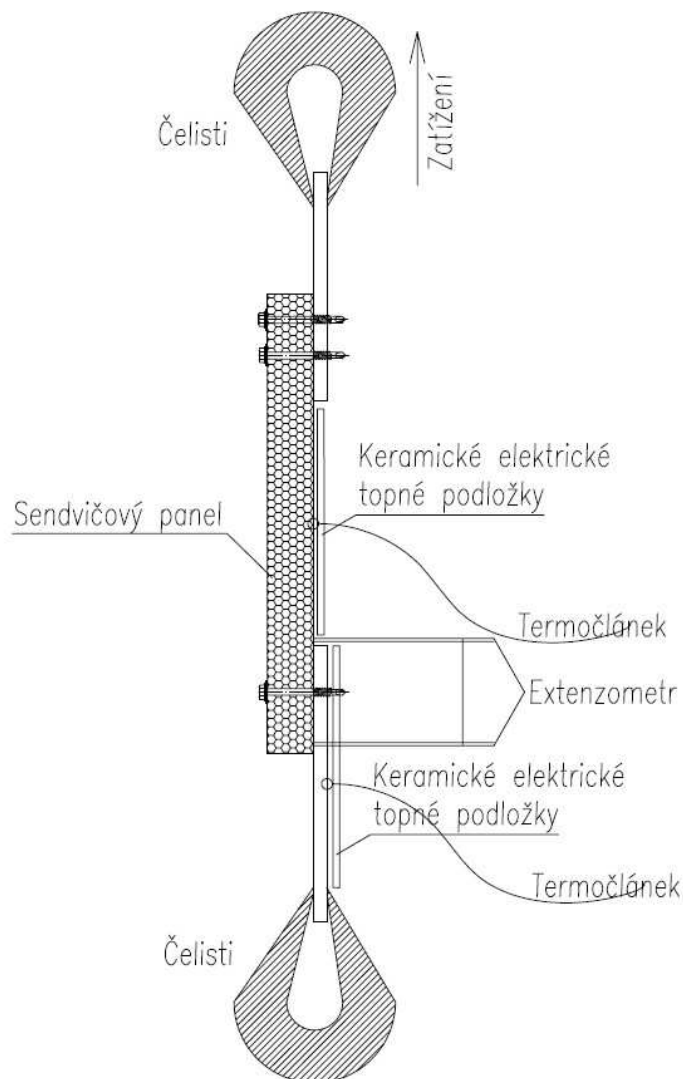


obr. 12 Samořezný šroub do ocele tloušťky 1,5 - 5 mm [11]

## 3 Experimentální studie

### 3.1 Popis experimentu

Cílem experimentu je ověřit chování přípoje sendvičových panelů k ocelové nosné konstrukci v tahu. Experiment byl proveden v laboratořích na ČVUT v Praze, fakultě stavební. Pro experiment bylo zakresleno základní schéma připojení panelu k pásnici, viz obr. 13, kde můžeme vidět ocelové plechy, představující pásnice sloupu, připevněné do čelistí trhačického stroje, k pásnicím přišroubovaný sendvičový panel na jedné straně jedním šroubem, kde se předpokládá porušení a na straně druhé dvěma šrouby. Z tohoto základního schématu vychází detailně rozkreslené schéma i s rozměry a změnami viz příloha 1. Při zkoušení byl panel a spoj s jedním šroubem zahříván pomocí keramických topných deček a byly měřeny teploty na různých místech. Pro prováděný experiment se vychází z obr. 9, kde požární ochrana sloupu bude simulována pomocí nižší teploty na pásnici.



obr. 13 Schéma experimentu

Nosnou konstrukci neboli otevřené profily typu HEA 120 a HEA 200 představují při experimentu plechy tloušťky 8 a 10 mm reprezentující pásnice daných profilů.

Pro zkoušení byly vybrány panely s výplní z minerální vaty od výrobce Ruukki typu SPA100E a SPA230E tloušťky 100 mm a 230 mm.

Jako spojovací prvky jsou použity nerezové samořezné šrouby SXC14-S19-5,5x190 pro panel tloušťky 100 mm a SXC14-S19-5,5x275 pro panel tloušťky 230 mm viz obr. 11. Na neohřívané pásnici byly dva šrouby a na ohřívané jeden.

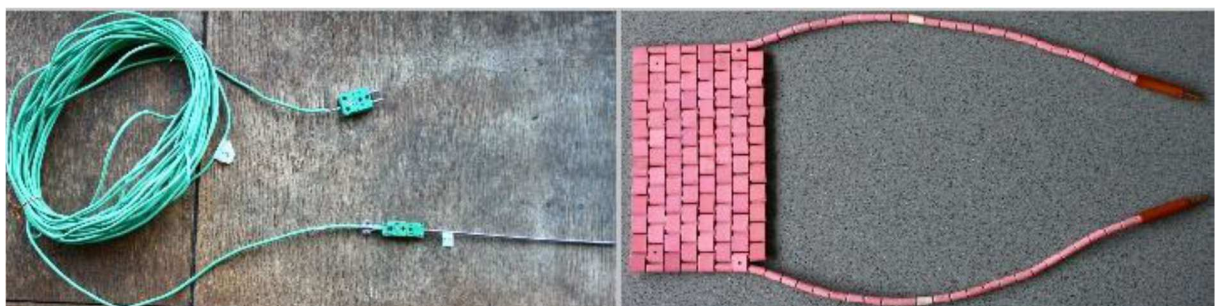
Zahřívání je provedeno pomocí systému skládající se z řídicího stroje Mannings HTC 70 kW (obr. 14), který zahřívá panel a řídicího stroje INVERTOR DHC 6510R, který zahřívá ocelový plech představující nosnou ocelovou konstrukci (obr. 15), keramických zahřívacích deček a termočlánků typu K (obr. 16).



obr. 14 Řídicí stroj Mannings HTC 70 kW



obr. 15 Řídicí stroj INVERTOR DHC 6510R



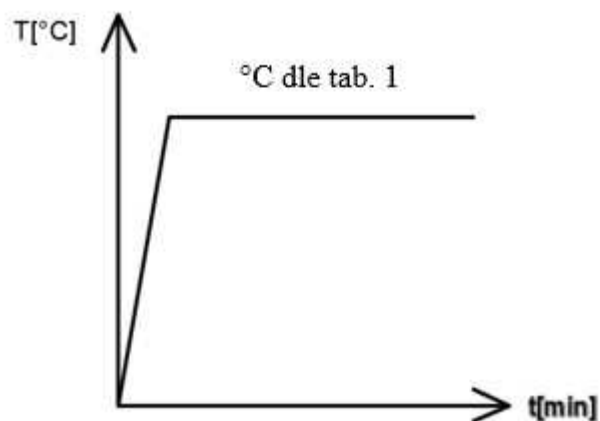
obr. 16 Termočlánek s propojovacím kabelem a keramická dečka

Keramické dečky jsou zavěšeny v těsném kontaktu na panel a plech s jedním šroubem pomocí přivařených izolačních trnů s terčíky. Díky tomu je teplo do vzorku přenášeno převážně vedením. Dečky byly puštěny naplno, dokud nedosáhly určité teploty stanovené v tab. 1 a následně

tato teplota byla udržována, viz obr. 17. Byly měřeny teploty na panelu a na plechu. Rychlost zahřívání vzorku je cca 24 °C/min, což se blíží nominální normové křivce.

tab. 1 Plánované experimenty

Průběh experimentu			Pásnice	Průměr šroubu
Panel	Tloušťka panelu	Teplota [°C]	Tloušťka [mm]	5.5 mm
SPA panel	100	20	8	1 test
			10	1 test
		300	8	1 test
			10	1 test
		450	8	1 test
			10	1 test
	600	8	1 test	
		10	1 test	
	230	20	8	1 test
			10	1 test
		200	8	1 test
			10	1 test
		300	8	1 test
			10	1 test
450	8	1 test		
	10	1 test		
600	8	1 test		
	10	1 test		



obr. 17 Předpokládaný průběh teplot keramických deček

Cílem experimentu je naměřit deformace přípoje při namáhání tahem za zvýšené teploty stanovené v tab. 1.

### 3.2 Příprava vzorku

Na obr. 18 a obr. 19 jsou vidět obrázky přípravy vzorku sendvičového panelu SPA230E přibližně 3 měsíce před prováděním zkoušek. Jsou zde navařeny izolační ocelové trny (o průměru 2 mm a délce 30 mm), které budou sloužit k uchycení keramických deček za pomoci samosvorných úchytek (které jsou vidět v blízkosti trnů). Pro přivaření trnů musela být odstraněna povrchová úprava plechu.



*obr. 18 Připravovaný vzorek pro 1. zkoušku, pohled shora*



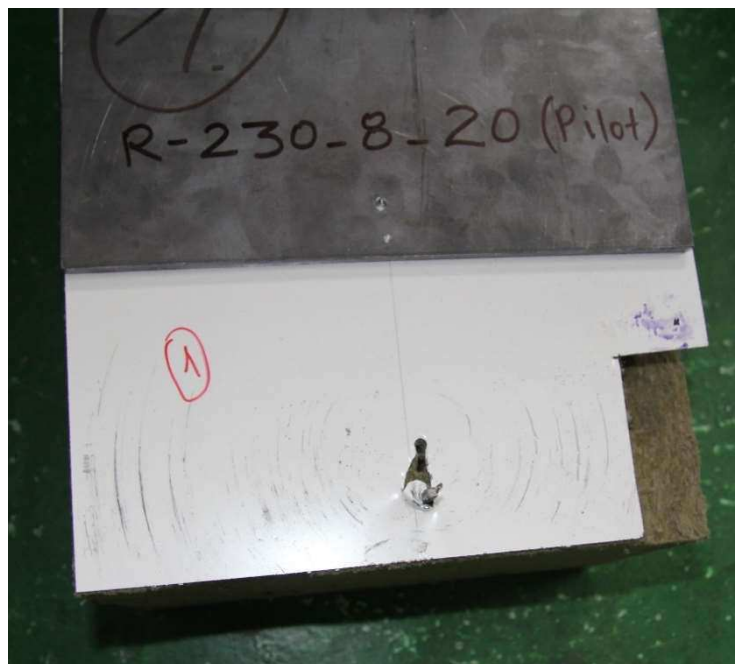
*obr. 19 Připravovaný vzorek pro 1. zkoušku, boční pohled*

### 3.3 Pilotní zkouška vzorku

Před započítím zkoušení vzorků byl vyzkoušen 1 pilotní vzorek, aby byla ověřena funkčnost a proveditelnost plánované zkoušky. Na obr. 20 je vidět pilotní vzorek po přemístění z trhacího přístroje ven. Na obr. 21 je vidět deformace v předpokládané části porušení vzorku vlivem zatížení. Společně s ověřením proveditelnosti byly během pilotní zkoušky nastaveny hodnoty zahřívání a zatěžování.



obr. 20 Pilotní vzorek



obr. 21 Pilotní vzorek

### 3.4 Skutečné provedení

Při provádění prvních experimentů za běžné teploty s tloušťkou panelu 230 mm se zjistilo, že plánované uchycení v místě, kde se nepředpokládá porušení, je špatně navrženo, a právě v tomto místě došlo k porušení vzorku. Proto proběhlo několik změn oproti plánům. Původně byly navrženy 2 šrouby nad sebou, viz obr. 22 a po úpravě 3 šrouby vedle sebe viz obr. 23. Pro tuto skutečnost bylo upraveno i schéma experimentu viz příloha 2. Na obr. 22 a obr. 23 je vidět panel tloušťky 100 mm, u kterého se prováděl test i s ukotvením se třemi šrouby. Tento test sloužil pro kontrolu, zda-li nedošlo k nesprávným výsledkům při ukotvení s dvěma šrouby. Ukázalo se, že nedošlo. Na obr. 24 je vidět srovnání obou variant uchycení vzorků po zkoušce.





*obr. 22 Ukotvení vzorku pomocí 2 šroubů nad sebou*



*obr. 23 Ukotvení vzorku pomocí 3 šroubů vedle sebe*

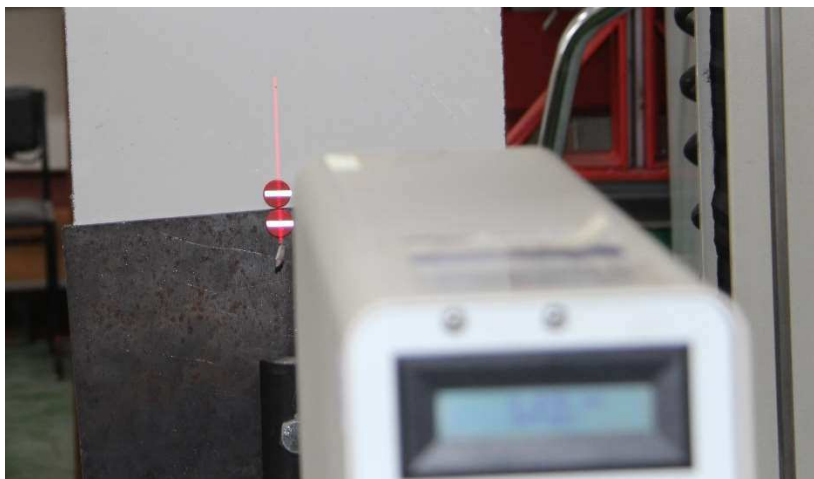


*obr. 24 Porovnání deformací špatného a správného uchycení vzorku po průběhu zkoušky*

Další změna oproti původnímu plánu experimentu je v tloušťce plechu reprezentující pásnici profilu nosné ocelové konstrukce. Místo plechu tloušťky 9 mm představující profil HEA 160 byl použit plech tloušťky 10 mm představující profil HEA 200. Tato změna byla způsobena nepřítomností plechů tloušťky 9 mm na trhu.

### 3.5 Vstupní a měřené hodnoty

Pro zkoušku za běžné teploty byla na trhacím stroji zadána rychlost zatěžování vzorku 0,6 mm/min. Měřila se vyvinutá tahová síla na vzorek v závislosti na protažení mezi plechem a panelem pomocí laserového extenzometru (viz obr. 25) a tahová síla na vzorek v závislosti na protažení celého vzorku takzvaný crosshead<sup>2</sup> pomocí softwaru trhacího přístroje. Tyto hodnoty jsou dále porovnávány. Pro správné měření extenzometrem se využily magnetky s reflexními pásky.



obr. 25 Laserový extenzometr a vzorek zkoušený za běžné teploty

Za zvýšené teploty byla zadána shodná rychlost zatěžování vzorku 0,6mm/min a měřila se vyvinutá tahová síla na vzorek v závislosti na protažení mezi plechem a panelem pomocí laserového extenzometru viz obr. 26 a tahová síla na vzorek v závislosti na protažení celého vzorku pomocí softwaru trhacího přístroje. Pro správné měření extenzometrem se využily špalíčky s reflexními pásky napíchnuté na izolační ocelové trny. Navíc oproti testům za běžné teploty se měřila teplota v různých částech vzorku, viz obr. 27. Kde termočlánek TC1 měří teplotu předního ohřívaného plechu panelu, podle které je ovládána teplota vyvinutá keramickou dečkou umístěnou právě na tomto povrchu. Termočlánek TC2 měří teplotu ve čtvrtině tloušťky minerální výplně. Termočlánek TC3 měří teplotu v polovině tloušťky minerální výplně. Termočlánek TC4 měří teplotu zadního neohřívaného plechu panelu. Termočlánek TC5 měří teplotu plechu reprezentující pásnici profilu nosné ocelové konstrukce. Podle tohoto termočlátku je řízena teplota generovaná keramickou dečkou umístěnou právě na tomto plechu. Tato teplota má pomalejší nárůst oproti teplotě na termočlátku TC1. Pomalejší nárůst má simulovat přítomnost požární ochrany ocelové konstrukce. V tomto případě je uvažováno se zpěnitelným nátěrem.

---

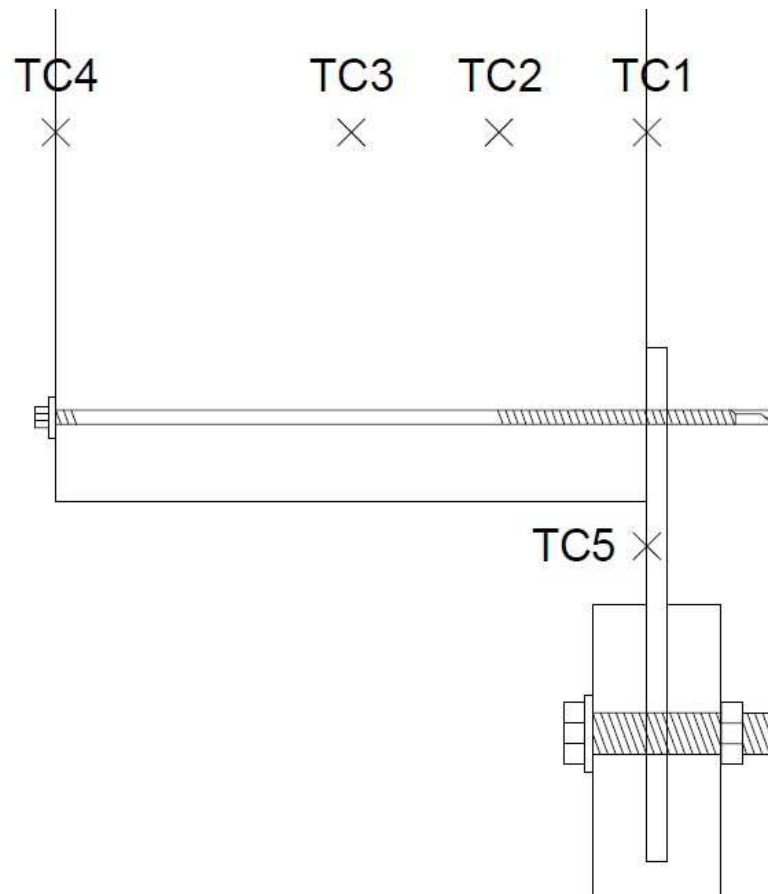
<sup>2</sup> Crosshead – celkové protažení

Jako zpěnitelný nátěr se uvažuje typ Sherwin Williams FX5090 doporučený firmou Ruukki v tloušťce 1,2 mm, což odpovídá požární odolnosti R60. Nátěr je určený k ochraně ocelových nosníků, klasifikaci třídy reakce na oheň B-s1-d0. Pomocí přírůstkové metody byl v programu Excel spočítán průběh teploty, viz obr. 28, kde křivka "Nechráněný" ukazuje průběh teplot, který by se měl ukázat na termočlásku TC1 a křivka "Chráněný" ukazuje průběh teplot, který by se měl ukázat na termočlásku TC5.

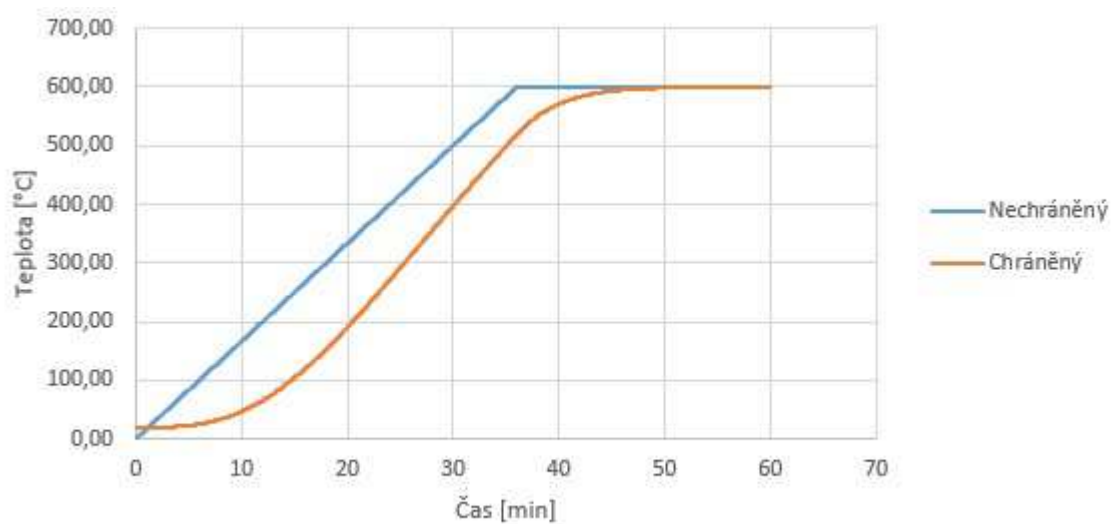
Během zkoušky byly vzorky obaleny izolační rohoží Fiberfax, aby nedocházelo k úniku tepla do okolí a současně aby nedošlo k poškození nejbližších částí trhačického stroje.



*obr. 26 Laser extenzometru a vzorek zkoušený za zvýšené teploty*



obr. 27 Umístění termočlánků ve vzorku



obr. 28 Průběh teplot chráněného a nechráněného plechu

Zatěžování vzorků při zvýšené teplotě bylo započato v moment, kdy teplota na termočlánek TC1 (umístění TC je zobrazeno na obr. 27) dosáhla požadované hodnoty neboli 300, 450 nebo 600 °C. Zatěžování vzorků bylo zastaveno při dosažení 20 mm protažení v místě, kde se předpokládá porušení vzorku.

### 3.6 Výsledky

U všech zkoušek nastalo porušení vnitřního ocelového plechu sendvičového panelu v blízkosti otvoru šroubového spojení. Porušení u experimentů při běžné teplotě se vyznačovalo protržením plechu sendvičového panelu v úzkém tvaru přibližně stejného průměru, jako byl průměr šroubu. Za protrženým otvorem došlo ke zvlnění plechu. U experimentů při zvýšené teplotě se ocelové plechy protrhly tak, že se široce otevíraly. Blízko konce protrženého otvoru došlo ke zhušťování plechu jeho zvlněním. Toto zhušťování ocelového plechu zpevňovalo ocelový plech během zkoušky a v grafech síly deformace mohlo způsobit další vrcholy pevnosti po prvním vrcholu.

Pozorování a shrnutí všech experimentů je uvedeno v tab. 2 a také na obr. 29 - obr. 44.

tab. 2 Přehled porušení vzorků

Zkouška			Druhy poruch	
Šroub o průměru 5.5 mm			Přípoj k plechu tl. 8 mm	Přípoj k plechu tl. 10 mm
Typ panelu	Tloušťka panelu [mm]	Teplota [°C]		
SPA Panel	100	20	Úzké protržení plechu s malým zvlněním	Úzké protržení plechu s malým zvlněním
		300	Protržení plechu se zvlněním Malé ohýbání šroubu	Protržení plechu Malé ohýbání šroubu
		450	Protržení plechu se zvlněním Selhání šroubu	Protržení plechu se zvlněním Malé ohýbání šroubu
		600	Protržení plechu se zvlněním Malé ohýbání šroubu	Protržení plechu se zvlněním Malé odlepování plechu v rohu od minerální vlny
	230	20	Úzké protržení plechu s malým zvlněním	Úzké protržení plechu s malým zvlněním
		300	Protržení plechu se zvlněním	Protržení plechu se zvlněním
		450	Protržení plechu se zvlněním	Protržení plechu se zvlněním
		600	Protržení plechu se zvlněním Malé odlepování plechu od minerální vlny	Protržení plechu se zvlněním Malé odlepování plechu od minerální vlny



obr. 29 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 20 °C



obr. 30 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 300 °C



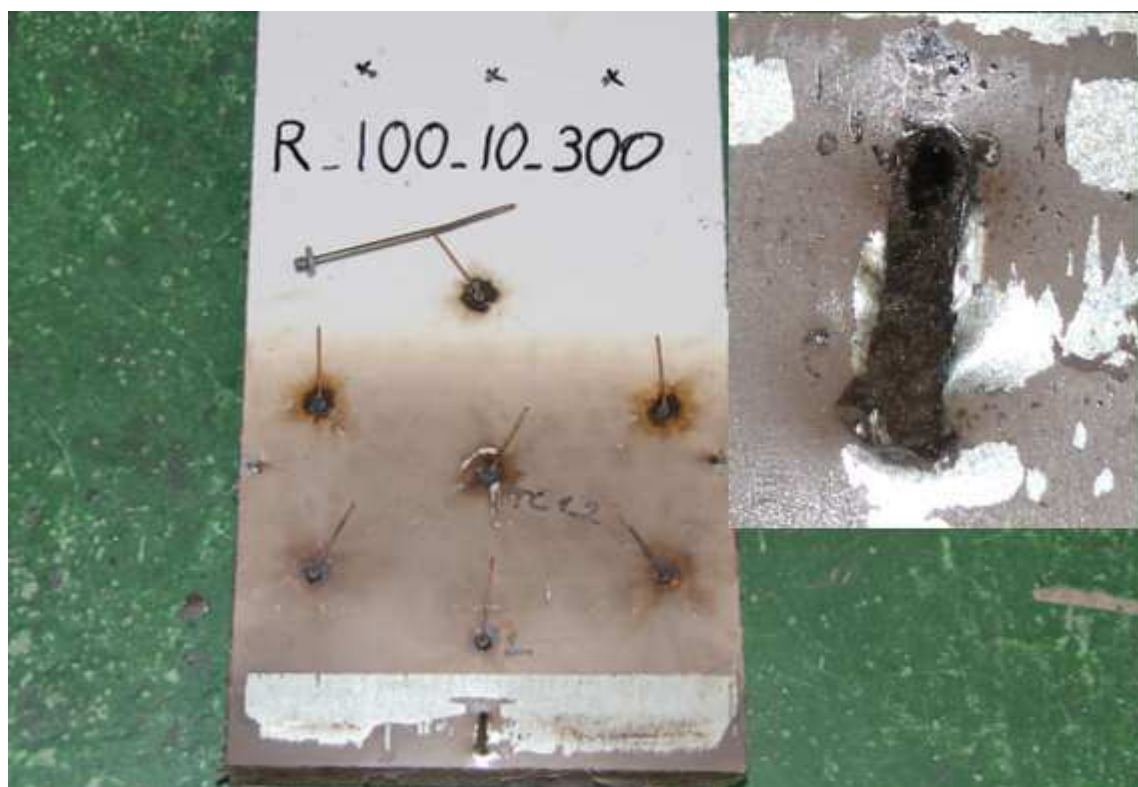
*obr. 31 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 450 °C*



*obr. 32 Porušení panelu SPA100E k plechu 8 mm při teplotě 600 °C*



obr. 33 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 20 °C



obr. 34 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 300 °C

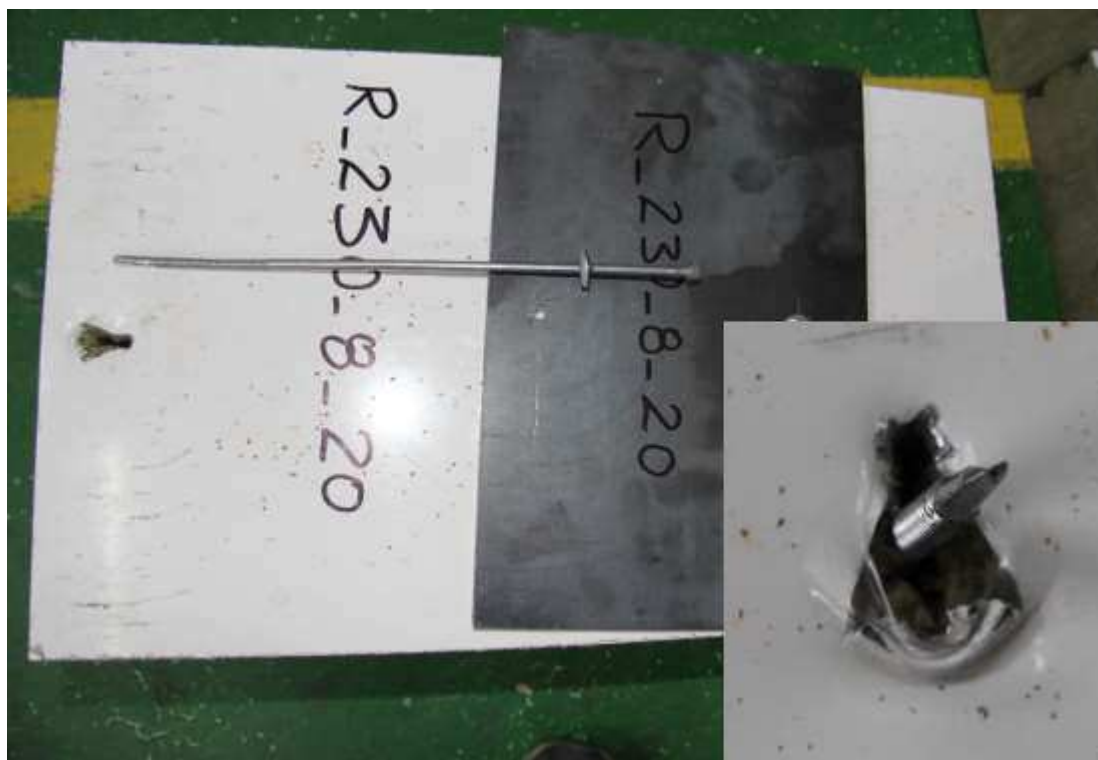




*obr. 35 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 450 °C*



*obr. 36 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 600 °C*



obr. 37 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 20 °C



obr. 38 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 300 °C



obr. 39 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 450 °C



obr. 40 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 600 °C



obr. 41 Obr. Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 20 °C



obr. 42 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 300 °C



*obr. 43 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 450 °C*

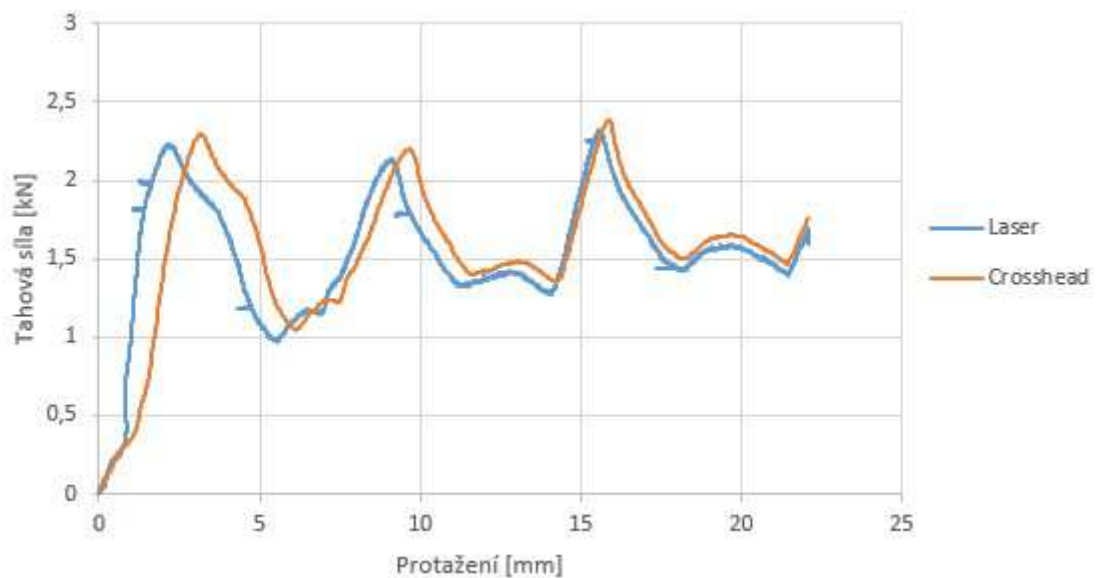


*obr. 44 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 600 °C*

### 3.6.1 Testy za běžné teploty - 20 °C

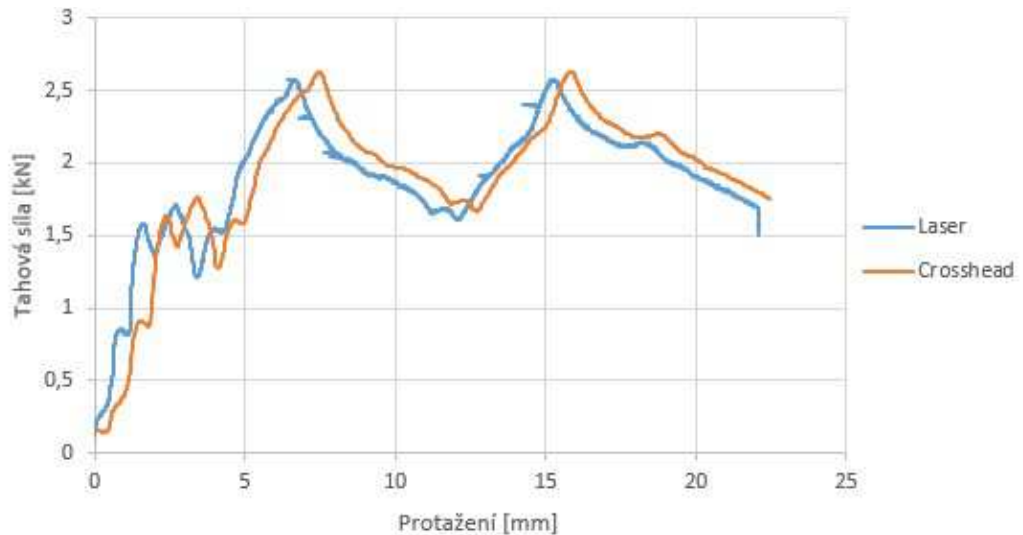
Na obr. 45, obr. 46, obr. 47 a obr. 48 je v grafech znázorněn průběh tahové síly působící na vzorek v závislosti na protažení vzorku za běžné teploty. Křivka s označením "Laser" je měření laserovým extenzometrem, který se zaměřuje pouze na měření prodloužení spoje, kde se předpokládá porušení. Křivka s označením "Crosshead", znázorňuje měření softwarem trhacího přístroje, který měří celkové prodloužení vzorku. Z grafů je vidět, že tvar křivek si je velmi podobný. Křivka "Crosshead" je ale oproti křivce "Laser" posunuta. Podle jejich výsledků bylo dosaženo větších deformací při shodném zatížení. Nárůst deformace ale pravděpodobně nastal v dalších částech vzorku (horní upevnění) a nevychází ze sledovaného místa. Křivka "Laser" tedy představuje chování sledovaného místa přípoje a pro další vyhodnocení v této práci je proto zásadní. Křivka "Crosshead" slouží spíše ke kontrole tvaru křivky "Laser".

obr. 45 představuje výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 8 mm. Z průběhu křivky laser na obr. 45 můžeme vyčíst z průběhu křivky laser 1. vrchol při tahové síle 2,232 kN a protažení 2,16 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,136 kN a protažení 9,116 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,324 kN a protažení 15,558 mm. Při každém vrcholu došlo během experimentu k dosažení únosnosti určité části přípoje a jejím porušením pak k poklesu síly. V případě zatížení přípoje tahovou silou se porušení projevilo postupným protahováním otvoru plechu sendvičového panelu v místě vrutu. Při zkoušení vzorků za běžné teploty nebyl pozorován žádný ohyb vrutů.



