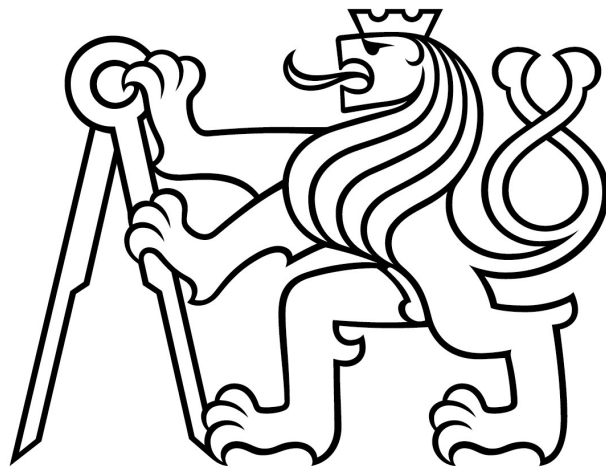


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



# Diplomová práce

Přestavné kompozitové rameno manipulátoru

2022

Petr Uksa

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. 7. 2022

.....podpis.....

## Poděkování

Rád bych poděkoval několika osobám, které mi poskytly nutné prostředky pro vypracování práce. Děkuji prof. Ing. Milanu Růžičkovi, CSc. za vedení práce a skvělá doporučení expertů na jakoukoliv problematiku, kterou jsem musel řešit. Děkuji Ing. Davidu Blahovi za konzultace spojené s experimentem a za zaučení v měření s optickým vláknem. Děkuji Ing. Viktoru Kulíškovi, Ph.D. za cenné rady spojené s MKP modelováním kompozitních materiálů obecně a dále za konkrétní rady k modelování součástí s integrovaným spojem. Děkuji Ing. Gabrielu Martinotovi za skvělou reprezentaci firmy Compo Tech PLUS, spol. s.r.o. a za zprostředkovávání komunikace s firmou.

## Anotace

Autor:	Petr Uksa
Název DP:	Přestavné kompozitové rameno manipulátoru
Rozsah práce:	72 str., 64 obr., 13 tab.
Akademický rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú 12105 - Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí DP:	prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
Zadavatel:	Compo Tech PLUS, spol. s.r.o.
Klíčová slova:	CFRP, experimentální měření, integrovaný spoj, kompozitní materiály, manipulátor, MKP, měření sil, robotické rameno
Anotace:	Práce prochází několik etap inovace technického řešení manipulátoru na zakládání plechů. V práci byla provedena MKP simulace stávající duralové konstrukce a nového návrhu konstrukce z kompozitních materiálů. Kompozitové součásti manipulátoru byly ověřeny experimentálním měřením. V práci byl navržen způsob integrace prvku pro měření přítláčné síly na plech. V práci jsou navrženy optimální parametry pro skladbu kompozitu a možné konstrukční úpravy.



## Annotation

Author:	Petr Uksa
Title of Master Thesis:	Adjustable composite manipulator arm
Extent:	72 p., 64 fig., 13 tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú 12105 - Department of Mechanics, Biomechanics and Mechatronics
Supervisor:	prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
Submitter:	Compo Tech PLUS, spol. s.r.o.
Keywords:	CFRP, composite, experimental measurement, force measurement, integrated loop connection, manipulator, robotic arm
Annotation:	The thesis goes through several stages of technical innovation of a sheet piling manipulator. FEM analysis of the current dural design and the new design made of composite materials was carried out in this thesis. The composite components of the manipulator were verified by experimental measurements. A method of integrating a force measuring element into the robotic arms was proposed. The optimal parameters for the composite layup and possible design modifications are proposed in the thesis.

# Zadání práce



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Uksa</b>	Jméno:	<b>Petr</b>	Osobní číslo:	<b>473425</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta strojní</b>				
Zadávací katedra/ústav:	<b>Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky</b>				
Studijní program:	<b>Aplikované vědy ve strojním inženýrství</b>				
Specializace:	<b>Aplikovaná mechanika</b>				

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

1. Popis stávajícího konstrukčního návrhu 2D manipulátoru, tvorba modelu MKP, ověřovací výpočty (deformace, napětí, zhodnocení kritických míst).
2. Návrh inovované kompozitní struktury s optimalizovanou kompozitní skladbou, rozvahy na konstrukční úpravy ramen manipulátoru.
3. Návrh implementace silových senzorů do konstrukce ramena a návrh systému pro posouzení funkčnosti/selhání upínacího zařízení.
4. MKP model nového návrhu kompozitového manipulátoru
5. Zhodnocení a porovnání řešených variant, závěry a doporučení

Seznam doporučené literatury:

1. V. Laš, Mechanika kompozitních materiálů, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008
2. D. Gay, S. V. Hoa a S. W. Tsai, Composite Materials, Design and Applications, CRC Press, 1997.
3. E. J. Barbero, Introduction to Composite Materials Design, Second Edition, CRC Press LLC, 2010.
4. Vlastní rešerše autora

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

prof. Ing. Milan Růžička, CSc. <small>podpis vedoucí(ho) práce</small>	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. <small>podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry</small>	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. <small>podpis děkana(ky)</small>

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání
 
 Podpis studenta

# Obsah

<b>Přehled použitých symbolů a veličin</b>	<b>2</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2 Mechanika kompozitních materiálů</b>	<b>5</b>
2.1 Matice tuhosti a její složky . . . . .	5
2.1.1 Lamina . . . . .	7
2.1.2 Transformace souřadnic . . . . .	8
2.1.3 Laminát . . . . .	9
2.1.4 Kompozitový nosník . . . . .	12
<b>3 Stávající konstrukce manipulátoru</b>	<b>14</b>
3.1 MKP stávajícího manipulátoru . . . . .	15
3.1.1 Sestava modelu . . . . .	15
3.1.2 Okrajové podmínky . . . . .	17
3.1.3 Zatížení . . . . .	17
3.1.4 Síť . . . . .	18
3.1.5 Výsledky simulace . . . . .	20
<b>4 Kompozitový manipulátor</b>	<b>23</b>
4.1 MKP kompozitového manipulátoru . . . . .	24
4.1.1 Sestava modelu . . . . .	24
4.1.2 Materiál . . . . .	25
4.1.3 Skladba materiálu . . . . .	25

---

4.1.4	Okrajové podmínky . . . . .	33
4.1.5	Zatížení . . . . .	35
4.1.6	Síť . . . . .	35
4.1.7	Výsledky . . . . .	36
4.2	Experimentální měření . . . . .	39
4.2.1	Senzory a umístění . . . . .	40
4.2.2	Výsledky měření . . . . .	43
4.2.3	Porovnání MKP, experimentu a analytických výpočtů . . . . .	49
4.2.4	Porovnání chování v koncentrátorech napětí . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Optimalizace částí manipulátoru</b>	<b>56</b>
5.1	Porovnání tuhostí centrálních částí . . . . .	56
5.1.1	Duralová centrální část manipulátoru . . . . .	56
5.1.2	Kompozitová centrální část manipulátoru . . . . .	59
5.2	Materiálová skladba pro ramena manipulátoru . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Implementace silových senzorů</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Diskuze</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>71</b>
	<b>Seznamy</b>	<b>73</b>
	Seznam použité literatury . . . . .	73
	Seznam použitého softwaru . . . . .	74
	Seznam obrázků . . . . .	75
	Seznam tabulek . . . . .	78
	Seznam příloh . . . . .	80

---

## Přehled použitých symbolů a veličin

<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam</b>
$E$	$MPa$ ( $GPa$ )	elastický modul pružnosti
$G$	$MPa$ ( $GPa$ )	smykový modul pružnosti
$u$	$mm$	posuv v ose x
$v$	$mm$	posuv v ose y
$V_f$	1	objemový podíl vláken
$V_m$	1	objemový podíl matrice
$w$	$mm$	posuv v ose z
$\gamma$	1	zkos
$\epsilon$	1 ( $m/m$ ; $\mu m/m$ )	poměrné prodloužení
$\theta$	$rad/m$	zkrut
$\kappa$	$1/mm$	křivost
$\nu$	1	Poissonovo číslo
$\rho$	$kg/m^3$	hustota
$\sigma$	$N/mm^2$	normálové napětí
$\tau$	$N/mm^2$	smykové napětí
$\phi$	°	natočení

# 1 Úvod

Tato práce pokryje několik bodů v procesu změny technického řešení robotického manipulátoru pro zakládání plechů na lisování karoserií.

Pro podobnou aplikaci jsou obecně používány roboty osazené konstrukcí s přísavkami, která umožní uchycení plechu, přenesení a následné umístění na správnou pozici v lince.

Stávající řešení je vyrobeno z dutých nosníků z hliníkové slitiny čtvercového a kruhového průřezu, má fixní polohu jednotlivých přísavek, a v případě změny tvaru plechu je nutné vyměnit celý nástroj, než může linka pokračovat ve výrobě.

Nové řešení má být vyrobeno z kompozitních materiálů (převážně uhlík-epoxid), čímž by se výrazně snížila hmotnost manipulátoru. Díky tomu je možné integrovat do ramen pohony, umožňující změnu pozice ramena bez nutnosti demontáže.

Dalším cílem je do kompozitních součástí integrovat čidlo schopné měřit přítlačnou sílu jednotlivých přísavek pro zajištění bezpečnosti provozu celé konstrukce.

Práce postupně projde body zadání:

1. Popis stávajícího konstrukčního návrhu 2D manipulátoru, tvorba MKP modelu, ověřovací výpočty (deformace, napětí, zhodnocení kritických míst)
2. Návrh inovované kompozitní struktury s optimalizovanou kompozitní skladbou, rozvahy na konstrukční úpravy ramen manipulátoru
3. Návrh implementace silových senzorů do konstrukce ramena a návrh systému pro posouzení funkčnosti/selhání upínacího zařízení
4. MKP model nového návrhu kompozitového manipulátoru
5. Zhodnocení a porovnání řešených variant, závěry a doporučení

Pro objasnění postupu v kapitolách prakticky řešících konstrukci manipulátoru a následné experimentální ověřování vlastností budou představeny teoretické základy jednotlivých témat. Bude představena mechanika kompozitních materiálů obecně a poté se zaměřením na nosníky.

## 2 Mechanika kompozitních materiálů

Pro provedení výpočtů nutných k návrhu a ověření kompozitní konstrukce je potřeba popsat, jakým způsobem se kompozitní materiál chová. Obecný kompozitní materiál je anizotropní, tedy může se chovat v každém směru jiným způsobem.

### 2.1 Matice tuhosti a její složky

Spojení napětí a deformace lze obecně popsat Hookeovým zákonem v tenzorovém zápisu [1]:

$$\sigma = S * \epsilon \tag{2.1}$$

Napětí  $\sigma$  i poměrná deformace  $\epsilon$  jsou tenzory druhého řádu (mají devět složek), tudíž z podstaty tenzorového počtu je tenzor tuhosti  $S$  tenzorem čtvrtého řádu a má osmdesát jedna složek.[1]

Pro zjednodušení tohoto zápisu se využívá symetrie v tenzorech napětí a poměrné deformace. Díky těmto symetriím lze převést rovnici do Voightova zápisu [1]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{bmatrix} \tag{2.2}$$



Další symetrie, která zjednoduší zápis, je symetrie samotné matice tuhosti vycházející z deformační energie - přesněji z hustoty deformační energie  $\lambda$ [1]:

$$\lambda = \frac{1}{2} \sigma^T \epsilon \quad (2.3)$$

Dosazením Hookeova zákona a prací s transpozicemi lze dokázat, že  $S = S^T$ :

$$\lambda = \frac{1}{2} \sigma^T \epsilon = \frac{1}{2} \epsilon^T S^T \epsilon = \frac{1}{2} \epsilon^T \sigma = \frac{1}{2} \epsilon^T S \epsilon \quad (2.4)$$

Obecně anizotropní materiál má dvacet jedna složek, které jsou vzájemně nezávislé. V tuto chvíli končí obecná pružnost a přichází na řadu specifikace jednotlivých materiálů.[1]

Speciální materiály mohou mít takzvané materiálové roviny symetrie. Takováto rovina musí splňovat podmínku: pokud je napětí  $\sigma$  symetrické podle této roviny, pak i poměrná deformace  $\epsilon$  je symetrická podle této roviny a naopak.[1]

Pokud materiál tuto podmínku splňuje, nazýváme ho monoklinickým a má 13 nezávislých složek matice tuhosti.[1]

Vláknový kompozit, který byl využit v této práci, ale splňuje ještě přísnější podmínky materiálové symetrie. Materiál má tři materiálové roviny symetrie na sebe vzájemně kolmé. Takovýto materiál se nazývá ortotropní a má devět nezávislých složek matice tuhosti, popřípadě poddajnosti, která je k ní inverzní a která vystupuje v následující rovnici. [1][2]

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.1.1 Lamina

Lamina je jedna vrstva materiálu obsahující výztuž a pojivo. Jeden její rozměr je výrazně menší než zbylé dva. Tímto rozměrem je tloušťka. Díky tomuto zjednodušení tvrdíme, že v lamině je pouze rovinná napjatost. Vztah 2.5 lze vyjádřit [1]:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Jedna vrstva obsahuje jednu orientaci materiálu. Pro označování hlavních směrů 1 a 2 se také používá označování L (longitudal) ve směru vláken, T (transversal) kolmo na směr vláken.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Pro zjištění vlastností laminy je nutné znát vlastnosti vláken a matrice a využít takzvaného směšovacího pravidla. V případě, že je známo množství vláken a množství matrice, které bylo použito pro výrobu, lze jednotlivé inženýrské konstanty získat následovně [1]:

$$E_L = V_f * E_f + (1 - V_f) * E_m \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m} \quad (2.9)$$

$$\nu_{LT} = V_f * \nu_f + (1 - V_f) * \nu_m \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{1 - V_f}{G_m} \quad (2.11)$$

Po zjištění modulů pružnosti charakterizujících laminu lze zjišťovat napětí a deformace v těchto hlavních směrech laminy. Pro obecné výpočty a obecné využití

laminy ve všech orientacích je nutné transformovat souřadnice a zjistit chování v obecných zatěžovacích směrech.

### 2.1.2 Transformace souřadnic

Transformace souřadnic umožňuje vyjádřit napětí v novém souřadnicovém systému a deformaci v novém souřadnicovém systému. Díky propojení deformací a napětí maticí tuhosti Hookovým zákonem je možné vyjádřit tuhosti, popřípadě poddajnosti, v novém souřadnicovém systému.

Pro transformaci napětí v rovinné napjatosti platí [1][3]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & \sin^2(\alpha) & 2\sin(\alpha)\cos(\alpha) \\ \sin^2(\alpha) & \cos^2(\alpha) & -2\sin(\alpha)\cos(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Pro transformaci poměrné deformace v rovinné napjatosti platí [1][3]:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & \sin^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ \sin^2(\alpha) & \cos^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ -2\sin(\alpha)\cos(\alpha) & 2\sin(\alpha)\cos(\alpha) & \cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Transformační matice spojující napětí v rovnici 2.12 se označuje  $T_\sigma^{xp}$  a transformační matice spojující deformace v rovnici 2.13 se označuje  $T_\epsilon^{xp}$ .

Pro vyjádření transformované tuhosti či poddajnosti je nutné transformovat celý Hookeův zákon - tedy využít transformační matici pro napětí i pro deformace: [3]

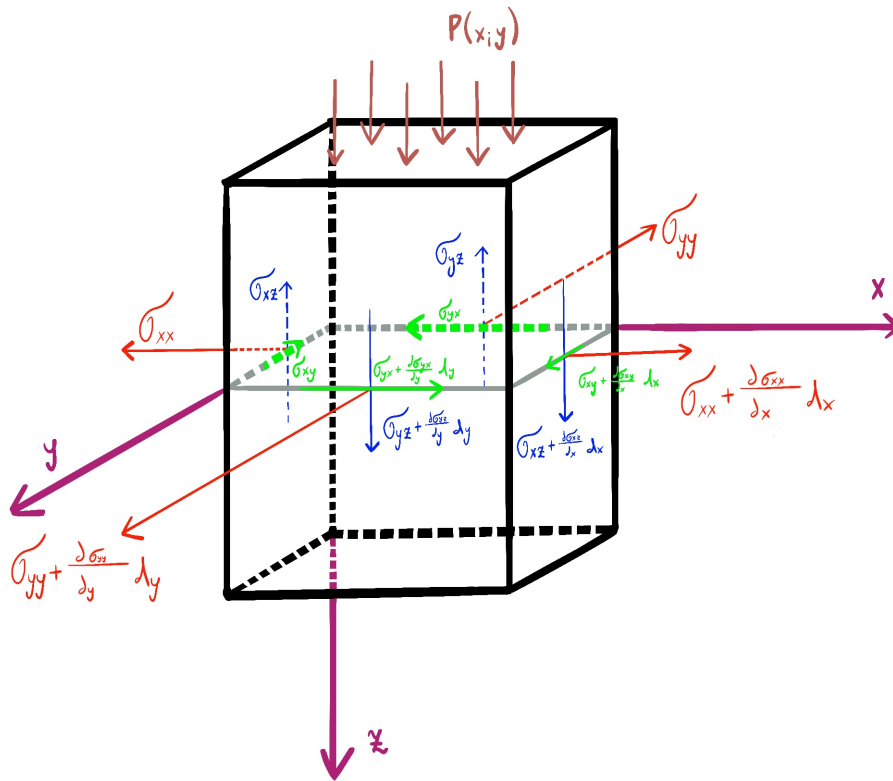
$$[T_\sigma^{xp}][\sigma] = [T_\sigma^{xp}][S][T_\epsilon^{xp}]^{-1}[T_\epsilon^{xp}][\epsilon] \quad (2.14)$$

Transformovaná tuhost či poddajnost:

$$[S^x] = [T_\sigma^{xp}][S^{LT}][T_\epsilon^{xp}]^{-1} \quad (2.15)$$

### 2.1.3 Laminát

Laminát představuje několik na sebe vrstvených lamin. Pro pružnostnickou analýzu je možné si ho představit jako tenkostěnnou desku a využít rovnice pro analýzu desek vycházející z rovnováhy deskového elementu na obrázku 2.1 (indexy za středníkem vyjadřují parciální derivaci dle dané souřadnice) [1]:



Obr. 2.1: Napětí na deskovém elementu

$$x : N_{xx;x} + N_{yx;y} = 0 \tag{2.16}$$

$$y : N_{yy;y} + N_{xy;x} = 0 \tag{2.17}$$

$$\text{Momenty kolem } x \text{ a } y \text{ v kombinaci se } z : p + M_{xx;xx} + 2M_{xy;xy} + M_{yy;yy} = 0 \tag{2.18}$$

V rovnicích 2.16, 2.17 a 2.18  $N$  označuje lineární hustotu síly,  $M$  označuje lineární hustotu momentu. Následující rovnice popisují, jak jsou tyto veličiny definovány (indexy a,b představují obecně souřadnice x,y) [1]:

$$N_{ab} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ab} dz \quad (2.19)$$

$$M_{ab} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ab} * z dz \quad (2.20)$$

Bohužel vztahy získané z rovnic 2.16, 2.17 a 2.18 jsou vztahem tří rovnic, ale pro šest neznámých. Je tedy nutné je ošetřit deformační podmínkou. Touto podmínkou bude Kirchhoffova deformační podmínka, jež říká, že normála k desce zůstává normálou i po deformaci a její délka se nemění. To v rovnicích vede na deformační podmínku (indexy za středníkem vyjadřují parciální derivaci dle dané souřadnice) [1]:

$$\epsilon_x = u_{0;x} - z * w_{0;xx} \quad (2.21)$$

$$\epsilon_y = v_{0;y} - z * w_{0;yy} \quad (2.22)$$

$$\epsilon_x = u_{0;y} + v_{0;x} - 2z * w_{0;xy} \quad (2.23)$$

Poté je třeba spojit získané silové účinky s deformacemi. Cílem je najít matici vystihující podstatu tuhosti pro celý laminát. Pro tuto charakterizaci jsou využívány takzvané ABD matice. [3]

$$A = \sum_{k=1}^N (S_{LT})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (2.24)$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (S_{LT})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.25)$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (S_{LT})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2.26)$$

Matice A se nazývá maticí tahové tuhosti, matice B maticí vazbové tuhosti a matice D maticí ohybové tuhosti. Matice A spojuje normálové a smykové zatížení s

poměrným prodloužením a zkosem. Matice B spojuje normálové a smykové zatížení se změnou křivosti a také momentové zatížení s poměrným prodloužením a zkosem. Matice D spojuje zatížení momenty se změnou křivosti, jak je vidět v maticovém zápisu [4]:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^0 \\ \epsilon_{yy}^0 \\ \epsilon_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ABD matici lze využít i v její inverzní formě podobně, jako se využívá matice tuhosti i se svou inverzní formou, maticí poddajnosti. Inverzní forma se pak značí [3]:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{16} & \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{16} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{26} & \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{26} \\ \alpha_{61} & \alpha_{62} & \alpha_{66} & \beta_{61} & \beta_{62} & \beta_{66} \\ \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{16} & \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{16} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{26} & \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{26} \\ \beta_{61} & \beta_{62} & \beta_{66} & \delta_{61} & \delta_{62} & \delta_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.28)$$

### 2.1.4 Kompozitový nosník

Nosník z kompozitního anizotropního materiálu však nespĺňuje všechny podmínky umožňující využít zjednodušených vztahů pro výpočet například zanedbání vlivu posouvající síly  $T$  na průhyb  $v$ . [1]

$$v = \int_0^L \frac{M_o m_o}{E J_z} dx + \int_0^L \frac{T t}{G A} dx \quad (2.29)$$

Anizotropie ale nezamezuje tomu, aby bylo možné nahradit tento výraz nějakou formou ekvivalentní tuhosti  $(EJ)_{ekv}$ . Takováto tuhost pak bude spojovat dané zatížení s danou deformací [3]:

$$\begin{bmatrix} N \\ M_{oy} \\ M_{oz} \\ M_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (EA)_{ekv} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (EJ_{yy})_{ekv} & (EJ_{yz})_{ekv} & 0 \\ 0 & (EJ_{yz})_{ekv} & (EJ_{zz})_{ekv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (GJ_t)_{ekv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \kappa_y \\ \kappa_z \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Hodnota každé ekvivalentní tuhosti je poté specifická pro geometrii nosníku a materiálovou skladbu laminátu. Kromě geometrie nosníku v rovnicích pro ekvivalentní tuhosti vystupují ještě členy ABD matice, popřípadě její inverze.

Pro ortotropní materiál a symetrický průřez nosníku lze vztah 2.30 upravit do tvaru [3]:

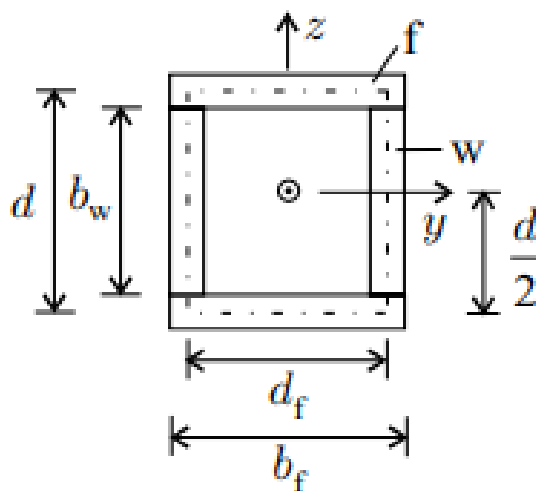
$$\begin{bmatrix} N \\ M_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (EA)_{ekv} & 0 \\ 0 & (EJ_{yy})_{ekv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \kappa_y \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Ze vztahů 2.30 a 2.31 lze vyjádřit vztahy spojující ohybový moment s křivostí a krouticí moment se zkrutem:

$$M_{oy} = (EJ_{yy})_{ekv} * \kappa_y \quad (2.32)$$

$$M_k = (GJ_t)_{ekv} * \theta \quad (2.33)$$

Pro nosník obdélníkového průřezu dle obrázku 2.2 jsou ekvivalentní tuhosti pro symetrickou skladbu materiálu definovány rovnicemi 2.34, 2.35 a 2.36 [3]:



Obr. 2.2: Průřez nosníku

$$(EJ_{yy})_{ekv} = \frac{b_f}{(a_{11})_f} \frac{d^2}{2} + \frac{2b_f}{d_{11})_f} + \frac{2b_w^3}{12(a_{11})_w} \quad (2.34)$$

$$(EJ_{zz})_{ekv} = \frac{b_w}{(a_{11})_w} \frac{d^2}{2} + \frac{2b_w}{d_{11})_w} + \frac{2b_f^3}{12(a_{11})_f} \quad (2.35)$$

$$(GJ_t)_{ekv} = \frac{2d_f^2 d^2}{(a_{66})_f d_f + (a_{66})_w d} \quad (2.36)$$



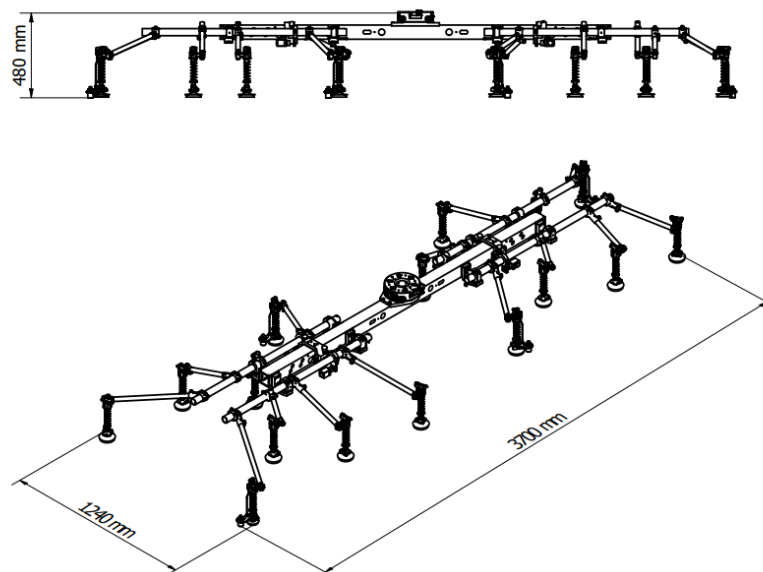
### 3 Stávající konstrukce manipulátoru

Stávající využívaný podavač je sestavou duralových nosníků spojených spojkami umožňujícími změnu polohy jednotlivých ramen a přísavek, ale pouze ručně, a tedy pouze v případě, že je podavač odmontován z robota, se kterým je spojen upínací hlavou.

Podavač přenáší pouze rovinné hloubkově netvarované plechy, vstupující do série lisů. Díky tomu je třeba zajistit polohování přísavek pouze v rovině plechu. Pokud ale má dojít ke změně ve výrobě, je třeba celý nástroj vyměnit, aby byl schopen uchopit plech rozdílného tvaru.

Centrální nosník je trubka čtvercového průřezu o straně 80 mm, tloušťce 6 mm, dlouhá 2200 mm. Pro uchycení jednotlivých ramen jsou použity kruhové trubky o průměru 40 mm, tloušťce 3 mm, dlouhé 1150 mm. Jednotlivá ramena jsou pak vyrobená z kruhových trubek o průměru 25 mm, tloušťce 3 mm a délkách v rozmezí 175-500 mm.

Rozměry a konstrukční řešení stávajícího podavače:



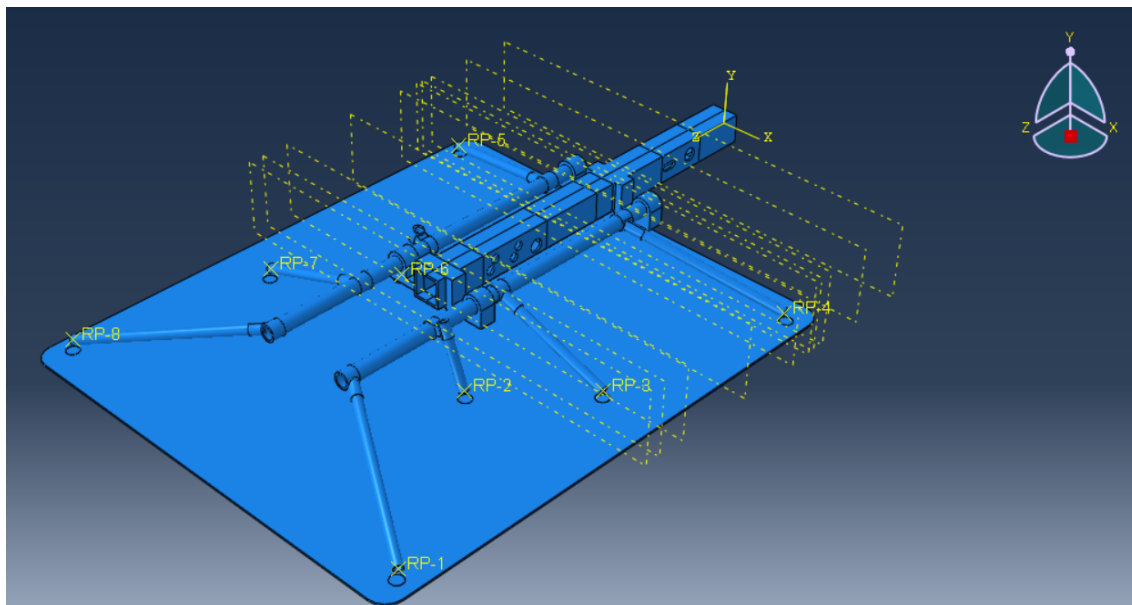
Obr. 3.1: Rozměry stávajícího podavače

## 3.1 MKP stávajícího manipulátoru

Pro zjištění chování duralového řešení manipulátoru byl sestaven MKP model v programu Abaqus verzi 6.14-5 [5]. Cílem bylo najít odezvu v posuvech na zadané zatížení, aby byl znám výchozí bod, kterému se má kompozitové řešení vyrovnat, nebo ho překonat.

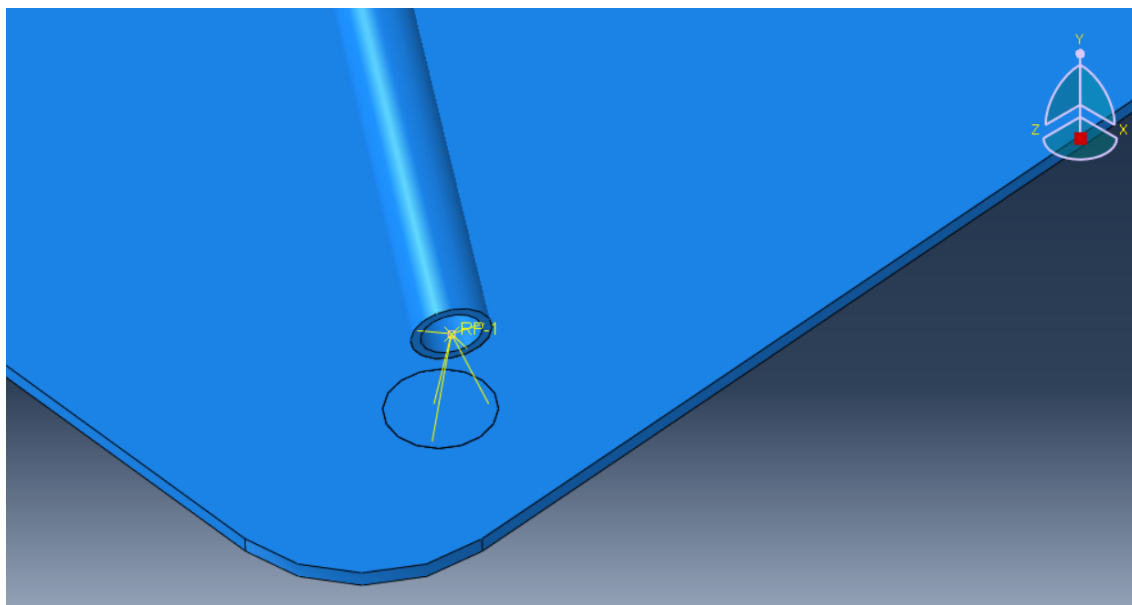
### 3.1.1 Sestava modelu

Pro modelovací účely byla využita pouze polovina nosníku díky symetrii konstrukce. Sestava na obrázku 3.2 se skládá z centrálního nosníku čtvercového průřezu 80x80 mm v němž byly i pro modelování zachovány otvory pro vnitřní vedení kabeláže, dvou nosníků kruhového průřezu s průměrem 40 mm a osmi nosníky kruhového průřezu s průměrem 25 mm. Jednotlivé nosníky jsou propojeny pomocí spojek, jimž byla zjednodušena geometrie pro snadnější modelování. Celý manipulátor byl poté spojen s plechem o rozměrech 1450x1220 mm a tloušťce 5 mm.



