



# NOVÉ KONSTRUKČNÍ POSTUPY PRO LEHKOU KONSTRUKCI RÁMŮ EFEKTORŮ A PERIFERIÍ ROBOTŮ

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Bc. Zdeněk Vít**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. František Novotný, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# NEW DESIGN METHODS FOR LIGHTWEIGHT FRAME CONSTRUCTION OF EFFECTORS AND ROBOT PERIPHERIES

Diploma thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2302T010 – Machines and Equipment Systems  
*Author:* **Bc. Zdeněk Vít**  
*Supervisor:* doc. Ing. František Novotný, CSc.



Tento list nahradte  
originálem zadání.

## Prohlášení

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

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## Poděkování

Děkuji panu **doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.**, vedoucímu Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci, za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost v průběhu řešení této diplomové práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a sourozencům za jejich velkou podporu a trpělivost při mém studijním úsilí. Závěrem děkuji svému švagrovi Michalovi zejména za technické poradenství v oblasti řešené problematiky.

**Téma:** Nové konstrukční postupy pro lehkou konstrukci ráků efektorů a periferií robotů

**Anotace:**

Předložená diplomová práce se zabývá řešeršní problematikou v oblasti nových přístupů ke konstrukci tuhých lehkých ráků. Na základě získaných poznatků je vybrán optimální konstrukční systém, pro který je dále realizován konstrukční návrh experimentálního standu a zkušebních vzorků pro laboratorní testování. Získané laboratorní výstupy dále slouží pro verifikaci numerického modelu. Nabité technologické a konstrukční poznatky jsou následně aplikovány na rekonstrukci nosného ráku servisního a inspekčního robotu ROBOTUL<sup>®</sup>.

**Klíčová slova:** konstrukce ráků, kompozitní materiály, dělení materiálu, zámkové systémy, numerická simulace

**Theme:** New design methods for lightweight frame construction of effectors and robot peripheries

**Annotation:**

This diploma thesis deals with new approaches in lightweight frame design. Based on theoretical knowledge optimal construction system is chosen. Experimental stand is constructed and realized and samples of chosen construction are tested. Obtained laboratory output is used as a verification of numerical model. Technological and constructional knowledge is subsequently applied in reconstruction of carrying frame of service and inspection robot ROBOTUL<sup>®</sup>.

**Key words:** frame construction, composite materials, material division, locking systems, numerical simulation

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
Úvod.....	9
<b>1. Rešerše nových přístupů ke konstrukci tuhých lehkých rámu</b> .....	<b>10</b>
1.1. Úvod do problematiky kompozitních materiálů .....	11
1.2. Možnosti spojování kompozitu .....	15
1.3. Patentová rešerše problematiky spojování kompozitu.....	17
1.4. Konstrukční realizace součástí z kompozitu .....	20
1.5. Klasické konstrukční materiály .....	22
1.6. Konstrukční aplikace z běžných konstrukčních materiálů.....	25
1.7. Způsoby technologie zpracování materiálu .....	27
1.8. Závěrečné shrnutí rešeršních poznatků .....	31
<b>2. Návrh zkušebních vzorků pro testování mechanických vlastností</b> .....	<b>33</b>
2.1. Zámkové konstrukce .....	33
2.2. Práce se zámkovým systémem v programu Autodesk Inventor .....	35
2.2.1. Poloautomatizovaný systém tvorby zámků.....	36
2.3. Experimentální činnost .....	38
2.4. Návrh experimentálního standu.....	38
2.5. Zkušební vzorky .....	40
2.6. Popis experimentálního pracoviště.....	41
<b>3. Výpočtová analýza zámkového spojení pomocí MKP a experimentální verifikace modelu</b> .....	<b>42</b>
3.1. Popis použité metodiky měření .....	42
3.2. Numerická simulace .....	43
3.3. Vyhodnocení naměřených hodnot při ohybovém namáhání.....	44
3.3.1. Vzorek ze čtvercové bezešvé trubky .....	45
3.3.2. Vzorek s pěti zámků .....	46
3.3.3. Vzorek s pěti zámků a tvarovým odlehčením bočnic .....	47
3.3.4. Vzorek se čtyřmi zámků .....	48
3.3.5. Vzorek se třemi zámků .....	49
3.3.6. Ověřovací výpočet vlivu průřezu nosníku na průhyb .....	50
3.3.7. Závěrečné shrnutí .....	51
<b>4. Souhrn technologických poznatků a konstrukční aplikace zámkových systémů</b> .....	<b>53</b>
4.1. Realizované aplikace konstrukce .....	54
4.2. Konstrukční návrh nosného rámu ROBOTUL® .....	56
<b>5. Zhodnocení přínosu práce</b> .....	<b>63</b>
5.1. Technické zhodnocení .....	63
5.2. Ekonomické zhodnocení .....	65
Závěr .....	66
Seznam použité literatury .....	67
Seznam převzatých obrázků .....	69

**Seznam použitých zkratk a symbolů**

<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Veličina</b>
RPS	[-]	systém referenčních bodů (Reference Point System)
MKP	[-]	metoda konečných prvků
HM	[-]	vysokomodulová vlákna (High Modulus)
výztuž II	[-]	vlákna jsou orientována pouze v jednom směru
výztuž #	[-]	vlákna jsou orientována ve více směrech
A	[mm]	šířka výstupku zámku
a	[mm]	velikost koutového svaru
B	[mm]	hloubka výstupku zámku
C	[mm]	výška výstupku zámku
D	[mm]	tloušťka plechu (díl 1)
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
F <sub>x</sub>	[N]	síla v ose x
F <sub>y</sub>	[N]	síla v ose y
F <sub>z</sub>	[N]	síla v ose z
J <sub>x</sub>	[mm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment k ose x
J <sub>y</sub>	[mm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment k ose y
k	[N.mm <sup>-1</sup> ]	tuhost
L	[mm]	šířka otvoru zámku
M <sub>x</sub>	[N.mm]	moment k ose x
M <sub>y</sub>	[N.mm]	moment k ose y
M <sub>z</sub>	[N.mm]	moment k ose z
N	[mm]	tloušťka plechu (díl 2)
O	[mm]	délka otvoru zámku
y	[mm]	posunutí
α	[μm.(m.K) <sup>-1</sup> ]	součinitel teplotní roztažnosti
ρ	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota
φ	[°]	orientace vláken
λ	[W.(m.K) <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti



## Úvod

Novodobým trendem v oblasti aplikačního nasazení průmyslových a především servisních robotů jsou požadavky na výslednou vysokou dynamickou odezvu systému. Jedním z hlavních směrů řešení této problematiky je vývoj ultralehkých rámových konstrukcí, využitelných jak v oblasti pohybových jednotek robotů, tak i jejich koncových členů, tzv. efektorů, a rovněž rámu přidružených periferií.

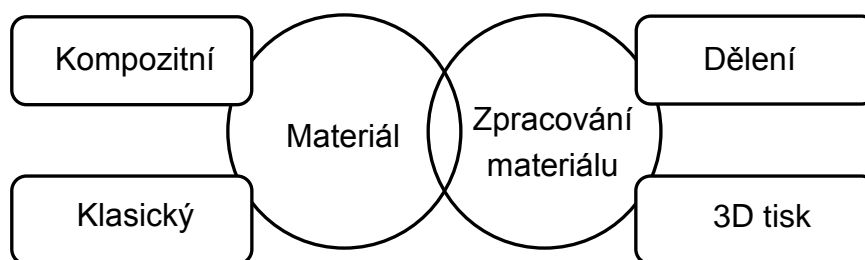
V oblasti ultralehkých konstrukcí lze sledovat nejpokročilejší vývoj v oblasti kosmonautiky, potažmo následně v leteckém průmyslu a to od letadel počínaje až po drony konče. Další významnou oblastí, která rozvíjí aplikační nasazení daných technologií a systémů pro masové užití, je pak automobilový průmysl. Ve všech uvedených oblastech má aplikace ultra lehkých rámu přímý dopad na provozní vlastnosti a to jak z pohledu výkonnostních parametrů, tak úspory provozních nákladů. Je však nutné poznamenat, že speciální konstrukce jsou mnohdy spjaty i s vysokou pořizovací cenou a to jak z pohledu použitého materiálu, tak užití výrobní technologie. V oblasti robotického průmyslu a to především průmyslových, příp. servisních, robotů, na které je předložená práce zaměřena, je nezbytné hledat kompromis mezi výrobními náklady a výslednými parametry zhotovené konstrukce.

Vývoj ultralehkých rámových konstrukcí obecně zahrnuje jednak využití nových konstrukčních materiálů, ale rovněž i moderní způsoby dělení a zpracování materiálu, které přinášejí mnoho nových možností, jak lze realizovat požadované konstrukce. Mezi nejvýznamnější parametry rámových konstrukcí v robotice patří zejména požadavek na vysokou tuhost ve vazbě na minimální hmotnost a v případě pohyblivých částí nízký moment setrvačnosti. Dalším neméně důležitým požadavkem je celková vspělost konstrukční úlohy, jak z pohledu technického, tak z pohledu estetického.

Diplomová práce se v souladu se zadáním člení do pěti hlavních kapitol. V první kapitole je provedena rešeršní činnost zaměřující se na problematiku ultralehkých tuhých konstrukcí. V druhé kapitole je zpracován návrh zkušebních vzorků testované speciální rámové konstrukce pro experimentální zatěžování. Následující třetí kapitola předkládá numerický model dané konstrukce verifikovaný výsledky z laboratorních měření. Čtvrtá kapitola je zaměřena na shrnutí získaných poznatků z oblasti ultralehkých tuhých rámu, včetně doložení realizovaných aplikačních výstupů, a dále předkládá návrh rekonstrukce nosného rámu servisního a inspekčního robotu ROBOTUL<sup>®</sup>. Závěrečná kapitola se zabývá technickoekonomickým zhodnocením navrhovaného řešení včetně závěru.

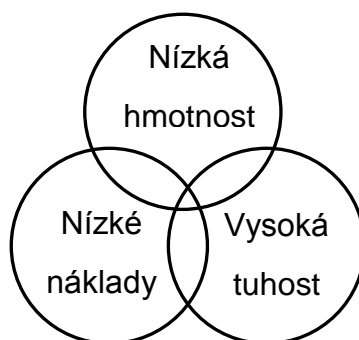
## 1. Rešerše nových přístupů ke konstrukci tuhých lehkých ráků

Při konstrukci robotů, manipulátorů, efektorů a ultralehkých ráků pro specifické aplikace je požadována vysoká hodnota tuhosti a naopak nízká hmotnost. Tuhost konstrukce zabraňuje nežádoucím deformacím a má zásadní vliv na přesnost opakování robotů a manipulátorů. Redukováním hmotnosti se naopak výrazně zlepší dynamický charakter celého zařízení a lze tak volit méně dimenzované pohony. Na tomto základě se daná kapitola ubírá následujícími dvěma hlavními směry, které dokumentuje obr. 1, detailněji popsáno v dílčích podkapitolách.



Obr. 1 Hlavní směry zaměření rešerše

Cílem rešerše je najít nové přístupy k realizaci konstrukce s aplikačním využitím klasických a kompozitních materiálů, včetně jejich vzájemné kombinace spojováním. Pro následnou rešerši týkající se problematiky ultralehkých tuhých ráků byly vytyčeny základní a zároveň nejdůležitější parametry, které budou během celé problematiky sledovány. Zejména se jedná o tři faktory, které musí být v maximální míře vzájemně provázány (obr. 2).



Obr. 2 Hlavní sledované faktory v rešerši

Faktory charakterizující nízkou hmotnost a vysokou tuhost jsou především ovlivněny vhodnou volbou materiálu, zároveň ale platí, čím je tento rozdíl větší, tím jsou vyšší pořizovací náklady. Proto je nutné uvažovat bezpečnost celé konstrukce v takové míře, která plně postačuje pro danou aplikační činnost, aby byl v souladu i třetí faktor (nízké náklady).

Novými nekonvenčními způsoby dělení materiálu lze příznivě ovlivnit náklady celé konstrukce. Tyto metody disponují poměrně velkou přesností a v případě, že způsob spojování jednotlivých dílů nepovede k deformacím většího rozsahu, jimi lze mnohdy minimalizovat či dokonce eliminovat složité a drahé dodatečné obrábění funkčních ploch. Pomocí těchto způsobů zpracování materiálu je možno „vyřezat“ různé geometrické tvary. S výhodou lze tyto nekonvenční způsoby dělení materiálu využít u speciálních konstrukcí, které dříve nebylo možné realizovat z technologických důvodů. Díky těmto metodám je možné efektivněji využívat klasické materiály při zachování dostatečného poměru nízké hmotnosti a vysoké tuhosti. Za doplňkové faktory ovlivňující náklady lze označit povrchové úpravy a způsob zpracování materiálu.

Závěrem této kapitoly je uvedeno shrnutí jednotlivých materiálů s následným porovnáním se základními faktory, které byly vytyčeny jako cíl rešeršní problematiky.

### **1.1. Úvod do problematiky kompozitních materiálů**

Kompozitní materiál [3, 5, 7, 8, 17] je heterogenní materiál složený ze dvou, či více vrstev, kde se tyto vrstvy významně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Vyrábí se mechanickým mísením jednotlivých vrstev dohromady. Minimálně jedna vrstva bývá v pevném skupenství ve formě vláken, které vytvářejí výztuž kompozitu. Vzájemné spojení vláken zajišťuje matrice, která dále zprostředkovává ochranu před vlivy okolí, tvarovou a geometrickou stálost a v neposlední řadě přenáší namáhání na výztuž. Výztuž dodává budoucímu kompozitu specifické mechanické vlastnosti (pevnost, tuhost, tažnost) a navíc přenáší tahová namáhání. Kompozity mají největší pevnost ve směru vláken. Pokud působí síla kolmo na směr vláken, zachytává toto namáhání pouze matrice, což má za následek minimální pevnost. Je-li laminát namáhaný ve více osách, musí se vytvořit další vrstva vláken, které jsou orientovány pod úhlem  $\varphi$  na předcházející vrstvu vláken.

Hlavní část kompozitu je tvořena maticí. Jedním z hlavních úkolů matrice je spojovat vlákna dohromady a zabraňovat tlakovému namáhání vláken. Další přísady, které přispívají ke tvorbě kompozitu, jsou plniva a aditiva. Jako pozitivní vlastnosti, které jsou důležité u vyspělých konstrukčních úloh, lze označit vysokou tuhost s ohledem na nízkou hmotnost, dále pak lepší dynamické vlastnosti (schopnost vyššího tlumení a posun vlastních frekvencí do vyšších oblastí) a nízká teplotní délková roztažnost. Vlastnosti běžně používaných materiálů (ocel, slitiny a polymery) nemohou konkurovat vlastnostem vzniklého kompozitu. Proto lze kompozity označit za vynikající materiály, které budou v budoucnu stále více nacházet uplatnění v průmyslové praxi. Samozřejmě i kompozitní materiály mají své negativní atributy, mezi které

patří nízká teplota použití, vysoké materiálové a výrobní náklady, navlhavost a komplikovaná, nebo nedostatečná recyklace.

Jak již bylo řečeno, výsledná pevnost kompozitu je dána jednak vlastnostmi matrice a dále především vlastnostmi vláken. Matrice [14, 17] lze dělit dle složení na polymerní, kovové, keramické a hybridní. Nejběžnější jsou matrice polymerní, které jsou využívány pro svou velkou měrnou pevnost, měrný modul pružnosti, dobrou korozivzdornost, chemickou odolnost a elektrickou nevodivost. Polymerní matrice se dělí na dvě základní podskupiny a to na termoplastickou a termosetickou. Termoplastické matrice se vyznačují především komplikovanějším zpracováním, a proto nenacházejí v praxi širšího uplatnění a to i přes své výhody spočívající v dobrých mechanických vlastnostech a houževnatosti výsledného kompozitu. V novodobých konstrukčních aplikacích převládají zejména kompozity s reaktoplastickou matricí, která se vyznačuje snadným zpracováním. Termosetické matrice jsou z pryskyřic na bázi nenasycených polyesterů, vinylesterů a epoxidů. Nejběžnějším reaktoplastem pro konstrukční úlohy technického směru je epoxidová pryskyřice. Má dobré mechanické vlastnosti při dynamickém zatěžování, což je velký přínos v konstrukci robotů a jejich periférií. Mezi nevýhody reaktoplastických pryskyřic lze zařadit nízkou houževnatost, nemožnost recyklace a nižší teplotní použitelnost (200 °C).

Druhou složku představují vlákna [16, 17], která jsou využívána především pro svoje výrazně lepší mechanické vlastnosti oproti výchozí výrobní surovině. Uvedená vlastnost je způsobena faktem, že u vláken jsou minimalizovány plošné a objemové chyby. Současným trendem ve výzkumu vláken je zmenšování jejich průměru a zvyšování pevnosti, v současné době vlákna mají průměr okolo 5 – 10 μm. V následující tabulce (tab. 1) je shrnuto porovnání meze pevnosti mezi vlákny a plným materiálem pro běžně používané druhy materiálů. Zajímavé srovnání vlastností klasických i kompozitních konstrukčních materiálů, včetně výrobních nákladů, dokumentuje tab. 2.

*Tab. 1 Srovnání pevnosti v tahu různých materiálů [17]*

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]		
	Plný materiál	Vlákno	Teoretická
Hliník	600	800	3800
Železo	1400	4100	11200
Aramid	-	3000	25000
Sklo	-	4000	11000
Uhlík	-	3000	35000

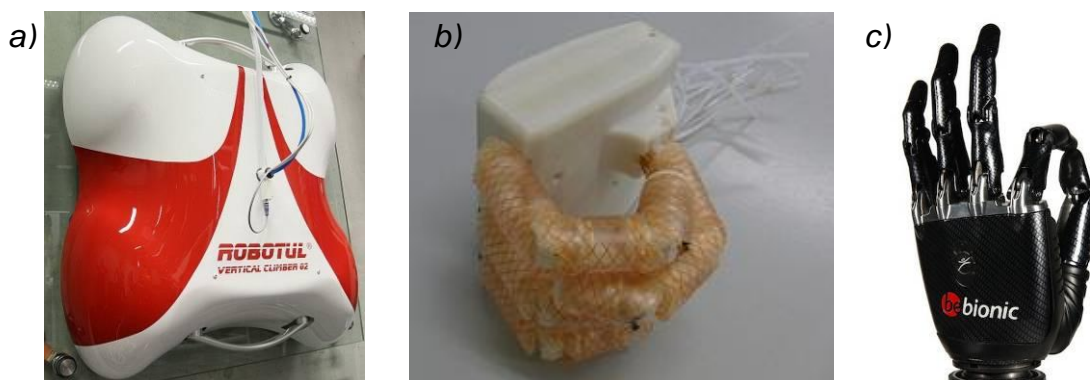
Tab. 2 Srovnání vlastností konstrukčních materiálů [17]

Vlastnosti	Kovy				Vláknové kompozity s epoxidovou pryskyřicí			
	Konstrukční ocel	Šedá litina	Titan	Hliník	Uhlíkové vlákno HM (výztuž II)	Uhlíkové vlákno HM (výztuž #)	Aramidové vlákno (výztuž II)	Skelné vlákno (výztuž II)
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7200	4500	2700	1600	1600	1400	2000
E [GPa]	210	105	105	70	360	120	50	40
$\alpha$ [μm/m.K]	11	9	9	24	-0,5	-1	-3,5	5
$\lambda$ [W/m.K]	45	50	22	220	50	1	0,1	0,6
Teplotní omezení [°C]	1500	1200	1800	660	200 (s termoplasty 400)			
Výrobní náklady [€/kg]	1	0,5	25	4	1000		18	3

Pzn.: HM - vysokomodulová vlákna, výztuž II - vlákna jsou orientována pouze v jednom směru, výztuž # - vlákna jsou orientována ve více směrech

Mezi nejběžnější druhy vláken lze zařadit vlákna skelná [16], dále aramidová [17] a v neposlední řadě uhlíková [16, 32, 42]. Skelná vlákna jsou levná, vyznačují se dobrou zpracovatelností, vysokou pevností a dobrou korozivzdorností, avšak pro novodobé konstrukce se nevyužívají z důvodu nízké tuhosti, únavové citlivosti a malé teplotní odolnosti. Ze skelných vláken se především vyrábí skelná izolační vata a dále se využívají k výrobě ochranných krytů (obr. 3 - a). Aramidová vlákna jsou známá především pod komerčním označením Kevlar. Kevlar je dostupný ve dvou variantách a to jako Kevlar 29, či Kevlar 49. Každý z nich je vhodný pro jiné konstrukční účely, vzhledem k jejich různým mechanickým vlastnostem. Pro zajímavost lze uvést, že např. Kevlar 29 se používá pro výrobu neprůstřelných vest, či pancéřů z důvodu dobrých tlumících vlastností. Obecně jsou aramidová vlákna velmi oblíbená ve strojírenském průmyslu, například u robotických zvířat slouží jako náhrada šlach, či v kosmonautice. Mají nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti a jsou nehořlavá. Ovšem oproti vláknům skelným a uhlíkovým jsou citlivá na tlakové namáhání. Na obr. 3 - b je vyobrazena aplikace aramidových vláken v konstrukci robotické ruky. Uhlíková vlákna se využívají v náročných technických aplikacích a patří k nejvíce

rozšířeným. Z důvodu vysokých hodnot pevnosti a tuhosti ve vzájemné vazbě na minimální měrnou hmotnost a rovněž také vzhledem k vysoké tepelné a chemická odolnosti. Jakožto další významnou vlastností je, že lze cíleně ovlivňovat součinitel délkové teplotní roztažnosti v širokém rozsahu vhodným složením jednotlivých vrstev uhlíkového vlákna. Zásadní nevýhoda karbonového vlákna je vysoká cena. Obr. 3 - c dokumentuje použití uhlíkového vlákna v robotické soustavě – karbonová antropomorfní robotická ruka.

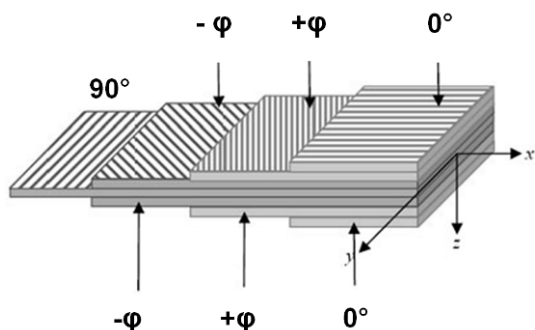


Obr. 3 Příklady aplikace vláken; a - skelných, b - aramidových, c - uhlíkových

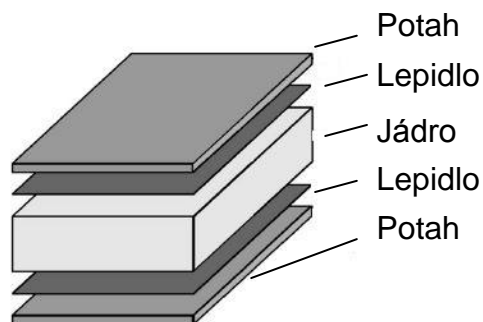
Samostatná vlákna se jako konstrukční prvek využívají málokdy. Proto jsou elementární vlákna sdružena do pramenů a následně jsou zpracovávány na polotovary typu příze, roving (pramenec), rovingové tkaniny, tkaniny z příze, rohože, pleteniny, voštinová jádra a prepregy [3]. Každý z uvedených polotovarů výztuže je vhodný pro jiný druh výrobní technologie výsledného kompozitu. Nejběžněji se vícevrstvé kompozity vytvářejí ve formě laminátů nebo sendvičů.

Lamináty [17] se vytvoří složením několika jednovrstvých kompozitů dohromady s rozdílným směrem orientace vláken jednotlivých vrstev (obr. 4). Orientace vláken vychází z následného použití kompozitu v konstrukční aplikaci. Zvláštním případem jsou hybridní lamináty, kdy jednotlivé vrstvy mezi sebou jsou kombinované z různých polotovarů výztuže (roving, rohož atd.) a materiálu vláken (Kevlar, sklo, uhlík atd.). Tyto lamináty umožňují konstruktérovi vytvořit kompozit s vynikajícími vlastnostmi s ohledem na výsledné finanční náklady. Druhým typem jsou sendviče [37], které se skládají ze dvou potahů, tvořící vnější část sendviče, a jádra z lehkého materiálu (obr. 5). Nejčastějším typem jádra jsou výplně ve tvaru voštiny, které svým vzhledem a uspořádání buněk připomínají včelí plástve. Voštiny mohou být kovové (hliníkové slitiny, nerezová ocel, titan) a nekovové (aramidová, skleněná, nebo uhlíková tkanina). Na jádro sendviče je kladen požadavek nejmenší hmotnosti při zachování vysokých hodnot pevnosti v tlaku a smyku a v neposlední řadě tuhosti. Na potahový materiál je kladen značný důraz, jelikož je to nosný prvek celé konstrukce. Musí odolávat zejména zatížení v tahu, tlaku, ohybu a také

zajišťovat rozměrovou stálost sendviče. Jako potahový materiál jsou nejčastěji používány slitiny z hliníku, hořčíku a titanu, dále pak nerezová ocel, vyztužený plast, nebo překližka. Sendviče nacházejí velké uplatnění v leteckém průmyslu, především se jedná o trupy a křídla letadel.



