



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TELES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÁ ANALÝZA PRVKU STAHOVACÍHO MECHANISMU

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF CLAMPING MECHANISM ELEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ERIK GERGEL'

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR SKALKA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Erik Gergel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a Zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Deformačně napět'ová analýza prvku stahovacího mechanismu

v anglickém jazyce:

Stress-strain analysis of clamping mechanism element

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velmi častou poruchou u osobních automobilů jsou poruchy stahování okenních skel, které činí vozidlo technicky nezpůsobilým provozu. Jednou z poruch je dosažení mezního stavu lomu prvku stahovacího zařízení.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření výpočtového modelu prvku stahovacího mechanismu a provedení napjatostně - spolehlivostní analýzy u tohoto prvku, případně navrhnout jeho tvarovou či materiálovou úpravu.

Seznam odborné literatury:

PETRUŠKA, J.: Počítačové metody mechaniky - Metoda konečných prvků. Studijní opory [online]. 2003. Dostupný z www: http://www.umt.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=79&Itemid=37

Janíček, P., Ondráček, E., Vrbka, J.: Pružnost a pevnost I, Brno 1992. Studijní opory [online]. Dostupný z www: http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/Pruznost_pevnost_1_Janicek_Ondracek_Vrbka.pdf

Vlk, M., Florian, Z.: Mezní stavy a spolehlivost, Brno 2007. Studijní opory [online]. Dostupný z www: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>

Petruška, J.: MKP v inženýrských výpočtech. Studijní opory [online]. Dostupný z www: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Skalka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá vytvorením výpočtového modelu a rieši deformačne napät'ovú analýzu prvku sťahovacieho mechanizmu okna osobného automobilu. Hlavným cieľom práce je určenie rozloženia napätia a z neho vyplývajúceho kritického miesta na prvku. Analýza bola realizovaná v konečnoprvkovom systéme ANSYS. Na základe výsledkov deformačne napät'ovej analýzy sa uskutočnila tvarová úprava prvku, ktorá viedla k výraznému zníženiu maximálnej hodnoty redukovaného napätia. Tvarová úprava by viedla k predĺženiu prevádzkovej doby sťahovacieho prvku.

Summary

The bachelor thesis deals with creation of computational model and solves Stress-strain analysis of a car window clamping mechanism element. The main focus of thesis is to locate a critical area of part and find out the distribution of stress in this area. FEA system ANSYS was used for this analysis. The shape optimization based on results of FEA was successful. The equivalent stress was significantly lowered. It would be able to increase the operating time of clamping element.

Kľúčové slová

sťahovací mechanizmus, deformačne napät'ová analýza, MKP, ANSYS

Keywords

clamping mechanism, stress-strain analysis, FEA, ANSYS

Bibliografická citácia

GERGEL, E. *Deformačně napěťová analýza prvku stahovacího mechanismu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 45 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne a v zozname literatúry som uviedol všetky informačné zdroje, ktoré som použil.

Brno 8. mája 2012

.....

Ďakujem vedúcemu mojej práce, pánu doktorovi Petrovi Skalkovi za odborné vedenie, rady a konzultácie. Takisto chcem poďakovať každému, kto mi počas vypracovávania akokoľvek pomohol.

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Problémová situácia	3
3	Formulácia problému	3
4	Ciele riešenia.....	3
5	Rešeršná štúdia.....	4
	5.1 Popis funkcie sťahovacieho mechanizmu.....	4
	5.2 Tvary plastového prvku	5
6	Analýza typu problému	7
7	Výpočtové modelovanie	7
	7.1 Systém veličín pre riešenie problému	7
	7.2 Zaistenie vstupných údajov.....	7
	7.2.1 Tiažová sila	7
	7.2.2 Predpätie pružín	7
	7.2.3 Tlak oceľového lana.....	8
	7.2.4 Dynamická zložka sily	9
	7.2.5 Kontaktný tlak oceľového lana	11
	7.3 Tvorba parciálnych modelov	14
	7.3.1 Model topológie	14
	7.3.2 Model dekompozície.....	14
	7.3.3 Model geometrie	14
	7.3.4 Model vlastností štruktúry objektu	16
	7.3.5 Diskretizácia modelu geometrie	17
	7.3.6 Model okrajových podmienok	20
	7.3.7 Model zaťaženia.....	21
8	Realizácia algoritmu výpočtového modelovania.....	23
9	Prezentácia a analýza výsledkov výpočtového modelovania	24
	9.1 Analýza pokojového stavu	24
	9.2 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,1 s	27
	9.3 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,01 s	29
10	Tvarová úprava	31
	10.1. Model geometrie tvarovej úpravy	31
	10.2 Diskretizácia modelu geometrie tvarovej úpravy	32
	10.3 Prezentácia a analýza výsledkov výpočtového modelovania tvarovej úpravy	32

10.3.1 Analýza pokojového stavu	32
10.3.2 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,1 s	35
10.3.3 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,01 s	37
11 Záver	39
Zoznam použitej literatúry	40
Zoznam použitých skratiek a symbolov	41
Zoznam obrázkov	43
Zoznam tabuliek	44
Zoznam príloh	45

1 Úvod

Osobný automobil je neodmysliteľnou súčasťou dnešnej doby. Myšlienka života bez neho je pre mnohých ľudí nepredstaviteľná, pretože si pomocou neho napríklad zarábajú na živobytie alebo ho používajú na dochádzanie do zamestnania, či do školy. Preto sa snažíme si jazdu v ňom čo najviac uľahčovať a spríjemňovať.

Jednou u najviac používaných funkcií počas jazdy je nepochybne otváranie a zatváranie bočných okien. To primárne umožňuje reguláciu teploty v aute. Správnu funkciu mechanizmu sťahovania okien považujeme za samozrejmosť, pretože je apriori vnímaná ako maličkosť. V skutočnosti tomu tak nie je. Práve porucha spomínaného mechanizmu je veľmi častým dôvodom na návštevu autoservisu, preto sa predkladaná práca zaoberá deformačne napäťovou analýzou najslabšieho prvku sťahovacieho mechanizmu.

V úvodných kapitolách sú formulované ciele, ktoré má táto práca dosiahnuť a rešeršná štúdia popisujúca funkciu sťahovacieho mechanizmu a typy plastových prvkov v nich obsiahnutých. Ďalej sa práca zameriava na vytvorenie výpočtového modelu pre MKP analýzu a zobrazuje v nej dosiahnuté výsledky. Na základe týchto výsledkov bola realizovaná vlastná tvarová úprava prvku.

2 Problémová situácia

Počas jazdy v osobnom automobile je častým úkonom manipulácia s bočnými oknami. Slúži hlavne na reguláciu teploty v automobile, a tým zvyšuje komfort cestujúcich. Funkcia sťahovania okien sa však občas stane nefunkčnou. Príčin poruchy môže byť niekoľko, napr. nefunkčný elektromotor, ktorý slúži na pohon okna, zaseknutie okna vo vodiacich drážkach z dôvodu nečistôt, alebo lom plastového prvku mechanizmu, ktorý pohyb okna ovláda.

3 Formulácia problému

Predkladaná práca sa zaoberá poruchou, ktorá sa javí ako najčastejšia, a to dosiahnutie medzného stavu lomu plastového prvku mechanizmu.