Obr. 3.2: Sestava modelu stávajícího manipulátoru

Spojení mezi plechem a koncovými nosníky bylo zařízeno pomocí interakcí Coupling dle obrázku 3.3. Pro jeden nosník byly vždy použity dvě vazby Coupling - jedna pro spojení mezikruhového průřezu s referenčním bodem nosníku a druhá pro spojení referenčního bodu s připojovací plochou na plechu.



Obr. 3.3: Propojení manipulátoru s plechem pomocí vazby Coupling

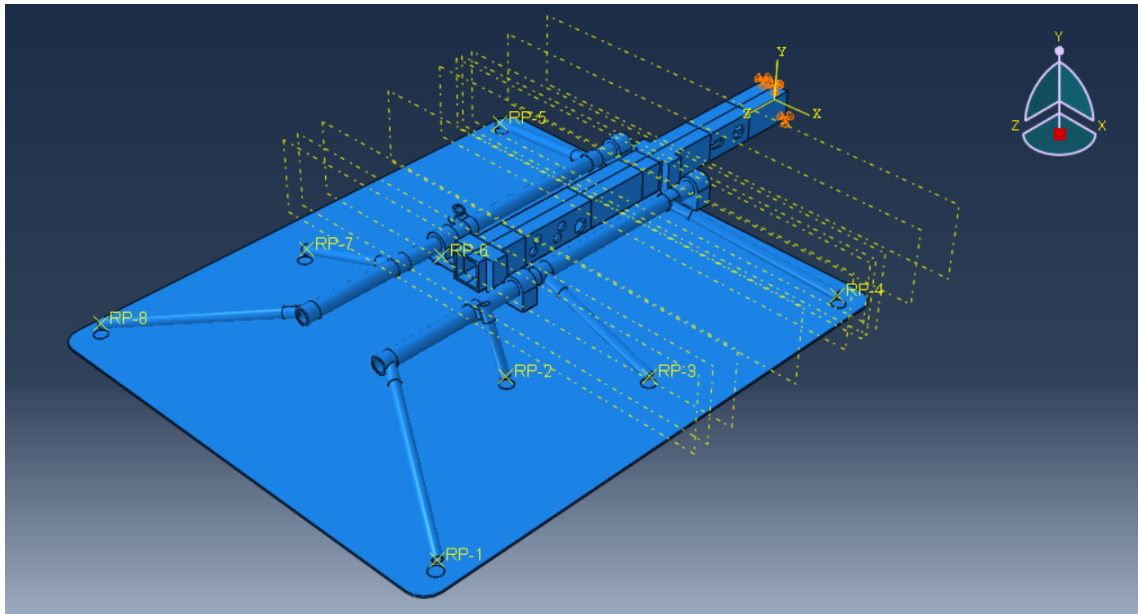
Celý manipulátor měl přiřazen jeden materiál - hliníkovou slitinu s modulem pružnosti  $E = 71 \text{ GPa}$ , Poissonovým číslem  $\nu = 0.32$  a hustotou  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ .

Plech byl z oceli s modulem pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$ , Poissonovým číslem  $\nu = 0.3$  a hustotou  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.1.2 Okrajové podmínky

Upínací hlava ve spojení s vysokou tuhostí robota, který manipulátor drží, umožňuje modelovat spoj v upínací hlavě jako vetknutí. Veškerá zrychlení z robota lze poté přímo použít jako dynamické zatížení pro manipulátor.

Okrajová podmínka v simulaci byla řešena zakázáním posuvu ve směru všech os. V obrázku 3.4 označeno oranžovými šipkami.



Obr. 3.4: Vetknutí nosníku

### 3.1.3 Zatížení

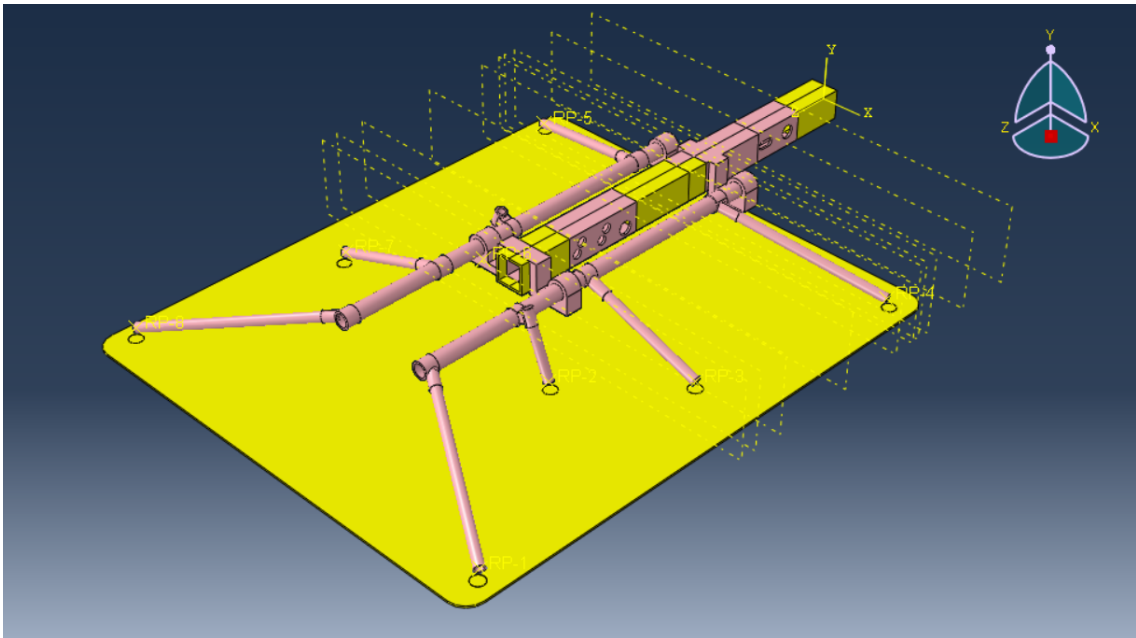
Zatěžování probíhalo v šesti krocích (stepech) tak, aby byly pokryty všechny druhy pohybů, jež robot s manipulátorem vykonává. Zatížení je dáno v podobě zrychlení dosahovaném při daném pohybu. Zrychlení  $-10 \text{ m/s}^2$  představuje gravitační zrychlení.

Tab. 3.1: Zatížení duralového manipulátoru zrychleným pohybem

Step	1	2	3	4	5	6
<b>zrychlení X</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	0	0	-20	20
<b>zrychlení Y</b> [ $m/s^2$ ]	-10	-20	-10	-10	-10	-10
<b>zrychlení Z</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	+20	-20	0	0

### 3.1.4 Síť

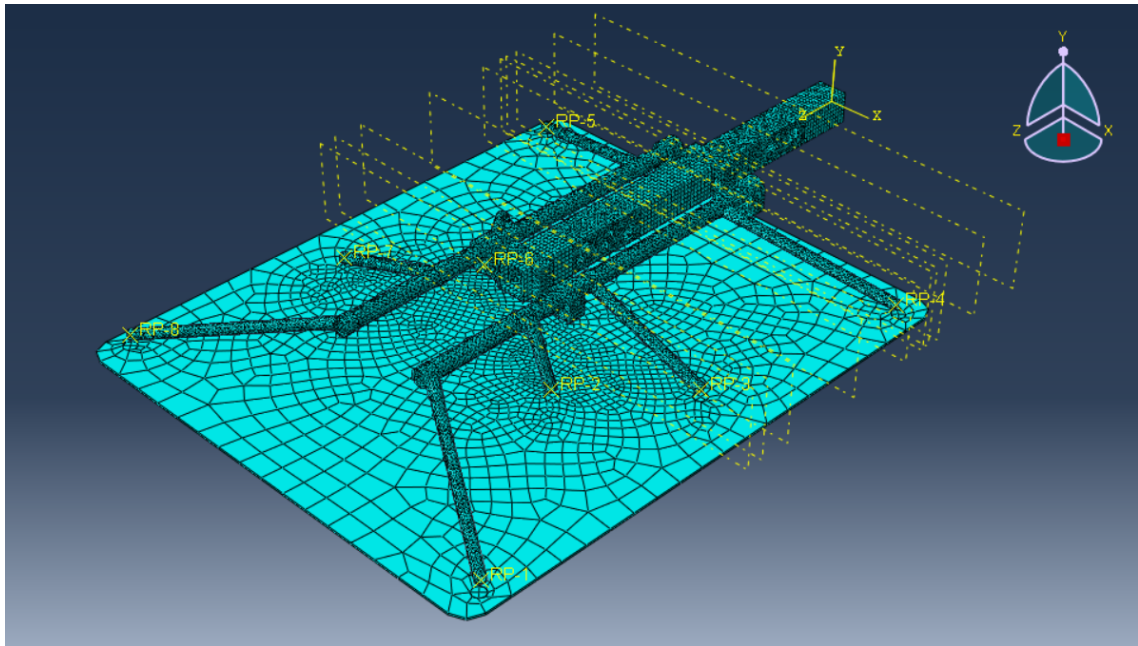
Manipulátor byl v programu vytvořen jako jedna součást, což představovalo problémy pro vhodné síťování. Žluté zóny na obrázku 3.5 byly síťovány standardními obdélníkovými elementy, ale pro vyplnění růžových zón bylo nutné využít tetragonálních elementů. Tetragonální elementy mají díky své trojúhelníkové struktuře zpravidla větší tuhost než elementy hexagonální, ale v případě, že tato konstrukce vyjde tužší, než reálně je, vede to k větší bezpečnosti kompozitového řešení, jehož tuhost má být vyšší než tuhost řešení z hliníkové slitiny.



Obr. 3.5: Model před vysíťováním

Pro manipulátor byla zvolena základní velikost elementu 11 mm. Pro plech poté 68 mm. Síť nebyla cíleně zhušťována kolem vrubů, protože nebylo cílem získat informace o dění kolem nich. Model vruby osahoval pouze pro bližší přiblížení globální tuhosti konstrukce.

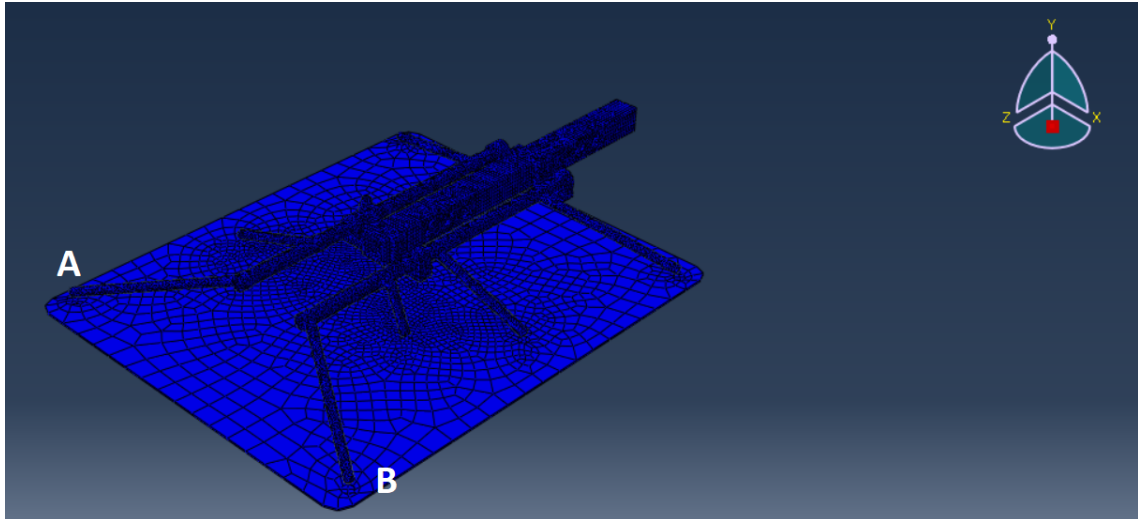
Vysíťovaný model je na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Model po vysíťování

### 3.1.5 Výsledky simulace

Při simulaci se maximální posuvy vždy nacházely v jednom z bodů A a B, na obrázku 3.7. Posuv byl vyhodnocován zde, protože zájem byl o deformaci manipulátoru, nikoliv zatím o deformaci plechu pod manipulátorem.



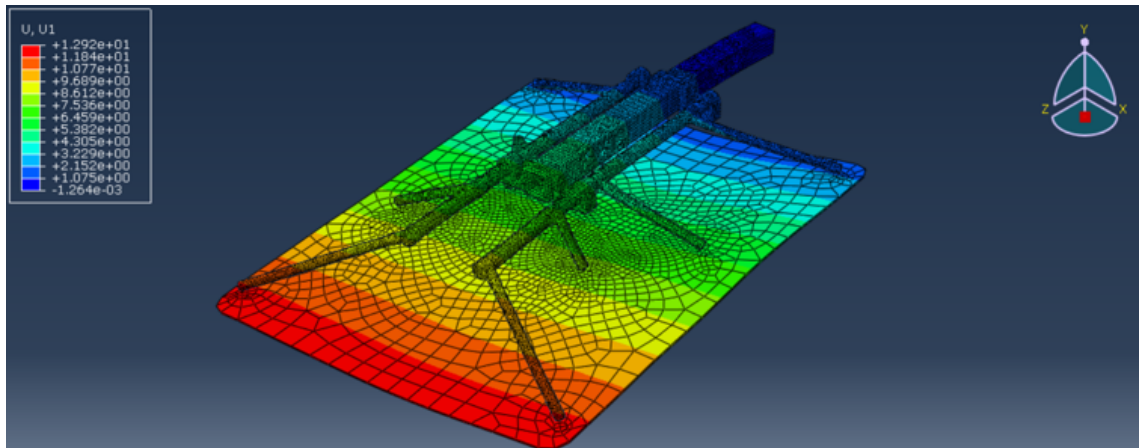
Obr. 3.7: Body A a B pro vyhodnocení maximálních posuvů

Výsledky simulace ukázaly, že pro duralový manipulátor byl kritický pohyb ve směru osy X, který kromě ohybové deformace v obou osách vyvolával i výraznou deformaci v krutu na centrálním nosníku. V tabulce 3.2 jsou vypsané maximální posuvy a jejich složky. V případě, že složka nabývala hodnoty menší než 0.5 mm, byla v tabulce vynechána.

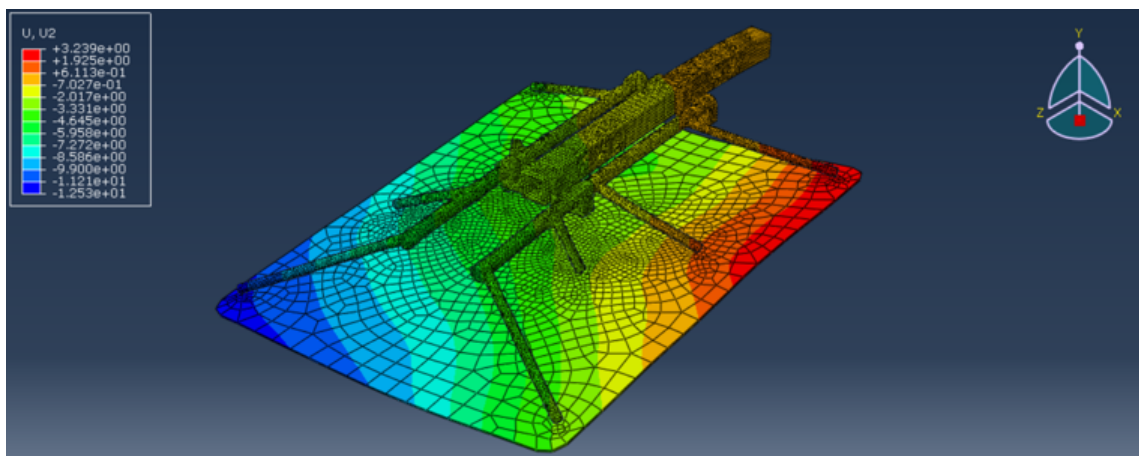
Tab. 3.2: Zatížení a maximální posuvy duralového manipulátoru v jednotlivých stepch

Step	1	2	3	4	5	6
<b>zrychlení X</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	0	0	<b>-20</b>	<b>20</b>
<b>zrychlení Y</b> [ $m/s^2$ ]	-10	-20	-10	-10	<b>-10</b>	<b>-10</b>
<b>zrychlení Z</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	+20	-20	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>max celkový posuv</b> [mm]	7.47	14.94	12.2	2.85	<b>17.1</b>	<b>16.67</b>
<b>max posuv v X</b> [mm]	-	-	-	-	<b>12.05</b>	<b>-11.76</b>
<b>max posuv v Y</b> [mm]	-7.44	-14.88	-12.11	-2.79	<b>-11.51</b>	<b>-11.28</b>
<b>max posuv v Z</b> [mm]	-	-	-1.8	0.55	<b>3.78</b>	<b>3.54</b>

Obrázky 3.8 - 3.11 ukazují posuvy v osách X a Y při pohybu v ose X - při kritickém módu zatěžování. Obrázky z ostatních módů zatěžování jsou k nahlédnutí v přílohách.

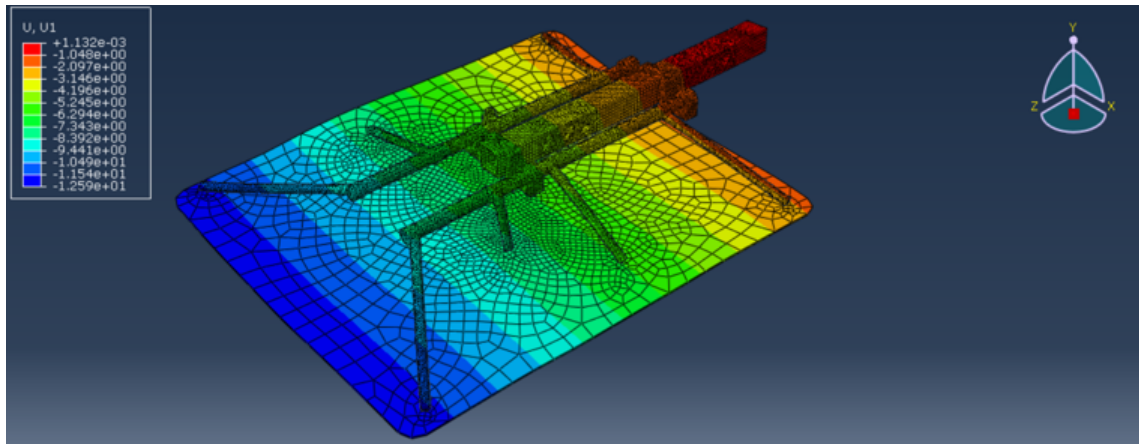


Obr. 3.8: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X

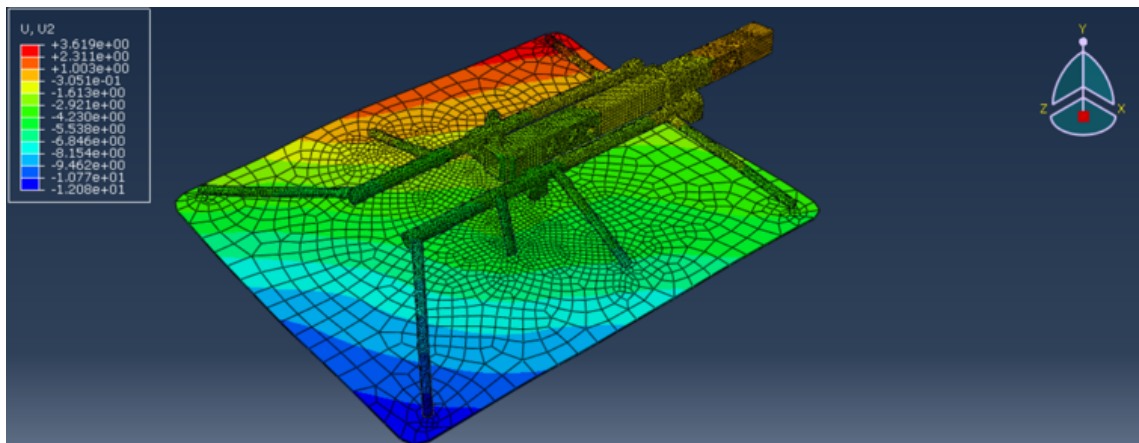


Obr. 3.9: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X





Obr. 3.10: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X

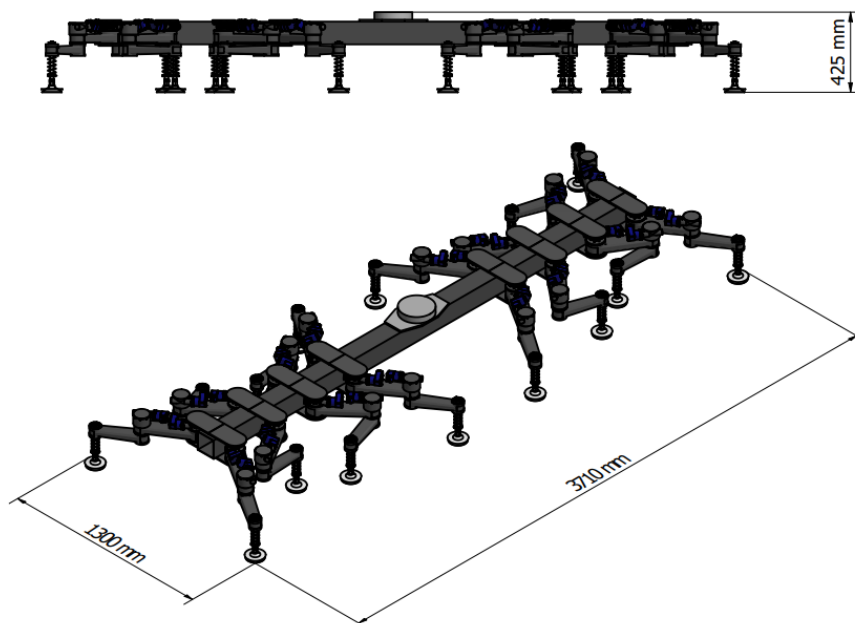


Obr. 3.11: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X

## 4 Kompozitový manipulátor

Nový podavač navržený firmou Compotech má umožnit přestavení poloh přísavek pro uchopení libovolného plechu bez nutnosti demontáže celého podavače. V konstrukci ramen by měly být umístěny pohony, zajišťující změnu konfigurace v čase kratším, než je potřeba pro výměnu nástrojů ve zbytku lisovací soustavy.

Podavač, zobrazený na obrázku 4.1, je navržen z centrálního kompozitového nosníku čtvercového průřezu o vnějších rozměrech 120x120 mm a tloušťce 5.98 mm a ramen skládajících se ze dvou nosníků zakončených z obou stran ovíjeným integrovaným spojem. Nosníky s integrovaným spojem jsou popsány v přílohách na obrázcích 8.1 a 8.2 (popsány jsou rozměry nástroje, na který je součást vinuta). V rámci integrovaného spoje mají být umístěny pohony s převodovým mechanismem a brzdicí/zamykací mechanismus, který zajistí, že po změně polohy již nedojde k její změně při přenášení plechů.



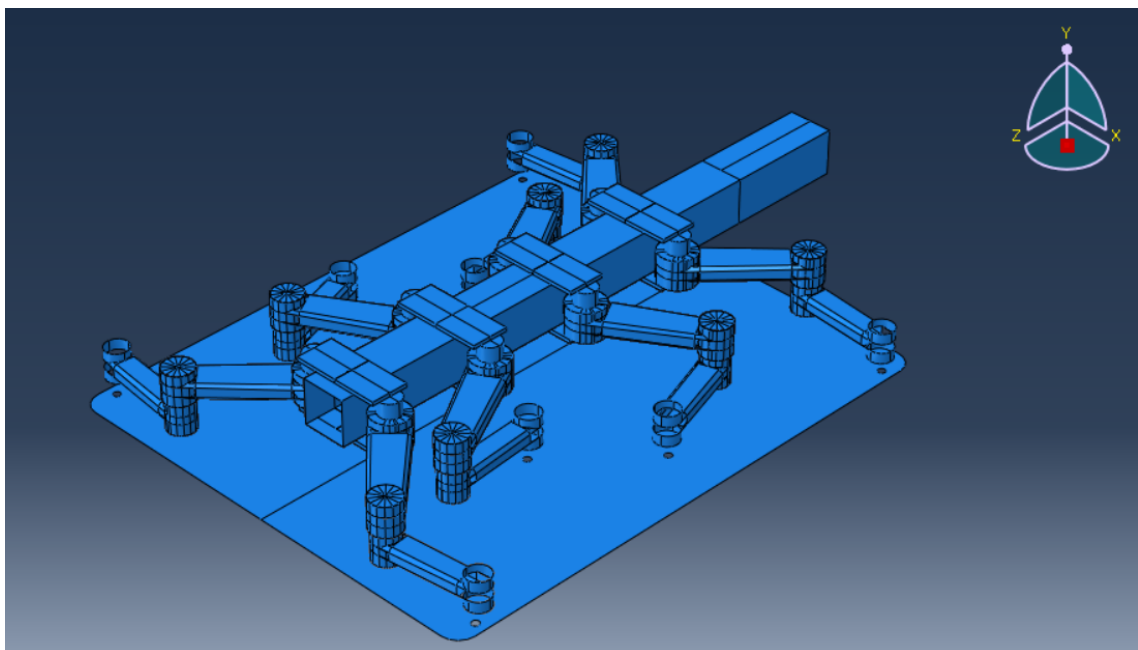
Obr. 4.1: Rozměry kompozitového podavače

## 4.1 MKP kompozitového manipulátoru

MKP model kompozitového manipulátoru byl vytvořen jako ekvivalent duralového řešení. Model upínal stejný plech a ve stejných polohách. Cílem bylo porovnat odezvu na stejná zatížení a porovnat kritické módy zatěžování. Celá simulace opět proběhla v programu Abaqus 6.14-5 [5].

### 4.1.1 Sestava modelu

Model na obrázku 4.2 zobrazuje polovinu manipulátoru nacházející se za upínací hlavou robota. Upínací hlava je v modelu nahrazena vetknutím. Model se skládá z centrálního nosníku z kompozitního materiálu, osmi velkých a osmi malých ramen s integrovaným spojem z kompozitního materiálu a spojek, které byly modelovány jako absolutně tuhé součásti, vzhledem k jejich zatím neznámé konstrukci a k usnadnění výpočtu. V případě spojek mezi velkými rameny a centrálním nosníkem se jednalo o standardní "rigid" součást, v případě spojek mezi velkými a malými rameny o "analytical rigid" součást.



Obr. 4.2: Model kompozitového manipulátoru

Všechny kompozitní součásti byly vzhledem k jejich velmi malé tloušťce modelovány jako skořepiny. Všechny propojovací struktury byly rovněž modelovány jako skořepiny z důvodu zachování konformity modelu (nelze spojovat vazbou skořepinu a objemovou součástí).

### 4.1.2 Materiál

Pro výrobu nosníků byla využita vysokomodulová vlákna standardně využívaná firmou Compotech s.r.o., která vystupují i v programu LamiEx. Pro všechny využití materiály byly získány parametry laminy  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $G_{LT}$ ,  $\mu_{LT}$  a  $\rho$ . Výsledná skladba byla kontrolována i podle parametru hmotnosti v MKP, aby tloušťky jednotlivých vrstev skutečně odpovídaly vyrobené součásti.

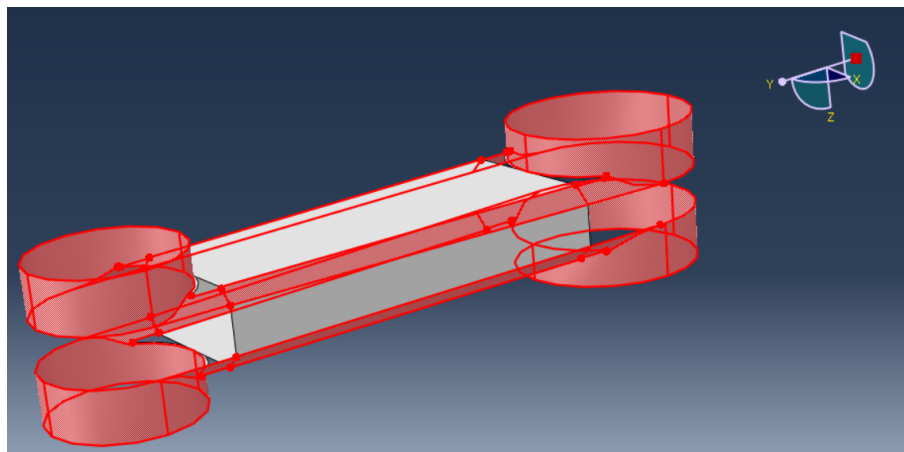
### 4.1.3 Skladba materiálu

Pro definování skladby materiálu bylo nutné dodržet několik základních postupů vzhledem k technologii výroby součástí (navíjením). Skladba měla co nejlépe kopírovat způsob, jakým bylo vlákno vinuto na trn (hlavně v případě ramen).

Pro ramena bylo nutné rozdělit součást na jednotlivé oblasti s rozdílnou kompozitní skladbou:

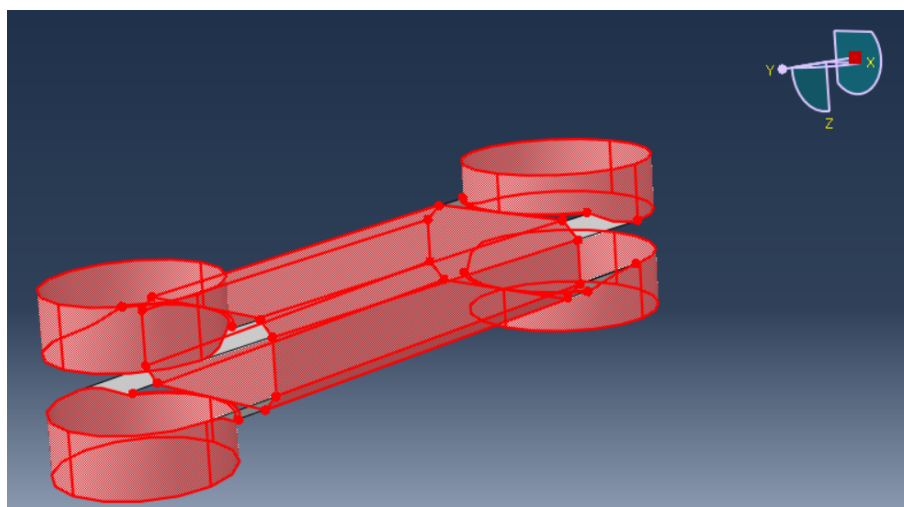
- oblast pouze axiálních vláken
- oblast pouze křížících se vláken
- kombinace axiálních a křížících se vláken
- speciální úhel vzniklý ve spojích

Na obrázcích 4.3 - 4.5 je znázorněno jaké oblasti vznikají při vinutí jednotlivých částí.