Obr. 4 Laminát

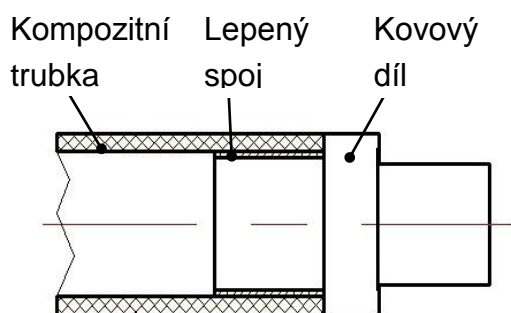


Obr. 5 Sendvič

## 1.2. Možnosti spojování kompozitu

Mezi běžné systémy spojování kompozitů se v průmyslové praxi řadí lepené [29, 36, 40], šroubové [40, 43] a nýtové spoje [38, 40]. Velice často je kladen požadavek na výrobu složitých kompozitních konstrukcí, přičemž by bylo velice nákladné a obtížné vyrobit jeden konstrukční celek. Proto se přistupuje k výrobě jednotlivých dílčích součástí, které se následně spojí lepením. Zmiňované spoje jsou za určitých podmínek rozebíratelné (zvýšením teploty) a patří dodnes k nejvíce používaným metodám pro spojení dvou kompozitů, či kompozitu s kovem. U dané technologie záleží na dvou hlavních faktorech a to na adhezi a kohezi. Oba lepené povrchy se musí ošetřit, buď fyzikálně (broušení, tryskání a kartáčování), nebo chemicky (odmaštění). Jako adhezivum se využívá epoxidová pryskyřice nebo dvousložkové, polyuretanové či akrylátové lepidlo.

Lepené spoje umožňují plnohodnotnou realizaci bez zásahu do struktury spojovaného materiálu. Mezi přední výhody patří vysoká těsnost spoje, zlepšení tuhosti celé konstrukce, tlumení účinku vibrací a hluku, malý hmotnostní přírůstek součástí, odolnost vůči agresivním chemickým látkám, slučitelnost s konzervačními oleji, nevznikají tepelná pnutí (svary) a dochází k rozložení silových účinků na větší plochu. Mezi nevýhody lze zařadit především pečlivou přípravu lepených ploch a omezenou provozní teplotu. Často se slepují kompozitní materiály s materiály kovovými a to především v případě vlepané příruby nebo závitové vložky. Lepení kompozitu s kovem (obr. 6) je identické, jako u lepení kompozitních materiálů, ale musí být kladen pečlivý důraz na rovnoměrnost rozložení lepidla v mezeře mezi kovovým pouzdem a kompozitem.



Obr. 6 Lepený spoj, včetně jeho řezu

Dalším druhem spojování jsou šroubové spoje, které však nejsou pro kompozitní materiály obecně příliš vhodné, z důvodu výroby děr do materiálu pro vložení šroubu. Tím hrozí vysoké riziko vzniku delaminace [41]. V blízkosti otvoru vzniká špička napětí, může lehce dojít k destrukci kompozitního dílu. Destrukce je způsobena vznikem trhliny, která se šíří až do úplného poškození kompozitu. Dále u šroubových spojů může dojít k tzv. „protažení“ šroubu otvorem. Rovněž dochází k nárůstu hmotnosti a může hrozit koroze a není zajištěna netěsnost spoje vůči kapalinám. Mezi hlavní výhody šroubových spojů patří to, že jsou rozebíratelné a dále jejich jednoduchá a rychlá montáž spojení. Při použití šroubových spojů (obr. 7), ať už se jedná o spojení dvou kompozitů, či spojení kompozitu s kovem, se postupuje tak, že se do kompozitu vloží závitová vložka. Pro zachování vysoké pevnosti spoje se využívají vložky ocelové.

Existuje řada tvarových spojů, jedním z nich je rychloupínací závitová vložka [43] (obr. 8 - a). Vnější plocha je opatřena profilem (drážkováním), který zajistí bezpečné ukotvení v materiálu, aby nedošlo k jejímu vytržení. Odstranění dané vložky již není možné bez destrukce kompozitního materiálu. Mezi další typy šroubových spojů patří samořezné závitové vložky [43] (obr. 8 - b). Oproti rychloupínacím mají závit na vnější i vnitřní ploše vložky. Při montáži je nutné použití nástroje. Jsou vhodná pro větší zatížení. Posledním typem jsou lisované závitové vložky [43] (obr. 8 - c). Tyto vložky jsou z vnější plochy opatřeny vroubkovanými kroužky. Při zalisování vložky do díry se jedná o uložení s přesahem. Šroubové spojení se aplikují pro méně namáhané spoje [34].



Obr. 7 Šroubový spoj



Obr. 8 Vložky – rychloupínací, samořezné, lisované



Posledním druhem jsou spoje nýtové (obr. 9), které jsou ve velké míře využívány především v leteckém průmyslu, z důvodu značných dynamických sil, které působí na letadlo při startu a během letu. Musí být zajištěno pevné a stále spojení jednotlivých kompozitních dílů (trup – křídla). V současné době se v určité míře nahrazují nýtované spoje lepenými, pokud to konstrukční řešení dovolí. Nevýhody nýtovaných spojů jsou stejné jako u šroubových spojů.

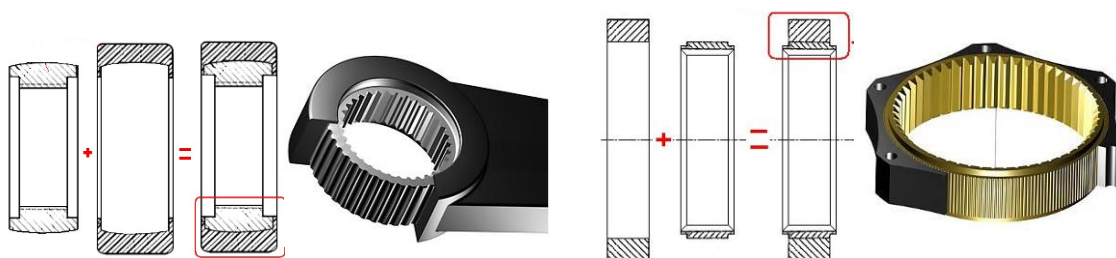


Obr. 9 Příklady nýtovaných spojů

### 1.3. Patentová řešení problematiky spojování kompozitu

Jelikož vzájemné spojování kompozitů a především jejich vazbení na jiné materiály a to zejména kovy představuje s ohledem na rámové konstrukce ústřední problematiku, byla za daným účelem realizována patentová řešení, která stručně dokumentuje jednotlivé přístupy a překládá zajímavá řešení v dílčích oblastech spojování [22, 26].

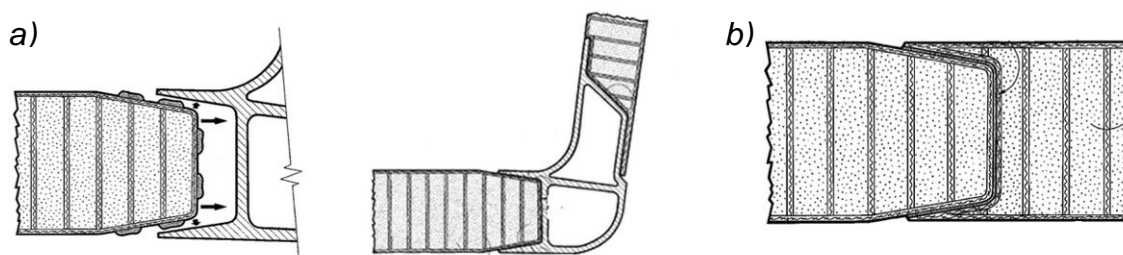
Prvním přístupem je vlisování kovových přírub (pouzder) do kompozitního materiálu (obr. 10), přičemž kontaktní plochy pouzder jsou opatřeny vroubkováním. Daná metoda lze dokumentovat na příkladu ráčny (US patent 5875693 [19]), kde „tělo“ tvoří skelná vlákna propojená plastovou maticí. Obdobný přístup je uveden v US patentu 6874231 [20] zaměřeného na ozubené věnce používané například u planetových převodovek.



Obr. 10 Vlisování kovových pouzder do kompozitů

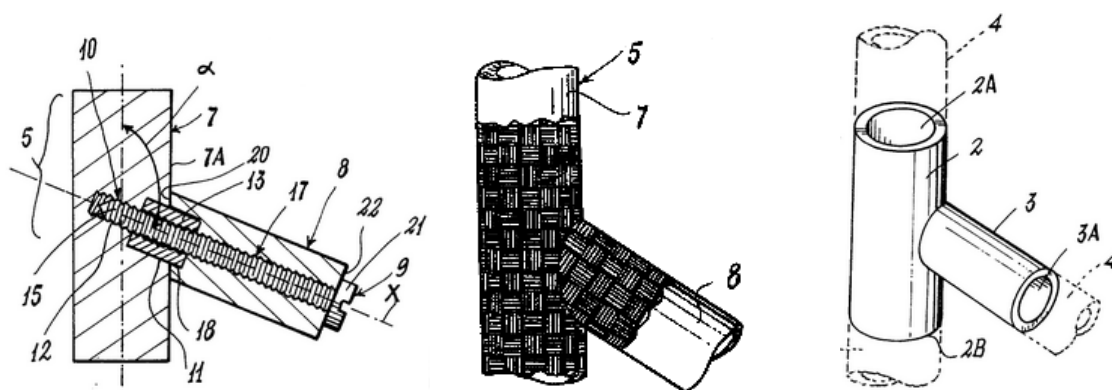
Jedním z nejběžnějších způsobů spojování je lepení. Na příkladu US patentu 5042395 [21] lze dokumentovat lepený spoj dvou kompozitních sendvičů, a to jak při užití propojovací příruby (obr. 11 - a), která je vhodná zejména v případě různých směrů jednotlivých spojovaných dílů, tak i na přímém spoji mezi

kompozity (obr. 11 - b). V obou zmíněných případech je využito spojení pomocí zešíkmených kontaktních ploch, což zajišťuje rozložení silového namáhání do více směrů.



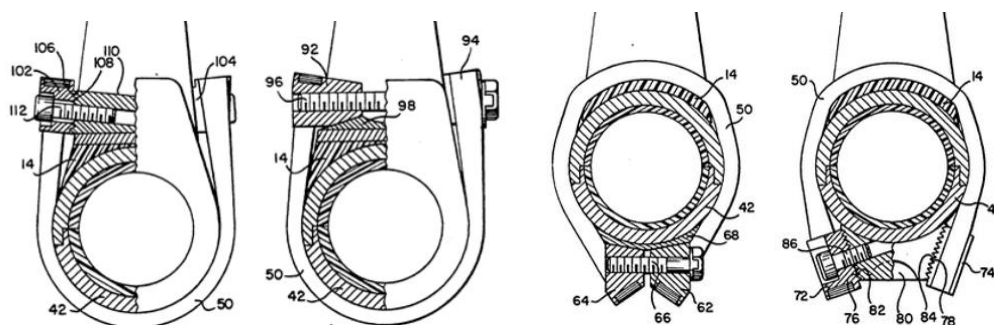
Obr. 11 Lepený spoj; a - kompozit s kovem, b - mezi 2 kompozity

Na dalším příkladu patentu [23] je zdokumentována výroba kompozitních spojovacích elementů (obr. 12), které mohou být využity například pro lehké rámové konstrukce z trubkových dílů. Metodika spočívá ve vytvoření jádra za pomoci šroubového spoje, které je v dalším kroku ovinuto kompozitními vlákny v různých směrech. Po vyrobení kompozitu je možné jádro demontovat a vyjmout, čím získáme finální kompozitní dutou přírubu.



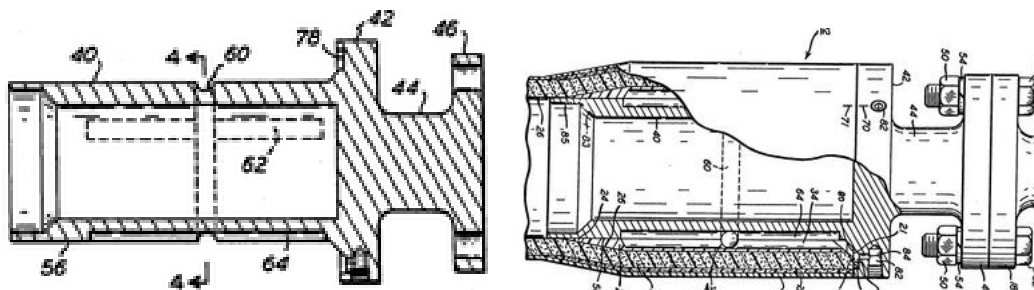
Obr. 12 Výroba kompozitního spojovacího elementu – jádro, ovíjení, produkt

Dalším přístupem ke sloučení kompozitních dílů jsou šroubové spoje, které se ve většině případů využívají s kombinací se svěrnými pouzdry. Patent US 5154098 [24] dokumentuje na obr. 13 způsob uchycení dělené kovové vložky do kompozitní ojnice. Hlava ojnice je stažena svěrnou objímkou zakončenou šroubovým spojením.



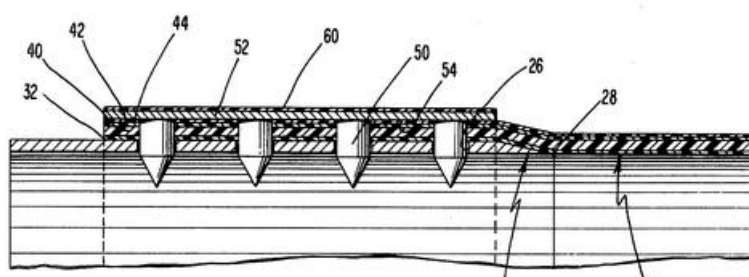
Obr. 13 Aplikace objímky zajištěné šroubovým spojením

Zajímavé řešení spojení kovového pouzdra s kompozitní hřídelí předkládá patent US 4834932 [27], kde pouzdro i kompozitní hřídel obsahují podélné a radiální drážky (obr. 14), do kterých se po sestavení dílů vstříkne do kanálku vzniklého spasováním drážek dávka polymerní hmoty, jež po vytvrzení zajišťuje tuhé a nerozebíratelné spojení.



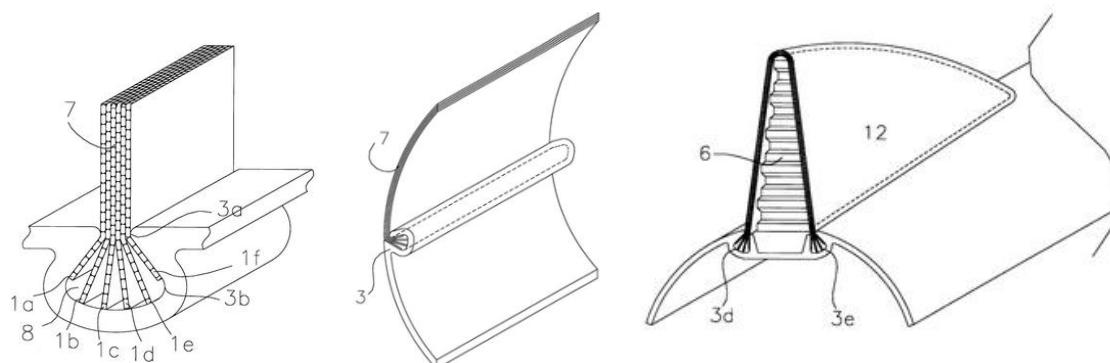
Obr. 14 Spojení pomocí polymerní hmoty v kanálcích – příruba a celý spoj

Další typ spojení kompozitní hřídele s kovovým pouzdem je prostřednictvím sady radiálních čepů, resp. hřebů. Tento druh spojení prezentuje obr. 15., dle patentu [25].



Obr. 15 Spojení prostřednictvím čepů

Vícevrstvé kompozity (lamináty) je možno spojovat dle patentu US 5948501 [28] pomocí svěrné kovové spony, kde při jejím zmáčknutí dojde k deformaci ústí. Lamináty jsou ve sponě drženy jednak třecí silou a rovněž tvarovým způsobem, což znázorňuje obr. 16. Vhodné využití této metodiky spojení lze dokumentovat na tvorbě skořepinových trupů apod.



Obr. 16 Spojení vícevrstvých kompozitů svěrnou sponou

#### 1.4. Konstrukční realizace součástí z kompozitu

Především v leteckém a automobilovém průmyslu, ale i robotice, se uplatňují čím dál tím větší mírou moderní kompozitní materiály – lamináty, které redukují hmotnost celé konstrukce [18]. Především v konstrukci robotických soustav je nejvíce vhodnou volbou, ze všech dostupných kompozitů, uhlíkový laminát. Vzhledem k redukci hmotnosti, avšak při zachování velké tuhosti konstrukce, dochází k tomu, že lze volit pohony nižších výkonů, což u robotických soustav ovlivňuje finanční náklady spojené se spotřebou elektrické energie. V leteckém či automobilovém průmyslu pak dochází k nezanedbatelné úspoře paliva při zpravidla navýšení výkonnostních parametřů těchto dopravních prostředků.

Typickým příkladem využití kompozitů může být náhrada klasického ramene průmyslového robotu KUKA KR 180 PA. Nahrazení stávajícího ocelového ramena ramenem (obr. 17) z uhlíkového kompozitu přineslo řadu pozitivních změn. V první řadě se jedná o zvýšení akcelerace a rychlosti při manipulačních operacích, dále volba pohonů s nižším výkonem (snížení spotřeby elektrické energie) a změnu těžiště robotu do příznivější polohy. O vyspělosti konstrukce robotu KUKA KR 180 PA vypovídá poměr mezi nosností a jeho vlastní hmotností, tj. 1:6. Další aplikaci kompozitů (obr. 17) lze doložit na nejnovější generaci modulárního robotu KUKA LWR IV. Poměr mezi nosností a vlastní hmotností v tomto případě činí 1:1. Energetická náročnost robotu je velmi nízká (přibližně 100 W). Skořepinová ramena vyrobená z uhlíkového kompozitu mají hmotnost v rozmezí 100 – 200 g. Po obrobení kontaktních ploch segmentů jsou vlepena hliníková pouzdra pro uchycení pohonných jednotek.



Obr. 17 Aplikace karbonových ramen na roboty KUKA

Nejmarkantnější nástup kompozitních materiálů lze sledovat v leteckém průmyslu. Převážně se jedná o díly letadla, které jsou rozměrově velké a hmotné. Mezi tyto díly se řadí například trup, ocas a křídla (obr. 18). Jako kompozitní materiál jsou využívána uhlíková vlákna. Tato uhlíková vlákna jsou reprezentována ve formě laminátů a sendvičů. Na příkladu letadla Boeing 787 Dreamliner lze demonstrovat, jak aplikací uhlíkových vláken došlo k redukci

hmotnosti o 18 tun (50 % celkové hmotnosti letadla) a zároveň citelnému zvýšení tuhosti křídel. Dále tím bylo umožněno použití tryskových motorů nižších výkonů, což má za následek výrazné snížení paliva o 20 %.



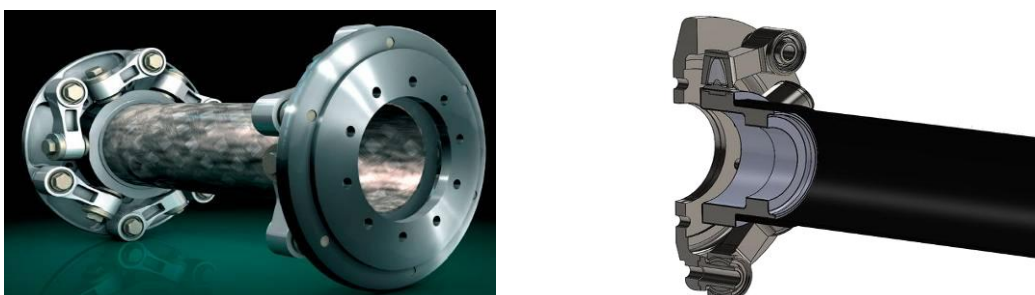
*Obr. 18 Trup letadla Boeing, včetně detailu nýtových spojů trupu*

Do leteckého průmyslu je možno v širším slova smyslu zahrnout i drony, včetně RC modelů, přičemž příkladem aplikace kompozitů může být rám RC modelu kvadrokoptéry (obr. 19), který se vyznačuje tím, že jednotlivé tvarově odlehčené sklaminátové desky jsou navzájem spojeny mezi sebou systémem zámků. Pevné sestavení rámu je zajištěno svěrnými spoji.



*Obr. 19 RC model, včetně ukázky zámkového systému spojení kompozitů*

Využití kompozitních materiálů lze sledovat i v lodním průmyslu. Příkladem může být torzní Azimutova hřídel, která slouží jako mezičlánek k přenosu velkého kroučícího momentu od agregátu k lodnímu šroubu. Obr. 20 znázorňuje vlepěné kovové pouzdro do duté karbonové hřídele. Nahrazením kovového materiálu hřídele uhlíkovými vlákny došlo k velké redukci hmotnosti, neboť Azimutova hřídel může dosahovat průměru až 1,6 m a délky 11 m.



*Obr. 20 Azimutova hřídel a řez jejím modelem*

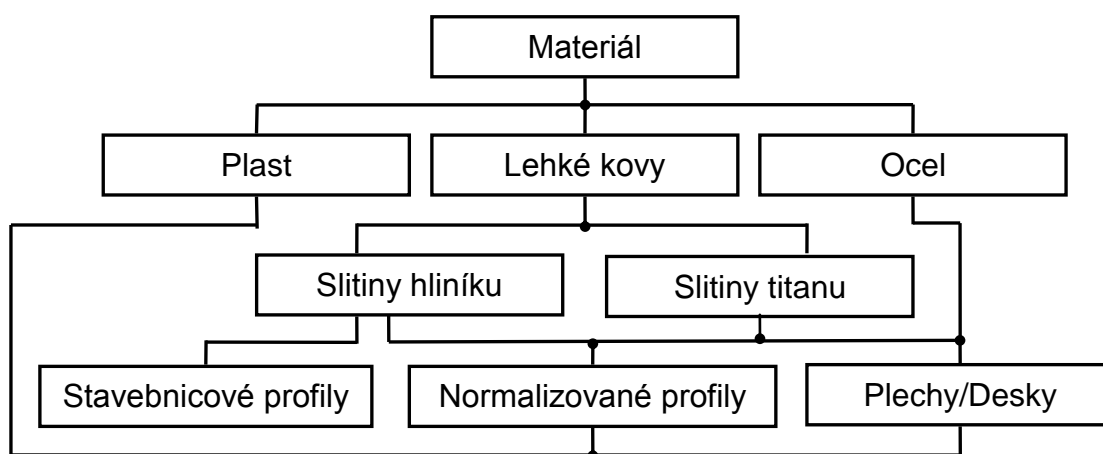
Na závěrečném příkladu lze demonstrovat zajímavé využití kompozitů na rám jízdního kola Delta 7, kde byla použita aramidová i uhlíková vlákna (obr. 21). Geometrická struktura rámu je síťová, skládající se z rovnoramenných trojúhelníků. Vzhledem k unikátní struktuře je použito pro výrobu pouze minimální množství kompozitních vláken, čímž je dosaženo nízké hmotnosti, při zachování relativně vysoké pevnosti a tuhosti rámu.



Obr. 21 Rám jízdního kola, včetně detailu jeho struktury

### 1.5. Klasické konstrukční materiály

V konstrukci tuhých lehkých rámu robotických soustav a jejich periférií se ve většině případů aplikují ocelové a lehké kovové materiály, nejběžněji slitiny na bázi hliníku. Dále to mohou být slitiny titanu, které se však především díky vyšší ceně uplatňují zejména v letectví a kosmonautice. Výše uvedené materiály nachází markantní uplatnění v konstrukčních realizacích z důvodu nižších pořizovacích a výrobních nákladů, v porovnání s moderními účelově navrhovanými kompozity. Základní rozdělení materiálů ve formě polotovarů, které jsou zmíněny v této práci, je znázorněno na obr. 22.



Obr. 22 Rozdělení polotovarů klasických konstrukčních materiálů

Primární shrnutí výhod a nevýhod [13] jednotlivých základních druhů kovových materiálů je uvedeno v následujícím výčtu:

Výhody Al slitin:

- Nízká hmotnost ( $2750 \text{ kg.m}^{-3}$ )
- Korozivzdornost
- Houževnatost

Nevýhody Al slitin:

- Vyšší cena (130 Kč/kg)
- Nízký modul pružnosti

Výhody Ti slitin:

- Mezi kovy nejlepší poměr pevnost/hustota ( $4500 \text{ kg.m}^{-3}$ )
- Výborné mech. vlastnosti

Nevýhody Ti slitin:

- Vysoká cena (~ 2200 Kč/kg)
- Špatně zpracovatelný
- Nižší modul pružnosti v tahu oproti oceli

Výhody ocelových materiálů:

- Velmi dobré mech. vlastnosti
- Cena (25-29 Kč/kg)

Nevýhody ocelových materiálů:

- Vyšší hustota ( $7850 \text{ kg.m}^{-3}$ )
- Možnost vzniku koroze

Práce je zaměřena na konstrukci tuhých lehkých rámu, přičemž samostatné plasty nejsou z pohledu tuhosti pro tyto účely příliš vhodné. Pro jejich nízkou hmotnost nacházejí uplatnění především u konstrukčních dílů, které nejsou vystaveny značnému silovému působení. S výhodou je lze využít například pro konstrukci nízko-zátěžových chapadel. Širší uplatnění nalézají v kompozitních materiálech jako základní složka matrice nebo nosné jádro konstrukce.

U robotických soustav a jejich periférií se především díky poměru cena/tuhost uplatní zejména ocelové materiály a z řad lehkých kovů slitiny hliníku. Proto bude následující část kapitoly dále zaměřena na tyto materiály, jejichž aplikace bude doložena praktickými konstrukčními příklady. Přehled vybraných materiálů dokládá pro hliníkové slitiny tab. 3 a pro ocele tab. 4. Ke zpracování daných materiálů je možné využít řadu konvenčních technologií, od třískového obrábění počínaje, odlitky a výkovky konče. S ohledem na zaměření diplomové práce na rámy efektorů a přidružených periférií, bude následující část věnována sestavným technologiím k tomu určeným. Standardně se jedná o svařování, šroubové spoje nebo kombinaci těchto dvou metod, případně nýtování.