4 Ciele riešenia

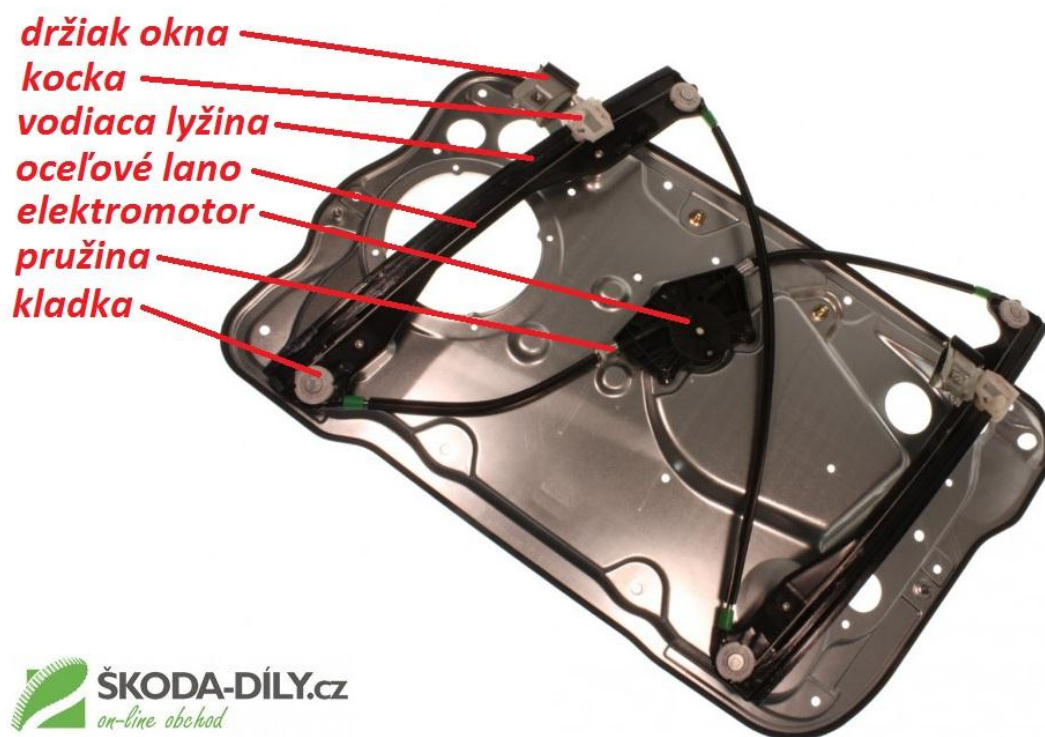
Na základe predchádzajúceho popisu a zadania bakalárskej práce sú ciele formulované nasledovne:

Realizovať deformačne napäťovú analýzu prvku sťahovacieho mechanizmu automobilu Škoda Fabia s cieľom odhaliť kritické miesto použitím metódy konečných prvkov. Na základe dosiahnutých výsledkov navrhnúť tvarovú úpravu plastového segmentu.

5 Rešeršná štúdia

5.1 Popis funkcie sťahovacieho mechanizmu

Pre vysvetlenie funkcie je nutné najskôr zaviesť pomenovanie pre jednotlivé prvky mechanizmu. Názvy komponentov a ich zobrazenie je na Obrázku 5.1.

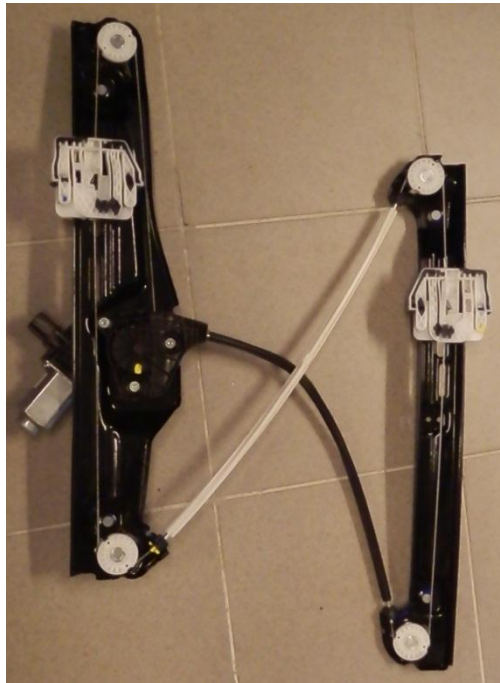


Obrázok 5.1 – Názvy komponentov sťahovacieho mechanizmu

Pohon celého mechanizmu je zabezpečený *elektromotorom*, ktorý reaguje na spínač, ktorý je umiestnený v dverách automobilu. Stlačenie spínača, alebo naopak jeho zatiahnutie reguluje zmysel otáčania *elektromotoru*. Podľa zmyslu otáčania sa okno automobilu pohybuje nahor alebo nadol. Hlavným spojovacím prvkom celého mechanizmu sú *oceľové laná* a sú dvojakého typu. Jeden typ spája *elektromotor* a s *kockou* cez *kladku*, druhý spája dve *kocky* navzájom. Na koncoch lán sú malé oceľové valčeky, ktoré sú zasadené do vybraniach v *kocke*. Tá „jazdí“ vo *vodiacich lyžinách*, ktoré nie sú vôbec mazané. Pri výstupoch z *elektromotoru* sú oceľové pružiny, ktorých stlačenie spôsobuje predpätie v celom systéme. Vďaka tomuto predpätiu sú oceľové laná stále napnuté a chod okna je plynulý. Ďalej sú v *kockách* zasunuté *držiačky okna*. Tieto komponenty realizujú spojenie okna s mechanizmom.

Predchádzajúci popis funkcie platí pre vozidlo Škoda Fabia. Iní výrobcovia automobilov používajú mechanizmy na podobnom princípe, ktoré sa však od seba líšia tvarom, umiestnením alebo počtom komponentov, ako je vidieť na Obrázku 5.2. Jedná sa o sťahovací mechanizmus z vozidla BMW X3. Je vidno, že oproti vyššie opísanému mechanizmu nemá *držiačky okna*, to znamená, že okno je zasunuté priamo v *kocke*. Ďalším

rozdielom je, že celý mechanizmus sa pomocou skrutiek pripája cez *vodiace lyžiny* priamo do tela dverí automobilu, nie je teda pevne spojený s plechovým podkladom. Táto skutočnosť zjednodušuje výmenu mechanizmu v prípade poruchy.



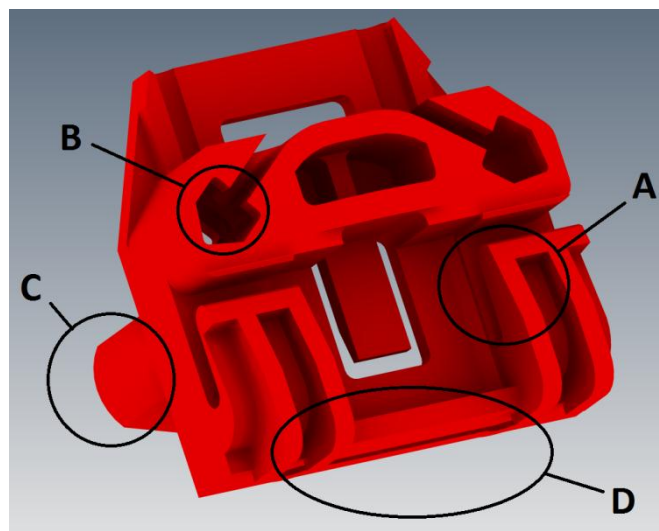
Obrázok 5.2 – Sťahovací mechanizmus vozidla BMW X3

5.2 Tvary plastového prvku

Tvar plastového prvku- *kocky* je daný jej funkciou. Základné tvarové časti a ich označenia v Obrázku 5.3 sú:

- drážka pre vodiacu lyžinu (A)
- vybrania pre valčeky oceleového lana (B)
- plocha pre dosadenie okna (C)

Prvok, ktorý bola predmetom analýzy obsahoval ešte tvarovú časť, kde sa zasúva oceľový plech (D), ktorý drží sklo.



Obrázok 5.3 – Tvarové časti kocky.

A - drážka pre vodiacu lyžinu, B - vybrania pre valčeky oceleového lana, C - plocha pre dosadnutie okna, D - otvor pre zasunutie plechu

Na Obrázku 5.4. sú zobrazené kocky vybraných modelov vozidiel. Kocka z vozidla Volkswagen Golf sa z vyobrazených najviac podobá analyzovanému prvku. Zostávajúce tri sa od neho líšia hlavne tým, že neobsahujú otvor pre *držiak okna*, takže okno je priamo zasunuté do tvarovaných drážok v kocke.



a) Audi A4 (6)



b) BMW X3



c) Volkswagen Golf (7)



d) Ford Focus (8)

Obrázok 5.4 – Tvar kocky vozidiel vybraných značiek.