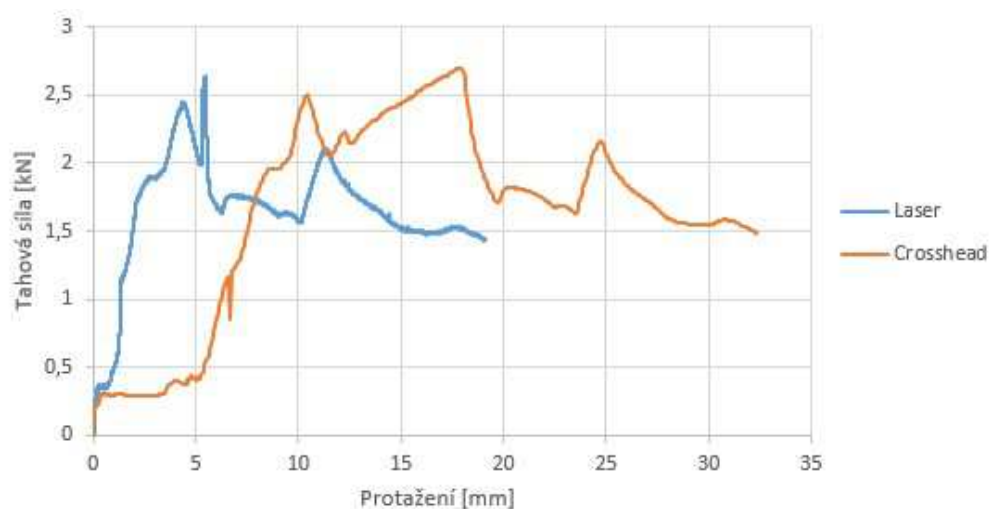
obr. 45 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 20 °C

Na obr. 46 jsou výsledky zkoušky spoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 46 můžeme vyčíst z průběhu křivky laser 1. vrchol při tahové síle 1,708 kN a protažení 2,676 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,58 kN a protažení 6,64 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,58 kN a protažení 15,244 mm. K poklesům sil opět docházelo vlivem postupného protahování otvoru v plechu sendvičového panelu v místě vrutu.



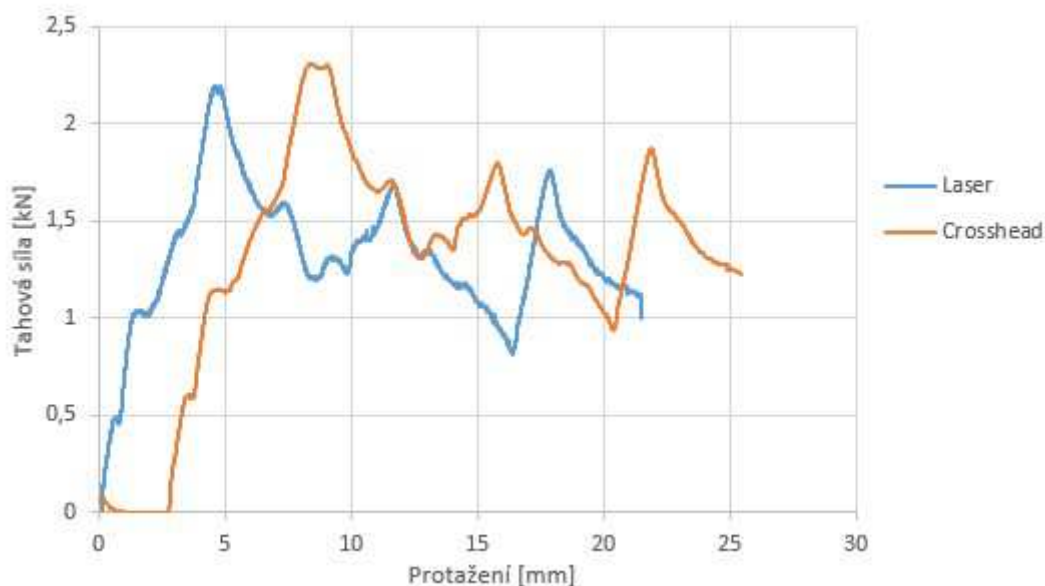
obr. 46 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 20 °C

Na obrázku obr. 47 jsou výsledky zkoušky spoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 47 můžeme vyčíst z průběhu křivky laser 1. vrchol při tahové síle 2,644 kN a protažení 5,648 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,108 kN a protažení 12,56 mm. Při porovnání křivky crosshead a laser je vidět markantní rozdíl v protažení, který vznikl v jiné části vzorku. Například na začátku zatěžování je vidět velké protažení celého vzorku nebo také před nejvyšším vrcholem křivky laser je vidět pokles tahové síly při krátkém protažení oproti křivce crosshead, kde před nejvyšším vrcholem je vidět pokles tahové síly při daleko větším protažení.



obr. 47 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 20 °C

Na obr. 48 jsou výsledky zkoušky spoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 48 můžeme vyčíst z průběhu křivky laser 1. vrchol při tahové síle 2.188 kN a protažení 4,804 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,688 kN a protažení 11,68 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,764 kN a protažení 17,872 mm.



obr. 48 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 20 °C

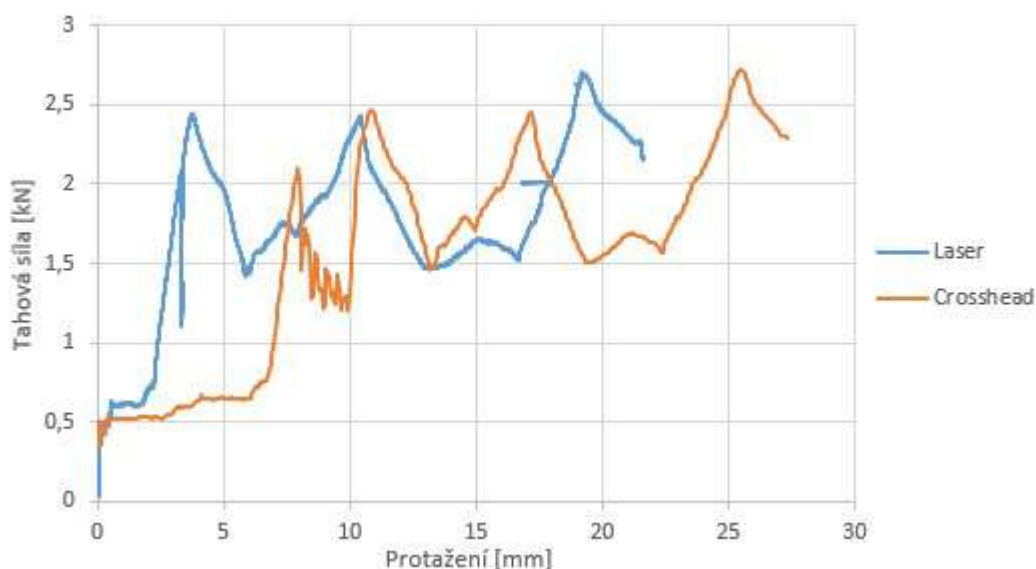
### 3.6.2 Testy za zvýšené teploty - 300 °C

Na obr. 49, obr. 51, obr. 53 a obr. 55 je v grafech znázorněn průběh tahové síly působící na vzorek v závislosti na protažení vzorku za zvýšené teploty, stejně jako za běžné teploty.

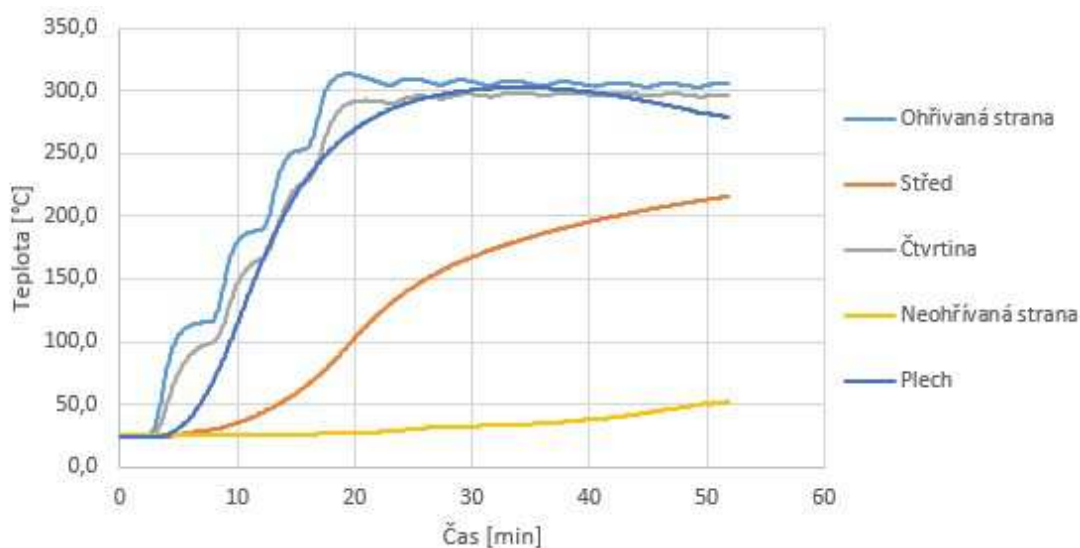
Na obr. 50, obr. 52, obr. 54 a obr. 56 je v grafech znázorněn průběh teplot v závislosti na čase. Křivka "Ohřívaná strana" znázorňuje průběh teplot na termočlátku TC1, křivka "Střed" znázorňuje průběh teplot na termočlátku TC3, křivka "Čtvrtina" znázorňuje průběh teplot na termočlátku TC2, křivka "Neohřívaná strana" znázorňuje průběh teplot na termočlátku TC4 a křivka "Plech" znázorňuje průběh teplot na termočlátku TC5. Umístění termočlátku je na obr. 27.



Obr. 49 a obr. 50 znázorňují výsledky ze zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 49 a obr. 50 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 2,44 kN a prodloužení 3,732 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,432 kN a protažení 10,404, 3. vrchol při tahové síle 2,708 kN a prodloužení 19,172 mm. Při porovnání křivek laser a crosshead si u křivky laser před 1. vrcholem můžeme všimnout poklesu tahové síly, což je příčinou protažení jiné části vzorku, které je vidět na křivce crosshead mezi 1. a 2. vrcholem. Zatěžování vzorku začalo při dosažení 300 °C na termočláнку TC1, nebo-li na ohříváné straně panelu v 18 minutě, kde plech měl 250 °C. 1. vrchol nastal v 29. minutě (v tomto čase se teploty plechu a ohříváné strany skoro rovnají), 2. vrchol v 35. minutě a 3. vrchol v 43. minutě. Teplota ve čtvrtině vzorku je po celý čas zatěžování teplotou o trošku menší než plech na ohříváné straně. Teplota ve středu vzorku se začne výrazně zvedat v 10. minutě. Teplota na neohříváné straně se po 50 minutách zvedla o 26 °C.

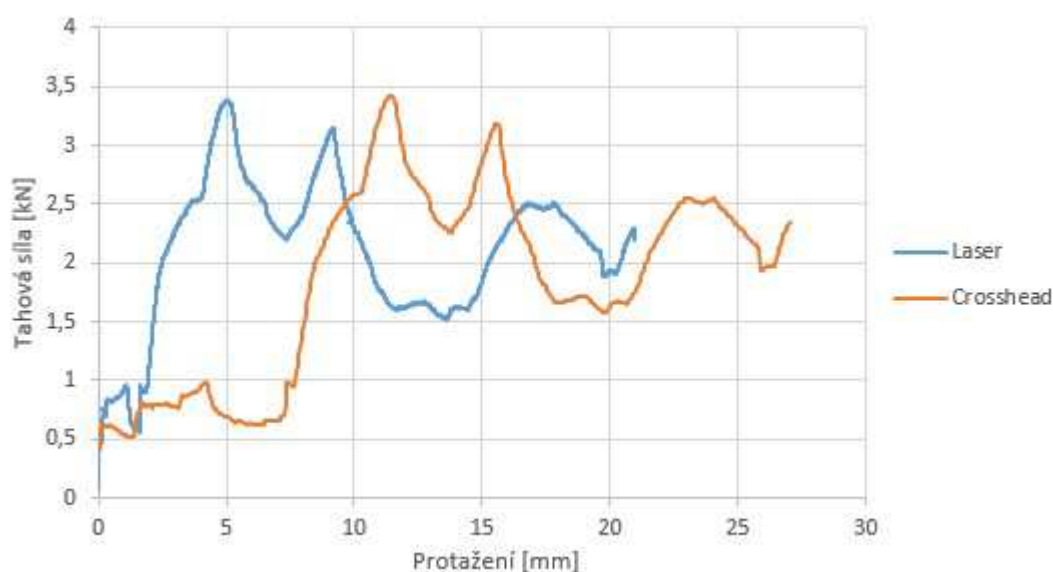


obr. 49 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 300 °C

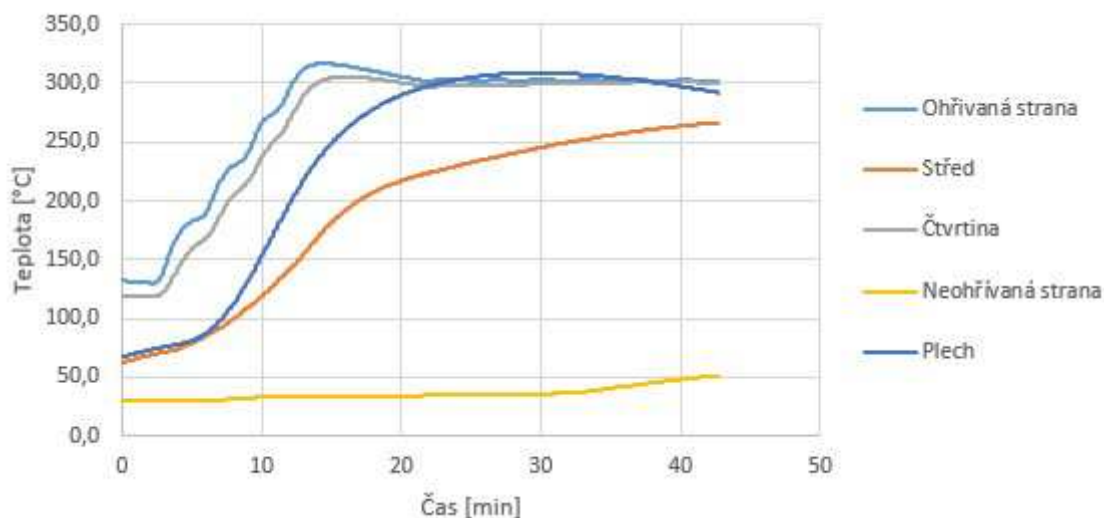


obr. 50 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 300 °C

Na obr. 51 a obr. 52 je vidět záznam výsledků ze zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 51 a obr. 52 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 3,384 kN a prodloužení 5,052 mm, 2. vrchol při tahové síle 3,144 kN a protažení 9,164 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,512 kN a prodloužení 17,788 mm. Z porovnání křivek laser a crosshead můžeme na začátku zatěžování vidět velký rozdíl v protažení vzorku, který byl pravděpodobně způsoben v části, kde se nepředpokládá přerušení vzorku. Zatěžování vzorku začalo při dosažení 300 °C na ohřívání straně vzorku ve 13. minutě. 1. vrchol křivky laser byl dosažen ve 24. minutě (kdy teplota plechu a ohřívání strany se přibližně shoduje), 2. vrchol v 28. minutě a 3. vrchol v 37. minutě. Na obr. 52 jsou teploty hned na začátku vyšší z důvodu přiložení ještě horkých deček.

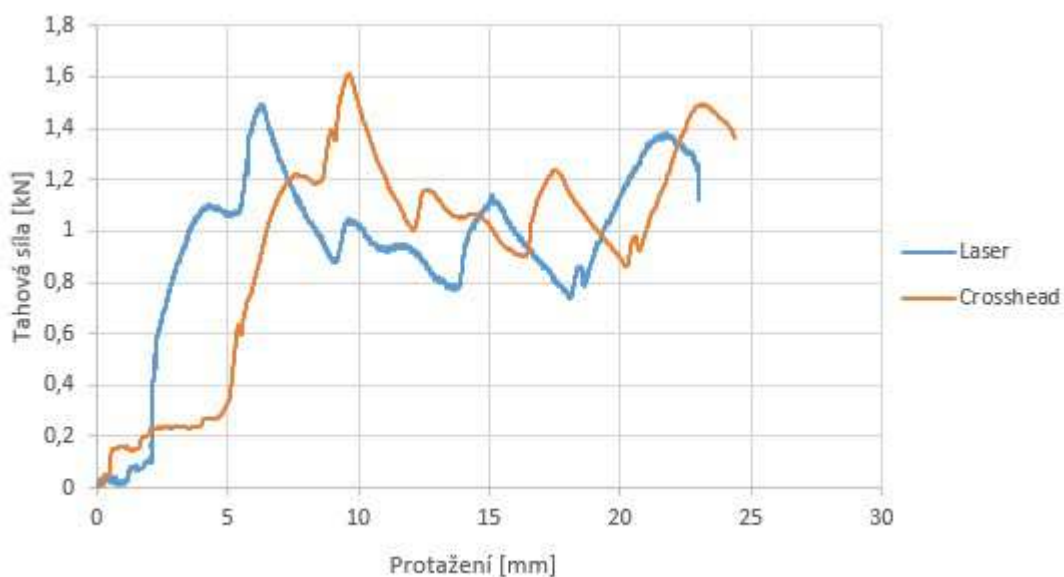


obr. 51 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 300 °C

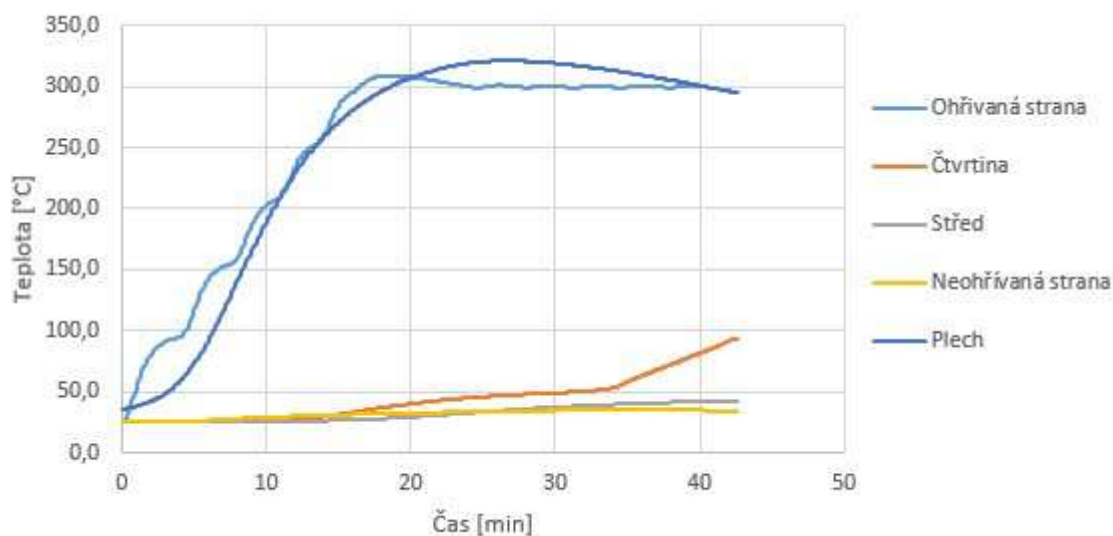


obr. 52 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 300 °C

Obr. 53 a obr. 54 shrnují výsledky ze zkoušky přípoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 53 a obr. 54 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 1,496 kN a prodloužení 6,3 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,14 kN a protažení 15,14 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,384 kN a prodloužení 21,768 mm. Z porovnání křivek laser a crosshead je největší rozdíl vidět hned na začátku zatěžování, kde u křivky crosshead došlo k většímu protažení než u křivky laser vlivem protažení celého vzorku. Zatěžování vzorku začalo v 17. minutě při dosažení teploty 300 °C na ohříváné straně vzorku. 1. vrchol křivky laser byl dosažen v 25. minutě (teploty ohříváné strany vzorku a plechu jsou přibližně stejné neboli 300 °C) 2. vrchol v 35. minutě a 3. vrchol v 40. minutě.

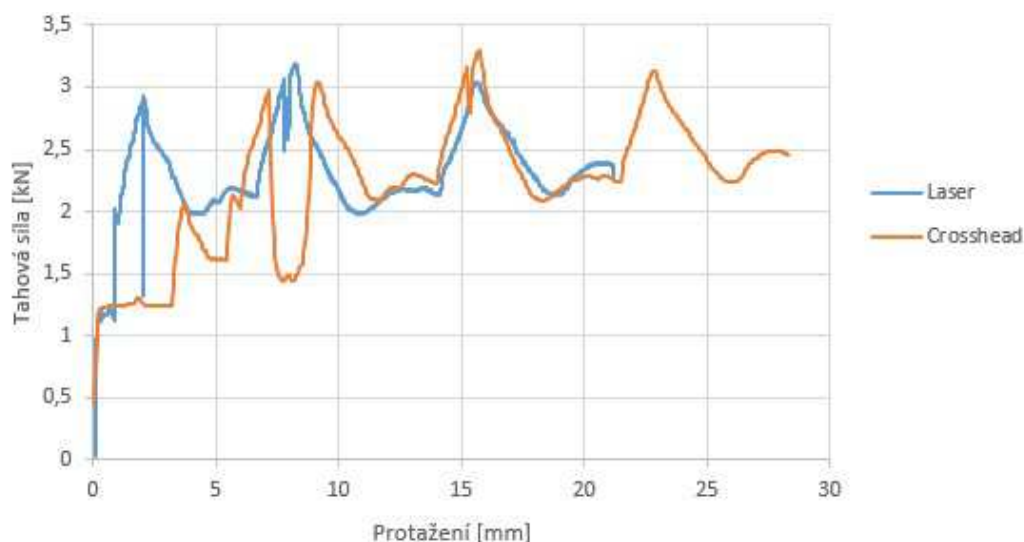


obr. 53 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 300 °C

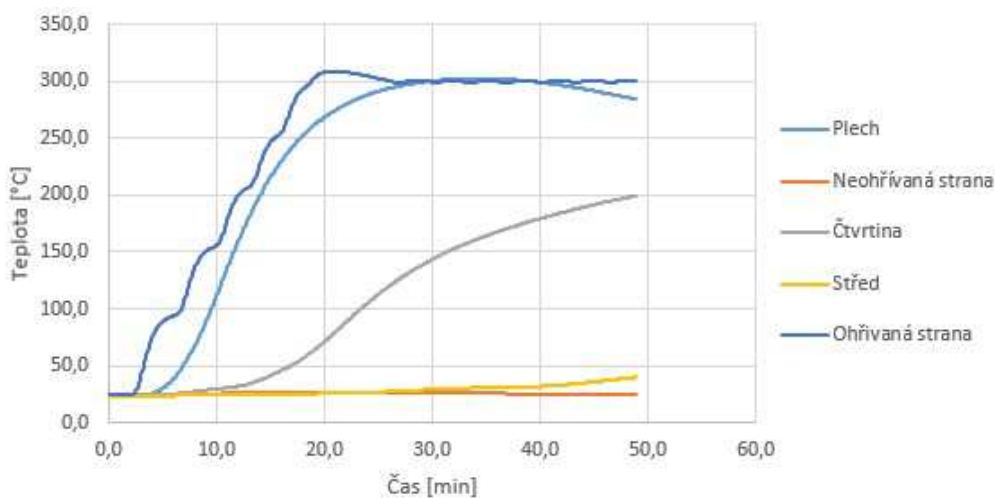


obr. 54 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 300 °C

Obr. 55 a obr. 56 uvádí výsledky ze zkoušky přípoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 55 a obr. 56 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 2,936 kN a prodloužení 2,028 mm, 2. vrchol při tahové síle 3,196 kN a protažení 8,268, 3. vrchol při tahové síle 3,04 kN a prodloužení 15,6. Zatěžování vzorku začalo při dosažení 300 °C na ohřívané straně vzorku. Při porovnání obou křivek můžeme vidět velké rozdíly, převážně na začátku zatěžování. Tyto rozdíly jsou způsobené teplotní roztažností a hlavně pozorováním pouze části předpokládaného porušení u křivky laser oproti křivce crosshead, která znázorňuje celý vzorek. U křivky crosshead je na začátku větší protažení. Dále je vidět u 1. vrcholu křivky laser náhlý pokles síly bez protažení, jehož důvod je vidět na křivce crosshead mezi 1. a 2. vrcholem neboli k protažení vzorku došlo v jiné části vzorku nikoli v části, kde se předpokládá porušení. 1. vrchol nastal v 28. minutě, 2. vrchol nastal v 35. minutě a 3 vrchol nastal v 42. minutě zahřívání. Teplota ve čtvrtině vzorku se začala výrazně zvedat až okolo 12. minuty, zatímco teplota v polovině a na neohřívané straně vzorku se skoro nezvýšila, to je způsobeno tloušťkou tepelně izolační vrstvy.



obr. 55 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 300 °C



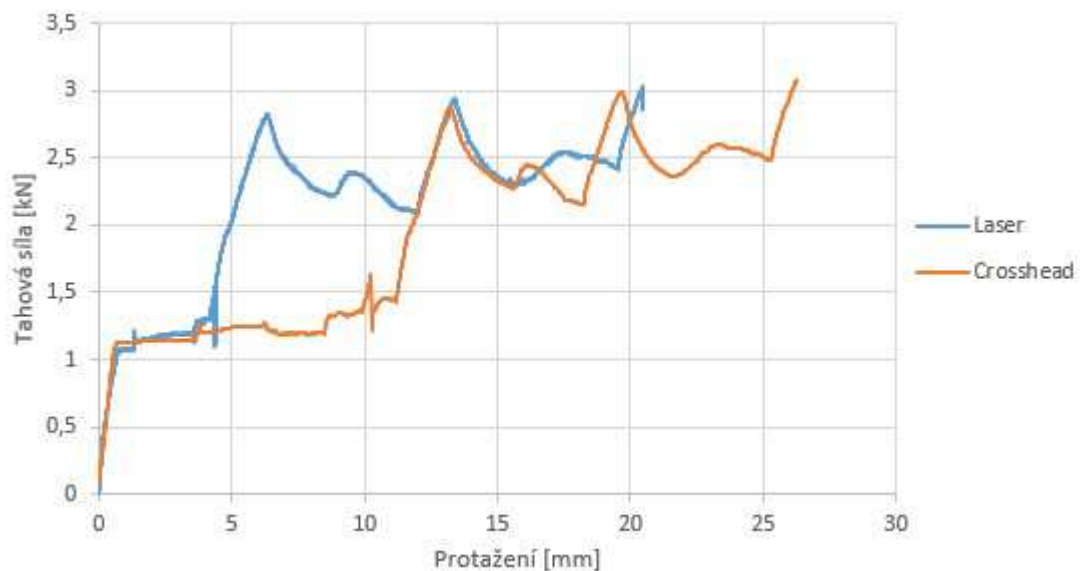
obr. 56 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 300 °C

### 3.6.3 Testy za zvýšené teploty - 450 °C

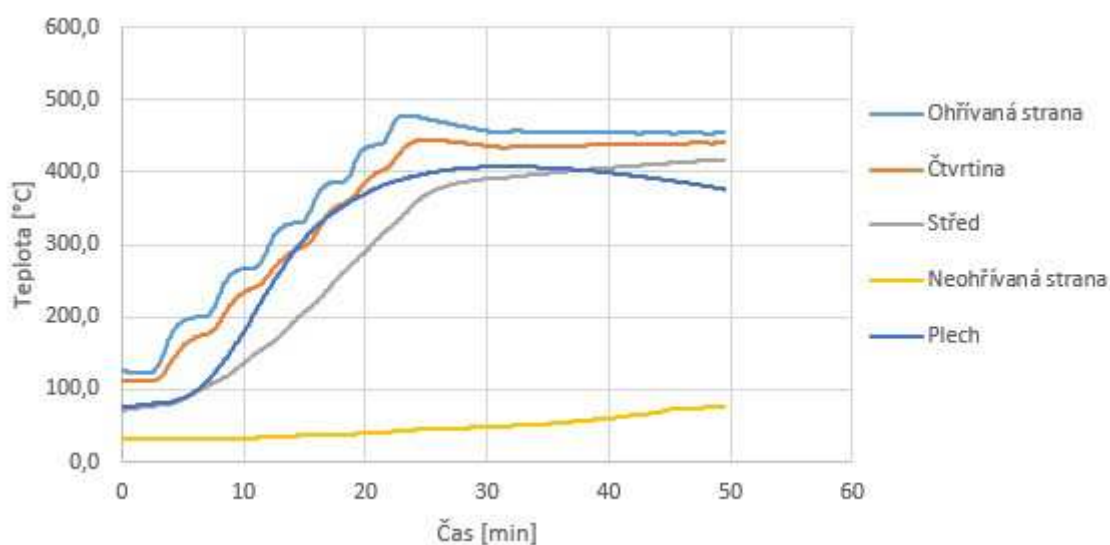
Na obr. 57, obr. 59, obr. 61 a obr. 64 je v grafech znázorněn průběh tahové síly působící na vzorek v závislosti na protažení vzorku při teplotě 450 °C.