Tab. 3 Vybrané druhy slitin hliníku [9, 12]

	Slitiny hliníku				
EN norma	EN AW 5754	EN AW 5083	EN AW 6082	EN AW 2017	EN AW 7075
DIN označení	AlMg3	AlMg4,5Mn	AlMgSi1	AlCu4MgSi	AlZnMgCu1,5
R <sub>m</sub> [MPa]	190-240	270-275	275-310	360-390	360-540
Tvrдость [HB]	50	73-75	84-94	105-110	104-160
Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	2660	2660	2700	2800	2800
Svařitelnost	dobrá	dobrá	dobrá	špatná	špatná

Tab. 4 Vybrané druhy ocelí [12, 13]

	Druh oceli				
ČSN EN 10027-1	1.0028	1.0036	1.005	1.4301	1.4541
ČSN EN 10020	11 343	11 373	11 500	17 240	17 247
R <sub>m</sub> [MPa]	320-410	340-440	441-647	520-720	500-700
Tvrдость [HB]	158	166	206	170-240	~ 215
Svařitelnost	dobrá	dobrá	špatná	dobrá	dobrá

Hojně využívaným způsobem rámových konstrukcí v robotice jsou ku příkladu stavebnicové systémy z hliníku [10], založené na principu šroubových spojů. Dané systémy jsou univerzální a je možno je použít pro širokou škálu konstrukčních úloh s možností osazením dynamických prvků. Ve značné míře jsou využívány právě ke stavbě jednoúčelových konstrukčních úloh, např. manipulátorů, pomocných periférií a efektorů průmyslových robotů. Modulární stavebnicový systém je nejčastěji využíván pro konstrukci nosného rámu efektoru, na kterém jsou například umístěny přísavky pro manipulaci. V profilech jsou specifické drážky, do kterých se umísťují spojovací prvky (úhelníky, kameny atp.) mezi jednotlivé díly stavebnice, či mohou posloužit pro



vedení kabelů a hadic. Konstrukční profily se standardně rozdělují do čtyř základních dimenzovaných řad, toto odvození vychází ze šířky drážky. Dále každá takto dimenzovaná řada má různou geometrii a velikost průřezu a rozdělení podle silového namáhání.

Dalším klasickým způsobem jsou konstrukce z normalizovaných profilů anebo plechů. Dané sestavy se vyrábějí nejčastěji jako jeden nerozebíratelný celek za pomoci svařování. Tím se docílí vysoké tuhosti celé konstrukce. Po svaření může následovat technologická operace pro zvýšení mechanických vlastností materiálu. Jelikož při svařování dochází k tepelnému namáhání, je z pravidla nutné kontaktní plochy podrobit následnému obrobení. Pro minimalizaci hmotnosti rámu je možné realizovat tvarová odlehčení a to především v případě užití plechů. U hliníkových slitin tvarové odlehčení plechů není tak časté a razantní, jak u ocelových materiálů, neboť jím většinou dochází k podstatnému poklesu tuhosti na úkor relativně nízké úspory hmotnosti.

### 1.6. Konstrukční aplikace z běžných konstrukčních materiálů

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.3., kde byla pozornost věnována kompozitním aplikacím, klasické konstrukční materiály se v průmyslové praxi uplatňují nejčastěji a to především díky stále výrazně nižším pořizovacím nákladům v porovnání s kompozity.

Příkladem aplikace hliníkových stavebnicových profilů může být podtlakový pneumatický uchopovací efektor Schmalz FXP (obr. 23), který se vyznačuje možností manipulace s rozměrnějšími objekty při uchopení ve více rovinách.



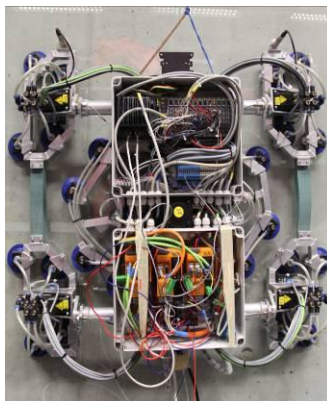
Obr. 23 Použití efektoru Schmalz FXP

Užití duralových plechů v podobě svařované sestavy lze doložit na příkladu nosného rámu technologické hlavice [39], která je určena pro mechanické opracování plochého skla (obr. 24). Dalším příkladem uplatnění duralových polotovarů je servisní robot ROBOTUL<sup>®</sup> Vertical Climber 02 [39], který je určen pro čištění, mytí a inspekční činnosti na skleněném opláštění budov

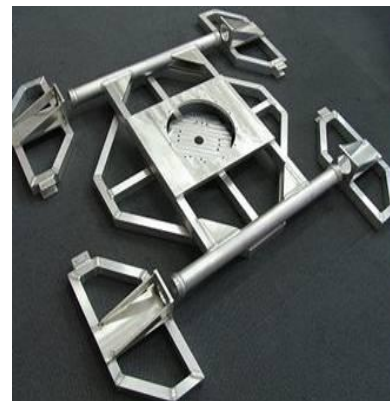
(obr. 25). Jeho nosný rám je vyroben jako svařovaná sestava z normalizovaných duralových profilů.



*Obr. 24 Matovací hlavice*



*Obr. 25 Servisní robot a jeho rám*



Dále na příkladu rámu vzducholodi Zeppelin, který je hmotný a rozměrově velký, lze demonstrovat opodstatněné využití razantního odlehčení duralového materiálu (obr. 26). Geometrie aplikovaného tvarového odlehčení musí dodržovat základní konstrukční zásady zajišťující tuhost a stabilitu konstrukce, ale vlastní design je především předmětem estetického pojetí konstruktéra.



*Obr. 26 Odlehčená duralová konstrukce vzducholodi Zeppelin*

Pro realizaci koncových členů manipulátorů jsou rovněž využívány ocelové normalizované profily a to jak ve formě šroubovaných sestav (obr. 27), tak svařovaných (obr. 28). Jedná se především o případy, kde hmotnost zařízení není zásadním sledovaným faktorem. Vzhledem k velmi dobrým mechanickým

vlastnostem ocelového materiálu mohou dosahovat dané manipulátory velkých nosností.



Obr. 27 Hydraulický manipulátor

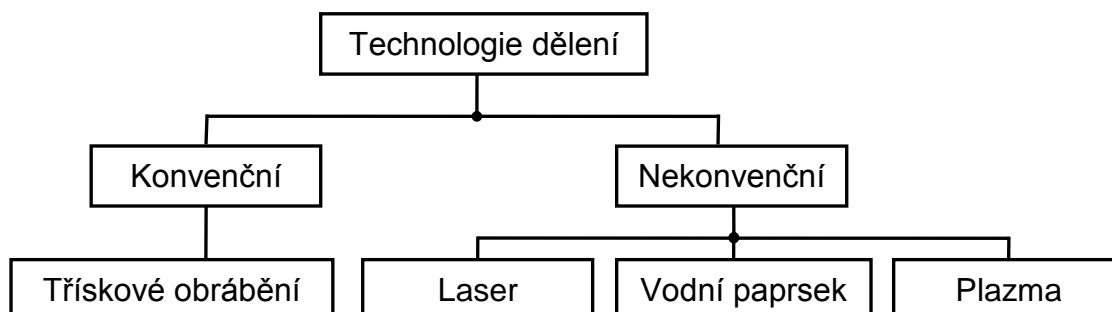


Obr. 28 Koncový člen manipulátoru

### 1.7. Způsoby technologie zpracování materiálu

Ve vazbě na dříve zmíněné výrobní postupy rámových konstrukcí jsou v následující kapitole prezentovány způsoby zpracování materiálu zaměřené na nekonvenční dělicí metody jak pro polotovary konvenční, tak i kompozitní. Pro doplnění bude ve stručnosti prezentována i velice zajímavá nekonvenční moderní výrobní technologie 3D tisku, která patří v současné době mezi trend a lze téměř s jistotou říct, že v odvětví strojírenského průmyslu ji výhledově čeká široké uplatnění.

V současné době existuje mnoho moderních nekonvenčních technologií [2, 4, 6, 11, 33, 35] které umožňují efektivně dělit většinu známých materiálů. Každá z těchto metod má své klady a zápory. Obr. 29 mapuje obecné rozdělení těchto technologií.



Obr. 29 Technologie zpracování materiálu

### a) Obrábění vodním paprskem

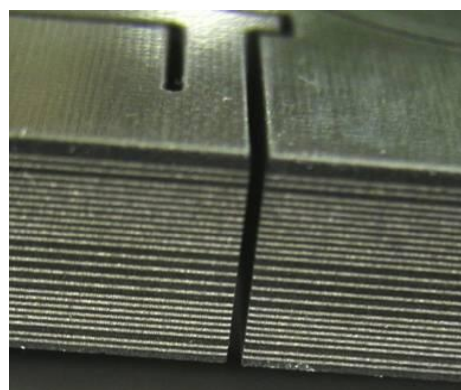
Fyzikální podstata řezání materiálu paprskem kapaliny vychází z úvahy, že paprsek kapaliny pohybující se dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze považovat z hlediska jeho účinků za pevné těleso. Proces řezání probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění v otvor, v druhé etapě dochází k prohlubování a k vytváření rezné spáry [2]. Vodní paprsek nachází značné uplatnění zejména při obrábění kompozitů a kovových materiálů. Zvláště pro složité geometrické tvary a těžkoobrobitelné kovové materiály. Mezi zásadní výhodu patří skutečnost, že lze dělit materiály o tloušťce až 600 mm, přičemž ocelové je možné řezat do tloušťky 120 mm. V zásadě se obrábění vodním paprskem [6] dělí na dvě základní podskupiny dle použitého pracovního média:

- Water Jet Machining (WJM) - vodní paprsek o vysokém tlaku a rychlosti
- Abrasive Waterjet Machining (AWM) - abrazivní vodní paprsek

Metoda WJM se zejména uplatňuje pro řezání nekovových materiálů, jako jsou například kompozity, jelikož při použití klasických konvenčních metod dochází k rychlému opotřebení obráběcího nástroje vlivem vysoké abrazivnosti kompozitu. Technologie obrábění abrazivním vodním paprskem (AWM) se liší od předchozí technologie liší v účinnost vodního paprsku a to díky přidání abrazivních zrn. Abrazivní zrna mohou být jak z přírodních, tak i syntetických materiálů. Velikost zrn je v rozmezí mezi 0,2 - 0,5 mm. Tato metoda je určena zejména pro tvrdé kovové materiály.



Obr. 30 Řez duralem



Obr. 31 Řez kompozitem

#### Výhody:

- Studené dělení materiálu
- Žádná deformace obrobku
- Geometricky složité řezy
- Přesnost obrobku +/- 0,1 mm

#### Nevýhody:

- Možnost vzniku koroze u obrobku
- Problematické dělení materiálů, které jsou náchylné na vlhkost

## b) Řezání laserovým paprskem

Dělení materiálu laserovým paprskem [2, 6] patří do skupiny tepelného dělení, tím se rozumí, že dochází k principu lokálního tavení s minimálními deformacemi řezaného materiálu. Řezání materiálu pomocí laserového paprsku je založeno na přeměně světelné energie na energii tepelnou, ke které dochází při teplotě okolo 10 000 °C. Přesný soustředěný laserový paprsek malého průměru (0,02 - 0,25 mm) o vysokém výkonu dokáže dělit materiály s různými tepelně-fyzikálními vlastnostmi. Díky velmi přesnému paprsku s vysokou koncentrací výkonu se dosahuje relativně kvalitního řezu. Lasery se rozdělují na plynové, pevné, polovodičové a kapalinové. Nejčastěji se používá laser plynový, konkrétně CO<sub>2</sub>, které se využívají převážně k dělení klasické legované, či korozivzdorné oceli, a to až do tloušťky materiálu 12 - 15 mm s přesností cca +/- 0,1 mm. Pevný laser lze s výhodou použít pro slabší tloušťky kovových a nekovových materiálů, u hliníkových slitin je to 8 - 10 mm. Pro dělení kompozitů je použití laserového paprsku omezeno, jelikož jednotlivé složky kompozitu (výztuž a matrice) musí mít stejnou hodnotu teploty tavení.



Obr. 32 Řezání laserovým paprskem



Obr. 33 Laserové výpalky

### Výhody:

- Minimální deformace obrobku
- Malá šířka řezné spáry (~0,2 mm)
- Vysoká řezná rychlost
- Přesnost výpalků +/- 0,05 mm

### Nevýhody:

- Vyšší pořizovací a provozní náklady
- Problematické dělení materiálu s vysokou emisivitou povrchu

## c) Laser MicroJet

Tato metoda vznikla spojením dvou nekonvenčních dělicích metod, a to sloučením vodního paprsku s paprskem laserovým. Princip metody spočívá v tom, že vodní komorou je do trysky přiváděn laserový paprsek, kde následně dojde v trysce ke spojení laserového paprsku s vodním. Ve vodním paprsku o nízkém tlaku dochází k vnitřnímu odrazu laserového paprsku. Při kombinaci vodního paprsku a laseru dochází k tomu, že se z tepelného dělení stává studený řez, což přináší řadu výhod. Voda během řezání materiálu odvádí teplo

v místě řezu a zároveň omývá materiál. Pracovní tlak vody je v rozmezí 2 - 50 MPa. Lze využít pro celou škálu materiálů (ocel, polykrystalický diamant atd.).

Výhody:

- Studený řez
- Vysoká řezná rychlost a přesnost
- Řez pórovitým i vrstveným materiálem
- Relativně nízké provozní náklady

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady

#### d) Řezání materiálu za pomoci plazmy

Řezání materiálu plazmou [4] také patří do skupiny tepelného dělení. K tavení dochází při teplotě více než 15 000 °C. Vysoká teplota se dosáhne rozkladem molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem. Elektrický oblouk je vytvořen katodou a anodou, kterou vytváří sám řezaný materiál, jenž musí být elektricky vodivý. Plazma je vysoce žhavý a elektricky vodivý plyn. Pro tyto účely se jako plazmový plyn využívá argon, kyslík, vodík, nebo dusík. Při použití plazmového řezání materiálu dochází k vývinu vysoké hlučnosti, prašnosti a vzniku spalin. Z tohoto důvodu se používají plazmové hořáky s přívodem vody. Plazmou nelze dělit kompozitní materiály, z důvodu vysoké teploty plazmy.

Výhody:

- Možnost dělení vysokopevnostních ocelí a slitin hliníku až do tl. 200 mm
- Vysoká řezná rychlost

Nevýhody:

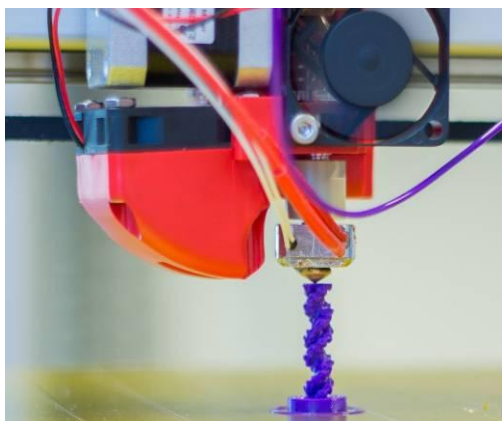
- Při suchém řezání velká hlučnost (80 - 100 dB)
- Pouze elektricky vodivé materiály
- Intenzivní UV záření

#### e) 3D tisk

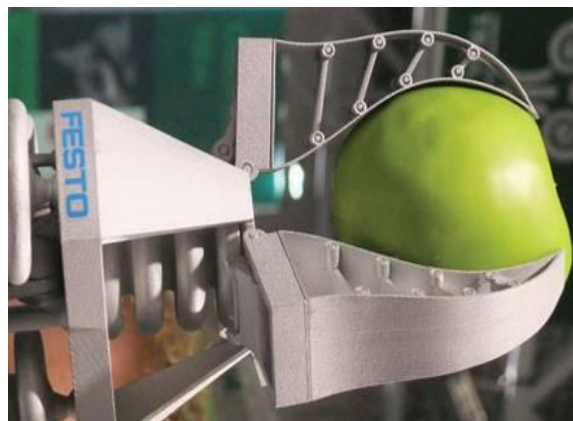
3D tisk [1] je relativně nový způsob výroby trojrozměrných objemových objektů z digitálních modelů. Virtuální modely se realizují pomocí CAD systémů, nebo 3D skenerem pokud je potřeba převést již existující objekt do digitální podoby pro vytištění. Realizace tištěného 3D předmětu je docíleno pomocí aditivních procesů, při kterých jsou na sebe v horizontálním směru kladeny jednotlivé vrstvy materiálu.

Mezi nejběžnější technologie patří tavení a selektivní spékání laserem. 3D tiskárny dokáží využívat širokou škálu materiálů, od plastových, přes keramické až po kovové a to včetně jejich kombinace. Polotovar je nejčastěji formou vlákna, resp. drátu, který je odvíjen z cívky a přiveden do vytlačovací trysky tiskové hlavy (obr. 34). Tryska je zahřívána pro potřebné roztavení polotovaru a pomocí řízeného servomechanismu je ovládán její pohyb. Po vytlačení roztaveného materiálu tryskou do jednotlivé vrstvy dochází k okamžitému samo-vytvrzení z důvodu zabránění nežádoucím deformacím („zborcení“).

3D tisk je velmi perspektivní způsob zpracování materiálu při pohledu do budoucna a dává vysoký potenciál ke vzniku novým typům konstrukcí. Jeho unikátní předností je možná realizace jinak tvarově nevyrobitelných předmětů. Příkladem aplikace 3D tisku může být pneumatické adaptivní chapadlo, které je vyrobeno z polymerního materiálu (obr. 35). Jedná se o konstrukční uspořádání se třemi aktivními úchopnými prvky, které se skládají ze dvou pružných pásek vytvářejících po spojení trojúhelníkový tvar. Pružné pásky jsou spojeny klouby, pomocí nichž se chapadlo přizpůsobí uchopovanému objektu.



Obr. 34 3D tisková hlavice



Obr. 35 Adaptivní bionické chapadlo

### 1.8. Závěrečné shrnutí rešeršních poznatků

V rešeršní části byly prozkoumány a popsány klasické i kompozitní materiály, včetně jejich nových způsobů dělení. Je nutné zdůraznit, že ne všechny uvedené druhy materiálů v jednotlivých kategoriích splňují základní faktory, tj. nízká hmotnost, vysoká tuhost a nízké náklady, které byly sledovány během rešeršní problematiky. Vzhledem k novým možnostem dělení materiálu je možné příznivě redukovat náklady, ale bezesporu největší poměrnou složku tvoří právě zvolený materiál. Obecně platí, že kompozity mají vynikající mechanické vlastnosti ve vzájemné vazbě na nízkou hmotnost, avšak pro konstrukční účely stavby ultralehkých tuhých rámců je nejvhodnější kompozit na bázi uhlíkových vláken. Jeho pořizovací cena ale je velmi vysoká, proto se s ním lze setkat v drtivé většině případů pouze u leteckých aplikací, případně u luxusních automobilů, kde jejich výhody přinášejí znatelnou úsporu pohonných hmot. Dále z hlediska výrobních nákladů včetně následného obrábění není cena rovněž příznivá, jelikož kompozity jsou velmi tvrdé, abrazivní, a proto pro jeho dělení je využíván především vodní paprsek, či „tvrdší“ nástroje konvenčních obráběcích metod (např. polykrystalický diamant). Jelikož markantním sledovaným faktorem jsou právě nízké náklady, které rozhodují o výběru materiálu a ty kompozitní materiály nesplňují, nebude s nimi nadále pro praktickou část diplomové práce uvažováno.

Při rozboru klasických materiálů byly diskutovány ocelové materiály, materiály na bázi slitin hliníku a titanu a v malé míře i plasty. Zmíněné slitiny titanu mají nejlepší poměr z kovových materiálů mezi maximální pevností a minimální hmotností, avšak jejich cena je velmi vysoká a ve většině případů by jeho nasazení pro konstrukční aplikace bylo nerentabilní. Plasty splňují pouze jeden faktor a to nízkou hmotnost, proto jako samotné se v konstrukci rámu nevyužívají, tudíž nebudou nadále společně se slitinami titanu uvažovány.

Ocelové materiály lze ještě rozdělit na běžné konstrukční a nerezové. Z mechanických vlastností vyplývá, že běžné konstrukční ocele mají relativně vysokou tuhost a při vhodném tvarovém odlehčení se zachováním dostatečné tuhosti i nízkou hmotnost, čímž lze označit základní dva faktory, které byly vytyčeny na začátku rešeršní činnosti, za splněné. Pořizovací náklady běžných konstrukčních ocelí jsou minimální, avšak je nutné klást zejména zvýšený akcent na povrchové úpravy z důvodu zabránění koroze. U nerezových ocelí je tuhost mírně vyšší, ale zase jsou podstatně vyšší pořizovací náklady polotovaru, které se však dají částečně kompenzovat eliminací povrchových úprav. Redukci hmotnosti je možné provádět stejným způsobem jako u běžných konstrukčních ocelí.

Hliníkové slitiny se hodí spíše pro méně namáhané konstrukce, kde je důraz kladen především na nízkou hmotnost. V tomto případě je diskutabilní, kdy využívat tvarová odlehčení, jelikož u menších a kompaktnějších konstrukcí může minimální redukce hmotnosti způsobit výrazný pokles tuhosti, což je nežádoucí. Proto je v daných případech nezbytné provádět počítačovou analýzu pomocí MKP, která pevnostně prověří navržené konstrukce a umožní optimální naladění poměru tuhosti a hmotnosti. Pořizovací náklady jsou u slitin hliníku menší, než u nerezové oceli, ale s běžnou ocelí jsou v poměru ku hustotě materiálu relativně srovnatelné. Náklady spojené s výrobní činností (obrábění) se zejména odvíjí od geometrické složitosti dílu s čímž je úzce spjata použitá obráběcí technologie. Při třískovém obrábění se hodinová sazba běžně pohybuje v rozmezí 500 až 600 Kč, avšak při využití CNC stroje jsou výrobní náklady výrazně vyšší, podle typu stroje od 700 až do 2500 Kč/hod. Při využití nekonvenčních paprskových metod se cena odvíjí za kus od rozměrové velikosti a většinou pouze okrajově od plošné tvarové složitosti. Obecně platí, že hliníkové slitiny a běžné konstrukční oceli jsou snadněji obrobitelné, než nerezové oceli, které vyžadují obráběcí nástroje z kvalitnějších materiálů. Uvedené kovy lze dělit i nekonvenčním způsobem, jak bylo popsáno v kap. 1.7.

Závěrečným shrnutím při porovnání se sledovanými faktory rešerše byly jako nejlépe shodující se vybrány **ocelové materiály a materiály na bázi hliníku, které budou využity i v následující části předložené diplomové práci.**



## 2. Návrh zkušebních vzorků pro testování mechanických vlastností

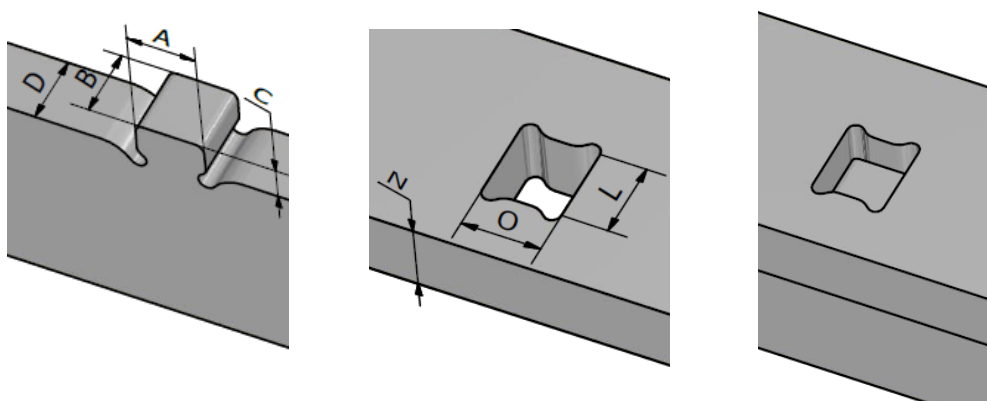
Úvodní část práce byla věnována rešeršní činnosti, kde byla pozornost soustředěna především na problematiku ultralehkých tuhých rámců, moderních materiálů a jejich způsobu dělení. Tyto získané informace lze s výhodou využít při řešení nových konstrukčních postupů v oblasti tuhých lehkých rámců. Mezi tyto nové postupy lze zařadit tzv. konstrukce ze zámkového systému, kterým bude následující část práce věnována. Detailnější popis a princip funkce daného systému je uveden v kapitole 2.1. Tato kapitola je zaměřena na návrh experimentálního standu a zkušebních vzorků.

### 2.1. Zámkové konstrukce

Nejprve je důležité vysvětlit princip zámkových konstrukcí, jejichž základními stavební díly jsou výstupek zámku a otvor pro zámeček. V následujícím textu je blíže popsán zámkový systém pro konstrukce z kovových materiálů, na které je praktická část této práce orientována.

Výstupek zámku a otvor mají geometricky relativně složitý tvar, využívá se k jejich realizaci nekonvenční technologie obrábění materiálu, konkrétně se jedná o aplikaci laserového paprsku (kap. 1.7.). Výpalky z plechů se vypalují na CNC laserovém řezacím centru, kde finální výrobek dosahuje velké přesnosti.