6 Analýza typu problému

Problém má charakter priamej úlohy, kedy sú známe vstupné veličiny a na základe nich sú vyjadrené veličiny výstupné.

7 Výpočtové modelovanie

7.1 Systém veličín pre riešenie problému

Systém veličín obsahuje tieto podstatné prvky:

- *vlastnosti objektu* – geometria, materiál
- *pôsobenie na objekt* – silové pôsobenie pružín, oceľových lán, kontakty medzi súčasťami, gravitačné zrýchlenie
- *chovanie objektu* – deformácia, napätosť

7.2 Zaistenie vstupných údajov

7.2.1 Tiažová sila

Najväčší vplyv na tiažovú silu, ktorá pôsobí na skúmanú komponentu má okno. Príspevky ostatných súčastí do tiažovej sily boli zanedbané, pretože ich vlastná bola pre analýzu nepodstatná

Hodnota sily sa vypočítala podľa vzťahu (1, str. 360):

$$F_G = m \cdot a_g = 3,2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 31,392 \text{ N} \quad (7.1)$$

7.2.2 Predpätie pružín

Predpätie pružín spolu s tiažovou silou okna a tlakom lán tvoria základné vonkajšie silové pôsobenie na sústavu. Hodnota sily predpätia sa určí podľa vzťahu pre známe stlačenie pružiny (2, str. 210)

$$F_p = k \cdot x \quad [\text{N}] \quad (7.2)$$

Stlačenie pružiny je známa veličina, ktorá bola zmeraná priamo na mechanizme. Tuhosť pružiny však bolo potreba určiť experimentálne pomocou známej hmotnosti,

ktorou bola zaťažená. Pružina sa pod pôsobiacim závažím skrátila o hodnotu, zmeranú posuvným meradlom.

Platia nasledujúce vzťahy:

$$k = \frac{F_0}{x_0} \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (7.3)$$

$$F_0 = m_0 \cdot a_g \quad [\text{N}] \quad (7.4)$$

Vstupné hodnoty a vypočítané hodnoty sú uvedené v Tabuľke 7.1.

Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Gravitačné zrýchlenie	a_g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	9,81
Experimentálna hmotnosť	m_0	$[\text{kg}]$	1,5
Experimentálne stlačenie pružiny	x_0	$[\text{m}]$	0,0095
Experimentálna sila	F_0	$[\text{N}]$	14,715
Stlačenie pružiny merané na mechanizme	x	$[\text{m}]$	0,0249
Tuhosť pružiny	k	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$	1549,26
Sila predpätia pružiny	F_p	$[\text{N}]$	38,57

Tabuľka 7.1 – Vstupné a vypočítané hodnoty pre predpätie pružín

7.2.3 Tlak oceľového lana

Kontakt medzi skúmaným elementom a oceľovým lanom je realizovaný prostredníctvom oceľových valčekov, ktoré sú pevne spojené s lanom. Tieto valčeky tlačia na element silou, ktorú lano prenášajú. Jej hodnota je daná súčtom tiažovej sily okna a silou predpätia pružín.

$$F_L = F_G + F_p = 31,392 \text{ N} + 38,57 \text{ N} = 69,96 \text{ N} \quad (7.5)$$

Výsledná hodnota tlaku sa spočíta podľa vzťahu (3, str. 101). Hodnoty síl F_{Li} sú dosadené výpočtu v podkapitole 7.2.5

Analýza pokojového stavu:

Hodnota je rovnaká pre ľavú aj pravú drážku:

$$p = \frac{F_L}{S} = \frac{69,96 \text{ N}}{7,53 \text{ mm}} = 9,29 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

Analýza rozjazdu stavu, zrýchlenie trvajúce 0,1s:

Ľavá drážka:

$$p_{r0,1} = \frac{F_{Lr0,1}}{S} = \frac{72,5 \text{ N}}{7,53 \text{ mm}} = 9,62 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Pravá drážka:

$$p_{p0,1} = \frac{F_{Lp0,1}}{S} = \frac{66,42 \text{ N}}{7,53 \text{ mm}} = 8,82 \text{ MPa} \quad (7.8)$$

Analýza rozjazdu stavu, zrýchlenie trvajúce 0,01s:

Ľavá drážka:

$$p_{r0,01} = \frac{F_{Lr0,01}}{S} = \frac{105,38 \text{ N}}{7,53 \text{ mm}} = 13,99 \text{ MPa} \quad (7.9)$$

Pravá drážka:

$$p_{p0,01} = \frac{F_{Lp0,01}}{S} = \frac{34,54 \text{ N}}{7,53 \text{ mm}} = 4,59 \text{ MPa} \quad (7.10)$$

7.2.4 Dynamická zložka sily

Pre analýzu rozjazdu okna bolo nutné určiť dynamickú časť sily, ktorou pôsobila na *Kocku* pri štarte elektromotora. Platí vzťah:

$$F_D = m \cdot a \quad [\text{N}] \quad (7.11)$$

Neznáma hodnota zrýchlenia okna je daná vlastnosťami elektromotora. Presnú hodnotu by bolo nutné experimentálne zmerať, na čo neboli k dispozícii potrebné prostriedky. Preto bolo prijaté nasledujúce zjednodušenie:

Priebeh rýchlosti okna do okamžiku, kedy prestáva na sústavu pôsobiť zrýchlenie elektromotora je považovaný za lineárny. Čas, kedy zrýchlenie prestáva pôsobiť patrí intervalu, ktorý bol určený na základe pozorovania:

$$t \in < 0,01; 0,1 > \text{ s} \quad (7.12)$$

Veličiny, ktoré boli potrebné pre ďalší výpočet sú: dráha, ktorú okno prejde z dolnej polohy do polohy hornej a čas, za koľko túto dráhu prekoná. Dráha bola zmeraná priamo na dverách osobného automobilu. Namerané hodnoty času sú uvedené v Tabuľke 7.2

Číslo merania	Nameraný čas t_{ci} [s]
1	4,23
2	4,09
3	4,15

Tabuľka 7.2 – Namerané hodnoty času pre zdvih okna

Výsledná hodnota sa určí ako aritmetický priemer z nameraných hodnôt:

$$t_c = \frac{\sum_1^3 t_{ci}}{3} = \frac{4,23+4,09+4,15}{3} = 4,156 \text{ s} \quad (7.13)$$

Rýchlosť po skončení pôsobenia zrýchlenia sa určí zo vzťahu (1, str. 60)

$$v_k = \frac{ds}{dt} = \frac{s}{t_c} = \frac{0,46 \text{ m}}{4,156 \text{ s}} = 0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.1)$$

Lineárna funkcia, ktorá popisuje priebeh rýchlosti má funkčný predpis na intervale

a) $t_a \in < 0; 0,1 > \text{ s}$

$$v_{0,1} = 1,107 \cdot t_a \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.14)$$

b) $t_a \in < 0; 0,01 > \text{ s}$

$$v_{0,01} = 11,07 \cdot t_a \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.15)$$

Pre zrýchlenie platí vzťah (1, str. 61):

$$a = \frac{dv}{dt} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (7.16)$$

Funkčné predpisy všetkých kinematických veličín sú zhrnuté v Tabuľka 7.3

Veličina	Jednotka	Funkčný predpis na intervale	
		$t_a \in < 0; 0,1 > \text{ s}$	$t_a \in < 0; 0,01 > \text{ s}$
Dráha okna	[m]	$s_{0,1} = 0,55 \cdot t_a^2$	$s_{0,01} = 5,53 \cdot t_a^2$
Rýchlosť	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$v_{0,1} = 1,107 \cdot t_a$	$v_{0,01} = 11,07 \cdot t_a$
Zrýchlenie	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	$a_{0,1} = 1,107$	$a_{0,01} = 11,07$