Na obr. 58, obr. 60, obr. 62 a obr. 65 je v grafech znázorněn průběh teplot v závislosti na čase stejně jako u testů při teplotě 300 °C.

Obr. 57 a obr. 58 uvádí výsledky ze zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 57 a obr. 58 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 2,824 kN a prodloužení 6,336 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,944 kN a protažení 13,388 mm, 3. vrchol při tahové síle 3,028 kN a prodloužení 20,44 mm. Při porovnání křivek laser a crosshead zjišťujeme největší rozdíl ve tvaru na začátku zatěžování, kdy křivka crosshead nabírá větší protažení oproti křivce laser, které je způsobeno teplotní roztažností vzorku a hlavně rozdílem protažení celého vzorku ku protažení části, kde se předpokládá porušení vzorku. Zatěžování začalo při dosažení 450 °C na ohřívané straně vzorku. 1. vrchol nastal v 35. minutě (teplota ohřívané strany 455 °C a plechu 406 °C), 2. vrchol nastal v 42. minutě (455 a 396 °C) a 3. vrchol nastal v 49. minutě (453 a 380 °C). Teplota ve čtvrtině vzorku se tvarem křivky podobá teplotě na ohřívané straně vzorku, avšak je po celou dobu nižší stejně tak teplota ve středu vzorku, je to způsobeno mocností minerální vaty panelu. Teplota na neohřívané straně vzorku se zvýšila o 47 °C. Teploty na obr. 58 začínají na vyšších hodnotách z důvodu přiložení ještě horkých deček na začátku zkoušky. Zkouška byla ukončena z důvodu porušení spojovacího prostředku, viz obr. 31.

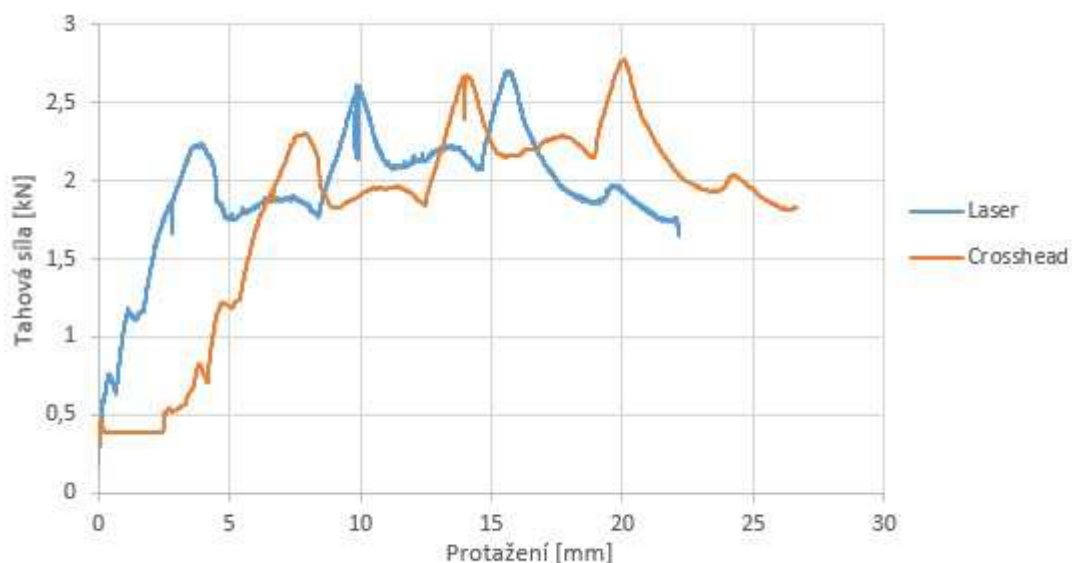


obr. 57 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 450 °C

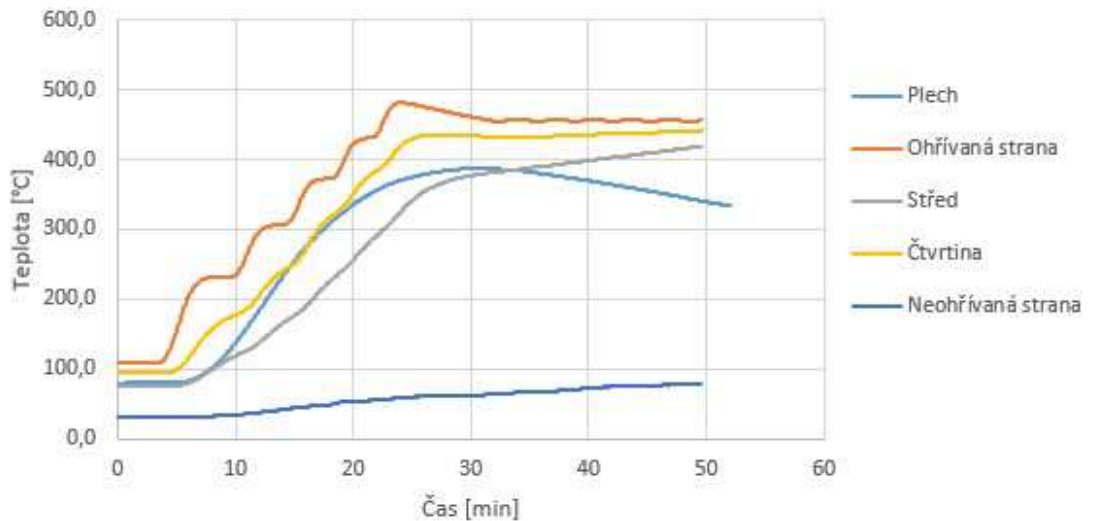


obr. 58 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 450 °C

Obr. 59 a obr. 60 shrnují výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 59 a obr. 60 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 2,236 kN a prodloužení 3,884 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,608 kN a protažení 9,864 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,708 kN a prodloužení 15,64 mm. Zatěžování vzorku začalo při dosažení 450 °C, tedy v 23. minutě. Obě křivky na obr. 59 si jsou velmi podobné až na začátek zatěžování kdy u křivky crosshead došlo k lehce většímu protažení oproti křivce laser. 1. vrchol nastal v 31. minutě (teplota ohřívané strany 460 °C a plechu 387 °C), 2. vrchol nastal v 37. minutě (457 a 378 °C) a 3. vrchol nastal v 43. minutě (455 a 362 °C). Průběh teplot v závislosti na grafech je podobný jako u předchozí zkoušky.

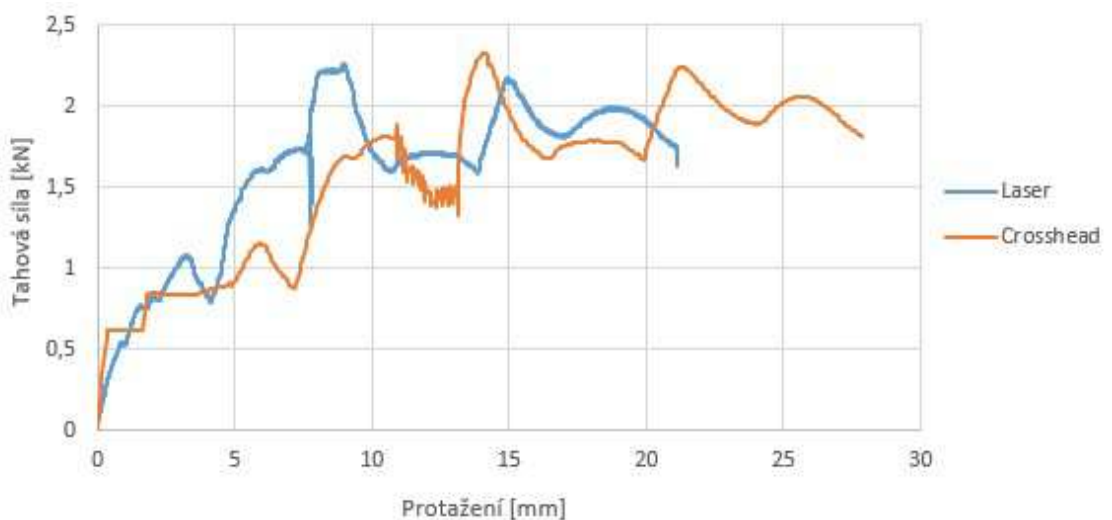


obr. 59 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 450 °C

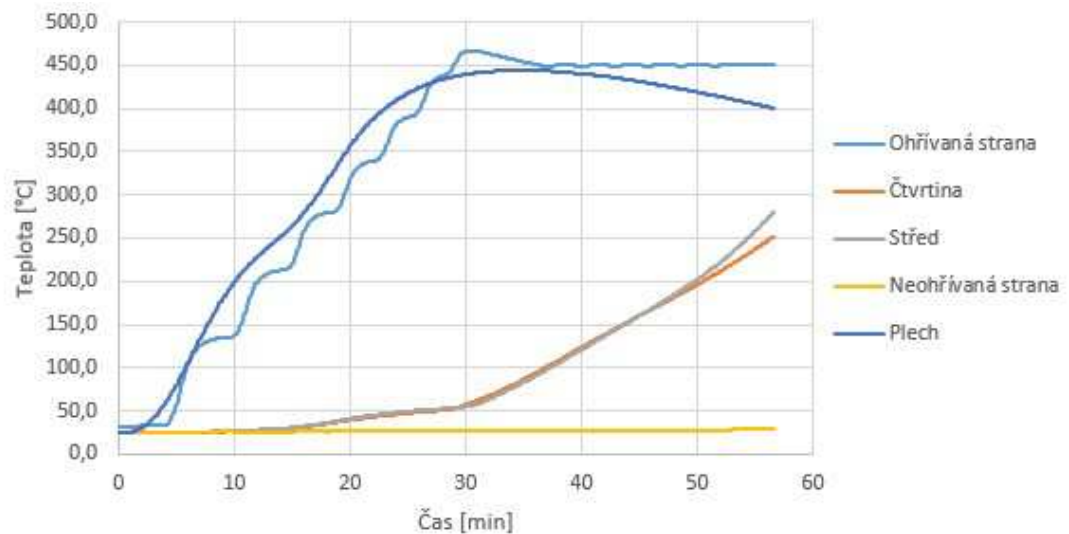


obr. 60 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 450 °C

Obr. 61 a obr. 62 představují výsledky zkoušky panelu tl. 230 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 61 a obr. 62 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 1,08 kN a prodloužení 3,228 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,26 kN a protažení 8,962 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,176 kN a prodloužení 14,952 mm. Zatěžování vzorku začalo při dosažení teploty 450 °C na ohřívané straně vzorku. Při porovnání křivek laser a crosshead je vidět rozdíl na začátku před 1. vrcholem, kde křivka crosshead dosahuje většího protažení oproti křivce laser. Nejzajímavější rozdíl v tomto porovnání je před 2. vrcholem kde u křivky crosshead dochází k protahování a u křivky laser nikoli (je zde vidět pokles síly, ale žádné protažení). 1. vrchol nastal v 35. minutě (teplota ohřívané strany i plechu přibližně stejná a to 450 °C), 2. vrchol nastal v 44. minutě (449 a 435 °C) a 3. vrchol nastal v 51. minutě (451 a 418 °C). Při tomto testu se nepodařilo udržet teplotu plechu tak, jak bychom si představovali, nicméně i tak tento test přináší cenné výsledky. Teploty ve středu a ve čtvrtině vzorku si jsou podobné nejspíš z důvodu většího prohřívání vzorku právě v místě termočlánků, viz obr. 63.



obr. 61 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 450 °C



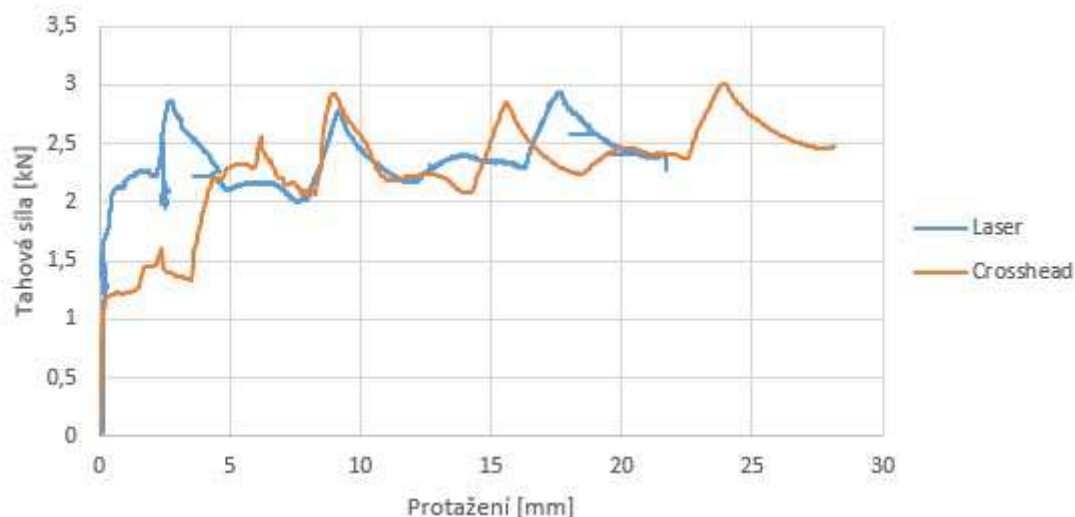
obr. 62 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 450 °C



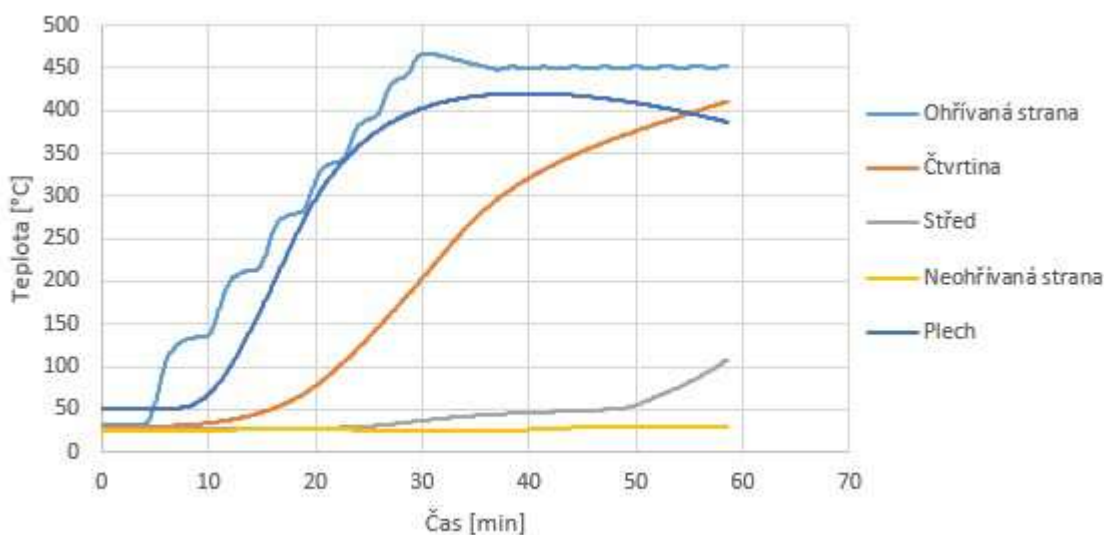
obr. 63 Fotografie z průběhu testu při teplotě 450 °C

Obr. 64 a obr. 65 uvádí výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 64 a obr. 65 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 2,868 kN a prodloužení 2,764 mm, 2. vrchol při tahové síle 2,78 kN a protažení 9,144 mm, 3. vrchol při tahové síle 2,944 kN a prodloužení 17,56 mm. Z porovnání křivek na obr. 64 jsou na křivce crosshead vidět zdánlivé vrcholy, které nastaly v jiné části vzorku než v té, kterou sledujeme, na křivce laser to je znázorněno poklesem síly při minimálním protažení. 1. vrchol nastal v 38. minutě (teplota ohřívané strany 450 a teplota plechu 420 °C), 2. vrchol nastal v 45. minutě (451 a 417 °C) a 3. vrchol nastal v 53. minutě (452 a 402 °C). Teplota ve čtvrtině vzorku začala značně stoupat cca v 13. minutě oproti teplotě ve středu vzorku, která značně začala stoupat až v 50. minutě. Teplota na neohřívané straně vzorku se zvedla celkem o 5 °C.





obr. 64 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 450 °C



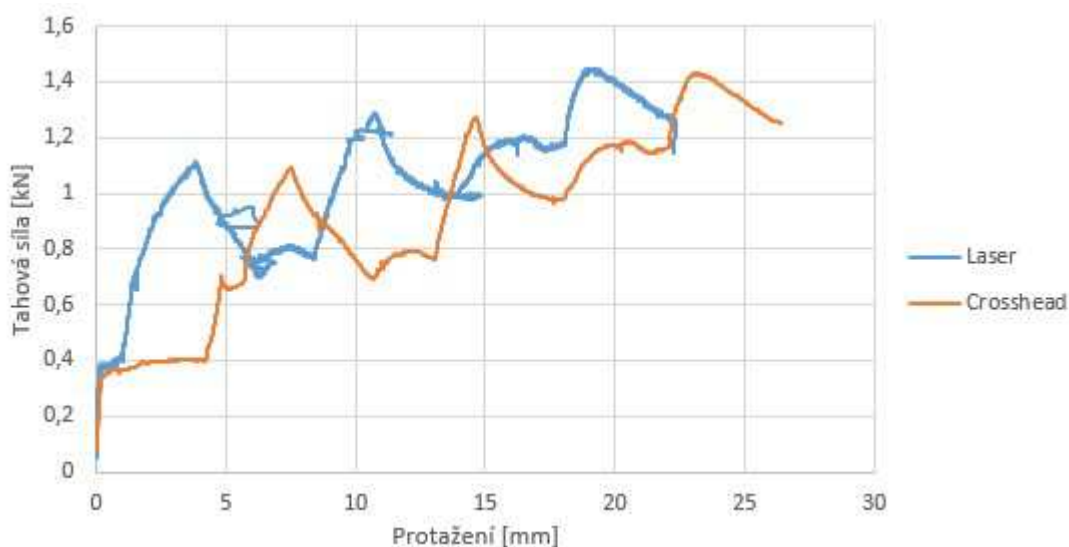
obr. 65 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 450 °C

### 3.6.4 Testy za zvýšené teploty - 600 °C

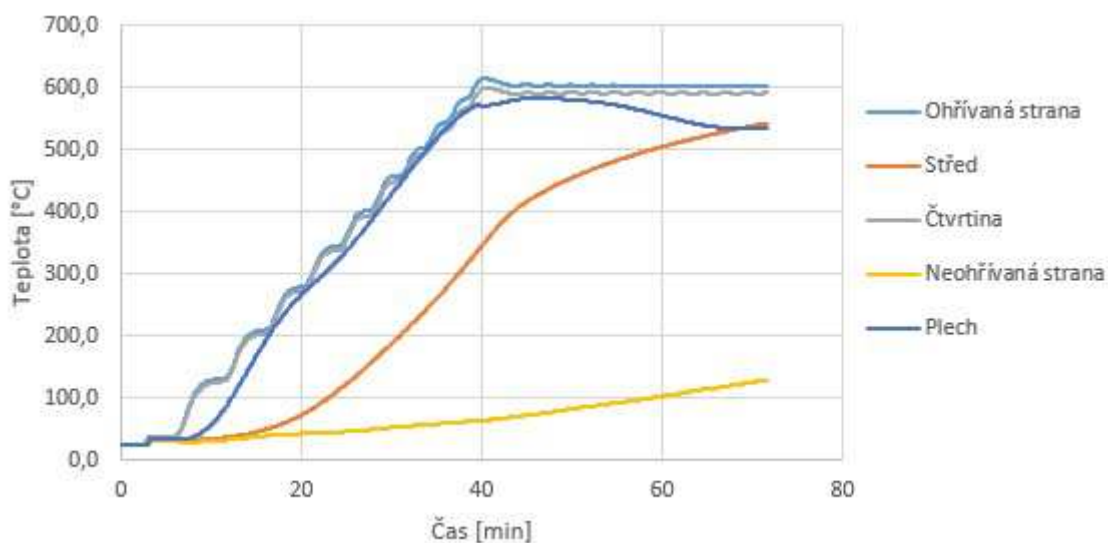
Na obr. 66, obr. 68, obr. 70 a obr. 72 je v grafech znázorněn průběh tahové síly působící na vzorek v závislosti na protažení vzorku za zvýšené teploty stejně jako u předešlých testů. U všech zkoušek došlo vlivem zatížení k porušení vzorku protažením otvoru plechu panelu v místě vrutu. Při zkouškách při teplotě 600 °C byl pozorován drobný ohyb spojovacích vrutů.

Na obr. 67, obr. 69, obr. 71 a obr. 73 je v grafech znázorněn průběh teplot v závislosti na čase stejně jako u předešlých testů.

Na obr. 66 a obr. 67 jsou výsledky ze zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 66 a obr. 67 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 1,112 kN a prodloužení 3,836 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,288 kN a protažení 10,756 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,448 kN a prodloužení 18,996 mm. Zatěžování vzorku začalo při dosažení teploty 600 °C na ohřívané straně vzorku. Jediný rozdíl při porovnání křivek crosshead a laser je na začátku, kde křivka crosshead nabývá většího protažení oproti křivce laser, jinak si je průběh křivek velice podobný. Teploty ohřívané strany a ve čtvrtině vzorku se takřka rovnají po celý čas zkoušky. Teplota ve středu vzorku začala výrazně stoupat v 18. minutě. Teplota na neohřívané straně vzorku vzrostla o 102 °C.

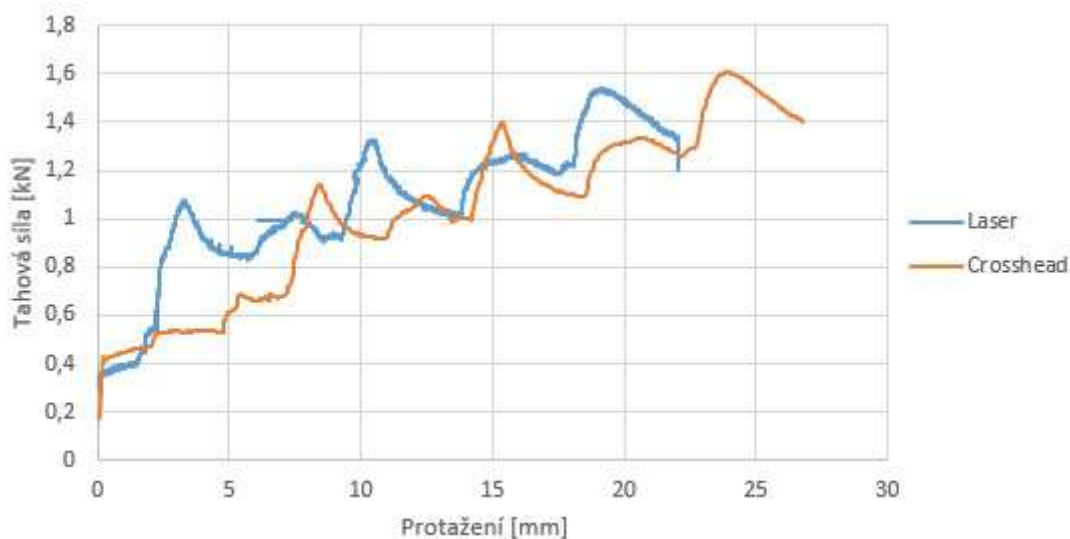


obr. 66 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 600 °C

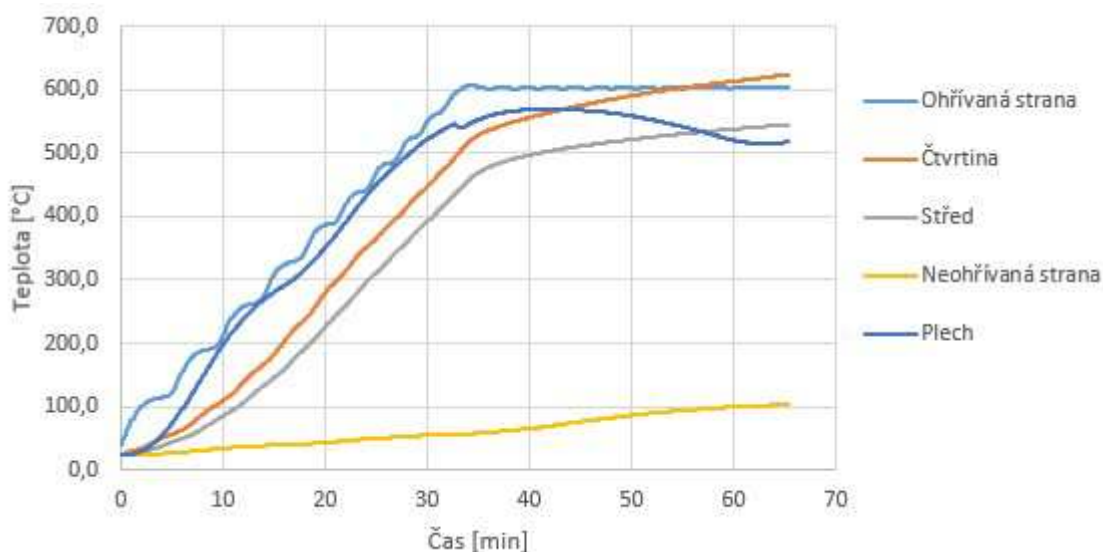


obr. 67 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 600 °C

Obr. 68 a obr. 69 uvádí výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 100 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 68 a obr. 69 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 1,076 kN a prodloužení 3,288 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,328 kN a protažení 10,428 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,544 kN a prodloužení 19,148 mm. Křivky crosshead a laser si jsou velice podobné, jediný rozdíl je opět hned na začátku zatěžování, kdy vlivem protažení celého vzorku dochází u křivky crosshead k většímu protažení oproti křivce laser. 1. vrchol nastal v 42. minutě (teplota ohřívané strany 603 °C a teplota plechu 569 °C), 2. vrchol nastal v 49. minutě (603 a 561 °C) a 3. vrchol nastal v 58. minutě (502 a 531 °C). Teplota ve čtvrtině vzorku ke konci testování přesáhla teplotu na ohřívané straně, nejspíše vlivem kumulace tepla uvnitř vzorku. Teplota ve středu je po celou dobu zatěžování velice podobná křivce ve čtvrtině akorát má pomalejší nárůst. Teplota na neohřívané straně vzrostla celkem o 80 °C.

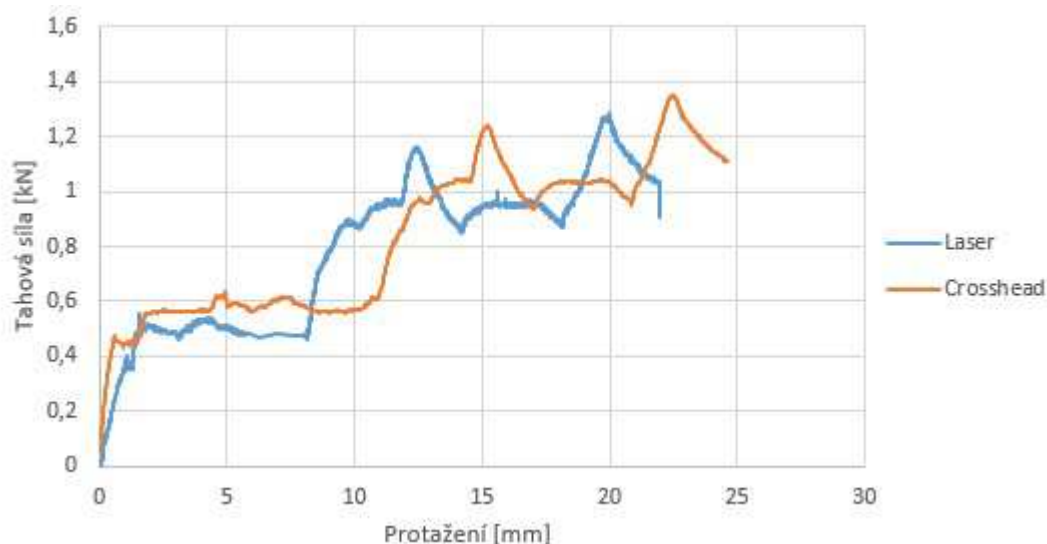


obr. 68 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 600 °C

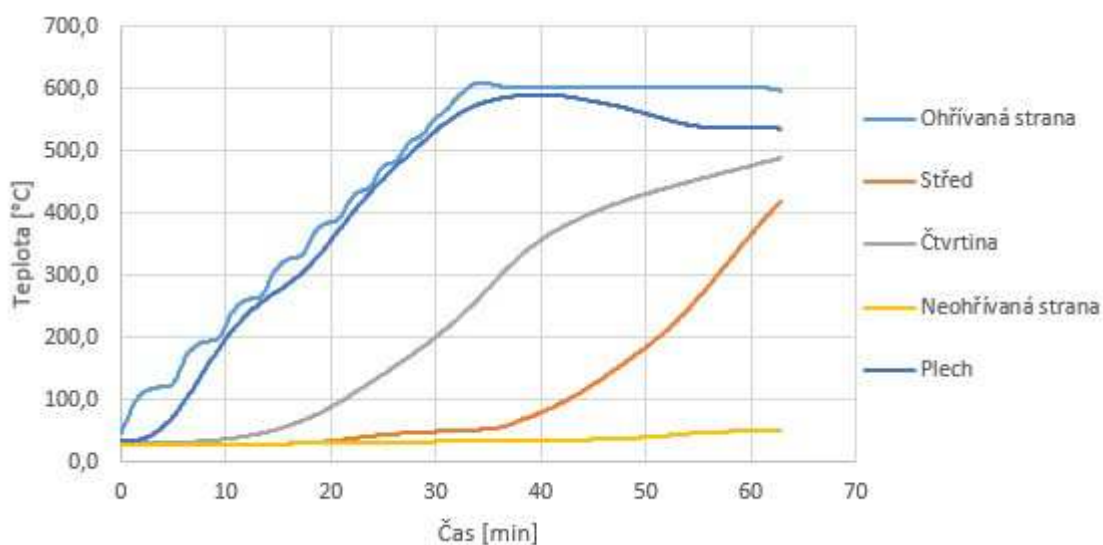


obr. 69 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 600 °C

Obr. 70 a obr. 71 znázorňují výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 8 mm. Z obr. 70 a obr. 71 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 0,556 kN a prodloužení 1,564 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,164 kN a protažení 12,428 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,288 kN a prodloužení 19,96 mm. Průběh křivek laser a crosshead si je velmi podobný, křivka crosshead po celou dobu zatěžování dosahuje vyšších tahových sil i protažení jinak je jejich průběh takřka totožný. Zatěžování začalo při dosažení 600 °C na ohřívané straně vzorku. 1. vrchol byl dosažen v 38. minutě (při teplotě ohřívané strany 603 °C a plechu 588 °C), 2. vrchol byl dosažen v 49. minutě (602 °C a 568 °C) a 3. vrchol byl dosažen v 56. minutě (602 °C a 538 °C). Teplota ve čtvrtině začala výrazně stoupat cca v 10. minutě zahřívání, teplota ve středu vzorku začala výrazně stoupat cca v 35. minutě zahřívání. Teplota na neohřívané straně vzorku vstoupila celkem o 24 °C.