Pro tvorbu výstupků a otvorů existují zásady, které musí být dodrženy z důvodu výrobní technologie. Tam, kde by vznikaly ostré zlomy, musí být tyto hrany nahrazeny zaoblením, zápichem apod.



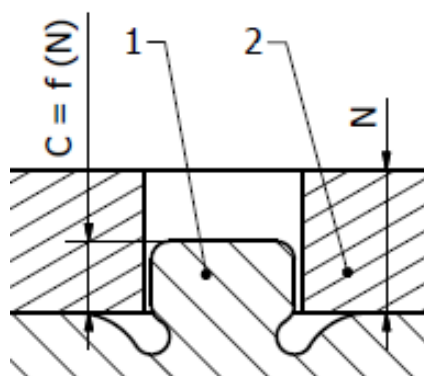
Obr. 36 Zámkový systém – výstupek, otvor a výsledné spojení

Přesná rozměrová specifikace výstupku zámku (obr. 36) je odvozena od tloušťky plechu ( $D$ ). Hloubka výstupku zámku ( $B$ ) odpovídá ze své podstaty tloušťce plechu ( $B = D$ ). Optimální půdorysný pohled výstupku se předpokládá ve tvaru čtvercové základny, tedy šířka zámku odpovídá jeho hloubce ( $A = B = D$ ). Velikost kóty  $C$ , tj. výška výstupku, je dána tloušťkou protilehlého dílu ( $N$ ),

přičemž daná hodnota se odvíjí od použitého materiálu na základě praktických poznatků s danou technologií lokálního svařování ( $C = f(N)$ ). Výstupek obsahuje zápichy pro styk kontaktních ploch.

Na obr. 36, kde je zobrazen otvor pro zámek, lze dále vidět rozměry L a O, jejichž velikost je dána protikusem, přičemž se navyšují o přídavek cca +0,2 mm ( $L = B + 0,2$  mm a  $O = A + 0,2$  mm). Hodnota přídavku záleží především na přesnosti CNC laserové hlavice. Otvor pro zámek obsahuje charakteristické zápichy, které při montáži musí být z důvodu rovinnosti plechu orientovány rovnoběžně s tloušťkou protilehlého plechu.

Obr. 37 dokumentuje řez samotným zámkem, který naznačuje umístění výstupku zámku (díl 1) do otvoru zámku (díl 2) s náležitou vůlí. Tyto vůle jsou užitečné s ohledem na snadnou montáž a také pro možnost dodatečného působení teplotního pnutí. Při provaření spoje se materiál zahřívá a následným chladnutím dochází k teplotnímu efektu, jenž v důsledku teplotní dilatace vytváří požadovaný přítlak („dotáhnutí“) zámkového spojení.



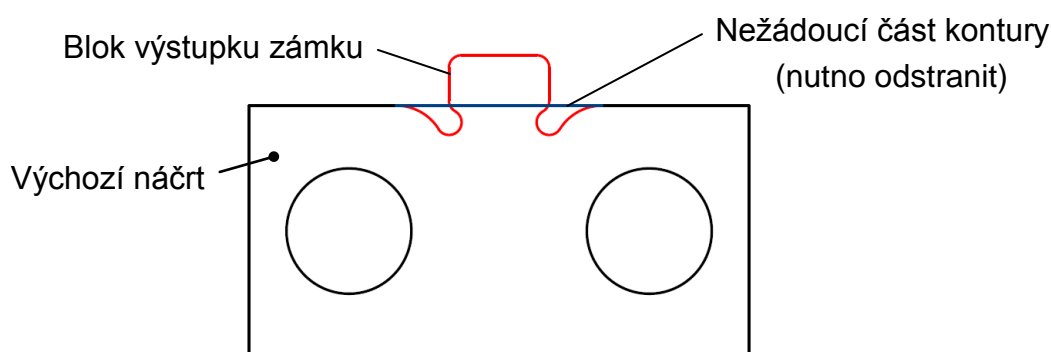
Obr. 37 Řez zámkovým spojením

Značná výhoda zámkového systému spočívá v tom, že danou technologickou operací (lokálním svařováním) dochází pouze k minimálním teplotním deformacím konstrukce. Díky moderním způsobům dělení materiálu má výsledné konstrukční řešení poměrně přesnou rozměrovou geometrii (v řádu desetin mm) a proto ve většině případů není třeba aplikovat složité a drahé následné obrábění funkčních ploch. Další předností je relativně nízká hmotnost výsledné konstrukce v důsledku možnosti aplikace tvarového odlehčení při zachování dostatečně vysoké tuhosti. V neposlední řadě lze konstatovat, že zámkové systémy dodávají konstrukci vysoký designový efekt, a to obzvláště při dodatečném zabroušení lokálních svarů, čímž finální konstrukce vypadá jednoduše.

## 2.2. Práce se zámkovým systémem v programu Autodesk Inventor

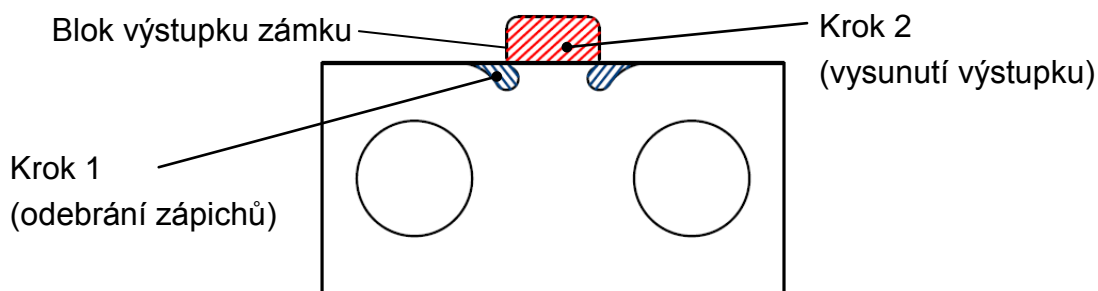
Pro počítačové modelování byl použit software Autodesk Inventor 2014, pro který je sepsán i níže uvedený postup, který je však obecně využitelný i v jiných CAD softwarech. Existuje řada způsobů jak vytvářet (modelovat) výstupky zámků a otvory do plechových dílů, které se liší především v efektivnosti a produktivitě práce.

Mezi nejtriviálnější, avšak málo efektivní, způsob patří modifikace základního geometrického tvaru plechu, kdy se do jeho výchozího náčrtu vloží blok výstupku zámku (obr. 38). Po vložení bloku je nezbytné jeho zavazbení k výchozímu náčrtu. Následně se musí upravit rozměr výstupku zámku, tak aby odpovídal čtvercovému půdorysu dle dané tloušťky protilehlého plechu. Poté lze vytvořit požadovaný počet výstupků s příslušnou roztečí funkcí „pole“, je však následně nutné oříznou kolem všech vzniklých výstupků zámků nežádoucí část kontury původního náčrtu. Při běžném postupu vytváření sestavy je výhodné konstrukční systém navrhnout a odladit bez zámků, které se do geometrie dílů vloží dodatečně. Při tomto postupu však výše uvedený způsob vytváření zámků naruší výchozí geometrii příslušných dílů a tím i veškeré vazby (v sestavě) aplikované mezi kontaktními plochami dílů.



Obr. 38 Skica zámku prvního způsobu modelování

Mezi další, rovněž málo efektivní, způsob tvorby výstupků zámků patří postup, kdy není nutné zasahovat do původního náčrtu plechu, ale vytvoří se v dané rovině nový náčrt. Následně se do nového náčrtu vloží, zavazbí a okótuje skica výstupku zámku (obr. 39) a pomocí funkce „vysunout“ se odebere část materiálu, tj. zápichy. V dalším kroku se využije stejný náčrt (funkcí „sdílení náčrtu“) pro přidání (vysunutí) tvaru výstupku. Vytvoření dalších výstupků zámků se provede, na rozdíl od předchozího postupu, až v modelu a to opět klasickou funkcí „pole“, čímž odpadá nutnost dodatečných úprav vzniklých prvků, jak tomu bylo v první variantě. Další výhodou tohoto postupu je jeho aplikovatelnost na sestavené díly bez narušení vzájemných vazeb.

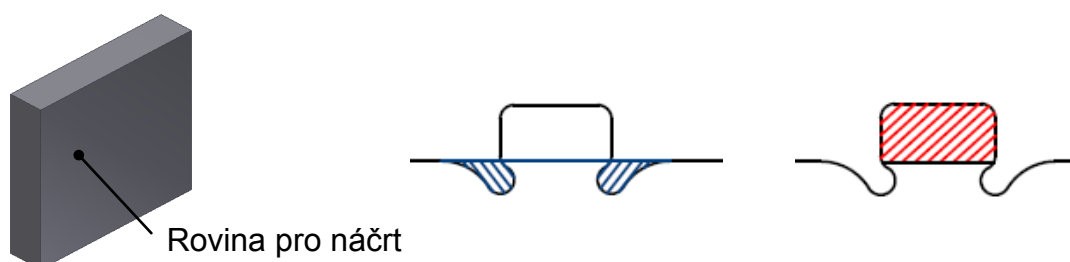


Obr. 39 Skica zámku druhého způsobu modelování

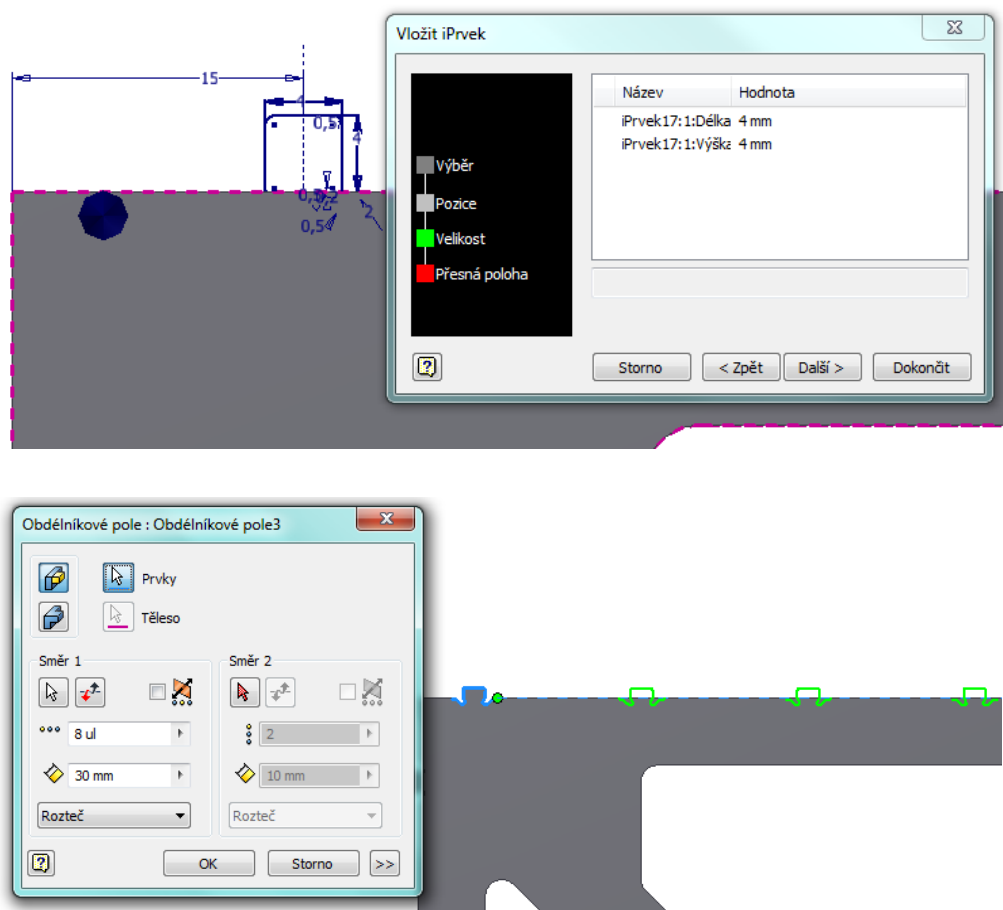
### 2.2.1. Poloautomatizovaný systém tvorby zámků

Výše uvedené manuální varianty lze bez problému využít při tvorbě zámkových konstrukcí, avšak pro zvýšení produktivity práce byla navržena poloautomatizovaná metoda založená na funkci „iPrvek“, který je součástí aplikace Autodesk Inventor. Předložený systém je založen na druhém uvedeném postupu, přičemž se jedná o makro, které umožňuje odebrat a zároveň přidat materiál v jednom kroku. V následujícím textu bude popsán způsob tvorby daného makra, který postačuje provést pouze jednou, přičemž distribuci mezi počítači je možné realizovat prostřednictvím uloženého souboru makra (\*.ide), a dále postup praktického používání tohoto makra.

Tvorbu makra je nezbytné zahájit vymodelováním krychle, či kvádrů o libovolných rozměrech (obr. 40 - krok 1). Poté se v souladu s uvedeným druhým postupem do vymodelovaného tělesa vloží a k obrysu zavazbí sdílený náčrt. Je vhodné, aby byl daný tvaru výstupku v náčrtu dobře okótován, jelikož použité parametry se projeví při aplikaci makra. Daný náčrt se v první fázi použije pro odstranění zápichů (obr. 40 - krok 2) a v druhé pro vysunutí výstupku zámku (obr. 40 - krok 3). V dalším kroku je nutné vyexportovat dosavadní postup pomocí funkce „extrahovat iPrvek“ do požadovaného makra. Při exportování je nutné vybrat ve stromu modelu obě výše popsaná „vysunutí“, čímž dojde k jejich sloučení umožňujícímu vytvoření kompletního výstupku zámku v jednom kroku. Poté se vyberou kóty, které mají být proměnné, tj. zadávané uživatelem. Tím je makro, tzv. „iPrvek“, nadefinováno a je možné ho uložit (\*.ide).



Obr. 40 Fáze vytváření makra na tvorbu výstupku zámku – krok 1, 2 a 3



Obr. 41 Postup poloautomatizované tvorby výstupků zámků – krok 1 a 2

Pro vložení výstupku zámku do požadovaného plechového dílu se použije za pomoci funkce „vložit iPrvek“ vytvořené makro. Při vkládání se zadají požadované rozměry výstupku, které se odvíjí od tloušťky plechu, na který je makro aplikováno, a dále od tloušťky protikusů a typu materiálu. Následně se nadefinovaný prvek umístí do požadované pozice, zavazbí se k hraně plechu a zadá se jeho pozice ve směru hrany, tj. např. odsazení od kraje (obr. 41 - krok 1). Tímto je výstupek vytvořen. Funkcí „pole“ se následně vytvoří řada výstupků o dané rozteči (obr. 41 - krok 2).

Otvory zámků lze vytvořit rovněž pomocí výše uvedených základních variant, ale výhodnější je použít opět makro, tedy funkci „iPrvek“, z důvodu možnosti komfortní modifikace rozměrových hodnot. Postup pro vytvoření makra se liší od makra výstupku pouze v tom, že stačí jen jeden krok pro náčrt tvaru otvoru a odebrání daného tvaru. Další postup tvorby makra na otvory zámků a rovněž postup aplikace makra je již identický. **Hlavním přínosem tohoto poloautomatizovaného systému tvorby zámkových konstrukcí je jeho vysoká produktivita modelování, daná sloučením více úkonů do jednoho, a také možnost přehledné modifikace rozměrových hodnot.**

### 2.3. Experimentální činnost

Na základě praktických zkušeností na Katedře sklářských strojů a robotiky s ultralehkými tuhými rámy, bylo nutné nejprve provést návrh a konstrukční realizaci zkušebních vzorků, včetně experimentálního standu pro zatěžování prostým ohybem. Blokové schéma graficky znázorňuje postup jednotlivých úkonů od seznámení se s pracovištěm až po vyhodnocení naměřených dat (obr. 42), které jsou zpracovány v kapitole 3. Pro měření mechanických vlastností a tuhosti rámových konstrukcí bylo využito laboratorní zařízení.



Obr. 42 Blokové schéma postupu realizace experimentální činnosti

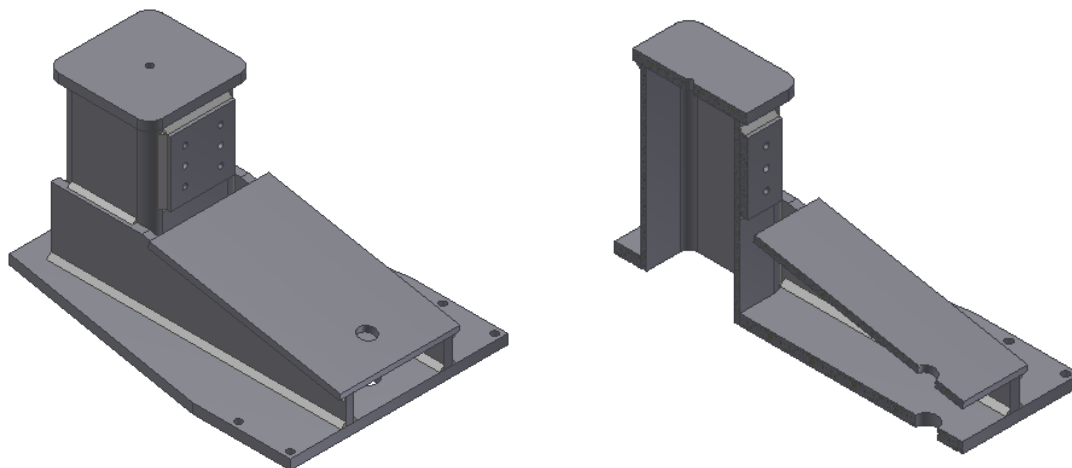
### 2.4. Návrh experimentálního standu

Stěžejním požadavkem pro návrh experimentálního standu byla především vysoká tuhost celé konstrukce, z důvodu zamezení vnášení nežádoucích dodatečných deformací testovacím přípravkem. Na tomto základě byly navrženy dvě varianty řešení pro vyšetření mechanických vlastností zkušebních vzorků rámových konstrukcí.

#### Varianta 1

Navržené koncepční řešení (obr. 43) je realizováno jako svařovaná sestava. Hlavní nosnou částí konstrukčního řešení je čtvercová trubka (140x8 mm) spojená s kotvícím plechem o tloušťce 15 mm svarovým spojem. Kotvící plocha umožňuje snadnou montáž a demontáž experimentálního standu k pracovnímu stroji. Pro uchycení zkušebních vzorků slouží navařená plechová příruba, ke

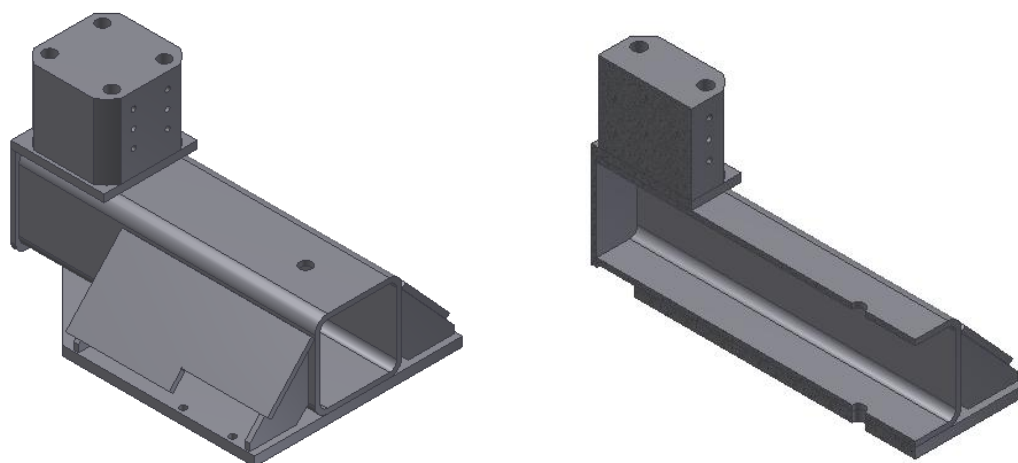
keré se nejprve pomocí válcových kolíků zabezpečí neměnnost polohy a následně šroubovými spoji zafixuje požadovaná poloha vzorku. Pro vysokou tuhost celé konstrukce byly do konstrukčního návrhu zakomponovány výztužné prvky (žebra).



*Obr. 43 Konstrukční řešení varianty 1, včetně řezu*

#### **Varianta 2**

Předložená varianta je kombinací rozebíratelných a nerozebíratelných spojů (obr. 44). Základ navrženého řešení je rovněž čtvercová trubka stejného průřezu, která je v horizontálním směru po celé její délce spojena s kotvicím plechem (tl. 15 mm) svarem. Kotvicí deska slouží pro pevné uchycení k laboratornímu lisu. Pro zajištění dostatečné tuhosti byla aplikována vyztužující žebra. Pro uchycení analyzovaných vzorků slouží tyč čtvercového průřezu, která je šroubovým spojem přichycena k čtvercové trubce přes přídavnou přírubu. Uchycení testovaných vzorků je identické jako ve variantě č. 1, tedy dva válcové kolíky a šroubové spoje.

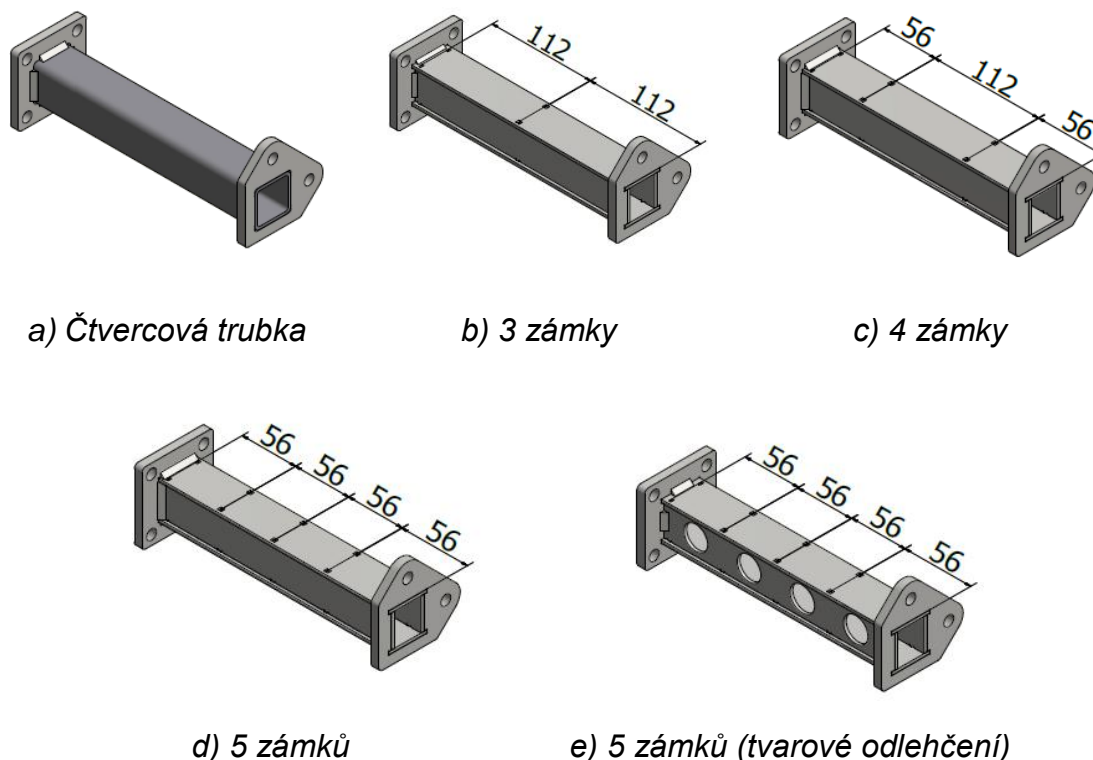


*Obr. 44 Konstrukční řešení varianty 2, včetně řezu*

Obě varianty byly podrobeny výpočtové analýze založené na metodě konečných prvků pro stanovení výsledné hodnoty tuhosti konstrukce. Maximální silové zatížení odpovídalo maximální síle použitého laboratorního lisu, tedy 50 kN. Na základě výsledků získaných z MKP byla vybrána varianta č. 2, kde tuhost konstrukce v porovnání s variantou č. 1 byla o 17 % vyšší, při srovnatelných výrobních nákladech. Podrobná výkresová dokumentace varianty 2 je uvedena v příloze.

## 2.5. Zkušební vzorky

Pro stanovení mechanických vlastností a hodnot tuhosti rámových konstrukcí při statickém namáhání prostým ohybem bylo navrženo pět testovacích vzorků. Za účelem vzájemného porovnání naměřených hodnot jsou čtyři testovací vzorky zámkového systému a jeden srovnávací vzorek z klasické čtvercové trubky. Zámkové konstrukce na testovaných vzorcích nejsou identické, liší se v četnosti a rozteči zámků. Četnost zámků na daný vzorek je v rozmezí od tří do pěti, což názorně ilustruje obr. 45. Dále pak pro pěti zámkový vzorek je realizováno tvarové odlehčení bočnic konstrukce. Sestavný výkres zkušebních vzorků je uveden v příloze.



Obr. 45 Zkušební vzorky

Ocelové svařované zkušební vzorky jsou vždy složeny z „těla“ a dvou koncových přírub, přičemž čtvercová upínací příruba obsahuje čtyři tolerované otvory pro válcové kolíky. Pro zvolený testovaný směr (0°, 90°) se využije vždy



jeden z párů kolíků, který slouží pro přesné ustavení vzorku, a následně se šroubovými spoji vzorek upne k experimentálnímu standu. Druhá krajní příruba slouží k uchycení k hornímu pohyblivému příčnicku laboratorního lisu. Tato příruba má k dispozici dva otvory, jeden je umístěný v podélné ose „těla“ a druhý je umístěný excentricky pro testování vzorku v pootočeném stavu o 90°. „Tělo“ vzorku je složeno ze čtyř vzájemně kolmých plechů o tloušťce 3 mm a osazeno zámkami a otvory pro zámkové výjimky, tvoří v jednom případě srovnávací vzorek z bezešvé čtvercové trubky o tloušťce stěny 3 mm. V kontaktních bodech, kde dochází ke styku výstupku zámku s otvorem, se nachází lokální svar. Mezi „tělem“ a přírubami je koutový svar. Délka zkušební vzorku je 250 mm.