Tabuľka 7.3 – Funkčné predpisy kinematických veličín

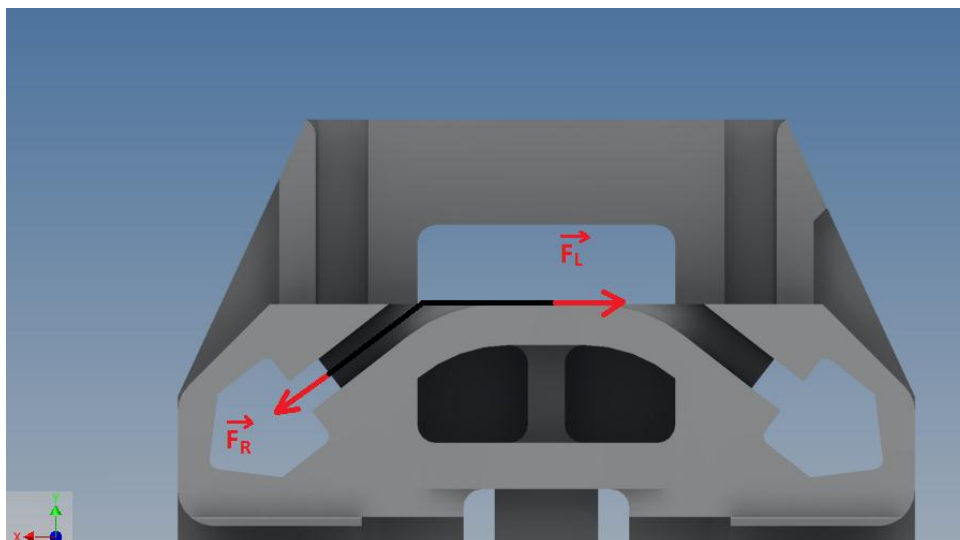
Výsledná hodnota dynamickej sily sa určí dosadením do vzťahu (7.11):

$$F_{D0,1} = 3,2 \text{ kg} \cdot 1,107 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3,54 \text{ N} \quad (7.17)$$

$$F_{D0,01} = 3,2 \text{ kg} \cdot 11,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 35,42 \text{ N} \quad (7.18)$$

7.2.5 Kontaktný tlak ocelového lana

Oceľové laná vytvárajú kontaktný tlak v drážkach analyzovanej súčiastky, ktorý nie je možné zanedbať. Silové pôsobenie jedného z dvojice lán a reakcia *Kocky* je na Obrázku 7.1 Tieto sily majú rovnakú veľkosť, avšak rôznu smer, pričom ich nositeľky sa pretínajú v jednom bode. Druhé lano pôsobí opačným smerom ako prvé.

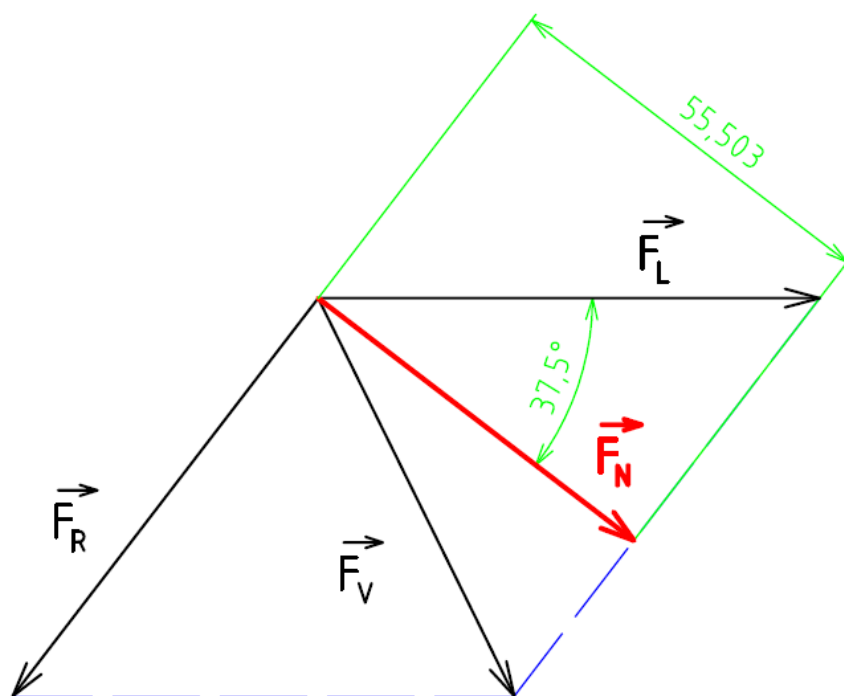


Obrázok 7.1 – Silové pôsobenie lana

Posunutím síl po nositeľkách je možné určiť pomocou vektorového súčtu ich výslednicu. Hľadaný kontaktný tlak je vytváraný práve zložkou výslednice, ktorá je rovnobežná s normálou plochy drážky. Preto sa táto podkapitola zaoberá určením hodnoty normálovej zložky silovej výslednice pôsobenia lana na *Kocku*.

Pre výpočet bola z dôvodu vyššej presnosti zvolená grafická metóda v programe AutoCad. Z Obrázku 7.2 je zrejmé, že veľkosť sily je:

$$F_N = 55,503 \text{ N} \quad (7.19)$$



Obrázok 7.2 – Normálová zložka výslednice: pokojový stav.
 F_L – hodnota sily prenášanej lanom (kap. 6.2.3.), F_R – reakcia Kocky na zaťaženie, F_V – silová výslednica, F_N – normálová zložka výslednice.

Pre analýzu rozjazdu však už neplatí, že zaťaženie je symetrické, preto bolo treba vyriešiť obe drážky. V časovom okamihu tesne po zapnutí elektromotoru nastáva ráz a ľavá drážka (Obrázok 7.1) je namáhaná viac, ako pravá. Ku hodnote sily prenášanej lanom sa v prvom prípade pripočíta dynamická zložka F_D , v druhom prípade sa odčíta.

a) pre zrýchlenie okna, trvajúce 0,1 s platí:

$$F_{Ll0,1} = F_L + F_{D0,1} = 69,96 \text{ N} + 3,54 \text{ N} = 73,5 \text{ N} \quad (7.20)$$

$$F_{Lp0,1} = F_L + F_{D0,1} = 69,96 \text{ N} - 3,54 \text{ N} = 66,42 \text{ N} \quad (7.21)$$

b) pre zrýchlenie okna, trvajúce 0,01 s platí:

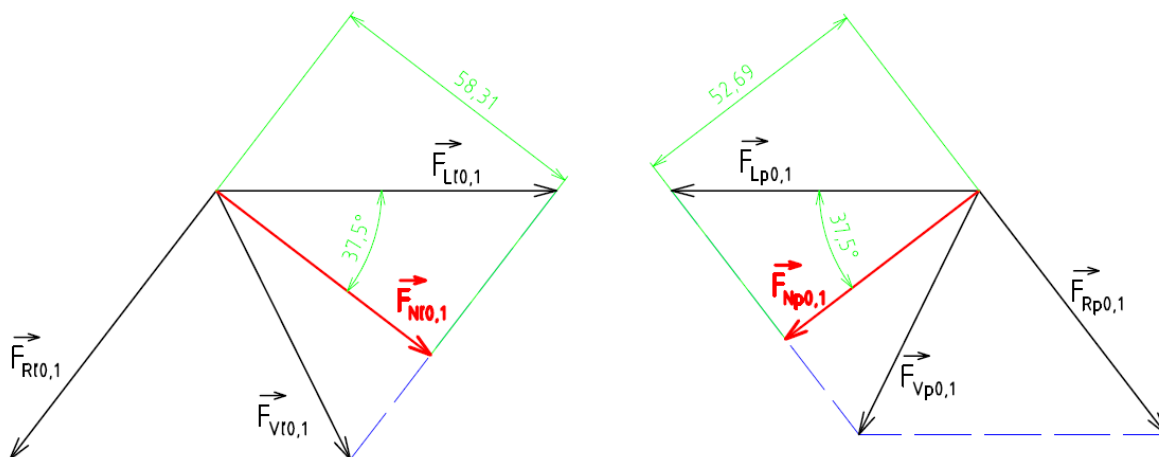
$$F_{Ll0,01} = F_L + F_{D0,01} = 69,96 \text{ N} + 35,42 \text{ N} = 105,38 \text{ N} \quad (7.22)$$

$$F_{Lp0,01} = F_L + F_{D0,01} = 69,96 \text{ N} - 35,42 \text{ N} = 34,54 \text{ N} \quad (7.23)$$

Veľkosti normálových zložiek pre prípad a) sú zrejmé z Obrázku 7.3

$$F_{Nr0,1} = 58,31 \text{ N} \quad (7.24)$$

$$F_{Np0,1} = 52,69 \text{ N} \quad (7.25)$$



Obrázok 7.3 – Normálová zložka výslednice: rozjazd so zrýchlením trvajúcim 0,1s.