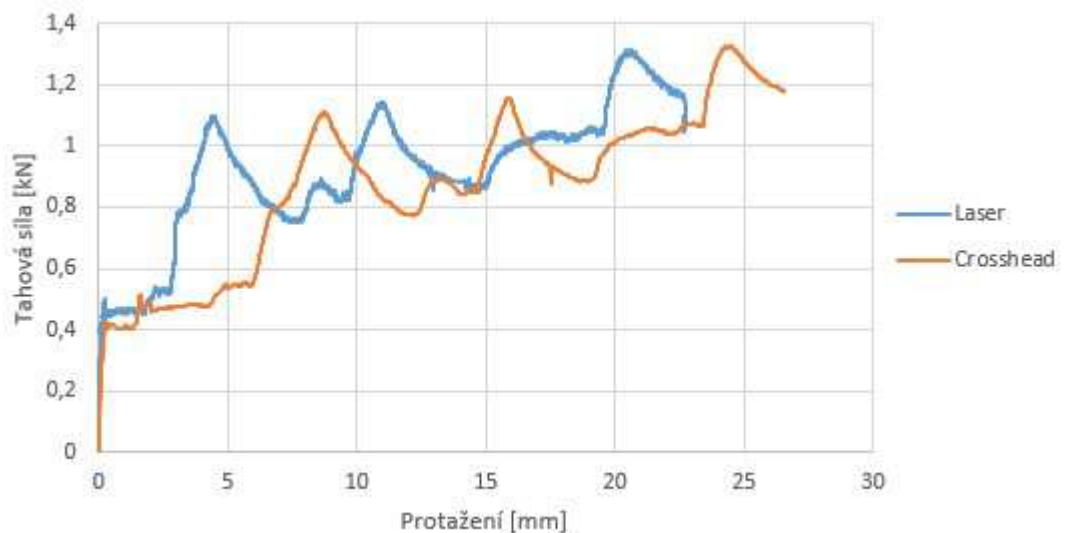


obr. 70 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 600 °C

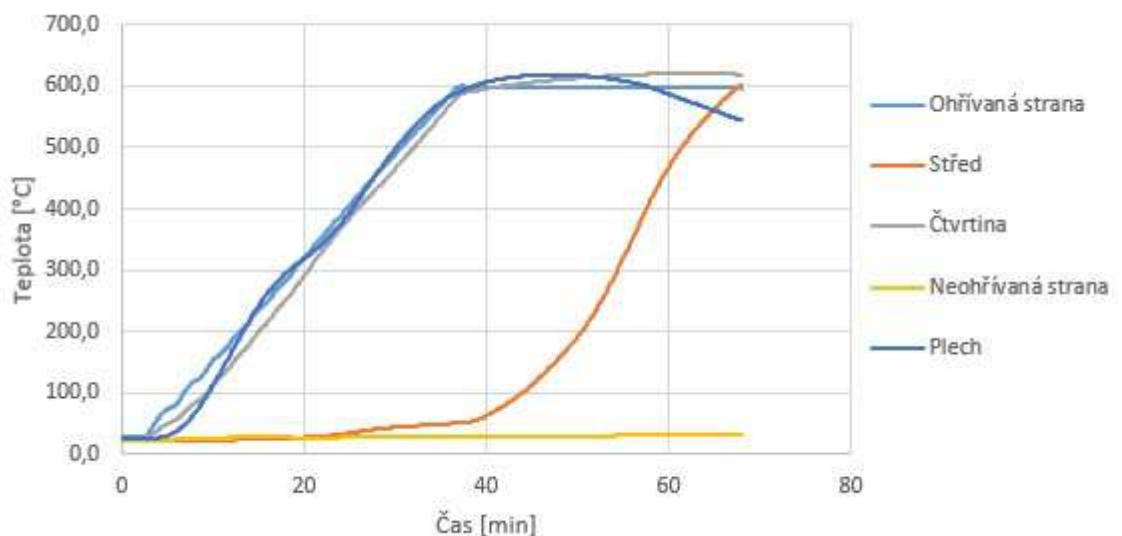


obr. 71 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 600 °C

Obr. 72 a obr. 73 uvádí výsledky zkoušky přípoje panelu tl. 230 mm s plechem tl. 10 mm. Z obr. 72 a obr. 73 můžeme vyčíst 1. vrchol při tahové síle 1,1 kN a prodloužení 4,412 mm, 2. vrchol při tahové síle 1,144 kN a protažení 10,956 mm, 3. vrchol při tahové síle 1,312 kN a prodloužení 20,596 mm. Při porovnání křivek se oproti křivce laser křivka crosshead na začátku zatěžování, které začalo při dosažení 600 °C na ohřivané straně vzorku, dosahuje většího protažení, z důvodu teplotních změn a deformací celého vzorku. 1. vrchol byl dosažen v 46. minutě (při teplotě ohřivané strany 597 °C a plechu 617 °C), 2. vrchol byl dosažen v 53. minutě (597 a 613 °C) a 3. vrchol v 61. minutě (598 a 581 °C). Teplota ve čtvrtině vzorku je po celou dobu zahřívání přibližně stejná jako na ohřivané straně vzorku. Teplota ve středu vzorku se začala výrazně zvyšovat cca v 40. minutě zahřívání. Teplota na neohřivané straně se zvedla celkem o 10 °C.



obr. 72 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 600 °C

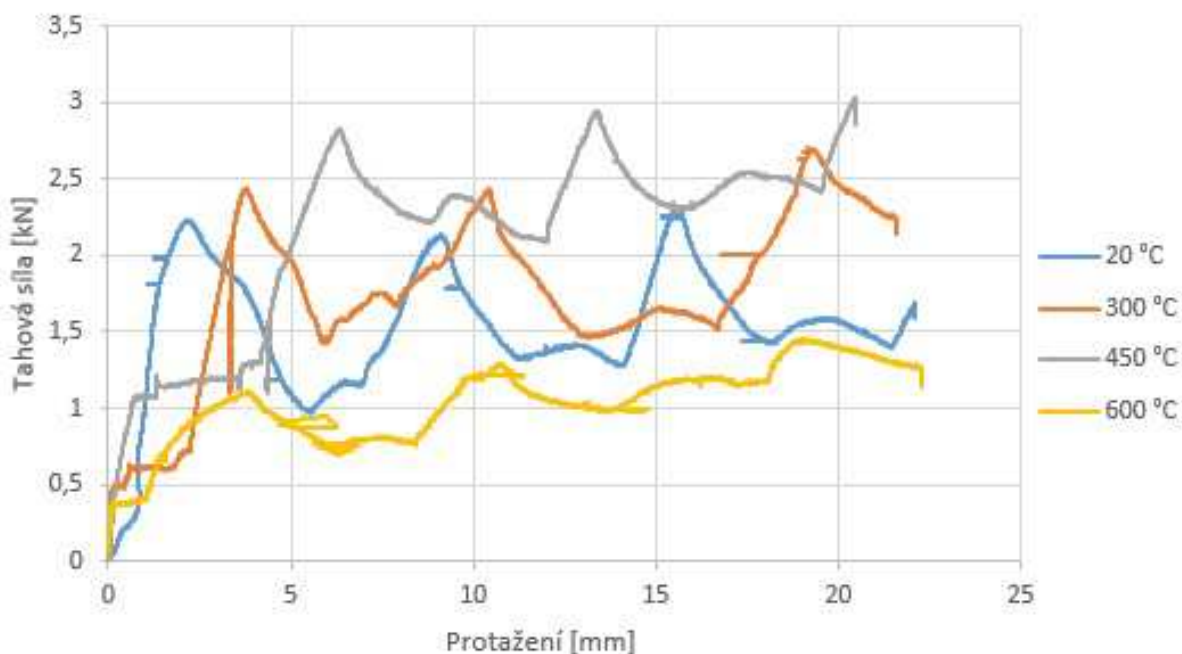


obr. 73 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 600 °C

## 3.7 Porovnání výsledků

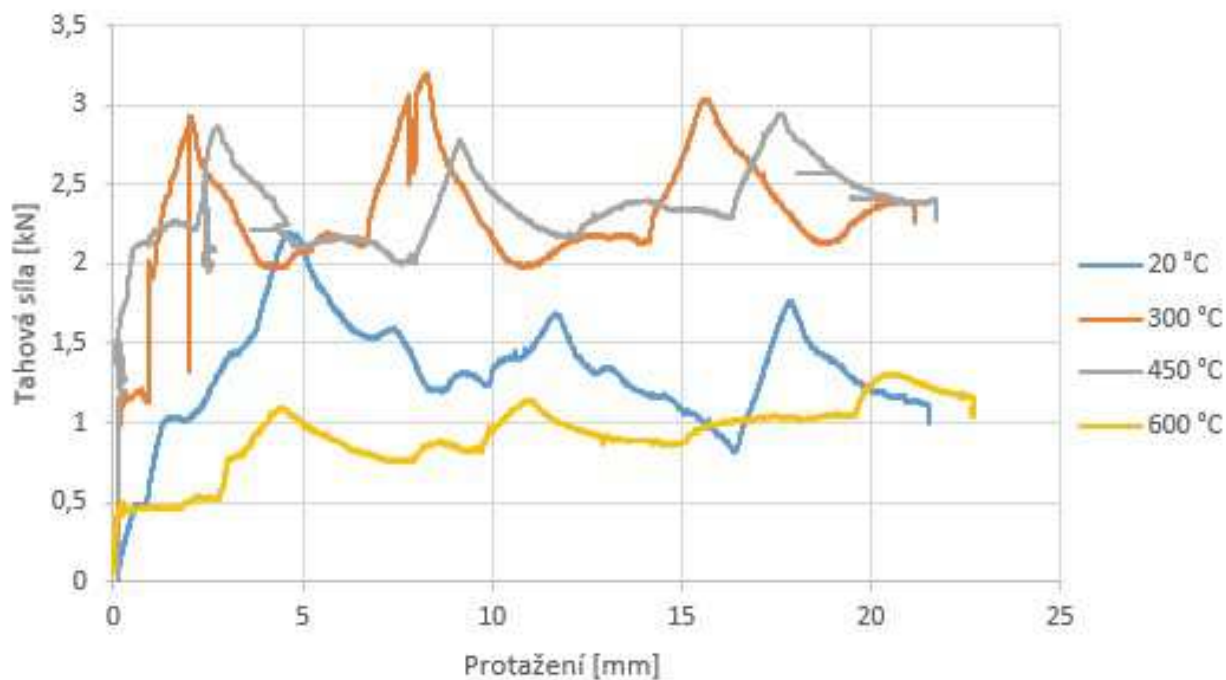
### 3.7.1 Vliv teploty při stejné tloušťce panelu a plechu

Na obr. 74 je vidět porovnání zkoušek panelu SPA100E s plechem tloušťky 8 mm při různých teplotách. Z předchozích výsledků se jedná o křivku laser. Z průběhů křivek můžeme usoudit, že s rostoucí teplotou se zvyšuje tažnost prvku, maximální vyvinutá tahová síla se rovněž zvyšuje u vzorků při 300 °C a 450 °C. U křivky 600 °C dochází ke značnému snížení maximálních tahových sil.



obr. 74 Porovnání zkoušek panelu SPA100E s plechem tl. 8 mm při různých teplotách

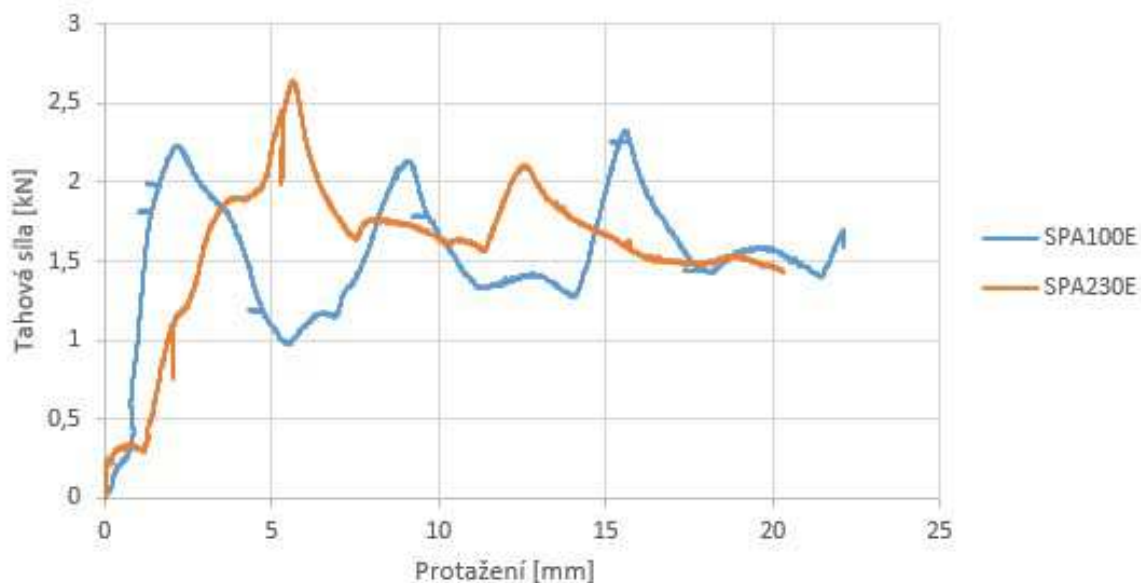
Na obr. 75 je vidět porovnání zkoušek panelu SPA230E s plechem tloušťky 10 mm při různých teplotách. Z průběhu křivek můžeme říct, že s rostoucí teplotou se opět zvyšuje protažení otvoru spoje. Maximální vyvinuté tahové síly u přípojů při teplotách 300 °C a 450 °C jsou srovnatelné. Při teplotě 20 °C je maximální síla nižší a při teplotě 600 °C je nejnižší. Oproti obr. 74 je na obr. 75 rozdíl mezi křivkami 450 °C, kde na obr. 74 dosahuje vyšších hodnot tahové síly než křivka 300 °C oproti obr. 75, kde křivka 450 °C dosahuje nižších hodnot tahové síly oproti křivce 300 °C.



obr. 75 Porovnání zkoušek panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při různých teplotách

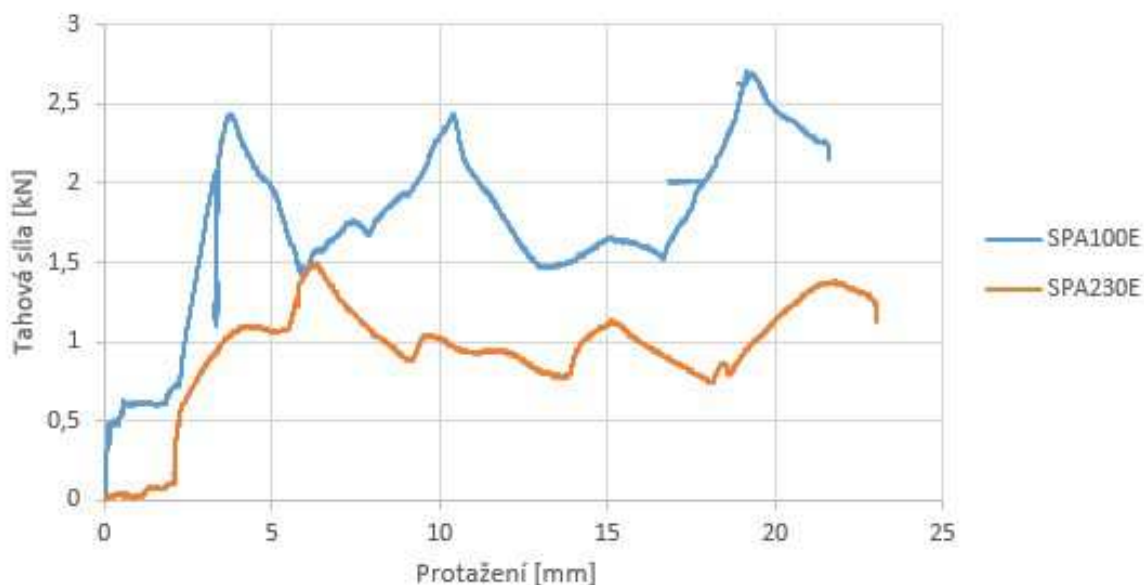
### 3.7.2 Vlivu tloušťky panelu při shodné teplotě a shodné tloušťce plechu

Na obr. 76 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E a SPA230E na plech tloušťky 8 mm při teplotě 20 °C. U panelu SPA230E je vyvinuta vyšší tahová síla při delším prodloužení než u panelu SPA100E.



obr. 76 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 8 mm při teplotě 20 °C

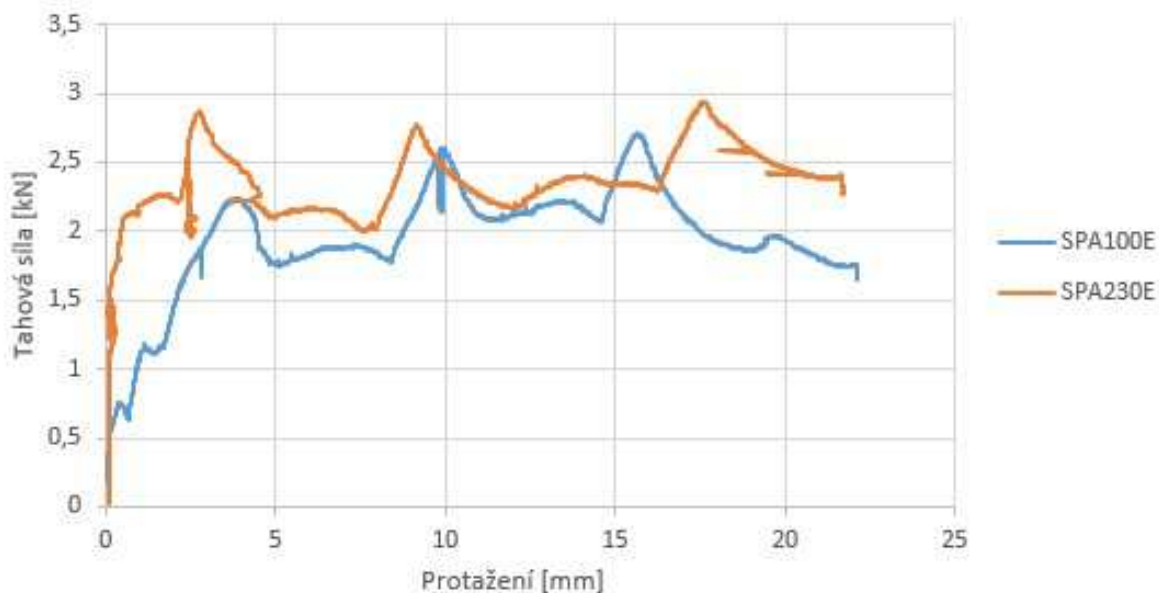
Na obr. 77 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E a SPA230E na plech tloušťky 8 mm při teplotě 300 °C. U panelu SPA100E bylo dosaženo výrazně vyšší tahové síly při menším protažení než u panelu SPA230E.



obr. 77 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 8 mm při teplotě 300 °C

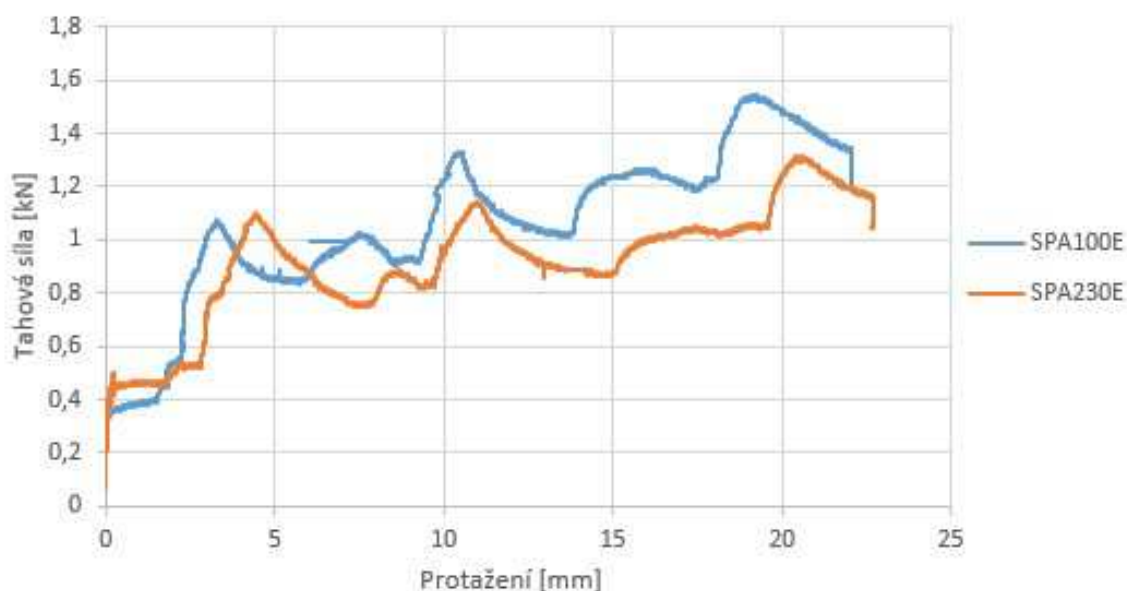


Na obr. 78 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E a SPA230E na plech tloušťky 10 mm při teplotě 450 °C. U panelu SPA230E je dosaženo vyšší tahové síly při kratším protažení než u panelu SPA100E. Obě křivky si jsou velice podobné.



obr. 78 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 10 mm při teplotě 450 °C

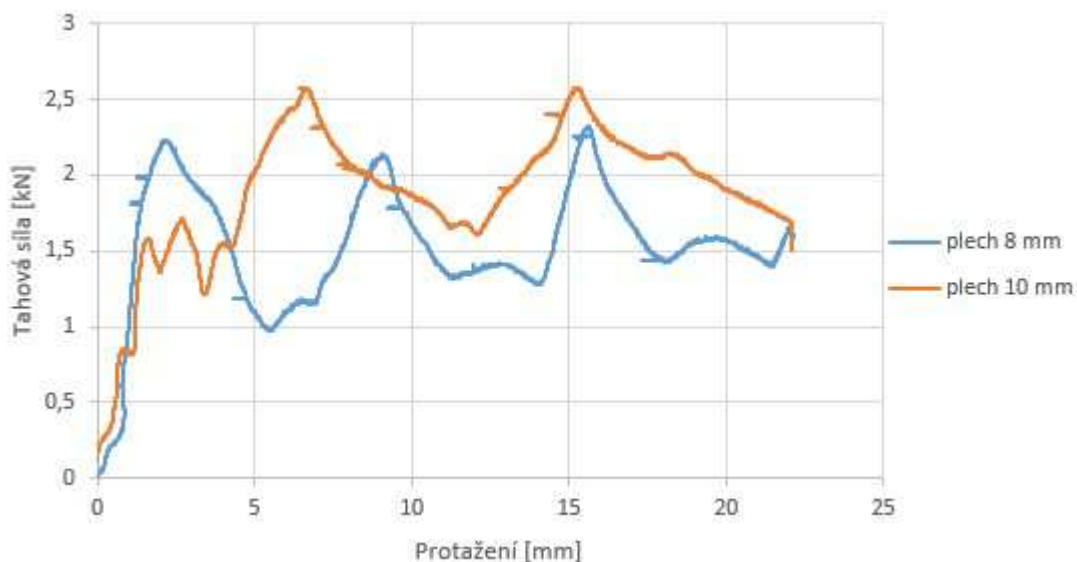
Na obr. 79 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E a SPA230E na plech tloušťky 10 mm při teplotě 600 °C. U panelu SPA100E je vyvinuta vyšší tahová síla při kratším protažení než u panelu SPA230E. Obě křivky si jsou velice podobné.



obr. 79 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 10 mm při teplotě 600 °C

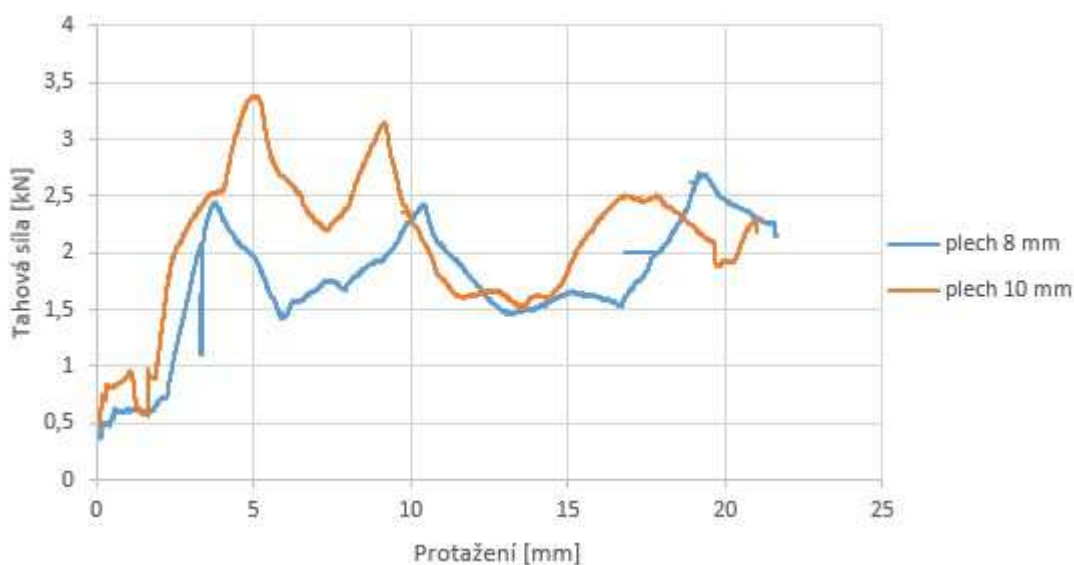
### 3.7.3 Vliv tloušťky plechu při shodné tloušťce panelu a shodné teplotě

Na obr. 80 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E na plech různé tloušťky při teplotě 20 °C. Křivka s plechem tl. 10 mm dosahuje vyšších hodnot tahové síly při kratším protažení než křivka s plechem tl. 8 mm.



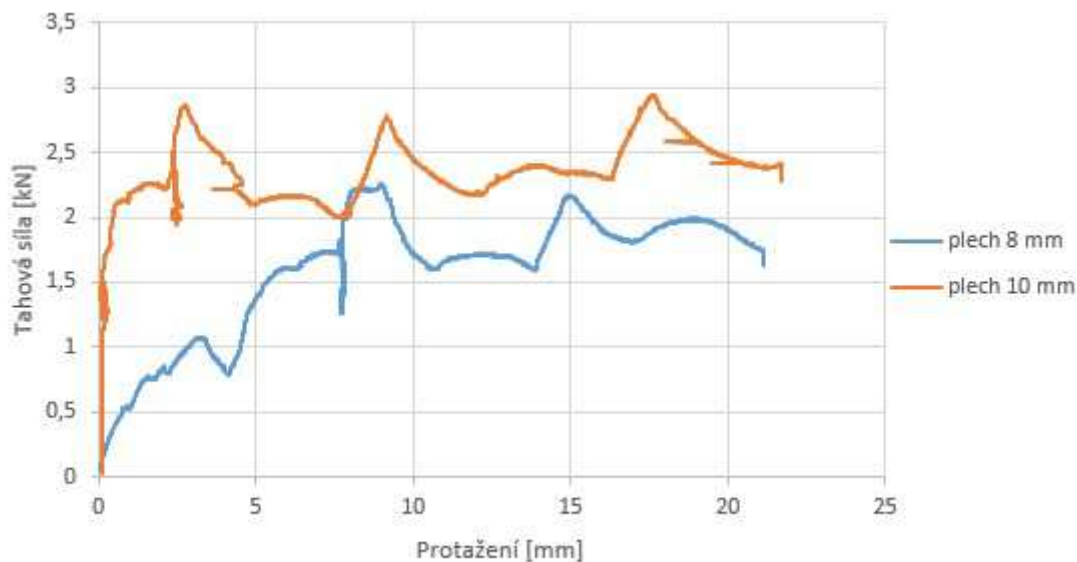
obr. 80 Porovnání zkoušek přípoje panelu SPA100E s plechem různé tloušťky při teplotě 20 °C

Na obr. 81 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA100E na plech různé tloušťky při teplotě 300 °C. Křivka s plechem tl. 10 mm dosahuje vyšších hodnot tahové síly při kratším protažení než křivka s plechem tl. 8 mm. V pozdější fázi grafu se tyto velikosti sil začínají rovnat vlivem prohřívání vzorku.