Obr. 4.3: Axiální vinutí vláken

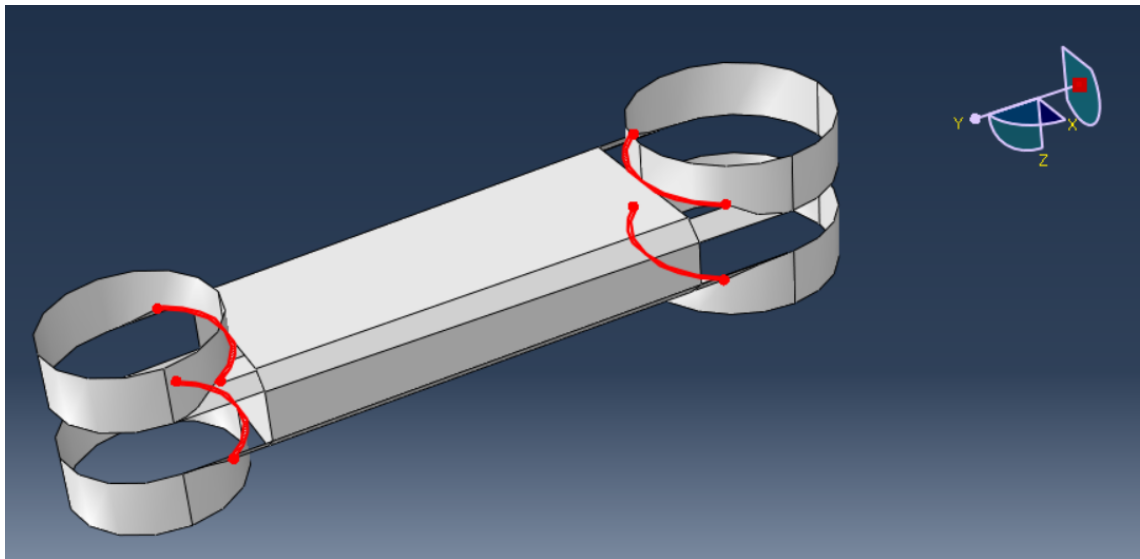
Při vinutí axiálních vláken dochází i ke krytí ok spoje. Oka jsou poté pokryta axiální vrstvou vláken.



Obr. 4.4: Křížené vinutí vláken

Při vinutí křížících se vláken dochází také k vinutí přes oka integrovaného spoje, ale v této oblasti jsou vlákna kladena jen axiálně a nedochází k jejich křížení.

Při vinutí této vrstvy dochází ke vzniku oblasti s odlišným úhlem vinutí, když se vlákno přibližuje spoji, vyznačené na obrázku 4.5.

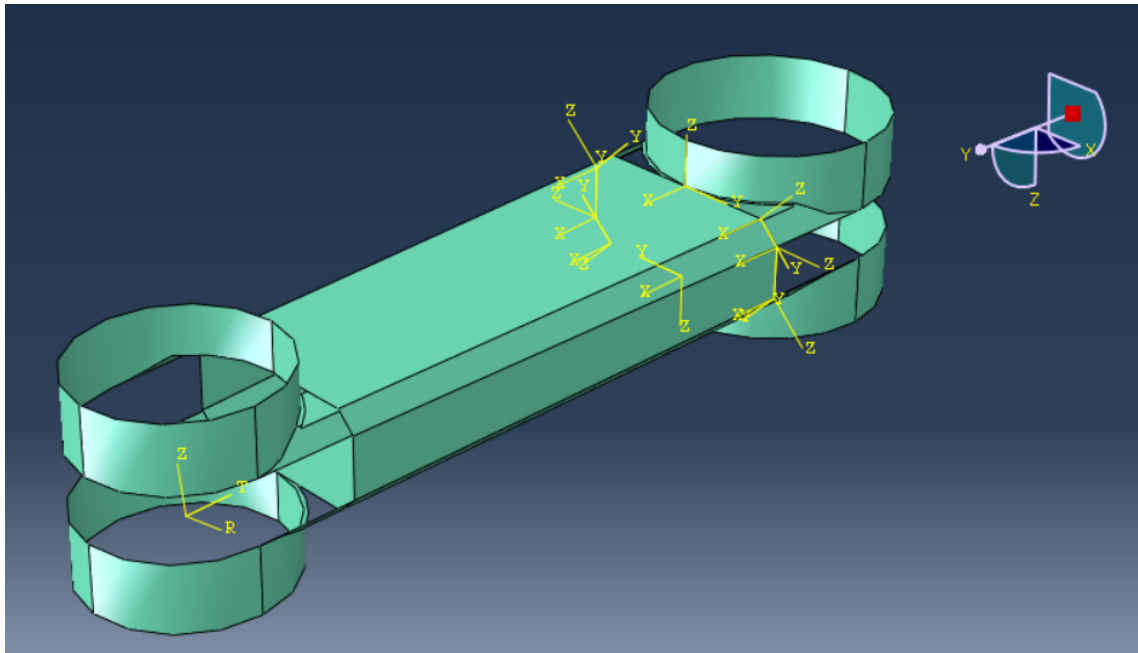


Obr. 4.5: Speciální úhel vzniklý ve spojích

Úhel vzniklý u spoje znázorněného na obrázku 4.5 vzniká při vinutí křížících se vláken, a to při procesu otáčení se okolo oka spoje. Tato část je potom z jednosměrných nekřížících se vláken, ale v úhlu, který není shodný s úhlem křížících se vláken.

Toto vše bylo respektováno v tvorbě kompozitní skladby v MKP. Tloušťky jednotlivých segmentů byly změřeny na vyrobené součásti, aby model co nejlépe odpovídal realitě. Pro simulaci byl použit symetrický laminát (vrstva kladného úhlu o čtvrtinové tloušťce, vrstva záporného úhlu o poloviční tloušťce, vrstva kladného úhlu o čtvrtinové tloušťce) jako náhrada používané technologie vinutí vláken, kdy dochází k proplétání vláken kladného a záporného úhlu do vzorců.

Každá oblast, pro kterou byl materiál definován, měla svůj souřadnicový systém. Pro rovinné oblasti modelu byl systém pravotočivý a tvořen hlavní osou Y modelu (osy x), vnější normálou povrchu (osy z) a osy y byly doplněny, aby byl systém pravotočivý. Pro cylindrické plochy byl vytvořen cylindrický systém, kde osa z odpovídala ose válce. Systémy souřadnic jsou vyznačené na obrázku 4.6.

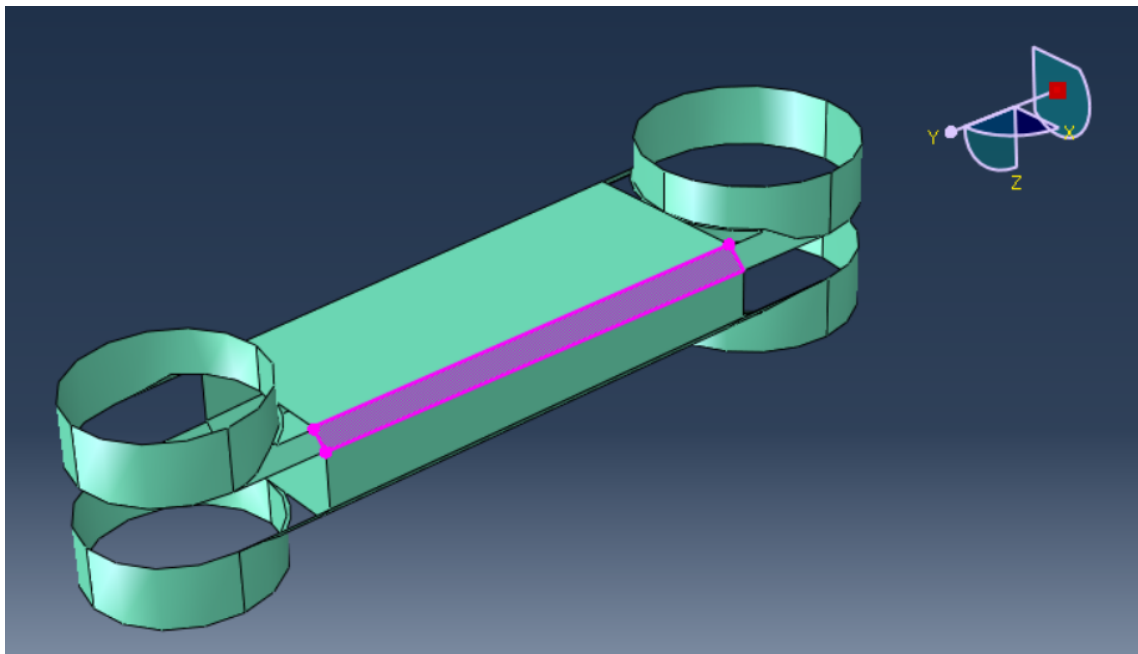


Obr. 4.6: Souřadnicové systémy pro definici skladby

Pro oblasti s axiálními i křížícími se vlákny na obrázku 4.7 byla využita skladba v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Skladba materiálu v částech s axiální i křížící se vrstvou

<b>vrstva</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>úhel [°]</b>	88.41	-88.41	65.28	-65.28	65.28	0
<b>tloušťka [mm]</b>	0.05	0.05	0.375	0.75	0.375	0.4
<b>vrstva</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	
<b>úhel [°]</b>	65.28	-65.28	65.28	-88.41	88.41	
<b>tloušťka [mm]</b>	0.375	0.75	0.375	0.05	0.05	



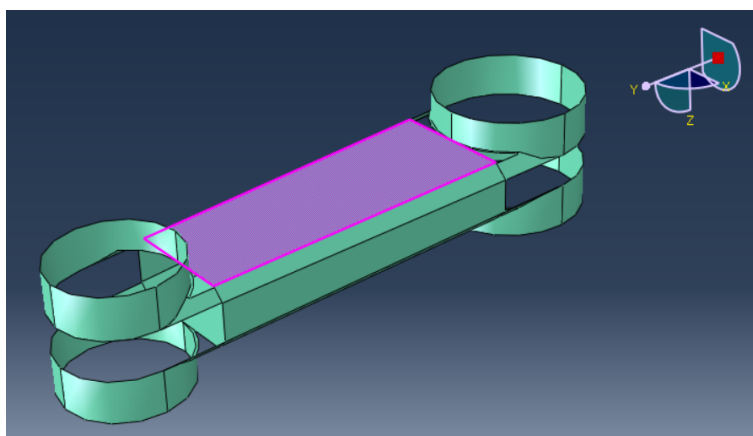
Obr. 4.7: Oblast kombinace axiálních i křížících se vláken



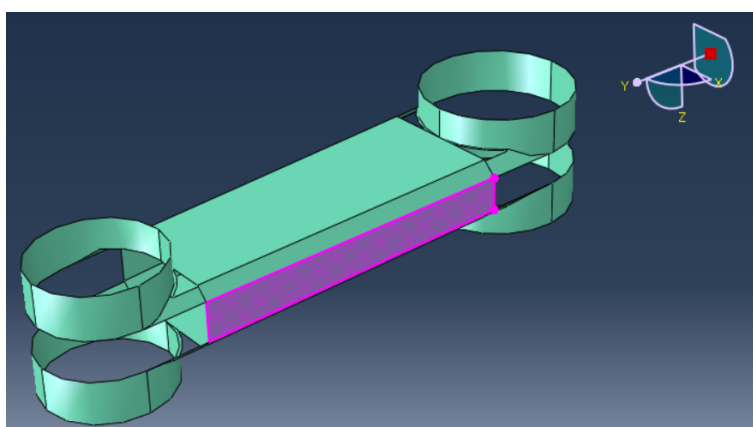
Pro oblasti pouze s křížícími se vlákny na obrázcích 4.8 a 4.9 byla použita skladba dle tabulky 4.2.

Tab. 4.2: Skladba materiálu v částech s křížící se vrstvou

<b>vrstva</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>úhel [°]</b>	88.41	-88.41	65.28	-65.28	65.28
<b>tloušťka [mm]</b>	0.05	0.05	0.375	0.75	0.375
<b>vrstva</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>úhel [°]</b>	65.28	-65.28	65.28	-88.41	88.41
<b>tloušťka [mm]</b>	0.375	0.75	0.375	0.05	0.05



Obr. 4.8: Oblast pouze křížících se vláken na horní (spodní) straně ramena

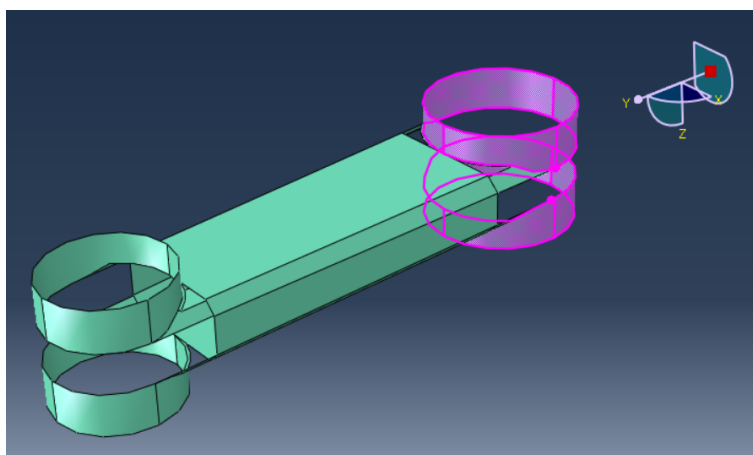


Obr. 4.9: Oblast pouze křížících se vláken na boční straně ramena

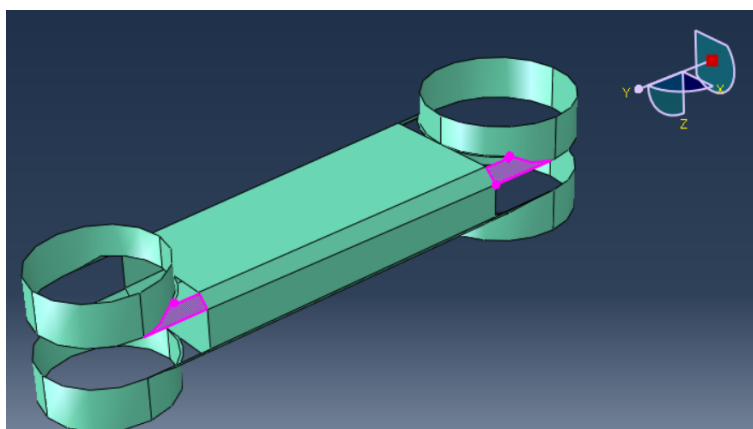
Pro oka integrovaného spoje a jejich připojení dle obrázků 4.10 - 4.12 je skladba popsána v tabulce 4.3.

Tab. 4.3: Skladba materiálu v částech s axiální vrstvou

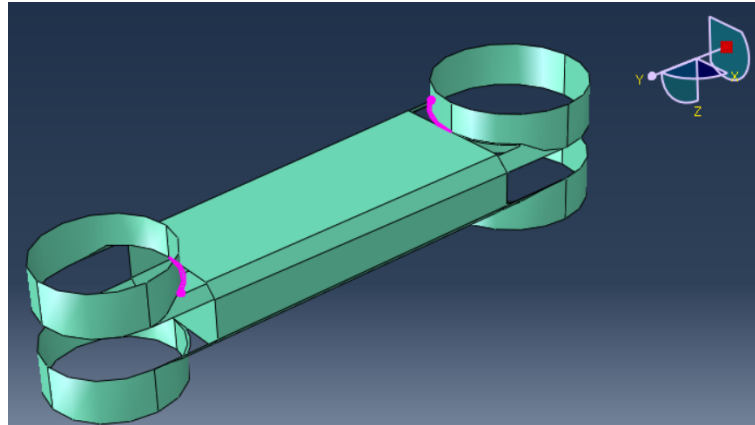
vrstva	oko	axiální připojení	odkloněné axiální připojení
úhel [°]	0	0	75
tloušťka [mm]	6.5	4.1	4



Obr. 4.10: Oblast pouze axiálních vláken v oku integrovaného spoje

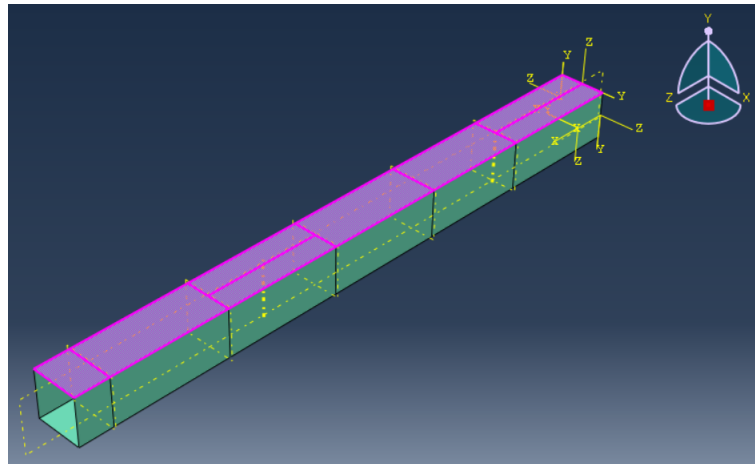


Obr. 4.11: Oblast pouze axiálních vláken v připojení k integrovanému spoji



Obr. 4.12: Oblast odkloněných axiálních vláken v připojení k integrovanému spoji

V případě centrálního nosníku byla skladba všech stěn stejná, složená z kombinace axiálních vrstev, vrstev křížících se vláken pro optimální poměr ohybové a krutové tuhosti a z technologické vrstvy. Vše je popsáno na obrázku 4.13 a v tabulce 4.4.



Obr. 4.13: Stěna centrálního nosníku

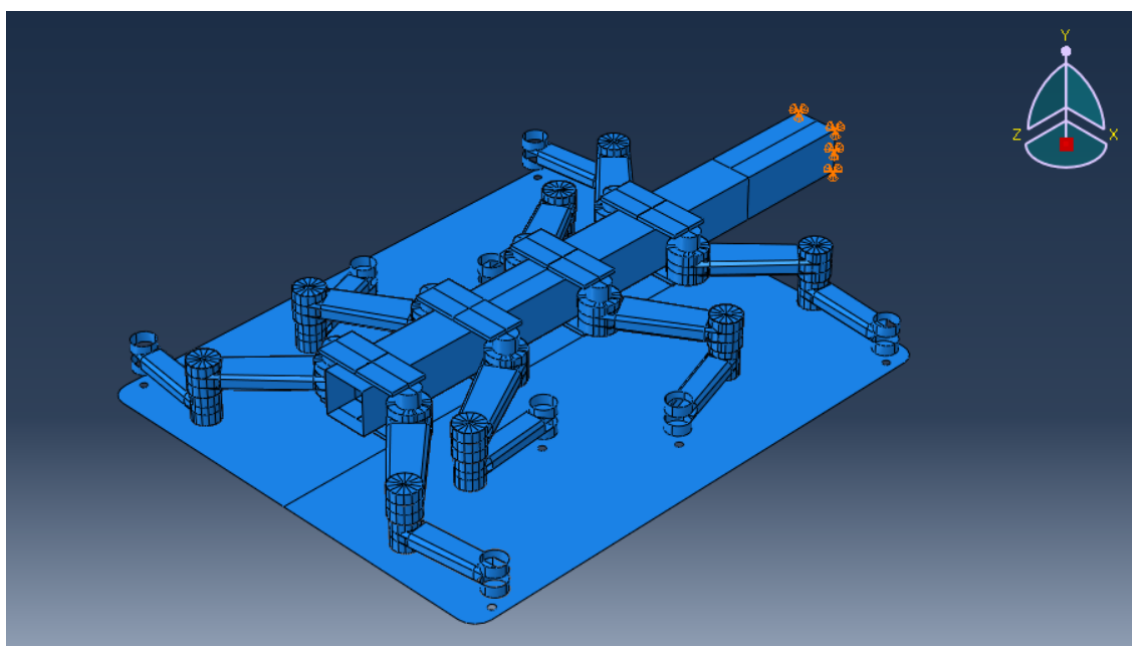
Tab. 4.4: Skladba materiálu v částech s axiální i křížící se vrstvou

<b>vrstva</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>úhel [°]</b>	0	89.4	-89.4	89.4	0	44.2
<b>tloušťka [mm]</b>	1.67	0.08	0.16	0.08	1.26	0.13
<b>vrstva</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>úhel [°]</b>	-44.2	44.2	0	24.5	-24.5	24.5
<b>tloušťka [mm]</b>	0.26	0.13	1.72	0.125	0.25	0.125

#### 4.1.4 Okrajové podmínky

V této kapitole budou popsány okrajové podmínky celého modelu, ale také interakce mezi jednotlivými součástmi (podstata okrajových podmínek pro jednotlivé součásti).

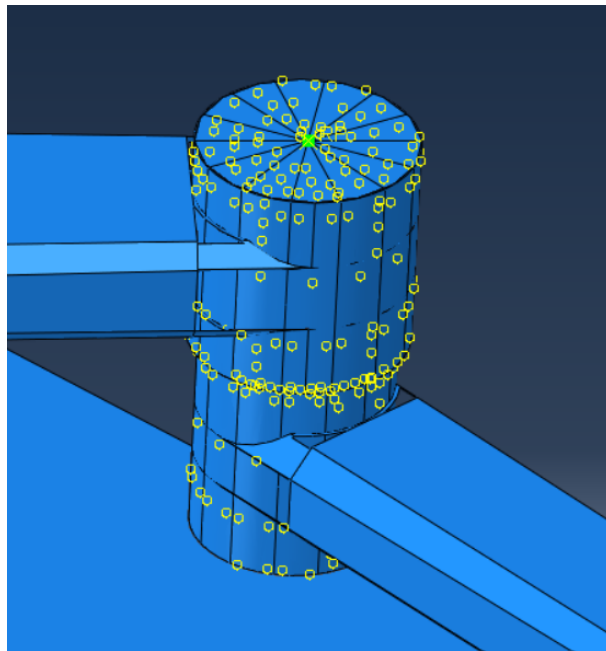
Celý model byl vetknutý za počáteční průřez centrálního nosníku dle obrázku 4.14. Tím byla simulována upínací hlava robota.



Obr. 4.14: Vetknutí manipulátoru

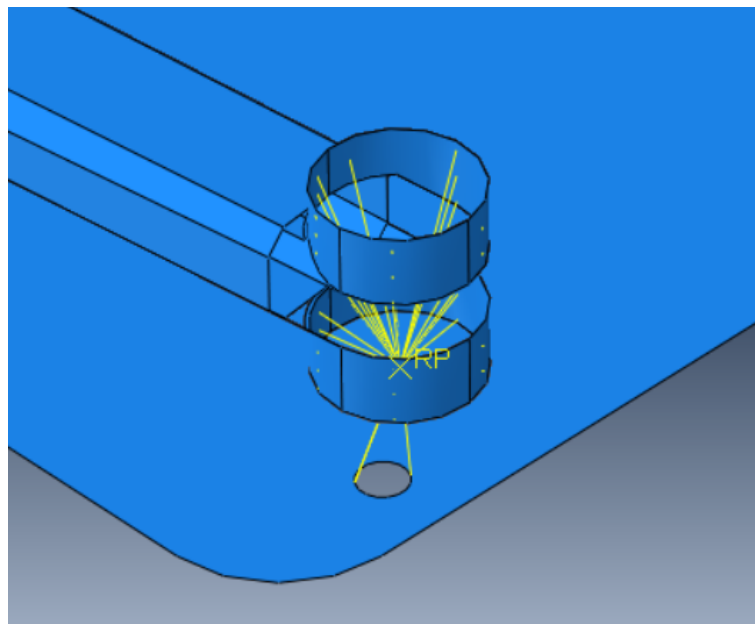
Pro celý model byla zaškrtnuta vlastnost obecného kontaktu mezi všemi součástmi, aby nedocházelo k penetraci jednotlivých povrchů do sebe. Pro propojení ramen byla využita vazba "tie" přes analyticky tuhou spojku mezi rameny. Vazba, jak je zobrazena na obrázku 4.15, byla využita pro propojení všech dvojic ramen a představuje pevné spojení mezi součástmi jako slepením - jejich dotýkající se plochy se deformují stejně.

Zelená tečka na spojce mezi rameny na obrázku 4.15 značí hmotný bod. Cílem tohoto hmotného bodu bylo zastoupit váhu motoru a konstrukce spoje mezi jednotlivými rameny.



Obr. 4.15: Vazba "tie" mezi okem ramen a tuhou spojkou

Pro propojení ramen s plechem byla využita vazba "coupling" mezi referenčním bodem malých koncových ramen a plechem. Tato vazba, jak je vyobrazena na obrázku 4.16, byla použita pro všechna ramena.



Obr. 4.16: Vazba "coupling" mezi plechem a ramenem

### 4.1.5 Zatížení

Simulovaná sestava byla podrobena stejné zatěžovací sekvenci jako sestava z hliníkové slitiny. V jednotlivých krocích (stepech) tedy byla zatížena zrychlením  $10 - 20 \text{ m/s}^2$  dle tabulky 4.5.

Tab. 4.5: Zatížení kompozitové konstrukce v jednotlivých stepech

Step	1	2	3	4	5	6
<b>zrychlení X</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	0	0	-20	20
<b>zrychlení Y</b> [ $m/s^2$ ]	-10	-20	-10	-10	-10	-10
<b>zrychlení Z</b> [ $m/s^2$ ]	0	0	+20	-20	0	0

### 4.1.6 Síť

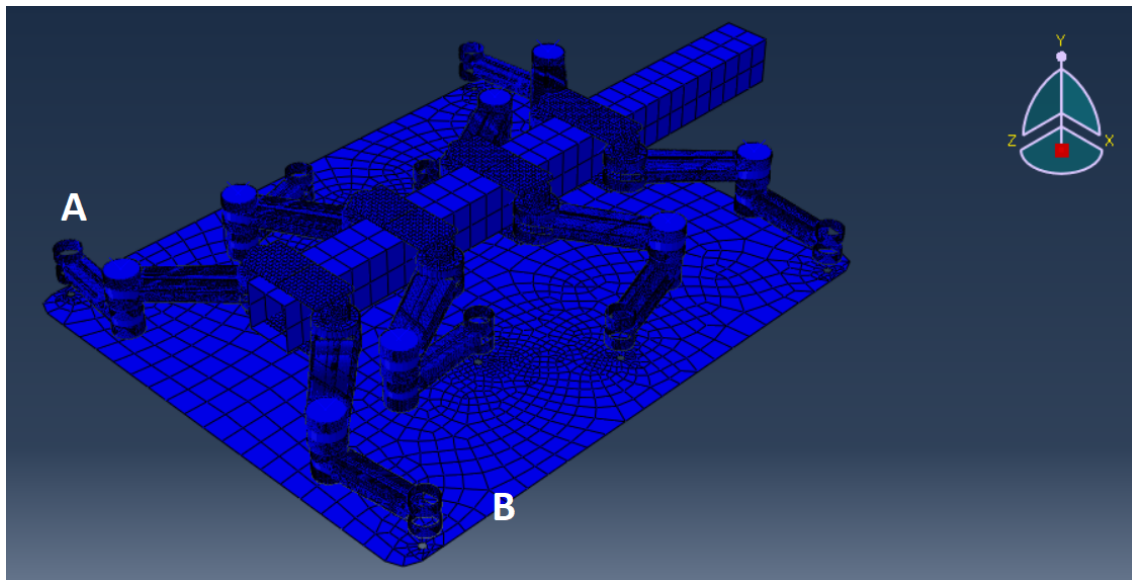
Při tvorbě sítě byl opět podobný přístup jako u stávajícího řešení z hliníkové slitiny. Zhušťování sítě neprobíhalo za cílem zjistit chování součástí v koncentrátoch, ale spíše pro zajištění konvergence výpočtu.

Pro velké součásti s jednoduchou geometrií nebylo třeba síť kdekoli výrazně zhušťovat, ale kompozitová ramena s integrovaným spojem představovala v tomto případě problém. Při použití nedostatečně husté sítě docházelo k rozpojování elementů v blízkosti připojení k integrovanému spoji. Při lokálním zhuštění sítě v blízkosti integrovaného spoje se tento problém pouze posouval dále po rameni. Bylo tedy nutné zajistit jemnou síť po celé součásti (alespoň pro výpočty celé soustavy, jednodušší výpočty pouze s jedním ramenem se obešly i bez takto jemného síťování).

Síť centrálního nosníku, jakožto geometrií nejjednodušší součásti modelu, byla pouze velmi hrubá, ale pouze tak, aby byla zachována přesnost výsledku. Na samotném nosníku bylo provedeno několik testovacích výpočtů a vybrána byla velikost elementů o přibližné velikosti 50 mm. Výsledné dělení bylo po 50 mm po délce a po 60 mm po šířce a výšce nosníku.

### 4.1.7 Výsledky

Pro vyhodnocení maximálních posuvů bylo opět využito pouze dvou ramen nejvíce vzdálených od vetknutí, jako v případě duralového manipulátoru. Místa jsou označena písmeny A a B na obrázku 4.17.



Obr. 4.17: Místa vyhodnocení maximálních posuvů

Průběh zatížení a posuvů v těchto módech zatížení popisuje tabulka 4.6.

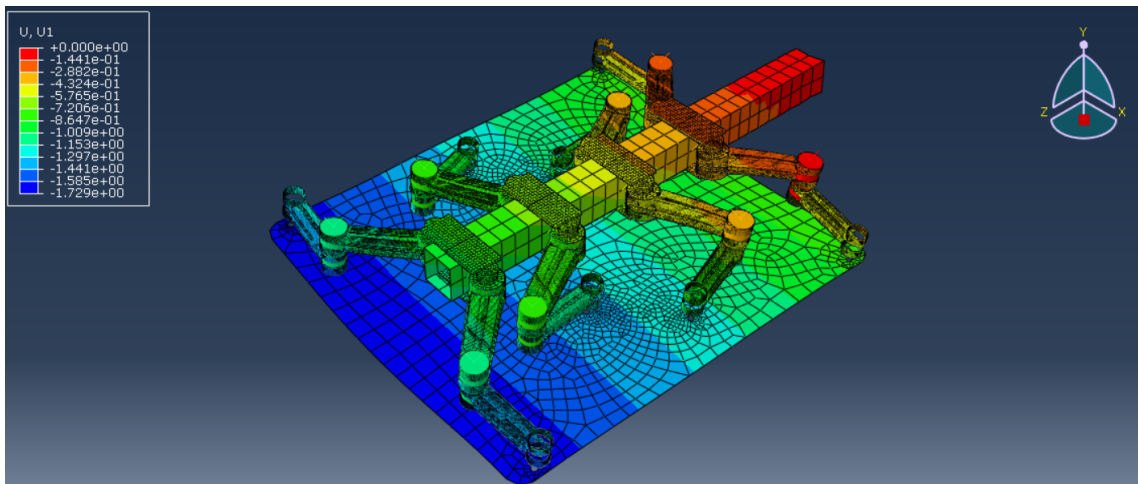
Tab. 4.6: Zatížení a maximální posuvy kompozitového manipulátoru v jednotlivých stepech

Step	1	2	3	4	5
zrychlení X [ $m/s^2$ ]	0	0	0	-20	20
zrychlení Y [ $m/s^2$ ]	-20	-10	-10	-10	-10
zrychlení Z [ $m/s^2$ ]	0	+20	-20	0	0
max celkový posuv [ $mm$ ]	2.2	1.61	0.66	<b>3.01</b>	<b>2.92</b>
max posuv v X [ $mm$ ]	-	-	-	<b>1.49</b>	<b>-1.45</b>
max posuv v Y [ $mm$ ]	-2.195	-1.57	-0.625	<b>-2.58</b>	<b>-2.51</b>
max posuv v Z [ $mm$ ]	-	-0.31	-0.2	<b>0.41</b>	<b>0.36</b>

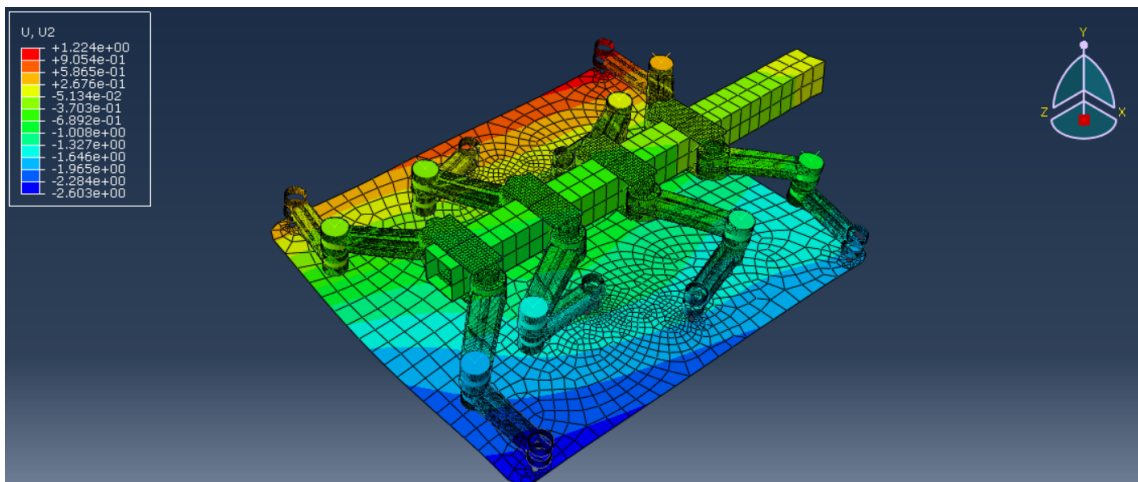
Z tabulky už je zřetelné, že maximální posuv v případě kompozitového manipulátoru je menší než v případě duralového. V případě stávajícího duralového manipulátoru dosahoval maximální posuv 17.1 mm, zatímco zde dosahuje 3.01 mm. V celkovém pohledu na věc to představuje více než 5krát menší posuvy.

