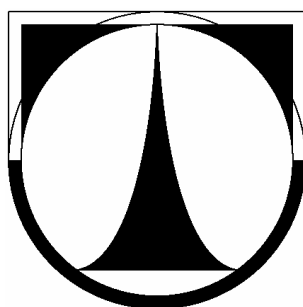


TECHNICKÁ UNIVERZITA

V LIBERCI

Fakulta strojní



Diplomová práce

Optimalizace spojů AL profilů

2006

Lukáš Záběhlík

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: M2301 – strojní inženýrství

Obor: 3901T003 – Aplikovaná mechanika

Zaměření: Inženýrská mechanika

Katedra částí a mechanismů strojů

Optimalizace spojů AL profilů

Jméno autora: Lukáš Záběhlík

KST - 19128

Vedoucí DP: doc.Ing. Ladislav Ševčík, CSc. TU Liberec

Konzultant DP: Ing. Miloslav Novák, MOAS CS s.r.o.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 60

Počet příloh: 10

Datum: 30.5.2006



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Studijní rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Lukáš Z Á B Ě H L Í K**

obor **Aplikovaná mechanika**

zaměření **Inženýrská mechanika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Optimalizace spojů AL profilů

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s dosavadním stavem řešení (konstrukce a výpočty) spojů AL profilů firmy MayTec a tento stav popište.
2. Proved'te kontrolu návrhu těchto částí:
 - Spojovací konektor,
 - Výztužné díly,
 - Klasický ocelový svařovaný díl.K řešení použijte klasické a FE metody.
3. Proved'te experiment a porovnejte s výpočty.
4. Na základě analýzy dle bodu 2 vytipujte části vhodné k inovaci. U vytipované části navrhnete inovační řešení, které doložíte výpočtovou a konstrukční dokumentací.

ANOTACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TÉMA: **Optimalizace spojů AL profilů**

THEME: **Optimization of joints that connect AL profiles**

ANOTACE:

Diplomová práce se zabývá optimalizací spojů profilů z aluminiových slitin. Byly sledovány tři druhy spojů, a to spojovací konektor a dva výztužné díly. Spoje se testovaly na základě předepsaných hodnot daných výrobcem. Výpočet byl z části proveden klasickými výpočetními postupy a úplná konstrukce byla vypočtena metodou konečných prvků. Pro kontrolu vypočtených hodnot byla provedena řada experimentů.

Na základě naměřených a vypočtených výsledků chování spojů, byla navržena vhodná inovace. Vlastnosti optimalizovaných spojů se porovnávaly s klasickými svařovanými ocelovými díly.

ANNOTATION:

My final thesis predominantly deals with the optimization of joints that connect aluminum alloy profiles. The research focuses on three types of joints, i.e. joint connector and two reinforcing parts. The joints were tested according to the producer prescribed values. The calculations were mainly performed using regular numerical methods while the final construction was calculated by the Finite Element Method (FEM). Several experiments were conducted to verify the measured values.

Consequently, a suitable innovation was proposed on the basis of the calculated values. The features of the optimized joints were being compared to the standard welded steel parts.

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Ševčíkovi, CSc. z katedry částí a mechanismů strojů TU v Liberci za poskytnutý čas a připomínky, svému konzultantovi Ing. Miloslavu Novákovi za poskytnuté firemní informace k dané problematice, z firmy MOAS CS s.r.o, Ing. Tomášovi Zůbkovi z hydrodynamické laboratoře v Doubí, za pomoc při rozboru a realizaci měření a také panu Josefu Válkovi za výrobu přípravků a pomoc při montáži zařízení. Celé katedře částí a mechanismů strojů za realizaci měření v hydrodynamických laboratořích v Doubí a za umožnění přístupu do počítačových laboratoří.

Děkuji firmě MOAS CS s.r.o. za možnost vypracování diplomové práce.

V poslední řadě chci poděkovat svým rodičům za jejich soustavnou podporu při studiu na Technické univerzitě v Liberci.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci 30. května 2006

.....

Lukáš Záběhlík

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci 30. května 2006

.....

Lukáš Záběhlík

Obsah:

1	CÍL PRÁCE	- 10 -
1.1	Seznámení s dosavadním stavem.....	- 10 -
1.2	Popis řešeného problému	- 11 -
1.3	Konstrukce jednotlivých spojů.....	- 11 -
1.3.1	Tvar profilů.....	- 11 -
1.3.2	Další součásti potřebné k realizaci spojů	- 12 -
1.3.3	Spoje pomocí konektoru	- 13 -
1.3.4	Spoje pomocí výztuhy 1	- 14 -
1.3.5	Spoje pomocí výztuhy 2	- 15 -
1.3.6	Uchycení jednotlivých spojů	- 16 -
1.4	Namáhání jednotlivých spojů	- 16 -
2	EXPERIMENT	- 17 -
2.1	Parametry měřicího zařízení	- 20 -
2.2	Experiment tahového namáhání	- 21 -
2.2.1	Tahové namáhání spoje s konektorem (experiment)	- 21 -
2.2.2	Poznatky z tahového namáhání spoje s konektorem (experiment)	- 23 -
2.2.3	Tahové namáhání spoje s výztuhou 1 (experiment).....	- 23 -
2.2.4	Tahové namáhání spoje s výztuhou 2 (experiment).....	- 25 -
2.2.5	Poznatky při tahovém namáhání, výztuha 1, výztuha 2 (experiment)	- 26 -
2.3	Experiment ohybového namáhání.....	- 29 -
2.3.1	Ohybové namáhání spoje s konektorem (experiment).....	- 29 -
2.3.2	Poznatky ohybového namáhání, konektor (experiment).....	- 31 -
2.3.3	Ohybové namáhání výztuha 1 (experiment)	- 32 -
2.3.4	Ohybové namáhání spoje s výztuhou 2 (experiment)	- 34 -
2.3.5	Poznatky při ohybovém namáhání, výztuha 1, výztuha 2 (experiment)	- 35 -
3	VÝPOČET POMOCÍ MKP	- 37 -
3.1	Postup při použití MKP	- 37 -
3.1.1	Volba materiálu	- 37 -
3.1.2	Definování kontaktů	- 38 -
3.1.3	Síťování (meshování)	- 41 -
3.1.4	Okrajové podmínky v MKP.....	- 43 -
3.1.5	Předpětí.....	- 45 -
3.1.6	Vypočtené deformací v MKP	- 49 -
4	ČÁSTI VHODNÉ K INOVACI	- 50 -
4.1	Výpočet kombinovaného spoje v MKP	- 51 -
4.1.1	Vypočtené hodnoty v MKP pro kombinovaný spoj.....	- 52 -
4.2	Experiment kombinovaného spoje.....	- 53 -
4.2.1	Experiment ohybové namáhání kombinovaného spoje.....	- 53 -

4.2.2	Experiment tahové namáhání kombinovaného spoje.....	- 54 -
4.3	Posouzení inovačního řešení kombinovaného spoje	- 56 -
5	POROVNÁNÍ S OCELOVÝMI SVAŘOVANÝMI VÝZTUHAMÍ	- 57 -
	ZÁVĚR	- 58 -
	POUŽITÁ LITERATURA	- 60 -
	PŘÍLOHA	

Použitá označení

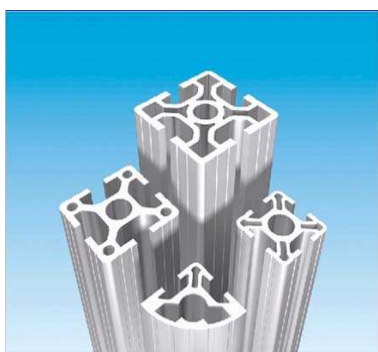
Označení	Jednotky	Název veličiny
l_{vod}	mm	Délka vodorovného profilu
l_{svis}	mm	Délka svislého profilu
d_d	mm	Průměr díry v profilu
l_{okr}	mm	Délka od hrany profilu
l_{hl}	mm	Hloubka díry
F_s	N	Síla působící v dříku konektoru
M_m	N · m	Utahovací moment konektoru
F_o	N	Osová síla ve šroubech
γ	°	Úhel stoupání šroubovice
f	-	Součinitel tření
s	mm	Stoupání závitu
d_2	mm	Střední průměr závitu
F_t	N	Třecí síla
F_N	N	Normálová síla
M_U	N · m	Utahovací moment šroubů
M_{ZU}	N · m	Odporový třecí moment v závitu šroubu
M_{PU}	N · m	Odporový třecí moment mezi hlavou šroubu a podložkou
F_{max}	N	Maximální zatěžující síla
F_{maxC}	N	Maximální zatěžující síla pro spoj s konektorem
F_{maxV1}	N	Maximální zatěžující síla pro spoj s výztuhou 1
F_{maxV2}	N	Maximální zatěžující síla pro spoj s výztuhou 2
$F_{\text{dest.T.V1}}$	N	Destrukční tahová síla pro spoj s výztuhou 1
$F_{\text{dest.T.V2}}$	N	Destrukční tahová síla pro spoj s výztuhou 2
$F_{O\text{max}}$	N	Maximální ohybová zatěžující síla
$F_{O\text{maxV1}}$	N	Maximální ohybová zatěžující síla pro spoj s výztuhou 1
$F_{O\text{maxV2}}$	N	Maximální ohybová zatěžující síla pro spoj s výztuhou 1
$M_{\text{dest.O.V1}}$	N · m	Destrukční ohybový moment pro spoj s výztuhou 1
$F_{O\text{max.com}}$	N	Maximální ohybová zatěžující síla pro kombinovaný spoj
$F_{O\text{min}}$	N	Zbytková ohybová síla

1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je optimalizace dosavadního stavu řešení (konstrukce a výpočty) spojů profilů firmy MayTec. Provést kontrolu návrhu jednotlivých částí spojů dle předepsaných hodnot z katalogu pomocí výpočtů a experimentu. Výsledky výpočtů porovnat s experimenty, popřípadě navrhnout části vhodné k inovaci a porovnat výsledky.

1.1 Seznámení s dosavadním stavem

V dnešní době se velmi často využívají tak zvané stavebnice z AL profilů pro



své výhodné vlastnosti:

- snadná manipulace,
- rychlá a jednoduchá montáž a demontáž zařízení,
- velmi dobrá odolnost proti korozi bez povrchové úpravy,
- vibrační odolnost.

Tyto výhody vyplývají z vlastností aluminiových slitin (malá hmotnost, odolnost proti korozi bez povrchové úpravy) atd.

Samozřejmě, že k těmto výhodám patří i nevýhody těchto profilů: menší pevnost a v některých případech dlouhodobého namáhání může docházet k tak zvanému tečení materiálu, např. v místě spoje.

Stavebnicemi se zabývá mnoho firem. Některé firmy si profily samy vyrábí nebo si je nechávají vyrobit a odebírají už hotové profily. V našem případě profily dodává zahraniční firma MayTec a výhradní zastoupení pro Českou republiku má firma MOAS CS s.r.o., která profily dále zpracovává a nabízí našim zákazníkům.

Profily se dodávají v mnoha velikostech a tvarech dle katalogu firmy MaTec a upravují se na předepsané rozměry, dle přání zákazníka. Z aluminiových profilů se dají sestavit veškerá zařízení, montážní a zkušební stoly, rámy strojů, ochranné zábrany, až po transportní dopravníky. Velmi důležitou částí této stavebnice jsou spoje těchto profilů. Jednak druh spoje a jednak provedení spoje. Tento problém je řešen v této diplomové práci.

1.2 Popis řešeného problému

Na přání firmy MOAS CS byly vybrány tři druhy spojů, které spojovaly dva stejné profily. Tyto profily byly spojeny pokaždé jiným druhem spoje a vystaveny dvěma druhům namáhání. Nejdříve tahovému namáhání a pak ohybovému namáhání. Výpočty namáhání byly provedeny metodou konečných prvků v programu „ANSYS WORKBENCH“ a vypočtené hodnoty ověřeny experimentem (měřením) v hydrodynamické laboratoři v Doubí.

K provedení experimentu byly zvoleny délky profilů tak, aby byly vhodné pro měřicí zařízení, na kterém se provedlo tahové a ohybové namáhání a zároveň neovlivnily pevnost jednotlivých spojů. Průřezové rozměry profilů jsou normovány dle katalogu firmy MayTec.

1.3 Konstrukce jednotlivých spojů

Návrh jednotlivých komponentů byl proveden na základě druhu spoje a to pro následující spoje:

1. spoj pomocí konektoru,
2. spoj pomocí výztuhy 1,
3. spoj pomocí výztuhy 2.

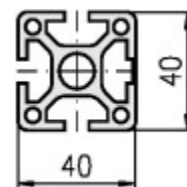
Tyto jednotlivé spojovací prvky, které budou popsány v následujících kapitolách byly vybrány z katalogu na základě dohody a konzultace se společností MOAS CS.

1.3.1 Tvar profilů

Základním komponentem je AL profil vybraný dle katalogu s označením:

profil – PG 40mm, E3 - slot 1.11.040040.43.60 obr. 1.

Tento druh profilu bude v této sestavě umístěn dvakrát, v poloze vodorovné a poloze svislé.



Obr. 1.

Pro vodorovný profil se volí délka: $l_{\text{vod}} = 120\text{mm}$.

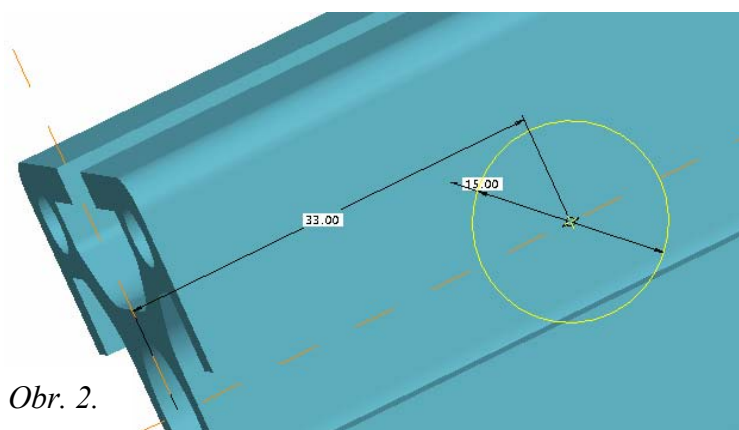
Pro svislý profil: $l_{\text{svis}} = 200\text{mm}$.

Délky profilů byly voleny s ohledem na provedení experimentu, tím je myšleno zvolení vhodných délek, pro umístění měřeného vzorku na měřicí zařízení. Vodorovný profil je nutno pro jednotlivé spoje upravit, a to tak, aby mohlo dojít k montáži jednotlivých spojů.

Nejprve je třeba upravit vodorovný profil, do kterého se vyvrtá díra dle předepsané geometrie z katalogu.

Díra o průměru $d_d = 15\text{mm}$ ve vzdálenosti od okraje (hrany) profilu $l_{okr} = 33\text{mm}$ a hloubce $l_{hl} = 22\text{mm}$ obr. 2 do nichž bude vsunuta část konektoru.

Další úpravu je nutné provést na druhém konci tohoto profilu, a to tak, že do čtyř děr, které jsou zobrazeny na obr. 1, kde je znázorněn řez profilem se vyříznou závit o rozměru **M6**.



Obr. 2.

Tato úprava se provádí z důvodu uchycení profilů k přípravku, který bude používán při jednotlivých měřeních.

Tyto úpravy se provedly pomocí přípravků přímo ve firmě MOAS CS u všech dodaných kusů.

Jiné komponenty se upravovat nemusí, jsou vybrány dle katalogu a jejich úprava pro montáž a měření není nutná.

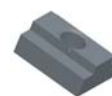
1.3.2 Další součásti potřebné k realizaci spojů

Jak už bylo uvedeno v předchozích odstavcích, je třeba k jednotlivým druhům spojů navrhnout doplňkové součásti, bez kterých, by se spoje nemohly realizovat. Doplňkovými součástmi jsou šrouby s podložkami a kamenné matice. Dle katalogu byly vybrány šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem označeny:

ŠROUB B M8x20 ČSN 02 1143.50, podložka 8,4 ČSN 02 1703.11.

Dále tak zvané kamenné matice obr. 3 s označením:

T-Nuts 1.32.EM8.



Obr. 3.

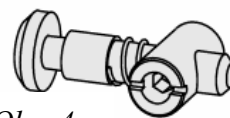
Matice jsou z nerezové oceli nebo galvanicky pokoveny.

V obou případech u výztuhy 1 i u výztuhy 2 se používají stejné druhy doplňkových spojovacích prvků, které se liší pouze počtem matic a šroubů s podložky.

1.3.3 Spoje pomocí konektoru

Navržené profily budou spojeny nejdříve tak zvaným konektorem. Konektor byl vybrán dle katalogu.