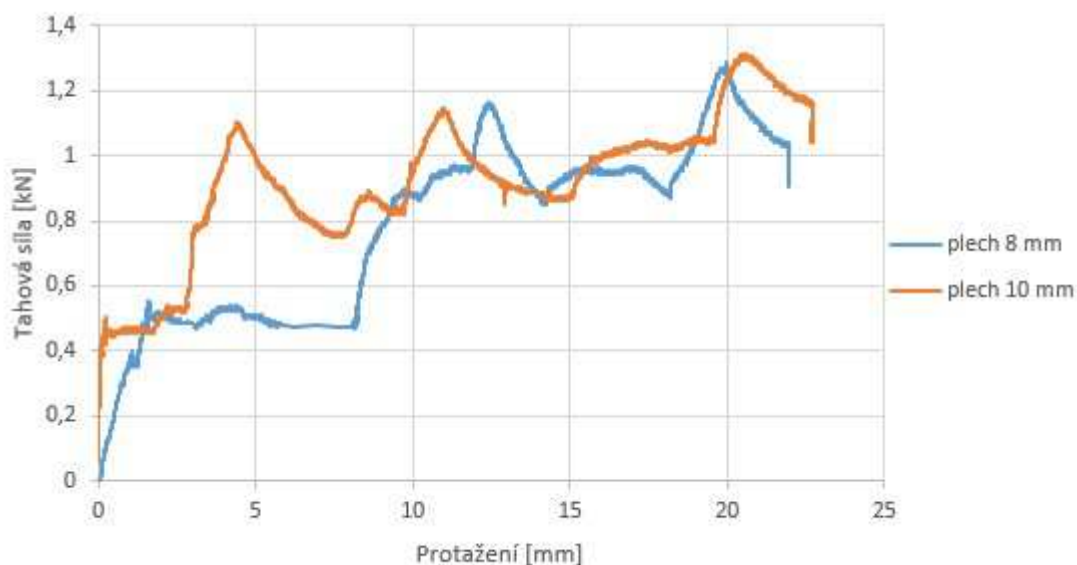
obr. 81 Porovnání zkoušek panelu SPA100E s plechem různé tloušťky při teplotě 300 °C

Na obr. 82 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA230E na plech různé tloušťky při teplotě 450 °C. Při této teplotě je tahová síla u křivky s plechem tl. 10 mm vyšší při kratším protažení než u křivky s plechem tl. 8 mm.



obr. 82 Porovnání zkoušek panelu SPA230E s plechem různé tloušťky při teplotě 450 °C

Na obr. 83 je vidět porovnání chování přípoje panelu SPA230E na plech různé tloušťky při teplotě 600 °C. Křivka s plechem tl. 10 mm dosahuje vyšších hodnot tahové síly při kratším protažení než u křivka s plechem tl. 8 mm. V pozdější fázi grafu se tyto velikosti sil začínají rovnat vlivem prohřívání vzorku.



obr. 83 Porovnání zkoušek panelu SPA230E s plechem různé tloušťky při teplotě 600 °C

### 3.8 Tuhost přípoje

Pro určení tuhosti šroubového přípoje ve střihu se měří maximální síla a protažení ve smyku odpovídajícímu maximálnímu zatížení přípoje. Podle doporučení ECCS [12] je toto zatížení definováno jako nejmenší z následujících hodnot (obr. 84):

maximální síla zaznamenaná během zkoušky

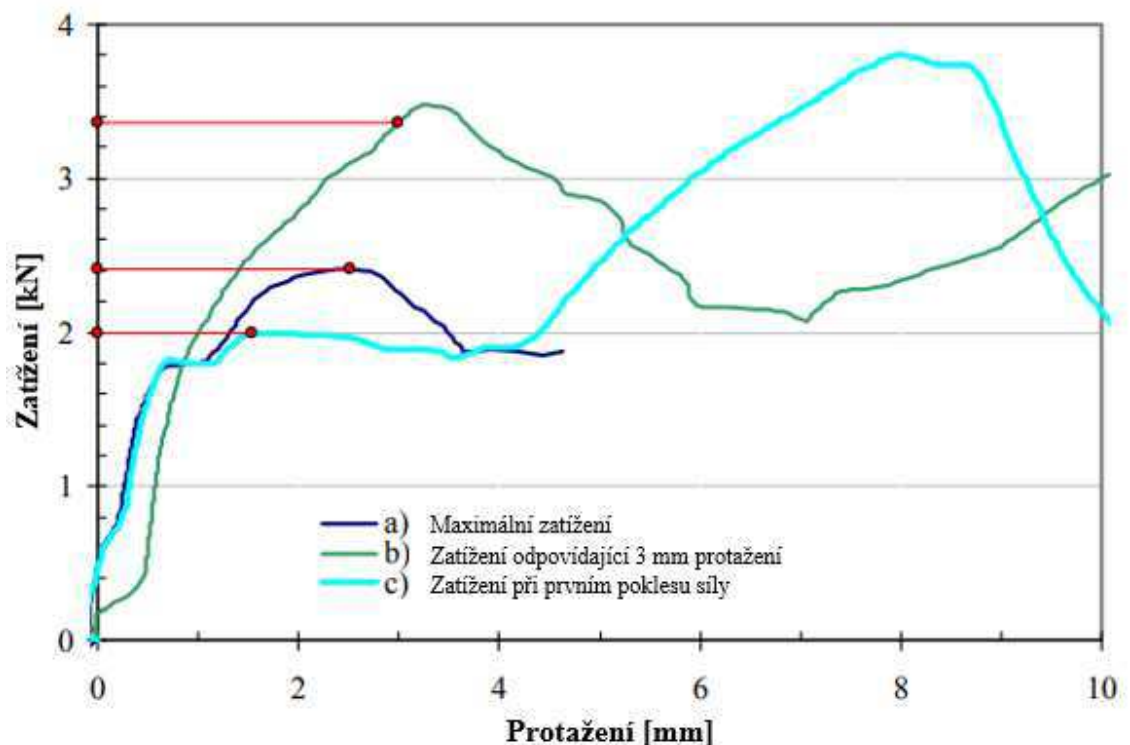
- síla, u které je pozorováno první snížení v křivce zatížení – deformace
- síla odpovídající posunu 3 mm, pokud k tomu dojde na stoupající části křivky zatížení - deformace.

$$\text{Tuhost } K_t \text{ se vypočítá jako: } K_t = \frac{F_{uit}}{\Delta d_{(ult)}}$$

kde  $F_{uit}$  je zatížení (síla) v kN definovaná výše

$\Delta d_{(ult)}$  je protažení v mm odpovídající síle  $F_{uit}$ .

Vypočítané tuhosti přípojů všech sendvičových panelů k ocelovým plechům při běžné a zvýšené teplotě jsou shrnuty v tab. 3. Maximální síla a k ní odpovídající protažení jsou taktéž uvedeny v tab. 3.



obr. 84 Příklady křivek smykového zatížení a posunutí a definice maximálního zatížení [12]

tab. 3 Výsledky tuhostí přípojí

Zkouška			Výsledek			
Typ panelu	Teplota [°C]	Tloušťka podpůrné konstrukce (plechu) [mm]	Maximální síla $F_{ult}$ [kN]	Protažení $\Delta d_{(ult)}$ odpovídající síle $F_{ult}$ [mm]	Tuhost [kN/mm] $K_t = \frac{F_{ult}}{\Delta d_{(ult)}}$	
SPA100E Panel tl. 100 mm	20	8	2,228	2,112	1,055	
		10	1,692	2,692	0,629	
	300	8	1,716	3,0	0,572	
		10	2,272	3,0	0,757	
	450	8	1,188	3,0	0,396	
		10	1,952	3,0	0,651	
	600	8	0,972	3,0	0,324	
		10	1,016	3,0	0,339	
	SPA230E Panel tl. 230 mm	20	8	1,608	3,0	0,536
			10	1,396	3,0	0,465
		300	8	1,064	3,0	0,355
			10	2,416	2,096	1,153
450		8	1,044	3,0	0,348	
		10	2,256	1,776	1,270	
600		8	0,48	3,016	0,159	
		10	0,752	3,0	0,251	

Z tab. 3 je možné vyčíst nejvyšší tuhost přípoje 1,27 kN/mm při zkoušce přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 450 °C a nejnižší tuhost přípoje 0,159 kN/mm při zkoušce přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 600 °C.

Dále z tab. 3 můžeme vyčíst tuhost přípoje v závislosti na teplotě:

- u přípoje panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm se tuhost se zvyšující se teplotou snižuje,
- u přípoje panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm se tuhost při teplotě 300 °C lehce zvyšuje a následně s vyšší teplotou se opět snižuje,
- u přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm se tuhost se zvyšující se teplotou snižuje,
- u přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm se tuhost rapidně zvyšuje do teploty 450 °C a následně při dalším zvýšení teploty rapidně klesá.

Z toho plyne, že tloušťka plechu představující nosnou ocelovou konstrukci má značný vliv na tuhost přípoje při zvýšené teplotě. Vliv teploty na tuhost přípoje není zcela jednoznačný. U všech zkoušek nebyl potvrzen shodný jev. Například u přípoje panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm se tuhost se zvyšující se teplotou stále snižuje, u přípoje panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm se tuhost se zvyšující se teplotou nejprve zvyšuje a následně snižuje, u přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm se tuhost se zvyšující se teplotou stále snižuje a u přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm se tuhost se zvyšující se teplotou hodně zvyšuje a poté rapidně klesá.

## 4 Numerický model

Pro vytvoření numerického modelu experimentu byl zvolen program ANSYS Workbench aktuální verze 19.2 [13], který disponuje příjemným a jednoduchým uživatelským prostředím. Pro numerický model byly vybrány experimenty přípoje panelu tl. 230 mm k plechu tl. 8 a 10 mm při běžné teplotě a model přípoje k plechu tl. 10 mm při teplotě 300 °C pro teplotní analýzu.

ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multifyzikálnímu pojetí programu ANSYS je lze také zahrnout do jediné, společné analýzy. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti. [14]

ANSYS patří mezi inženýrské systémy využívající metodu konečných prvků (MKP). ANSYS je průkopník multifyzikálních analýz s vedoucí pozicí v klasických oborech, jakými jsou strojírenství, automobilová a dopravní technika, energetika a také stavební aplikace s procesním inženýrstvím. Tento software lze s velkou výhodou používat i v dalších (úzce specializovaných) oborech, jako je např. mikroelektronika nebo biomechanika. [14]

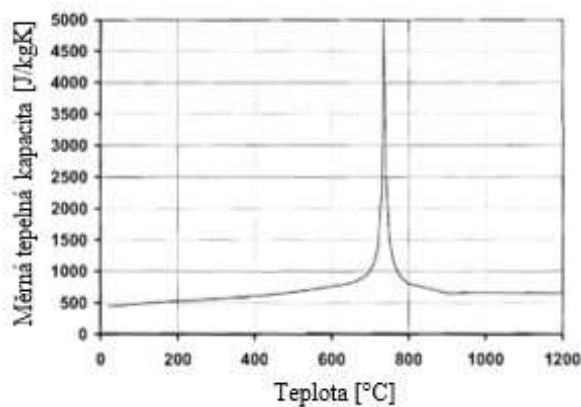
### 4.1 Popis modelu

#### 4.1.1 Materiálové vlastnosti

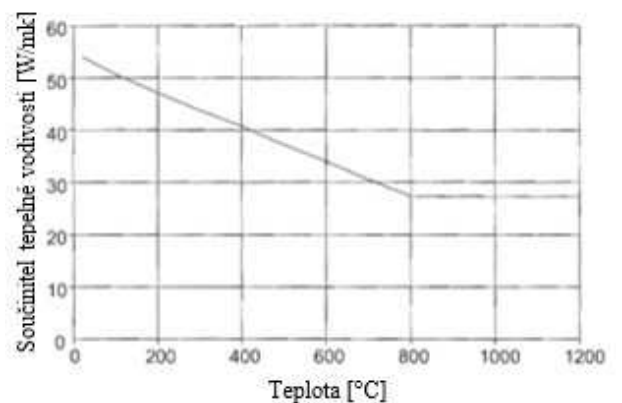
Numerický model obsahuje vlastnosti několika materiálů, které tvoří jednotlivé části modelu. Jedná se konkrétně o ocelový plech reprezentující nosnou ocelovou konstrukci, ocelový plech tvořící opláštění panelu, materiál samořezných šroubů, podložky šroubu a materiál výplně sendvičového panelu. Materiálové vlastnosti použité pro model jsou shrnuty v tab. 4 na konci této podkapitoly.

### Ocelový plech (reprezentující nosnou ocelovou konstrukci)

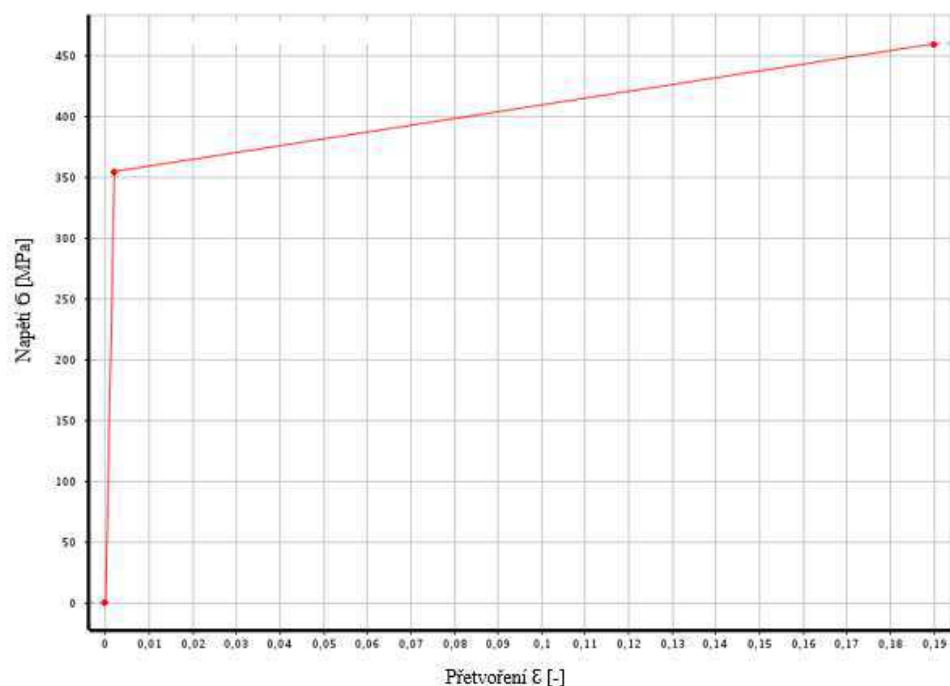
Jako materiál byla zvolena ocel třídy S355J2G3, pro kterou byly do programu zadány tyto parametry: hustota materiálu  $7850 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul pružnosti  $210 \text{ GPa}$ , Poissonova konstanta  $0,3$ , mez kluzu  $355 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $460 \text{ MPa}$ , měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě viz obr. 85 a součinitel tepelné vodivosti také v závislosti na teplotě viz obr. 86. Tento průběh měrné tepelné kapacity a součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě byl převzat z normy ČSN EN 1993-1-2 [13]. Závislost napětí na relativním přetvoření je vidět na obr. 87. Obrázek uvádí zjednodušený pracovní diagram (bilineární se zpevněním), který byl do modelu pro ocel zaveden. Z obrázku můžeme vyčíst relativní přetvoření  $19 \%$ , mez kluzu i mez pevnosti oceli.



obr. 85 Měrná tepelná kapacita uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [13]



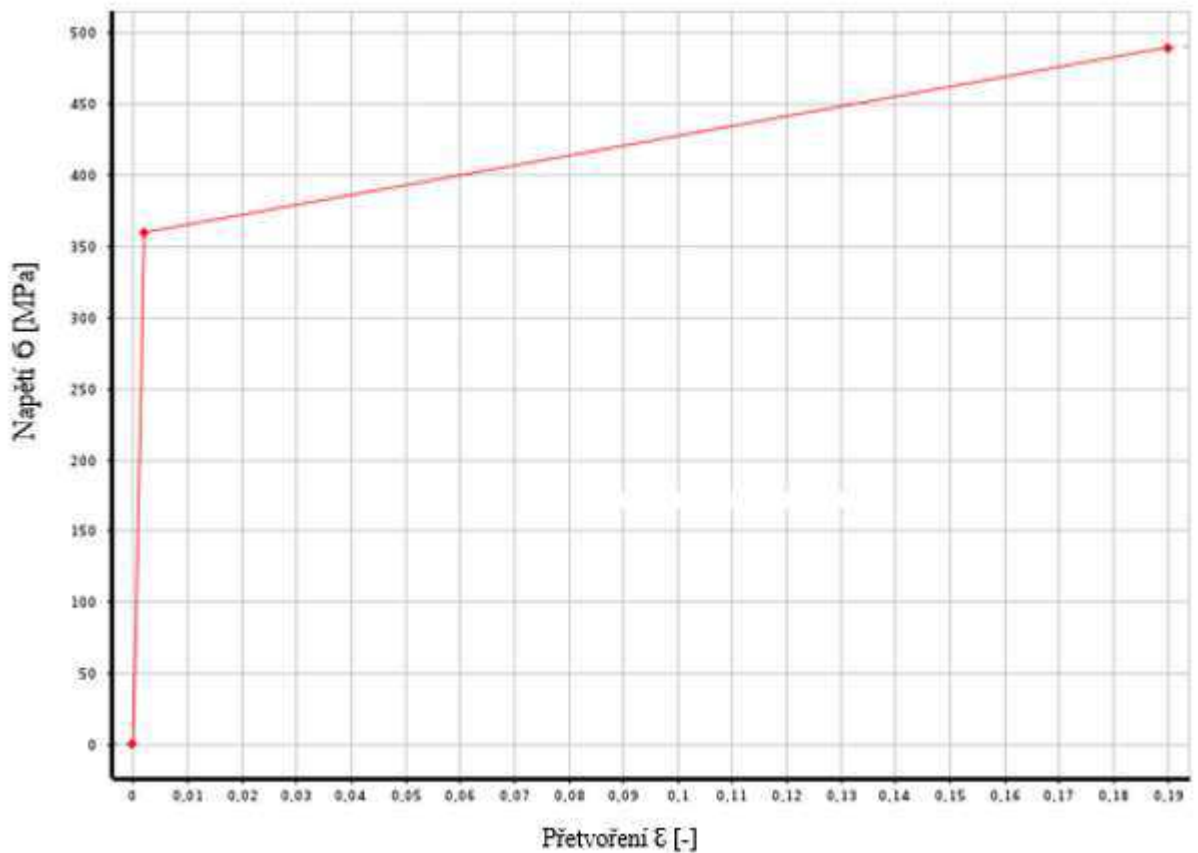
obr. 86 Součinitel tepelné vodivosti uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [13]



obr. 87 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy S355J2G3

## Ocelový plech panelu

Ocel, z které jsou vyrobeny povrchové plechy pro panely je třídy S280GD+Z. Pro tento materiál byly do programu zadány tyto parametry: hustota materiálu  $7850 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul pružnosti  $210 \text{ GPa}$ , Poissonova konstanta  $0,3$ , mez kluzu  $360 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $490 \text{ MPa}$ , měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti jsou stejné jako u ocelového plechu reprezentující nosnou ocelovou konstrukci. Závislost napětí na relativním přetvoření je vidět na obr. 88. Z idealizovaného pracovního diagramu je možné vyčíst relativní přetvoření  $19 \%$ , mez kluzu i mez pevnosti oceli.

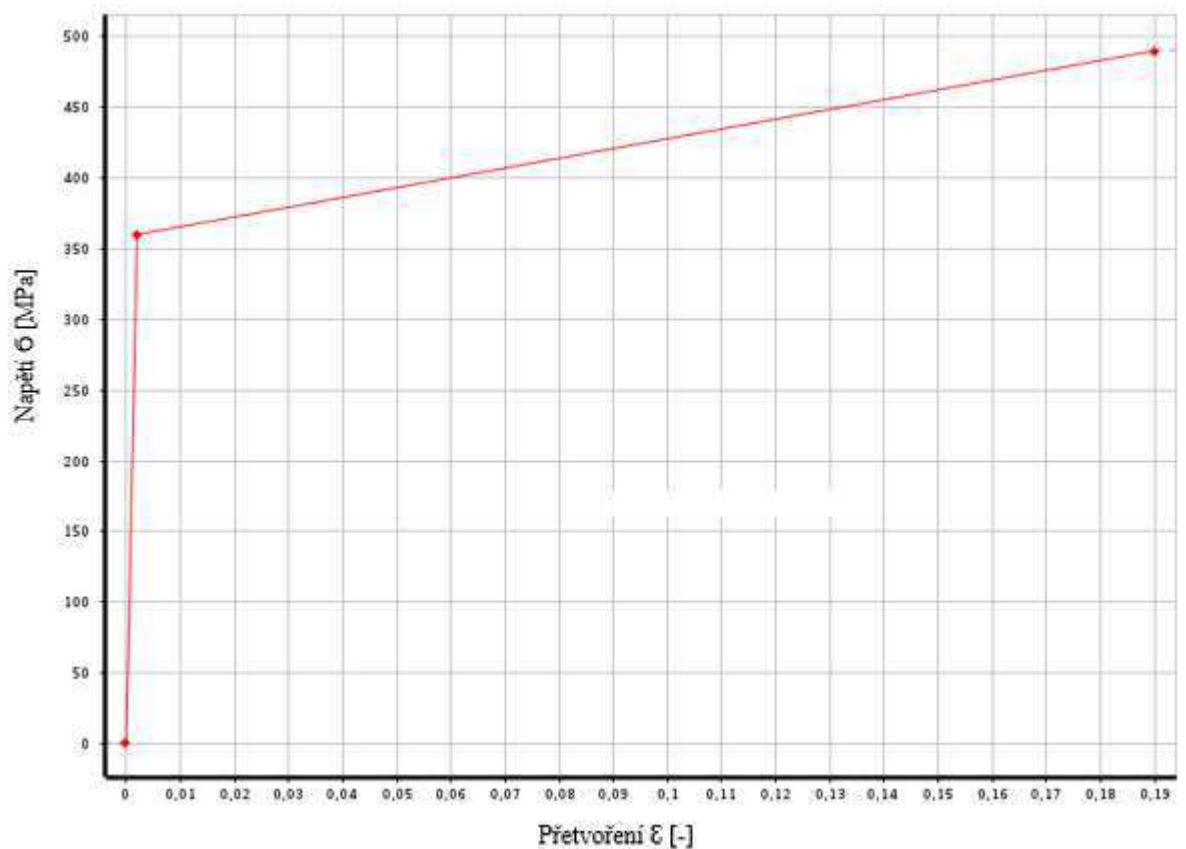


obr. 88 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy S280GD+Z



### Samořezné šrouby

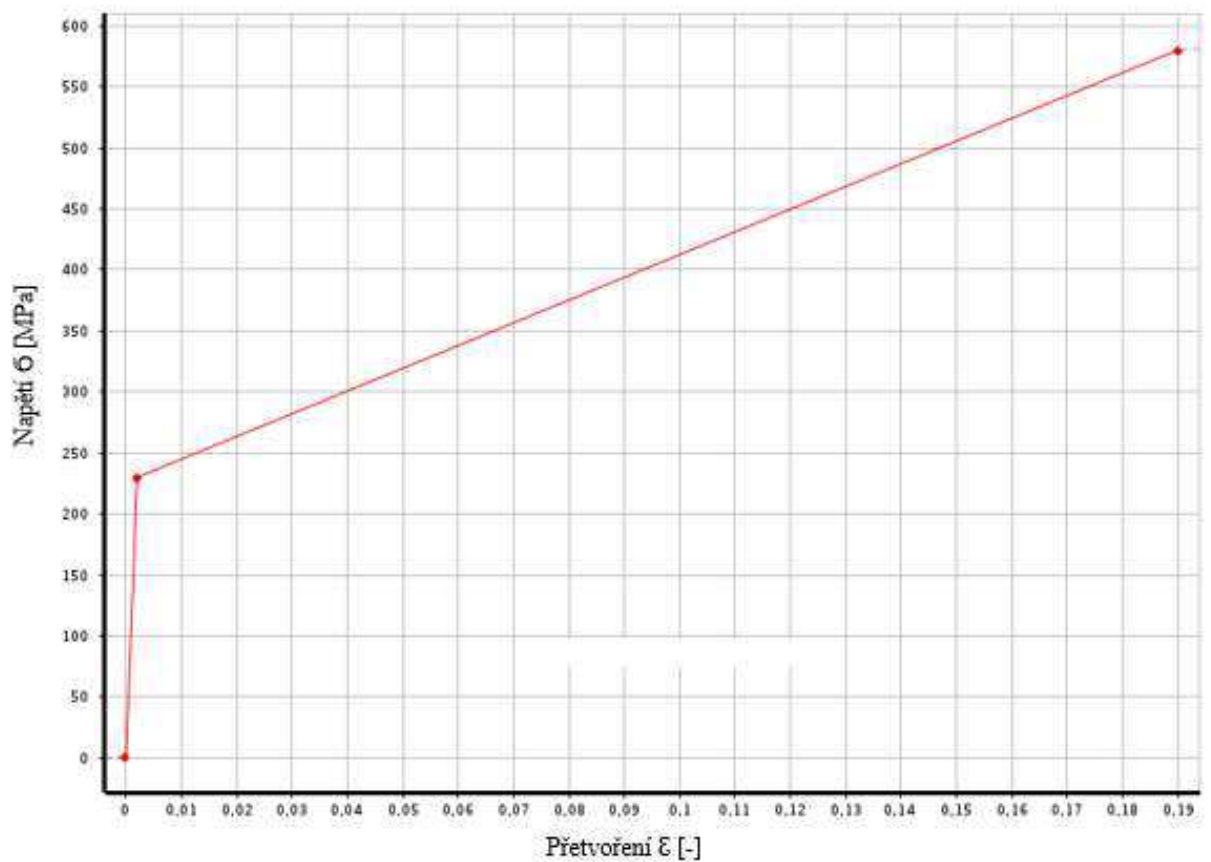
Samořezné šrouby jsou vyrobeny z materiálu třídy 1.4567, který je také možné nalézt pod označením AISI 304Cu. Jedná se o austenitickou ocel odolnou korozi. Pro tento materiál byly do programu zadány tyto vlastnosti: hustota materiálu  $7900 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul pružnosti  $195 \text{ GPa}$ , Poissonova konstanta  $0,28$ , mez kluzu  $210 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $530 \text{ MPa}$ , měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti jsou stejné jako u ocelového plechu reprezentující nosnou ocelovou konstrukci. Závislost napětí na relativním přetvoření je vidět na obr. 89. Z obrázku je možné vyčíst relativní přetvoření  $19 \%$ , mez kluzu i mez pevnosti oceli.



obr. 89 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy 1.4567

## Podložky

Podložky jsou vyrobeny z materiálu třídy 1.4301, také pod označením AISI 304 (austenitická ocel). Pro tento materiál byly do programu zadány tyto parametry: hustota materiálu  $7800 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul pružnosti 197 GPa, Poissonova konstanta 0,28, mez kluzu 230 MPa, mez pevnosti 580 MPa, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti jsou stejné jako u ocelového plechu reprezentující nosnou ocelovou konstrukci. Na obr. 90 můžeme vidět graf napětí v závislosti na relativním přetvoření, z něhož můžeme vyčíst maximální relativní přetvoření 19 %, mez kluzu i mez pevnosti oceli.



obr. 90 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy 1.4301

## Minerální vata

Minerální vata je mezi plechy v panelu ve formě takzvaných lamel, které jsou uvnitř metodicky poskládány tak, aby bylo co nejvíce zabráněno prostupu tepla. Tyto lamely mají různé materiálové charakteristiky pro jednotlivé směry zatěžování (chová se jako anizotropní materiál). Jelikož tuto funkci ANSYS Workbench nenabízí, bylo třeba tyto vlastnosti odvodit ze skladby panelu a směru vláken. Do programu byly zadány tyto vlastnosti a hodnoty (jedná se o hodnoty zatěžování podél vláken): hustota materiálu  $120 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul pružnosti  $11,6 \text{ MPa}$ , Poissonova konstanta  $0$ , mez kluzu  $0,04 \text{ MPa}$ , mez pevnosti  $0,86 \text{ MPa}$ , měrná tepelná kapacita je konstantní  $1150 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  a součinitel tepelné vodivosti je také konstantní a to  $0,039 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Modelování lamel bylo zanedbáno z důvodu nedostatku informací o velikosti a uspořádání těchto lamel vůči vnějším plechům. Vzhledem k velikosti a sledované části zkoušeného vzorku nebudou výsledky výrazně ovlivněny.

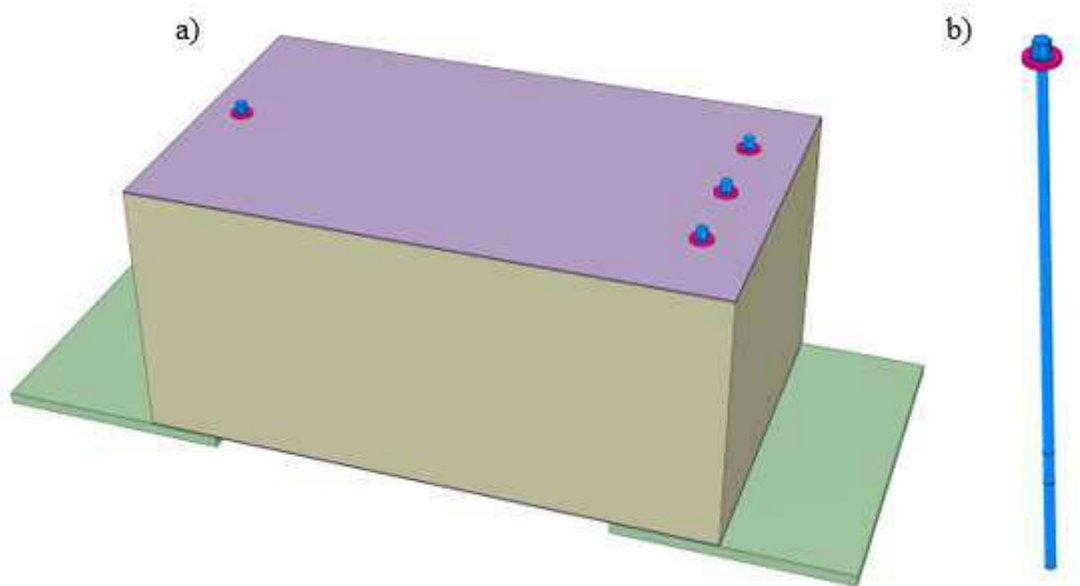
tab. 4 Souhrn materiálových vlastností

Materiálové vlastnosti při $20 \text{ }^\circ\text{C}$	Youngův modul pružnosti [MPa]	Poissonova konstanta	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Elastické přetvoření [%]	Maximální přetvoření [%]	Tangenciální modul plasticity [MPa]
Plech	210000	0,3	355	460	0,17	19	557,59
Plech panelu	210000	0,3	360	490	0,17	19	690,44
Šroub	194560	0,28	210	530	0,11	19	1693,83
Podložka	197120	0,28	230	580	0,12	19	1853,49
Minerální vata	11,6	0	0,04	0,086	0,34	153,67	0,03

## 4.1.2 Geometrie

Pro modelování byl zvolen experiment s tloušťkou panelu 230 mm. Byl vymodelován model podle výkresu v příloze 2. Geometrie z programu ANSYS je znázorněna na obr. 91a.

Model se skládá z 2 ocelových plechů tl. 10 mm představující nosnou ocelovou konstrukci, na které je pomocí 4 šroubů upevněn vzorek sendvičového panelu Ruukki tl. 230 mm. Tento panel byl namodelován pomocí dvou plechů tl. 0,5 mm na vnitřní straně a tl. 0,6 mm na vnější straně (u hlavy šroubu) a vnitřní výplně z minerální vaty tl. 229 mm. Tělo šroubů bylo modelováno jako válec, viz obr. 91b, kterému byly pomocí kontaktů zadány vlastnosti chování. Byly namodelovány i podložky a hlavy šroubů.



obr. 91 Geometrie modelu a) celý model b) model samotného šroubu s podložkou

### 4.1.3 Kontakty

Pomocí kontaktů se v programu ANSYS Workbench definuje chování jednotlivých spojů namodelovaných částí. Byly použity spoje typu bonded (lepení) tam, kde je uvažováno, že se dva prvky od sebe nepohnou (zabráněn posun a oddálení povrchů ve všech směrech), dále byly použity spoje typu frictional (tření) tam, kde je uvažován pohyb prvků, ale zároveň je mu bráněno třením (posun v rovině styčných ploch).

Spoje bonded byly použity mezi minerální vatou a plechy panelu. Dále mezi plechem představující nosnou ocelovou konstrukci a šroubem, tento kontakt byl zvolen z důvodu jednoduššího chování modelu, jelikož při experimentu docházelo jen k velmi malému otláčování šroubu do plechu.