## 2.6. Popis experimentálního pracoviště

Ústřední částí experimentálního pracoviště (obr. 46) je laboratorní lis LLOYD Instruments typu LR50K Plus (parametry lisu jsou uvedeny v tab. 5) vybavený navrženým experimentálním standem a speciálním uchopovaným prvkem pro zajištění vzorků. Dále je do pracoviště zakomponována měřicí a výpočetní technika pro záznam závislosti zatěžovací síly na posunutí (průhybu) vzorku.

Tab. 5 Parametry laboratorního zařízení

LLOYD LR50K Plus	
Jmenovitá síla	50 kN
Minimální rychlost příčnicku	$1,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Maximální rychlost příčnicku	$8,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Pohyblivá část lisu	horní příčnick

Experimentální stand je instalován prostřednictvím šroubových spojů k nosné desce laboratorního lisu. Pohyblivý horní příčnick laboratorního lisu byl osazen siloměrem s maximální hodnotou zatížení 5 kN ( $\pm 0,25 \%$ ). Na něj navazuje uchopovací prvek, ke kterému je přes čep upevněn vzorek.



Obr. 46 Experimentální pracoviště

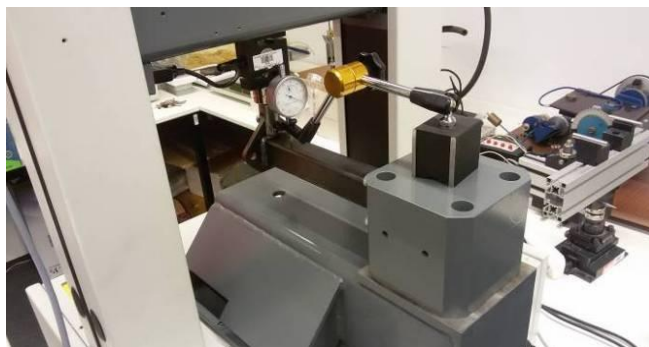
### 3. Výpočtová analýza zámkového spojení pomocí MKP a experimentální verifikace modelu

Tato kapitola je v úvodní části věnována laboratornímu testování. Naměřené výsledky mechanických vlastností jsou dále vyhodnoceny a použity pro verifikaci počítačové simulace, založené na metodě konečných prvků. K simulaci byl využit modul pevnostní analýzy integrovaný v prostředí aplikace Autodesk Inventor. S ohledem na získané výsledky z měření a numerické simulace je na závěr práce proveden konstrukční návrh stávajícího nosného rámu servisního a inspekčního robotu ROBOTUL<sup>®</sup> ze zámkového systému.

#### 3.1. Popis použité metodiky měření

Testované vzorky byly před zahájením experimentálních zkoušek podrobeny numerické simulaci pomocí MKP. Hlavním cílem prvotních numerických simulací bylo zjištění maximální přípustné zatěžovací síly, aniž by došlo v materiálu k překročení meze kluzu. Jedná se tedy o nedestruktivní zkoušky.

Nejprve byly realizovány úvodní experimenty, které předcházely vytvoření experimentálního plánu. Jejich hlavním cílem bylo odladění celé metodiky. Následně bylo zjištěno, že dochází k rozdílným hodnotám posunutí při vícečetném opakování z důvodu pro dané účely nedostatečně přesného odměřovacího systému zařízení. Proto musel být aplikován kontrolní analogový úchylkoměr (obr. 47). Obrázek 48 dokumentuje spojení zkušební vzorku s laboratorním lisem.



Obr. 47 Kontrolní odměřování úchylkoměrem



Obr. 48 Upnutí příruby k lisu

Každý zkušební vzorek byl nejprve zatížen počáteční silou o velikosti 250 N, přičemž v každém dalším měření byla tato hodnota navýšena o 250 N, až do hodnoty 1500 N. Rychlost pohybu horního příčnicku byla ustavena na hodnotu 0,01 mm.s<sup>-1</sup>. Po každém měření byl vzorek vizuálně prohlédnut, zda nedošlo k plastické deformaci, porušení svaru, či počátku šíření trhliny z důvodu vady materiálu. Ze statistického hlediska pro zaručení věrohodnosti a přesnosti měření bylo každé měření realizováno třikrát. Po dokončení celé série měření byl vzorek pootočen o 90° a celý cyklus zatěžování se opakoval.

### 3.2. Numerická simulace

Realizované simulace testovaných vzorků byly konfrontovány s experimentálními výstupy. Vlastní použitý konečnoprvkový model má síť tvořenou tetraedry, což je jediná možnost v rámci dané aplikace. V úvodní části simulace byla realizována studie zaměřená na vliv hustoty sítě, přičemž se ukázalo, že výraznější zahuštění přináší vyšší tuhost konstrukce v řádu pouze několika setin mm a naopak výrazně prodlužuje dobu simulace. Proto pro finální verzi modelu byla užitá hustota sítě, tj. průměrné velikosti prvku vyjádřené jako zlomek délky ohraničujícího kvádru, v podobě výchozí přednastavené hodnoty 0,2. Důraz byl kladen na definování okrajových podmínek, mezi které patří odebrání příslušného počtu stupňů volnosti, definice jednotlivých kontaktních bodů (ploch) a v neposlední řadě definování velikosti svarových spojů.

V případě definice kontaktních ploch byl počáteční model ponechán výchozímu nastavení generátoru simulace, kde je přednastaveno vytvoření pevného kontaktu ve všech stykových plochách (s tolerancí 0,1 mm). Dále byl testován zpřesněný model s ručním nastavením kontaktních ploch pouze v místech zámků, což blíže koresponduje s reálným stavem, a to jak pouze v jedné kontaktní ploše v daném směru pro každý zámek, tak ve dvou kontaktních plochách v každém směru. Uvedený manuální postup je však zdlouhavý, což v případě rozsáhlých sestav výrazně prodlužuje (v řádu hodin) dobu přípravy simulace. **Vyhodnocením výsledků simulace bylo prokázáno, že užitím zjednodušeného automatizovaného postupu se vůči modelu se zpřesněnou definicí kontaktních ploch dopouštíme chyby v řádu 20 %.**

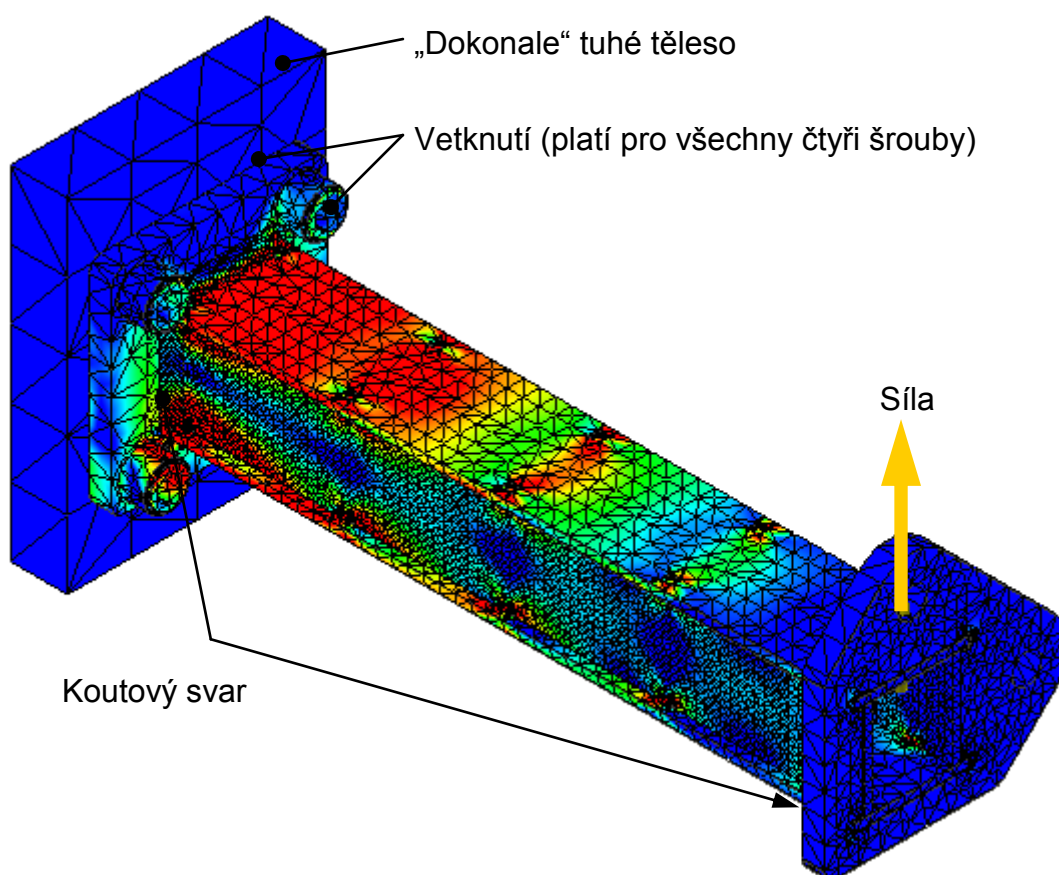
Při prvotních simulacích byl koutový svar nadefinován po celé délce spojů (ideální případ), přičemž výsledek z MKP a experimentálního měření se lišil až o cca 30 %, tj. několik desetin milimetrů. Následně bylo zjištěno, že při konstrukčním návrhu zkušebních vzorků nebyl kladen ve výkresové dokumentaci dostatečný akcent na rozměrovou specifikaci svarů. Koutové svary u přírub některých vzorků nejsou provedeny po celé délce spojovaných dílů, jsou různě dlouhé a odsazené od možného počátku svaru (okraje dílu), jak lze vidět na obr. 49. Z těchto důvodů bylo nutné zohlednit danou skutečnost i v simulačních modelech jednotlivých vzorků.



Obr. 49 Fotodokumentace vzorků s realizovanými svarovými housenkami

Při realizaci numerické simulace je rovněž nutné uvažovat s výpočetní délkou nosného svaru, která se liší od skutečné (vizuální) svarové housenky. U běžně provedených svarů často dochází k výskytu takzvaných "koncových kráterů". Důsledkem toho je zeslabení průřezu na začátku a konci svaru, nosná délka svaru je pak menší než skutečná délka. Proto je nutné v souladu s výpočetní praxí [15, 30] odečíst z každé strany velikost svaru. Například pokud velikost svaru („a“) činí 3 mm a skutečná délka je 20 mm, tak uvažovaná nosná délka svaru je 14 mm.

Uvedeným systematickým postupem bylo následně docíleno naladění konečnoprvkového modelu (obr. 50) do velmi dobré shody mezi simulačními výstupy a naměřenými průběhy.



Obr. 50 Odladěný MKP model zkušební vzorku

### 3.3. Vyhodnocení naměřených hodnot při ohybovém namáhání

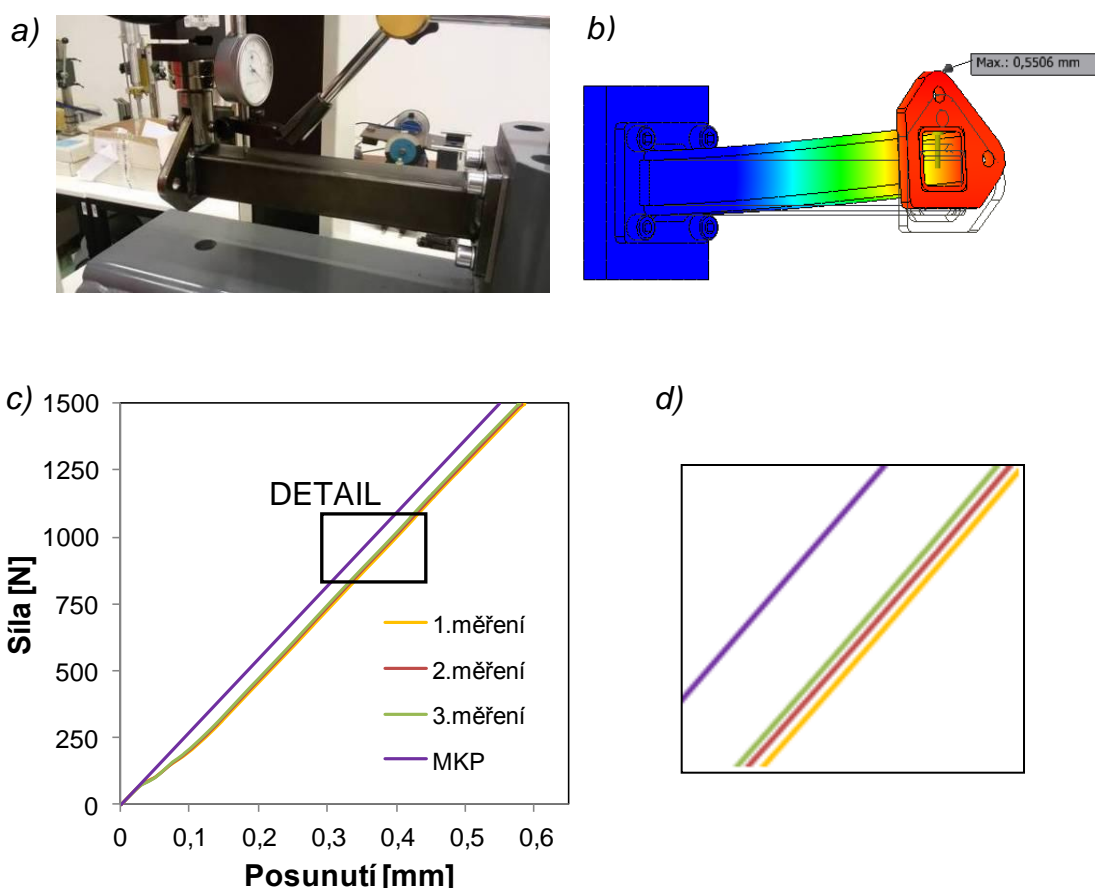
Tato kapitola je věnována datovým i obrazovým výstupům z laboratorních experimentů a jejich prezentaci v konfrontaci s výsledky numerické simulace. Z důvodu porovnání deformačního chování jednotlivých vzorků byla měření prováděna za shodných výchozích podmínek. Pro názornost je uvedena

hodnota tuhosti pro každý zkušební vzorek, která je definována empirickým vztahem (5).

Experimentální výstupy vystihující chování všech zkoumaných vzorků při stejné zatěžovací síle dokumentují následující obrázky (obr. 51 až obr. 55). Hlavním výstupem jsou vždy dvě typické závislosti vyjadřující chování daného vzorku při zatížení prostým ohybem (výjimku tvoří první vzorek ze čtvercové bezešvé trubky). Hodnoty posunutí při maximální vyvozené síle a konstantní rychlosti příčnicku pro analyzované vzorky jsou shrnuty v tab. 6.

### 3.3.1. Vzorek ze čtvercové bezešvé trubky

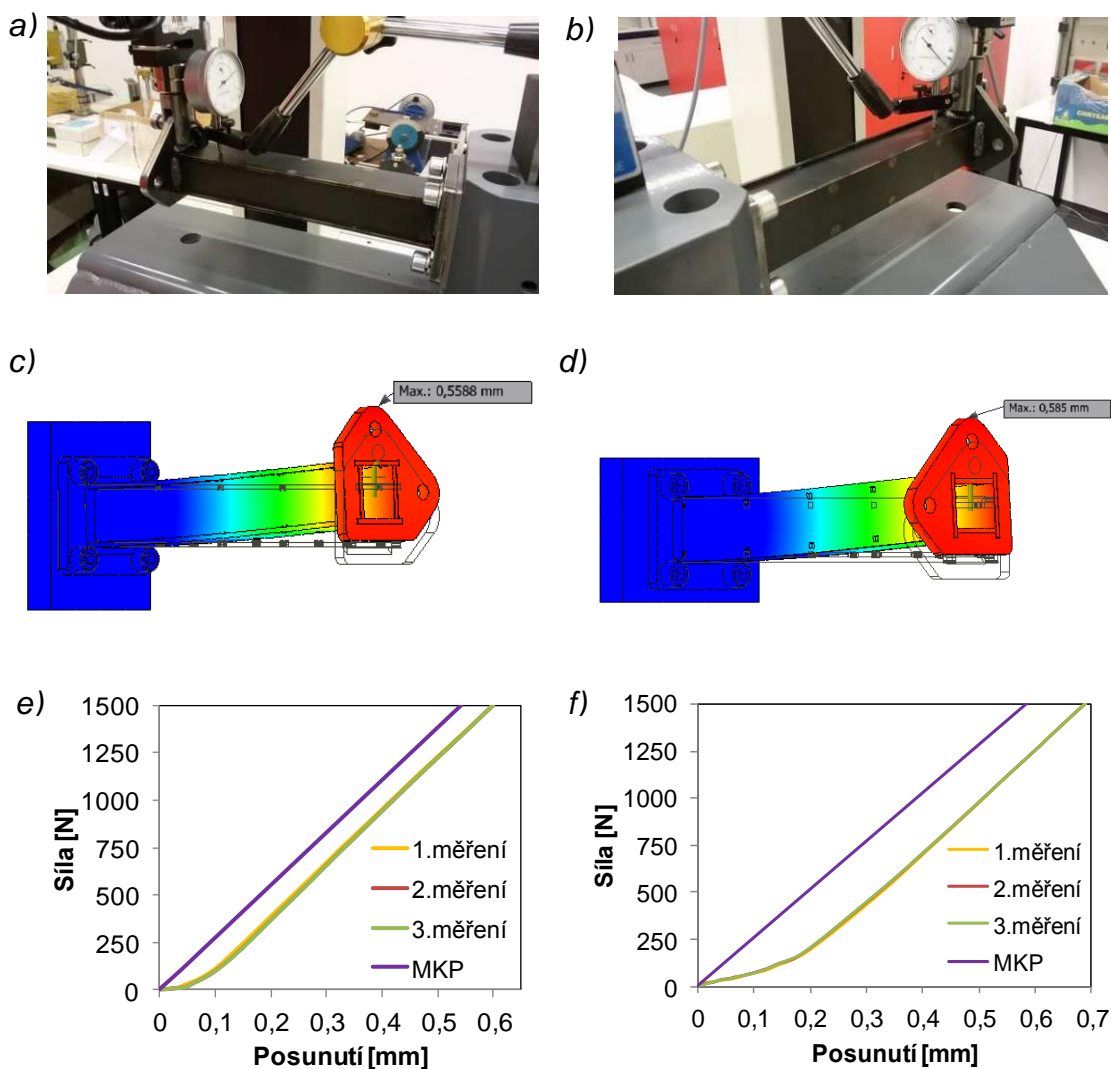
V případě výchozího vzorku tvořeného ze čtvercové bezešvé trubky jsou uvedena výsledná data pouze pro jeden směr (označován  $0^\circ$ ) ohybového namáhání (obr. 52 - c), jelikož při potočeném vzorku o  $90^\circ$  byly naměřeny identické hodnoty posunutí.



Obr. 51 Vzorek ze čtvercové bezešvé trubky; a - aplikovaná experimentální metoda, b - příslušná numerická simulace ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), c - závislost zatěžovací síly na posunutí ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), d - detailní pohled na rozdíly opakovaných měření

### 3.3.2. Vzorek s pěti zámky

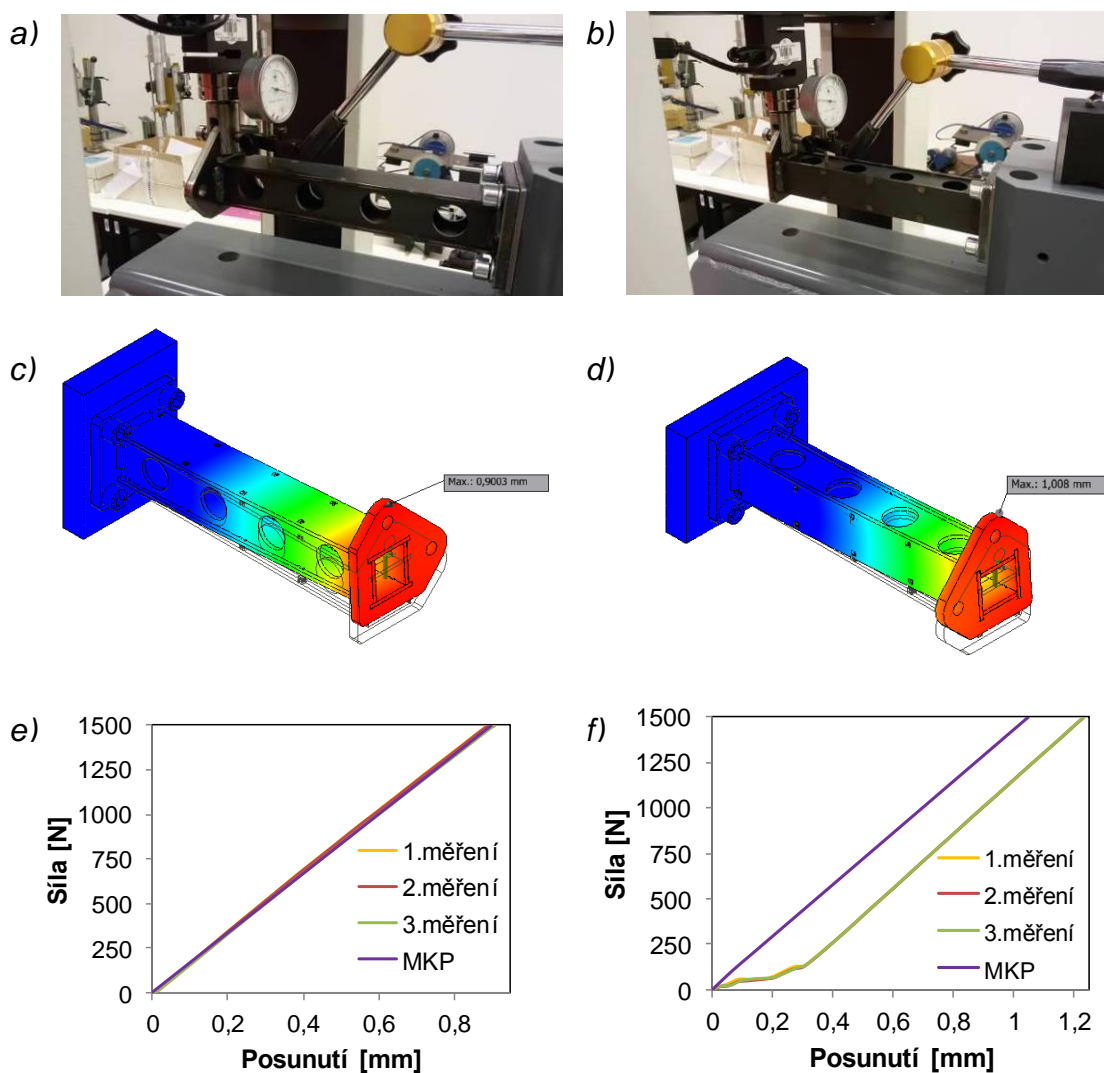
Jedná se o zkušební vzorek realizovaný zámkovou metodou s četností pěti zámků. Daný vzorek byl testován ve dvou směrech (obr. 52 - a, b). Pro ověření naměřených hodnot byla rovněž využita numerická simulace (obr. 52 - c, d).