Označení konektoru: *1.21.E0* obr. 4, jde o univerzální konektor typu E z nerezové oceli nebo konektor galvanicky pokoven. Tento konektor je určen pro spojení dvou profilů stejného průřezu s pravoúhlým provedením spoje. Pro umístění konektoru v profilu, musí být v jednom z profilů vyvrtána díra dané geometrie, což bylo popsáno v předešlé kapitole.

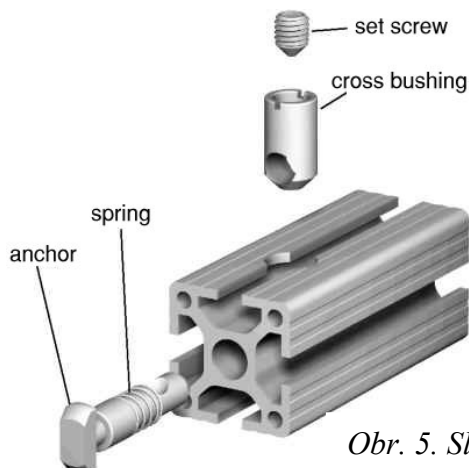


Obr. 4

Tímto konektorem nelze spojit profily pod jiným úhlem než 90°. Pro jiné úhly by se musel užít jiný druh konektoru viz. katalog. Jednotlivé konektory se odlišují tvarem, velikostí a způsobem uchycením v profilu, což odpovídá druhu provedení spoje.

Spoj s konektorem je jeden z nejpoužívanějších a nejvhodnějších druhů spoje. Jde o spoj dvou profilů za pomoci konektoru. Výhodou tohoto spoje je velmi snadná montáž a demontáž.

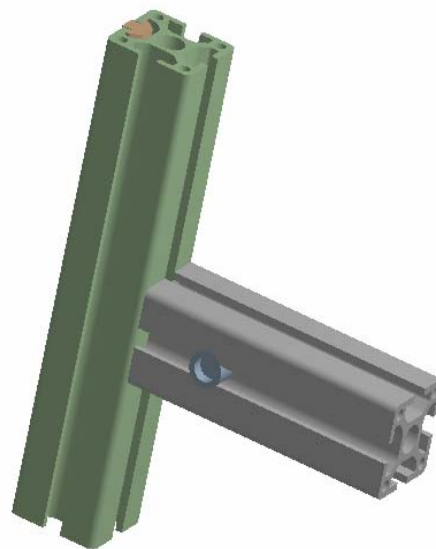
Samotný konektor se skládá ze čtyř částí - dříku (anchor) na němž je nasunuta pružina (spring), válečku (cross bushing), kterým prochází dřík a vně válečku je zašroubován šroub (set screw) pro dotažení spoje obr. 5.



Obr. 5. Složení konektoru

Při montáži a demontáži spoje je nutno dřík s pružinou vyjmout z válečku po dostatečném povolení šroubu. Také je třeba dbát na polohu dříku vůči válečku tak, aby drážka v dříku směřovala k šroubu, jinak není možné sesadit dřík s válečkem. Pro jednotlivé profily a konektory jsou předepsané dotahované momenty viz. katalog str. 110. Provedení spoje s konektorem je zobrazeno na obr. 6.

Pro tento druh spoje, jako jediný, je třeba upravovat profil. Spojením pomocí konektoru se docílí velmi pevného spoje, co se týče tahového namáhání.



Obr. 6. Spoj s konektorem

1.3.4 Spoje pomocí výztuhy 1

Další druh spoje je realizován pomocí výztuhy 1, která byla vybrána dle katalogu.

Označení výztuhy: *Angle GD-Zn 40x39, 1.46.204.4039.1*

obr. 7, jde o výztuhu doplněnou dvěma šrouby s odpovídajícími podložkami a dvěma kamennými maticemi.



Obr. 7.

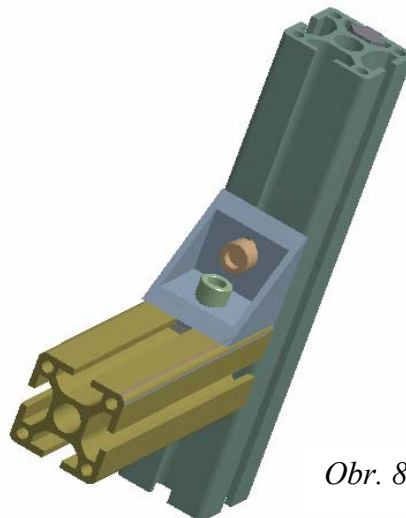
Jako v předešlém případě jde o spoj s úhlem 90°, pro jiné úhly než 90° spoj nelze provést. Tento typ spoje lze realizovat bez jakékoliv úpravy na profilech v místě spoje.

Spoj spojuje svislý a vodorovný profil pomocí výztužného prvku, v našem případě nazvaném výztuha 1, obr. 8. Výztuha je spojena s profily dvěma šrouby s maticemi, které jsou též dotaženy na předepsaný utahovací moment dle katalogu.

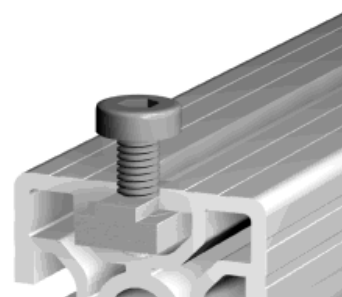
Montáž tohoto spoje je také velmi snadná, ale s porovnáním s konektorem je o něco náročnější a to v ohledu na umístění kamenů vůči šroubům, které musí být ve vzájemně vhodné pozici, aby se daly sešroubovat.

Montáž spoje můžeme provést dvěma způsoby. První způsob provedení se realizuje takto: nejprve vložíme šrouby do výztuhy, na šrouby našroubujeme matice a to pouze na první závity. Poté nasuneme postupně matice i se šrouby jednotlivě do profilů a nakonec se provede dotažení šroubů na předepsaný utahovací moment. Druhý způsob provedení montáže je odlišný v tom, že nejprve se nasune matice do profilů obr. 9a a poté se našroubují jednotlivé šrouby s výztuhou. Nakonec se též dotáhnou na předepsaný utahovací moment. Montáž tohoto spoje v obtížnějších podmínkách vyžaduje větší zručnost.

Spojením pomocí výztuhy 1 se na rozdíl od konektoru očekává mnohem lepší pevnost spoje v ohybu, než tahu.



Obr. 8.



Obr. 9a.

1.3.5 Spoje pomocí výztuhy 2

Poslední druh spoje je téměř totožný jako v předchozím případě s rozdílem rozměrů výztuhy. Výztuha 2 obr. 10a je též vybrána z katalogu.

Označení výztuhy 2:

Angle GD-Zn 38x76, 1.45.204.3876.1.

Spojovací úhel je totožný s výztuhou 1. Rozdíl u těchto spojů je v tom, že každá z výztuh má jinou velikost, což lze najít již v označení výztuh. Tato výztuha je doplněna dalšími součástmi a to čtyřmi šrouby a čtyřmi kamenovými maticemi obr. 10b. Navíc ke každému šroubu je přiřazena odpovídající podložka.



Obr. 10a.

Montáž tohoto spoje je o něco horší než v předešlém případě, protože přibily další dva šrouby. Stále lze ale považovat spoj za snadno smontovatelný a rozebíratelný. Co se týče postupu při montáži, ten může být aplikován stejným způsobem jako u výztuhy 1 s ohledem na vyšší počet šroubů.

Pevnost spoje by měla být lepší, než u výztuhy 1 s ohledem na velikost výztuhy a na větší počet šroubů. Z konstrukce spoje vyplývá, že pevnost v ohybu by měla být mnohem lepší, než pevnost v tahu.



Obr. 10b. Spoj s výztuhou 2

1.3.6 Uchycení jednotlivých spojů

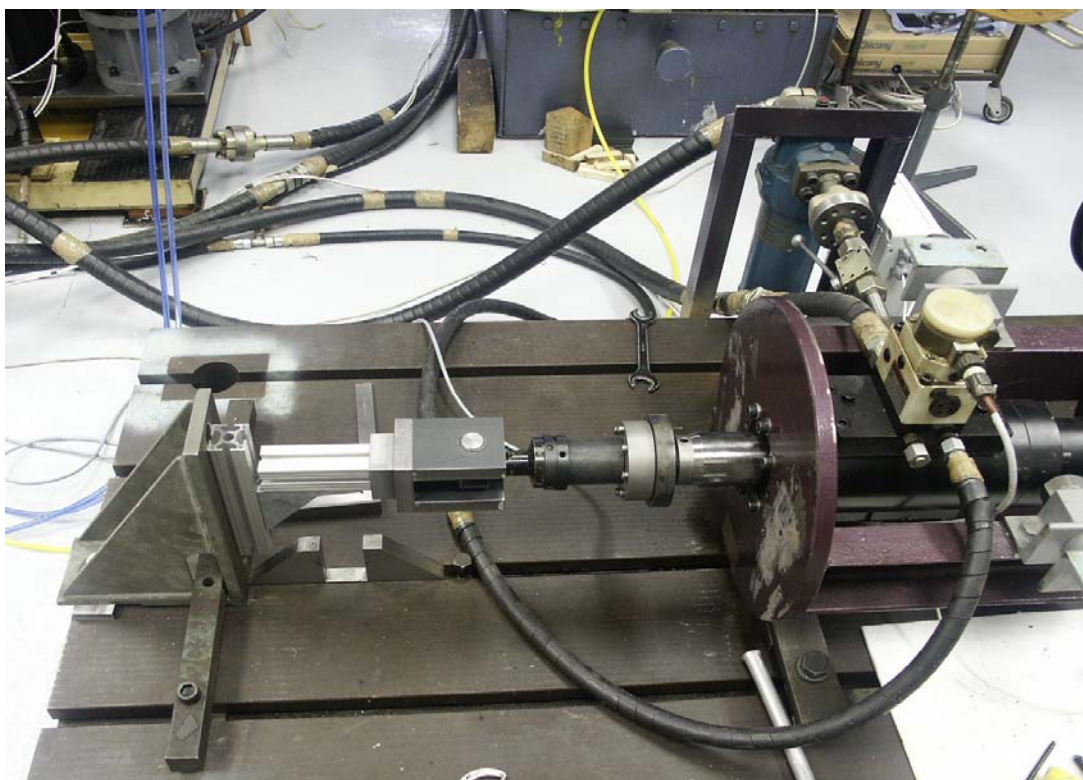
Jednotlivé spoje jsou uchycené pomocí tak zvaného kamene. Kamen je umístěn v drážce svislého profilu a to po celé jeho délce. Pro výpočet pomocí MKP je kamen na celé své délce vetknut a jednotlivé sestavy jsou přichyceny na tento kamen. Co se týče měření (experimentu) a způsobu uchycení kamene, je provedeno podobně jako při výpočtu v MKP; podrobněji bude popsáno v kapitole měření.

1.4 Namáhání jednotlivých spojů

Namáhání jednotlivých spojů bylo zvoleno na základě domluvy se společností MOAS CS a to tak, že každý z uvedených spojů se vystavil míjivému tahovému a ohybovému namáhání. Namáhání bylo vyvoláno ohybovou nebo tahovou silou, jejichž velikost byla odečtena z katalogu, nebo byla stanovena experimentem. Pro jednotlivé druhy spojů jsou tyto síly rozdílné, a proto se nejdříve provedl experiment pro získání všech neznámých zatěžujících sil. Následovně byl proveden výpočet pomocí MKP, kde tyto síly bylo nutno použít.

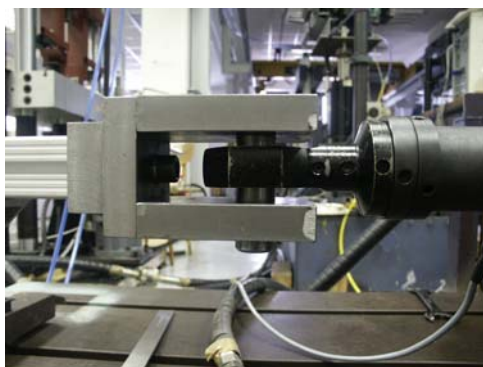
2 Experiment

Samostatný experiment (měření) byl realizován v hydrodynamické laboratoři v Doubí. Prvním ze základních kroků bylo vybrání vhodného zařízení, na kterém bylo provedeno měření obr. 11.



Obr. 11. Měřicí zařízení

V tomto případě byl vybrán hydraulický válec, který je umístěn na pevném ocelovém podkladu ve vodorovné pozici. Válec byl přichycen k ocelovému podkladu šesti šrouby, které jsou zakotveny v drážkách. Tyto šrouby musejí být velmi důkladně dotaženy, aby nedošlo k posunu válce. Při posunu válce by mohlo dojít k porušení přírodních trubic a hadic s hydraulikou.

*Obr. 12.**Obr. 13.*

Ze samotného válce vystupuje pístnice, na niž je umístěn siloměr spolu s ocelovým okem, které je do pístnice zašroubováno obr. 12, 13. Oko má v sobě pouzdro s výklopným ložiskem, proto při pohybu může docházet k malému natočení

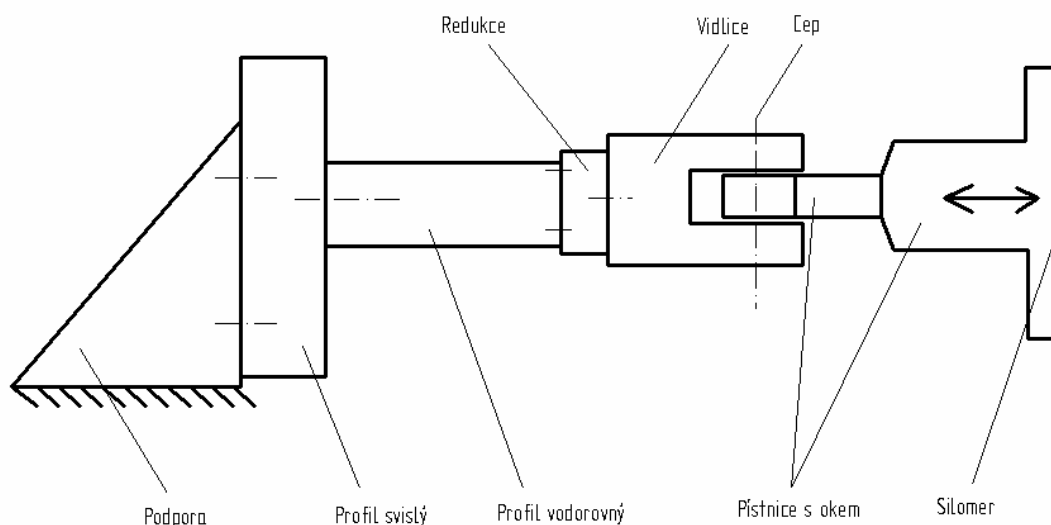
*Obr. 14.*

čepu v oku. K oku je připevněna vidlice, pomocí již zmiňovaného čepu, k vidlici je pomocí šroubu M12 přišroubována redukční deska (redukce), v níž jsou vyvrtány čtyři díry pro šrouby velikosti M8, kterými je přichycen měřený spoj obr. 13, 15. Měřený spoj je ukotven na svařenec pomocí kamene, který je vsunut do drážky svislého profilu. V kameni jsou

vyvrtány dvě díry se závity pomocí nichž je přišroubován měřený spoj k svařenci obr. 14.

Samotný svařenec je ukotven k ocelovému podkladu několika šrouby.

Připevnění svařence je stejně důležité jako přichycení válce, musí být naprosto pevné, aby nedošlo k jejich posunu.



Obr. 15. Schéma měřicí sestavy

Pro jednotlivá namáhání tah a ohyb zůstává hydraulický válec ve své vodorovné pozici. Přemísťovat se bude pouze měřený vzorek, a to tak, aby bylo možné provést namáhání na tah a ohyb.

Z experimentu byly naměřeny absolutní deformace, v níž jsou zahrnuty všechny deformace, které jsou na celé dráze (neboli ve všech částech kde jsou jednotlivé části zařízení spojeny) od pístu až na svařenec.

Některé části potřebné k realizaci uchycení měřeného spoje do měřícího zařízení, musely být navrženy a poté vyrobeny. Jedná se o tyto části : redukce a podložka k siloměru, která byla zakalena z důvodu předepsané tvrdosti. Jednotlivé výrobní výkresy těchto částí měřicí sestavy budou umístěny v příloze této diplomové práce.

2.1 Parametry měřícího zařízení

Siloměr GTM 25 kN.

Na siloměru byla provedena kalibrace, aby snesl maximální zatěžující sílu

$$F_{\max} = 12 \text{ kN}$$

Poloha snímače ve válci LVDT.