Jako kritický způsob zatížení se ukázal opět pohyb v ose X, při kterém docházelo k maximálním posuvům, stejně jako u duralového manipulátoru.

Výstupy z tohoto módu zatěžování zastupují obrázky 4.18 - 4.21.

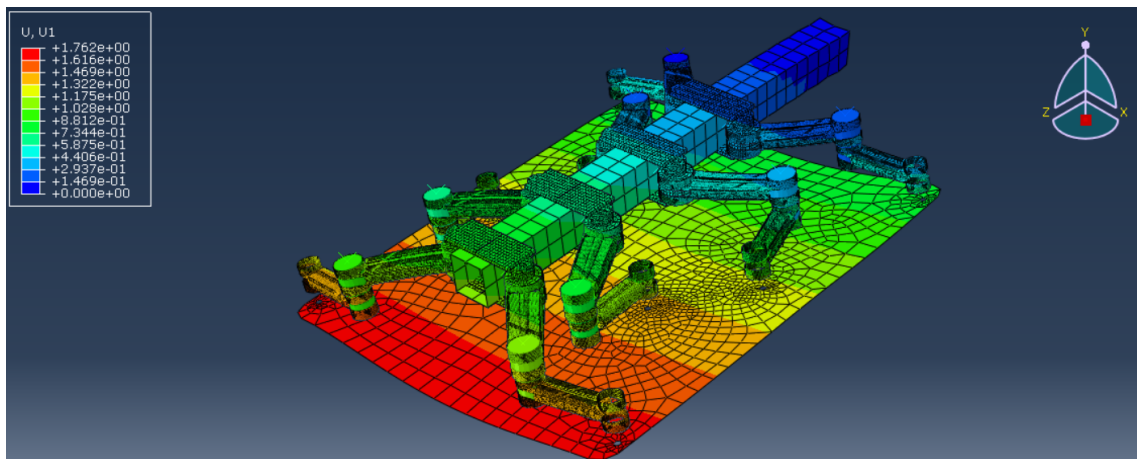


Obr. 4.18: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X

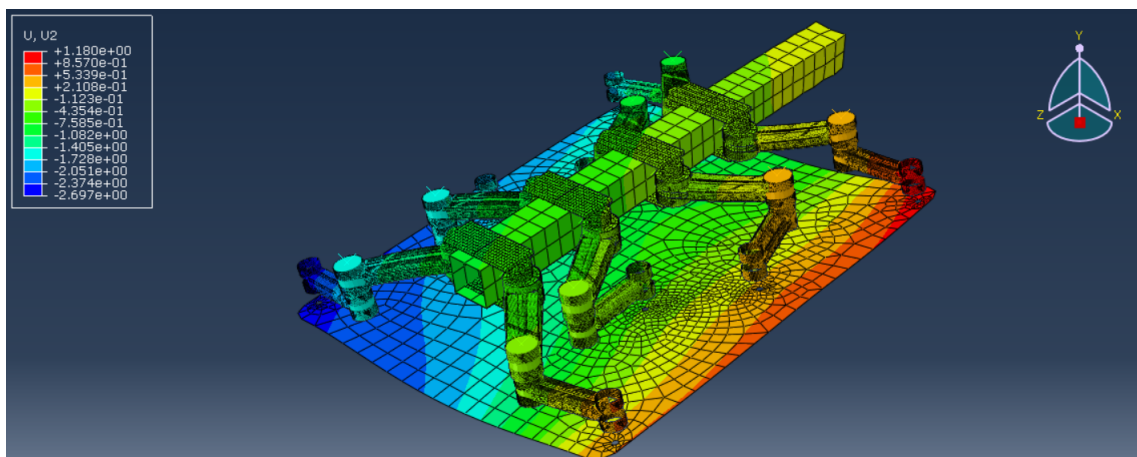


Obr. 4.19: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X





Obr. 4.20: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X



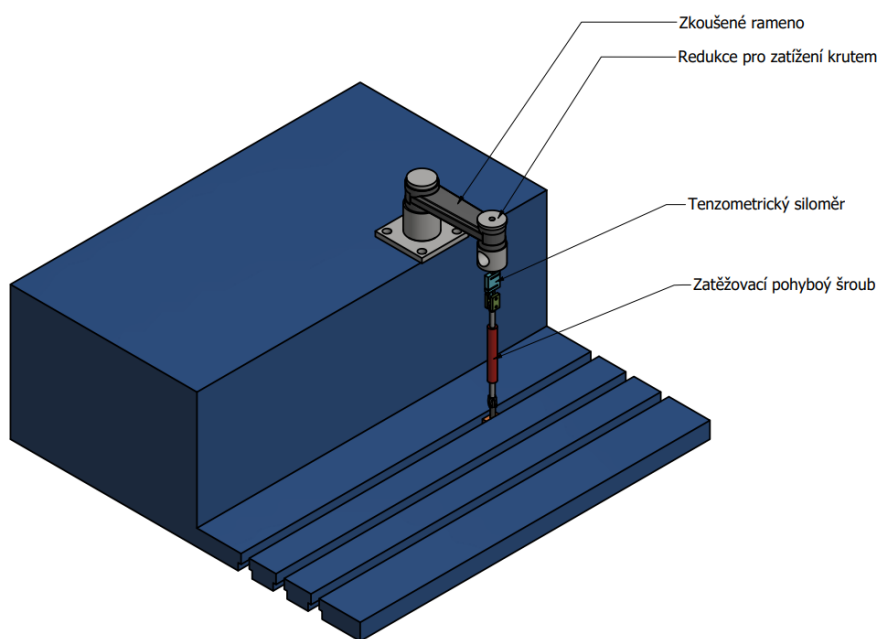
Obr. 4.21: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X

## 4.2 Experimentální měření

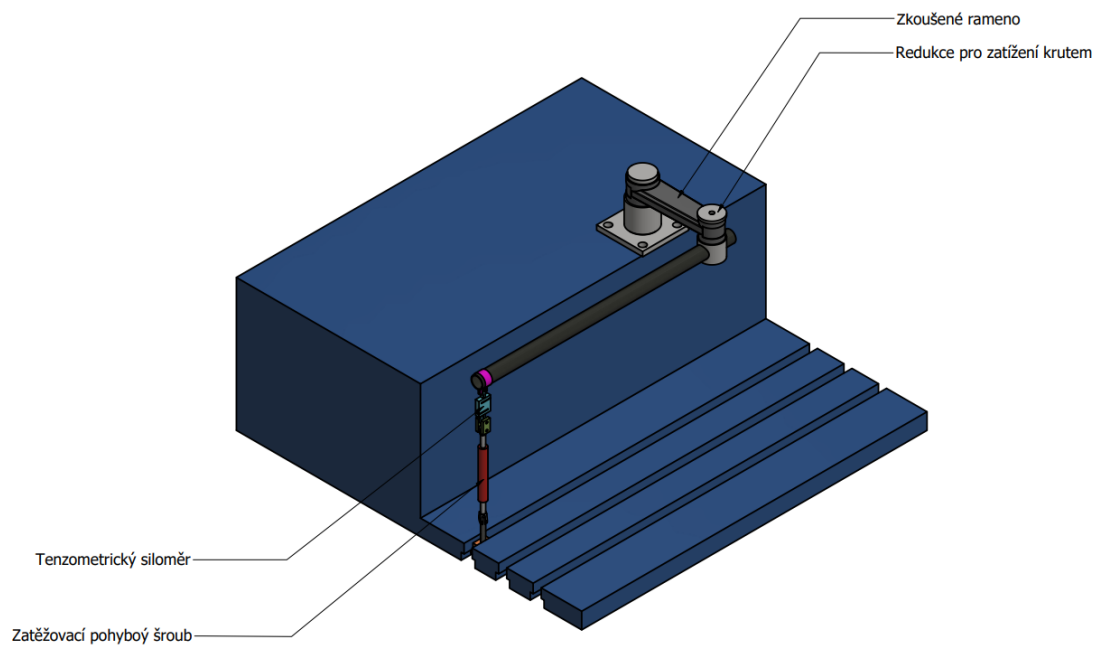
Experimentální měření probíhalo nikoliv na celém manipulátoru, ale pouze na větším z dvojice ramen s integrovaným spojem. Cílem experimentu bylo ověřit velikosti deformace ramena s integrovaným spojem při zatížení, které může odpovídat provozu manipulátoru. Ze simulace je zřejmé, že ramena manipulátoru budou namáhána v ohybu, ale současně i v krutu (poměr podle pozice ramen). Pro testování byla navržena sestava, která umožní zatížit vyrobené rameno v ohybu i v krutu. Experiment byl také využit k ověření výpočtových modelů.

K dosažení zatěžování krouticím momentem byla navržena redukce pro vsazení zatěžovací trubky představující rameno síly. Při zatížení přes redukci a zatěžovací trubku ale docházelo ke kombinovanému namáhání - krut a ohyb.

Pro měření byly navrženy dvě konfigurace upnutí a zatěžování dle obrázků 4.22 a 4.23. Zatěžování poté probíhalo schodově po krocích 5 kg do maximálního zatížení 45 kg, aby nedošlo k překročení maximální hodnoty siloměru (50 kg). Toto zatížení bylo aplikováno při ohybovém namáhání přímo na konci měřeného ramena dle obrázku 4.22 a při měření krutu (kombinovaného s ohybem) bylo toto zatížení aplikováno na trubku představující rameno momentu dlouhé 1 m.



Obr. 4.22: Sestava v konfiguraci pro měření v ohybu



Obr. 4.23: Sestava v konfiguraci pro měření v krutu s ohybem

### 4.2.1 Senzory a umístění

Pro měření byly vyrobeny 3 zkušební vzorky. Vzhledem k tomuto nízkému počtu vzorků bylo třeba umístit všechny senzory na každý vzorek (nebylo možné testovat ohyb na jedné sadě vzorků a krut na druhé).

Na rameni je potřeba sledovat několik deformací a vybrat pro ně vhodné senzory a umístění. Důležité deformace:

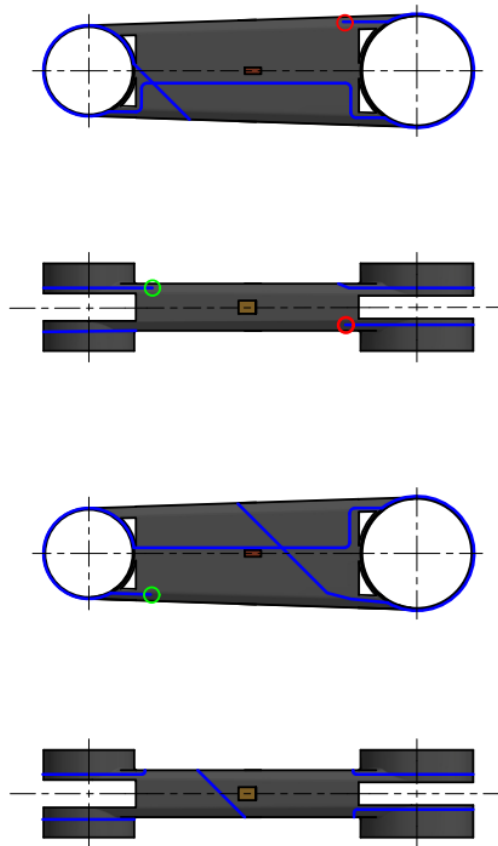
- podélná deformace horního vlákna
- podélná deformace spodního vlákna
- krutová deformace
- deformace kolem koncentrátorů napětí

Pro analýzu podélných a krutových deformací byly zvoleny tenzometry. Na zkoušená ramena bylo následně připevněno optické vlákno, které pokrývalo podélnou

deformaci horního i spodního vlákna, krutovou deformaci a také deformaci připojovacích částí integrovaných spojů.

Optické senzory byly typu DFOS ("distributed fiber optic sensing") a fungují tak, že optickým vláknem, připevněným na monitorovanou součást, prochází laserový paprsek o specifické vlnové délce. Tento paprsek je vysílán z ústředny a odraží se uvnitř optického vlákna ve směru od vysílací ústředny i ve směru zpět k ní. Optické vlákno měří po celé své délce v daných úsecích. V závislosti na deformaci vlákna dochází ke změně ve specifické vlnové délce díky jevům rozptylu světla při odrazu, což umožňuje vzniklou deformaci měřit. [6]

Umístění senzorů na součásti bylo navrženo tak, aby si tenzometry a optické vlákno nepřekážely při aplikaci. Zároveň bylo navrženo tak, aby byly senzory dostatečně blízko u sebe, aby bylo možné je vzájemně porovnat. Poloha senzorů na součástech je na obrázku 4.24.



Obr. 4.24: Umístění senzorů na zkoušeném tělese

Tmavší hnědá barva zastupuje podélné tenzometry, světlejší hnědá barva tenzometrické kříže pro měření krutu a modrá barva označuje optické vlákno. Začátek optického vlákna je označen zeleným kruhem a je vedeno přes všechny integrované spoje, přes podélnou deformaci horního a spodního vlákna a pod úhlem  $45^\circ$  pro měření krutové deformace.

Pro zaznamenání poměrných deformací byly využity měřicí ústředny. Pro zaznamenání tenzometrů byla využita ústředna HBM QuantumX MX1615B, která měřila s frekvencí 300 Hz. Podélné tenzometry dle katalogu [7] měly označení LY41-6/350 a tenzometrické kříže měly označení XY41-6/350. L označuje lineární tenzometr, X označuje tenzometrický kříž, Y značí konstantanový drátek v polyimidové fólii, číslo 4 označuje konstrukční řešení (s pájecími body pro vlastní drátky), číslo 1 označuje teplotní roztažnost shodnou s feritickou ocelí, číslo 6 označuje délku měřicí mřížky a číslo 350 odpor tenzometru. Tenzometry byly přilepeny lepidlem HBM X60, které zajistilo vyplnění nerovností na povrchu součásti.

Pro zaznamenání dat z optického vlákna byla využita ústředna Luna ODiSI 6101, která měřila s frekvencí 62.5 Hz a jako vlákno bylo použito skleněné vlákno o průměru  $155 \mu\text{m}$  obalené polyimidovou ochranou, přilepené na povrch lepidlem Kyowa CC-33A. Zelený konec označuje místo připevnění začátečního konektoru a červený konec označuje místo připevnění bezodrazového vlákna. Vlákno měřilo po celé své délce v úsecích dlouhých 2.6 mm.

## 4.2.2 Výsledky měření

Výsledky měření jsou demonstrovány na vzorcích se zřetelnými výsledky. Grafy ze všech zkušebních těles jsou dostupné v přílohách.

Všechny výstupy, u kterých to bylo možné, byly zbaveny nefyzikálních dějů, které byly dány například překročením povolených hodnot senzorů, možným poškozením senzorů při aplikaci, či ustalováním na začátku zatěžování.

Všechny deformace byly převedeny na svou absolutní hodnotu, aby bylo zřetelné porovnání mezi jednotlivými senzory. Tedy například při ohybu by docházelo k natažení horního vlákna (kladná deformace) a zkrácení spodního vlákna (záporná deformace), ale v grafu budou tyto hodnoty obě kladné.

Výstupem z měření byl záznam poměrných prodloužení na čase a síly na čase, a to pro zkoušku v ohybu i pro zkoušku v krutu. Síla v [N] byla získána v podobě hmotnosti v [kg] zavěšené na siloměru. Převod na sílu byl přes gravitační konstantu. Poměrné deformace byly změřeny v  $[\mu m/m]$  a bylo je nutné převést na  $[m/m]$ .

Pro vyjádření deformací a zatížení vhodných pro výpočet tuhostí byl potřeba převod jednotlivých měřených výstupů do tvarů v rovnicích 2.32 a 2.33. Rovnice pro převod síly na ohybový moment:

$$M_o [N.mm] = F [N] * l [mm] \quad (4.1)$$

Zde  $l$  představuje vzdálenost od podpory k tenzometru.

Rovnice pro převod síly na krouticí moment:

$$M_k [N.mm] = F [N] * L [mm] \quad (4.2)$$

Zde  $L$  představuje délku trubky, přes kterou se zatěžuje.

Rovnice pro převod podélné deformace na křivost:

$$\kappa_y [1/mm] = \frac{\epsilon_o [m/m]}{h/2 [mm]} \quad (4.3)$$

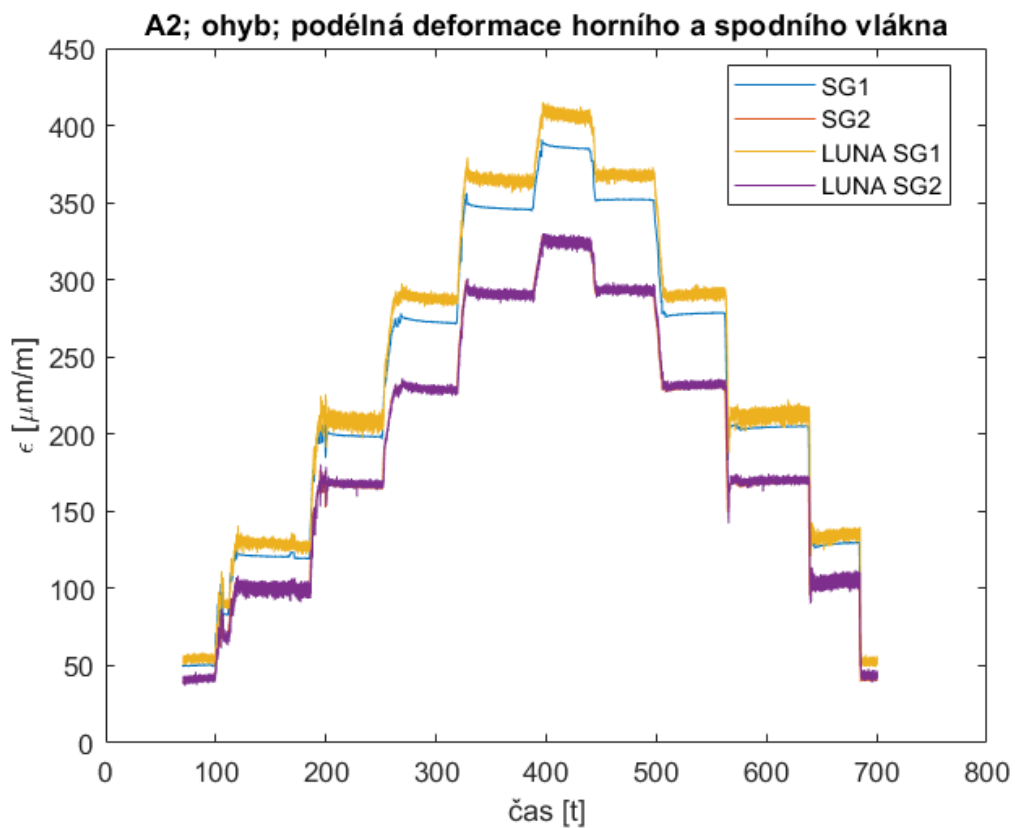
Zde  $h$  představuje výšku průřezu nosníku.

Rovnice pro převod smykové deformace na zkrut:

$$\theta [1/mm] = \frac{2 * \epsilon_{lt} [m/m]}{R [mm]} \quad (4.4)$$

Zde  $R$  představuje střední průměr nosníku.

Z grafu na obrázku 4.25 lze zřetelně odečíst, že všechny čtyři senzory, které by měly měřit shodně, kopírují své průběhy velmi dobře. Senzory s číslem 1 umístěny na horním vlákne mají odchylku přibližně  $50 \mu m/m$  a senzory s číslem 2 umístěny na spodním vlákne jsou zde takřka nerozpoznatelné od sebe.



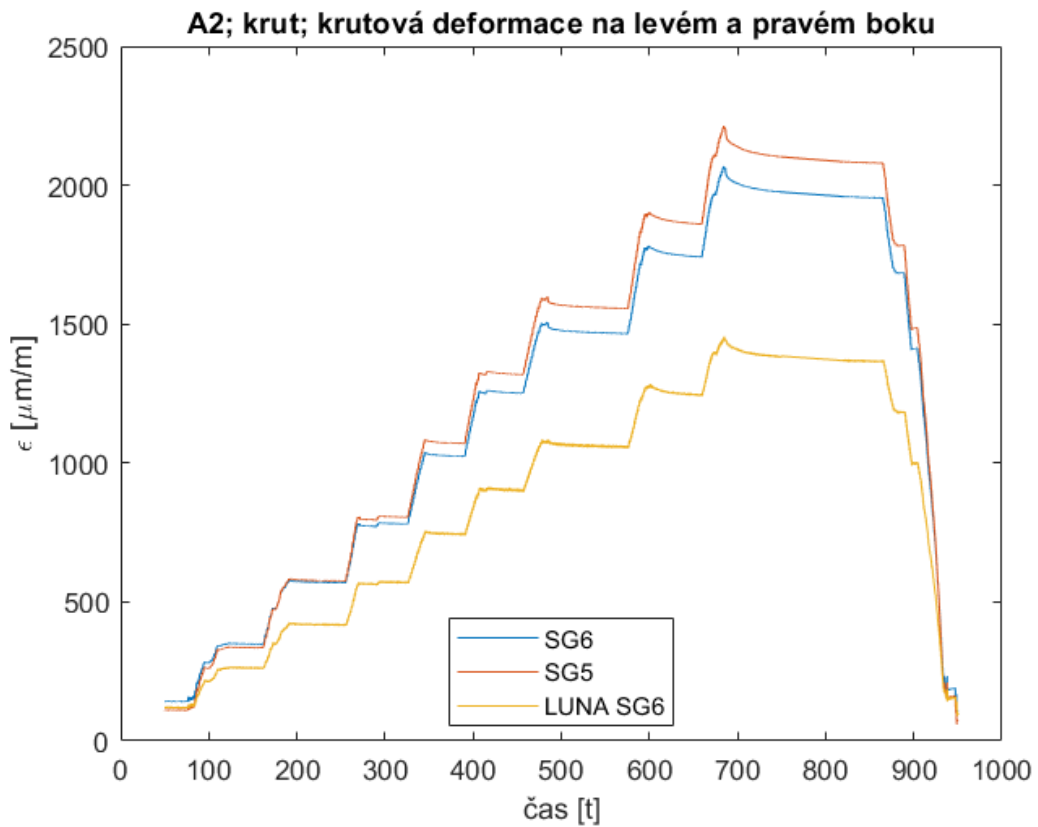
Obr. 4.25: Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A2

Ideální průběh ale při měření nebyl standardem. Nebylo výjimkou, že se některý ze senzorů oddálil ostatním, či vůbec neměřil. V tabulce 4.7 je popsáno, které senzory měřily, neměřily a které se odchýlily svou hodnotou ostatním.

Tab. 4.7: Zhodnocení měřidel při ohybu

	SG1	SG2	Luna SG1	Luna SG2
<b>A1</b>	měří srovnatelně	měří srovnatelně	měří srovnatelně	neměří
<b>A2</b>	měří srovnatelně	měří srovnatelně	měří srovnatelně	měří srovnatelně
<b>A3</b>	měří odchýleně	měří srovnatelně	měří srovnatelně	měří mírně odchýleně

Při zaznamenávání deformací v krutu, jak je vidět na obrázku 4.26, již byla odchylka mezi senzory výraznější, a to hlavně mezi optickým vláknem a tenzometry. Tenzometry mezi sebou měřily srovnatelně, ale optické vlákno měřilo s výraznou odchylkou.

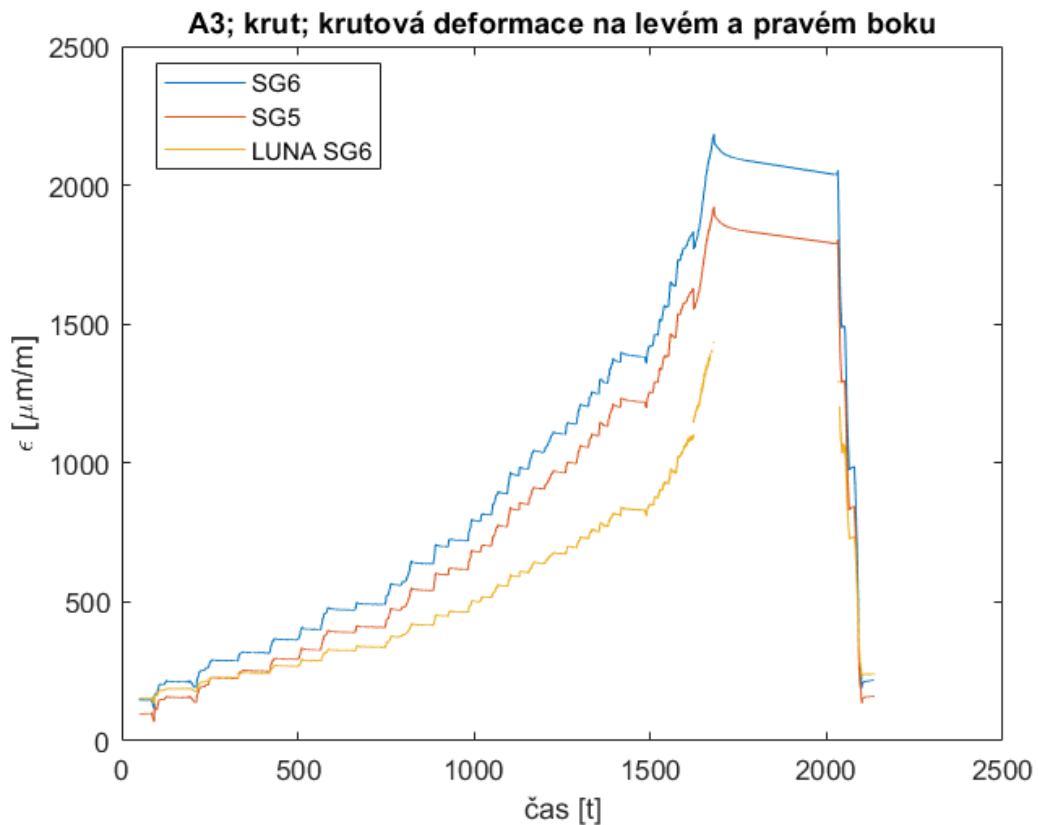


Obr. 4.26: Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A2



Při zatěžování krouticím momentem byla problematika senzorů ještě o něco větší, vzhledem k výrazně větším poměrným prodloužením.

Omezení optického vlákna je přibližně  $3000 \mu\text{m}/\text{m}$ . Toto omezení neplatí od hodnoty nastavené jako referenční nula při iniciaci měření. V tomto případě jde o skutečnou deformaci vlákna. Při aplikaci vlákna je tedy možné senzor připravovat o jeho dostatečný rozsah. Výsledkem měření s takovýmto senzorem pak byl neúplný záznam deformace, který neměřil vyšší hodnoty deformace jako v případě tělesa A3 v grafu na obrázku 4.27.



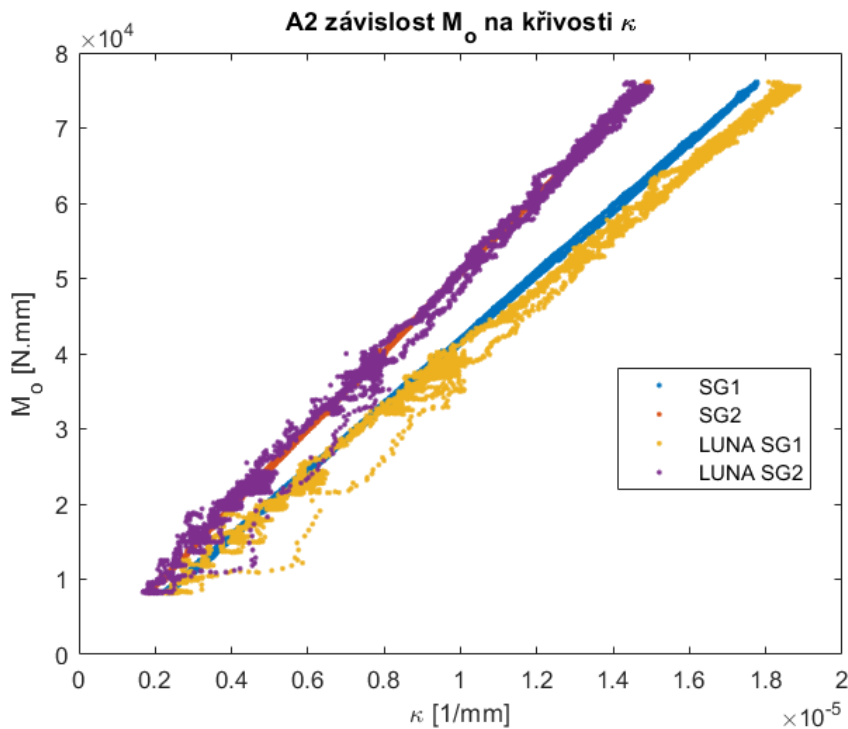
Obr. 4.27: Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A3

V případě měření krutu byly senzory zhodnoceny dle tabulky 4.8. Optická vlákna v krutu měřila všechna s mírnou odchylkou, což mohlo být dáno více faktory. Hlavním faktorem bylo pravděpodobně to, že při měření byly senzory vystaveny hodnotám deformace, které jsou již na mezi jejich schopností.

Tab. 4.8: Zhodnocení měřidel při krutu

	SG5	SG6	Luna SG6
<b>A1</b>	měří srovnatelně	měří srovnatelně	neměří
<b>A2</b>	měří srovnatelně	měří srovnatelně	měří mírně odchýleně
<b>A3</b>	měří odchýleně	měří srovnatelně	měří mírně odchýleně

Cílem experimentu bylo zjistit tuhosti, pro něž bylo třeba převést závislosti z ohybového měření na závislost ohybového momentu na křivosti dle rovnic 4.1 a 4.3 a závislost z krutového měření na závislost krouticího momentu na zkrutu dle rovnic 4.2 a 4.4. Pro demonstraci je využito měření na tělese A2 na grafu v obrázku 4.28.