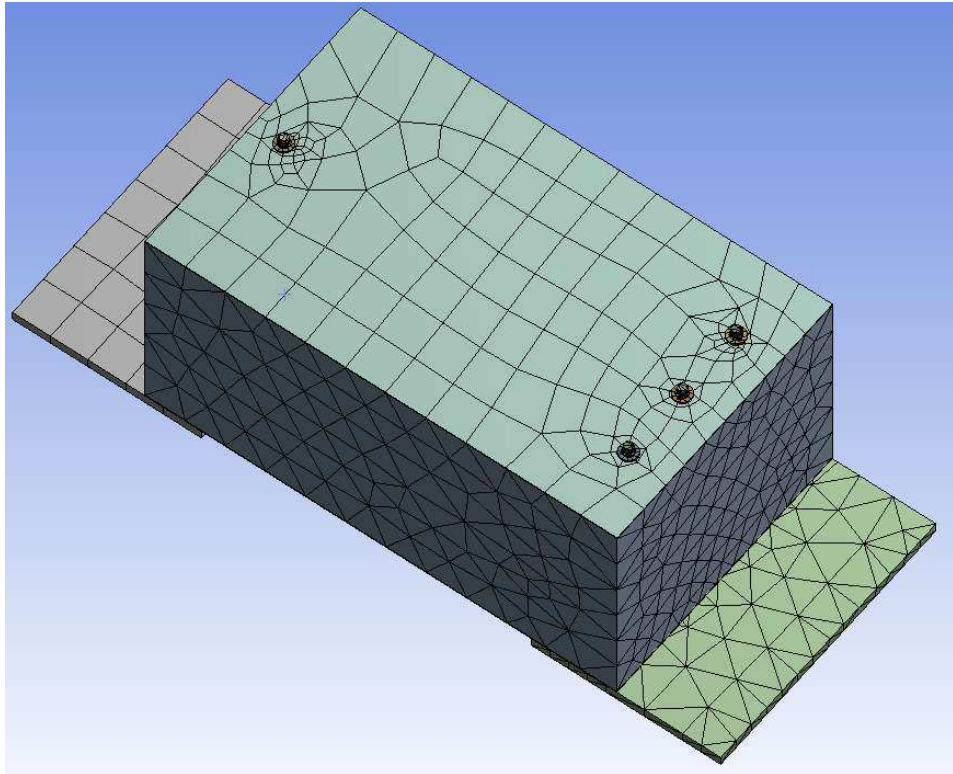
Ve všech ostatních případech kontaktů je použit kontakt typu frictional se zadaným koeficientem tření mezi ocelí a ocelí 0,15 a mezi vatou a šroubem 0,2. Veškeré kontakty jsou shrnuty v tab. 5.

tab. 5 Shrnutí kontaktů modelu

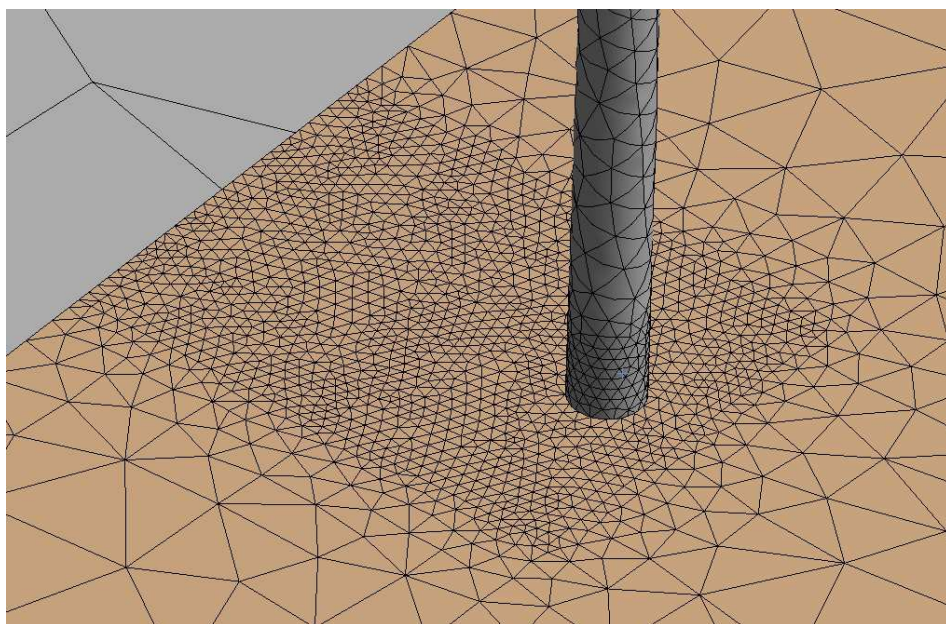
Spoj		Typ kontaktu	Součinitel tření
Plech	Plech panelu	Tření	0,15
Plech panelu	Minerální vata	Lepení	-
Šroub	plech	Lepení	-
Šroub	Plech panelu	Tření	0,15
Šroub	Minerální vata	Tření	0,2
Šroub	Podložka	Tření	0,15
Podložka	Plech panelu	Tření	0,15

#### 4.1.4 Výpočetní síť

Síť byla vygenerována automaticky pomocí softwaru, viz obr. 92. Její nastavení je nelineární s velikostí elementu 43,067 mm. Pro dosažení přesnějších výsledků deformace byla síť v okolí sledované části přípoje nastavena na velmi jemnou síť o velikosti elementu 1 mm, viz obr. 93. Tato síť je shodná jak pro numerický model za běžné teploty, tak i pro teplotní analýzu.



obr. 92 Síť modelu

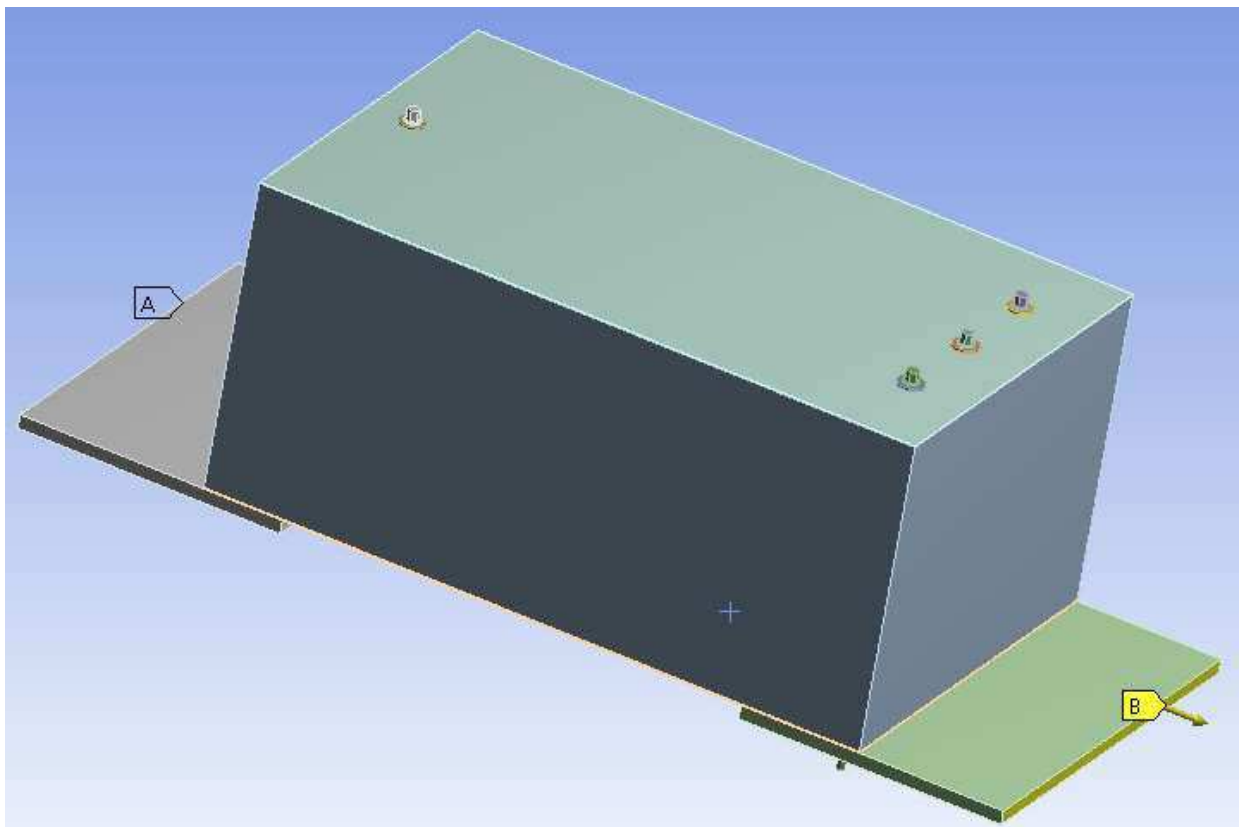


obr. 93 Zhuštění sítě ve sledované části přípoje

## 4.1.5 Zatížení

### Mechanické

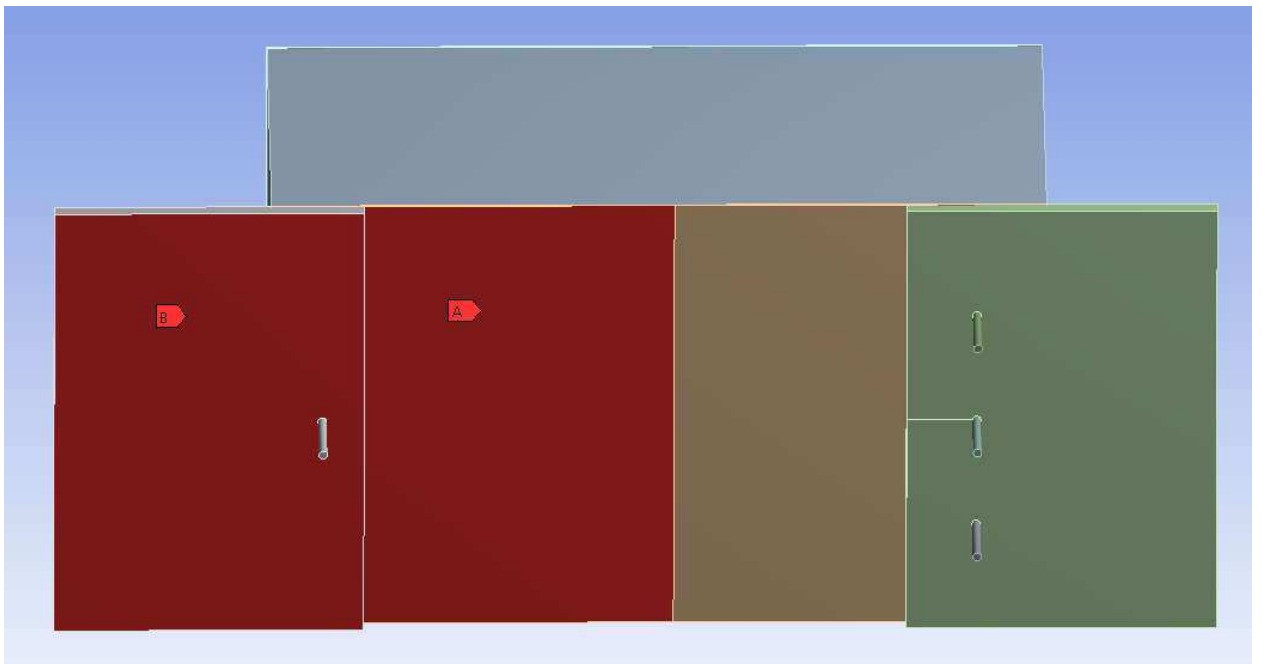
Na obr. 94 je vidět, na jaké části je v modelu zatížení aplikováno. Zatížení (v tomto případě by se dalo říci podpora) s označením A simuluje pevnou podporu, která znemožňuje jakýkoliv pohyb. Pod označením B je nadefinován řízený posun 0,6 mm/min po dobu 26 minut neboli celkové protažení 15,6 mm, které představuje zatížení vzorku tahem. Tento posun odpovídá nastavení posunu na řídicím stroji při provádění experimentů.



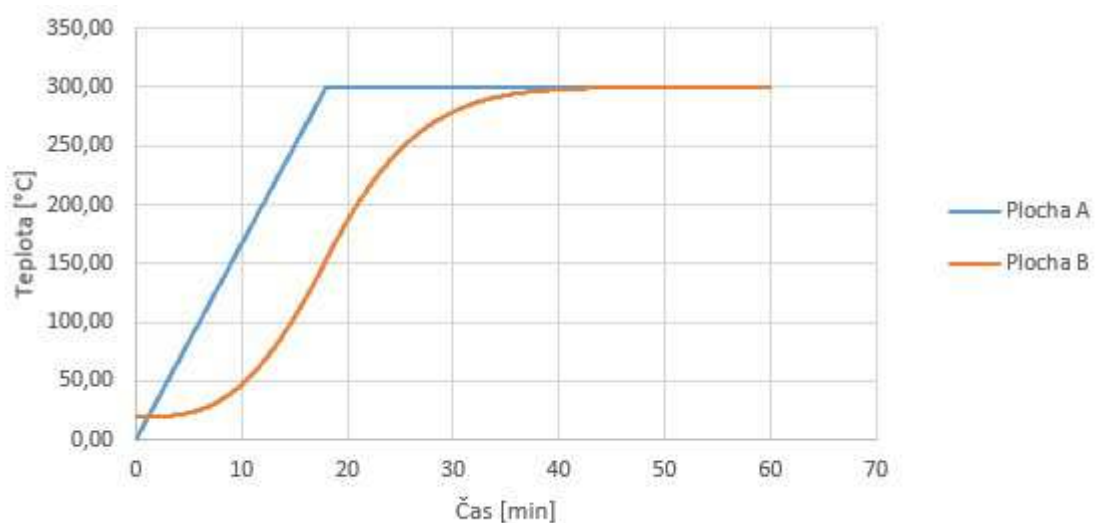
obr. 94 Mechanické zatížení modelu

## Teplotní

Na obr. 95 jsou vidět barevně označené plochy, kde je v modelu zadána teplota. Průběh teplot definovaný na plochu A i B je zobrazen na obr. 96. Teplota je definována po dobu 60 minut. Na plochu A (ocelový plech sendvičového panelu) je aplikována teplota lineárně se zvyšující až do hodnoty 300 °C. Poté je teplota udržována konstantní. Na ploše B (plech ocelové nosné konstrukce) je aplikována teplota, která má simulovat teplotu chráněného ocelového profilu. Z důvodu přítomnosti požární ochrany teplota stoupá pomaleji. Výpočet teplot je uveden v kapitole 3.5. Počáteční teplota ostatních ploch v modelu byla nastavena na 20 °C.



obr. 95 Umístění teplotního zatížení modelu



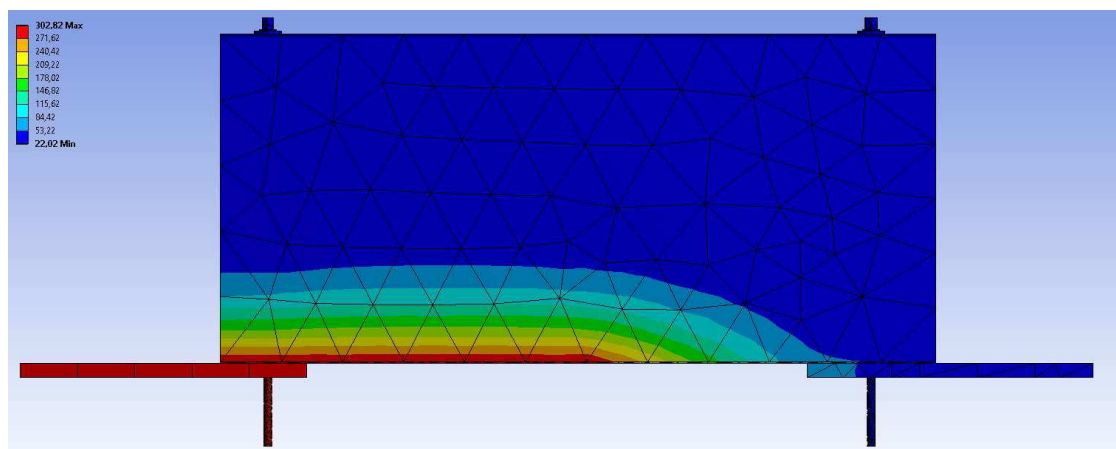
obr. 96 Průběh teplotního zatížení



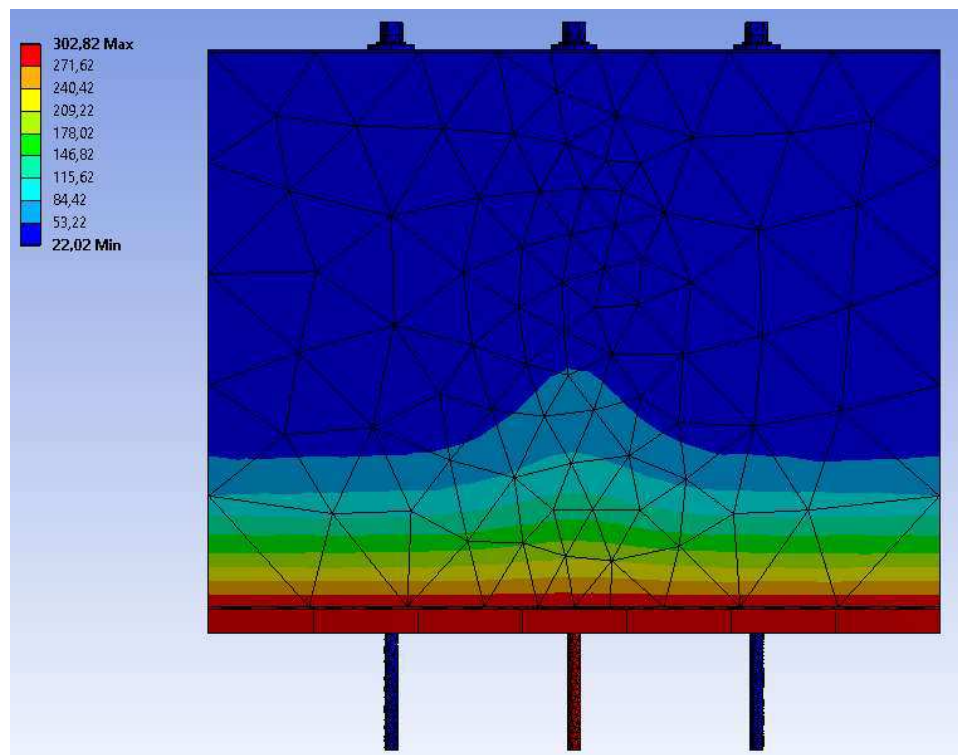
## 4.2 Výsledky

### 4.2.1 Teplotní analýza

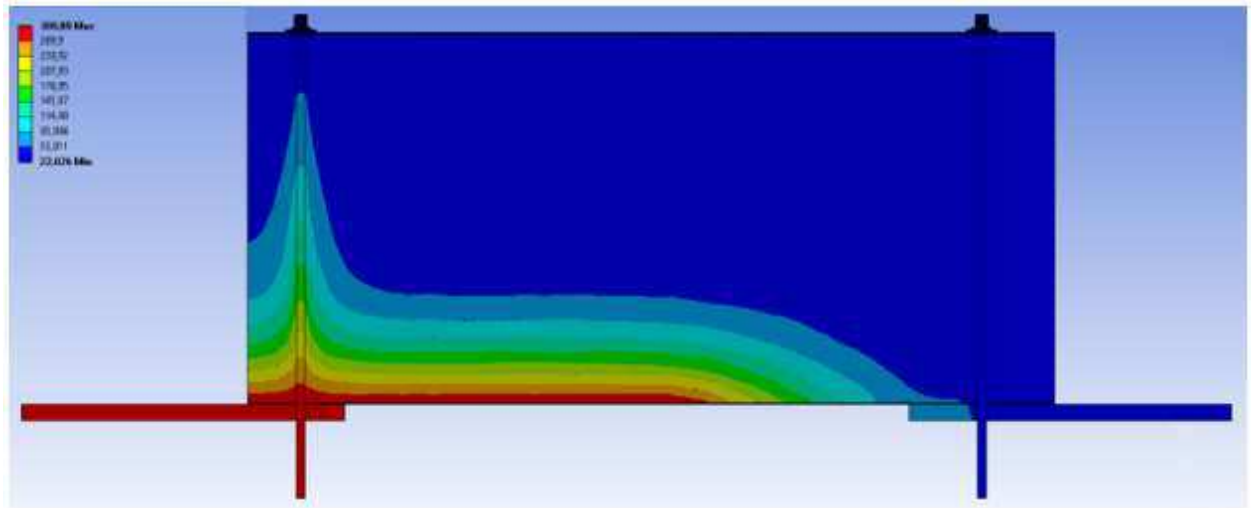
Pomocí softwaru ANSYS byl vyřešen přestup tepla z povrchu do vnitřních částí modelu spoje panelu tl. 230 mm k plechu tl. 10 mm při 300 °C. Na obr. 97 jsou vidět hodnoty teplot v podélném pohledu modelu v 60. minutě. Na obr. 98 jsou vidět hodnoty teplot v příčném pohledu na sledovaný přípoj v čase 60 minut. Na obrázcích je rovněž uvedena barevná škála, která uvádí hodnoty teplot v °C. Na obr. 99 je zobrazen podélný řez modelem vedený v místě šroubu. Z obrázku je vidět vliv tepelné vodivosti materiálu šroubu oproti minerální vatě.



obr. 97 Podélný pohled na model při zatížení teplotou v 60. minutě

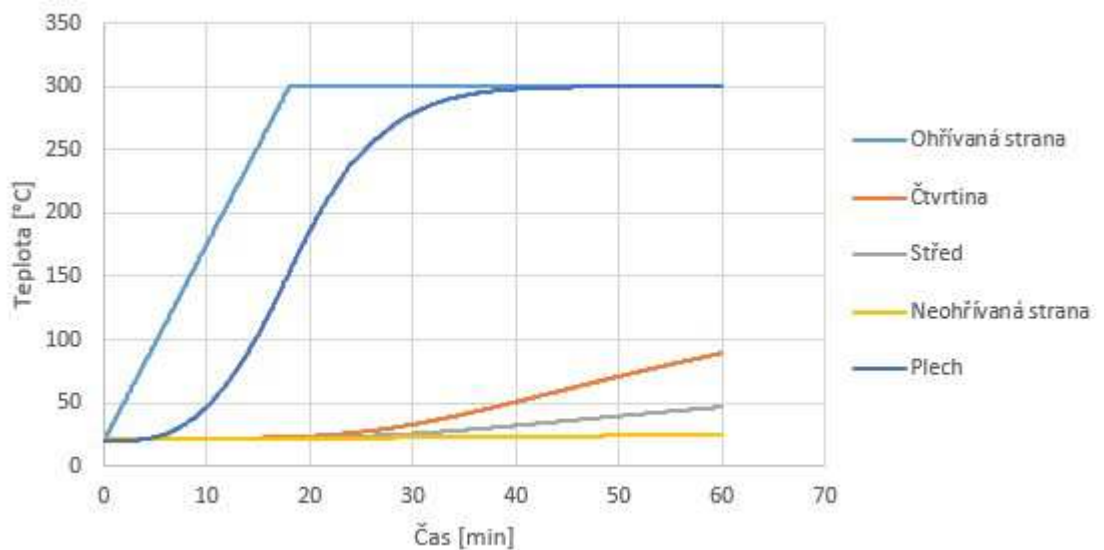


obr. 98 Příčný pohled na model při zatížení teplotou v 60. minutě



obr. 99 Průběh teplot v podélném řezu vzorku v 60. minutě

Na obr. 100 je znázorněn graf průběhu teplot v místě termočlánků (umístění termočlánků je uvedeno na obr. 27) po celou dobu zatěžování. Ohříváná strana dosáhla teploty 300 °C v čase 18 minut. Maximální teplota dosažená ve čtvrtině panelu je 89,22 °C, ve středu panelu 46,71 °C a na neohříváné straně 24,88 °C.



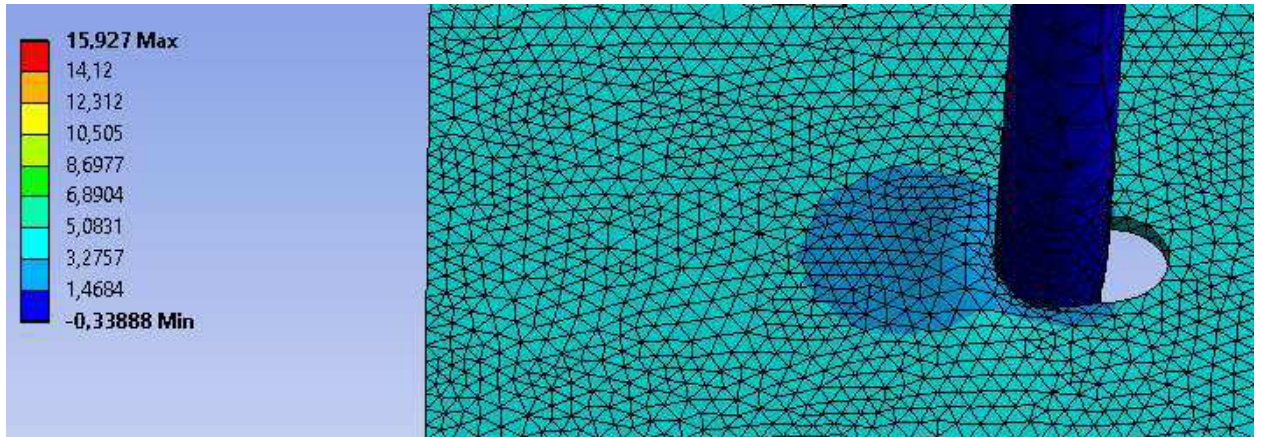
obr. 100 Průběh teplot v modelu přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při teplotě 300 °C

## 4.2.2 Mechanické chování

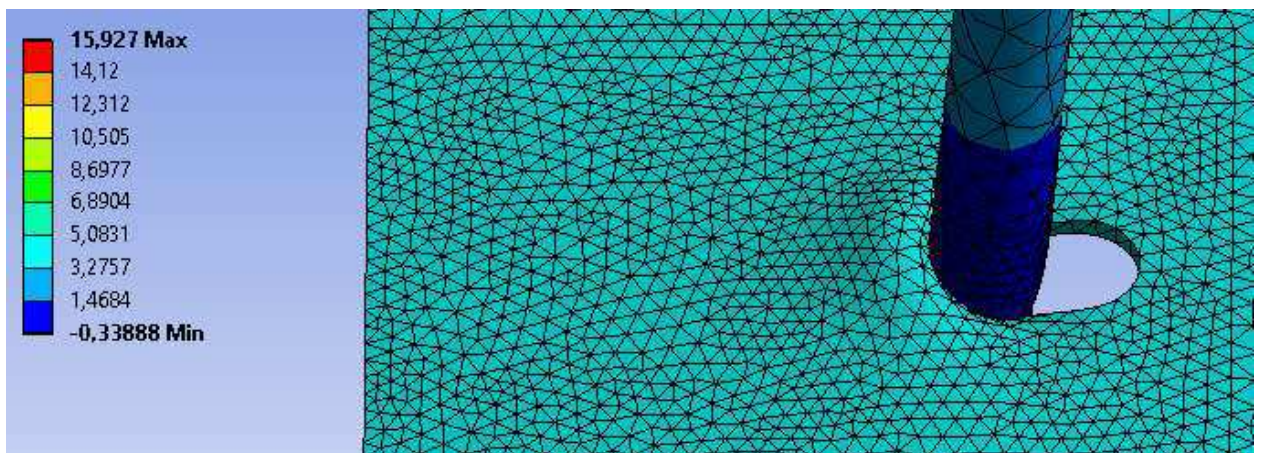
### Výsledky pro model s tloušťkou plechu 10 mm

Pomocí softwaru ANSYS bylo vypočítáno mechanické chování řešeného spoje ve smyslu deformací. Na obr. 101 - obr. 108 je vidět chování modelu v různých časech výpočtu. Všechny obrázky uvádí barevnou škálu hodnot deformace v mm. Z obrázků je vidět, že od počátku zatěžování dochází k protahování otvoru šroubu do oválného tvaru. V čase 650 sekund se začíná

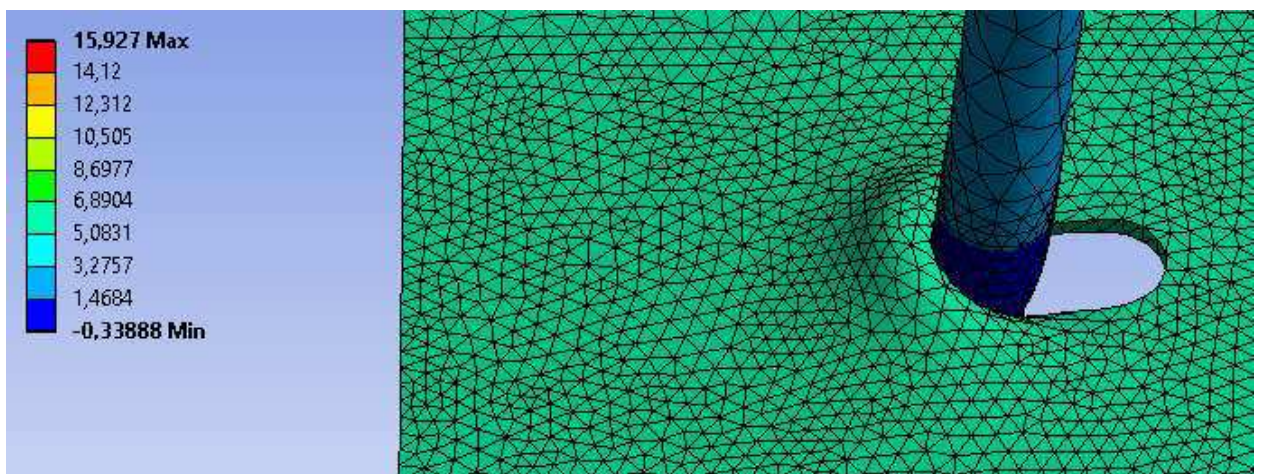
plech v místě dotyku se šroubem mírně vlnit. Toto zvlnění materiálu za šroubem narůstá. V čase okolo 1200 sekund se začíná šroub značně ohýbat a v čase 1500 sekund jsou vidět velké deformace plechu i šroubu. Na obr. 109 je vidět graf průběhu protažení v závislosti na čase.