Řízeno v silové zpětné vazbě.

Regulátory jsou nastaveny na předepsanou sílu 12 kN při 0,8 Hz.

$$\begin{aligned} \text{Složky:} \quad & P = 0,6, \\ & I = 2\,400 \, \mu\text{s}, \\ & D = 0. \end{aligned}$$

Z toho lze usoudit, že jde o regulátor PI.

Podrobnější údaje o měřícím zařízení jsou k dispozici v laboratoři v Doubí.

2.2 Experiment tahového namáhání

Tahové namáhání bylo provedeno na měřicím zařízení, které bylo popsáno v předešlé kapitole.

Tahové zatěžování bylo rozděleno do tří částí dle druhu spojů:

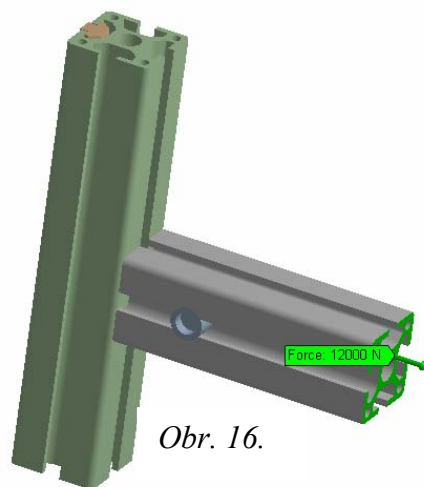
- Konektor,
- výztuha 1,
- výztuha 2.

2.2.1 Tahové namáhání spoje s konektorem (experiment)

Nejprve byla provedena příprava na tahové namáhání spoje s konektorem. Tato příprava spočívala ve vyhledání předepsaných hodnot z katalogu, maximální zatěžující síly pro spoj s konektorem a předepsaný utahovací moment pro konektor.

$$F_{\max C} = 12000 N, \quad M_m = 40 Nm.$$

Po té následovalo sestavení měřeného spoje obr. 16 a jeho umístění do měřicího zařízení. Připojení měřeného spoje k pístnici bylo provedeno pomocí vidlice, čepu a redukce. Tato celá sestava byla přichycena k svařenci dvěma šrouby a kamenem.



Obr. 16.

Po dotažení jednotlivých šroubů a konektoru na předepsaný utahovací moment následovala kontrola celého měřicího zařízení.

Po té se mohlo začít s postupným zkušebním zatěžováním spoje až na předepsanou sílu $F_{\max C} = 12000 N$.

Nejprve se to nepodařilo, protože vlivem špatného dotažení válce došlo k jeho posunutí, a proto se měření muselo opakovat. Po dotažení válce se měření

zopakovalo a předepsané síly se dosáhlo bez problémů. Následovně se spoj vystavil míjivému namáhání o určité frekvenci. Při míjivém namáhání docházelo k velkým deformacím vlivem vůlí, a proto se musela ponechat zbytková síla $F_{\min} = 0,4kN$, aby spojovací sestava zůstala mírně předepjata, a tím se odstranily vlivy vzniklé vůlí. Maximální hodnota míjivého namáhání nepřesáhla předepsanou zatěžující sílu.

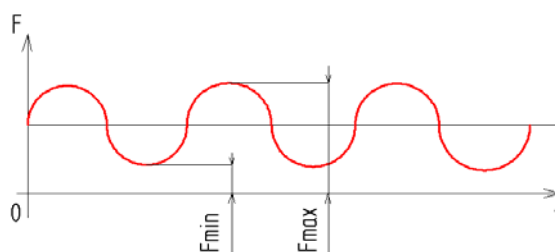
Následně se zvětšovala frekvence až na 0,8Hz, kdy začalo docházet k vibraci válce. Pro odstranění této vibrace se frekvence musela snížit nebo zvýšit. Po zvýšení frekvence až na 1,5 Hz chvění stále neustávalo, a proto bylo rozhodnuto, že hodnota frekvence zůstane na nejpříjemnější vibraci, a to bylo právě zmiňovaných 0,8Hz. Při této frekvenci vibrace nebyla tak výrazná, jako u jiných hodnot.

Vibrace vzniká vlivem tření mezi pístnicí a těsněním, dochází k pohybu na sucho, poskakování a zadrhávání.

Po tomto zkušebním zatížení, kde se ověřilo, že spoj vydrží předepsanou maximální zatěžující sílu se rozhodlo, že pro tento spoj s konektorem se měření bude opakovat 3x, a to v jednotlivých třech krocích.

1. Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max C} = 12000N$, při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6s$), následně odečtení hodnoty celkové deformace.

2. Navazuje na krok 1, vystavení spoje míjivému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut, což odpovídá 300 cyklům, následné odečtení hodnot při prvních třech periodách zatěžování, a též při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{\min} = 0,4kN$ obr. 17.



Obr. 17. Průběh namáhání spoje

3. Zopakování kroku 1

Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max C} = 12000\text{N}$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6\text{s}$) následuje odečtení hodnoty celkové deformace. Tento krok byl proveden z důvodů porovnání deformace na počátku zatěžování a na konci zatěžování.

2.2.2 Poznatky z tahového namáhání spoje s konektorem (experiment)

Při měření spoje s konektorem se sledovala velikost celkové deformace a původ vzniku deformace. Z měření je patrné, že prvotní deformace vzniká už při dotažení konektoru na požadovaný utahovací moment, ale tato deformace je velmi malá. Největší deformace vznikla při prvotním zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max C} = 12000\text{N}$ a to v místě kontaktu konektoru a svislého profilu. Deformace měřená až po střídavém namáhání, byla téměř totožná s deformací u prvotního zatížení. Z toho lze usoudit, že deformace v průběhu zatěžování se dále nezvětšovala.

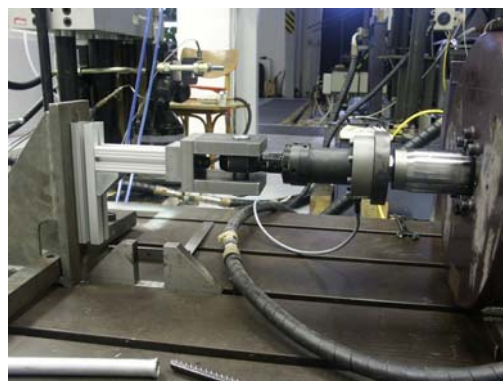
Také docházelo k vrzání profilů při maximální a minimální amplitudě. Původ tohoto vrzání byl vyvolán vlivem tření profilů vůči sobě. Vrzání se projevilo v polovině cyklů a dále se jemně zvyšovalo.

Spoj s konektorem bez problémů snesl namáhání vyvolané předepsanou tahovou silou z katalogu.

2.2.3 Tahové namáhání spoje s výztuhou 1 (experiment)

Pro toto namáhání nebylo třeba přestavovat měřicí zařízení z předešlého měření, stačilo pouze vyměnit druh měřeného spoje obr. 18.

Utahovací momenty pro šrouby s maticemi jsou dány opět dle katalogu $M_u = 26\text{Nm}$, utahovací momenty jsou pro oba šrouby stejné.

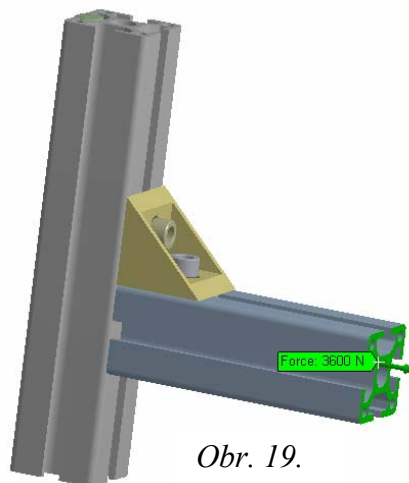


Obr. 18.

Pro tento druh spoje nebyla známa předepsaná hodnota pro maximální zatěžující sílu, kterou by měl být spoj namáhán, a proto se tato síla musela stanovit experimentálně.

Nejprve se zjišťovala síla, při které dojde k povolení spoje a to tak, že spoj byl zatěžován zvětšující se silou až do porušení tohoto spoje. Porušení spoje v tomto případě znamenalo posun profilu vůči výztuze. Tato síla nabyla hodnoty 4,2 kN, následovně byla zmenšena na adekvátní hodnotu, kterou by spoj měl vydržet.

Hodnota, která se považovala za maximální sílu pro výztuhu 1, byla stanovena na $F_{\max V1} = 3600\text{ N}$, obr. 19.



Obr. 19.

Šrouby byly umístěny na střed děr výztuhy a utaženy na předepsaný moment.

Po tomto experimentálním zjištění maximální zatěžující síly následovalo měření, které se bude jako v předešlém případě opakovat 3x a to v jednotlivých třech krocích.

1. Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max V1} = 3600\text{ N}$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6\text{ s}$), následovně odečtení hodnoty celkové deformace.

2. Navazuje na krok 1; vystavení spoje míjivému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut, což odpovídá 300 cyklům, následně odečtení hodnot při prvních třech periodách zatěžování a též při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{\min} = 0,4\text{ kN}$.

3. Zopakování kroku 1

Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max V1} = 3600\text{ N}$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6\text{ s}$), následuje odečtení hodnoty

celkové deformace. Tento krok byl proveden z důvodů porovnání deformace na počátku zatěžování a na konci zatěžování.

2.2.4 Tahové namáhání spoje s výztuhou 2 (experiment)

V tomto případě se postupovalo stejným postupem jako u výztuhy 1, nejprve byla naměřena síla, při které dojde k posunu spoje obr. 20.



Obr. 20. Posun spoje s výztuhou 2

Tato síla nabyla hodnoty 6,5kN, následovně byla zmenšena na adekvátní hodnotu, kterou by spoj měl vydržet.

Hodnota, která se považovala za maximální sílu pro výztuhu 2, byla stanovena na $F_{\max V2} = 6000N$. Šrouby byly též umístěny na střed děr výztuhy a utaženy na předepsaný utahovací moment $M_u = 26Nm$.

Po tomto experimentálním zjištění maximální zatěžující síly následuje měření, které se bude realizovat v již známých třech krocích:

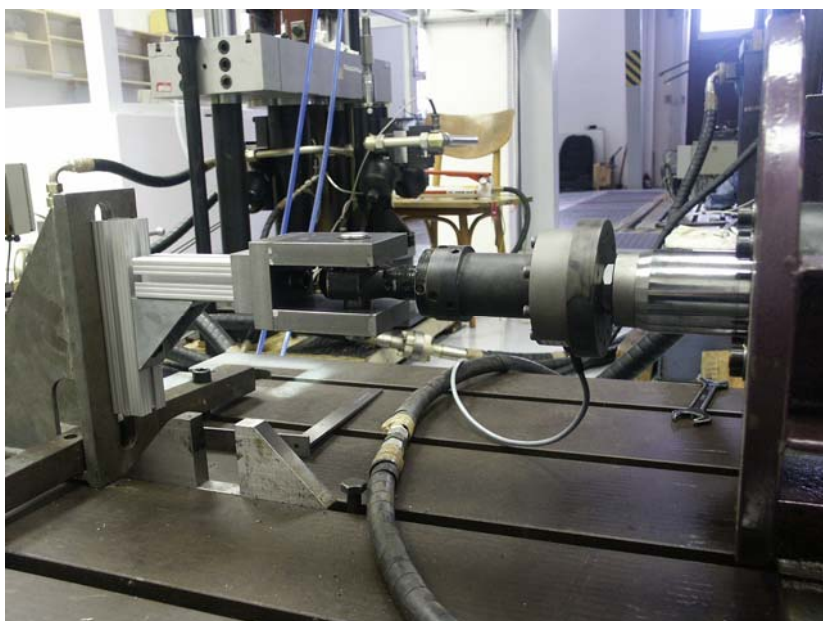
1. Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max V2} = 6000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6s$), následně odečtení hodnoty celkové deformace.

2. Navazuje na krok 1, vystavení spoje míjivému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut, což odpovídá 300 cyklům, následně odečtení hodnot při prvních třech periodách zatěžování, a též při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{\min} = 0,4kN$.

3. Zopakování kroku 1

Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{\max V2} = 6000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6s$), následuje odečtení hodnoty celkové deformace.

Na obr. 21, je celá měřicí sestava se zkoušeným spojem.



Obr. 21. Celá měřicí sestava s zkoušeným spojem

2.2.5 Poznatky při tahovém namáhání, výztuha 1, výztuha 2 (experiment)

Při měření spojů s výztuhami se sledovala deformace a původ vzniku deformace. Z měření je patrné, že při tahovém namáhání spojů s výztuhou nedochází k velkým deformacím na profilech, ale k nejvýznamnější deformaci dochází mezi šrouby s podložkami a výztuhami. Pokud dojde v tomto místě k posunu spoje, tak je

mírně poničena výztuha spoje. Deformace měřené až po střídavém namáháním byly téměř totožné s deformací u prvotního zatížení. Z toho lze usoudit, že deformace při namáhání na tah se u těchto spojů nijak výrazně nezvětšuje.

Měřením byly stanoveny hodnoty sil, při kterých dochází k povolení spoje nebo jeho porušení. Naměřené síly:

$$\text{výztuha 1} \quad F_{dest.T.V1} = 4,2kN ,$$

$$\text{výztuha 2} \quad F_{dest.T.V2} = 6,5kN .$$

Tyto dva druhy spojů snášejí namáhání na tah mnohem hůře, než je to u spoje s konektorem, a proto není vhodné tyto spoje vystavovat většímu namáhání na tah. Což lze usoudit již na první pohled z geometrie těchto spojů.

Naměřené hodnoty z tahového namáhání jednotlivých spojů jsou zapsány v tabulce 1.

TABULKA 1.

TAHOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ						
<u>Druh spojení, číslo měření</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace na počátku zatěžování</u>	<u>Celková deformace po zatěžování</u>	<u>Průměrná hodnota deformace na počátku</u>	<u>Průměrná hodnota deformace po zatěžování</u>	<u>Průměrná hodnota všech deformací</u>
	F[kN]	Δ [mm]	Δ [mm]	průměr Δ [mm]	průměr Δ [mm]	průměr Δ [mm]
Konektor, č.1	12,00	0,78	0,84			
Konektor, č.2	12,00	0,89	0,84			
Konektor, č.3	12,00	0,89	0,92	0,85	0,86	0,86
Výztuha 2 38x76, č.1	6,00	0,79	0,73			
Výztuha 2 38x76, č.2	6,00	0,84	0,71			
Výztuha 2 38x76, č.3	6,00	0,73	0,69	0,78	0,71	0,75
Výztuha 1 40x39, č.1	3,60	0,60	0,68			
Výztuha 1 40x39, č.2	3,60	0,67	0,71			
Výztuha 1 40x39, č.3	3,60	0,68	0,71	0,65	0,70	0,68

2.3 Experiment ohybového namáhání

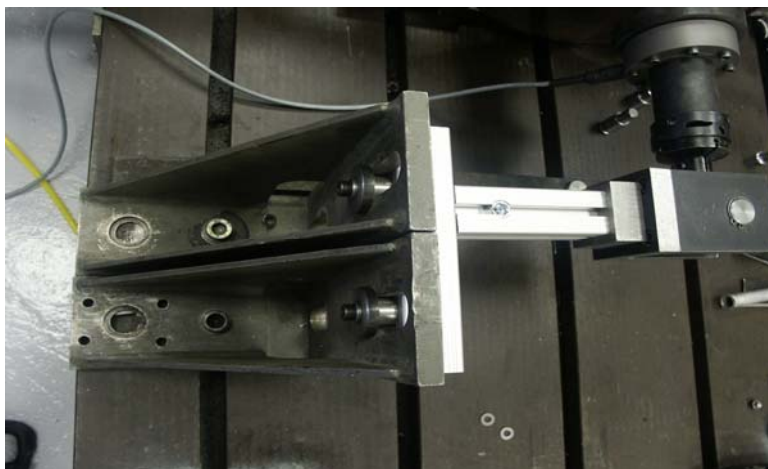
Ohybové namáhání se realizovalo na měřicím zařízení, které bylo popsáno v předešlé kapitole. Při ohybovém namáhání se postupovalo podobným způsobem jako u tahového namáhání. S rozdílem, že zatěžující síly mají jiné velikosti a namáhají spoje ve směru ohybu. Průběh míjivého namáhání byl též stejný.

Ohybové zatěžování bude také rozděleno do tří částí dle druhu spojů:

- konektor,
- výztuha 1,
- výztuha 2.

2.3.1 Ohybové namáhání spoje s konektorem (experiment)

Nejprve se musela provést příprava na ohybové namáhání spoje s konektorem. Tato příprava spočívala v přestavení celého zařízení, připevnění měřeného spoje na pístnici pomocí vidlice, čepu a redukce. Připevnění měřeného spoje k dvěma svařencům, které byly pootočený od původního svařence o 90°. Uchycení bylo provedeno pomocí dvou šroubů a jednoho kamene obr. 22.