Obr. 4.28: Závislost pro odečtení ohybové tuhosti tělesa A2

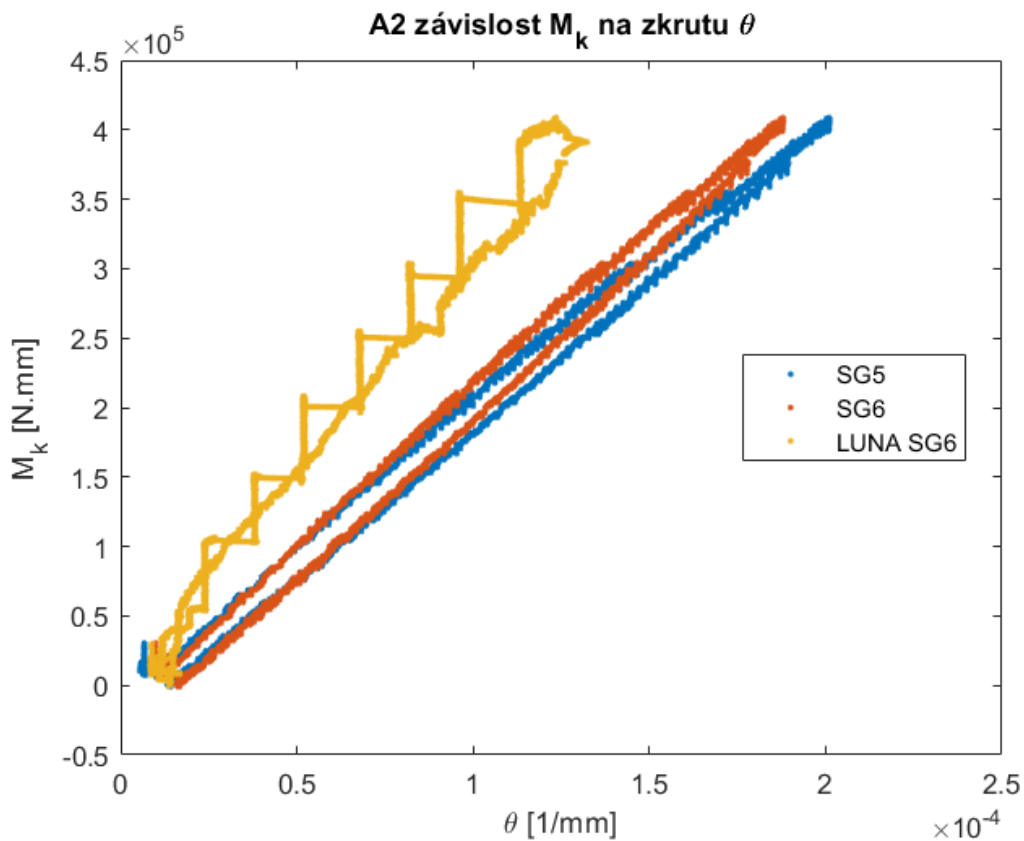
Každý senzor v grafu byl podroben lineární regresi. Ze získaných směrnic přímk byla vyhodnocena ohybová tuhost podle rovnice 2.32.

Ekvivalentní tuhosti v ohybu, jak vyšly podle jednotlivých zkušebních těles a jednotlivých senzorů, jsou v tabulce 4.9.

Tab. 4.9: Ekvivalentní ohybové tuhosti ramena vypočtené z experimentu

$(EJ_{yy})_{ekv} [N.mm^2]$	SG1	SG2	Luna SG1	Luna SG2
<b>A1</b>	$4.785 \cdot 10^9$	$4.616 \cdot 10^9$	$4.031 \cdot 10^9$	-
<b>A2</b>	$4.363 \cdot 10^9$	$5.187 \cdot 10^9$	$4.163 \cdot 10^9$	$5.185 \cdot 10^9$
<b>A3</b>	-	$5.689 \cdot 10^9$	$4.467 \cdot 10^9$	$6.208 \cdot 10^9$

Získání krutových tuhostí je demonstrováno na měření z tělesa A2 v grafu na obrázku 4.29.



Obr. 4.29: Závislost pro odečtení krutové tuhosti tělesa A2

U odečítání krutové tuhosti opakovaně docházelo k tomu, že optické vlákno měřilo menší deformace než tenzometry (tedy z něj vychází větší tuhost). Tento fakt může být daný tím, že se vlákno blížilo své krajní hodnotě a tedy už neměřilo přesně.

Tuhosti vypočtené dle rovnice 2.33 jsou vypsány v tabulce 4.10 dle jednotlivých senzorů a zkušebních těles.

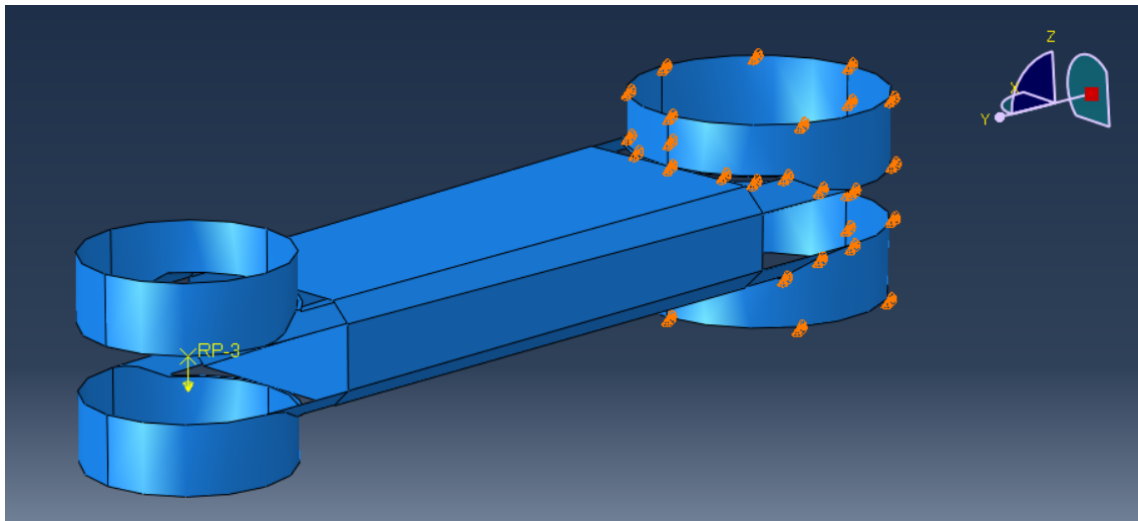
Tab. 4.10: Ekvivalentní krutové tuhosti ramena vypočtené z experimentu

$(GJ_t)_{ekv} [N.mm^2]$	SG1	SG2	Luna SG6
<b>A1</b>	2.325*10 <sup>9</sup>	2.193*10 <sup>9</sup>	-
<b>A2</b>	2.066*10 <sup>9</sup>	2.251*10 <sup>9</sup>	3.139*10 <sup>9</sup>
<b>A3</b>	2.402*10 <sup>9</sup>	2.161*10 <sup>9</sup>	3.728*10 <sup>9</sup>

### 4.2.3 Porovnání MKP, experimentu a analytických výpočtů

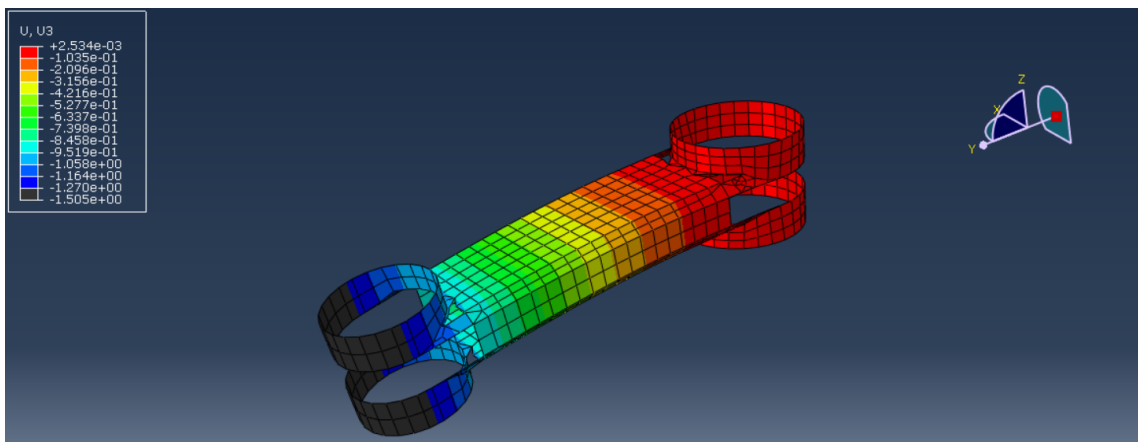
Pro porovnání dat z experimentu, analytického výpočtu a MKP výpočtu bylo nejprve nutné vybrat porovnatelné hodnoty. Byla provedena jednodušší simulace, představující měřicí konfiguraci pro ohyb a pro krut. Tato data byla napřímo porovnatelná s výsledky z experimentu. Analytický výpočet vždy počítal pouze se střední částí ramen, nikoliv s integrovaným spojem. Analytický výpočet měl méně vypovídající hodnotu, byl zde pouze pro ujištění, že ostatními způsoby vychází tuhosti nižší.

Pro simulaci bylo využito větší z dvojice ramen o shodné materiálové skladbě jako v simulaci celého konstrukčního řešení. Rameno bylo vetknuto za velké oko integrovaného spoje jako při samotném měření. V případě ohybové zkoušky bylo rameno pouze zatíženo osamnělou silou o velikosti 500 N na konci dle obrázku 4.30.



Obr. 4.30: Model pro simulaci ohybové zkoušky

Ekvivalentní ohybová tuhost byla vypočítána z průhybu ramena. Jako průhyb byl brán rozdíl mezi posuvy bodů v polovině ok integrovaných spojů. Výsledky ukazuje obrázek 4.31.

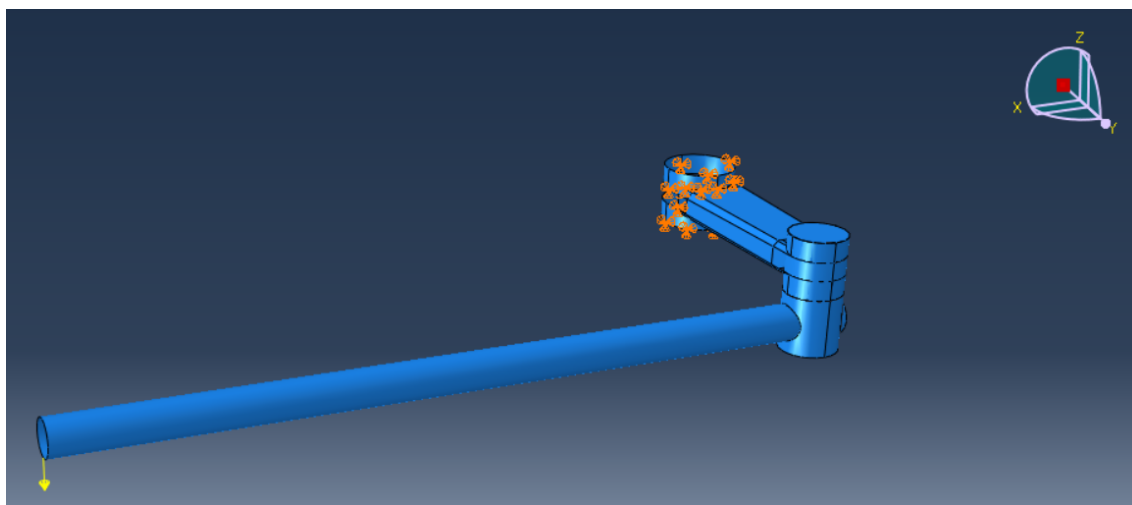


Obr. 4.31: Výsledky simulace ohybové zkoušky

Ekvivalentní ohybová tuhost byla spočítána ze vzorce pro průhyb vetknutého nosníku:

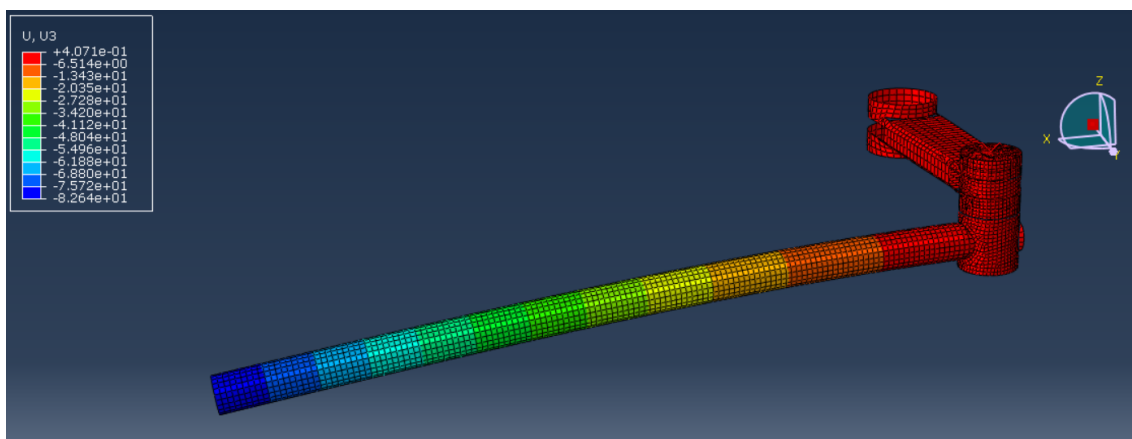
$$(EJ)_{ekv} = \frac{1}{3} \frac{Fl^3}{u} = \frac{1}{3} \frac{500 * 300^3}{1.27} = 3.54 * 10^9 N.mm^2 \quad (4.5)$$

V případě krutové zkoušky byla na konci ramena umístěna spojka pro připojení krutové tyče. Zatížení bylo provedeno osamnělou silou o velikosti 500 N ve vzdálenosti 1 m od osy oka integrovaného spoje. Vše je znázorněno na obrázku 4.32.



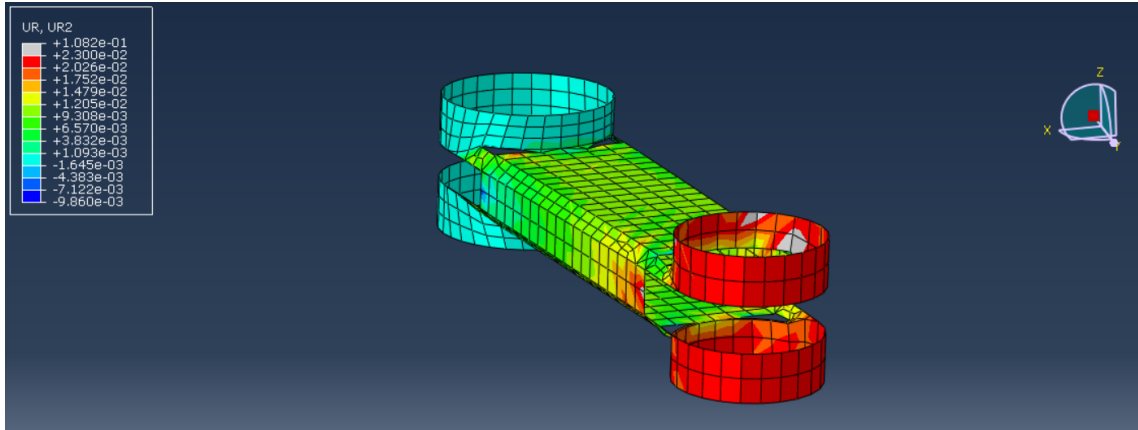
Obr. 4.32: Model pro simulaci krutové zkoušky

Pro kontrolu byl porovnán i rozdíl průhybů zatěžovací trubky mezi připojením do redukce a zatíženým koncem.



Obr. 4.33: Kontrola průhybu v simulaci krutové zkoušky

V simulaci (dle obrázku 4.33) i při měření byl zaznamenán rozdíl průhybů 80 mm  $\pm$  2 mm. Dále bylo z obrázku 4.34 odečteno natočení obou ok integrovaných spojů a z nich odečteno vzájemné natočení.



Obr. 4.34: Výsledky simulace krutové zkoušky

Tuhost byla spočítána ze vzorce pro natočení vetknutého nosníku:

$$(GJ_t)_{ekv} = \frac{M_k l}{\phi} = \frac{500000 * 300}{0.023} = 6.5 * 10^9 N.mm^2 \quad (4.6)$$

Pro analytický výpočet byly využity vzorce 2.34, 2.35 a 2.36. Výsledky jednotlivých tuhostí:

$$(EJ_{yy})_{ekv} = 7.09 * 10^9 N.mm^2 \quad (4.7)$$

$$(EJ_{zz})_{ekv} = 1.95 * 10^{10} N.mm^2 \quad (4.8)$$

$$(GJ_t)_{ekv} = 1.42 * 10^{10} N.mm^2 \quad (4.9)$$

Tyto tuhosti počítají pouze se střední částí nosníku. Nepočítají nic, co se týká integrovaných spojů, a slouží pouze jako řádový odhad.

Tab. 4.11: Tabulka porovnání tuhostí získaných různými metodami

	Experiment	MKP	Analytika
$(EJ_{yy})_{ekv}$	$4.54 * 10^9$	$3.54 * 10^9$	$7.09 * 10^9$
$(GJ_t)_{ekv}$	$2.23 * 10^9$	$6.5 * 10^9$	$14.2 * 10^9$

V tabulce 4.11 jsou tuhosti získané z experimentu vybrány jako medián ze všech měření na všech tělesech.

#### 4.2.4 Porovnání chování v koncentrátorech napětí

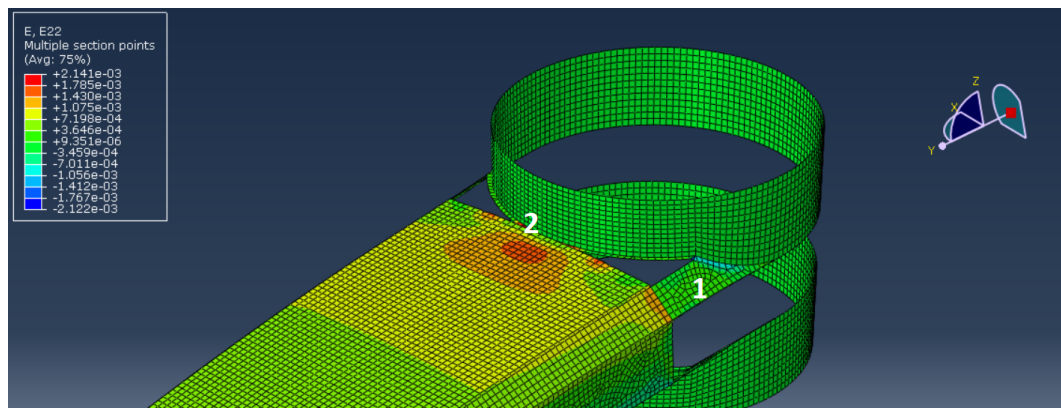
Hlavním cílem aplikace optického vlákna bylo měřit deformace po celé součásti. Vlákno bylo navinuto i na připojení integrovaných spojů, kde se kvůli menšímu množství materiálu a ostrým přechodovým hranám dá počítat s koncentrací deformace a napětí.

Pro porovnání byla vybrána propojení s integrovaným spojem, u kterých je očekávána největší zatíženost. Jedná se o propojení s velkým okem, které je vetknuté.

Pro tyto výpočty byla zjemněna síť na ramenech na 2 mm, stejně jako v celkové simulaci, pro získání bližšího chování v menších částech geometrie. Porovnání probíhalo se senzory navinutými kolem velkého oka ramene na horní straně, kde docházelo k největším deformacím.

Bohužel z experimentu není velké množství dat k porovnání vzhledem k tomu, že optické vlákno na tělese A1 přestalo měřit. Podobně tak části vlákna na tělese A3. V případě tělesa A2 je výsledků více, ale vzhledem k vysokým deformacím již senzory nebyly schopny některé deformace měřit.

Porovnávány budou hodnoty v oblastech označených v obrázku 4.35 čísly 1 a 2. Oblast 1 označuje propojení s okem spoje pomocí axiálních vláken, oblast 2 propojení s okem pomocí vláken cross vrstvy.

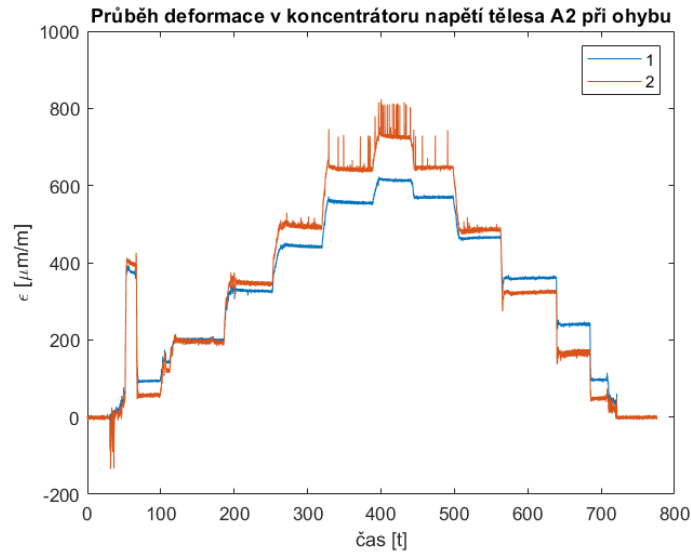


Obr. 4.35: Označení koncentrátorů napětí při ohybu

Hodnoty poměrného prodloužení ze simulace viditelné na obrázku 4.35 se (po převedení jednotek) pohybovaly mezi 300-700  $\mu m/m$  pro spoj 1 tvořený axiálními

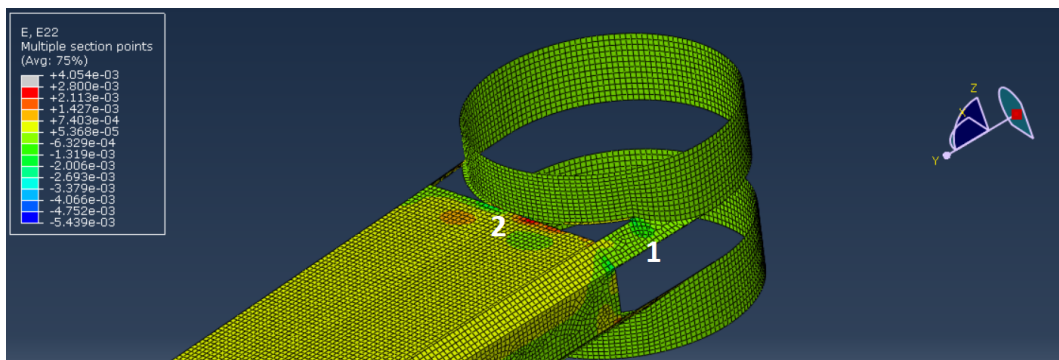


vrstvou. Pro spoj 2 tvořený cross vrstvou dosahovaly hodnot i výrazně vyšších, dosahujících až na  $2000 \mu m/m$ .



Obr. 4.36: Průběh deformace při v koncentrátoru při zkoušce ohybem

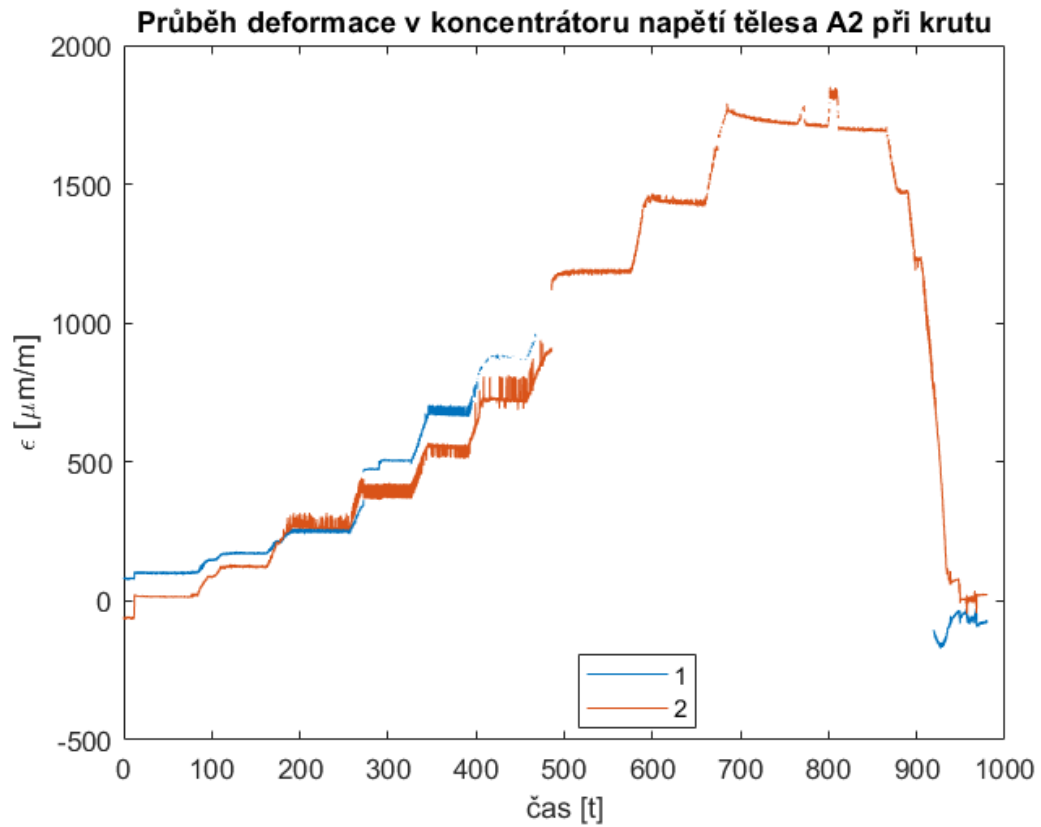
Z grafu na obrázku 4.36 lze vyčíst, že hodnoty deformace ve spoji 1 tvořeném axiální vrstvou je dosaženo hodnoty  $600 \mu m/m$ , což spadá do rozmezí získaného v simulaci. Ve spoji tvořeném cross vrstvou jsou deformace dle grafu rozhodně vyšší, nedosahují ale v simulaci zmíněných  $2000 \mu m/m$ . Otázkou ale je, zda data neodpovídají místu vzdálenějšímu od největší koncentrace. Všechny okolní body senzoru totiž byly přetíženy a již neměřily.



Obr. 4.37: Označení koncentrátorů napětí při krutu

V případě krutového zatěžování byl dle simulace více zatížen spoj 2 tvořený cross vrstvou. Bohužel tentokrát to nelze potvrdit pomocí dat z grafu, jelikož senzor

byl při takto velkém zatížení poškozen a přestal měřit. Na částech senzoru, které stále měřily i přes velké zatížení, vystoupalo poměrné prodloužení ve spoji 2 až na  $1800 \mu m/m$ , což je velmi blízko  $2000 \mu m/m$  dosženým v simulaci ve spoji 2.



Obr. 4.38: Průběh deformace při v koncentrátoru při zkoušce krutem

## 5 Optimalizace částí manipulátoru

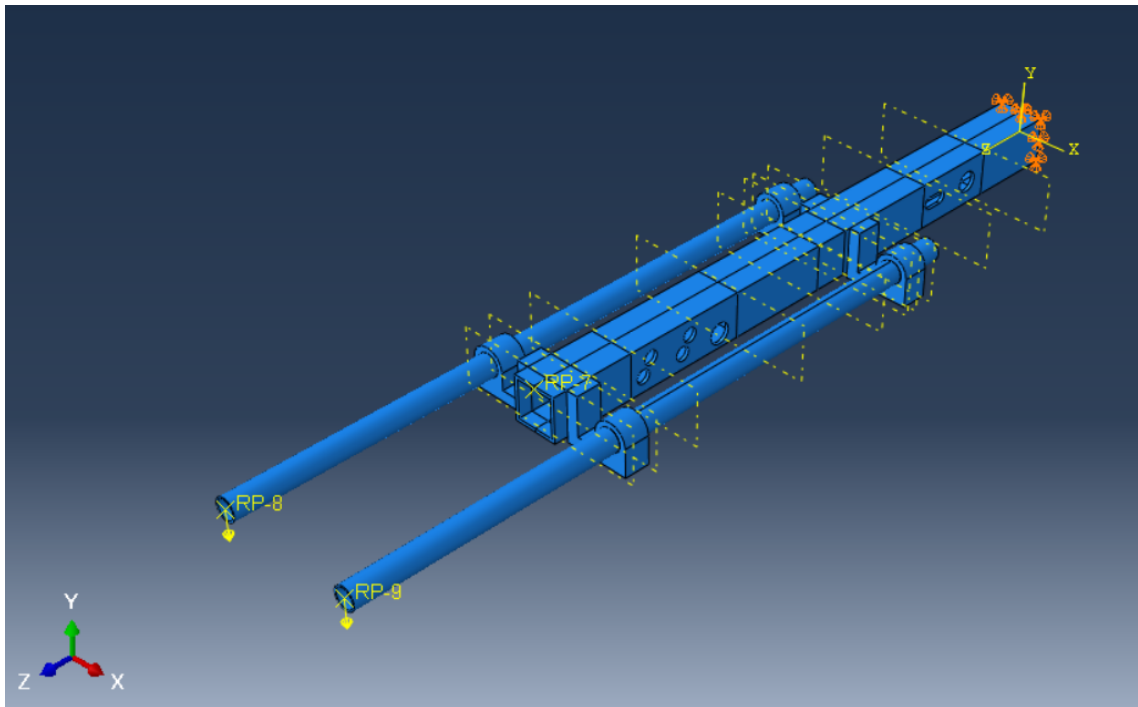
Kapitola nejprve porovná centrální nosníky manipulátorů. Tato část je totiž pro výslednou tuhost manipulátoru dominantní. Následně bude představen princip skladby materiálu pro ramena manipulátoru a bude vybrána optimální skladba ramen. Tato optimální skladba bude porovnána s materiálovou skladbou, na které proběhlo měření.

### 5.1 Porovnání tuhostí centrálních částí

Porovnání tuhostí centrálních částí proběhlo analytickým a MKP výpočtem pro oba centrální nosníky - duralový i kompozitový.

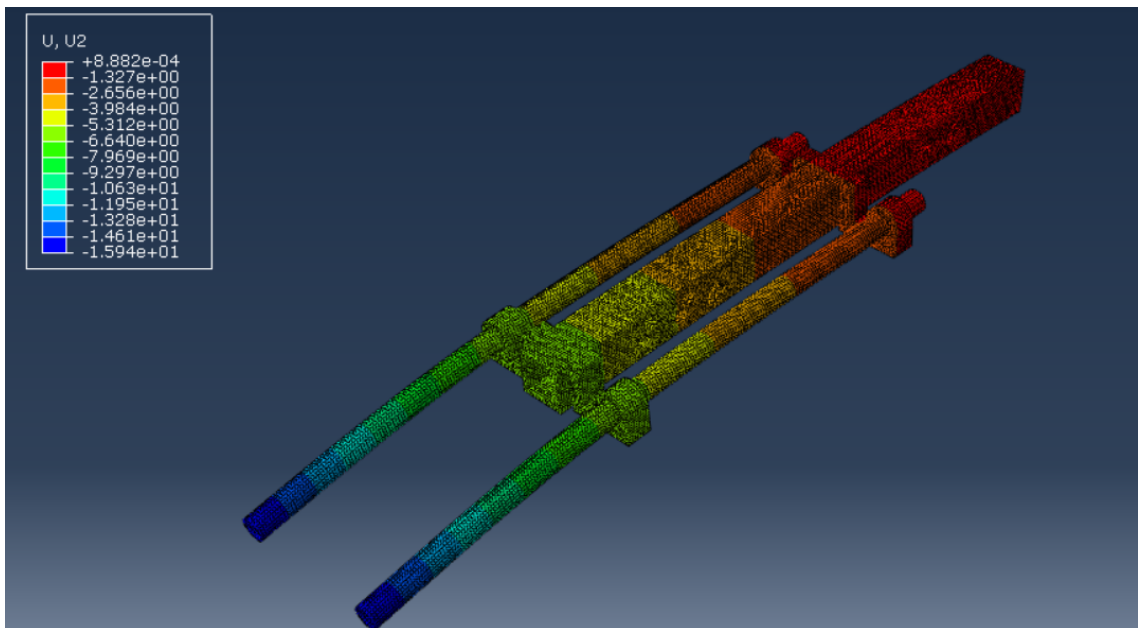
#### 5.1.1 Duralová centrální část manipulátoru

MKP centrální části duralového manipulátoru bylo provedeno na části modelu, který simuloval celé technické řešení. Model obsahoval pouze centrální část, byl vetknutý shodně s předchozím řešením a byl shodně vysítován. Rozdíl mezi kompletním modelem a modelem centrálního nosníku spočíval v zatížení. Centrální nosník byl zatížen osamnělými silami v součtu 1000 N rozdělenými na levý a pravý konec (500 N a 500 N) dle obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Model centrální části duralového manipulátoru

Na zdeformovaném nosníku na obrázku 5.2 byl odečten posuv koncových bodů (maximální průhyb) a z něj byla následně vypočítána ohybová tuhost.