Obr. 52 Vzorek s pěti zámky; a - aplikovaná experimentální metoda (0°), b - aplikovaná experimentální metoda (90°), c - příslušná numerická simulace (90°), d - příslušná numerická simulace (90°), e - závislost zatěžovací síly na posunutí (0°), f - závislost zatěžovací síly na posunutí (90°)

### 3.3.3. Vzorek s pěti zámky a tvarovým odlehčením bočnic

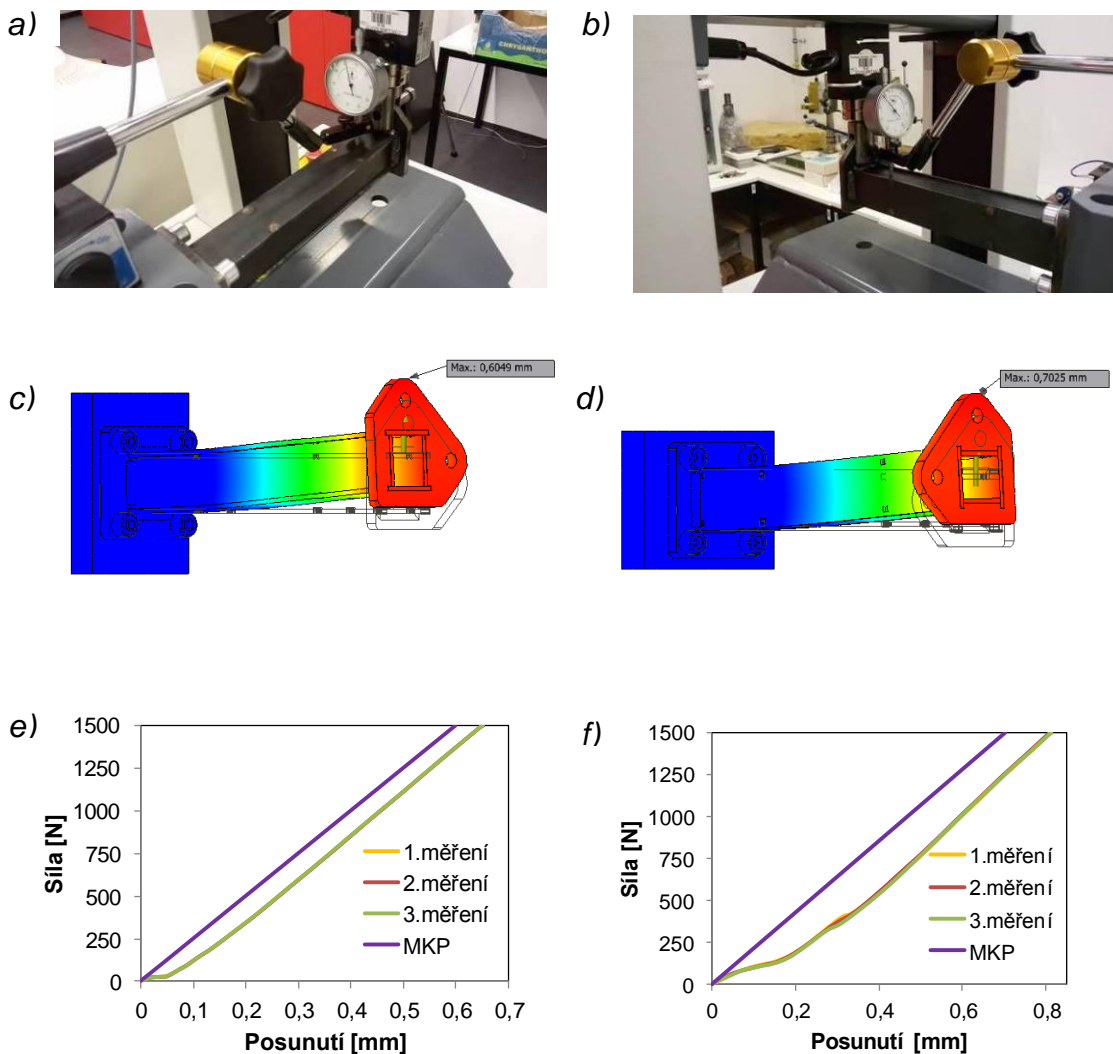
Mechanické chování analyzovaného vzorku je prezentováno ve stejném grafickém uspořádání jako předchozí série měření. Na obr. 53 - e, f jsou vykresleny odpovídající průběhy zatěžovacích charakteristik. Za účelem srovnání s experimentálními výsledky se shodným předchozím vzorkem byly bočnice tvarově odlehčeny.



Obr. 53 Vzorek s pěti zámky a tvarovým odlehčením bočnic; a - aplikovaná experimentální metoda (0°), b - aplikovaná experimentální metoda (90°), c - příslušná numerická simulace (90°), d - příslušná numerická simulace (90°), e - závislost zatěžovací síly na posunutí (0°), f - závislost zatěžovací síly na posunutí (90°)

### 3.3.4. Vzorek se čtyřmi zámky

Grafické výstupy na obr. 54 předkládají naměřená data společně s numerickou simulací testovaného vzorku při shodných počátečních podmínkách.

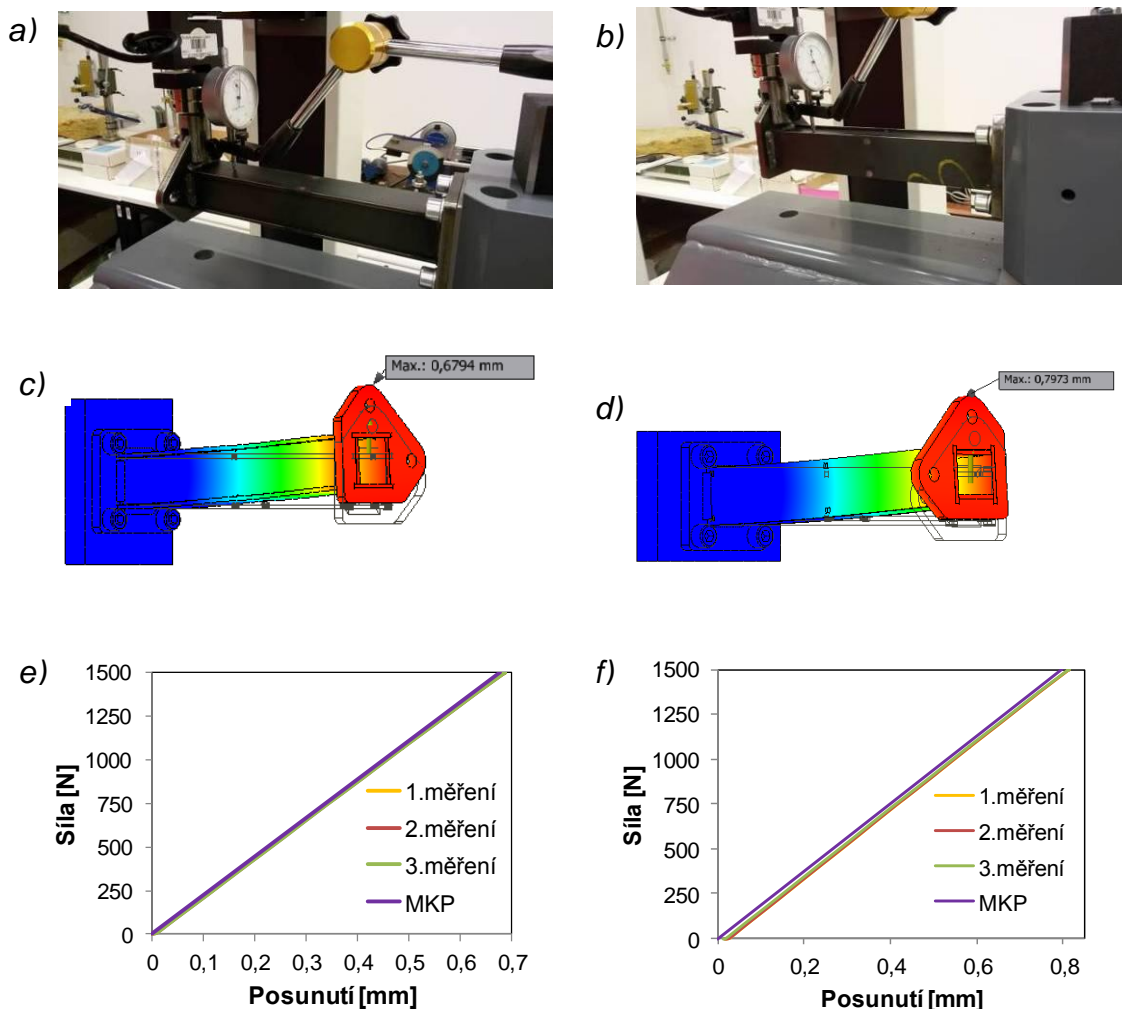


Obr. 54 Vzorek se čtyřmi zámky; a - aplikovaná experimentální metoda (0°), b - aplikovaná experimentální metoda (90°), c - příslušná numerická simulace (90°), d - příslušná numerická simulace (90°), e - závislost zatěžovací síly na posunutí (0°), f - závislost zatěžovací síly na posunutí (90°)



### 3.3.5. Vzorek se třemi zámky

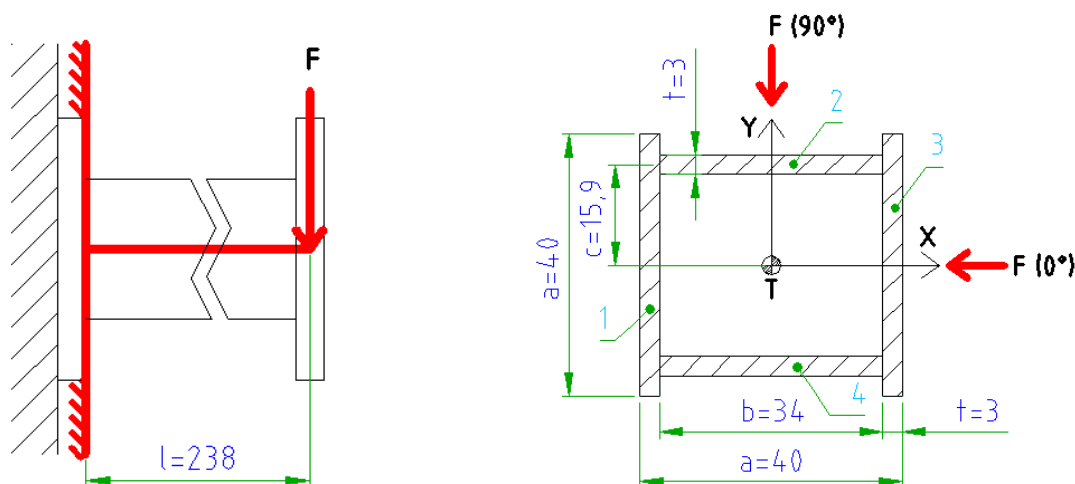
Posledním testovaným vzorkem je vzorek se třemi zámky, charakter vývoje příslušné zatěžovací síly na reálném průhybu dokládá obr. 55 - e, f. Rovněž experimentální výsledky byly porovnány s výstupy aplikovaného MKP modelu, obr. 55 - c, d.



Obr. 55 Vzorek se třemi zámky; a - aplikovaná experimentální metoda ( $0^\circ$ ), b - aplikovaná experimentální metoda ( $90^\circ$ ), c - příslušná numerická simulace ( $90^\circ$ ), d - příslušná numerická simulace ( $90^\circ$ ), e - závislost zatěžovací síly na posunutí ( $0^\circ$ ), f - závislost zatěžovací síly na posunutí ( $90^\circ$ )

### 3.3.6. Ověřovací výpočet vlivu průřezu nosníku na průhyb

Pro objektivní vyhodnocení vlivu tuhosti vzorku v závislosti na orientaci profilu zámkové konstrukce byl realizován zjednodušený kontrolní výpočet, který vychází z kvadratického momentu průřezu.



Obr. 56 Schéma vetknutého nosníku a jeho průřez

Pro ruční výpočet kvadratických momentů k osám x a y byla využita metoda, při které se vychází z rozdělení celého průřezu na dílčí geometricky známé útvary. V tomto případě byl průřez uvažován jako součet čtyř obdélníků. Aplikací Steinerovy věty se určí kvadratický moment pro jednotlivé obdélníky a jejich následným součtem, příp. rozdílem, je dosaženo výsledného kvadratického momentu k příslušné ose. Uvažované rozměry prezentuje obr. 56, přičemž příruba k ukotvení k experimentálnímu standu je uvažována vzhledem k jejím rozměrům jako součást vetknutí.

$$J_x = 2 \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot a^3 \cdot t \right) + 2 \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot b \cdot t^3 + c^2 \cdot t \cdot b \right) = \frac{1}{6} \cdot (a^3 + 12 \cdot b \cdot c^2 + b \cdot t^2) \quad (1)$$

$$J_x = \frac{1}{6} \cdot (40^3 + 12 \cdot 34 \cdot 15,9^2 + 34 \cdot 3^2) = 83726,24 \text{ mm}^4$$

$$J_y = 2 \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t^3 \cdot a + \left( \frac{a}{2} \right)^2 \cdot a \cdot t \right) + 2 \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t \cdot b^3 \right) = \frac{1}{6} \cdot t \cdot (3 \cdot a^3 + a \cdot t^2 + b^3) \quad (2)$$

$$J_y = \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot (3 \cdot 40^3 + 40 \cdot 3^2 + 34^3) = 115832 \text{ mm}^4$$

$$y_x = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_y} = \frac{1500 \cdot 0,238^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,15832 \cdot 10^{-7}} = 0,28 \text{ mm} \quad (3)$$

$$y_y = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x} = \frac{1500 \cdot 0,238^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 8,37 \cdot 10^{-8}} = 0,39 \text{ mm} \quad (4)$$

Rozdíl průhybů při daných parametrech činí cca 0,1 mm, což v procentuálním vyjádření představuje 28 %.

### 3.3.7. Závěrečné shrnutí

Všechna laboratorní měření byla realizována metodou zatížení prostým ohybem, přičemž každý vzorek byl testován ve dvou směrech (0°, 90°). Z naměřených grafických výstupů je patrné, že bylo docíleno velmi dobré opakovatelnosti měření.

Uvedené výstupy z numerického modelu byly konfrontovány s naměřenými zátěžovými charakteristikami testovaných vzorků (obr. 51 - c, obr. 52 - e, f až obr. 55 - e, f) a vzájemné porovnání potvrdilo velmi dobrou shodu mezi modelem a průběhem získaným experimentální metodou v celé oblasti zatěžování. Z grafických výstupů je patrné, že závislost zatěžovací síly na posunutí má v ústřední části vykreslených průběhů lineární charakter. Při porovnání s výstupem z numerické simulace lze konstatovat, že směrnice křivky je téměř identická s experimentálními daty. Strmost křivek udává výslednou tuhost konstrukce.

V počáteční oblasti měření, zhruba do hodnoty síly 250 N, se vyskytly u některých zkoumaných vzorků evidentní odchylky nelineárního charakteru, které lze přisuzovat řadě nepříznivých faktorů. Tato skutečnost může být jednak důsledkem celkové nepřesnosti odměřovacího systému laboratorního lisu, a dále vřelými ve spojení mezi uchopovacím prvkem a zkušebním vzorkem, které se pro jednotlivé vzorky liší v rámci přesnosti napolohování stroje při montáži.

Pro celkové srovnání všech testovaných vzorků jsou maximální průhyby získané laboratorním měřením a konečnoprvkovým modelem při shodné zatěžovací síle uvedeny v souhrnné tab. 6. Do této tabulky byly zahrnuty také hodnoty tuhosti užitím empirického vztahu (5).

$$k = \frac{F}{y} [N.mm^{-1}] \quad (5)$$










Průhyb vzorku ze čtvercové trubky nabýval u laboratorního měření maximální hodnoty zhruba 0,6 mm. V porovnání s nejtuzším testovaným vzorkem se zámky (5 zámků) byl nárůst maximálního průhybu vůči výchozímu vzorku o pouhá 3 %. Na základě získaného průhybu ověřeného i numerickou simulací lze konstatovat, že nejvhodnější variantou aplikovatelnou v konstrukční praxi je vzorek s pěti zámečky. Podstatnější rozdíl v hodnotách průhybu vykazuje vzorek s pěti zámkem a tvarovým odlehčením bočnic, který vykazoval úbytek tuhosti vůči výchozímu vzorku o 50 %.

Z doložených hodnot průhybu vyplývá, že s ubývajícím počtem zámků dochází ke snížení tuhosti (zvýšení průhybu) rámové konstrukce. Ve směru označovaném 0° je tuhost vyšší, než ve směru pootočeném o 90°, což je dáno kvadratickým momentem průřezu nosníků, jak dokládají realizované výpočty

(vzorec 3 a 4). Výpočtem je doloženo, že při dané geometrii a zatížení představuje rozdíl v orientaci profilu odchylku průhybu řádově 0,1 mm. Udaná odchylka koresponduje s rozdíly průhybů doloženými tab. 6. Aplikace odchylky v podobě procentuálního srovnání v tomto případě není vyhovující, jelikož je značný rozdíl mezi teoretickým výpočtem a reálnými výsledky (až 100 %) a je zřejmé, že vyšší reálná poddajnost nosníku není způsobena faktory, které jsou závislé na průřezu profilu (např. délka svaru mezi přírubou a nosníkem).

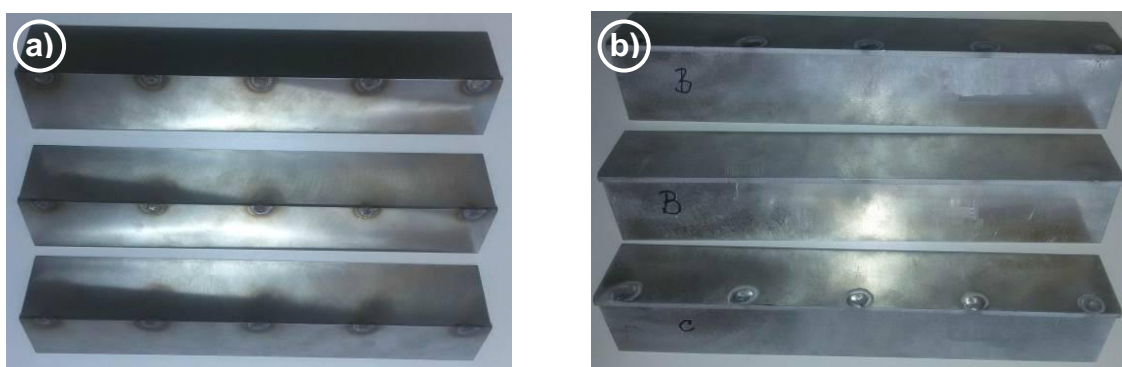
Na základě provedeného srovnání numerických výsledků s experimentálními charakteristikami a rovněž z maximálních hodnot průhybu lze konstatovat, že příslušný konečnoprvkový model byl úspěšně odladěn a je dostatečně věrohodný.

Tab. 6 Naměřené a vypočtené hodnoty průhybu a tuhosti

	Čtverc. trubka	5 zámků		5 zámků (tvarové odlehčení)		4 zámký		3 zámký	
Směr	 0°	 0°	 90°	 0°	 90°	 0°	 90°	 0°	 90°
<b>Posunutí [mm]</b> (naměřené)	0,58	0,60	0,69	0,90	1,22	0,65	0,81	0,68	0,81
<b>Tuhost [N.mm<sup>-1</sup>]</b> (naměřená)	2586	2500	2174	1667	1230	2308	1852	2206	1852
<b>Posunutí [mm]</b> (MKP)	0,55	0,56	0,59	0,90	1,05	0,60	0,70	0,68	0,80
<b>Tuhost [N.mm<sup>-1</sup>]</b> (MKP)	2727	2679	2542	1667	1429	2500	2140	2206	1875
<b>Hmotnost [kg]</b> (bez přírub)	0,83	0,86		0,76		0,86		0,86	
<b><math>\frac{\text{hmotnost}}{\text{tuhost}}</math> [-]</b> (naměřená)	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$
<b><math>\frac{\text{hmotnost}}{\text{tuhost}}</math> [-]</b> (MKP)	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$5,32 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$	$4,63 \cdot 10^{-4}$

#### 4. Souhrn technologických poznatků a konstrukční aplikace zámkových systémů

Při vypracovávání práce byly zjištěny nové poznatky důležité pro efektivní aplikaci zámkových systému pro různé druhy materiálu. Tyto poznatky podléhají know-how pracoviště a proto zde budou pouze okrajově zmíněny bez konkrétních hodnot. Jedná se převážně o optimální výšku zámku vůči tloušťce plechu pro jednotlivé druhy materiálu. Pro ověření optimálních svarových spojů byly vyrobeny testovací vzorky ze dvou vzájemně kolmých plechů o tloušťce 3 mm, resp. 2 mm (obr. 57) z hliníkové slitiny (AlMg3), resp. nerezové oceli (17240). S jistotou se dá konstatovat, že optimální výška zámku musí být navržena jako funkce tloušťky materiálu.



Obr. 57 Testované vzorky; a - hliník, b - nerezová ocel

##### Hliníkové konstrukce

Obecně u hliníkového materiálu platí to, že při aplikaci nižší výšky výstupku zámku oproti tloušťce spojovaného plechu dochází ke zvýšené četnosti provaření spoje, tzn. vzniku deformace (návaru) v oblasti vnitřní strany spoje. Dále dostatečné prohřátí kontaktního místa vyžaduje značné množství energie, což vede k uhoření okrajů desek v oblasti zámků. Naopak velké převýšení nad úroveň druhého plechu neposkytuje dostatečný prostor pro přídavný drát a vede k nedokonalému provaření bodu spoje. V rámci výzkumu byl navržen tvar a výška zámku pro daný materiál v širokém rozmezí a experimentálně byla testována úspěšnost procesu svařování s důrazem na minimální poškození svarového bodu a jeho okolí a dosažení přesnosti a tuhosti konstrukce.

##### Konstrukce z běžné oceli

Pro běžnou konstrukční ocel se jeví jako nejlepší možnost výška zámku, která byla aplikována na zkušebních vzorcích aplikovaných při experimentálním zatěžování a rovněž na již realizovaných konstrukčních aplikacích.

### Konstrukce z nerezové oceli

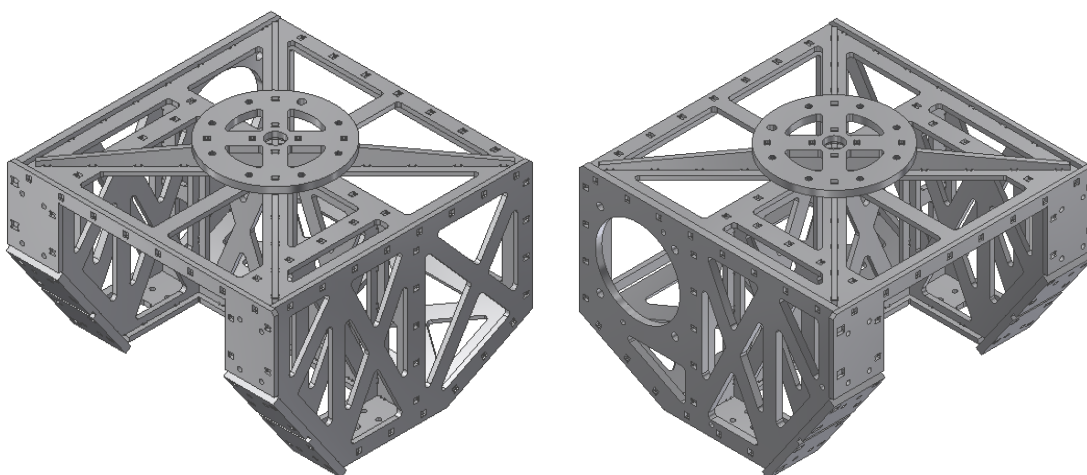
Pokud se jedná o vzorky z nerezové oceli, dochází při nižších hodnotách výšky zámku k hoření okrajů. I pro tento případ byla na základě zkušebních vzorků nalezena optimální hodnota výšky výstupku zámku.

#### 4.1. Realizované aplikace konstrukce

Poznatky ze zámkových konstrukcí byly již v průběhu řešení diplomové práce využity v řadě konstrukčních projektů, které jsou zde dále ve stručnosti prezentovány. V uvedených konstrukčních řešeních byl kladen důraz i na estetický vzhled, který byl podpořen ověřeným tvarovým odlehčením prostřednictvím trojúhelníkových geometrických útvarů, které při vhodném uspořádání vytváří tzv. „psaníčka“. Ponechaný materiál mezi jednotlivými trojúhelníky slouží jako vyztužující žebrování.

#### Matovací hlavice

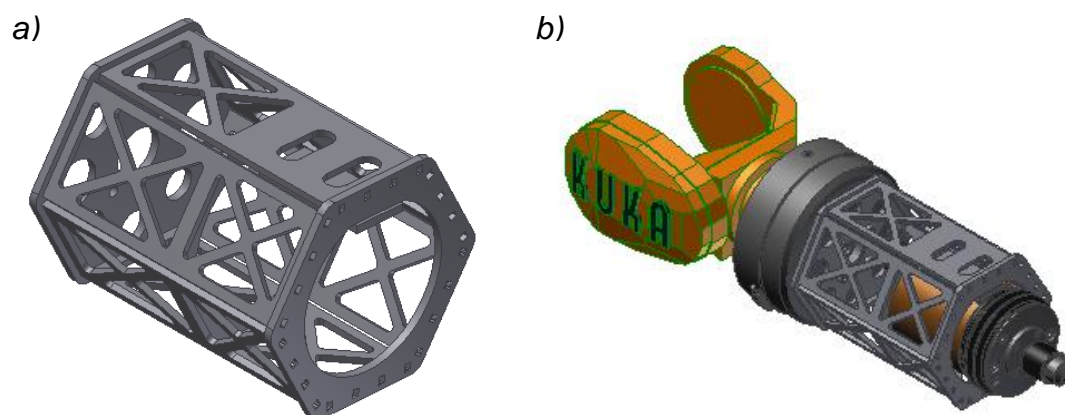
Jedná se o nosný rám (obr. 58) efektoru průmyslového robotu určený pro technologickou operaci matování. Rám je zhotoven z ocelového plechu tloušťky 4 mm, pouze kontaktní prvky, tj. horní příruba, patky pro ustavení domků a bočnice pro uložení motoru, jsou ze silnějšího plechu. Takto realizovaný rám vyniká vysokou tuhostí ve vzájemné vazbě na minimální hmotnost, díky tvarově odlehčeným dílům.