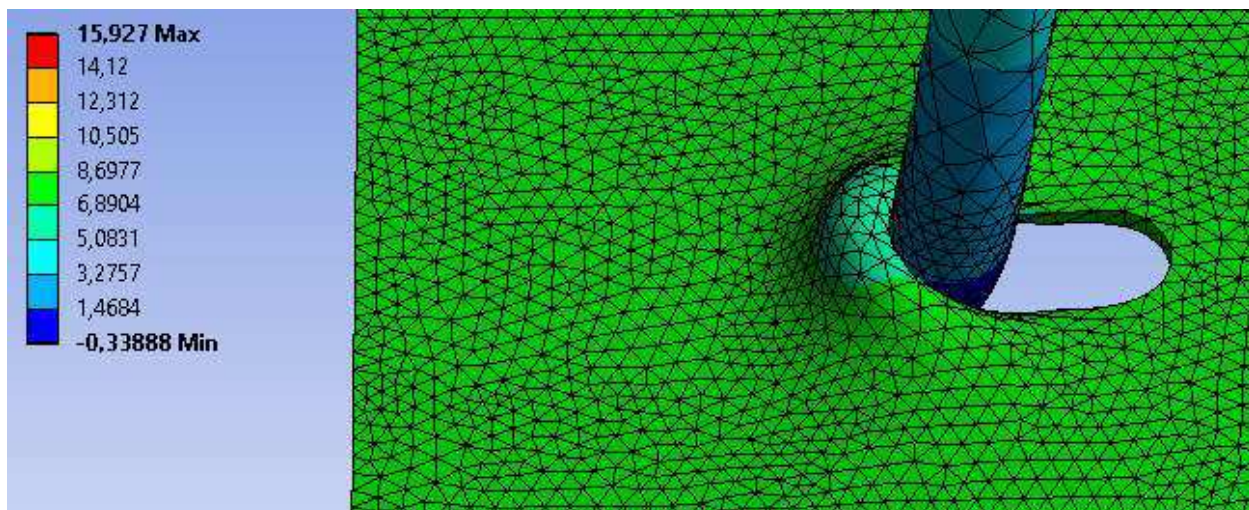
*obr. 101 Deformace plechu v čase 341 sekund*



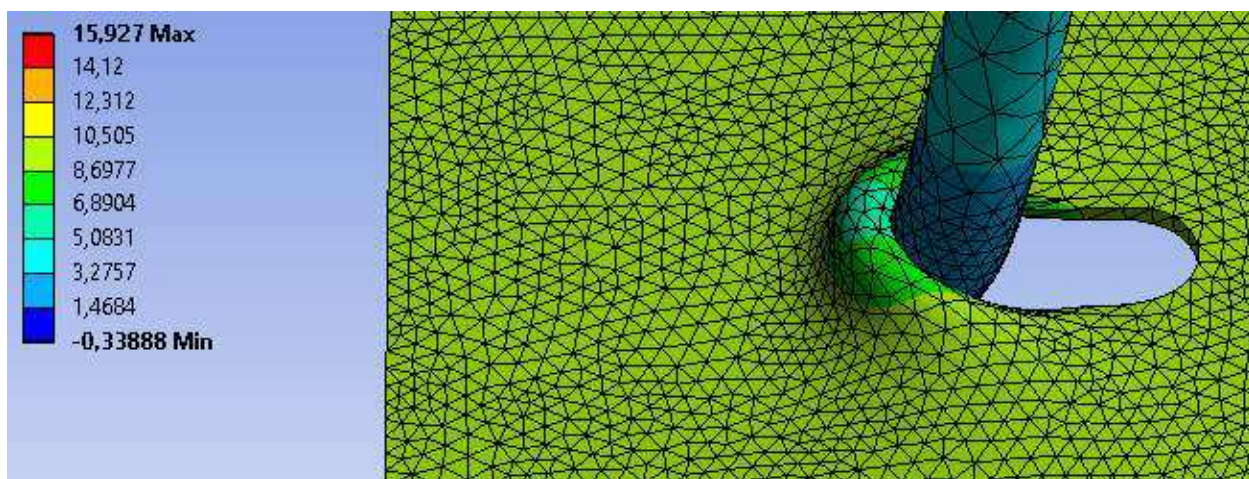
*obr. 102 Deformace plechu v čase 511 sekund*



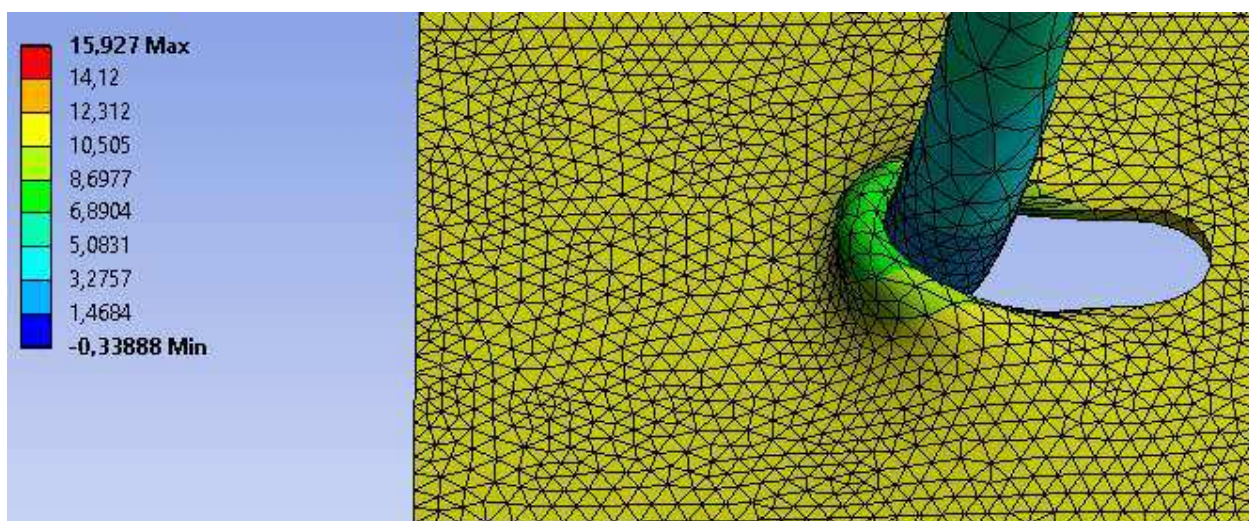
*obr. 103 Deformace plechu v čase 682 sekund*



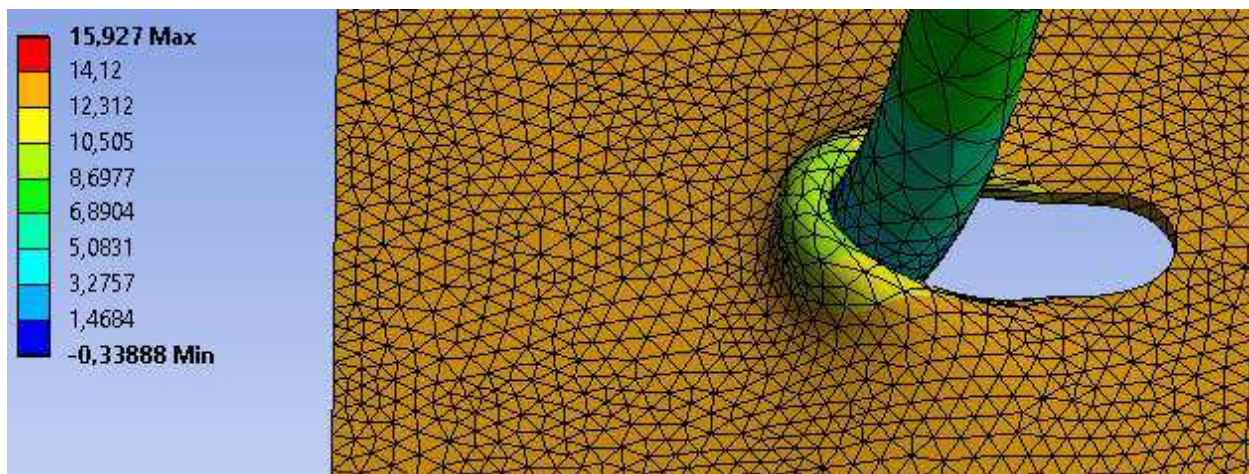
*obr. 104 Deformace plechu v čase 852 sekund*



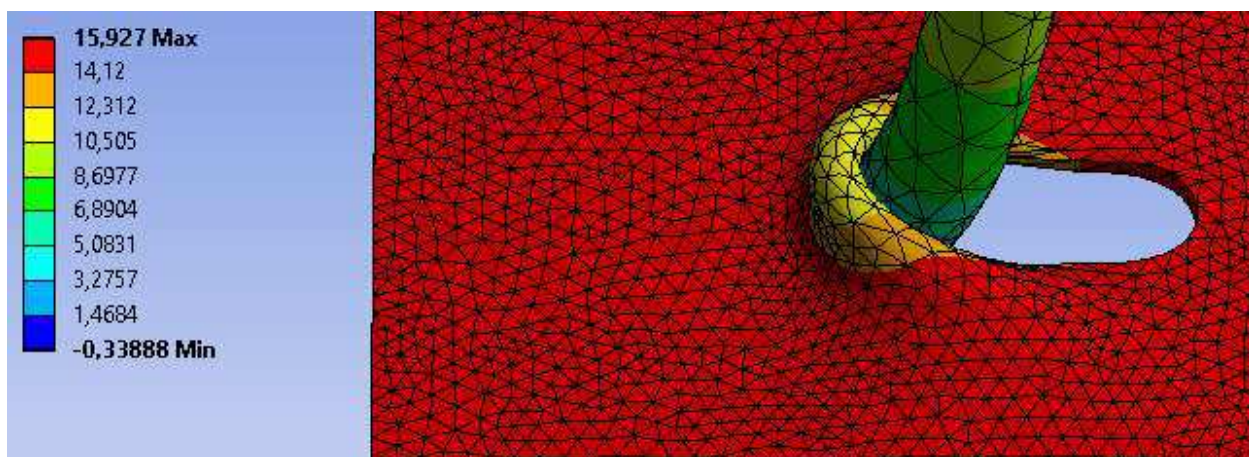
*obr. 105 Deformace plechu v čase 1023 sekund*



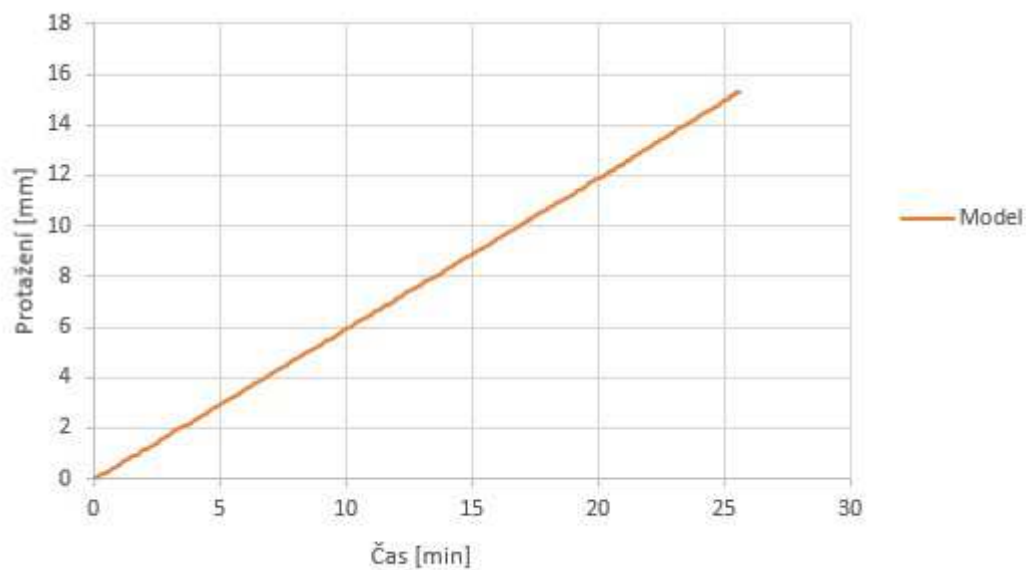
*obr. 106 Deformace plechu v čase 1193 sekund*



obr. 107 Deformace plechu v čase 1364 sekund



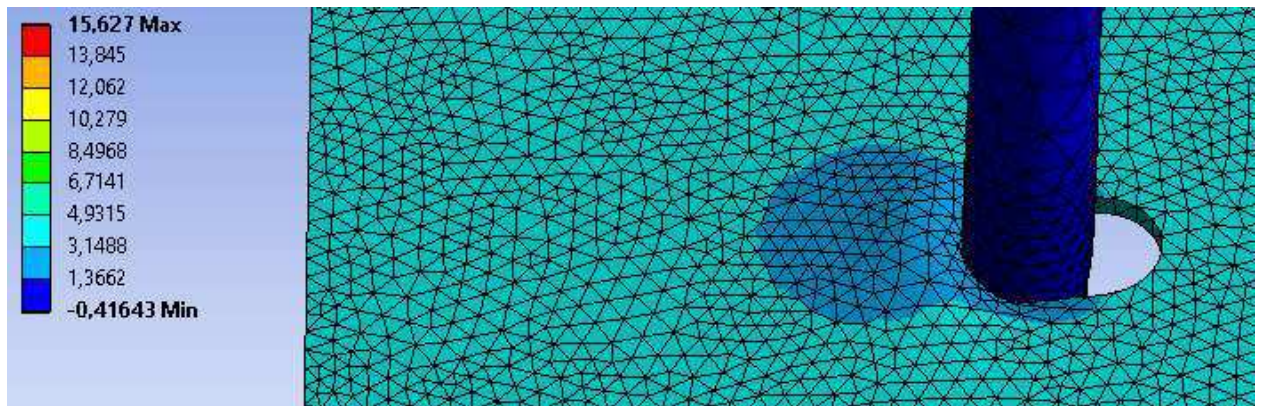
obr. 108 Deformace plechu v čase 1534 sekund



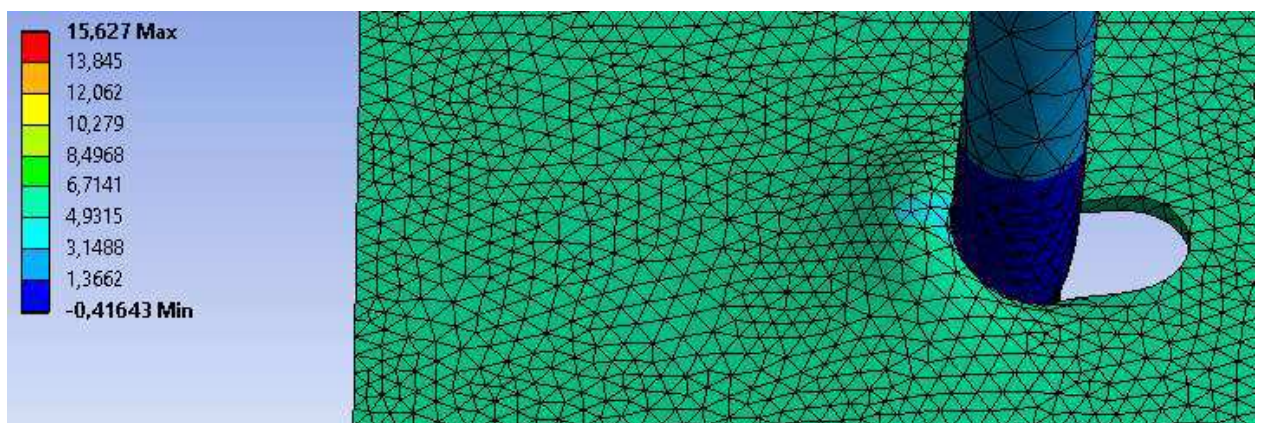
obr. 109 Výsledné protažení modelovaného přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm

### Výsledky pro model s tloušťkou plechu 8 mm

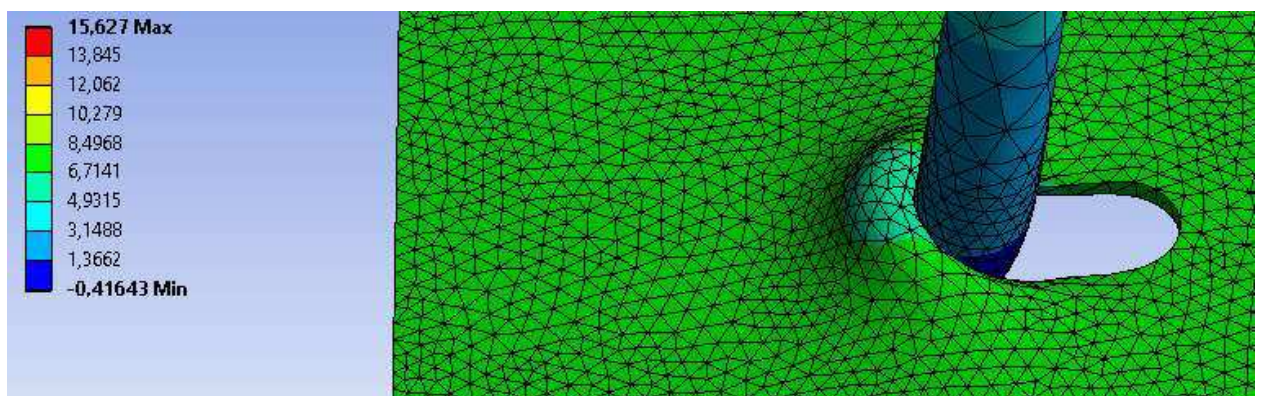
Dále bylo pomocí softwaru ANSYS vypočítáno mechanické chování řešeného spoje k připojovanému plechu tl. 8 mm. Opět byly sledovány deformace spoje. Na obr. 110 - obr. 117 je vidět chování modelu v různých časech výpočtu. Všechny obrázky uvádí barevnou škálu hodnot deformace v mm. V čase 574 sekund se začíná mírně vlnit plech, který je v kontaktu se šroubem. V čase kolem 1150 sekund se šroub začíná ohýbat a v čase kolem 1560 sekund jsou vidět velké deformace plechu i šroubu. Na obr. 118 je vidět graf průběhu protažení v závislosti na čase



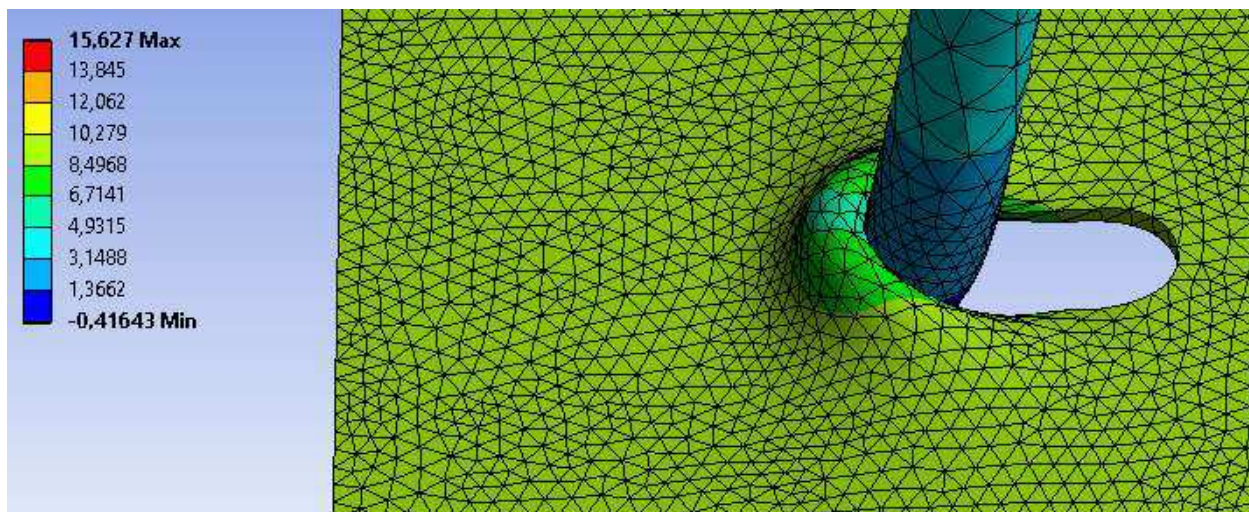
obr. 110 Deformace plechu v čase 328 sekund



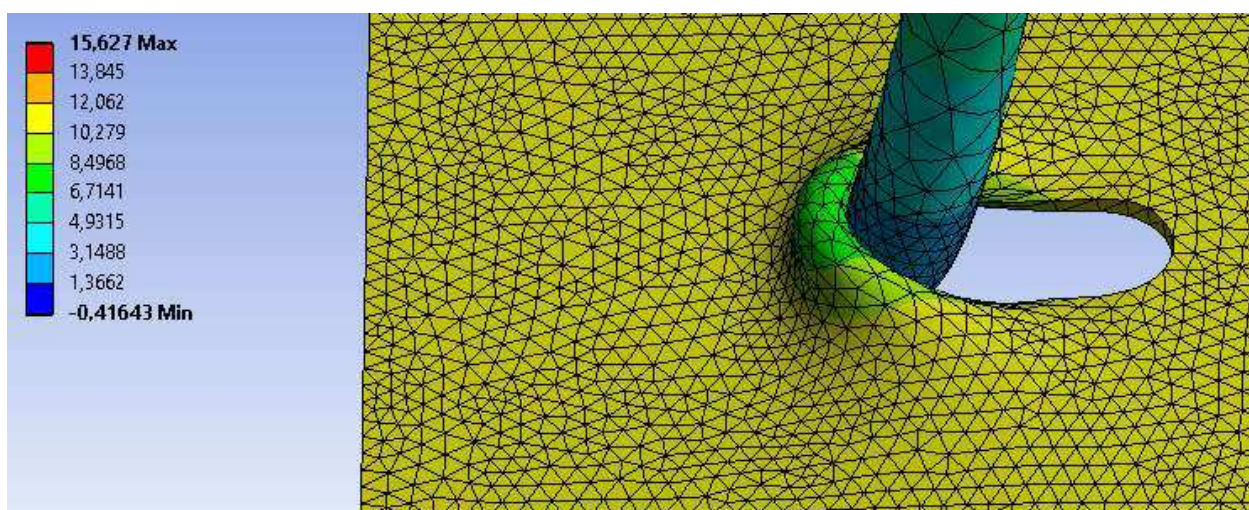
obr. 111 Deformace plechu v čase 574 sekund



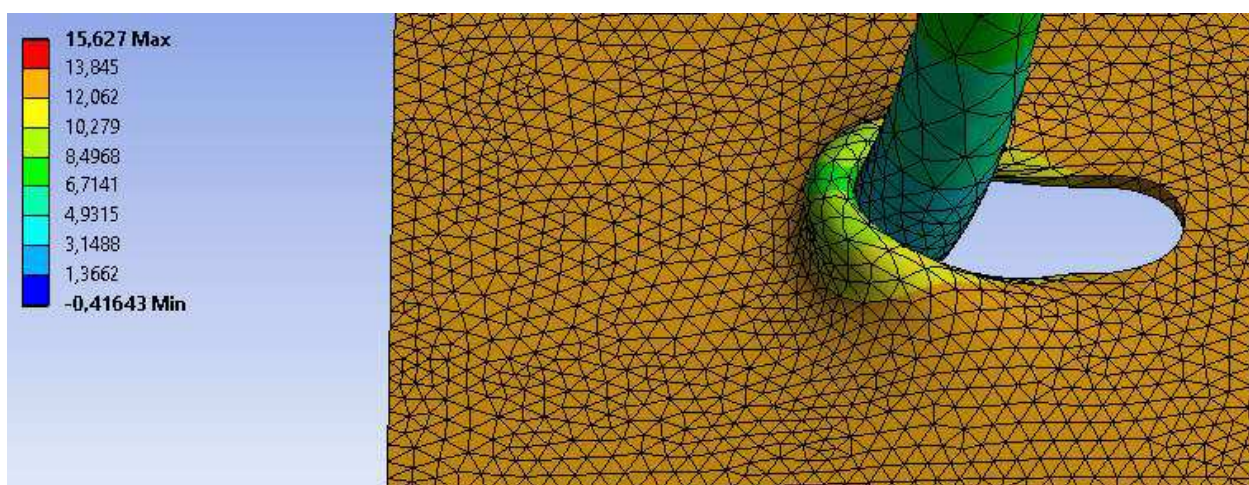
obr. 112 Deformace plechu v čase 821 sekund



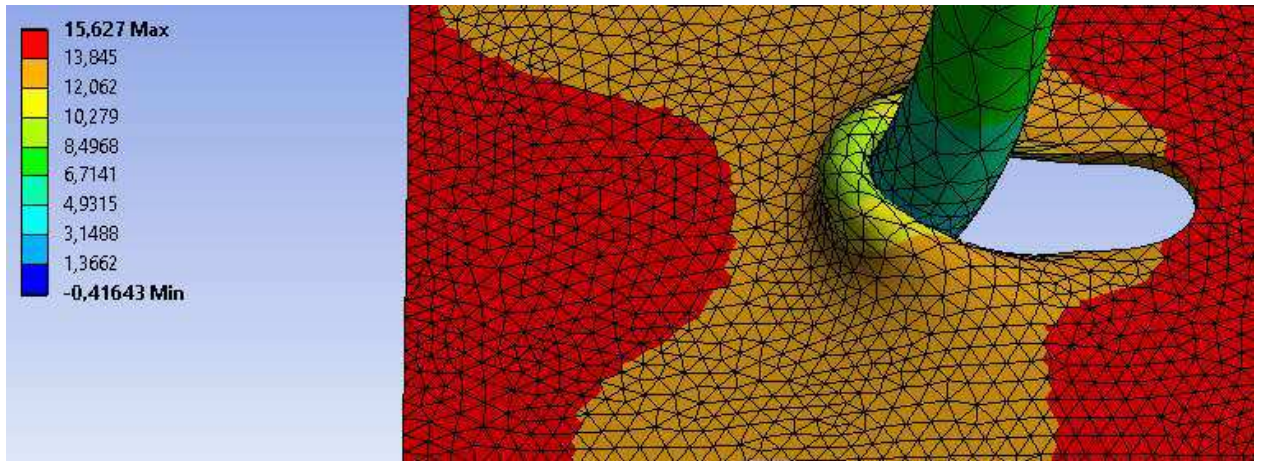
*obr. 113 Deformace plech v čase 985 sekund*



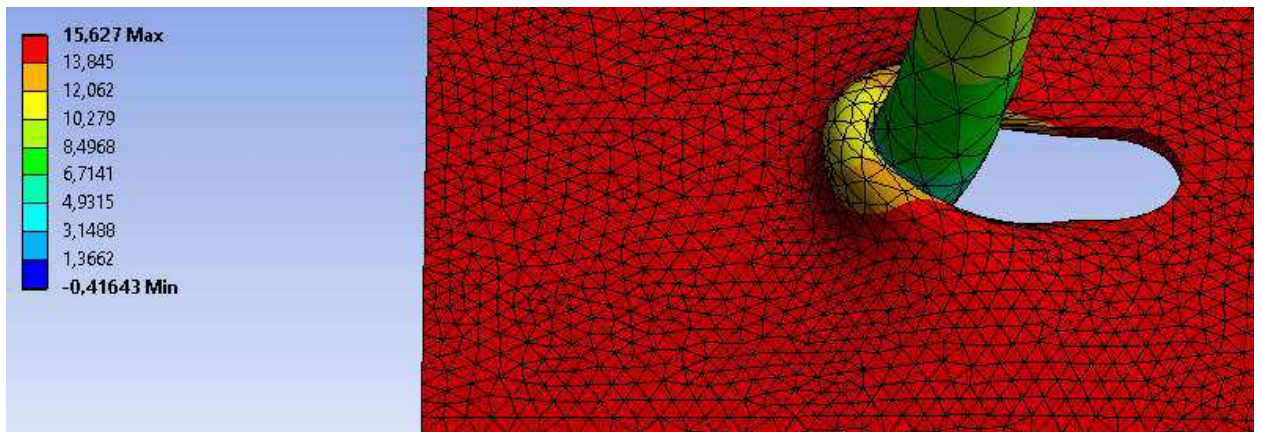
*obr. 114 Deformace plech v čase 1150 sekund*



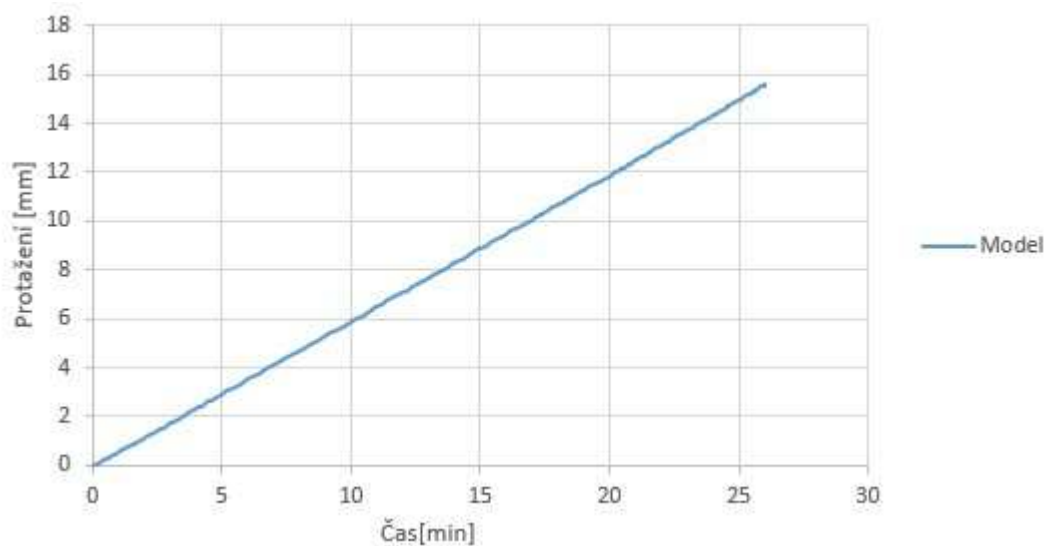
*obr. 115 Deformace plechu v čase 1313 sekund*



obr. 116 Deformace plechu v čase 1395 sekund



obr. 117 Deformace plechu v čase 1560 sekund



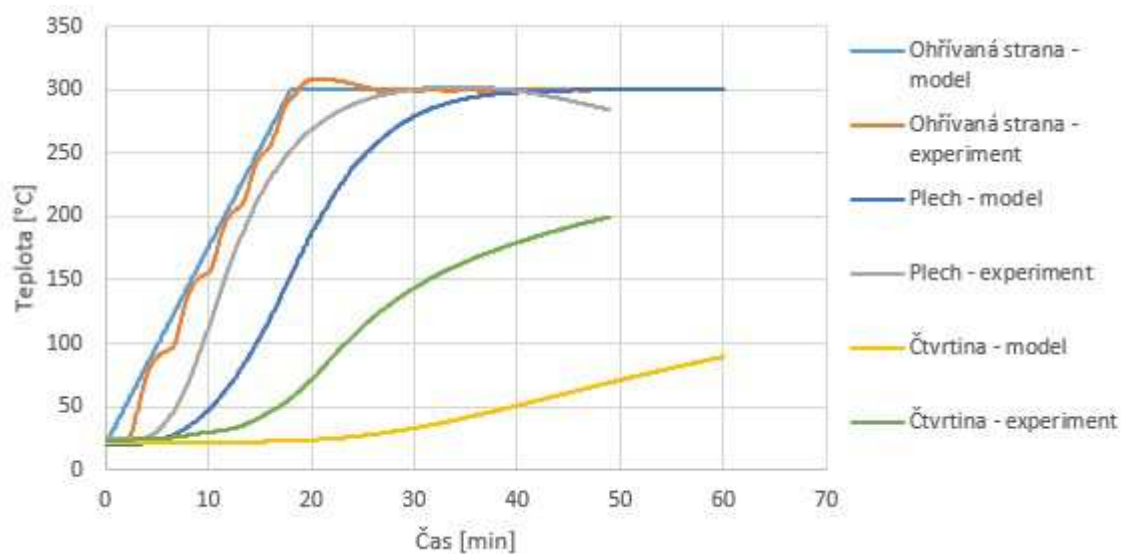
obr. 118 Výsledné protažení modelovaného přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm



## 5 Validace numerického modelu

### 5.1 Teplotní analýza

Na obr. 119 je znázorněno porovnání průběhu teplot naměřených při experimentu a vypočítaných z modelu v závislosti na čase. Teploty jsou v modelu vypočítány na shodných místech, jako byly během experimentu umístěné termočlánky. Křivky teploty ohříváné strany panelu si jsou velice podobné. Křivky teploty ocelového plechu nosného prvku si už tak podobné nejsou. Důvodem je nemožnost aplikace přesné křivky vypočítané teploty na ocelový plech během experimentu. Pro požárně chráněný plech byl vypočítán požadovaný průběh teploty. Během provádění experimentu se ale ukázalo, že aplikace teploty podle požadované křivky je velice náročná a s použitým vybavením pro zahřívání téměř nemožná. V numerickém modelu je aplikace přesné křivky dle požadovaného průběhu naopak jednoduše proveditelná. Proto jsou obě křivky odlišné. Křivka modelu ve čtvrtině panelu je značně nižší oproti experimentu (v čase 49 minut o 130 °C) a to z důvodu nedostatku informací o materiálových vlastnostech minerální vaty při zvýšených teplotách.