Obr. 5.2: Posuvy na centrální části duralového manipulátoru

Ze získaného průhybu byla vypočítána ohybová tuhost  $EJ$  dle vzorce pro vetknutý nosník zatížený na konci osamnělou silou. Délka nosníku byla 1480 mm, síla 1000 N a odečtený průhyb 15.94 mm.

$$u = \frac{1}{3} \frac{Fl^3}{EJ} \Rightarrow EJ = \frac{Fl^3}{3u} \quad (5.1)$$

$$EJ = \frac{1000 * 1480^3}{3 * 15.94} = 6.78 * 10^{10} \text{ N.mm}^2 \quad (5.2)$$

Analytický výpočet pro stejnou tuhost byl proveden dle následujících rovnic pro sčítání sériových a paralelních tuhostí  $\frac{EJ}{l}$ :

Sériově:

$$\frac{l}{EJ} = \sum \frac{l_i}{E_i J_i} \quad (5.3)$$

Paralelně:

$$\frac{EJ}{l} = \sum \frac{E_i J_i}{l_i} \quad (5.4)$$

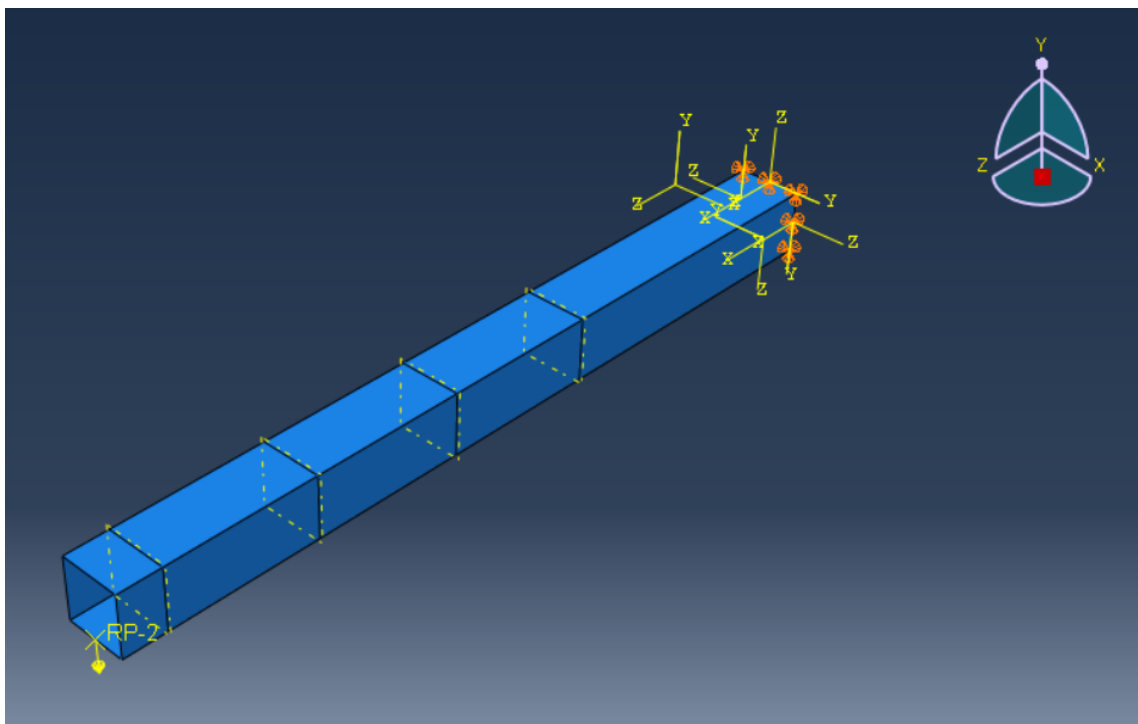
Výsledná rovnice po dosazení hodnot:

$$\frac{1480}{EJ} = \frac{460}{1.1584 * 10^{11}} + \frac{620}{1.1584 * 10^{11} + 2 * 4.26 * 10^9} + \frac{400}{2 * 4.26 * 10^9} \quad (5.5)$$

$$EJ = 2.65 * 10^{10} \text{ N * mm}^2 \quad (5.6)$$

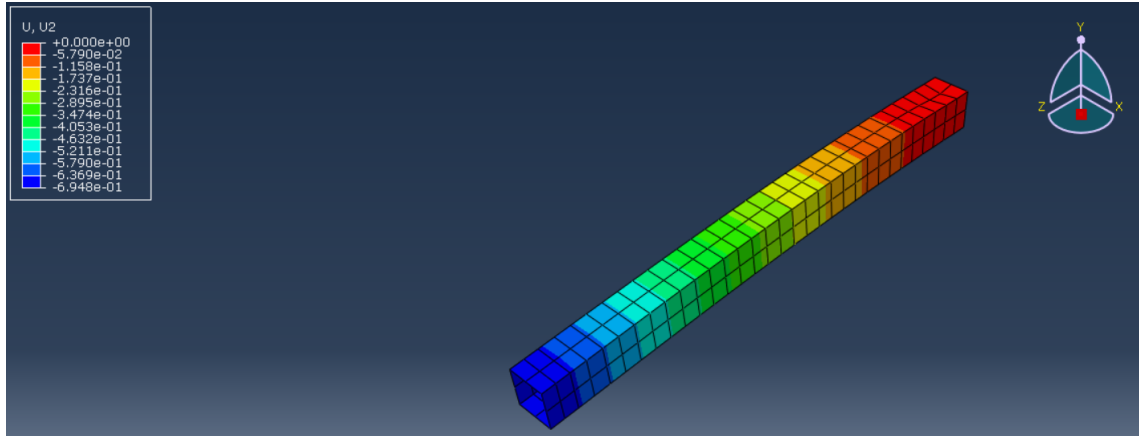
### 5.1.2 Kompozitová centrální část manipulátoru

MKP simulace centrálního kompozitového nosníku probíhala na části modelu, na které proběhla celá simulace. Nosník byl shodně vetknut a vysíťován. Jediný rozdíl byl v zatížení. Nosník byl zatížen osamnělou silou o velikosti 1000 N dle obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Centrální nosník kompozitového manipulátoru

Ze získaného průhybu byla vypočítána ohybová tuhost  $EJ$  dle vzorce pro vetknutý nosník zatížený na konci osamnělou silou. Délka nosníku byla  $1575 \text{ mm}$ , síla  $1000 \text{ N}$  a odečtený průhyb  $0.6948 \text{ mm}$  z obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Posuvy na centrálním nosníku kompozitového manipulátoru

$$u = \frac{1}{3} \frac{Fl^3}{EJ} \Rightarrow EJ = \frac{Fl^3}{3u} \quad (5.7)$$

$$EJ = \frac{1000 * 1575^3}{3 * 0.6948} = 1.874 * 10^{12} \text{ N.mm}^2 \quad (5.8)$$

Taková ohybová tuhost by v nejhorším případě (porovnání s nejvyšší vypočtenou hodnotou tuhosti duralového řešení) byla stále 27krát větší než tuhost centrální části duralového řešení.

Analytickým výpočtem dle rovnice 2.34, vyjadřující ekvivalentní ohybovou tuhost, vychází tuhost nosníku:

$$(EJ_{yy})_{ekv} = 2.49 * 10^{12} \text{ N.mm}^2 \quad (5.9)$$

Výpočet pomocí MKP leží v tomto případě na bezpečnější straně. Oba výpočty ukazují, že tuhost kompozitového nosníku se standardní skladbou firmy je v ohybové tuhosti dostačující.

## 5.2 Materiálová skladba pro ramena manipulátoru

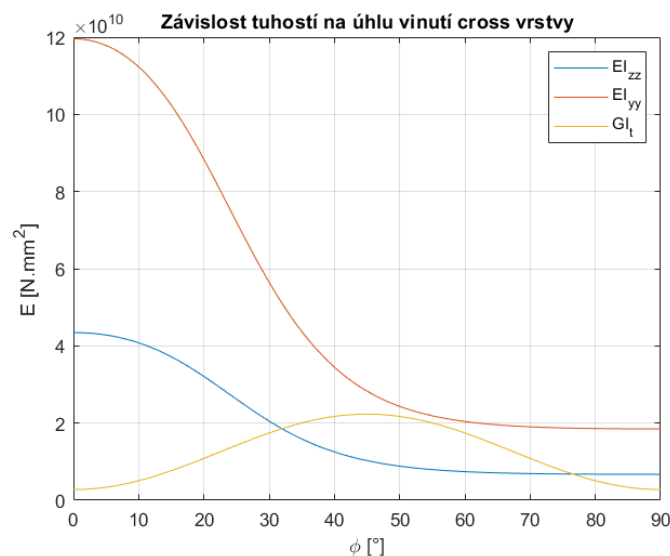
Technologie výroby pro ramena s integrovaným spojem prozatím využívá skladbu s pouze jedním volitelným úhlem vinutí. Součást obsahuje technologické vrstvy  $\pm 88.4^\circ$ , dále obsahuje takzvané 'cross' vrstvy, jejichž úhel je volitelný, ale po zvolení zůstává jeden stejný pro celou součást (nastavením G kódu). Dále obsahuje axiální vrstvy  $0^\circ$ .

Cílem axiálních vláken je zajistit tahovou a tím pádem i ohybovou tuhost. Cílem cross vrstvy je zajistit dostatečnou tuhost v krutu, popřípadě přispět i částečně ohybové tuhosti.

Pro optimální skladbu je momentálně možné řešit úhel cross vrstvy a rozložení vrstev ve smyslu tloušťek jednotlivých vrstev.

Pro zjištění optimálních hodnot byly vytvořeny dvě jednoduché optimalizační úlohy. Jedna řešila pouze optimalizaci úhlu při zachování tloušťek jednotlivých vrstev. Druhá již počítala i s možností tloušťku změnit. Obě měly dosáhnout takové skladby, aby byla součást co nejodolnější v ohybu i v krutu.

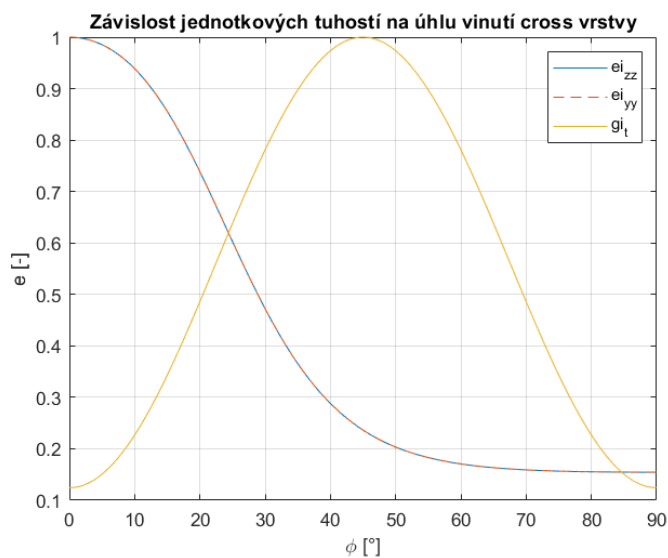
Nejprve byly získány závislosti ohybové a krutové tuhosti na úhlu vinutí cross vrstvy. Viz graf na obrázku 5.5.



Obr. 5.5: Jednotlivé tuhosti v závislosti na úhlu cross vrstvy

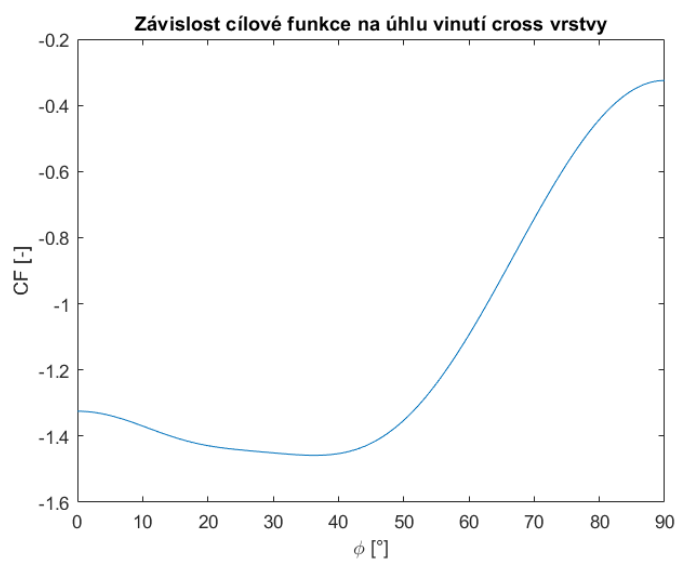


Každá tuhost byla vydělena svou maximální hodnotou. Tato závislost je vynesena do grafu na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Jednotlivé jednotkové tuhosti v závislosti na úhlu cross vrstvy

Cílovou funkcí, která je k vidění na obrázku 5.7, byl součet záporných hodnot ohybové a krutové tuhosti, které byly převedeny na jednotkový rozměr. Záporné hodnoty byly použity, protože optimalizační funkce programu Matlab mají od základu nastaveno hledat minimum, nikoliv maximum.

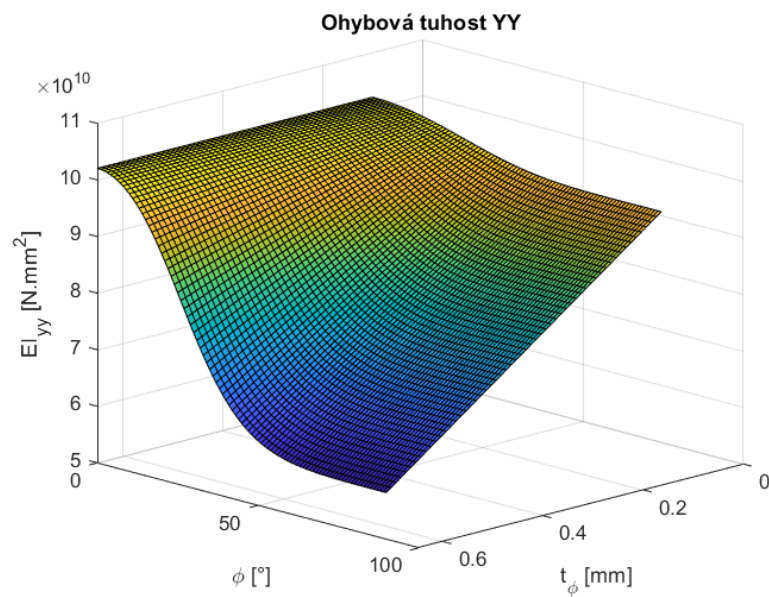


Obr. 5.7: Cílová funkce v závislosti na úhlu cross vrstvy

Z této závislosti byl nalezen optimální úhel cross vrstvy rovný  $36.32^\circ$ .

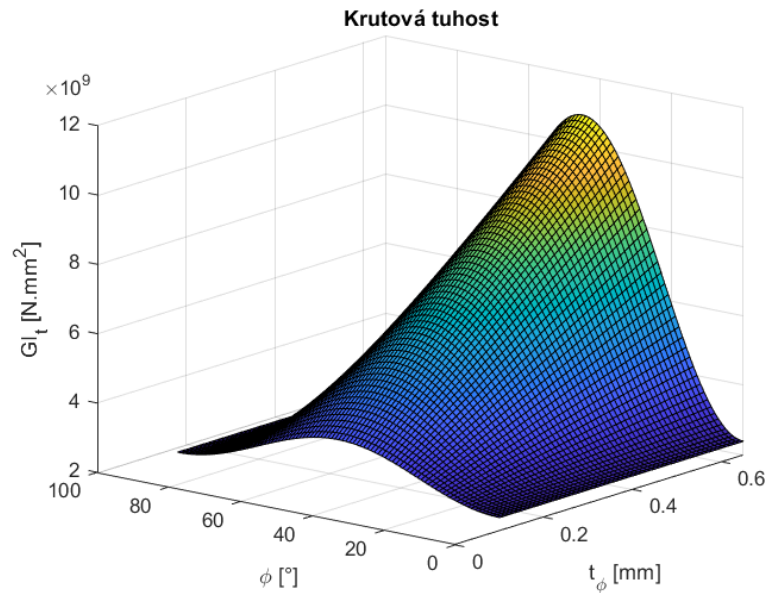
Další výpočty se zabývaly tloušťkou cross vrstvy a axiální vrstvy, zatímco celková tloušťka zůstávala stejná. Přidání tloušťky do cross vrstvy tedy znamenalo odebrání tloušťky z axiální.

Závislost ohybové tuhosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy lze vidět na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: Ohybová tuhost v závislosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy

Závislost krutové tuhosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy lze vidět na obrázku 5.9.

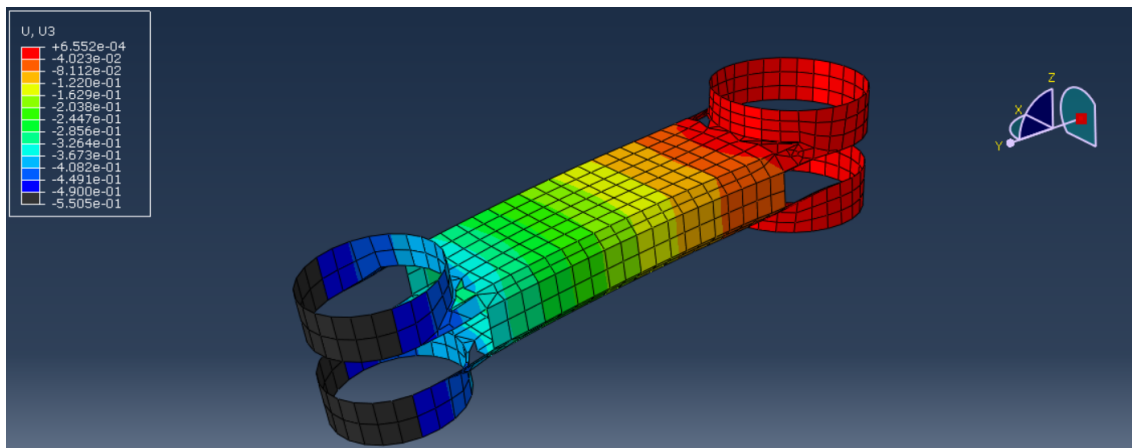


Obr. 5.9: Krutová tuhost v závislosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy

Z výše zmíněných grafů je možné vyčíst, že v případě ohybové tuhosti rozhodují axiální vlákna, v případě krutové tuhosti vlákna pod úhlem  $45^\circ$ . Co se ale rozměrů týče, ukazuje se, že tloušťka vrstvy má výrazně větší vliv na tuhost krutovou, nežli na tuhost ohybovou.

Vyvstává zde myšlenka, že ohybová tuhost bude výrazně závislejší na celkové geometrii, jak naznačuje graf na obrázku 5.5, kde ohybová tuhost v jednom směru je výrazně vyšší než druhá, ale nikoliv kvůli rozdílu ve skladbě, se kterou se počítá, ale pouze kvůli rozdílné geometrii.

Velké rameno bylo podrobena zjednodušené simulaci, která replikovala experimentální měření, aby bylo možné tuhosti porovnat. Z obrázku 5.10 byl odečten průhyb a dle rovnice 5.10 vyjádřena tuhost.

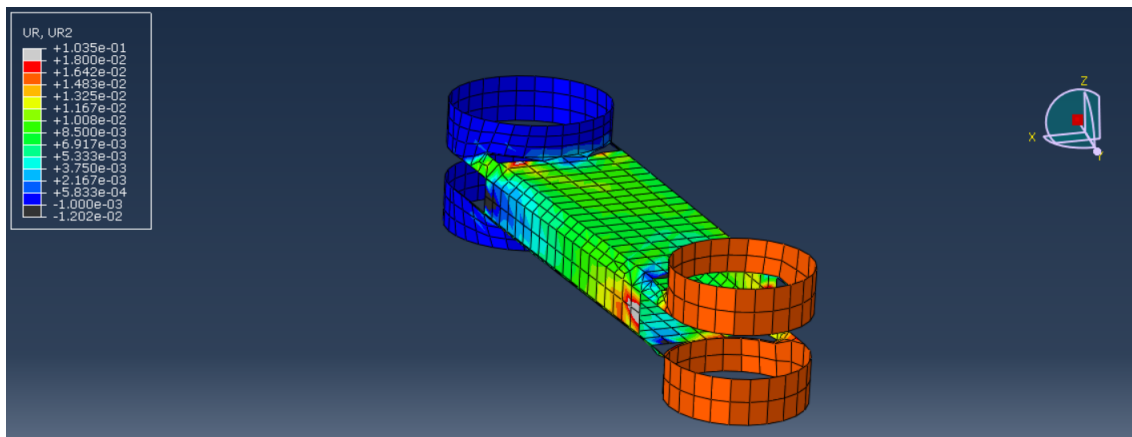


Obr. 5.10: Výsledky simulace optimalizované struktury v ohybu

$$(EJ)_{ekv} = \frac{1}{3} \frac{Fl^3}{u} = \frac{1}{3} \frac{1500 * 300^3}{0.49} = 9.18 * 10^9 N.mm^2 \quad (5.10)$$

Tato ohybová tuhost je 2.5krát větší než tuhost testovaného tělesa.

Pro krut byl aplikován stejný postup. Opět rameno prošlo zjednodušenou simulací, tentokrát experimentu v krutu. Z obrázku 5.11 bylo odečteno natočení a dle rovnice 5.11 vypočtena krutová tuhost.



Obr. 5.11: Výsledky simulace optimalizované struktury v krutu

$$(GJ_t)_{ekv} = \frac{M_k l}{\phi} = \frac{500000 * 300}{0.0165} = 9.09 * 10^9 N.mm^2 \quad (5.11)$$

Výsledek představuje přibližně 1.4krát větší tuhost než bez optimalizované skladby.

## 6 Implementace silových senzorů

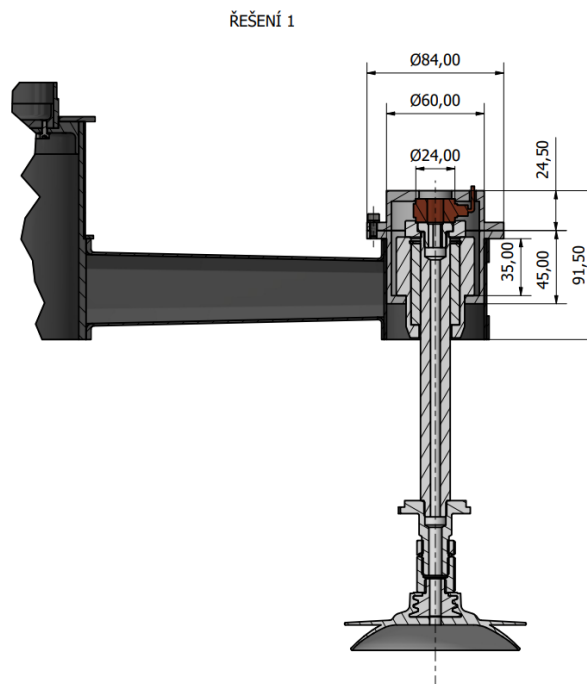
Pro bezpečný provoz manipulátoru je nutné zajistit, že všechny přísavky budou držet plech. Přestože pro tuto problematiku existují a jsou využívána různá řešení, byl tento požadavek spojen v případě této práce s možností sledovat silové působení při upínání plechu.

Vzhledem k tomu, že se nejedná o jednorázovou konstrukci, nepřipadá v úvahu připevňování senzorů použitých v experimentu, ale cílem je najít řešení schopné sériové výroby.

Jako vhodné řešení se ukázaly senzory HBM KMR+ pro měření síly ve šroubových spojích popsané v katalogu [8]. Senzory jsou určeny k tomu, aby byly zatíženy v tlaku, uprostřed mají díru, kterou při klasické aplikaci prochází měřený šroub, ale v tomto případě bude využita pro zajištění nutného vedení do přísavky. Pro vhodné použití je tedy nutné navrhnout uložení přísavky do oka integrovaného spoje tak, aby přísavka měla možnost tlačit na senzor v momentu, kdy je přitlačována k plechu.

Pro splnění těchto podmínek byly vytvořeny dvě možnosti řešení. Jedna respektuje prozatímní návrh ramen. Vzhledem k malému prostoru mezi konstrukcí přísavky a okem integrovaného spoje je nutné provést spojení mimo vnitřní otvor integrovaného spoje. Druhá možnost je integrovat celé propojení do vnitřní části oka za podmínky zvětšení jeho průměru.

Následující obrázky 6.1 a 6.2 nastíní možná spojení přísavky, ramena a měřicího prvku. Měřicí prvek ve všech skicách vystupuje v měděné barvě.

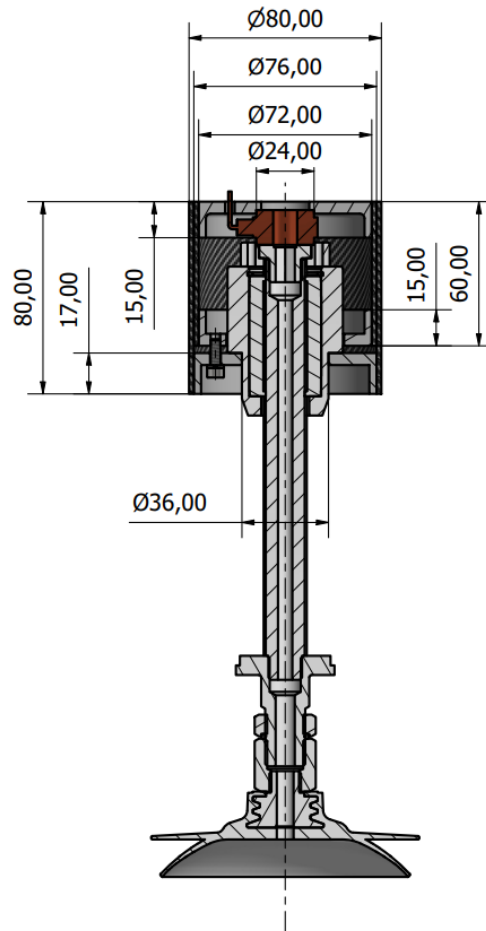


Obr. 6.1: Skica uložení měřicího prvku 1

Řešení na obrázku 6.1 zachovává rozměry integrovaného spoje za cenu růstu konstrukce do výšky, čímž může hrozit kolize s větším ramenem při pozicích, kdy se ramena kryjí.

Uložení se skládá z hliníkového insertu vlepeného do trubky v integrovaném spoji a hliníkového víka. Podobné řešení by bylo za určitých změn proveditelné i při nahrazení jednoho hliníkového insertu sestavou dvou insertů a kompozitové trubky, podobně, jako je tomu v návrhu na obrázku 6.2.

ŘEŠENÍ 2



Obr. 6.2: Skica uložení měřicího prvku 2

Řešení na obrázku 6.2 již nerespektuje průměr oka integrovaného spoje. Na druhou stranu, zabírá konstrukce méně místa na výšku a je možné ji ve spoji s ramenem umístit tak, že nebude hrozit kolize s větším ramenem v žádné dosažitelné pozici.

Uložení se skládá ze spodního insertu, vloženého přímo do trubky integrovaného spoje, středního a horního insertu, které jsou vlepené do samostatné kompozitové trubky.

Obě uložení umožňují předepnout senzor na hodnotu zatížení pomocí šroubů spojujících uložení. Díky tomu lze pomocí siloměru nejen zjišťovat přítlačnou sílu, ale i reagovat na hmotnost upnutého plechu. V případě, že nedojde k odlehčení senzoru po zvednutí plechu, přísavka plech nedrží.



## 7 Diskuze

Tato kapitola se vyjádří k výsledkům získaným z experimentu a simulace. Dále popíše několik bodů, které by vyžadovaly další prozkoumání. Odhalí několik klíčových bodů konstrukce a nastíní, jaké modifikace by byly vhodné pro dosažení určených cílů.

Prvním zásadním bodem je, že součásti byly otestovány pouze staticky. Prozatím pro součásti nebylo provedeno žádné měření zabývající se cyklickým zatěžováním této struktury. Toto měření by bylo zapotřebí, protože technologie, kterou byla ramena vyrobena nebyla zatím ve své finální formě, vyžadovala nejdén zásah lidské ruky, a tím pádem její kvalita nemusí být dostatečná. Při pohledu na povrch součásti lze odhadovat, že i uvnitř se může nacházet řada nedokonalostí a tedy iniciačních bodů pro šíření trhlin.

Druhým bodem je zamyšlení se nad konstrukcí ramen. Ze simulací celého konstrukčního řešení vychází, že největší posuvy jsou ve vertikálním směru, zatímco ramena jsou geometrií navržena tak, aby byla nejodolnější v horizontálním směru. Toto by mohl být bod další optimalizace.

Vyjádření k samotnému simulačnímu modelu je takové, že v případě ohybové tuhosti predikuje chování dobře a nachází se na konzervativní straně řešení. Takové chování je vítáno, vzhledem k tomu, že se jedná o jedno z prvních použití této technologie pro podobnou aplikaci. Problém nastává při zjišťování krutové tuhosti, kde jsou výsledky tuhostí získané z experimentu až 3krát menší než ty získané ze simulace. Tato zjištění vedou k otázkám, jaké změny v modelu by pomohly přesně postihnout chování vyrobené součásti. Jedním z problémů modelu by mohl být nestálý objemový podíl v různých částech součásti (například v připojení oka integrovaného spoje), vzhledem k tomu, že ne všechny části ramena byly po navinutí stlačeny, aby došlo k vytlačení přebytečné pryskyřice.

## 8 Závěr

Práce popsala pomocí simulace v MKP stávající řešení manipulátoru z profilů z hliníkové slitiny. K největším posuvům koncových bodů docházelo při pohybu v ose X manipulátoru, kdy docházelo k posuvu až 17 mm. To se stalo výchozím bodem pro kompozitové řešení. Simulace o stejných zatěžovacích parametrech pak proběhla i pro kompozitový manipulátor. K největším posuvům opět docházelo při pohybu v ose X, maximální posuv zde nabýval hodnot pouze 3 mm, což je více než 5krát méně. Tato konstrukce dosahuje při takřka stejné hmotnosti (45 kg hliníkový manipulátor, 50 kg kompozitový manipulátor i se šestnácti pohony pro změnu poloh) výrazně vyšší tuhosti.

Pro součásti s integrovaným spojem byla navržena materiálová skladba odlišná od vyrobené a testované. Kritériem byla maximalizace krutové i ohybové tuhosti, které jsou si materiálovou skladbou vzájemně protichůdné a tedy je nutný kompromis. Vzhledem k technologii výroby šlo o optimalizaci pouze jedné vrstvy křížících se vláken. Výběrem optimálního úhlu se podařilo zvýšit ohybovou i krutovou tuhost v porovnání s vyrobenými prototypy.

Dále bylo provedeno experimentální měření, které mělo zhodnotit, zda vyrobené součásti dosahují kvality, s jakou byly navrženy. Všechny tři testované součásti dosahovaly při měření takřka stejných tuhostí. Bohužel toto kryje pouze kvazi-statické chování těchto součástí a pro lepší obraz jejich chování a kvality by bylo vhodné provést i zkoušky s cyklickým zatěžováním.

Následně byla navržena implementace silového senzoru do uložení mezi přísavkou a malým ramenem s integrovaným spojem. Byl vybrán senzor, který je schopný měřit přítláčnou sílu, je k dostání ve velkém množství pro možnou sériovou výrobu a má i mnoho typů a různých velikostí pro další použití v podobné aplikaci. Pro realizaci uložení byly vytvořeny dvě skici.

Na konci práce byly shrnuty poznatky získané z provedených výpočtů, simulací a experimentů. Bylo vyhodnoceno, že kompozitová konstrukce manipulátoru je pro splnění požadavků více než dostatečná, ale dokazatelně pouze z kvazi-statického hlediska.