Obr. 58 Nosný rám kompaktní matovací hlavice

### Brusná hlavice

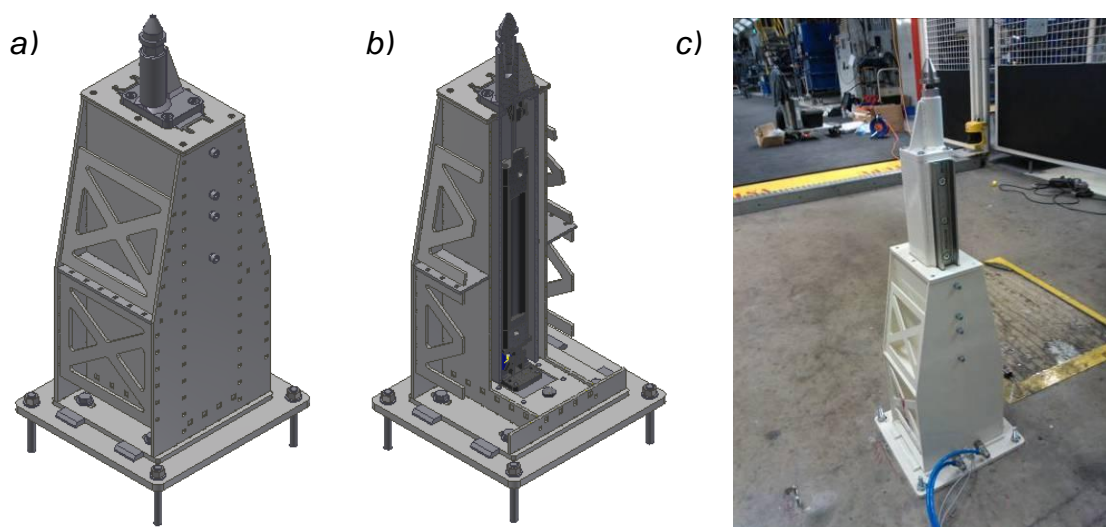
Navržená rámová konstrukce (obr. 59) je určena pro uchycení pneumatického vřetena, do něhož se následně upne brusný kotouč. Vzniklé řešení osazené ve finální fázi tenzometrem je koncovým efektem průmyslového robotu. Volba zámkového systému pro tento účel byla s výhodou využita pro jeho přesnou rozměrovou specifikaci a především vysokou tuhost ve vazbě na minimální hmotnostní zatěžování zápěstí robotu.



Obr. 59 Brusná hlavice; a - rámové konstrukce, b - konstrukční sestava

### Výsuvný trn

Výsuvný trn (obr. 60) byl navržen a zkonstruován v rámci projektu pro ŠKODA Auto a.s., závod Kvasiny, za účelem ustavení automobilu za RPS pro následnou montáž frontendu. Využívá se na lince pro automobily Škoda Yeti a Superb druhé i třetí generace. Nosnou částí výsuvného trnu je vnější rám tvořený zámkovou konstrukcí. Daný systém konstrukce byl v tomto případě zvolen s ohledem na jednoduchost výroby a zároveň pro estetický přínos.



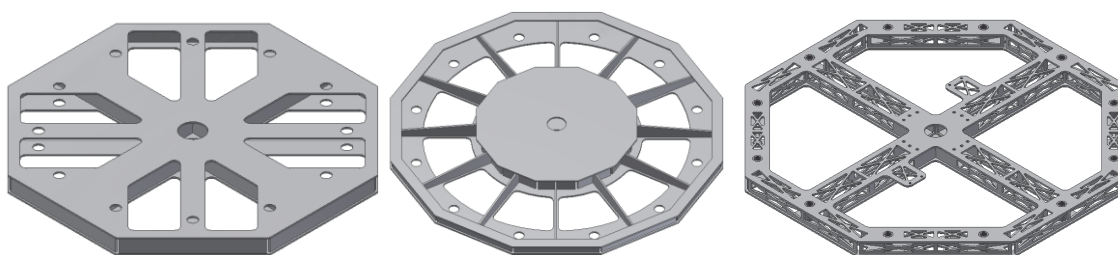
Obr. 60 Výsuvného trnu; a - 3D model, b - řez 3D modelem, c - reálné nasazení

## 4.2. Konstrukční návrh nosného rámu ROBOTUL®

Následující kapitola prezentuje návrh praktické aplikace konstrukce zámkovým systémem na stávající řešení servisního a inspekčního robotu ROBOTUL®. Realizovaný návrh vychází ze souhrnu poznatků získaných během řešení předložené diplomové práce. Rekonstrukce se sestává z návrhu nosných rámu, tj. horního rámu, spodního rámu a čtyř zrcadlových nohou.

Cílem nového konstrukčního řešení rámu byla z technického pohledu minimalizace hmotnosti soustavy s ohledem na zachování, resp. optimalizaci, tuhosti rámu. Při realizaci nového řešení byl kladen důraz na možnost plnohodnotné záměny rámu, tj. zohlednění umístění veškerých připojovaných komponent bez požadavků na jejich dílčí konstrukční úpravy. S ohledem na výstupní poznatky z kap. 1.8. je pro návrh nového nosného rámu uvažováno s použitím slitiny hliníku, konkrétně pak běžně skladem dostupného typu AlMg3 (EN 5754). Jelikož stávající rám je rovněž zhotoven ze slitiny hliníku, musí být při návrhu nové konstrukce kladen důraz především na tvarovou optimalizaci rámu, která je umožněna daným konstrukčním systémem, a zároveň na razantní tvarová odlehčení jednotlivých dílů.

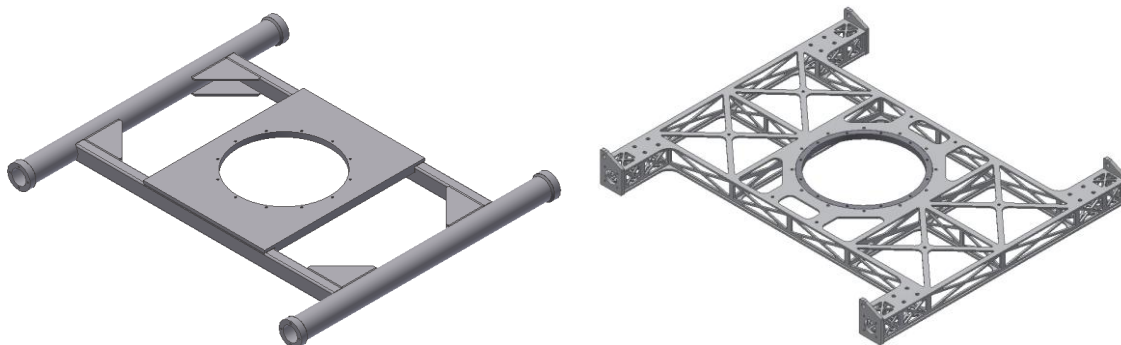
Vlastní realizace návrhů dílčích částí nosného rámu byla spojena v první řadě se sérií designových návrhů nového řešení, jak na příkladu spodního rámu dokládá obr. 61. Po výběru vzhledově a konstrukčně vhodné varianty byla provedena základní tvarová modifikace, zaručující substituci mezi novým a původním rámem. Předmětem následné etapy byla mnohačetná tvarová optimalizace konstrukce rámu, včetně jeho tvarových odlehčení, přičemž sledovanými parametry byly výsledná hmotnost, tuhost rámu hodnocená v podobě deformace, rozložení napětí s ohledem na jeho lokální maxima a v neposlední řadě design.



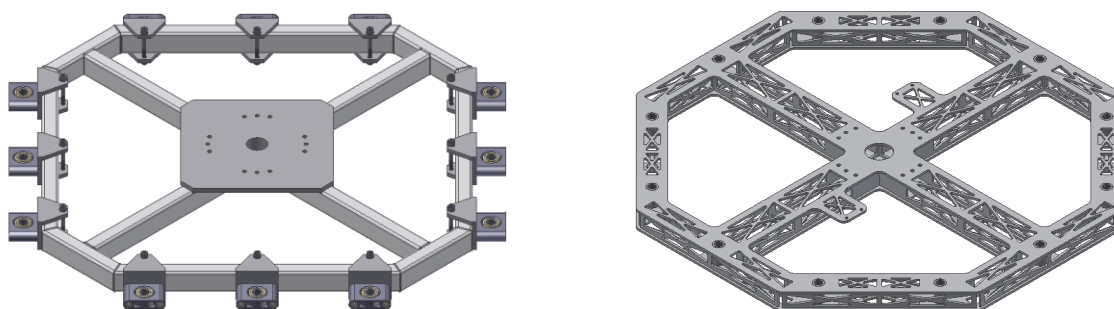
Obr. 61 Příklad alternativních designových návrhů pro spodní rám

Porovnání původních a nových rámu dokumentují obr. 62, 63 a 64. Do uvažovaných částí stávajících rámu byly rozměrových a hmotnostních důvodů zahrnuty i držáky přísavek, jelikož představují součást daných celků, jenž v případě zámkové konstrukce byla eliminována pevně danou pozicí ve výpalcích rámu.

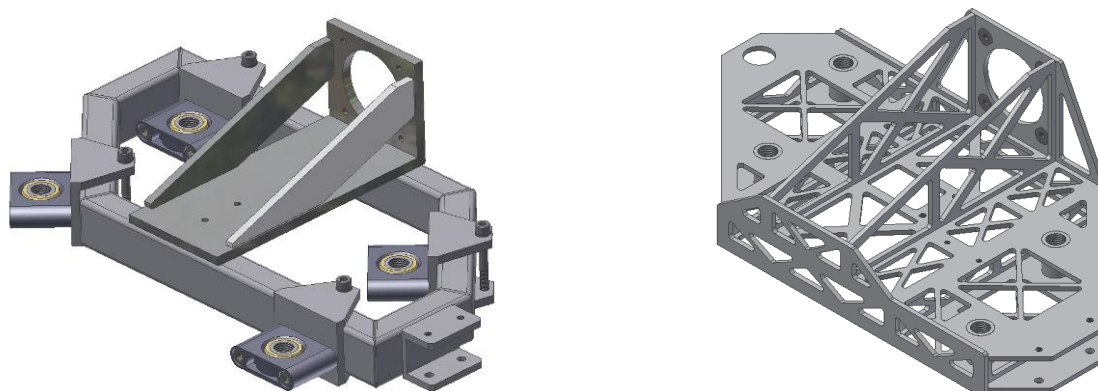




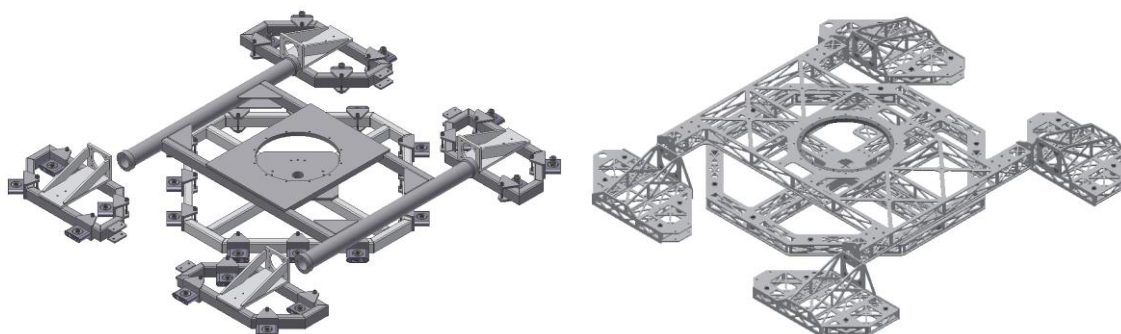
Obr. 62 Vyobrazení 3D modelu původního a nového horního rámu



Obr. 63 Vyobrazení 3D modelu původního a nového spodního rámu



Obr. 64 Vyobrazení 3D modelu původního a nového rámu nohy



Obr. 65 Vyobrazení 3D modelu původní a nové soustavy rámu robotu

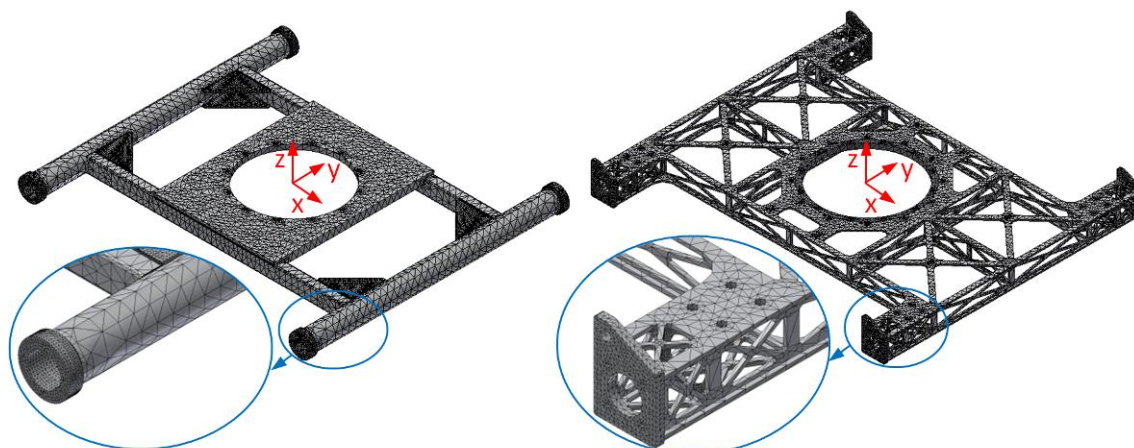
V případě horního rámu bylo dosaženo cca 33% redukce hmotnosti (z 2,88 kg na 1,93 kg). U spodního rámu úspora činí zhruba 37 % (z 3,52 kg na 2,21 kg). U nohou bylo docíleno snížení přibližně 47 % (z 1,12 kg na 0,59 kg na jednu nohu), které je v případě nohou velmi podstatné, jelikož se v sestavě vyskytují v počtu čtyř kusů. Celkovou redukcí hmotnosti lze vyčíslit v řádu 40 % (z 10,9 kg na 6,5 kg), přičemž podoba výsledné sestavy rámu je doložena na obr. 65.

Jak již bylo zmíněno, konstrukční návrh nových rámu byl založen na principu optimalizace za pomoci výstupů z pevnostní analýzy a to jak v podobě sledování rozložení a výše napětí, tak ve formě maximálních deformací konstrukce pro zvolené druhy zatížení. S ohledem na závěry z kap. 3.2. byl pro simulaci systému zámkové konstrukce použit zjednodušující systém, který uvažuje spojení dílů ve všech kontaktních plochách, čím se dopouštíme odchylky ve výsledcích v řádu 20 %.

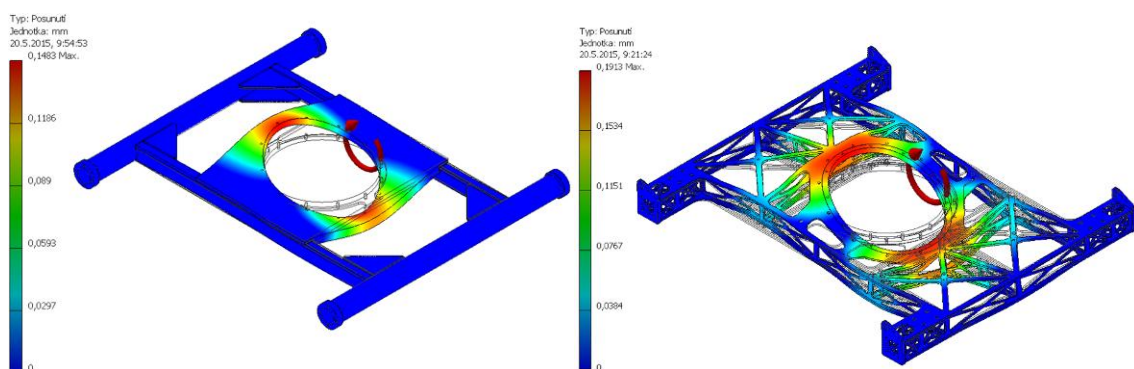
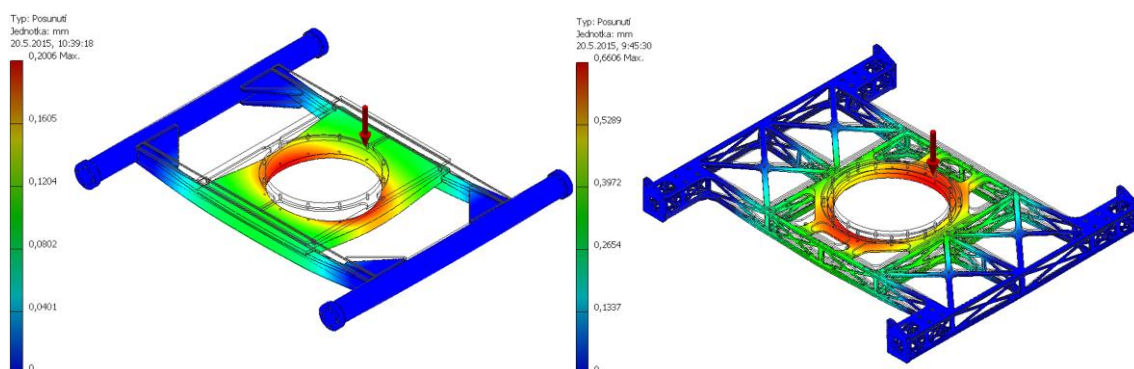
Pro modely byla po základním odladění užitá síť s průměrnou velikostí prvku (vyjádřené jako zlomek velikosti ohraničujícího kvádru) 0,05. Konečnoprvková simulace byla realizována pro každý model ve všech základních osách a to jak pro síly, tak i momenty, tj.  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Pouze v případě spodního rámu bylo z důvodu jeho symetrie jako druhý směr zvoleno natočení o  $45^\circ$  namísto klasických  $90^\circ$ .

V modelu bylo uvažováno s ukotvením nohou, tj. v případě horního rámu přírubové uložení nohou a v dalších případech uložení přísavek, a aplikací zatížení na přírubu rámu. Silové zatížení bylo aplikováno ve zvolené výši 500 N, které zhruba odpovídá maximální hmotnosti sestaveného robotu, a momentové zatížení na úrovni 50 Nm, což odpovídá hodnotě aplikované v simulacích v DP zaměřené na návrh původního rámu [31]. Přestože dané zatížení aplikované ve všech osách plně nekoresponduje s reálným namáháním rámu, poskytuje základní představu pro srovnání tuhosti jednotlivých konstrukcí. Rovněž výsledné hodnoty v kontaktních místech s jinými díly je nezbytné brát se zřetelem na finální podobu osazeného robotu, jelikož například středová uložení jsou vyztužena přírubou motoru apod.

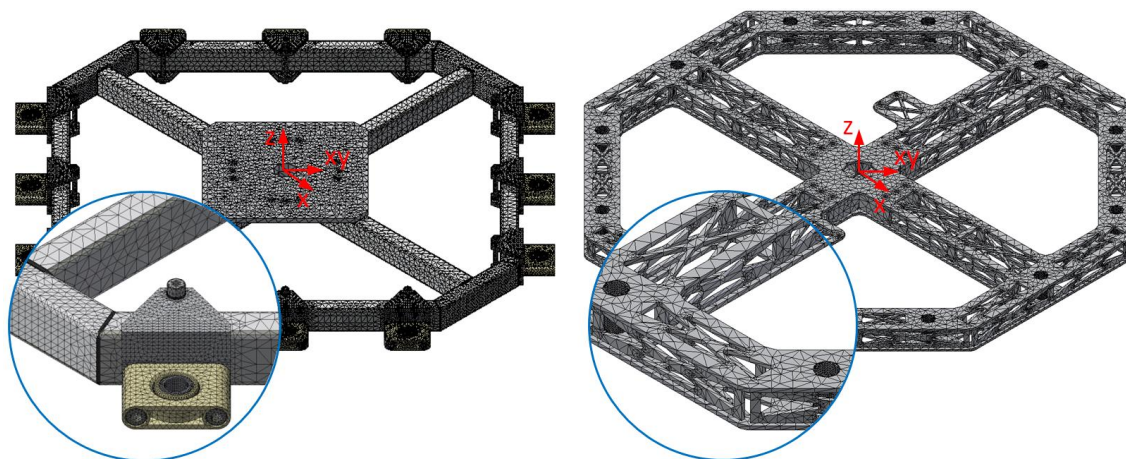
S ohledem na rozsah výsledků jsou grafické výstupy zobrazeny u každého rámu pouze pro dvě zatížení s nejvyšším výsledkem deformace, tj. pro maximální silovou a nejvyšší momentovou deformaci. Dále je vhodné poznamenat, že na obrázcích zobrazené pozice síly, příp. momentu, vyplývají ze systému zobrazování zatížení v použitém programu, přičemž jejich skutečná pozice je v, resp. kolem zvoleného souřadného systému, který dokumentují obr. 66, 67 a 68, čemuž odpovídají i vykreslené deformace.



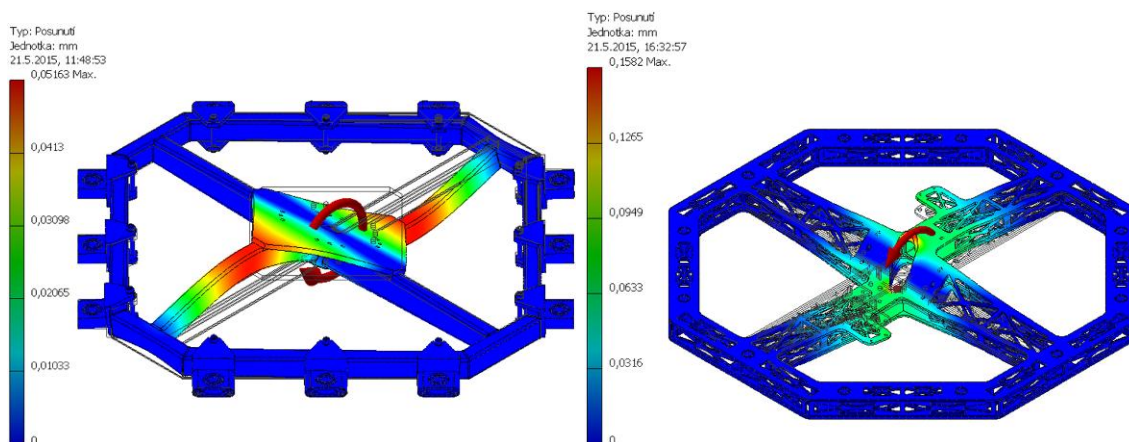
Obr. 66 Síť konečnoprvkových modelů horního rámu

Obr. 67 Deformace horního rámu při zatížení  $M_y = 50 \text{ Nm}$ Obr. 68 Deformace horního rámu při zatížení  $F_z = -500 \text{ N}$ 

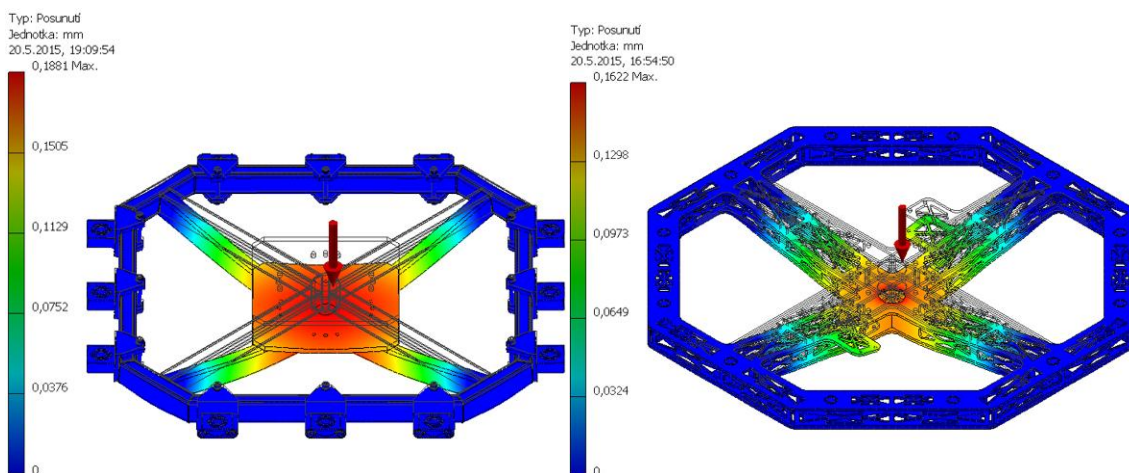
Poměr mezi deformacemi původního a nového horního rámu udává v případě momentového zatížení obr. 67 a v případě silového obr. 68. U zatížení momentem  $M_y$  došlo ke zhoršení deformace o 28 % (z maximální hodnoty 0,15 mm na 0,19 mm), což lze považovat za přijatelnou hodnotu. Za nejproblematictější je možné označit deformační chování rámu pod silovým zatížením  $F_z$ , kde došlo k více než trojnásobnému navýšení deformace oproti původnímu rámu, tj. z 0,20 mm na 0,66 mm. Pokud by byla požadována vyšší odolnost rámu proti danému zatížení, je možné redukovat tvarová odlehčení v postranních profilech, případně pro razantnější efekt postranní profily zesílit nebo zdvojit. Je však vhodné poznamenat, že v osazené sestavě bude daná deformace snížena přítomností středového uložení a rovněž horní nástavbou.