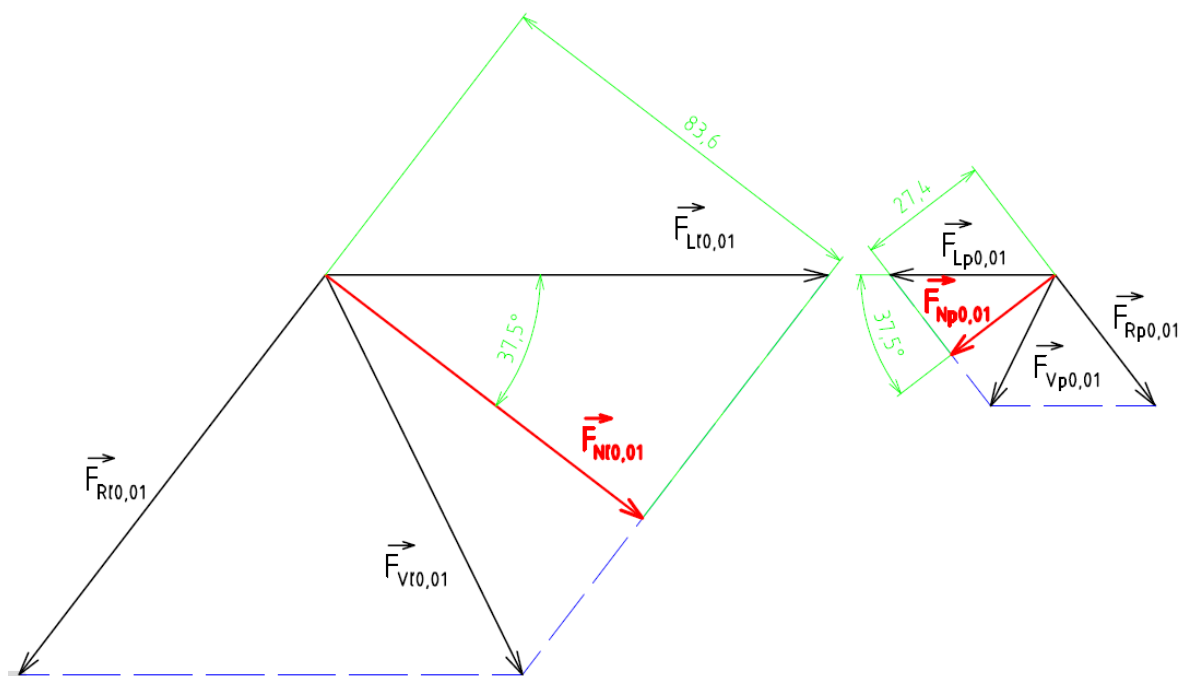
$F_{Lt0,1}$ – hodnota sily prenášanej lanom v ľavej drážke, $F_{Rt0,1}$ – reakcia Kocky na zaťaženie v ľavej drážke, $F_{Vt0,1}$ – silová výslednica v ľavej drážke, $F_{Nt0,1}$ – normálová zložka výslednice ľavej drážky.

$F_{Lp0,1}$ – hodnota sily prenášanej lanom v pravej drážke, $F_{Rp0,1}$ – reakcia Kocky na zaťaženie v pravej drážke, $F_{Vp0,1}$ – silová výslednica v pravej drážke, $F_{Np0,1}$ – normálová zložka výslednice pravej drážky.

Veľkosti normálových zložiek pre prípad b) sú zrejmé z Obrázku 7.4

$$F_{Nt0,01} = 83,6 \text{ N} \quad (7.26)$$

$$F_{Np0,01} = 27,4 \text{ N} \quad (7.27)$$



Obrázok 7.4 – Normálová zložka výslednice: rozjazd so zrýchlením trvajúcim 0,01s.

$F_{Lt0,01}$ – hodnota sily prenášanej lanom v ľavej drážke, $F_{Rt0,01}$ – reakcia Kocky na zaťaženie v ľavej drážke, $F_{Vt0,01}$ – silová výslednica v ľavej drážke, $F_{Nt0,01}$ – normálová zložka výslednice ľavej drážky.

$F_{Lp0,01}$ – hodnota sily prenášanej lanom v pravej drážke, $F_{Rp0,01}$ – reakcia Kocky na zaťaženie v pravej drážke, $F_{Vp0,01}$ – silová výslednica v pravej drážke, $F_{Np0,01}$ – normálová zložka výslednice pravej drážky.

7.3 Tvorba parciálnych modelov

7.3.1 Model topológie

Prvok, ktorý je predmetom analýzy sa nachádza vo dverách osobného automobilu, ktoré sa pre výpočtové modelovanie musia riešiť zvlášť, po častiach. Preto sa štúdia zameriava len na sťahovací mechanizmus ovládania pohybu bočného okna automobilu (Obrázok 5.1).

7.3.2 Model dekompozície

Analyzovaný prvok je v sťahovacom mechanizme obsiahnutý dvakrát. Silové zaťaženie oboch prvkov je totožné, preto bol predmetom analýzy iba jeden prvok a ďalšie časti mechanizmu, ktoré sú s ním v kontakte.

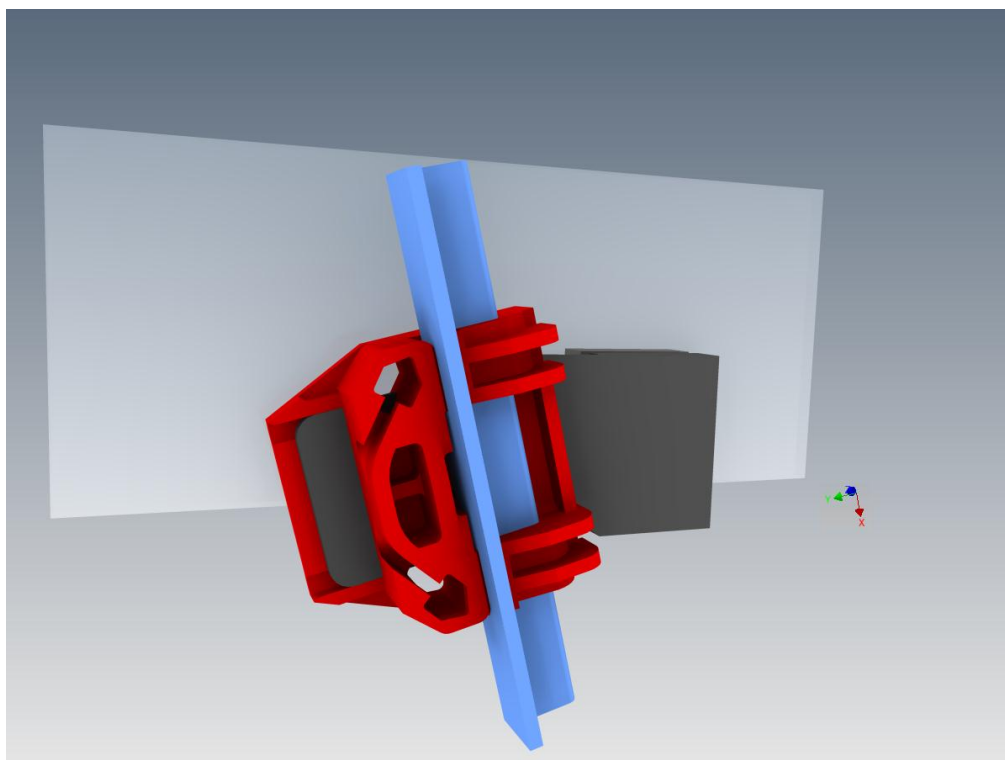
7.3.3 Model geometrie

Geometria elementu, získaná meraním posuvným meradlom zo zlomeného originálu bola spracovaná do 3D modelu v programe Autodesk Inventor. Ďalej boli vymodelované ďalšie prvky zostavy, a to nasledovne:

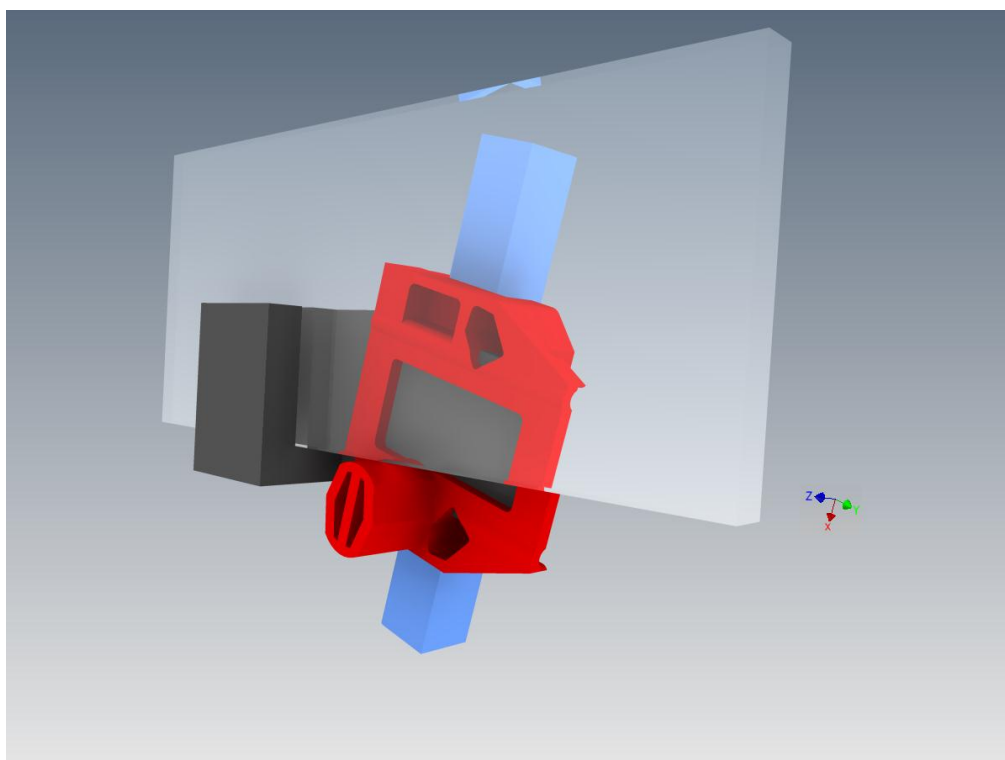
- *časť vodiacej lyžiny*
- *držiak skla*
- *časť okna*

Rozmery súčastí boli volené s ohľadom na rozmery analyzovaného prvku. Geometria držiacu skla bola zjednodušená. Dôvodom bola skutočnosť, že táto súčiastka nebola predmetom analýzy.

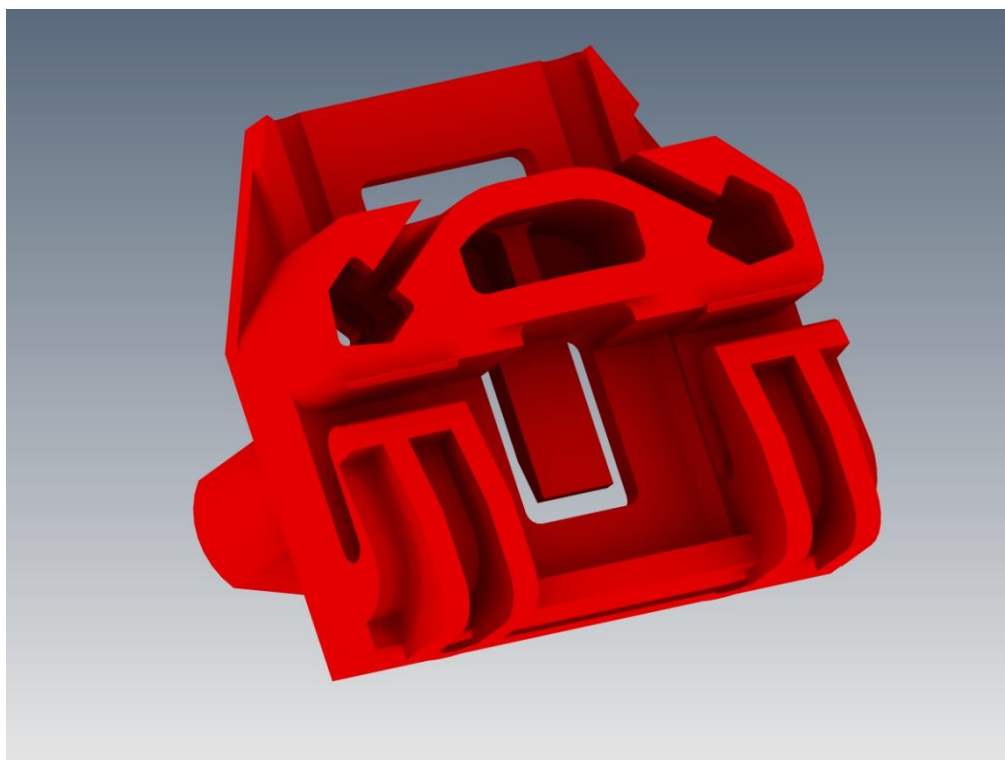
Vymodelovaná zostava bola ďalej vyexportovaná do programu ANSYS, kde sa uskutočnili ďalšie časti analýzy, popísané nižšie.



Obrázok 7.5 – Model geometrie zostavy: pohľad 1



Obrázok 7.6 – Model geometrie zostavy: pohľad 2



Obrázok 7.7 – Model geometrie prvku

7.3.4 Model vlastností štruktúry objektu

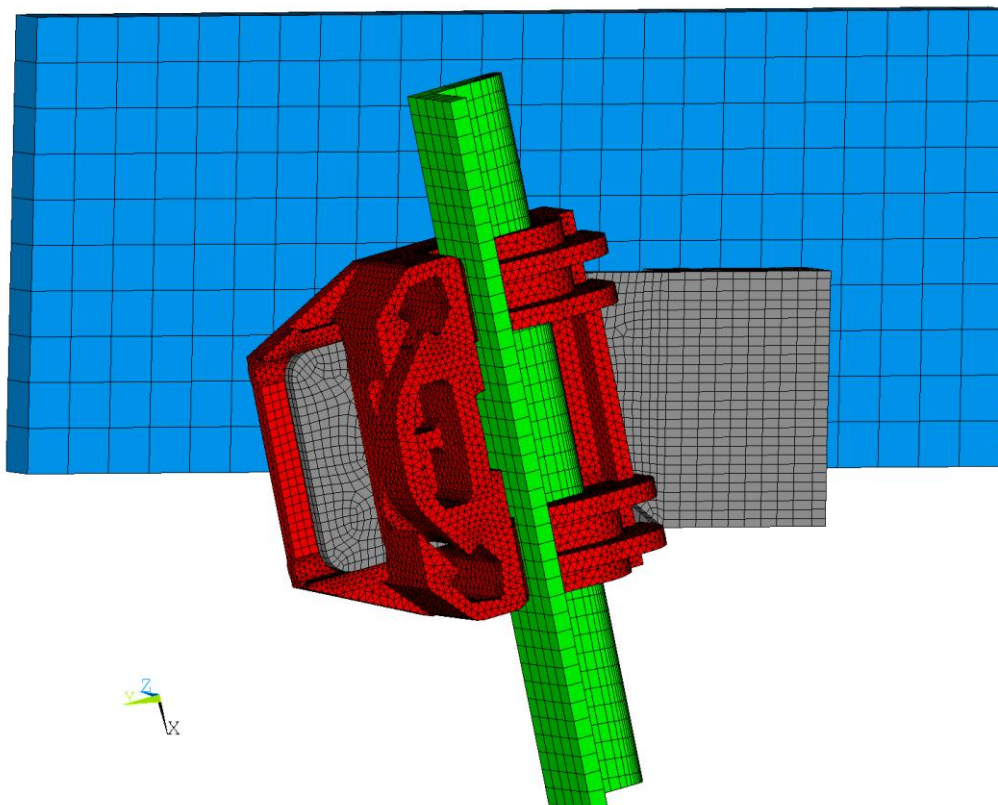
Pre výpočet bolo treba okrem typu materiálu poznať aj základné mechanické charakteristiky. Bol uvažovaný Hookovský materiál – lineárne pružný a izotropný, ten je definovaný modulom pružnosti v ťahu a Poissonovým pomerom.