## Seznamy

### Seznam použité literatury

- [1] T. Mareš, „Mechanika kompozitních materiálů, Přednáška,“ Fakulta strojní; ČVUT v Praze, 2021.
- [2] J. Vrbka, *Mechanika kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [3] L. P. Kollar a G. S. Springer, *Mechanics of composite structures*. New York: Cambridge University Press, 2003, ISBN: 0521801656.
- [4] Z. Padovec, „Analýza laminátů - klasická laminační teorie, Přednáška,“ Hrubá Voda, 2015.
- [5] M. Smith, *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14-5*, English. United States: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.
- [6] X. Bao a L. Chen, *Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors*, Ottawa, ON K1N6N5, Canada, 2012.
- [7] *HBM Strain Gauges, First choice for strain measurements*. URL: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/S01265.pdf>.
- [8] *HBM KMR+, KMR+ Force transducers*. URL: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/B05474.pdf>.

## Seznam použitého softwaru

- Abaqus 6.14-5
- LamiEx V3.1 (Ing. Robin Poul; 2006)
- Materiálová databáze v rámci LamiEx V3.1 (Ing. Robin Poul; 2006)
- Matlab R2020b

## Seznam obrázků

2.1	Napětí na deskovém elementu . . . . .	9
2.2	Průřez nosníku . . . . .	13
3.1	Rozměry stávajícího podavače . . . . .	14
3.2	Sestava modelu stávajícího manipulátoru . . . . .	15
3.3	Propojení manipulátoru s plechem pomocí vazby Coupling . . . . .	16
3.4	Vetknutí nosníku . . . . .	17
3.5	Model před vysíťováním . . . . .	18
3.6	Model po vysíťování . . . . .	19
3.7	Body A a B pro vyhodnocení maximálních posuvů . . . . .	20
3.8	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X .	21
3.9	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X .	21
3.10	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	22
3.11	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	22
4.1	Rozměry kompozitového podavače . . . . .	23
4.2	Model kompozitového manipulátoru . . . . .	24
4.3	Axiální vinutí vláken . . . . .	26
4.4	Křížené vinutí vláken . . . . .	26
4.5	Speciální úhel vzniklý ve spojích . . . . .	27
4.6	Souřadnicové systémy pro definici skladby . . . . .	28
4.7	Oblast kombinace axiálních i křížících se vláken . . . . .	29
4.8	Oblast pouze křížících se vláken na horní (spodní) straně ramena . .	30
4.9	Oblast pouze křížících se vláken na boční straně ramena . . . . .	30
4.10	Oblast pouze axiálních vláken v oku integrovaného spoje . . . . .	31

4.11	Oblast pouze axiálních vláken v připojení k integrovanému spoji . . . . .	31
4.12	Oblast odkloněných axiálních vláken v připojení k integrovanému spoji	32
4.13	Stěna centrálního nosníku . . . . .	32
4.14	Vetknutí manipulátoru . . . . .	33
4.15	Vazba "tie" mezi okem ramen a tuhou spojkou . . . . .	34
4.16	Vazba "coupling" mezi plechem a ramenem . . . . .	34
4.17	Místa vyhodnocení maximálních posuvů . . . . .	36
4.18	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X . . . . .	37
4.19	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X . . . . .	37
4.20	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X . . . . .	38
4.21	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X . . . . .	38
4.22	Sestava v konfiguraci pro měření v ohybu . . . . .	39
4.23	Sestava v konfiguraci pro měření v krutu s ohybem . . . . .	40
4.24	Umístění senzorů na zkoušeném tělese . . . . .	41
4.25	Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A2 . . . . .	44
4.26	Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A2 . . . . .	45
4.27	Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A3 . . . . .	46
4.28	Závislost pro odečtení ohybové tuhosti tělesa A2 . . . . .	47
4.29	Závislost pro odečtení krutové tuhosti tělesa A2 . . . . .	48
4.30	Model pro simulaci ohybové zkoušky . . . . .	50
4.31	Výsledky simulace ohybové zkoušky . . . . .	50
4.32	Model pro simulaci krutové zkoušky . . . . .	51
4.33	Kontrola průhybu v simulaci krutové zkoušky . . . . .	51
4.34	Výsledky simulace krutové zkoušky . . . . .	52
4.35	Označení koncentrátorů napětí při ohybu . . . . .	53
4.36	Průběh deformace při v koncentrátoru při zkoušce ohybem . . . . .	54
4.37	Označení koncentrátorů napětí při krutu . . . . .	54

4.38	Průběh deformace při v koncentrátoru při zkoušce krutem . . . . .	55
5.1	Model centrální části duralového manipulátoru . . . . .	57
5.2	Posuvy na centrální části duralového manipulátoru . . . . .	57
5.3	Centrální nosník kompozitového manipulátoru . . . . .	59
5.4	Posuvy na centrálním nosníku kompozitového manipulátoru . . . . .	60
5.5	Jednotlivé tuhosti v závislosti na úhlu cross vrstvy . . . . .	61
5.6	Jednotlivé jednotkové tuhosti v závislosti na úhlu cross vrstvy . . . . .	62
5.7	Cílová funkce v závislosti na úhlu cross vrstvy . . . . .	62
5.8	Ohybová tuhost v závislosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy . . . . .	63
5.9	Krutová tuhost v závislosti na úhlu a tloušťce cross vrstvy . . . . .	64
5.10	Výsledky simulace optimalizované struktury v ohybu . . . . .	65
5.11	Výsledky simulace optimalizované struktury v krutu . . . . .	66
6.1	Skica uložení měřicího prvku 1 . . . . .	68
6.2	Skica uložení měřicího prvku 2 . . . . .	69
8.1	Výkres malého ramena s integrovaným spojem . . . . .	80
8.2	Výkres velkého ramena s integrovaným spojem . . . . .	81
8.3	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X . .	82
8.4	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X . .	82
8.5	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	83
8.6	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	83
8.7	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Z . .	83
8.8	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru Z . .	84
8.9	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Y . .	84
8.10	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	85
8.11	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X . .	85
8.12	Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X . .	86



8.13	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X . . .	86
8.14	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru y . . .	86
8.15	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru Z . . .	87
8.16	Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Z . . .	87
8.17	Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A1 . . . . .	88
8.18	Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A2 . . . . .	88
8.19	Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A3 . . . . .	89
8.20	Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A1 . . . . .	89
8.21	Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A2 . . . . .	90
8.22	Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A3 . . . . .	90
8.23	Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A1 . . . . .	91
8.24	Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A2 . . . . .	91
8.25	Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A3 . . . . .	92
8.26	Závislost krouticího momentu na zkrutu tělesa A1 . . . . .	92
8.27	Závislost krouticího momentu na zkrutu tělesa A2 . . . . .	93
8.28	Závislost krouticího momentu na zkrutu tělesa A3 . . . . .	93

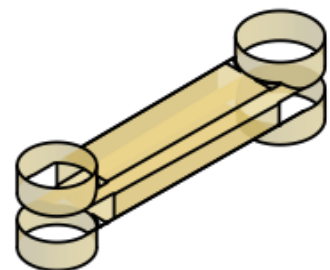
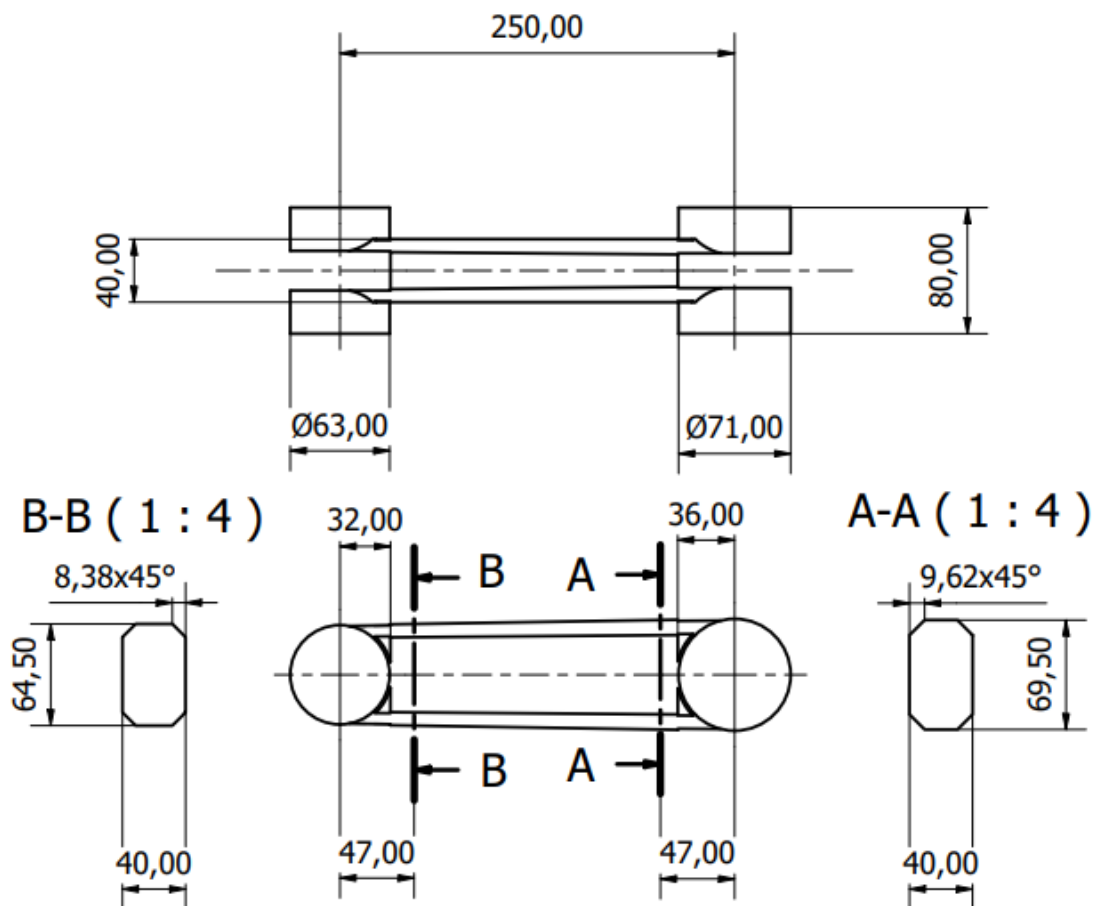
## Seznam tabulek

3.1	Zatížení duralového manipulátoru zrychleným pohybem . . . . .	17
3.2	Zatížení a maximální posuvy duralového manipulátoru v jednotlivých stepech . . . . .	20
4.1	Skladba materiálu v částech s axiální i křížící se vrstvou . . . . .	29
4.2	Skladba materiálu v částech s křížící se vrstvou . . . . .	30
4.3	Skladba materiálu v částech s axiální vrstvou . . . . .	31

4.4	Skladba materiálu v částech s axiální i křížící se vrstvou . . . . .	32
4.5	Zatížení kompozitové konstrukce v jednotlivých stepech . . . . .	35
4.6	Zatížení a maximální posuvy kompozitového manipulátoru v jednotlivých stepech . . . . .	36
4.7	Zhodnocení měřidel při ohybu . . . . .	45
4.8	Zhodnocení měřidel při krutu . . . . .	47
4.9	Ekvivalentní ohybové tuhosti ramena vypočtené z experimentu . . . .	48
4.10	Ekvivalentní krutové tuhosti ramena vypočtené z experimentu . . . .	49
4.11	Tabulka porovnání tuhostí získaných různými metodami . . . . .	52

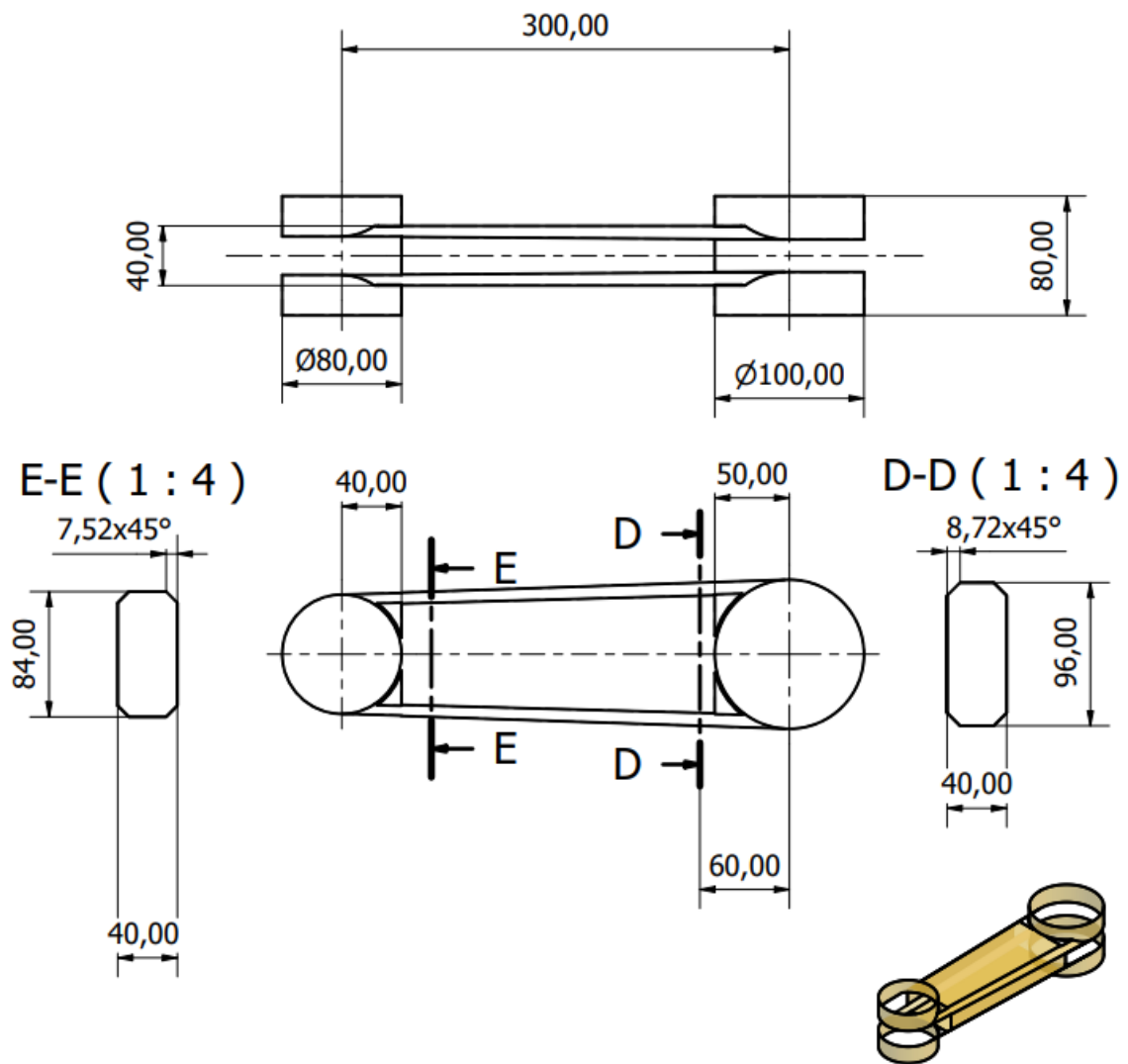
## Příloha A - Výkresy a skici

### Malé rameno s integrovaným spojem



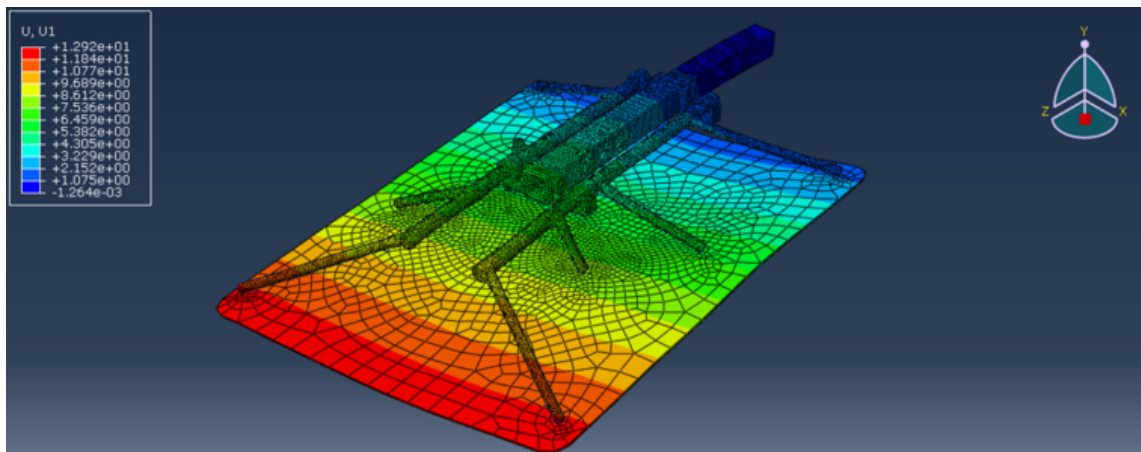
Obr. 8.1: Výkres malého ramena s integrovaným spojem

## Velké rameno s integrovaným spojem

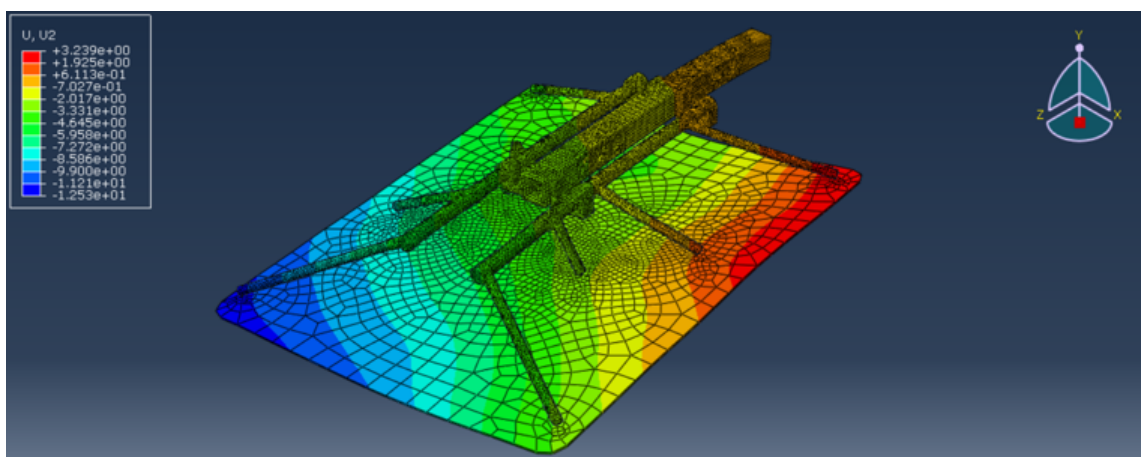


Obr. 8.2: Výkres velkého ramena s integrovaným spojem

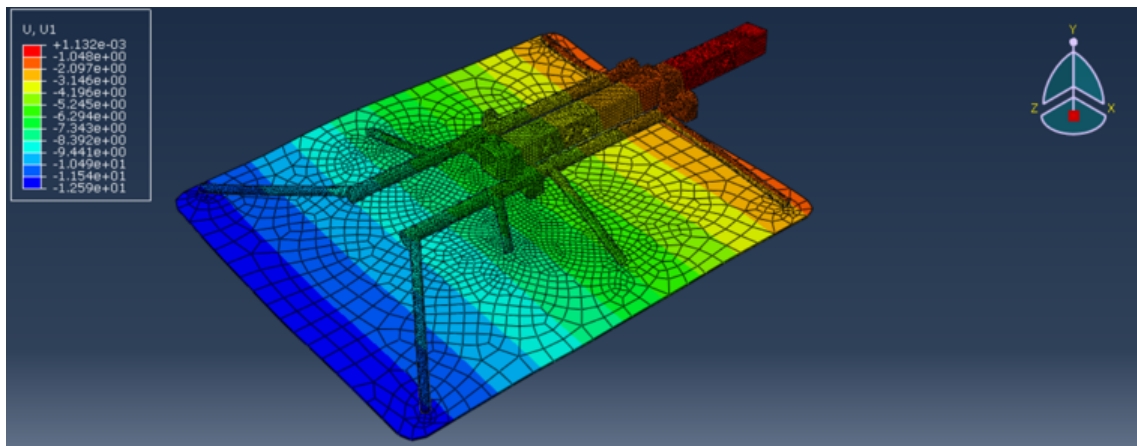
## Příloha B - Výstupy ze simulací manipulátoru z hliníkové slitiny



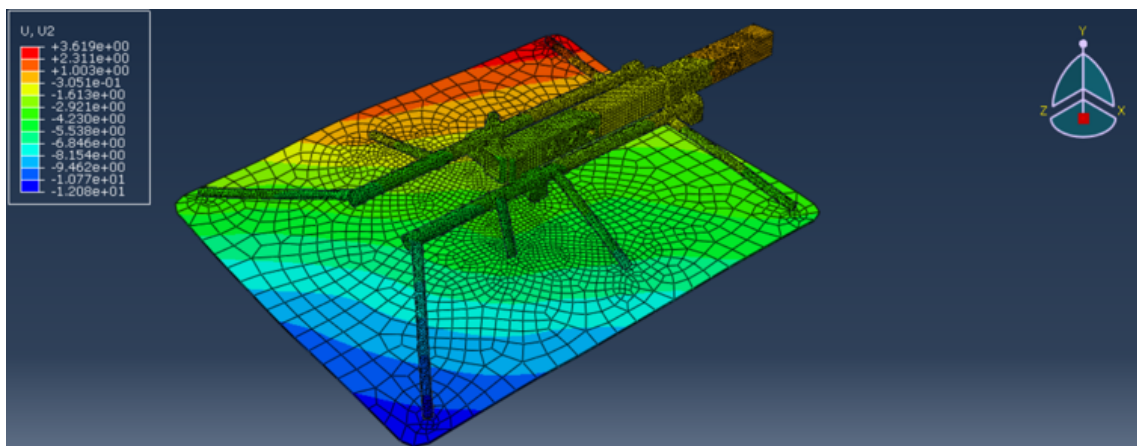
Obr. 8.3: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X



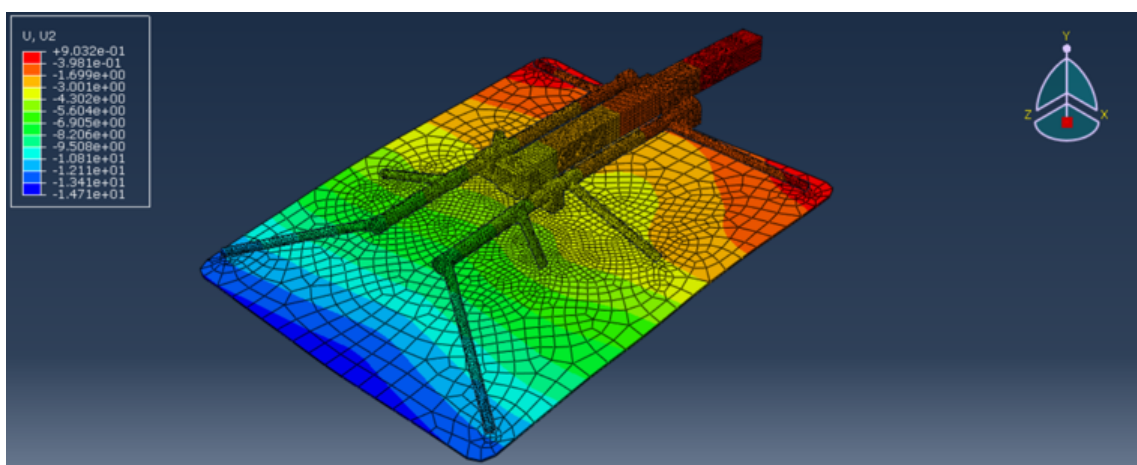
Obr. 8.4: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X



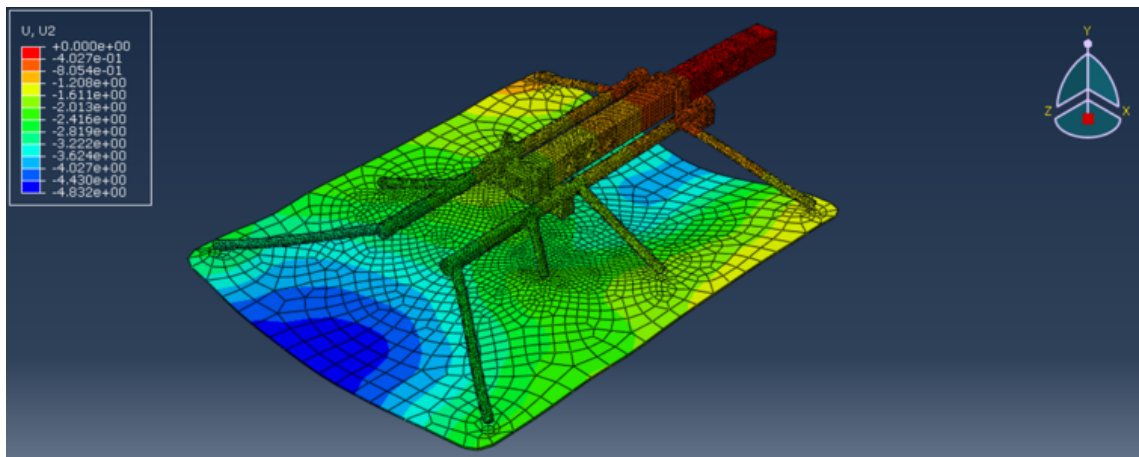
Obr. 8.5: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X



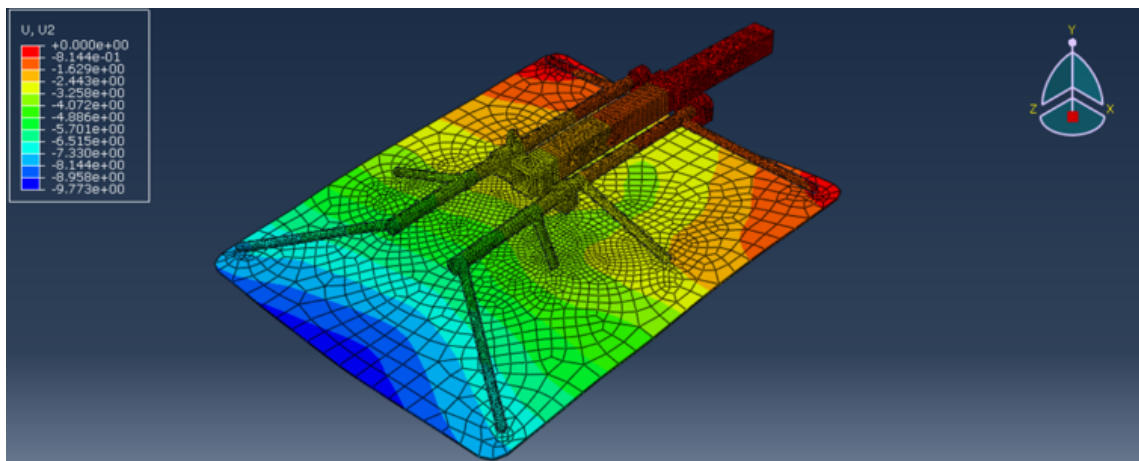
Obr. 8.6: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X