Obr. 69 Síť konečnoprvkových modelů spodního rámu



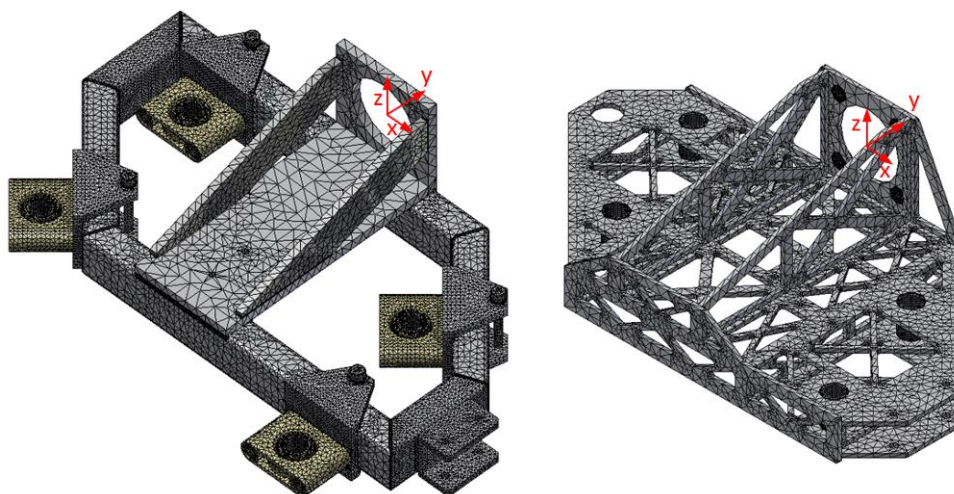
Obr. 70 Deformace spodního rámu při zatížení  $M_x = -50 \text{ Nm}$



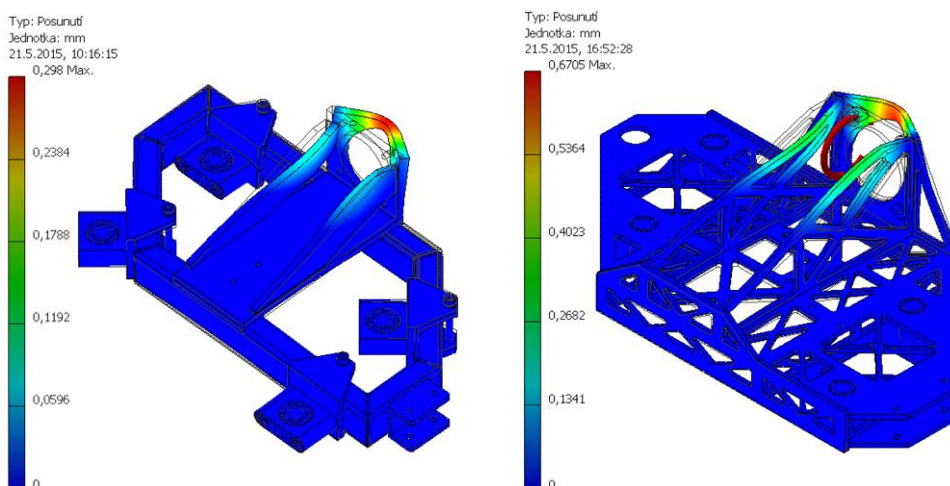
Obr. 71 Deformace spodního rámu při zatížení  $F_z = -500 \text{ N}$

Srovnání deformace spodního rámu při zatížení  $M_x$  dokládá obr. 70. V daném případě nemá smysl u zámkové konstrukce hodnotit nepodstatnou lokální deformaci lemu kruhového otvoru a je vhodnější srovnávat průhyb ramenou, kde vychází obdobné hodnoty, tj. 0,05 mm a cca 0,07 mm. Zde hraje podstatnou roli v původním rámu přítomnost přírubové desky, ale nutno poznamenat, že v osazené sestavě je střed rámu podepřen masivní přírubou

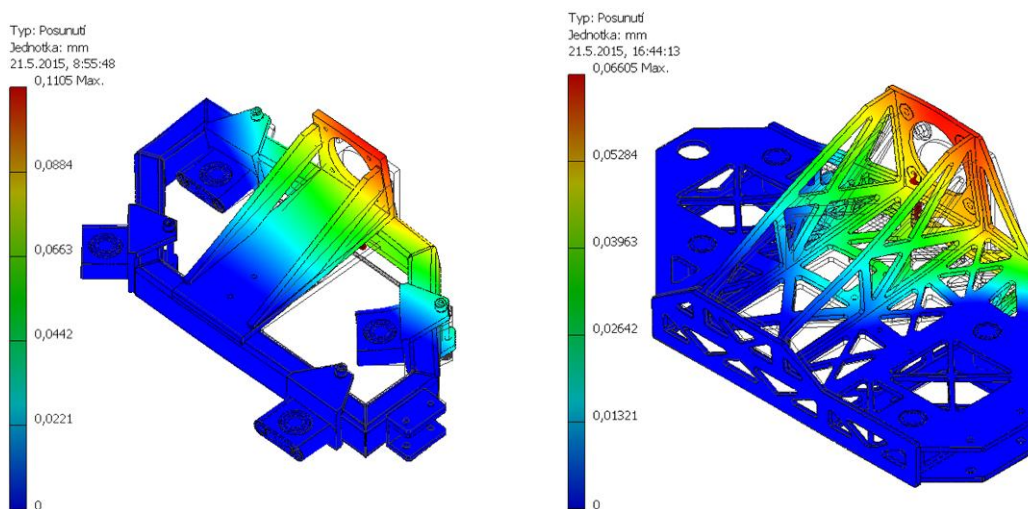
středového uložení. Deformace spodního rámu při silovém zatížení  $F_z$  je uvedena na obr. 71, kde je možné pozorovat mírné (cca 14%) zlepšení tuhosti nové konstrukce oproti původní, tj. z 0,19 na 0,16 mm.



Obr. 72 Síť konečnoprvkových modelů nohou



Obr. 73 Deformace rámu nohy při zatížení  $M_x = -50 \text{ Nm}$



Obr. 74 Deformace rámu nohy při zatížení  $F_z = 500 \text{ N}$

Deformační chování rámu nohy pod momentovým zatížením  $M_x$  dokumentuje obr. 73. Přestože došlo k více než dvojnásobné místní deformaci (z původních 0,30 mm na 0,67 mm), není tato hodnota směrodatná, jelikož dané místo je v realitě podepřeno přírubou motoru. V daném případě byla sledována především deformace a rovněž napětí v celém rámu nohy, které jsou i při zvoleném abnormálním zatížení minimální. Obr. 74 dále dokládá navýšení tuhosti nového rámu nohy oproti původnímu při silovém zatížení  $F_z$ , kde naopak došlo ke 40% poklesu deformace (z 0,11 na necelých 0,07 mm).

Před závěrečným vyhodnocením nově navržené konstrukce je nezbytné shrnout základní fakta. Optimalizace konstrukce byla komplexní proces, monitorovaný řadou ukazatelů, a to jak v podobě napětí, tak deformací, při různých silových zatíženích, tj. nejen v práci uvedených. Pro přesné posouzení tuhosti finální konstrukce by bylo nezbytné do simulace zahrnout všechny hlavní díly robotu a hodnotit výslednou soustavu jako jeden celek. Předložená práce však měla za cíl zejména poukázat možnosti, přínosy, ale i osvětlit problematické oblasti v návrhu nové konstrukce. Rovněž není plně objektivní srovnávat poměr tuhostí mezi optimalizovanou konstrukcí a původním v řadě míst předdimenzovaným rámem, jehož konstrukce je značně závislá na použitém systému, tj. způsobu spojování, tvaru profilů atp.

**Lze konstatovat, že se novým systémem zámkové konstrukce podařilo docílit razantní úspory hmotnosti, při dosažení poměrně vysoké tuhosti soustavy.** V porovnání s horním rámem lze označit ve smyslu tuhosti spodní rám a především nohy za předdimenzované. Další redukce hmotnosti těchto rámu ale naráží na praktické možnosti návrhu dané konstrukce (minimální šířku odlehčených stěn ve vazbě na lokální svary atp.). Další výraznější úspora by byla možná jedině snížením tloušťky použitých plechů, což naráží na technologické hranice použitého zámkového systému. **Problematickým místem návrhu nové konstrukce je nesporně horní rám, kde je při vybraném zatížení jen třetinová tuhost konstrukce.** Zde byl díky jeho základnímu tvaru nejvyšší potenciál k tvarovým odlehčením, která se negativně projevila na výsledné tuhosti rámu a to především ve smyslu průhybu středového uložení. **Při plném osazení robotu a reálném zatížení však lze predikovat průhyb horního rámu na úrovni méně než 0,4 mm, což je možné označit pro danou konstrukci za přijatelné.** Relativně snadné zvýšení tuhosti rámu, bez razantního zásahu do podoby konstrukce, lze dosáhnout zdvojnásobením tloušťky obou postranních profilů (z 3 mm na 6 mm), což má za následek snížení průhybu pod silou  $F_z$  o 20 % (z 0,66 mm na 0,53 mm), při navýšení hmotnosti rámu o cca 140 g.

## 5. Zhodnocení přínosu práce

Cílem řešení diplomové práce bylo nalezení optimálního konstrukčního systému rámových konstrukcí. Dále navržení zkušebních vzorků zvoleného systému, včetně jejich následného laboratorního testování. Naměřená data pak slouží k verifikaci a odladění numerických modelů analyzovaných vzorků. Jako poslední a zároveň ústřední bod práce byl proveden konstrukční návrh stávajícího nosného rámu ROBOTUL<sup>®</sup> zámkovou konstrukcí.

V technickém hodnocení je popsán výsledek konstrukčního řešení nosného rámu ROBOTUL<sup>®</sup> a zhodnocen jeho přínos.

Ekonomická část hodnocení podává přehled o finančních nákladech na realizaci nosného rámu zámkovou konstrukcí.

### 5.1. Technické zhodnocení

Konstrukčně navržený nosný rám inspekčního a servisního robotu ROBOTUL<sup>®</sup> zámkovým systémem se skládá z třech hlavních částí, které byly systematicky zachovány v souladu se stávající verzí robotu. Hlavní důraz byl kladen na maximální kompatibilitu rámu se stávající konstrukcí, tedy možnost záměny dílů bez dalších konstrukčních úprav použitých dílů.

Pro celou konstrukci rámu byl zvolen hliníkový materiál, konkrétně AlMg3, přičemž funkční plochy pro šroubové spoje byly osazeny ocelovými vložkami. Na základě mnohačetných numerických simulací ve vzájemné vazbě na úpravy 3D modelů bylo odladěno a optimalizováno navržené konstrukční řešení, včetně tvarových odlehčení jednotlivých plechových dílů s důrazem na zachování dostatečně velké tuhosti vzniklým výztužným žebrováním. V níže uvedeném odstavci je podrobněji proveden rozbor jednotlivých podsestav rámu.

První ústřední částí celé konstrukce je horní rám, na který navazují zbylé dvě části. Jelikož dolní rám (podvozek) a horní rám se vůči sobě natáčí, je v horním rámu upevněna ocelová příruba pro uchycení elektropohonu a jeho uložení. Do rámu se vkládají 4 ložisková pouzdra, která mohou být použita ze stávajícího robotu. Každé pouzdro je v místě příruby ustaveno prostřednictvím 4 šroubů a dále je zadní částí vloženo do výztužné přepážky rámu, čímž je tvarově podepřeno. Pro ustavení boxů s elektronikou jsou v rámu vytvořeny závitové díry, přičemž se předpokládá mírná změna pozice nosných sloupků boxů s ohledem na tvarová odlehčení rámu. Ustavení horní nástavby robotu na navržený rám je předpokládáno ve stávajících místech, ale namísto svěrného spoje se předpokládá spoj v podobě plošných přírub se 4 šrouby. To představuje nejzásadnější změnu v koncepci stávajícího řešení, která by jako jediná vyžadovala konstrukční úpravy stávajícího řešení (nástavby). Jako výhodnější řešení lze jednoznačně označit rozsáhlejší rekonstrukci horní části

robotu, která by umožnila v ideálním případě eliminovat potřebu horní nástavby, která zajišťuje především uložení závěsného ramene. Daná rekonstrukce však není předmětem řešení této diplomové práce.

Druhou částí sestavy je již zmíněný dolní rám (podvozek), který plní funkci změny orientace na vertikální stěně. Podvozek je osazen duralovými závitovými pouzdry pro umístění podtlakových přísavek. Rovněž se na podvozku nacházejí závitové díry pro ustavení ejektorů a rozvaděčů tlakového vzduchu.

Poslední částí nosného rámu inspekčního a servisního robotu jsou nohy, v kterých jsou opět vloženy tvarové ocelové vložky pro uchycení pohonů kliky, které zajišťující specifický pohyb robotu. Všechny čtyři nohy jsou řešeny z totožných polotovarů, pouze přední nohy mají jiné horní desky z důvodu uložení snímačů. Správné sestavení dané nohy je tedy jen předmětem naorientování použitých polotovarů.

Jako podstatnou výhodu daného řešení lze označit skutečnost, že je možné v rámci plošného tvaru navržených dílů volit relativně libovolnou pozici přísavek, tj. otvoru pro přísavky, což svávající řešení umožňovalo pouze minimálně a to v rámci posuvu držáku přísavky po daném profilu. Původní kloubové uložení přísavek (nohy, spodní rám) bylo nahrazeno pevným uložením, jelikož se ukázalo, že dané uložení nepřináší tížený efekt a naopak může způsobovat komplikace.

V tab. 7 jsou pro přehledné porovnání uvedeny hodnoty hmotnosti obou dvou nosných rámu, jak stávajícího, tak i nově realizovaného zámkovými spoji.

*Tab. 7 Hmotnosti částí nosného rámu*

Konstrukční řešení	Hmotnost [kg]	
	Stávající sestava	Zámkový systém
Horní rám	2,88	1,93
Spodní rám (podvozek)	3,52	2,71
Noha (4x)	1,12	0,59
<b>Celkem</b>	<b>10,9</b>	<b>6,5</b>

Celková hmotnost existující verze nosného rámu, která je vytvořena svařovanou sestavou normalizovaných profilů z hliníkových slitin činí 10,9 kg (včetně držáků přísavek). **Nově vzniklé koncepční řešení metodou zámkových spojů docílilo razantní úspory hmotnosti o 40 %, při zachování dostatečně vysoké tuhosti rámu.**



## 5.2. Ekonomické zhodnocení

Konstrukční návrh nosného rámu zámkovými spoji není v době odevzdání této práce ve výrobní fázi a tak nejsou skutečné finanční náklady na navržené řešení k dispozici. Pro orientační porovnání s náklady stávajícího rámu, které je doloženo v tab. 8, je finanční rozpočet řešení zámkovým systémem kvalifikovaně odhadnut na základě dosud realizovaných konstrukcí. Ceny stávajícího rámu byly aproximovány z nákupních cen v souladu s vývojem trhu.

Tab. 8 Celkové náklady na nosný rám bez DPH

Konstrukční řešení	KS	Cena [Kč]	
		Stávající sestava	Zámkový systém
Horní rám	1	23 000	14 000
Spodní rám (podvozek)	1	17 000	15 000
Noha	4	4x 4500	4x 3500
<b>Celkem</b>	-	<b>58 000</b>	<b>43 000</b>

Předloženým konstrukčním řešením nosného rámu robotu lze řádově ušetřit 25 % finančních nákladů oproti původní verzi.

## Závěr

V úvodní části byla provedena rešeršní činnost zabývající se ultra lehkými tuhými rámy, kde byly zpočátku kapitoly vytyčeny sledované cíle problematiky. Rešerše se ubírala dvěma základními směry a to rozdělením klasických i kompozitních materiálů včetně jejich konstrukčních aplikací v praxi. V druhém směru byly popsány nové způsoby dělení materiálů. Závěrem kapitoly byly shrnuty zjištěné poznatky a porovnány se sledovanými faktory rešerše, z čehož vzešly optimální materiály použitelné pro konstrukční aplikace ultralehkých tuhých rámu.

Dále byl zpracován návrh a konstrukční realizace zkušebních vzorků, včetně experimentálního standu pro jejich ustavená na laboratorním lisu. Při modelování testovaných vzorků byl použit poloautomatický systém tvorby zámkových spojů v 3D CAD softwaru Autodesk Inventor, který byl při vypracování této práce vyvinut za účelem zvýšení produktivity při vytváření zámkových spojů.

Následně byly navržené vzorky podrobeny laboratornímu testování mechanických vlastností a hodnot tuhosti. Naměřená vyhodnocená data byla využita pro verifikaci a odladění numerických modelů analyzovaných vzorků. Lze konstatovat, že bylo dosaženo v celém rozsahu měření velmi dobré shody mezi výstupy z numerických modelů a hodnotami z experimentálního testování zkušebních vzorků.

Na základě praktických zkušeností se zámkovými systémy získaných během vypracování této práce byl proveden konstrukční návrh stávajícího nosného rámu robotu ROBOTUL<sup>®</sup> zámkovým systémem, který byl v původním prototypu konstrukčně řešen jako svařovaná sestava normalizovaných profilů z lehkých kovů (dural). Byla realizována řada designových konstrukčních návrhů rámu a následně provedeny mnohačetné numerické simulace ve vzájemné vazbě na úpravy modelů, čímž bylo odladěno a optimalizováno konstrukční řešení, včetně tvarových odlehčení jednotlivých dílů.

Výsledkem je optimalizovaný nosný rám ze zámkových spojů, jehož přínos je doložen v technickoekonomické části, srovnáním s původním rámem, na úspore hmotnosti (40 %) ve vazbě na zachování, resp. optimalizaci tuhosti konstrukce a dále ve vazbě na výrobní náklady (řádově 25% úspora).

## Seznam použité literatury

- [1] 3D tisk, [online], [cit. 2015-04-05], dostupné na:  
<http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [2] AWAC spol. s r.o. Řezání vodním paprskem, plasma, laser, obrábění, vodní paprsek, [online], [cit. 2015-04-02], dostupné na:  
<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=2&m2=1&m3=0&m4=0>
- [3] Cabrnch, B. Kompozitní materiály a jejich vlastnosti. LŠMK2, VZLÚ, a.s., 2011
- [4] David, P., Stach, V. Plazma, fyzikální jevy a technické aplikace. České Budějovice: Sborník Pedagogické fakulty, 1977
- [5] Ehrenstein, G. W. Polymerní kompozitní materiály. Nakladatelství Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [6] Horáček, L. Využití nekonvenčních paprskových (laser/vodní paprsek) ve strojírenství. Brno: VUT, 2008. Diplomová práce
- [7] Janovec, J., Cejp, J., Steidl, J. Perspektivní materiály, Praha: ČVUT, 2001
- [8] Jančář, J. Úvod do materiálového inženýrství kompozitů. Brno: VUT, 1999
- [9] Katalogové materiály, [online], [cit. 2015-01-05], dostupné na:  
[www.aluminiumcentrum.com/](http://www.aluminiumcentrum.com/)
- [10] Katalogové materiály, [online], [cit. 2015-03-02], dostupné na:  
<http://www.amtek.cz/cs/maytec>
- [11] Krajný, Z. Vodný lúč v praxi – WJM. Bratislava: EPOS, 2001
- [12] Leinveber, J., Vávra, P. Strojnické tabulky - 3. vydání. Scientia, Praha: 1999
- [13] Louda, P. Nauka o materiálech I a II, přednášky, Liberec: TUL
- [14] Martynková, S. G. Nové technické materiály. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2010. ISBN 978-80-7204-714-7.
- [15] Mitcalc - svarové spoje, [online], [cit. 2015-03-05], dostupné na:  
<http://mitcalc.com/doc/welding/help/cz/weldingtxt.htm>
- [16] Morgan, P. Carbon fibers and their composites. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2005. ISBN-10 0-8247-0983-9
- [17] Mráz, P., Talácko, J. Konstrukce strojů s kompozitními materiály. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9
- [18] Mráz, P. Aplikace nekonvenčních materiálů v konstrukci manipulátorů a robotů. Praha: ČVUT, 2001. Disertační práce.
- [19] Patent 5875693, [online], [cit. 2015-05-05], dostupné na:  
[http://www.zakgear.com/Snap\\_On\\_Composite\\_Gear.html](http://www.zakgear.com/Snap_On_Composite_Gear.html)
- [20] Patent 6874231, [online], [cit. 2015-05-05], dostupné na:  
[http://www.zakgear.com/Ring\\_gear\\_US6874231.html](http://www.zakgear.com/Ring_gear_US6874231.html)
- [21] Patent, [online], [cit. 2015-05-05], dostupné na:  
<https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20110601/patents/EP2327609NWA2/document.html>
- [22] Patent 20130186893, [online], [cit. 2015-05-06], dostupné na:

- <http://www.faqs.org/patents/app/20130186893>
- [23] Patent, [online], [cit. 2015-05-06], dostupné na:  
<https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/19941005/patents/EP0618395NWA1/document.html>
- [24] Patent 5154098, [online], [cit. 2015-05-06], dostupné na:  
<http://www.docstoc.com/docs/43203097/Connecting-Rod-Made-Of-Composite-Material---Patent-5154098>
- [25] Patent 4185472, [online], [cit. 2015-05-07], dostupné na:  
<http://www.patentbuddy.com/Patent/4185472>
- [26] Patent, [online], [cit. 2015-05-07], dostupné na:  
[http://www.bateau2.com/howto/cf\\_spar3.php](http://www.bateau2.com/howto/cf_spar3.php)
- [27] Patent 4834932, [online], [cit. 2015-05-07], dostupné na:  
<http://www.google.com.ar/patents/US4834932>
- [28] Patent 5948501, [online], [cit. 2015-05-07], dostupné na:  
<http://www.google.com.na/patents/US5948501>
- [29] Peterka, J. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980
- [30] Pešík, L. Části strojů I a II. Liberec: TUL, 2010
- [31] Plavec, M. Mobilní platforma servisního robotu pro pohyb na vertikální skleněné stěně. Liberec: TUL, 2011
- [32] Pompe, V. Příklady z praxe s kompozitními materiály. LŠMK2, VZLÚ, a.s., 2011
- [33] Roubíček, M. Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení materiálů. Dostupné na: [www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf](http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf)
- [34] Růžička, M. Konstruování a výpočty kompozitních aplikací. LŠMK2, 2011
- [35] Řasa, J., Kerečaninová, Z. Nekonenční metody obrábění - 4. díl. In MM Průmyslové spektrum, 2008. ISSN 1212-2572
- [36] Sedláček, P. Lepené spoje. Praha: ČVUT, 2007, [online], [cit. 2015-02-26], dostupné na:  
[www.kompozity.info/seminar/8\\_2%20lepene\\_spoje.pdf](http://www.kompozity.info/seminar/8_2%20lepene_spoje.pdf)
- [37] Sendvičové konstrukce [online], [cit. 2015-02-02], dostupné na:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [38] Spojovací materiály - Nýty, nýtování [online], [cit. 2015-02-20], dostupné na:  
<http://www.modding.cz/?p=43>
- [39] Starý, M. Technická dokumentace technologických hlavíc a periférií robotů. Technická univerzita v Liberci, Katedra sklářských strojů a robotiky
- [40] Stunová, B. B. Spojování kompozitů. Praha: ČVUT, 2013
- [41] Šebela, R. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Brno: VUT, 2012
- [42] Vrbka, J. Mechanika kompozitů. Brno: VUT, 2008
- [43] Závítové vložky pro plasty a dřevo [online], [cit. 2015-02-22], dostupné na:  
<http://www.kerbkonus.de/proddb/pdf/frame.php?pdf=en.ds.30&lang=en>

## Seznam převzatých obrázků

V seznamu jsou uvedeny pouze obrázky, které byly převzaty. V případě patentů jsou odkazy přímo v literatuře.

- [Obr. 3 a] Fotogalerie KSR
- [Obr. 3 b] <https://bsclarified.wordpress.com/2011/11/09/grasping-a-new-reality/>, [cit. 2015-01-02]
- [Obr. 3 c] <http://www.carbonfiberglass.com/carbon-fiber-robotic-arm/>, [cit. 2015-01-02]
- [Obr. 4] [http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture4/4\\_6.htm](http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture4/4_6.htm), [cit. 2015-01-05]
- [Obr. 6] <http://www.pinkbike.com/forum/listcomments/?threadid=156966>, [cit. 2015-01-07]
- [Obr. 7] <http://www.webbikeworld.com/ducati-motorcycles/carbon-fiber/carbon-fiber-belt-covers.htm> [cit. 2015-01-07]
- [Obr. 8] <http://67-72chevytrucks.com/vboard/showthread.php?t=652878>, <http://www.achyutbrassenterprise.in/brass-threaded-inserts.htm>, [cit. 2015-01-10]
- [Obr. 9] <http://www.pro-werks.com/partlist/1014/>,
- [Obr. 17] <http://www.akon-robotics.de/palettieren/palettierer-palettierroboter-typen/kuka-palettierer/palettierroboter-kr-180-2-pa> <http://ias.cs.tum.edu/robots/tum-rosie>, [cit. 2015-01-20]
- [Obr. 18] <http://www.compositesworld.com/articles/2011-high-performance-resins-highlights>, <http://harpers.org/blog/2013/07/boeings-plastic-planes/>, [cit. 2015-02-01]
- [Obr. 19] <http://www.robotshop.com/en/lynxmotion-crazy2fly-drone-t-motor-combo-kit.html>, [cit. 2015-02-01]
- [Obr. 20] <http://www.directindustry.com/prod/centa/azimuth-shafts-9279-718265.html>, [cit. 2015-02-03]
- [Obr. 21] <https://www.pinterest.com/source/delta7bikes.com/>, [cit. 2015-02-03]
- [Obr. 23] <http://www.schmalz.com/produkte/vakuumgreifsysteme/xfxc/>, [cit. 2015-02-03]
- [Obr. 24] Fotogalerie KSR
- [Obr. 25] Fotogalerie KSR
- [Obr. 26] <http://www.regensblog.com/2013/11/10/flensburg-frankfurt-friedrichshafen/>, [cit. 2015-02-05]
- [Obr. 27] <http://www.firmy.net/WZY1F,manipulator-pneumatyczny,YPWF.html>, [cit. 2015-02-10]
- [Obr. 28] <http://www.giveng.com/manipulators.php>, [cit. 2015-02-15]
- [Obr. 30] <http://www.awac.cz/cz/2-Rezani-vodnim-paprskem-br-a-vyroba-dilu/1-Rezani-vodnim-paprskem/9-Obrázky-ukázky/0>, [cit. 2015-02-20]
- [Obr. 31] <http://aipaerospace.com/products-page2>, [cit. 2015-02-20]
- [Obr. 32] <http://www.doncasterlaser.co.uk/>, [cit. 2015-02-20]
- [Obr. 33] <http://www.chps.cz/rezani-laserem>, [cit. 2015-02-20]
- [Obr. 34] <http://io9.com/3d-printing-has-a-strange-unintended-consequence-1702894457>, [cit. 2015-02-20]
- [Obr. 35] <http://www.foodengineeringmag.com/articles/89423-the-bionic-gripper>, [cit. 2015-02-20]