Súčasť	Materiál	Modul pružnosti v ťahu E [MPa]	Poissonov pomer [-]
Kocka	PE	2900	0,38
Vodiaca lyžina	Oceľ	210000	0,30
Držiak okna	Oceľ	210000	0,30
Časť okna	Oceľ	210000	0,30

Tabuľka 7.4 – Použité materiály a ich mechanické charakteristiky

Pre komponentu Časť okna bola zvolená oceľ. Dôvodom tohto výberu bol fakt, že bola požadovaná vysoká tuhosť súčiastky, keďže nie je hlavným premetom analýzy. Plní funkciu kontaktného telesa a telesa pre aplikáciu okrajových podmienok.

7.3.5 Diskretizácia modelu geometrie

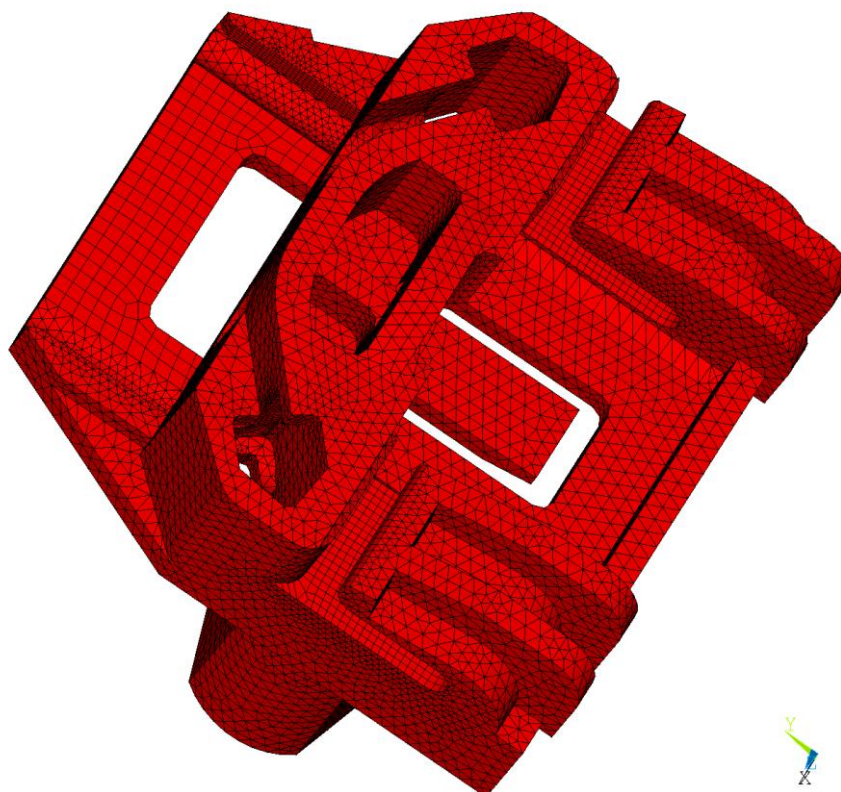


Obrázok 7.8 – Diskretizácia modelu geometrie zostavy

Pre tvorbu konečnoprvkovej siete bol použitý prvok SOLID186. Jedná sa o kvadratický 3D prvok, ktorý má dvadsať uzlov s tromi stupňami voľnosti v každom z nich- konkrétne sa jedná o posuvy v osových smeroch. Prvok sa v analýze vyskytuje vo všetkých svojich modifikáciách.

Ďalším použitým prvkom bol MESH200. Je to prvok, ktorý nevstupuje do výpočtu. Používa sa na predpripravenie konečnoprvkovej siete. Dá sa kombinovať s ďalšími typmi prvkov a po vytvorení siete na celom telese sa dá zmazať, prípadne môže byť ponechaný na mieste. Vo výpočte sa používa výhradne jeho štvoruholníková osemuzlová modifikácia (4).

Globálna veľkosť prvku bola zvolená jeden milimeter. Táto voľba sa ukázala byť najlepším kompromisom medzi kvalitným tvarom prvku a celkovým množstvom prvkov v celej analýze. Plochy, na ktoré boli aplikované okrajové podmienky a plochy, ktoré sa počas analýzy ukázali byť kľúčové boli zdiskretizované prvkami, ktorých veľkosť sa pohybovala od desiatok ku stovkám mikrometrov. Celkový počet prvkov takmer dosiahol 160 000.



Obrázok 7.9 - Diskretizácia modelu geometrie Kocky

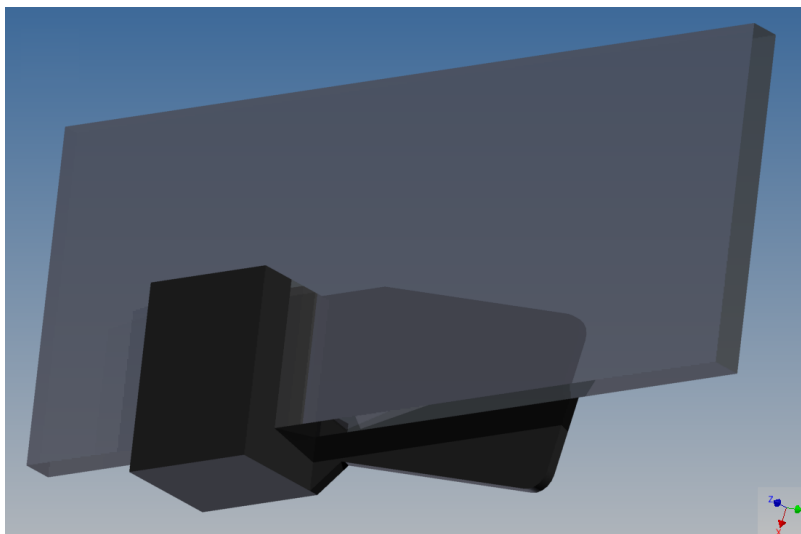
Kontakt medzi komponentmi

Kontakty vnášajú do numerického výpočtu značnú nestabilitu, čo môže mať za následok problémy s konvergenciou úlohy. Pre analýzu však boli nutné. K ich modelovaniu boli použité riadiaci prvok TARGET170 a prvok kontaktný CONTA174. Nastavenie kontaktov je zhrnuté v Tabuľke 7.5.