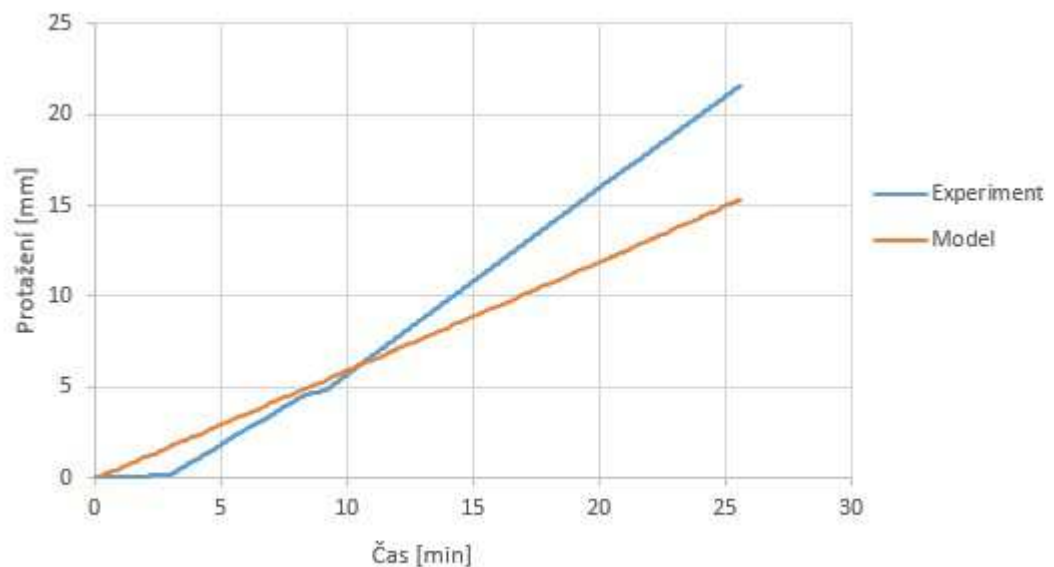
obr. 119 Porovnání průběhu teplot při experimentu a modelu

Pro dosažení příznivějších výsledků průběhu teplot z numerického modelu by bylo třeba nadefinovat přesnější chování materiálových vlastností při zvýšené teplotě, respektive měrnou tepelnou kapacitu a součinitel prostupu tepla, jak pro ocelové prvky, tak i pro minerální vatu. I přes snahu získat tato data pro účely výpočtů nevyšel výrobce panelů bohužel vstříc a podrobná data neposkytl.

## 5.2 Mechanická analýza

### Přípoj panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm

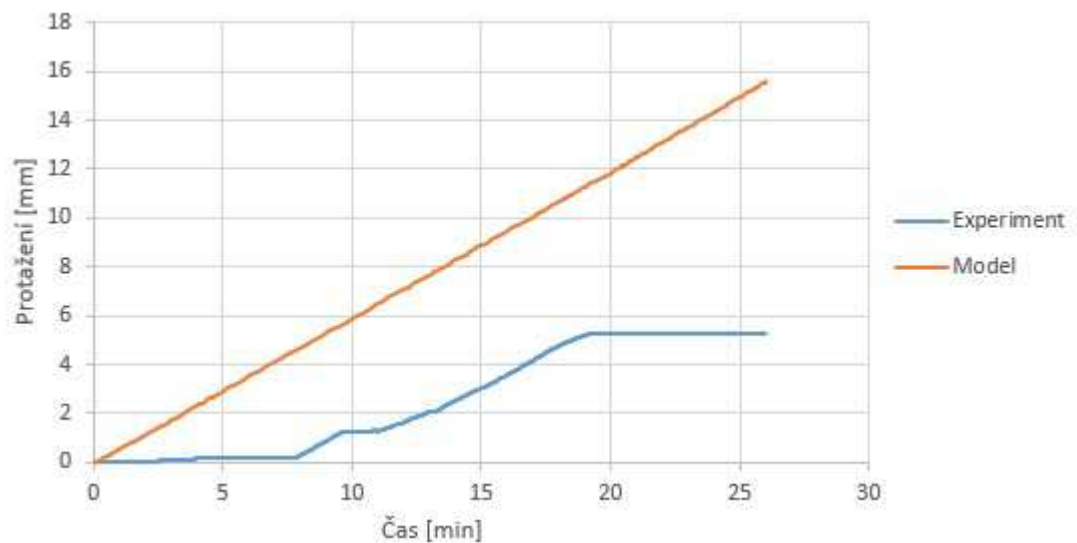
Na obr. 120 je vidět graf průběhu protažení v závislosti na času. V grafu jsou porovnány dvě křivky pocházející z experimentu a modelu. Křivka z modelu je lineární, kde na začátku zatěžování dosahuje vyššího protažení oproti křivce z experimentu. Přibližně v 11. minutě se tyto křivky protínají a křivka experimentu dosahuje vyššího protažení oproti křivce modelu. Protažení u křivky experimentu je na počátku zatížení téměř nulové a poté se začíná razantně zvedat. V čase 25 minut dosahuje křivka modelu protažení 14,943 mm a křivka experimentu 20,98 což činí rozdíl 6 mm.



obr. 120 Porovnání protažení numerického modelu s experimentem, přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm

### Přípoj panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm

Na obr. 121 je vidět graf protažení sledovaného spoje v závislosti na času. V grafu jsou porovnávány dvě křivky pocházející z experimentu a modelu. Křivka z modelu je lineární a dosahuje v čase 25 minut téměř stejného protažení jako u přípoje k plechu tl. 10 mm. Křivka z experimentu na počátku zatěžování nabírá minimálního protažení, přibližně v 8. minutě se vzorek začíná protahovat, avšak v 18. minutě se protažení znovu zastavuje. V čase 25 minut křivka modelu dosahuje protažení 14,934 mm oproti křivce experimentu, která dosahuje protažení 5,328 mm, což činí vysoký rozdíl 9,606 mm.



obr. 121 Porovnání protažení numerického modelu s experimentem, přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm

Pro dosažení příznivějších výsledků z numerického modelu by bylo třeba v modelu nadefinovat přesnější materiálové vlastnosti, v tomto případě mechanické. Ani tyto se bohužel nepodařilo od výrobce panelů získat. Dále by ke zpřesnění modelu pomohlo ještě více zjemnit síť v okolí pozorovaného místa neboli místa přípoje.

Celkově je numerické modelování velice náročná disciplína a pro dosažení přesných výsledků modelu je nutné znát veškeré vstupy do modelu, namodelovat řešený problém co nejlíže skutečnosti (bez zjednodušení) a zvolit velice jemnou síť a malý výpočetní krok. Modelování a dalšímu ověřování chování spoje sendvičových panelů k nosné ocelové konstrukci by bylo potřeba věnovat více času. Ten však v rámci diplomové práce není pro takto složitou problematiku dostatečný.

## 6 Závěr

Práce se zabývá chováním spojů sendvičových panelů k nosné ocelové konstrukci za požáru. Problematika je podložena výzkumy z ČR i ze zahraničí, které pojednávají o vznikajících vnitřních silách, výhodách a nevýhodách různých spojovacích prostředků, vlivech různých typů opláštění, typických porušení přípoje, validacích a verifikacích výpočetních modelů a přibližné redukci pevnosti spoje při zvýšených teplotách. V rámci práce byl uskutečněn experiment, pro který je vybrán a popsán typ zkoušeného sendvičového panelu, typ spojovacího prostředku a typ přípoje. Práce se především zaměřuje na všechny fáze experimentu neboli na jeho přípravu, na samotný průběh a na jeho vyhodnocení. Dále se práce zaměřuje na numerické modelování vybraných experimentů a porovnání výsledků.

Experiment vychází z přípoje obvodového pláště ke sloupu otevřeného průřezu profilu HEA 120 a HEA 200, kde během experimentů byly profily nahrazeny pouze plechy tloušťky 8 a 10 mm reprezentující pásnice těchto profilů. K pásnicím průřezů byly připojeny sendvičové panely s výplní z minerální vaty od výrobce Ruukki typu SPA100E a SPA230E tloušťky 100 a 230 mm. Jako spojovací prvky sloužily nerezové samořezné šrouby typu SXC14-S19-5,5x190 a SXC14-S19-5,5x275 pro panely tloušťky 100 mm a 230 mm. Na neohřívané pásnici byly tři šrouby a na ohřívané, kde se předpokládalo porušení, byl umístěn jeden šroub. Zahřívání zorku na požadovanou teplotu bylo provedeno pomocí řídicího přístroje Mannings HTC 70 kW, řídicího stroje INVERTOR DHC 6510R, keramických deček a termočlánků typu K. Teplo bylo do vzorku přenášeno převážně vedením. Rychlost zahřívání vzorku se blížila nominální normové křivce. Provedený experiment sloužil k ověření chování spoje sendvičového panelu k ocelové nosné konstrukci za zvýšené teploty.

V práci jsou prezentovány výsledky z experimentu, které jsou následně porovnávány mezi sebou podle vlivu teploty, vlivu tloušťky plechu představující nosnou ocelovou konstrukci a vlivu tloušťky sendvičového panelu. Pro jednotlivé zkoušené přípoje je spočítána a vyhodnocena tuhost daného přípoje.

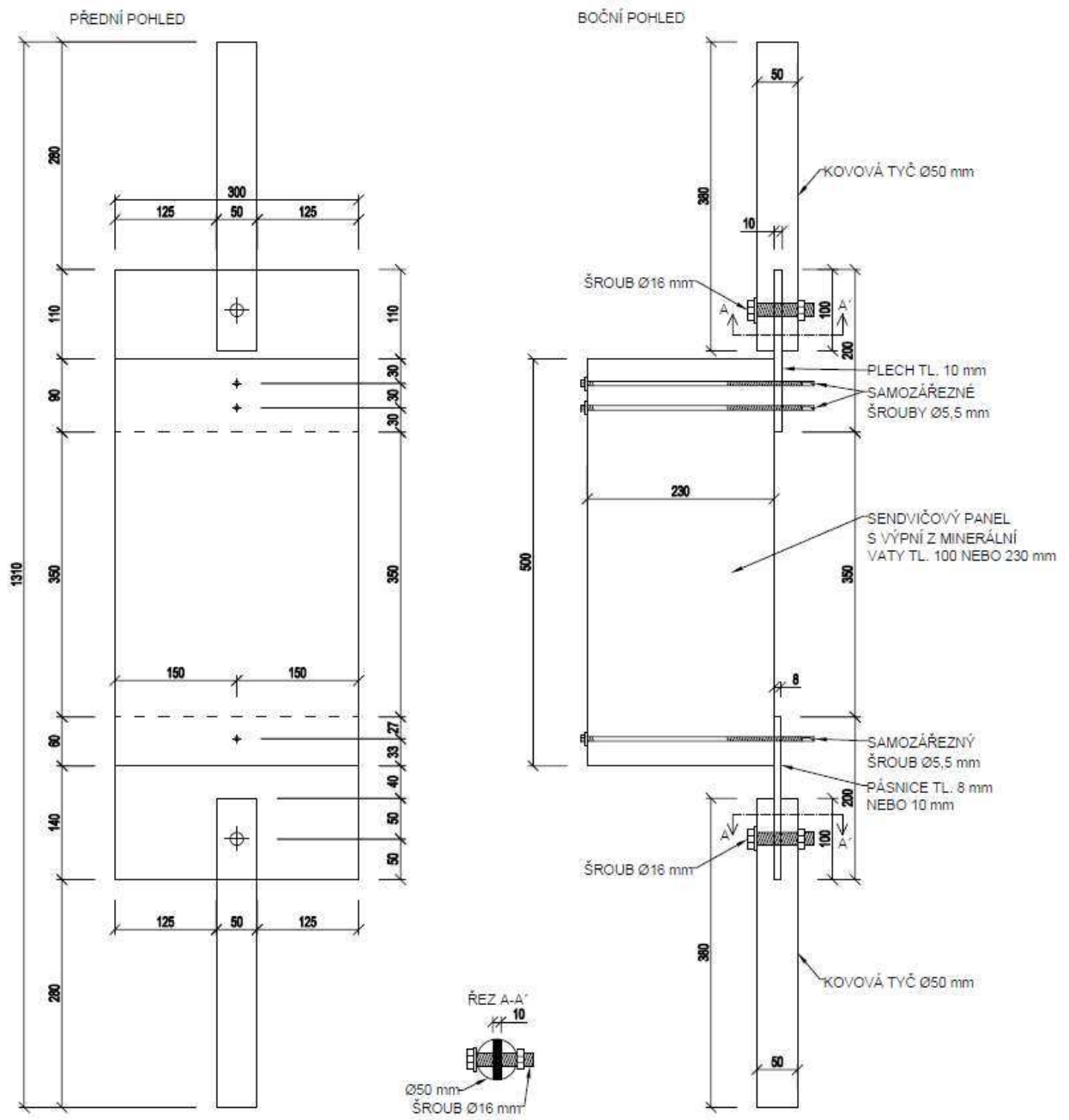
Práce se zabývá i numerickým modelováním přípoje v programu ANSYS Workbench. V numerickém modelu jsou detailně popsány materiálové vlastnosti jednotlivých částí modelu, dále je popsána geometrie, kontakty, výpočetní síť a zatížení. Numerický model byl sestaven za účelem výpočtu mechanického chování vybraných spojů a výpočtu přestupu tepla do jednotlivých částí spoje při zvýšené teplotě. Výsledky mechanického chování z programu jsou prezentovány a porovnávány s výsledky z experimentů.

Podrobně jsou v práci prezentovány výsledky z teplotní analýzy přípoje panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm a mechanické analýzy přípoje panelu SPA230E k plechu tloušťky 8 a 10 mm za běžné teploty, kde je na obrázcích zobrazen teplotní průběh v modelu a způsob deformace modelu v čase. Tyto průběhy teplot a deformací jsou také zobrazeny v grafech.

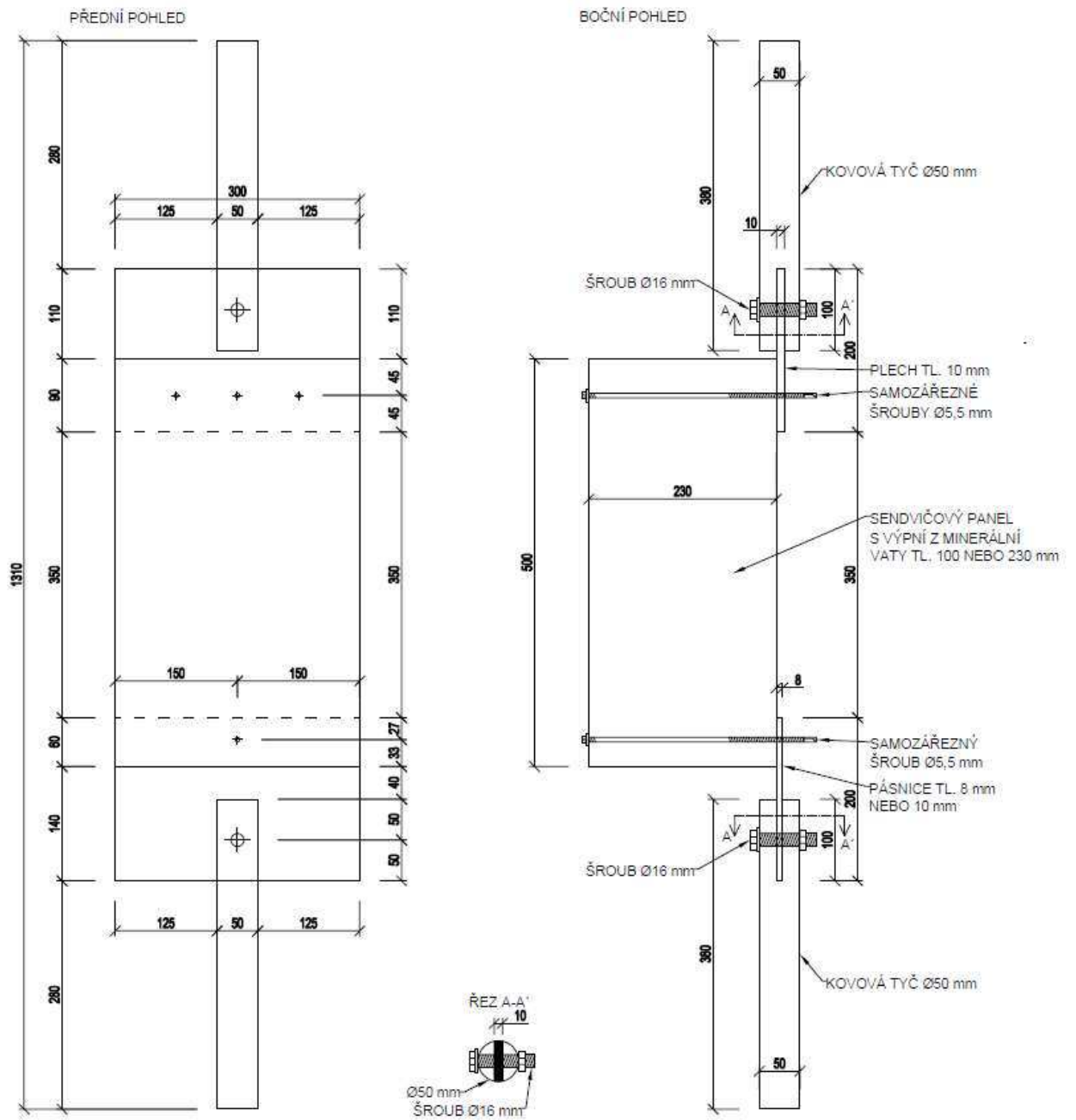
Výsledky z numerického modelování jsou následně v práci graficky porovnávány s výsledky z experimentů. U každého porovnání je uveden rozdíl mezi experimentem a modelem, a také jak by se dalo dojít k přesnějším výsledkům z numerického modelu.

Pro dosažení přesnějších výsledků z numerického modelu by bylo třeba znát a do modelu zadat přesná vstupní data. Jedná se hlavně o přesné materiálové vlastnosti, detailní geometrii bez zjednodušení, definici všech kontaktů a definici jemné výpočetní sítě. Materiálové vlastnosti by bylo třeba lépe nadefinovat (průběh mechanických vlastností ocelových prvků, tepelně technické charakteristiky včetně jejich závislosti na zvýšených teplotách, přesné materiálové vlastnosti minerální vaty, atd.). V geometrii by se přesnost modelu zvýšila vymodelováním závitů šroubu nebo nadefinováním přesnějšího kontaktu mezi šroubem a dalšími částmi v místě závitů, respektive změnou kontaktu na typ frictional (tření) místo bonded (lepení) a určením koeficientu tření v místě kontaktu mezi šroubem a ocelovým plechem představující nosnou ocelovou konstrukci. Dále by v rámci úprav geometrie mohly být modelovány lamely minerální výplně či vrstva lepidla mezi plechy a jádrem panelu. Zdokonalení výpočetní sítě, která hraje ve výpočtu velkou roli, neboli zjemnit síť celého modelu a sledovaného místa by vedlo k dosažení přesnějších výsledků numerického modelu.

# Příloha 1 – Původní schéma experimentu



## Příloha 2 – Schéma experimentu po úpravě



## Seznam obrázků

obr. 1 Deformace materiálu v okolí hřebíku [1] .....	3
obr. 2 Schéma spoje [2].....	3
obr. 3 Model jednotřížného šroubového spoje [4].....	4
obr. 4 Porušení přípoje [5] .....	5
obr. 5 Pracovní diagramy šroubových přípojů pro tloušťku plechu 0,8 mm [5] .....	6
obr. 6 Deformovaný tvar z MKP modelu [8].....	7
obr. 7 Trilineární idealizace kroutícího momentu [8].....	8
obr. 8 Ruukki: Stěnový panel SPA230E a SPA100E a typy povrchových úprav [9].....	9
obr. 9 Detail sendvičového panelu spojeného se sloupem otevřeného profilu [10] .....	10
obr. 10 Detail sendvičového panelu spojeného se sloupem uzavřeného profilu [10].....	11
obr. 11 Samořezný šroub do ocele tloušťky 4 - 14 mm [11] .....	11
obr. 12 Samořezný šroub do ocele tloušťky 1,5 - 5 mm [11] .....	11
obr. 13 Schéma experimentu.....	12
obr. 14 Řídící stroj Mannings HTC 70 kW.....	13
obr. 15 Řídící stroj INVERTOR DHC 6510R .....	13
obr. 16 Termočlánky a keramické dečky .....	13
obr. 17 Předpokládaný průběh teplot keramických deček .....	14
obr. 18 Přípravovaný vzorek pro 1. zkoušku, pohled shora.....	15
obr. 19 Přípravovaný vzorek pro 1. zkoušku, boční pohled .....	15
obr. 20 Pilotní vzorek.....	16
obr. 21 Pilotní vzorek.....	16
obr. 22 Ukotvení vzorku pomocí 2 šroubů nad sebou .....	17
obr. 23 Ukotvení vzorku pomocí 3 šroubů vedle sebe.....	17
obr. 24 Porovnání deformací špatného a správného uchycení vzorku po průběhu zkoušky ...	17
obr. 25 Laserový extenzometr a vzorek zkoušený za běžné teploty .....	18
obr. 26 Laser extenzometru a vzorek zkoušený za zvýšené teploty .....	19
obr. 27 Umístění termočlánků ve vzorku.....	20
obr. 28 Průběh teplot chráněného a nechráněného plechu.....	20
obr. 29 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 20 °C .....	22
obr. 30 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 300 °C .....	22



---

obr. 31 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 8 mm při teplotě 450 °C .....	23
obr. 32 Porušení panelu SPA100E k plechu 8 mm při teplotě 600 °C .....	23
obr. 33 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 20 °C .....	24
obr. 34 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 300 °C .....	24
obr. 35 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 450 °C .....	25
obr. 36 Porušení panelu SPA100E k plechu tl. 10 mm při teplotě 600 °C .....	25
obr. 37 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 20 °C .....	26
obr. 38 Porušení panelu SPA2330E k plechu tl. 8 mm při teplotě 300 °C .....	26
obr. 39 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 450 °C .....	27
obr. 40 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 8 mm při teplotě 600 °C .....	27
obr. 41 Obr. Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 20 °C .....	28
obr. 42 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 300 °C .....	28
obr. 43 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 450 °C .....	29
obr. 44 Porušení panelu SPA230E k plechu tl. 10 mm při teplotě 600 °C .....	29
obr. 45 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 20 °C .....	30
obr. 46 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 20 °C .....	31
obr. 47 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 20 °C .....	31
obr. 48 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 20 °C .....	32
obr. 49 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 300 °C .....	33
obr. 50 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 300 °C .....	33
obr. 51 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 300 °C .....	34
obr. 52 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 300 °C .....	34
obr. 53 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 300 °C .....	35
obr. 54 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 300 °C .....	35
obr. 55 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 300 °C .....	36
obr. 56 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 300 °C .....	36
obr. 57 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 450 °C .....	37
obr. 58 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 450 °C .....	38
obr. 59 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 450 °C .....	38
obr. 60 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 450 °C .....	39
obr. 61 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 450 °C .....	39
obr. 62 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 450 °C .....	40

---

obr. 63 Fotografie z průběhu testu při teplotě 450 °C.....	40
obr. 64 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 450 °C .....	41
obr. 65 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 450 °C .....	41
obr. 66 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 600 °C .....	42
obr. 67 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 8 mm při 600 °C .....	42
obr. 68 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 600 °C .....	43
obr. 69 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA100E na plech tl. 10 mm při 600 °C .....	43
obr. 70 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 600 °C .....	44
obr. 71 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm při 600 °C .....	44
obr. 72 Výsledky zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 600 °C .....	45
obr. 73 Průběh teplot zkoušky přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při 600 °C .....	45
obr. 74 Porovnání zkoušek panelu SPA100E s plechem tl. 8 mm při různých teplotách.....	46
obr. 75 Porovnání zkoušek panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při různých teplotách.....	47
obr. 76 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 8 mm při teplotě 20 °C .....	48
obr. 77 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 8 mm při teplotě 300 °C .....	48
obr. 78 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 10 mm při teplotě 450 °C .....	49
obr. 79 Porovnání zkoušek panelů SPA100E a SPA230E s plechem tl. 10 mm při teplotě 600 °C .....	49
obr. 80 Porovnání zkoušek přípoje panelu SPA100E s plechem různé tloušťky při teplotě 20 °C .....	50
obr. 81 Porovnání zkoušek panelu SPA100E s plechem různé tloušťky při teplotě 300 °C ...	50
obr. 82 Porovnání zkoušek panelu SPA230E s plechem různé tloušťky při teplotě 450 °C ...	51
obr. 83 Porovnání zkoušek panelu SPA230E s plechem různé tloušťky při teplotě 600 °C ...	51
obr. 84 Příklady křivek smykového zatížení a posunutí a definice maximálního zatížení [12].....	52
obr. 85 Měrná tepelná kapacita uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [13].....	55
obr. 86 Součinitel tepelné vodivosti uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [13].....	55
obr. 87 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy S355J2G3.....	55
obr. 88 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy S280GD+Z.....	56
obr. 89 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy 1.4567 .....	57
obr. 90 Zjednodušený pracovní diagram oceli třídy 1.4301 .....	58

---

obr. 91 Geometrie modelu a) celý model b) model samotného šroubu s podložkou.....	60
obr. 92 Síť modelu .....	62
obr. 93 Zhuštění sítě ve sledované části přípoje .....	62
obr. 94 Mechanické zatížení modelu .....	63
obr. 95 Umístění teplotního zatížení modelu .....	64
obr. 96 Průběh teplotního zatížení .....	64
obr. 97 Podélný pohled na model při zatížení teplotou v 60. minutě.....	65
obr. 98 Příčný pohled na model při zatížení teplotou v 60. minutě .....	65
obr. 99 Průběh teplot v podélném řezu vzorku v 60. minutě .....	66
obr. 100 Průběh teplot v modelu přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm při teplotě 300 °C .....	66
obr. 101 Deformace plechu v čase 341 sekund.....	67
obr. 102 Deformace plechu v čase 511 sekund.....	67
obr. 103 Deformace plechu v čase 682 sekund.....	67
obr. 104 Deformace plechu v čase 852 sekund.....	68
obr. 105 Deformace plechu v čase 1023 sekund.....	68
obr. 106 Deformace plechu v čase 1193 sekund.....	68
obr. 107 Deformace plechu v čase 1364 sekund.....	69
obr. 108 Deformace plechu v čase 1534 sekund.....	69
obr. 109 Výsledné protažení modelovaného přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm ....	69
obr. 110 Deformace plechu v čase 328 sekund.....	70
obr. 111 Deformace plechu v čase 574 sekund.....	70
obr. 112 Deformace plechu v čase 821 sekund.....	70
obr. 113 Deformace plech v čase 985 sekund.....	71
obr. 114 Deformace plech v čase 1150 sekund.....	71
obr. 115 Deformace plechu v čase 1313 sekund.....	71
obr. 116 Deformace plechu v čase 1395 sekund.....	72
obr. 117 Deformace plechu v čase 1560 sekund.....	72
obr. 118 Výsledné protažení modelovaného přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm .....	72
obr. 119 Porovnání průběhu teplot při experimentu a modelu.....	73
obr. 120 Porovnání protažení numerického modelu s experimentem, přípoje panelu SPA230E na plech tl. 10 mm .....	74

obr. 121 Porovnání protažení numerického modelu s experimentem, přípoje panelu SPA230E na plech tl. 8 mm .....	75
---	----

## Seznam tabulek

tab. 1 Plánované experimenty .....	14
tab. 2 Přehled porušení vzorků.....	21
tab. 3 Výsledky tuhostí přípojů .....	53
tab. 4 Souhrn materiálových vlastností .....	59
tab. 5 Shrnutí kontaktů modelu .....	61

## Literatura

- [1] 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**, 229–238. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2012.04.008
- [2] LU, Wei, Pentti MÄKELÄINEN, Jyri OUTINEN a Zhongcheng MA. Design of screwed steel sheeting connection at ambient and elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2011, **49**(12), 1526–1533. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2011.07.014
- [3] DE MATTEIS, Gianfranco a Raffaele LANDOLFO. Mechanical fasteners for cladding sandwich panels: *Thin-Walled Structures* [online]. 1999, **35**(1), 61–79. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/S0263-8231(99)00017-8
- [4] LU, W., P. MAKELAINEN a J. OUTINEN. Finite Element Modeling of Single Lap Shear Screw Connection in Steel Sheeting in Fire. *The Open Construction and Building Technology Journal* [online]. 2008, **2**(1), 257–261. ISSN 18748368. Dostupné z: doi:10.2174/1874836800802010257
- [5] PETRA KALLEROVÁ. *Požární odolnost šroubového přípoje trapézových plechů vystavených požáru*. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí. 2011
- [6] WANG, Y.C. a A. FOSTER. Experimental and numerical study of temperature developments in PIR core sandwich panels with joint. *Fire Safety Journal* [online]. 2017, **90**, 1–14. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2017.03.003
- [7] HE, Yuchuan. *Bearing behaviour of lap joints to thin-walled steel plates at ambient and elevated temperatures*. B.m.: ProQuest Dissertations Publishing. 2012. Dissertation/Thesis
- [8] DÜRR, Markus. Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch Sandwichelemente und Trapezbleche. *Stahlbau* [online]. 2008, **77**(5), 388–388. ISSN 00389145, 14371049. Dostupné z: doi:10.1002/stab.200890060
- [9] RUUKKI. *Ruukki Sandwich panel SPA product description*. 2016
- [10] RUUKKI. *Sandwich panel SPA compartment details, principle details*. 2012
- [11] RUUKKI. *Ruukki fasteners for panels product description*. 2016
- [12] ECCS. *Preliminary European Recommendations for Testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels*. 2009. ISBN 92-9147-000-93.
- [13] *ANSYS Workbench* [online]. B.m.: ANSYS, Inc., 2018. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [14] Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/cvis/software/vypocetni-programy/ansys-d110298?aid\\_redir=1](https://www.vutbr.cz/cvis/software/vypocetni-programy/ansys-d110298?aid_redir=1)

- [15] ČSN EN 1993-1-2: Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČSNI, Praha 2004.