Obr. 8.7: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Z

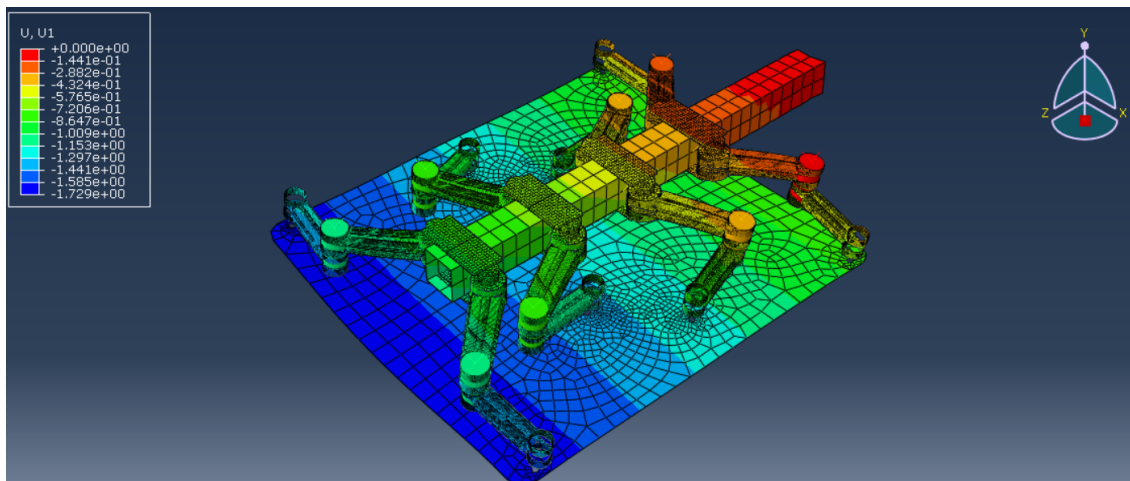


Obr. 8.8: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru Z

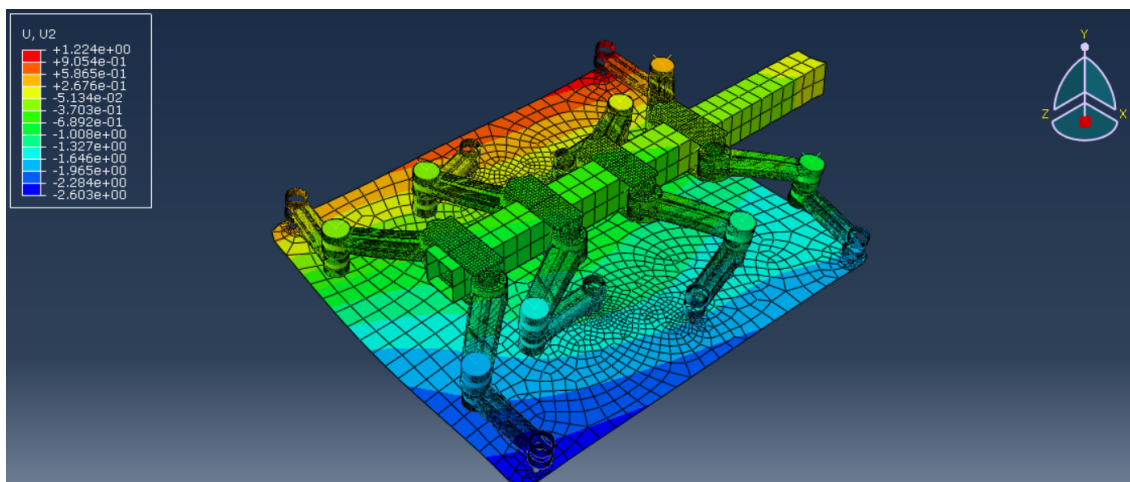


Obr. 8.9: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Y

## Příloha C - Výstupy ze simulace kompozitového manipulátoru

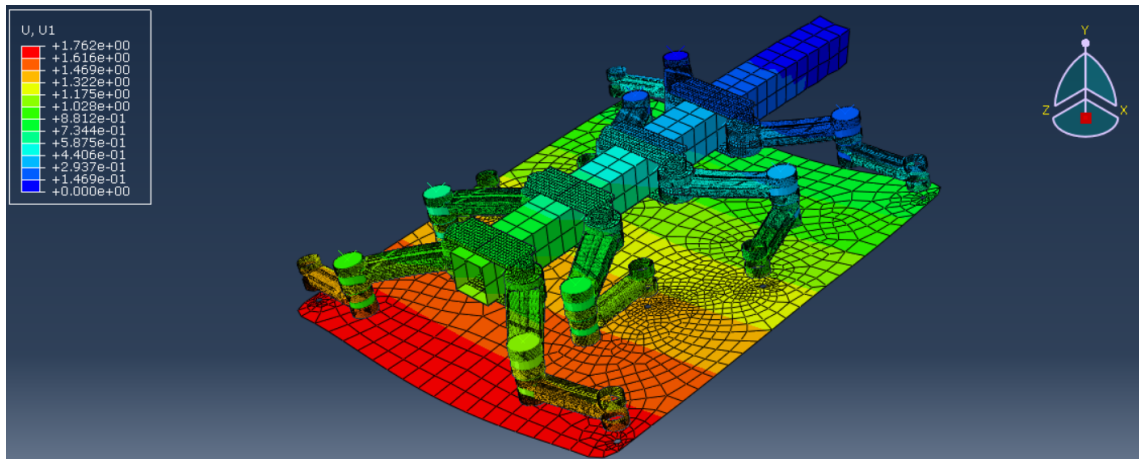


Obr. 8.10: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v kladném směru X

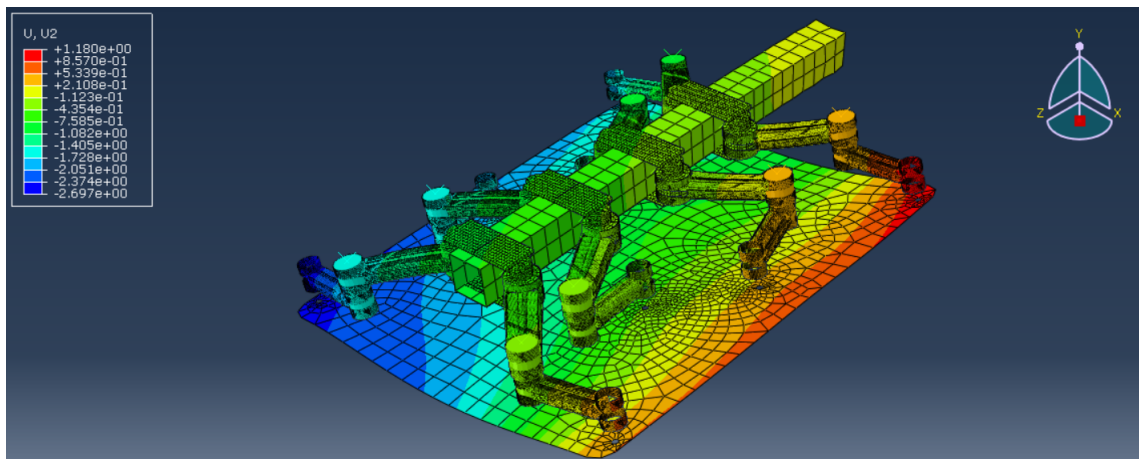


Obr. 8.11: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru X

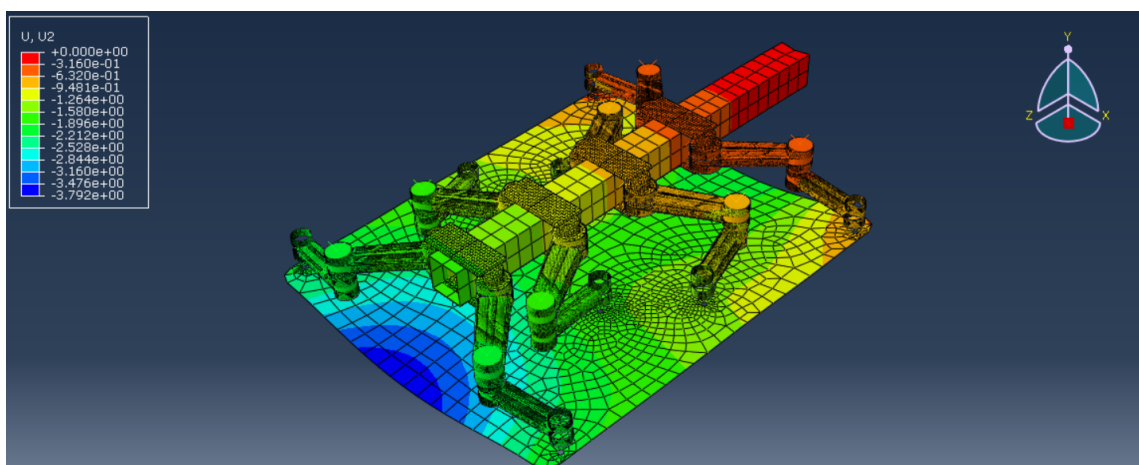




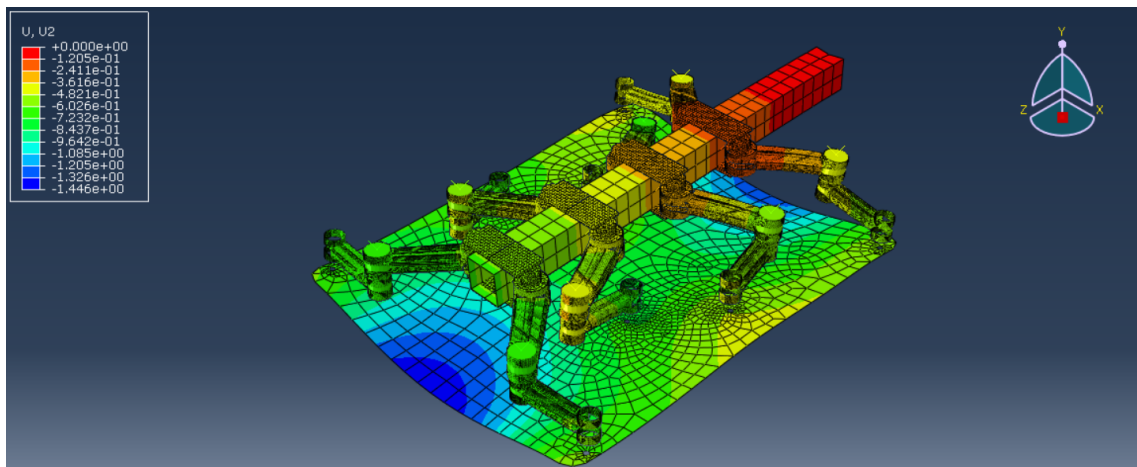
Obr. 8.12: Maximální posuv v X při zrychleném pohybu v záporném směru X



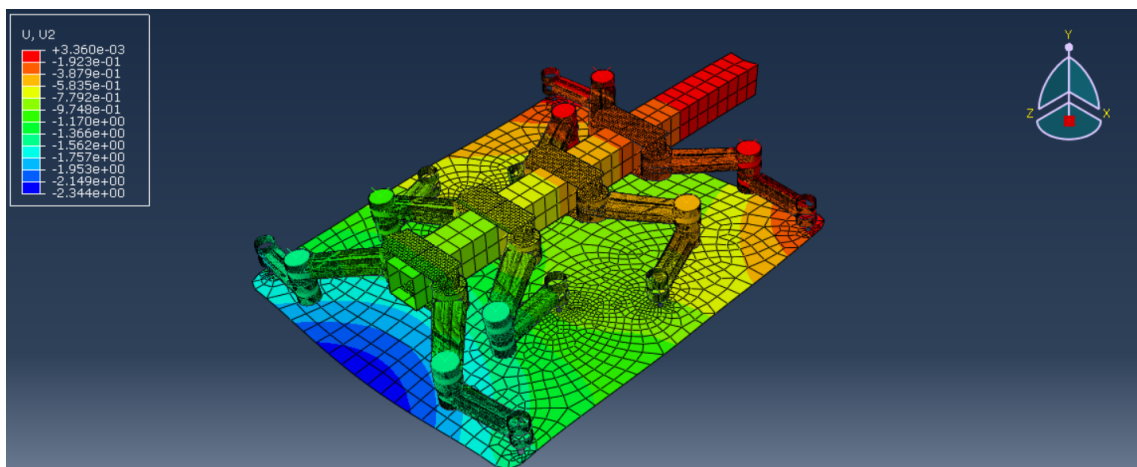
Obr. 8.13: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru X



Obr. 8.14: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru y

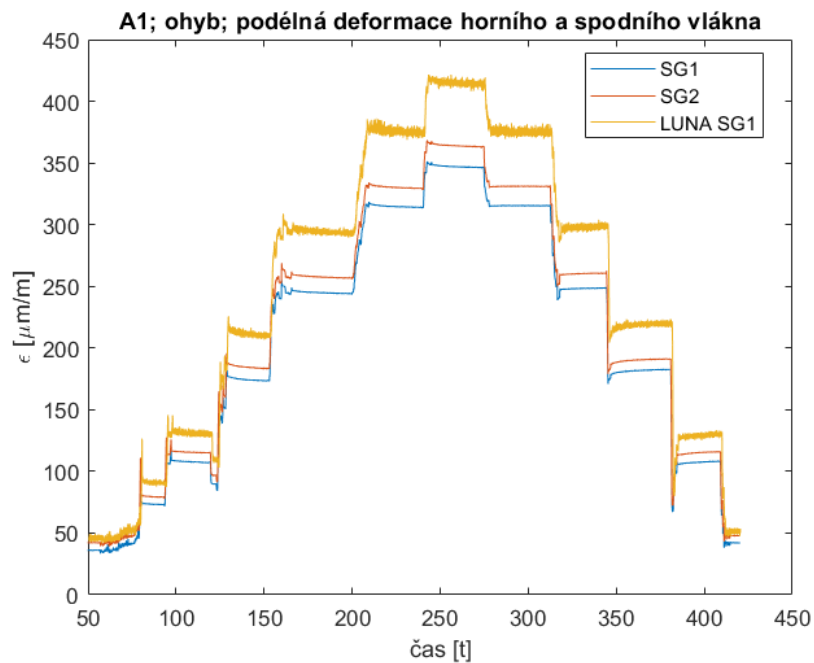


Obr. 8.15: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v záporném směru Z

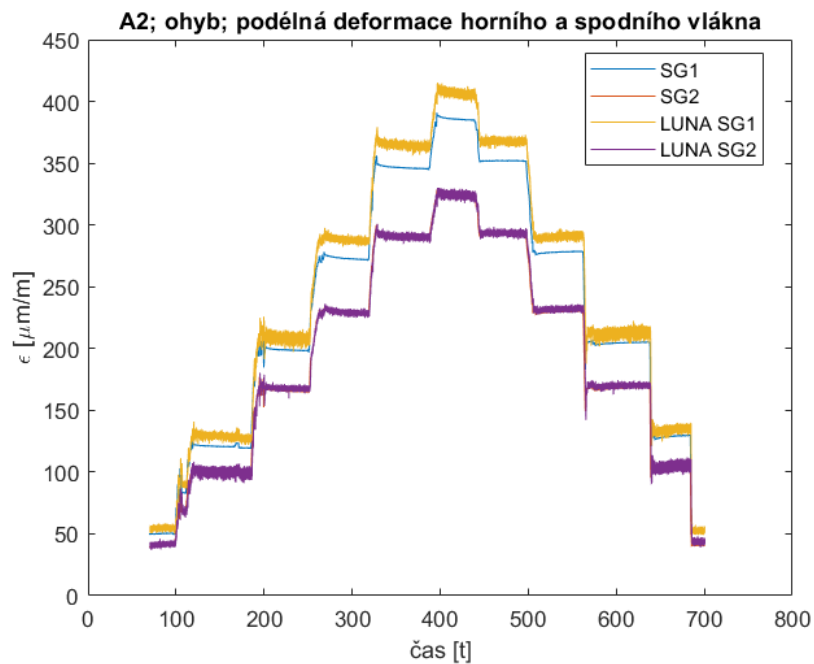


Obr. 8.16: Maximální posuv v Y při zrychleném pohybu v kladném směru Z

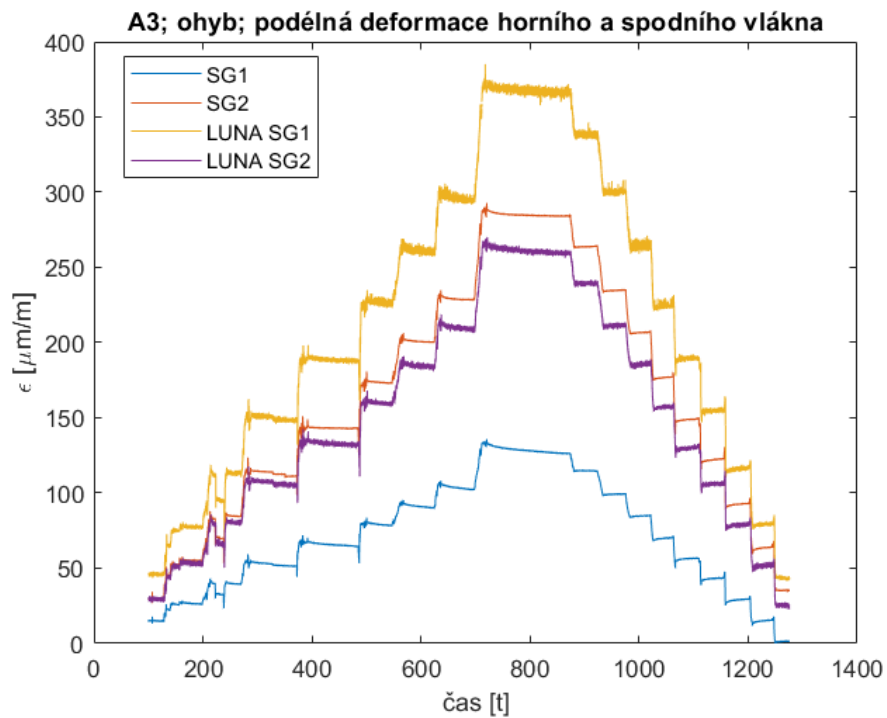
## Příloha D - Grafické výstupy z experimentu



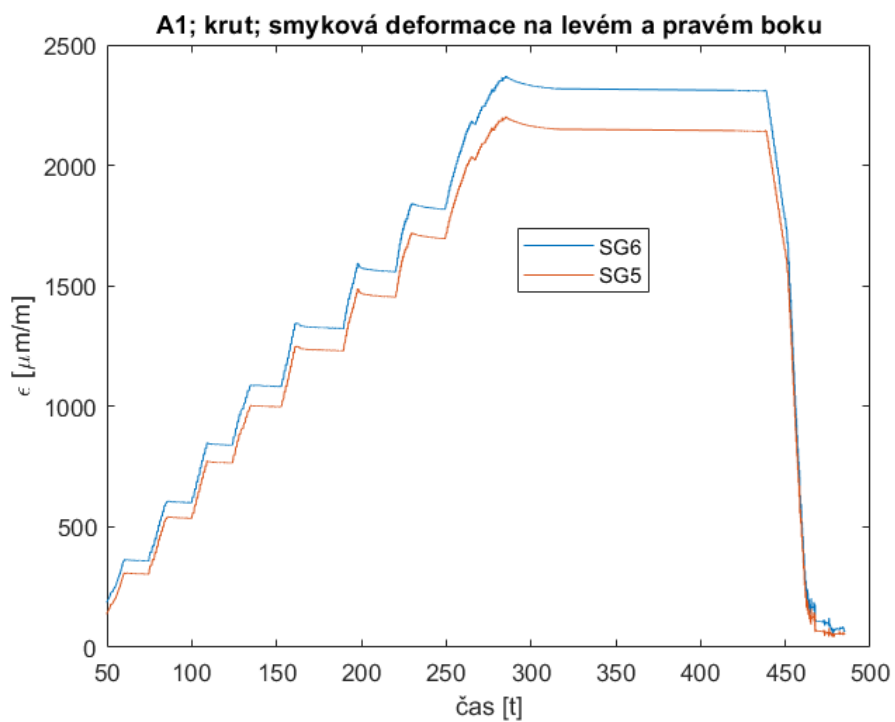
Obr. 8.17: Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A1



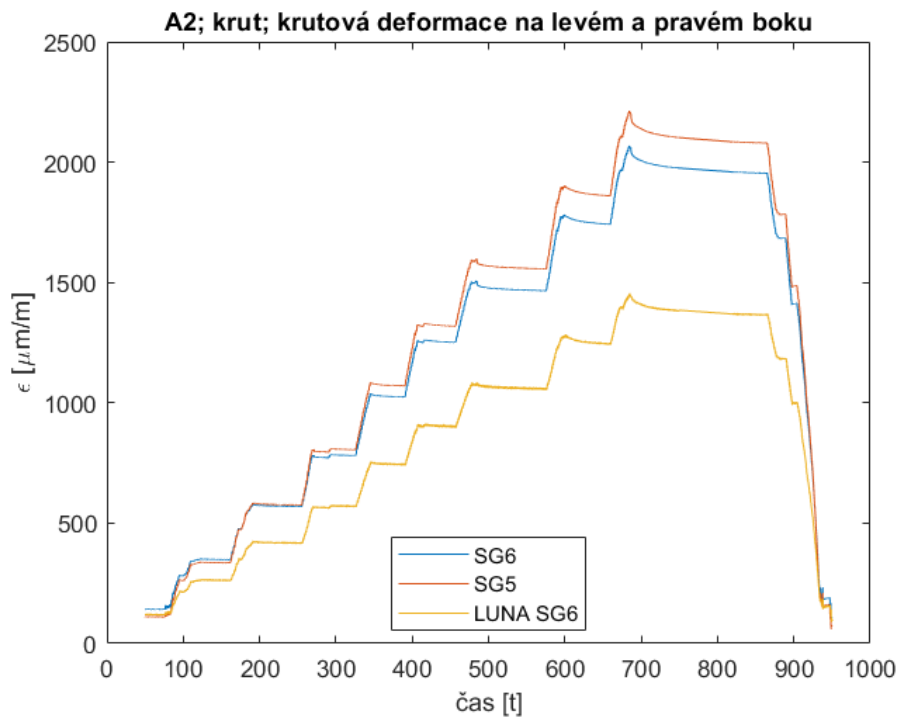
Obr. 8.18: Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A2



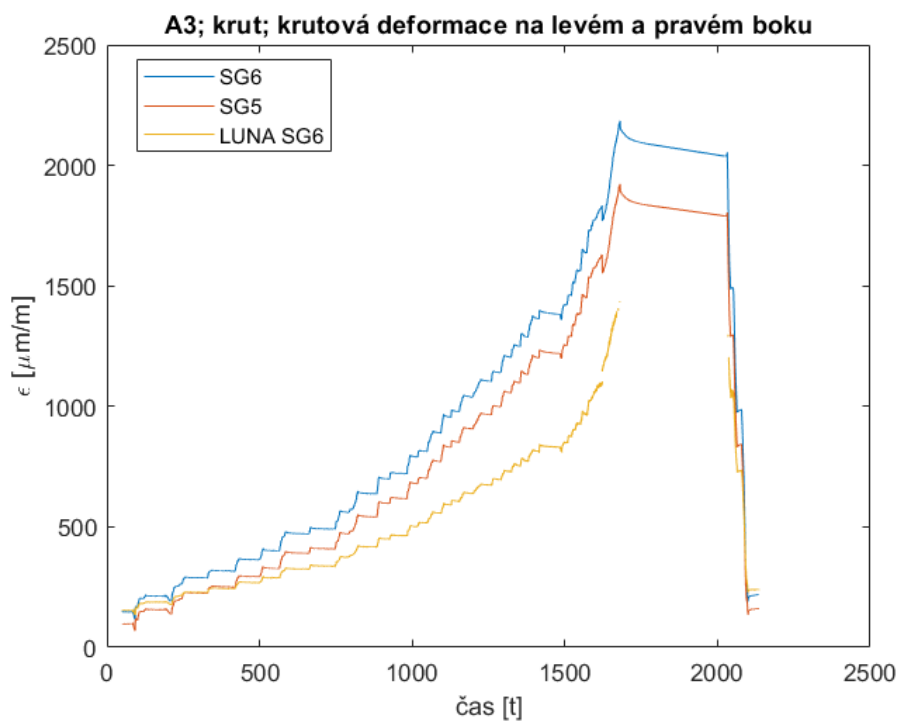
Obr. 8.19: Časový záznam ze senzorů při ohybu tělesa A3



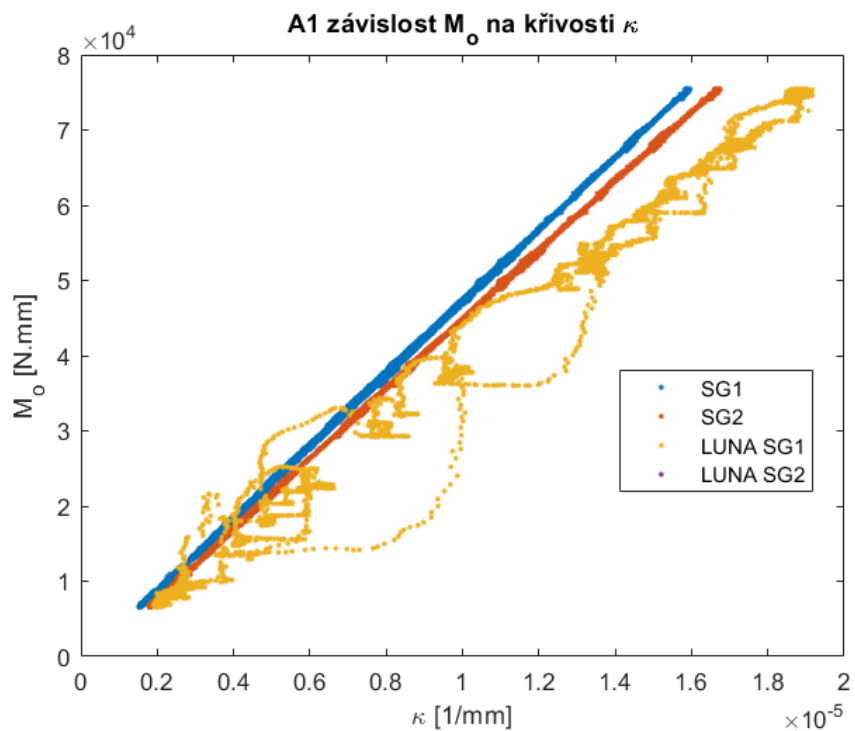
Obr. 8.20: Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A1



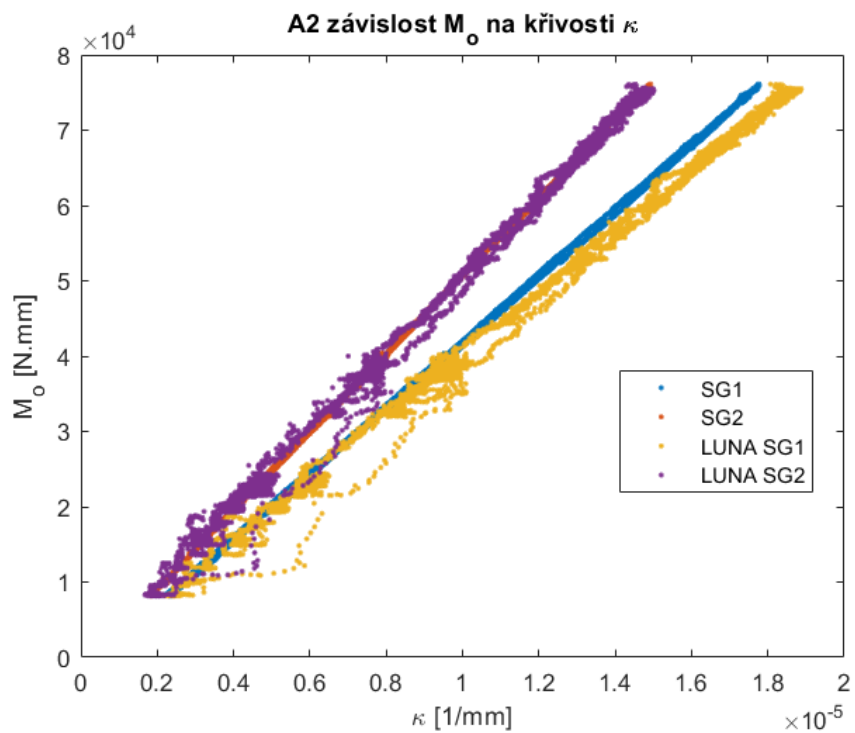
Obr. 8.21: Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A2



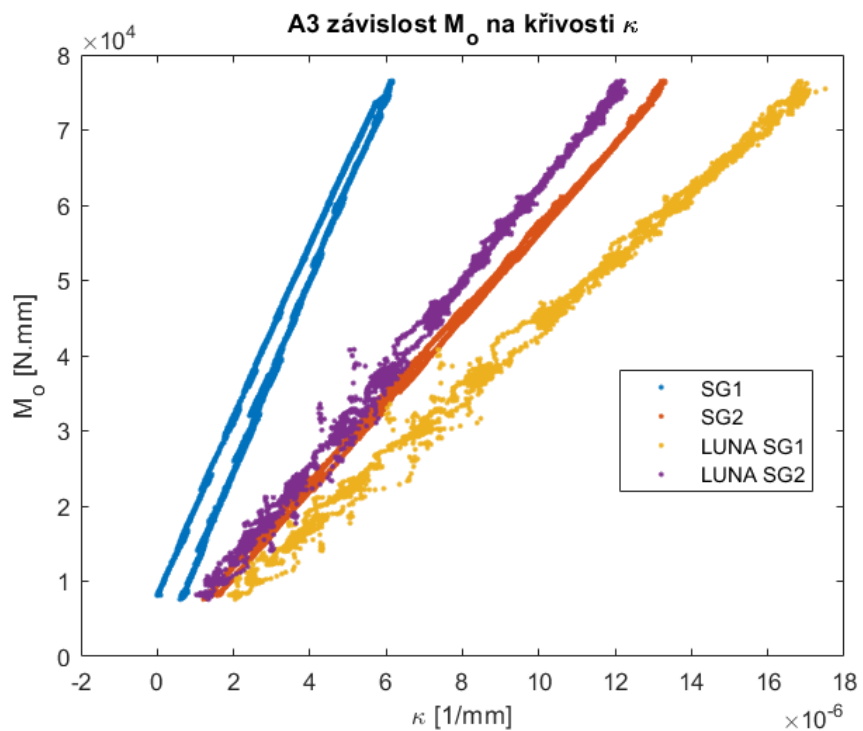
Obr. 8.22: Časový záznam ze senzorů při krutu tělesa A3



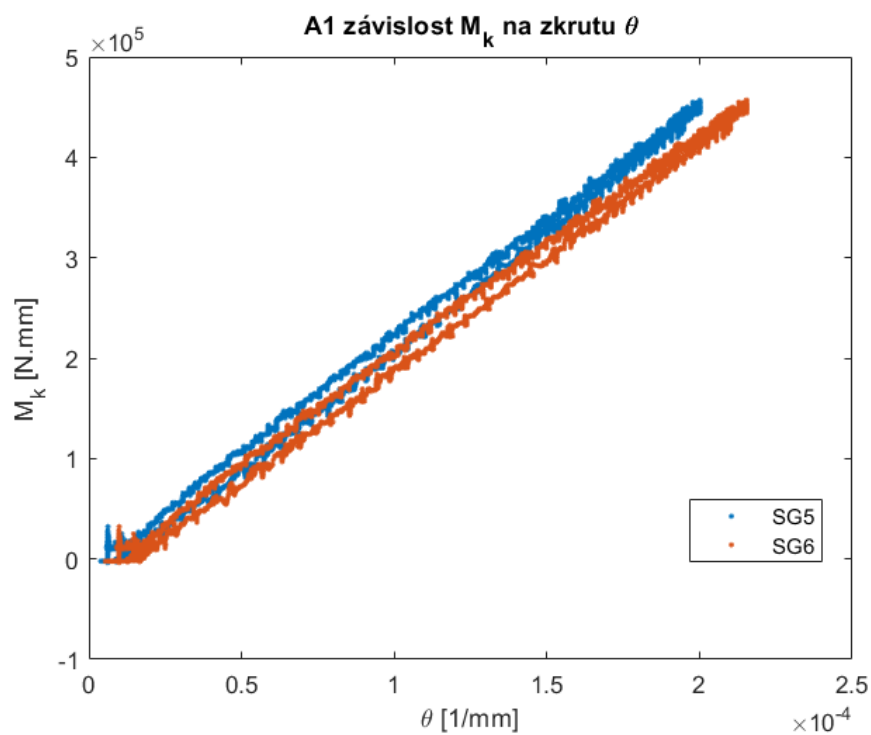
Obr. 8.23: Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A1



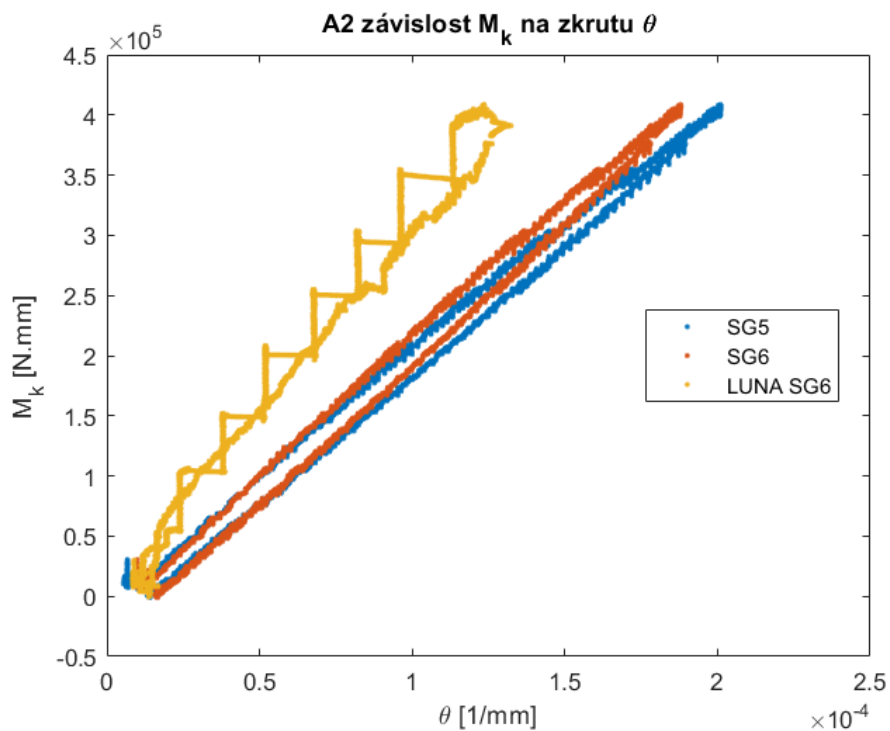
Obr. 8.24: Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A2



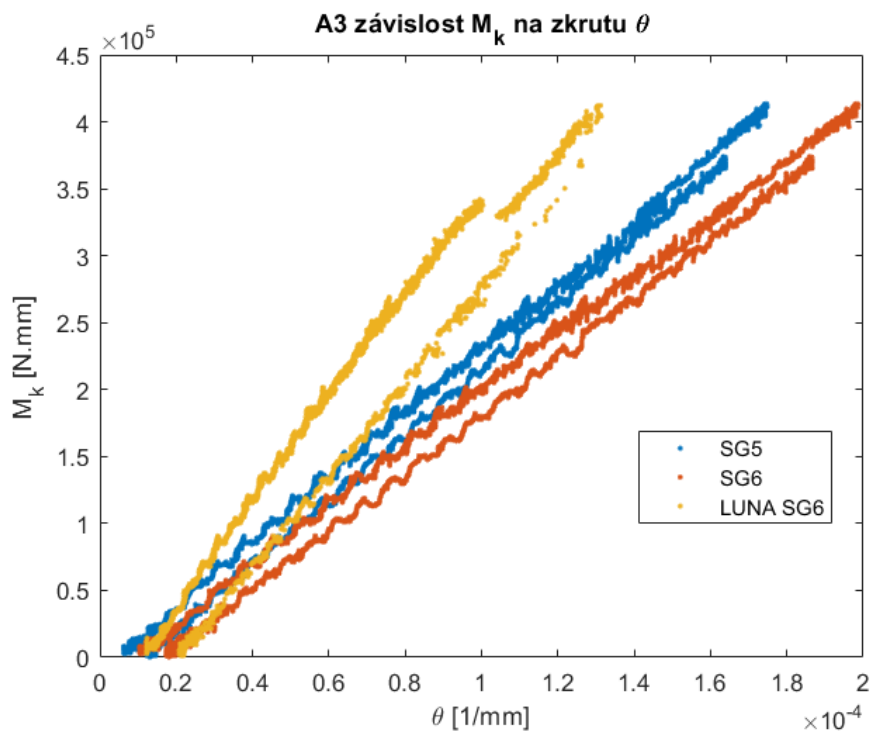
Obr. 8.25: Závislost ohybového momentu na křivosti tělesa A3



Obr. 8.26: Závislost kroučícího momentu na zkrutu tělesa A1



Obr. 8.27: Závislost kroučícího momentu na zkrutu tělesa A2



Obr. 8.28: Závislost kroučícího momentu na zkrutu tělesa A3