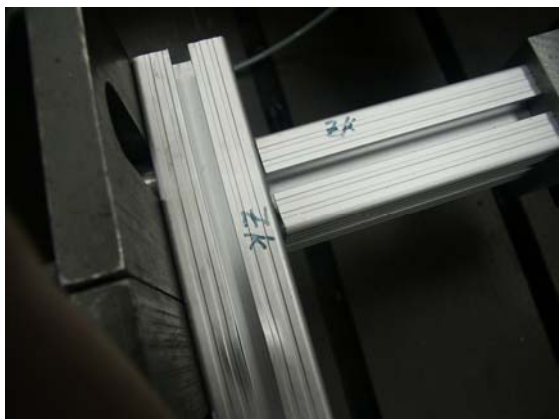


Obr. 22. Uchycení pomocí dvou svařenců

Předepsané hodnoty pro ohybové namáhání jsou v katalogu udávány pouze pro spoj s konektorem. Předepsaný ohybový moment pro spoj s konektorem $M_{O_{\max}} = 250 Nm$. Z tohoto momentu byla vypočítána síla $F_{O_{\max}}$, kterou bude spoj zatěžován. A to tak, že bylo změřeno rameno $r = 230 mm$, na kterém síla působí a tímto ramenem byl vydělen maximální ohybový moment $M_{O_{\max}}$.

$$F_{O_{\max}} = \frac{M_{O_{\max}}}{r} = \frac{250}{0,230} = 1087 N.$$

Po dotažení jednotlivých šroubů na předepsaný utahovací moment a zkontrolování všech spojů se začalo postupným zkušebním zatěžováním spoje, až na předepsanou sílu $F_{O_{\max}} = 1087 N$. Při této maximální síle nám spoj s konektorem nevydržel, došlo u něho k deformaci drážky na profilu obr. 23, 24. Při opakovaném zatížení na předepsanou sílu spoj vydržel. Z toho vyplývá, že maximální ohybová síla je na hranici pevnosti spoje.



Obr. 23. Deformace spoje



Obr. 24. Deformace drážky profilu

Proto v důsledku této deformace se maximální síla musela upravit na $F_{O_{\max}} = 1000 N$. Síla byla upravena tak, aby byla jistota, že nedojde k opětovnému zdeformování spoje. Po této úpravě ohybové síly, spoj bez problému vydržel.

Následně se spoj vystavil střídavému namáhání o určité frekvenci. K vymezení vůlí a odstranění rezonance se musela opět ponechat zbytková síla $F_{\min} = 100N$. Z důvodu mírného předepjetí spoje a tím odstranění vůlí a rezonancí.

Po tomto zkušebním zatížení, kde se upravila zatěžující síla se spoj s konektorem měřil 3x, a to v následujících krocích.

1. Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{Omax} = 1000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6s$), následně odečtení hodnoty celkové deformace.

2. Navazuje na krok 1, vystavení spoje míjivému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut což odpovídá 300 cyklům, následně odečtení hodnot při prvních třech periodách zatěžování a též při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{\min} = 100N$.

3. Zopakování kroku 1.

Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{Omax} = 1000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly za dobu $t = 6s$), následuje odečtení hodnoty.

2.3.2 Poznatky ohybového namáhání, konektor (experiment)

Při měření spoje s konektorem se sledovala deformace a původ vzniku deformace. Z měření je patrné, že prvotní deformace vzniká už při dotažení konektoru na požadovaný utahovací moment, jak tomu bylo u tahového namáhání, ale tato deformace je velmi malá. Největší deformace vznikla při prvotním zatížení na předepsanou maximální sílu, a to v místě kontaktu konektoru s profilem.

Při měření bylo zjištěno, že předepsaná hodnota maximálního ohybového momentu pro spoj s konektorem je na mezi únosnosti spoje, a proto je vhodnější takovému namáhání spoj nevystavovat. Tuto ohybovou sílu lze považovat za sílu, při které dojde k porušení spoje.

Namáhání spoje s konektorem na ohyb je velmi nevhodné, a proto při tomto druhu namáhání, by se raději měl zvolit jiný druh spoje.

Deformace měřené po střídavém namáhání byla o něco menší, než deformace prvotního zatěžování. Tento rozdíl deformací si lze vysvětlit tím, že při nadměrném zatěžování komponentů z AL slitin může docházet ke zpevňování jednotlivých komponentů vlivem dosažení plastické deformace.

2.3.3 Ohybové namáhání výztuha 1 (experiment)

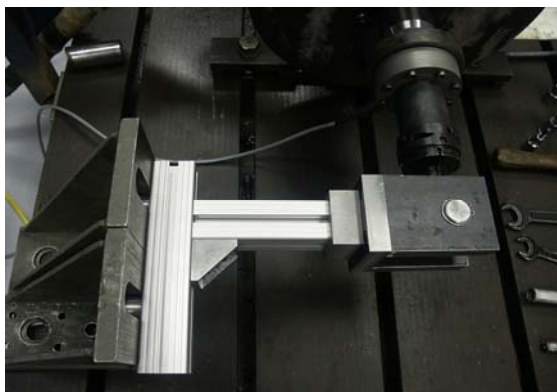
Pro tento druh spoje nebylo třeba nějak přestavovat měřicí zařízení z předešlého nastavení, stačilo pouze vyměnit druh měřeného spoje.

U tohoto spoje též nebyly předepsané hodnoty pro maximální ohybový moment, kterému by se měl spoj vystavit. Proto se ponechal stejný ohybový moment jako u spoje s konektorem, za předpokladu, že spoj s konektorem při namáhání na ohyb vydrží nejméně z namáhaných spojů a ostatní spoje na tom budou lépe.

Zatěžující ohybová síla $F_{O_{\max}} = 1000\text{ N}$ se použila i u spojů s výztuhou 1, 2.

Hodnota, která se považovala za maximální ohybovou sílu pro výztuhu 1, byla tedy stanovena na $F_{O_{\max V1}} = 1000\text{ N}$. Šrouby byly umístěny na střed děr výztuhy a utahovací moment šroubů byl $M_u = 26\text{ Nm}$.

Po tomto stanovení maximální ohybové síly následuje měření obr. 25, 26, které bude stejné, jako v předešlém případě u spoje s konektorem.

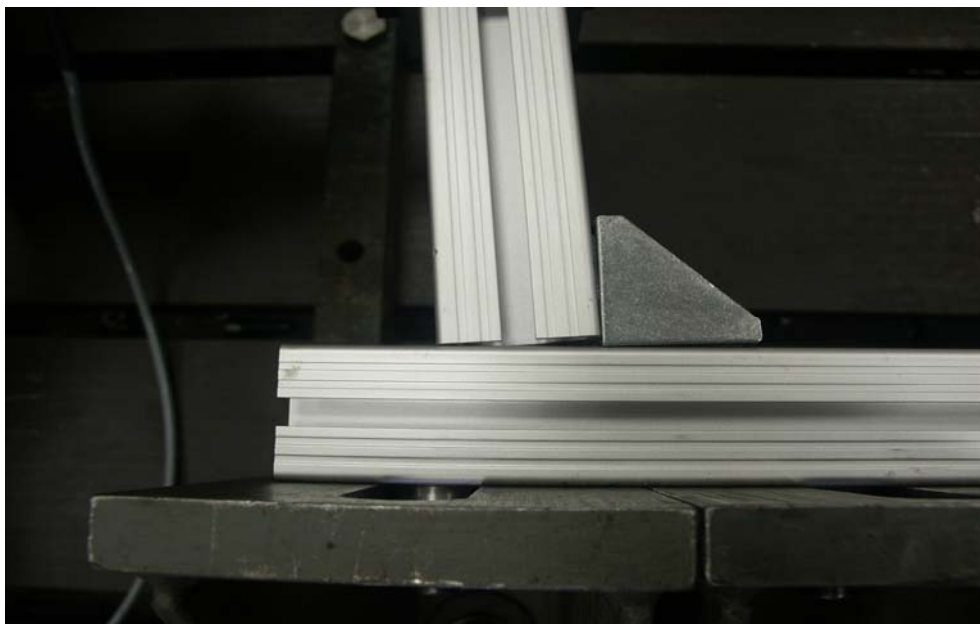


Obr. 25. Namáhání spoje s výztuhou 1



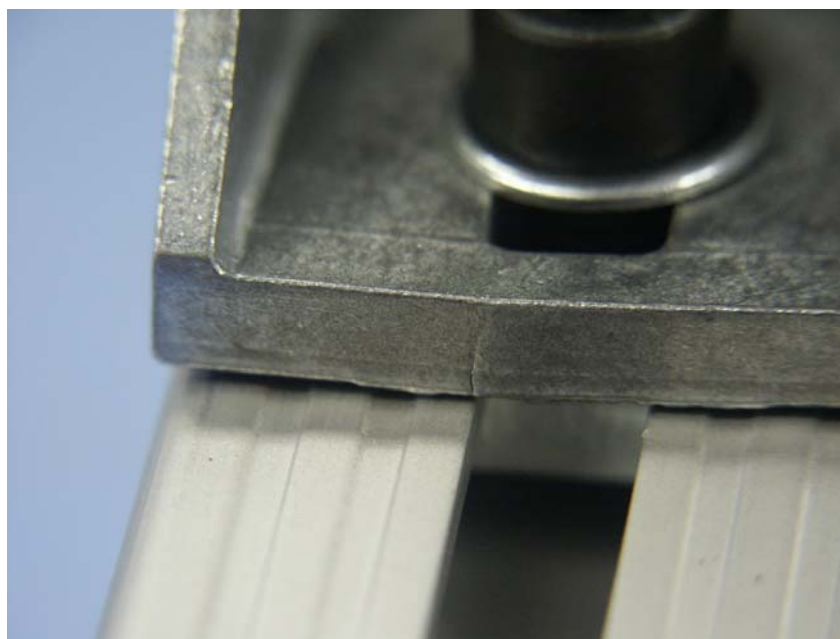
Obr. 26. Namáhání spoje s výztuhou 1

Po měření následovalo zjištění ohybové síly, při které se spoj poruší, a to tak, že se spoj zatěžoval zvětšující se silou, až do porušení spoje. Porušení spoje v tomto případě znamenalo vyvolání deformace výztuhy v místě uchycení obr. 27.



Obr. 27. Deformace spoje s výztuhou 1

Tato síla nabyla hodnoty 1,51kN, při níž došlo k trhlině na okraji výztuhy pod hlavou šroubu obr. 28.



Obr. 28. Trhlině na výztuze 1

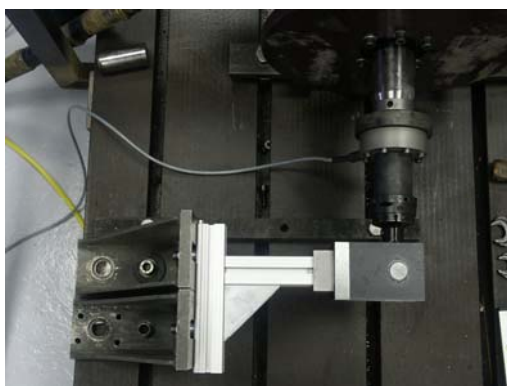
Ohybové síla se zvětšovala až do té doby, než došlo k tak velké deformaci nebo k tak velkému posuvu pístnice, že se hodnota posuvu dostala až na hranici nastaveného dorazu. Po dosažení hodnoty dorazu na pístnici se měřící zařízení vypnulo. Hodnoty se zaznamenávaly v průběhu celého zatěžování, a proto lze bez problému odečíst hodnotu maximální ohybové síly.

2.3.4 Ohybové namáhání spoje s výztuhou 2 (experiment)

V tomto případě se postupovalo stejným postupem jako u výztuhy 1.

Hodnota, která se považovala za maximální ohybovou sílu pro výztuhu 2, byla stanovena na $F_{O_{\max V2}} = 1000N$

Samostatné měření bylo provedeno naprosto stejným způsobem jako u výztuhy 1 obr. 29, 30.



Obr. 29. Namáhání spoje s výztuhou 2



Obr. 30. Namáhání spoje s výztuhou 2

Po měření následoval pokus o zjištění ohybové síly, při které dojde k porušení spoje. Ale k porušení spoje v tomto případě nedošlo z důvodu kalibrace siloměru. Kalibrace byla stanovena na hodnotu maximálního zatížení, tato hodnota nebyla dostatečná k trvalému porušení spoje. Z důvodu této kalibrace se nemohlo docílit většího poškození spoje obr. 31.



Obr. 31. Minimální poškození spoje s výztuhou 2

2.3.5 Poznatky při ohybovém namáhání, výztuha 1, výztuha 2 (experiment)

Z měření je patrné, že při ohybovém namáhání spojů s výztuhou dochází k mnohem menším deformacím, než u spoje s konektorem. Proto při namáhání na ohyb je mnohem vhodnější použít spoje s výztuhami. Také byly naměřeny ohybové síly, při kterých dojde k porušení spoje. Pro výztuhu 1 byla síla $F_{dest.V1} = 1,51kN$, což odpovídá ohybovému momentu $M_{dest.OV1} = 347,3Nm$. Pro spoj s výztuhou 2 se ohybová síla nepodařila naměřit. Spoj s výztuhou 2 odolává ohybovému namáhání nejlépe ze všech zkoušených spojů.

Pokud se porovnávají deformace měřené před a po namáhání, tak jsou téměř totožné.

Naměřené hodnoty z ohybového namáhání jednotlivých spojů jsou zapsány v tabulce 2.

TABULKA 2

OHYBOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ						
Druh spojení, číslo měření	Zatěžující síla	Celková deformace na počátku zatěžování	Celková deformace po zatěžování	Průměrná hodnota deformace na počátku	Průměrná hodnota deformace po zatěžování	Průměrná hodnota všech deformací
	F[kN]	Δ [mm]	Δ [mm]	průměr Δ [mm]	průměr Δ [mm]	průměr Δ [mm]
Konektor, č. 1	12,00	6,07	5,31			
Konektor, č. 2	12,00	5,88	4,44			
Konektor, č. 3	12,00	5,46	4,58	5,80	4,78	5,29
Výztuha 2 38x76, č. 1	6,00	1,57	1,52			
Výztuha 2 38x76, č. 2	6,00	1,46	1,28			
Výztuha 2 38x76, č. 3	6,00	1,13	1,10	1,39	1,30	1,34
Výztuha 1 40x39, č. 1	3,60	2,38	2,46			
Výztuha 1 40x39, č. 2	3,60	2,75	2,88			
Výztuha 1 40x39, č. 3	3,60	2,30	2,20	2,47	2,51	4,99

3 Výpočet pomocí MKP

3.1 Postup při použití MKP

Při použití metody konečných prvků se musí dodržovat určitý postup, abychom dosáhli příznivého výpočtu.

V tomto případě se postupovalo v několika základních krocích. Nejprve se vymodelovaly jednotlivé druhy spojů pomocí objemového modeláře (Pro-Engineer), to znamená vymodelování jednotlivých součástí spoje (profily, konektor, výztuhy atd.), pak následuje sestavní součástí do jednotlivých spojů. Při sestavování jednotlivých spojů se vytvářejí tak zvané vzájemné vazby, tento krok je velmi důležitý pro další operace se sestavami v MKP. Vzájemné vazby se vytvářejí tak, jak mají být jednotlivé součásti k sobě připevněny (svázány). To znamená, že pomocí vazeb je určena jejich přesná vzájemná poloha.

Takto byly vymodelovány všechny měřené spoje a následovně importovány do programu „Ansys Workbench“, což je program podporující metodu konečných prvků.

Postup, kterým se postupovalo v tomto programu, je popsán v následujících kapitolách.

3.1.1 Volba materiálu

Volba materiálu je jeden ze základních kroků.

Materiál se vybírá z materiálových knihoven, v našem případě se volila ocel nebo slitiny aluminia.

Profily svislý, vodorovný	– aluminium.
Konektor	– ocel.
Výztuhy 1, 2	– aluminium.
Šrouby	– ocel.
Kamenové matice	– ocel.
Kotvící kámen	– ocel.

Knihovny v programu „Ansys Workbench“ nebyly tak vhodné, jak bychom si představovali. Výběr z knihoven byl velmi omezený, knihovny obsahují pouze základní materiály.

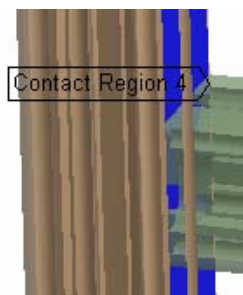
U oceli a slitiny aluminia nebyl problém, ale u výztuh, kde bylo nutné zvolit slitinu GD - ZN, tato slitina však v knihovně nebyla, a proto musela být zvolena náhradní slitina aluminia.

3.1.2 Definování kontaktů

Dalším krokem po volbě materiálu je definování kontaktu, respektive úprava a zvolení druhu kontaktu. Po importování sestavy do programu „Workbench“. Program automaticky přiřadí kontakty všude tam, kde se součásti dotýkají. Program zvolí sám základní kontakt, který se nazývá *Bond*. Jde o kontakt, který se chová, jako by byly součásti v místě kontaktu svařeny. Ale stále bere v úvahu, že v místě kontaktu jde o dvě rozdílná tělesa, což se týče např. rozdílného materiálu spojených částí. Tento kontakt se používá velmi často v MKP pro zjednodušené případy, ale ve skutečnosti se v realitě, tak často nevyskytuje.

V našem případě jsme používali dva druhy kontaktu *Bond* a *Fricction*. *Fricction* je třecí kontakt. U třecího kontaktu se udává součinitel tření, byla zvolena hodnota $f = 0,1$. Třecí kontakty se volí tam, kde by mohlo dojít k pohybu součástí vůči sobě, u kontaktu s pevným spojením byl ponechán *Bond* kontakt.

Jeden z prvních třecích kontaktů je kontakt v místě, kde se profily dotýkají obr. 32. V tomto kontaktu se profily při namáhání vůči sobě pohybují, a proto byl zvolen třecí kontakt, který je stejný u všech druhů spojů. Další stejný kontakt pro všechny spoje je *Bond* kontakt, který je mezi velkým kotvicím kamenem a svislým profilem obr. 33. Ostatní kontakty jsou pro jednotlivé spoje rozdílné, a proto se budou popisovat jednotlivě.

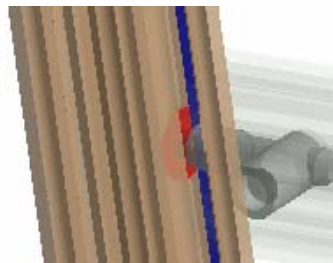


Obr. 32.

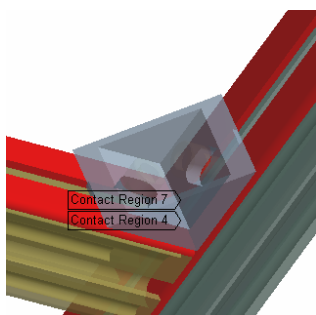
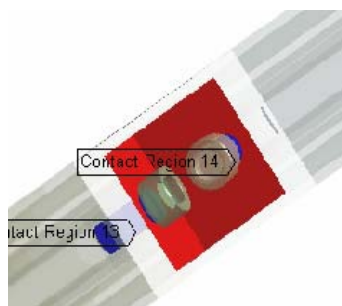
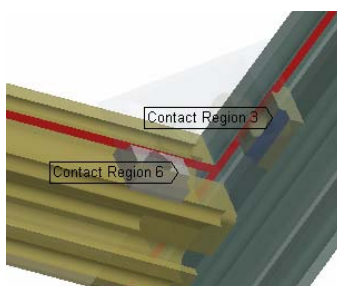


Obr. 33.

Spoj s konektorem – obsahuje dva třecí kontakty a to mezi vodorovným profilem a konektorem obr. 34 a dále mezi svislým profilem a konektorem obr. 35.

*Obr. 34.**Obr. 35.*

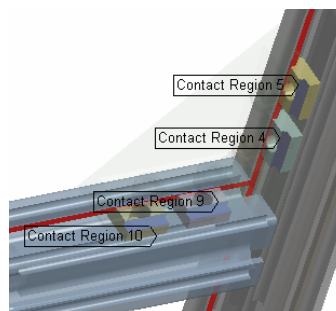
Spoj s výztuhou 1 – obsahuje třecí kontakty mezi výztuhou a profily obr. 36, též třecí kontakt mezi hlavami matic a výztuhou obr. 37. *Bond* kontakty jsou mezi maticemi a šrouby obr. 38 a mezi maticemi a profily obr. 39.

*Obr. 36.**Obr. 37.**Obr. 38.**Obr. 39.*

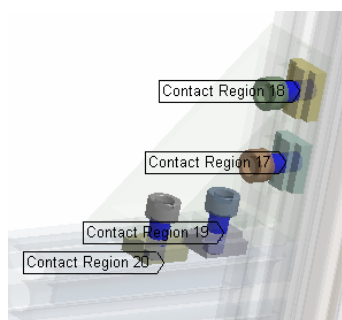
Spoj s výztuhou 2 – podobné, jako u výztuhy 1 s rozdílem, že spoj má více šroubů a matic jinak naprosto stejným druhem kontaktů obr. 40, 41, 42, 43.



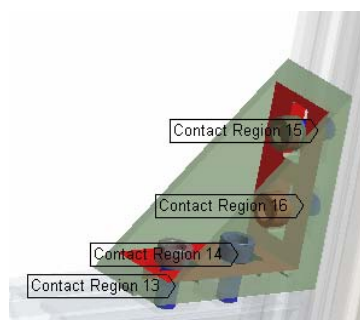
Obr. 40.



Obr. 41.



Obr. 42.



Obr. 43.

Volba kontaktů byla provedena tak, aby co nejvíce odpovídala realitě a zároveň, aby vypočtené hodnoty byly v rozumném rozmezí co se týče doby výpočtu.

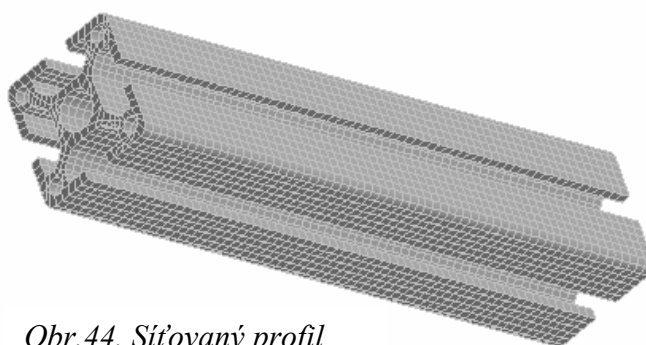
3.1.3 Sít'ování (meshování)

Volba sítí byla provedena adekvátně k podmínkám jednotlivých spojů. Jde hlavně o velikost jednotlivých elementů. Pokud bude zvolena velmi hustá sít', tak výpočet bude co nejpřesnější, ale může se stát, že tento výpočet může trvat i několik dní. V našem případě trvá výpočet u některých spojů den a více, a proto se muselo být zvoleno optimální řešení, co se týče doby výpočtu a přesnosti výpočtu.

WorkBench vytvoří sít' dle svého pevného nastavení, pro jednotlivé spoje byla tato sít' nepřijatelná, a proto se sítě upravily dle takovýchto představ.

Druh elementu se zvolil pro všechny součásti stejný – *Hex Dominant* jde o element, který má tvar šestistěnu, velikosti elementů se pro jednotlivé součásti volily rozdílné.

Pro profily, vodorovný a svislý je velikost elementu roven 3mm obr. 44

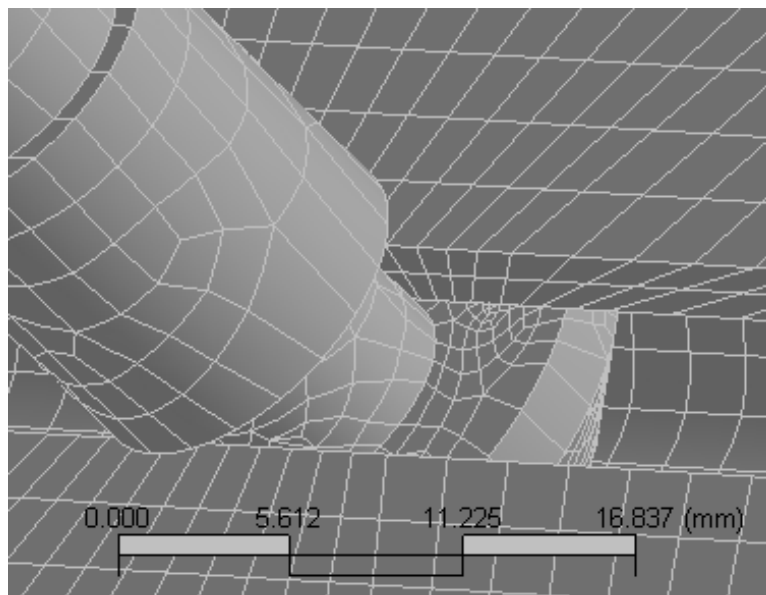


Obr.44. Sít'ovaný profil

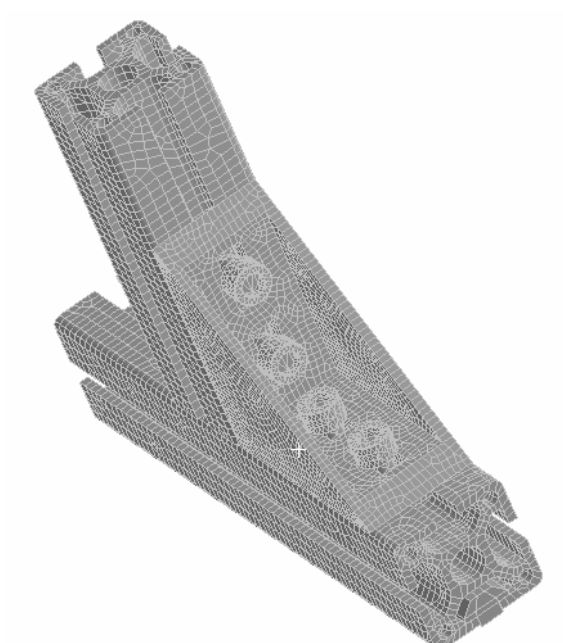
Pro výztuhy 1, 2 se volila velikost elementu 2mm a u konektoru byla velikost elementu též 2mm. V místě kontaktů, mezi jednotlivými částmi se sít' zjemňovala a to na velikost 1mm obr. 45, kde je znázorněn kontakt mezi konektorem a svislým profilem. Zjemnění bylo provedeno ve všech důležitých, kontaktních místech.

Je dobré dodržovat tento postup, nejprve volbu kontaktů a následně upravit sítě. Při obráceném postupu by se nemohlo provést zjemňování sítě v místech kontaktů. Pro názornost je vložen vy-sít'ovaný spoj s výztuhou 2 na obr. 46. U ostatních spojů je sít' obdobná s rozdílným počtem kontaktních míst.

Takto zvolené síťování (*meshování*)dle tohoto uvážení, je pro měřené případy dostatečné, co se týče přesnosti výpočtu i doby výpočtu.



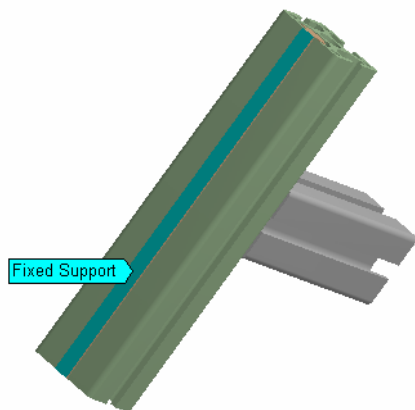
Obr. 45. Síťovaný kontakt



Obr. 46. Síťovaný spoj s výztuhou 2

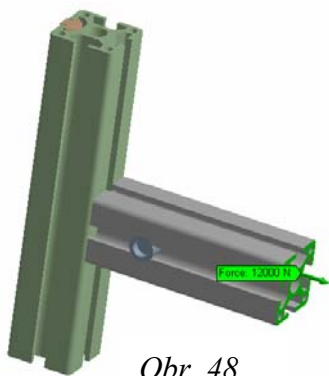
3.1.4 Okrajové podmínky v MKP

Další krokem v MKP jsou tak zvané okrajové podmínky. V případě zkoušených spojů okrajové podmínky obsahují vetknutí kamene, které je znázorněno

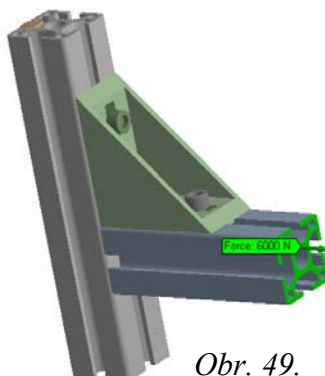


na obr. 47. Další okrajová podmínka je definování velikosti a orientací zatěžujících sil, ty jsou zobrazeny pro jednotlivé spoje na obr. 48 - 53. Síly jsou rozloženy na celou plochu profilu. Co se týče velikostí zatěžujících sil, ty jsou shrnuty v tabulce 3 a 4. Poslední okrajovou podmínkou je definování předpětí u šroubových spojů. Této okrajové podmínce bude věnována

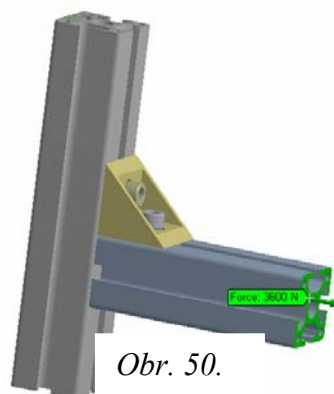
Obr. 47. Vetknutí pomocí kamene následující kapitola.



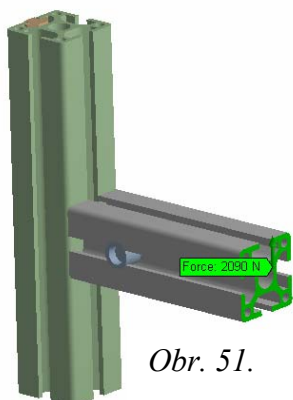
Obr. 48.



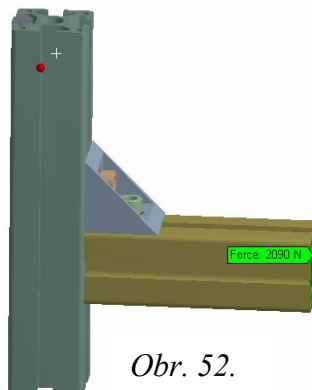
Obr. 49.



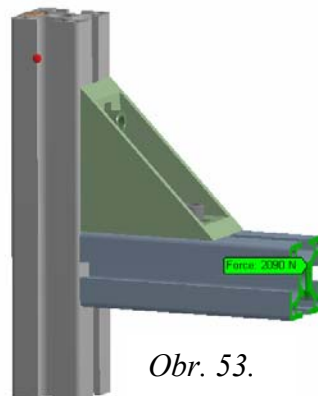
Obr. 50.



Obr. 51.



Obr. 52.



Obr. 53.

Shrnutí důležitých hodnot

Pro lepší orientaci v MKP se provedlo shrnutí hodnot pro tah a ohyb.

TABULKA 3

TAHOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spoje</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Předepsané utahovací momenty (konektor, šroub)</u>
	$F_{\max T} [N]$	Mm, Mu[Nm]
Konektor	12,000	40
Výztuha 1	3600	26
Výztuha 2	6000	26

TABULKA 4

OHYBOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spoje</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Předepsané utahovací momenty (konektor, šroub)</u>
	$F [N]$	Mm, Mu[Nm]
Konektor	2090	40
Výztuha 1	2090	26
Výztuha 2	2090	26

Zatěžující ohybová síla pro jednotlivé spoje byla vypočtena z předepsaného ohybového momentu pro spoj s konektorem. Zatěžující ohybové síly jsou pro všechny spoje stejné, jako tomu bylo i u experimentu. Pro zachování stejného ohybového momentu u experimentu a výpočtu, se ohybová síla musela přepočítat z důvodu rozdílných velikostí ramen, na kterých síly působí. U výpočtu MKP velikost ramene odpovídá velikosti vodorovného profilu $l_{\text{vod}} = 120\text{mm}$, jemuž odpovídá síla 2090N. U experimentu rameno mělo velikost $r = 230\text{mm}$, a proto ohybová síla vycházela menší. Ohybové síly pro výpočet jsou stejné pro všechny spoje.

Při porovnávání ohybových výsledků s experimentem je nutno vypočtené deformace vynásobit podílem ramen, $x = \frac{r}{l_{\text{vod}}} = 1,92$, pak lze hodnoty porovnat. U všech následujících tabulek pro výpočet v MKP jsou tyto hodnoty již vynásobeny.

3.1.5 Předpětí

U konektoru a šroubu se v MKP zadává tak zvaný (*pretension Bold Load*), což ve skutečnosti představuje šroubové zatížení ve formě předepjatého spoje.

U měřených spojů se předpětí bude aplikovat na konektor a šrouby. Výpočet předpětí u jednotlivých spojů bude proveden následovně.

Odvození síly (předpětí) v konektoru:

Ve spoji s konektorem po dotažení konektoru na předepsaný utahovací moment vznikne předpětí. Toto předpětí způsobuje síla F_s , která působí na dříku konektoru obr. 54.

Pro výpočet v MKP je tato síla potřeba k definování předepjatého spoje. Proto byl proveden výpočet pro získání této síly.

Provedení výpočtu:

V konektoru je závit M10 x 1,5 ten je dotažen na předepsaný utahovací moment dle katalogu $M_m = 40 Nm$

Při pohybu šroubu ve směru síly F_0 bude utahovací moment

$$F_m \cdot a = M_m = F_0 \cdot \frac{d_2}{2} (\operatorname{tg} \gamma - f) \Rightarrow F_0, \quad F_0 = \frac{2 \cdot M_m}{d_2 (\operatorname{tg} \gamma - f)}$$

Kde γ je úhel stoupání šroubovice závitu,

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{s}{\pi \cdot d_2},$$

f - součinitel tření v závitech, u šroubu s ostrými závity s vrcholovým úhlem

α se do předešlého vztahu dosazuje místo součinitele tření f hodnota $f' = \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}$.

Pro metrický závit je $\alpha = 60^\circ$ a součinitel tření $f = 0,1$

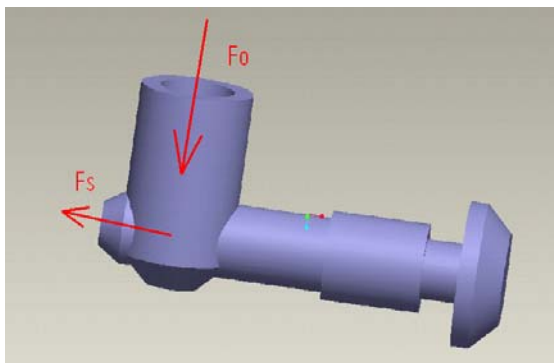
Hodnoty z tabulek pro šroub M10: stoupání závitu $s = 1,5$,

střední průměr $d_2 = 9,026 mm$

Po dosazení do předešlého vztahu dostaneme:

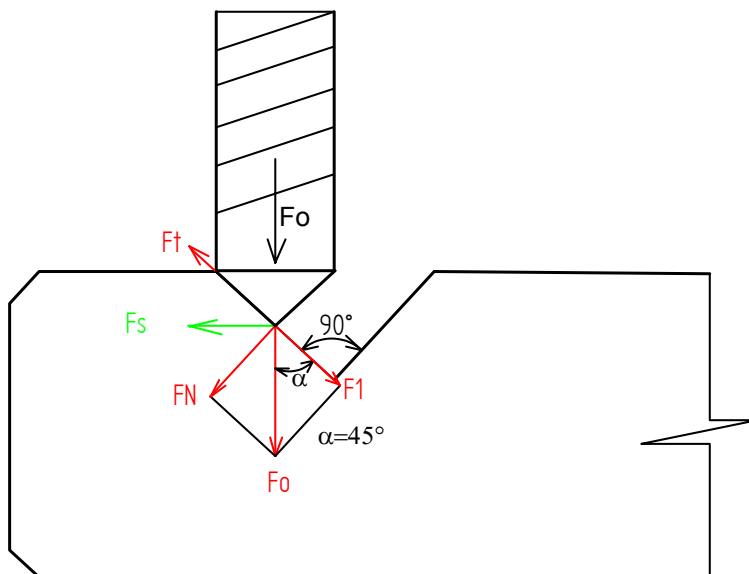
$$F_0 = \frac{2 \cdot M_m}{d_2 \cdot \left(\frac{s}{\pi \cdot d_2} - \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right)} = \frac{2 \cdot 40}{9,026 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,5}{\pi \cdot 9,026 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,1}{\cos \frac{60^\circ}{2}} \right)} = 141651,1159 N$$

$F_0 = 141651,1 N$ - síla působící v ose šroubu



Obr. 54.

Přepočítání síly na dřík konektoru (síla ve spoji) dle obr. 55.



Obr. 55.

$$F_t = F_N \cdot f, \quad F_N = F_0 \cdot \sin \alpha = F_0 \cdot \cos \alpha = F_1$$

Síla v dříku konektoru: $F_s = F_t \cdot \cos \alpha = F_N \cdot f \cdot \cos \alpha = F_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot f$

$$F_s = 141651,1 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 7082,56 N$$

Síla byla zaokrouhlena na $F_s = 7090 N$.

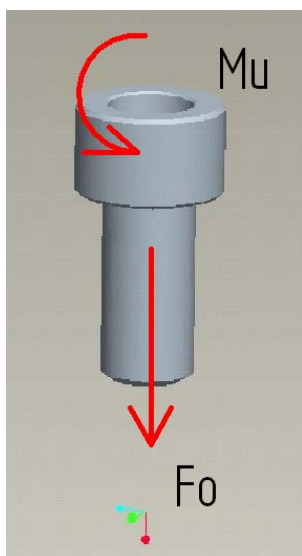
Odvození síly (předpětí) ve šroubu:

Síla, která způsobuje předpětí ve šroubu se vyskytuje všude, kde se používá šroubový spoj a to je u výztuh 1 a 2. U obou druhů spojů jsou použity stejné šrouby, které se dotahují na stejně velký, předepsaný moment, a proto síla ve šroubu F_0 bude všude stejná.

Sílu F_0 obr. 56 budeme potřebovat pro výpočet v MKP, abychom nadefinovali předpětí u jednotlivých spojů.

Provedení výpočtu:

Parametry šroubu jsou M8 x 1,25, šroub je dotažen na předepsaný utahovací moment dle katalogu.



Obr. 56.

$$M_u = 26 Nm$$

Při pohybu šroubu ve směru síly F_0 je utahovací moment.

$$F_0 \cdot a = M_u = M_{zu} + M_{pu} = \frac{3}{4} F_0 \cdot d_2 \cdot (tg \gamma - f) \Rightarrow F_0,$$

$$\text{Za předpokladu, že } M_{pu} = \frac{1}{2} \cdot M_{zu}$$

$$F_0 = \frac{3 \cdot M_u}{4 \cdot d_2 (tg \gamma - f)}$$

Kde γ je úhel stoupání šroubovice závitu,

$$tg \gamma = \frac{s}{\pi \cdot d_2},$$

f - součinitel tření v závitech, u šroubu s ostrými závity s vrcholovým úhlem

α se do předešlého vztahu dosazuje místo součinitele tření f hodnota $f' = \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}$.

Pro metrický závit je $\alpha = 60^\circ$ a součinitel tření $f = 0,1$

Hodnoty z tabulek pro M8: stoupání závitu $s = 1,25 \text{ mm}$,

střední průměr $d_2 = 7,188 \text{ mm}$.

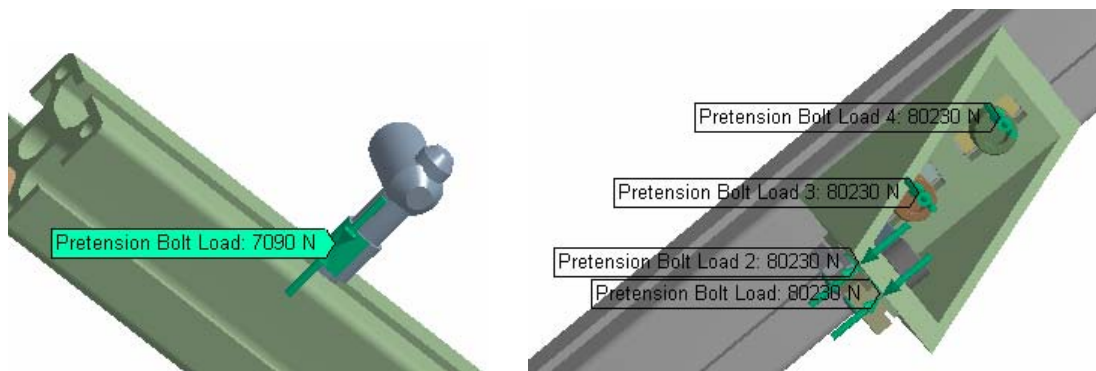
Po dosazení do předešlého vztahu dostaneme:

$$F_0 = \frac{3 \cdot M_m}{4 \cdot d_2 \left(\frac{s}{\pi \cdot d_2} - \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right)} = \frac{3 \cdot 26}{4 \cdot 7,188 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,25 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 7,188 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,1}{\cos 30^\circ} \right)}$$

$F_0 = 80226,23 \text{ N}$ - síla působící v ose šroubu.

Sílu byla zaokrouhlena na $F_0 = 80230 \text{ N}$.

Názorné předvedení předpětí u konektoru a šroubů v MKP obr. 57, 58.



Obr. 57,58. Předpětí u spojů s konektorem a výztuhy 2

Předpětí na obr. 58 představuje spoj s výztuhou 2, je stejným způsobem aplikován i na spoji s výztuhou 1 s rozdílem počtů šroubů.

Vypočtené hodnoty předpětí pro jednotlivé spoje jsou shrnuty v tabulce 5.

TABULKA 5

Předpětí	
<u>Druh spoje</u>	<u>Síla předpětí (konektor, šroub)</u>
	F[N]
Konektor	7090
Výztuha 1	80230
Výztuha 2	80230

3.1.6 Vypočtené deformací v MKP

Posledním krokem je samotný výpočet. Za konečný výsledek je považována celková deformace jednotlivých spojů.

U každého spoje byl proveden výpočet celkové deformace, a také jednotlivých směrových deformací X,Y,Z.

Vypočtené hodnoty celkových deformací byly vyneseny do tabulek 6, 7, pro tahové a ohybové zatěžování.

TABULKA 6

TAHOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]
Konektor	12000	1,1
Výztuha 1	3600	2,1
Výztuha 2	6000	1,6

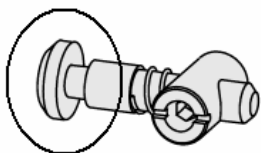
TABULKA 7

OHYBOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]
Konektor	2090	4,1
Výztuha 1	2090	1,29
Výztuha 2	2090	1,13

Zobrazení jednotlivých deformací, pro jednotlivé spoje je přiloženo v příloze. Pro každou z těchto deformací byla vytvořena simulace. Tyto simulace byly zaznamenány na CD a vloženy do přílohy.

4 Části vhodné k inovaci

Částí vhodných k inovaci se zvolilo několik. Jedna ze tří inovací je změna geometrie tvaru a to konkrétně u konektoru v místě jeho hlavy obr. 59, zakroužkovaná oblast.



Obr. 59.

Tento druh konektoru má sice největší plochu v místě kontaktu s profilem z nabízených konektorů dle katalogu, ale při ohybovém namáhání spoje s konektorem docházelo k velkým deformacím v místě kontaktu hlavy konektoru s drážkou profilu. Proto by bylo vhodné tuto plochu co nejvíce zvětšit, což by mohlo mít za následek zmenšení deformace v drážce, a tím i zlepšení pevnosti celého spoje. Pro zvětšení plochy by bylo nejvhodnější změnit tvar hlavy z kruhového na obdélníkový, tím by se dosáhlo i vhodnějšího vyplnění drážky v profilu a zároveň zlepšení stability hlavy v drážce. Tato inovace by se dala snadno ověřit stejným způsobem, jako u měření a výpočtu spoje s konektorem z katalogu.

V této diplomové práci se tomuto ověření věnovat nebudeme, tento inovovaný konektor, by se musel vyrobit a následovně zopakovat měření s výpočty dle naměřených a vypočtených hodnot, které by se porovnávaly s hodnotami pro konektor z katalogu. Následovně by se dalo usoudit, zda-li je tato inovace natolik vhodná, aby se dala použít. Za příznivý výsledek této inovace by bylo zlepšení pevnosti spoje s konektorem při namáhání na ohyb, což u konektoru z katalogu bylo velmi slabé.

Druhé inovační řešení se týká spojů s výztuhami a to ve volbě podložek pod šrouby. V případě, v kterém byl proveden experiment se používaly podložky bez zdrsňeného povrchu. To mělo za následek při namáhání na tah, posun výztuhy pod šrouby s podložkami. Pokud by se použily podložky se zdrsňeným povrchem mohlo by k tomuto posunu dojít až při větších zatěžujících silách, než bylo naměřeno. Ale k podobnému posunu by mohlo dojít též mezi profilem a kamenovou maticí, která také neměla zdrsňený povrch. Pak by záleželo na provedení experimentu, z něhož by se dalo usoudit, jestli stojí za to používat zdrsňené podložky a pevnost spoje na tah se zvětší a nebo jestli je to nevhodné, protože dojde k stejnému posunu mezi kamenovými maticemi a profilem.

Jako poslední vhodná inovace byla vybrána část týkající se zlepšení pevnosti spojů. A to tak, že se provedla kombinace dvou spojů, které by měly pevnost spoje zvýšit, jak při namáhání tahovém, tak i ohybovém.

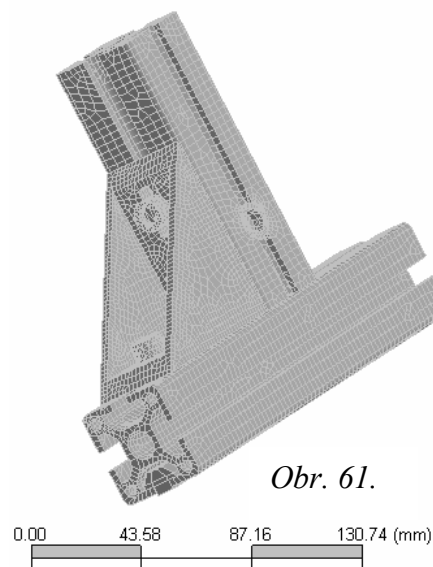
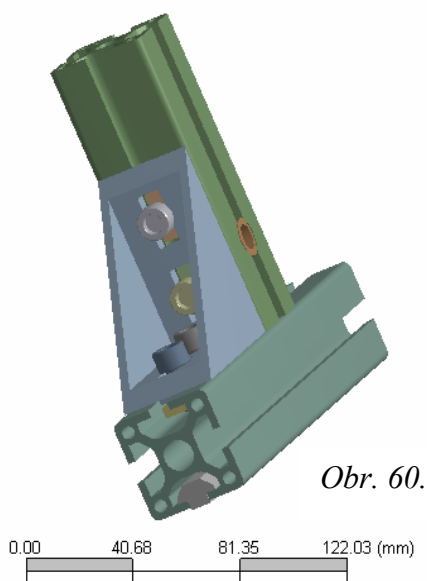
Jde o kombinaci spoje s konektorem a s výztuhou 2. Spoj s konektorem nejlépe odolával tahovému namáhání, co týče spoje s výztuhou, ten byl na tom nejlépe u ohybového namáhání, proto se zvolila tato volba. Při tomto druhu kombinovaného spoje by mělo docházet k mnohem menším deformacím, než u jednotlivých spojů, a též by se měla zvýšit celková pevnost spoje.

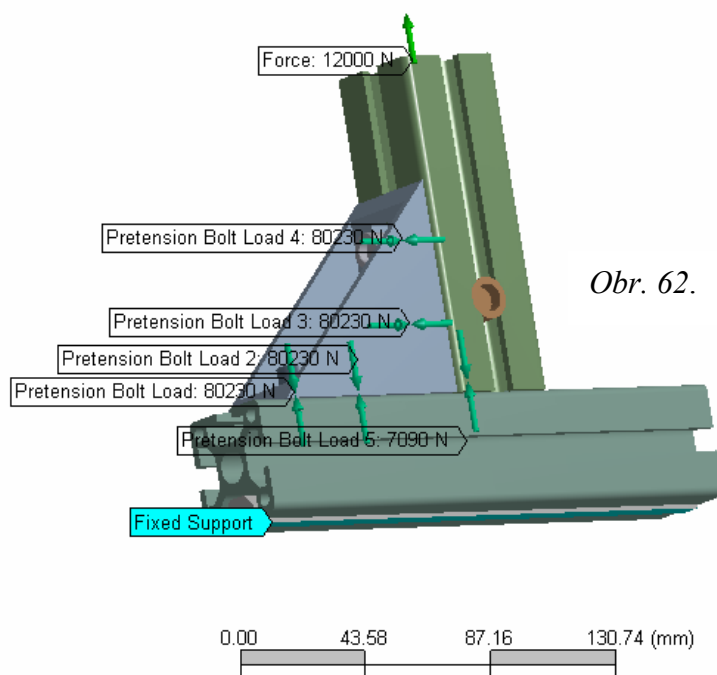
Ověření pevnosti a deformací kombinovaného spoje se provedlo pomocí výpočtu v MKP a experimentem. Výsledné hodnoty z výpočtu a experimentu byly nakonec porovnány.

4.1 Výpočet kombinovaného spoje v MKP

Při výpočtu kombinovaného spoje se postupovalo stejným způsobem jako u jednotlivých spojů. Volba materiálu, síť a kontaktu mezi jednotlivými částmi zůstává zachována.

Konstrukce kombinovaného spoje se liší pouze počtem částí, ze kterých je sestaven a to jsou profily vodorovný a svislý, konektor, výztuha 2, a čtyři šrouby s kamenovými maticemi. Uchycení celé sestavy je provedeno pomocí kotvícího kamene jako u předešlých sestav. Celý kombinovaný spoj je na obr. 60, síťovaný model obr. 61, model s předpětím obr. 62.





Obr. 62.

4.1.1 Vypočtené hodnoty v MKP pro kombinovaný spoj

Posledním krokem je samotný výpočet. V našem případě za konečný výsledek považujeme celkovou deformaci kombinovaného spoje.

Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 8, 9 pro tahové a ohybové zatěžování.

TABULKA 8

TAHOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]
Kombinovaný spoj s výztuhou 2 (38x76)	12000	0,42

TABULKA 9

OHYBOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ		
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]
Kombinovaný spoj s výztuhou 2 (38x76)	2090	0,50

4.2 Experiment kombinovaného spoje

Namáhání kombinovaného spoje byl proveden na stejném měřicím zařízení jako u předchozích spojů. Prvním druhem namáhání bylo namáhání na ohyb z důvodu připraveného měřicího zařízení z předešlých měření. Po tomto namáhání následovalo přestavení měřicího zařízení na tah.

4.2.1 Experiment ohybové namáhání kombinovaného spoje

Při tomto druhu namáhání se kombinovaný spoj vystavil stejným silám jako u předešlých ohybových namáhání.

Hodnota, která se považovala za maximální ohybovou sílu pro kombinovaný spoj, byla stanovena na $F_{0\max\text{com}} = 1000\text{N}$. Šrouby u výztuhy byly umístěny na střed děr a utaženy na předepsaný moment $M_u = 26\text{Nm}$. Utahovací moment pro konektor je $M_m = 40\text{Nm}$.

Po dotažení jednotlivých šroubů na předepsaný utahovací momenty a zkontrolování všech spojů se začalo měřit v již třech známých krocích.

1. Zatížení předepsanou maximální ohybovou silou $F_{0\max\text{com}} = 1000\text{N}$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly $t = 6\text{s}$) – následuje odečtení hodnoty celkové deformace

2. Navazuje na krok 1, dále je spoj vystaven střídavému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut, což odpovídá 300 cyklům, následně budou odečteny hodnoty při prvních třech periodách zatěžování a také při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{0\min} = 100\text{N}$.

3. Zopakování kroku 1, zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{0\max\text{com}} = 1000\text{N}$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly $t = 6\text{s}$) – následuje odečtení hodnoty celkové deformace. Tento krok byl proveden z důvodů

porovnání deformace na počátku zatěžování a deformace po vystavení střídavému namáhání.

Naměřené hodnoty ohybové namáhání kombinovaného spoje jsou v tab. 10.

TABULKA 10

OHYBOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ				
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace na počátku zatěžování</u>	<u>Celková deformace po zatěžování</u>	<u>Průměrná hodnota deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]	Δ [mm]	průměr Δ [mm]
Kombinovaný spoj s výztuhou 2 (38x76)	1000	0,75	0,73	0,74

4.2.2 Experiment tahové namáhání kombinovaného spoje



Obr. 63

Nejprve se musela provést přestavení celého zařízení na tah. Připevnění kombinovaného spoje na pístnici pomocí vidlice, čepu a redukce. Uchycení kombinovaného spoje k svařenci, který byl pootočen od svařenců o 90°, obr. 63.

Hodnota, která se považovala za

maximální sílu pro kombinovaný spoj byla stanovena na $F_{T_{maxcom}} = 12000N$, což je stejná síla jako v případě spoje s konektorem. Šrouby u výztuhy byly umístěny na střed děr a utaheny na předepsaný moment $M_u = 26Nm$. Utahovací moment pro konektor je $M_m = 40Nm$.

Po dotažení jednotlivých šroubů na předepsaný utahovací momenty a zkontrolování všech spojů se začalo měřit v již třech známých krocích.

1. Zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{T_{maxcom}} = 12000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly $t = 6s$) – následuje odečtení hodnoty celkové deformace.

2. Navazuje na krok 1, dále je spoj vystaven střídavému namáhání o frekvenci 0,8 Hz po dobu 10 minut, což odpovídá 300 cyklům, následovně budou odečteny hodnoty při prvních třech periodách zatěžování a také při posledních třech periodách zatěžování. Spoj stále zůstává pod zbytkovou silou $F_{\min} = 0,4kN$.

3. Zopakování kroku 1, zatížení na předepsanou maximální sílu $F_{T_{\max com}} = 12000N$ při konstantní rychlosti pístu (dovršení maximální síly $t = 6s$), následuje odečtení hodnoty celkové deformace. Tento krok byl proveden z důvodů porovnání deformace na počátku zatěžování a deformace po vystavení střídavému namáhání.

Naměřené hodnoty tahového namáhání kombinovaného spoje jsou v tab. 11.

TABULKA 11

TAHOVÉ ZATĚŽOVÁNÍ				
<u>Druh spojení</u>	<u>Zatěžující síla</u>	<u>Celková deformace na počátku zatěžování</u>	<u>Celková deformace po zatěžování</u>	<u>Průměrná hodnota deformace</u>
	F[N]	Δ [mm]	Δ [mm]	průměr Δ [mm]
Kombinovaný spoj s výztuhou 2 (38x76)	12000	0,62	0,63	0,63

4.3 Posouzení inovačního řešení kombinovaného spoje

Inovační řešení bylo provedeno za předpokladu, že pevnost spoje se zlepší a tím se zmenší jeho deformace. Pro ověření tohoto předpokladu byl proveden výpočet a experiment, z něhož lze usoudit o správnosti inovace.

Celkové deformace kombinovaného spoje:

$$TAH: MKP = 0,42mm$$

$$Experiment = 0,63mm$$

$$OHYB: MKP = 0,50mm$$

$$Experiment = 0,74mm$$

Celkové deformace spoje s konektorem:

$$TAH: MKP = 1,06mm$$

$$Experiment = 0,86mm$$

$$OHYB: MKP = 4,10mm$$

$$Experiment = 5,29mm$$

Celkové deformace spoje s výztuhou 2:

$$OHYB: MKP = 1,13mm$$

$$Experiment = 1,34mm$$

Pokud tyto hodnoty porovnáme s naměřenými a vypočtenými hodnotami spoje s konektorem a výztuhou 2, lze vidět, že došlo k velkému poklesu deformací. Tím je znatelné, že pevnost spoje je mnohem větší. Pevnost spoje se zlepšila na tah i na ohyb. Dokazují to výpočty MKP i naměřené hodnoty při experimentu. V některých případech se deformace zlepšila více jak o 50%, což je považováno za velmi příznivý výsledek.

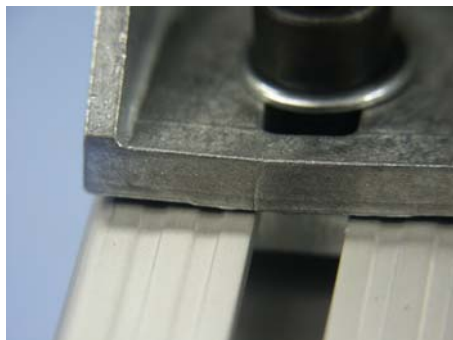
Tento kombinovaný spoj je nejpevnější spoj, kterého lze docílit ze spojů, které byly zkoušeny. Spoj je velmi vhodný používat v případech, kde není přesně znám druh namáhání, co se týče ohybu či tahu.

5 Porovnání s ocelovými svařovanými výztuhami

Pokud se bude porovnávat pevnost spoje spojeným klasickou svařovanou výztuhou s AL výztuhami, je nutno si uvědomit, že pevnost spojů závisí na druhu namáhání. Při namáhání na tah nemá takový vliv na pevnost druh výztuhy, protože při tomto namáhání dochází k posunu profilu v místě kontaktu šroubů z výztuhou a na deformaci profilů či výztuhy se podílí minimálně. Proto lze říci, že při namáhání na tah není takový rozdíl v použití ocelové výztuhy a AL výztuhy. Pevnost spoje se tím výrazně nezmění.

Při namáhání na ohyb je pevnost těchto spojů rozdílná z důvodu rozdílného modulu pružnosti v tahu. Pro ocel je modul pružnosti v tahu $E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$ pro slitinu GD-ZN, která byla nahrazena AL slitinou je modul pružnosti v tahu $E = 71000 \text{ MPa}$. Tímto by pevnost spoje s ocelovou výztuhou měla být mnohem větší.

Deformace výztuh při namáhání na ohyb se projevuje mnohem více, než při tahovém namáhání. Důkazem je prasklina pod hlavou šroubu, která se vznikla při



Obr. 64

ohybovém namáhání výztuhy 1 obr. 64.

Pro ověřování rozdílné pevnosti v MKP byl proveden výpočet s výztuhou z oceli. Deformace tohoto spoje byla o 25% menší, než u stejného spoje s AL výztuhou.

Z toho lze usoudit, že pevnost ocelové výztuhy je velmi vysoká a z AL výztuhami se nedají srovnat.

V praxi se velmi často k AL výztuhám nepřikládá tak velká důvěra a nahrazují se ocelovými výztuhami.

Závěr

Tato práce doplňuje technickou dokumentaci pro spoje AL profilů a popisuje výsledky měření, provedené na měřicím zařízení a jejich ověření výpočtem MKP.

Z provedených experimentů vyplývá pro jednotlivé spoje:

- Spoj s konektorem – prvotní deformace vzniká už při dotažení konektoru na požadovaný utahovací moment. Spoj s konektorem bez problémů snesl namáhání vyvolané předepsanou tahovou silou z katalogu.

Největší deformace spoje vznikla při prvotním zatížení na předepsanou maximální ohybovou sílu v místě kontaktu konektoru s profilem.

Předepsaná hodnota maximálního ohybového momentu v katalogu je na mezi únosnosti spoje, a proto je lepší takovému namáhání spoj nevystavovat. Tuto ohybovou sílu lze považovat za sílu, při které dojde k porušení spoje.

Namáhání spoje s konektorem na ohyb je velmi nevhodné, proto je lepší zvolit jiný druh spoje.

- Spoj s výztuhou 1, 2 – Při tahovém namáhání nedochází k deformacím na profilech, ale k deformacím mezi šrouby s podložkami a výztuhami.

Byly stanoveny hodnoty sil, při kterých dochází k posunu spoje neboli jeho porušení.

$$\text{výztuha 1} \quad F_{dest.T.V1} = 4,2kN ,$$

$$\text{výztuha 2} \quad F_{dest.T.V2} = 6,5kN .$$

Tyto dva druhy spojů snášejí namáhání na tah mnohem hůře, než je to u spoje s konektorem, a proto není vhodné tyto spoje vystavovat většímu namáhání na tah.

Při ohybovém namáhání spojů s výztuhami dochází k mnohem menším deformacím, než u konektoru, proto je vhodnější použít spoje s výztuhami.

Byla naměřena ohybová síly, při které dojde k porušení spoje.

$$F_{dest.V1} = 1,51kN , \text{ což odpovídá ohybovému momentu } M_{dest.OV1} = 347,3Nm .$$

Pro spoj s výztuhou 2 se ohybová síla nepodařila naměřit. Spoj s výztuhou 2 odolává ohybovému namáhání nejlépe ze všech zkoušených spojů.

Na základě provedení výpočet v MKP a porovnání hodnot s experimentem bylo zjištěno.

- Podařilo se navrhnout vhodnou inovaci ve formě kombinovaného spoje, která byla ověřena výpočtem i experimentem.

Pevnost spoje se zlepšila na tah i na ohyb. V některých případech se deformace zlepšila více jak o 50%, což je považováno za velmi příznivý výsledek.

Tento kombinovaný spoj je nejpevnější spoj, kterého lze docílit složením ze spojovacích částí.

Další možné inovace jsou uvedeny v kapitole 4 a patří mezi ně zejména: úprava geometrie konektoru, zvolení vhodnějších typů podložek.

V dalším pokračování by bylo dobré tyto inovace ověřit výpočtem a experimentem.

Dále bylo zjištěno:

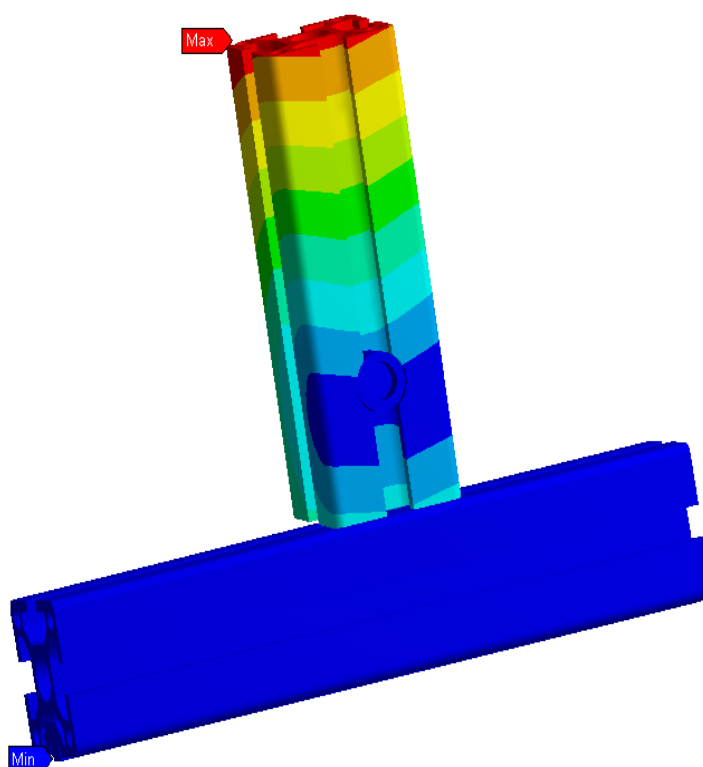
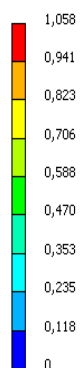
- Deformace spojů v průběhu zatěžování se nemění. V některých případech docházelo i k zmenšení této deformace.
- Spoj z ocelovou výztuhou při namáhání na ohyb má o 25% menší deformaci, než spoje s výztuhami z AL slitin.
- Program „ANSYS WORKBENCH“ lze použít k ověření experimentu pomocí MKP.

Použitá literatura

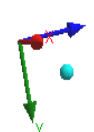
- [1] Katalog firmy MayTec,
- [2] ANSYS Manuals,
- [3] Černoch - strojně technická příručka,
- [4] Bartsch H. J. - Matematické vzorce,
- [5] Části strojů I. - Lubomír Pešík,
- [6] Strojírenské Tabulky.

Příloha

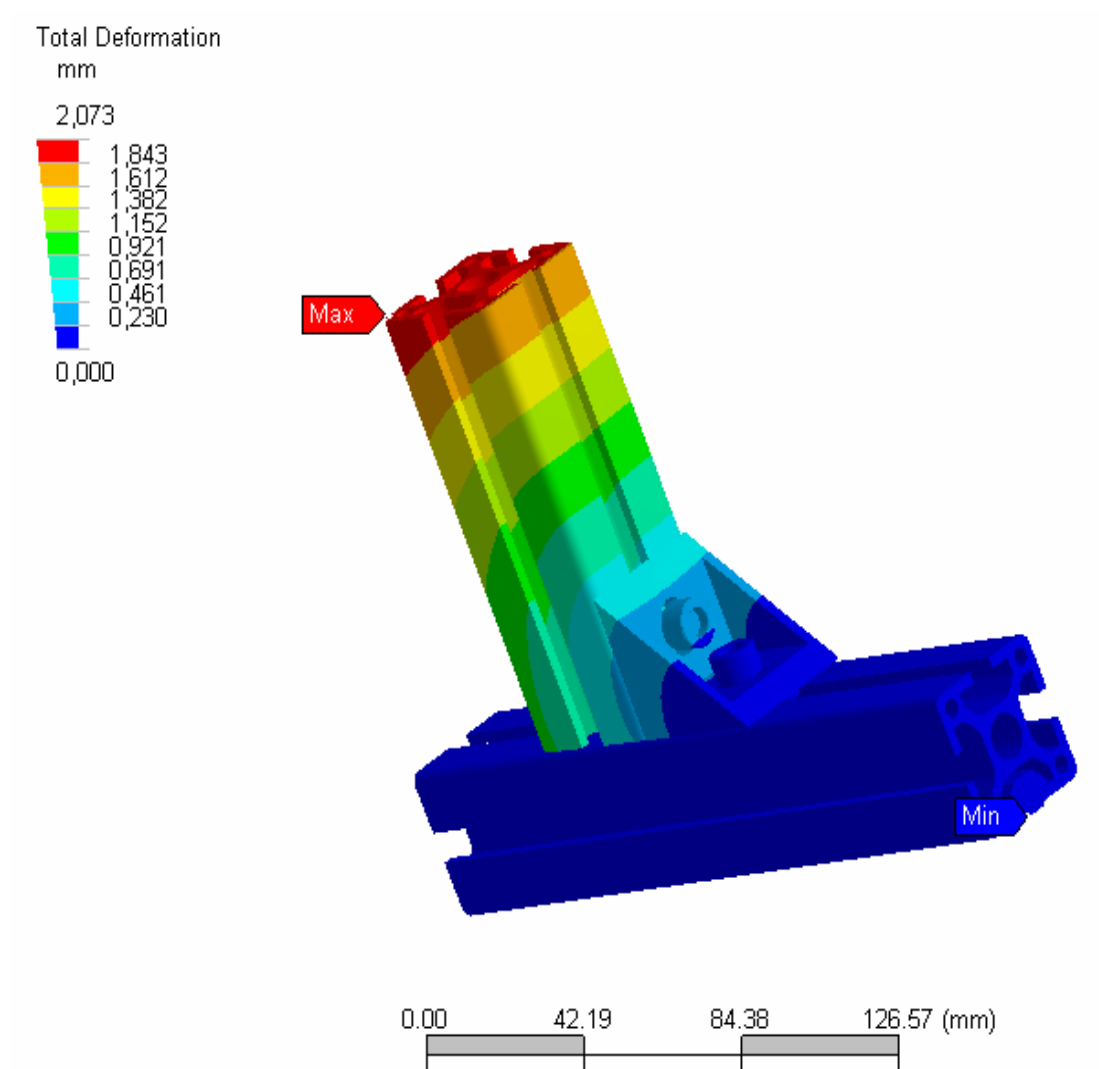
Total Deformation
mm
Max: 1.058e+000
Min: 0.000e+000
2006/5/3 09:11



0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

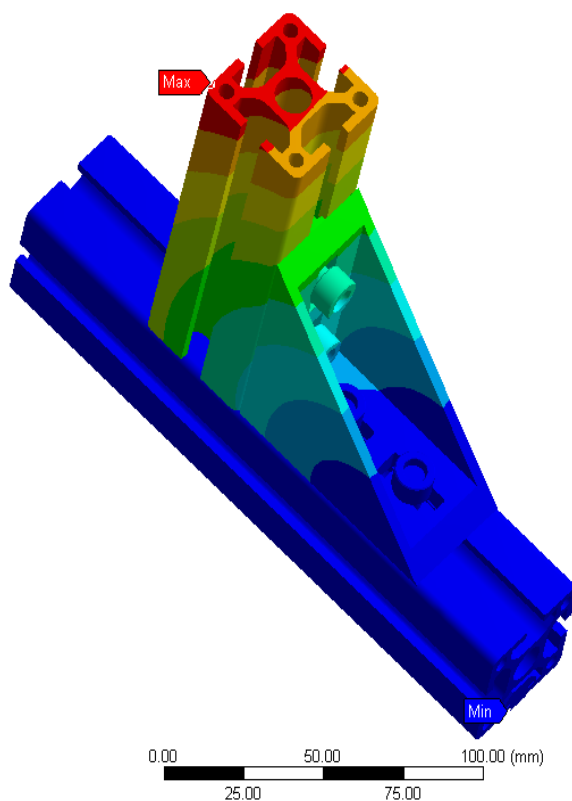
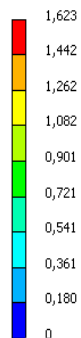


Spoj s konektorem, TAH.



Spoj s výztuhou 1, TAH.

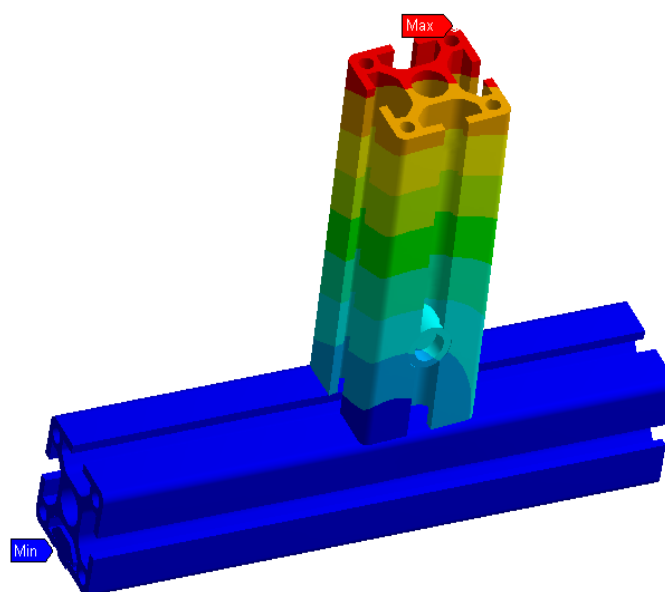
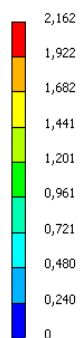
Total Deformation
mm
Max: 1.623e+000
Min: 0.000e+000
Step: 2 / 2
2006/5/3 09:06



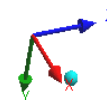
ANSYS100
WORKBENCH

Spoj s výztuhou 2, TAH.

Total Deformation
mm
Max: 2.162e+000
Min: 0.000e+000
2006/5/3 09:10



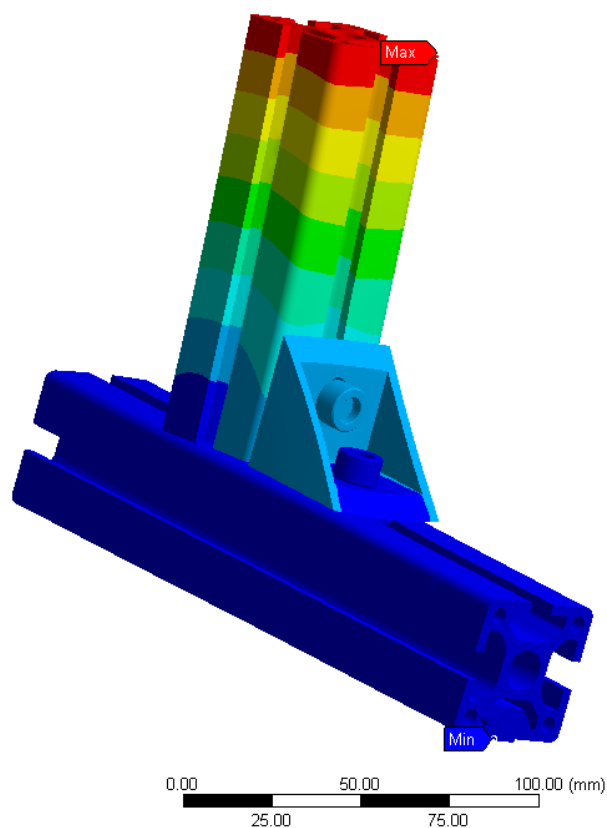
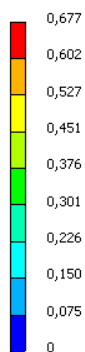
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)



Spoj s konektorem, OHYB.

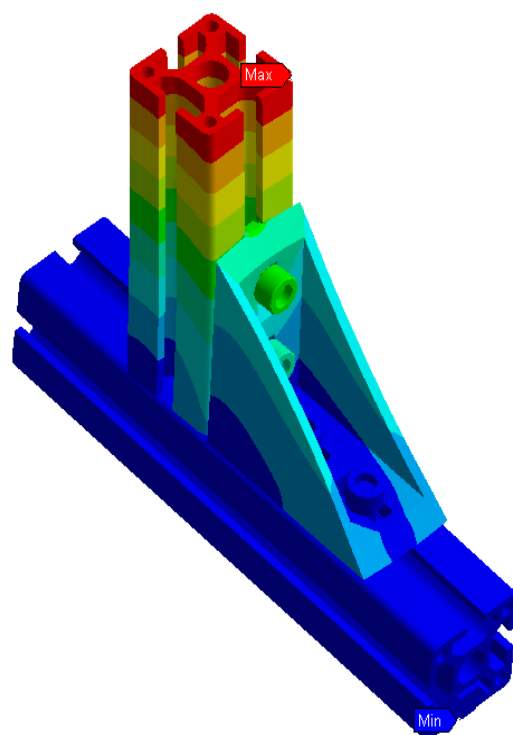
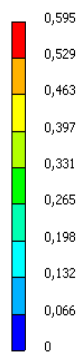
Total Deformation
mm
Max: 6,772e-001
Min: 0,000e+000
2006/5/3 09:02

ANSYS100
WORKBENCH



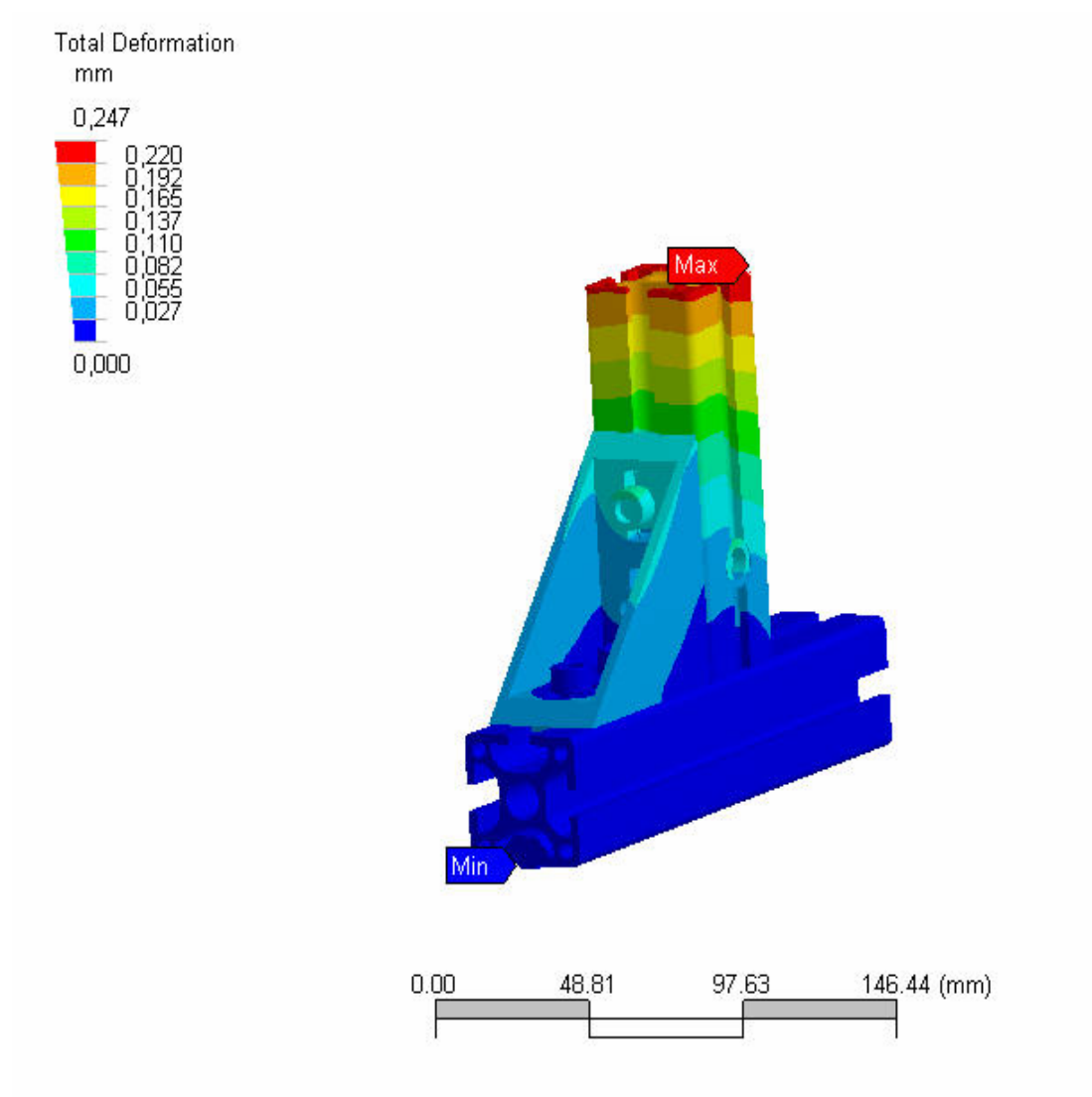
Spoj s výztuhou 1, OHYB.

Total Deformation
mm
Max: 5,954e-001
Min: 0,000e+000
2006/5/3 09:04

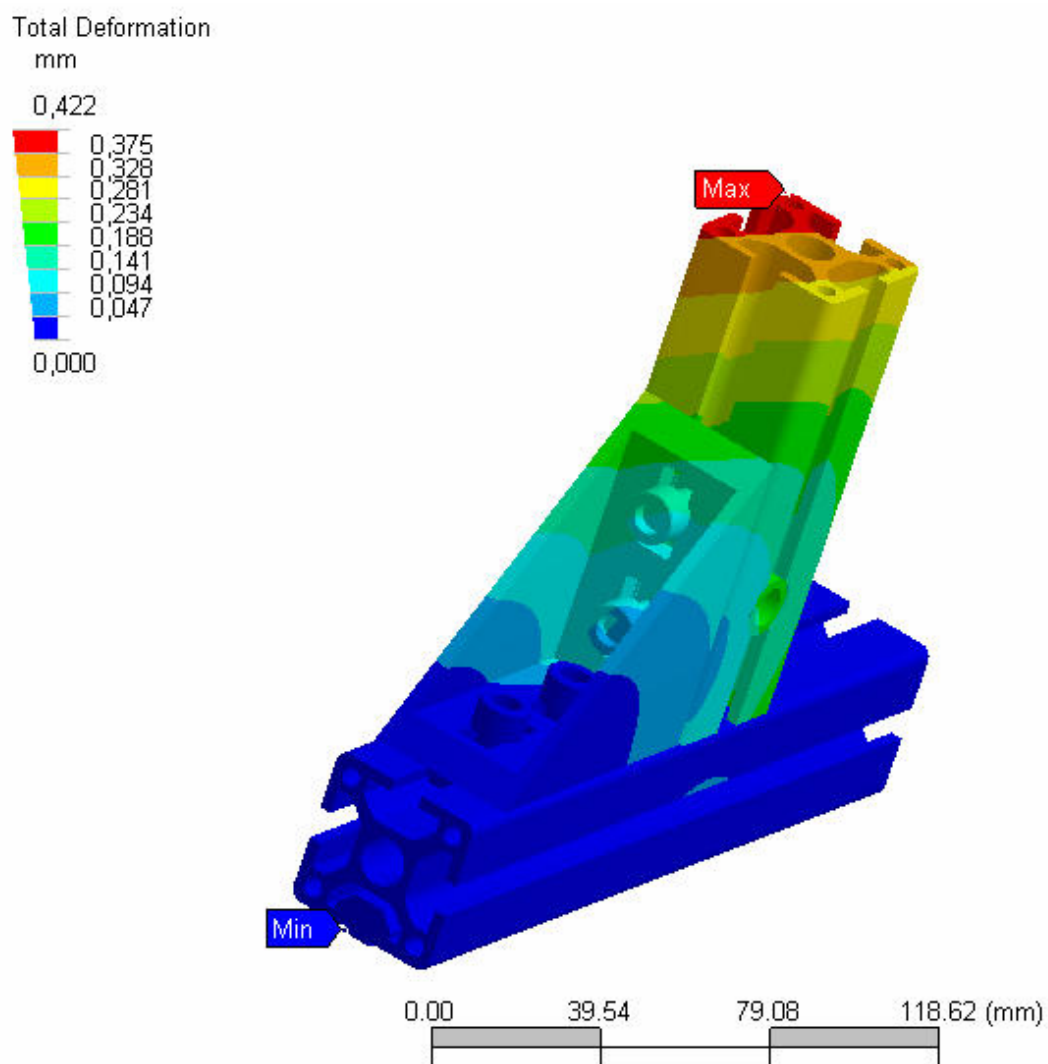


ANSYS100
WORKBENCH

Spoj s výztuhou 2, OHYB.



Spoj kombinovaný, OHYB.



Spoj kombinovaný, TAH