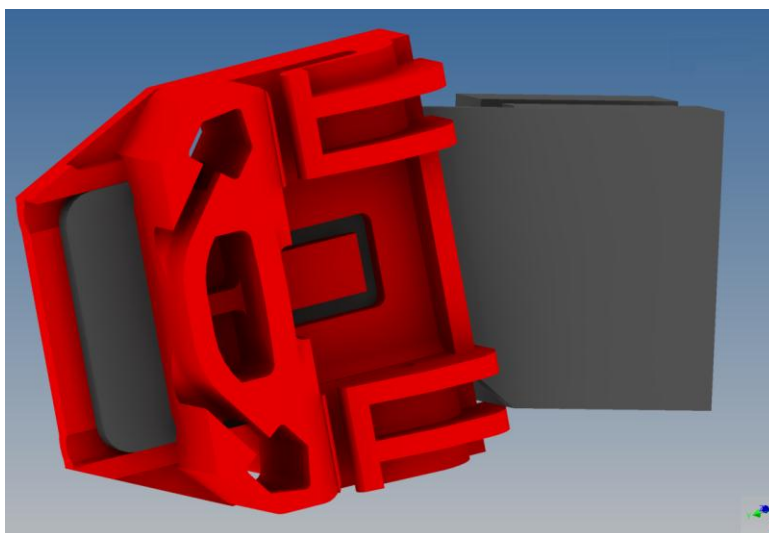
Kontaktná dvojica	Nastavenie chovania kontaktnej plochy	Označenie v Obrázku 7.10
Časť okna – Držiak okna	Bonded (always)	a
Držiak okna – Kocka	Standard	b
Kocka – Vodiaca lyžina	Standard	c
Kocka – Časť okna	Standard	d

Tabuľka 7.5 - Kontakty medzi komponentmi

Na Obrázku 7.10 sú zobrazené jednotlivé kontaktné dvojice súčastí.

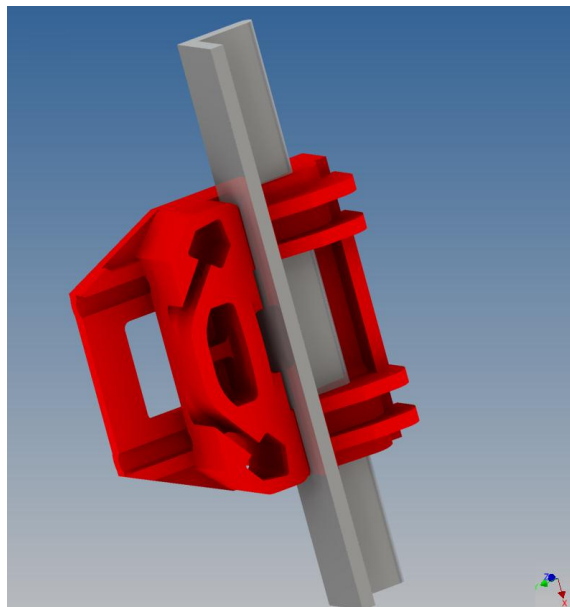


a) *čast' okna – držiak okna*

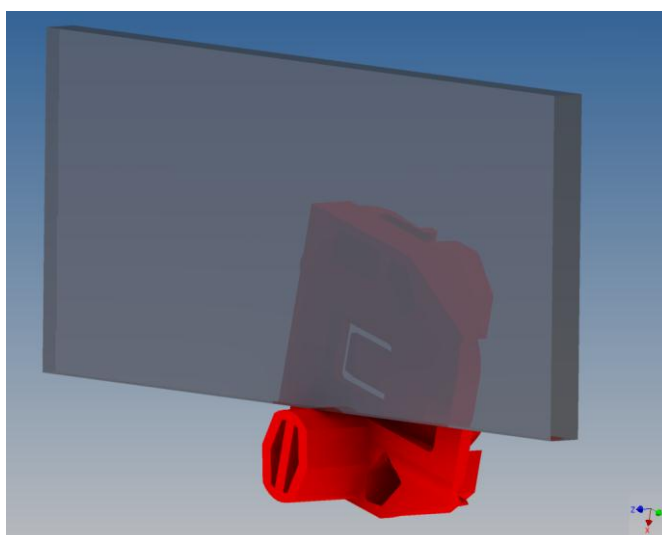


b) *držiak okna - kocka*

Obrázok 7.10 – Kontaktné dvojice



c) kocka – vodiaca lyžina



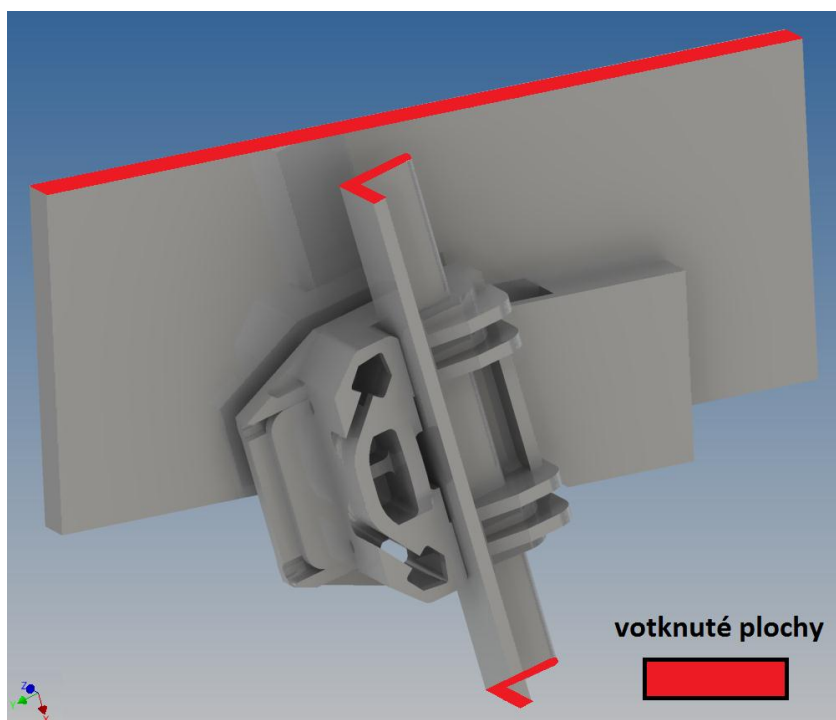
d) kocka – časť okna

Obrázok 7.10 – Kontaktné dvojice

7.3.6 Model okrajových podmienok

Každá konečnoprvková analýza musí mať predpísané okrajové podmienky, ktoré úlohu definujú v priestore.

Uzlom hornej a dolnej plochy komponenty *Vodiaca lyžina* uzlom hornej plochy súčiastky *Časť skla* boli zamedzené posuvy vo všetkých smeroch.

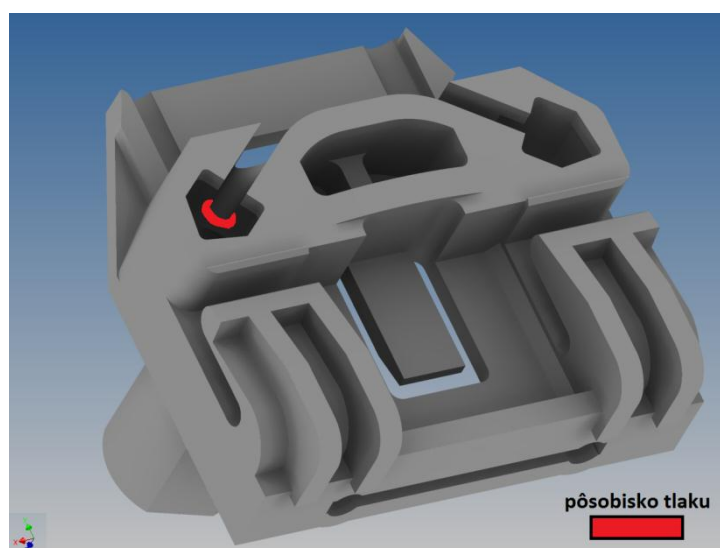


Obrázok 7.11 – Model okrajových podmienok.

7.3.7 Model zaťaženia

7.3.7.1 Pôsobisko tlaku

Vo oboch vybraniach v *Kocke* boli vytvorené plochy, ktoré odpovedajú veľkosti podstavy oceľových valčekov. Do týchto plôch bol predpísaný tlak pre daný výpočet podľa kapitoly 7.2.3, ktorý pôsobí smerom do telesa. Bolo uvažované rovnomerné rozloženie kontaktného tlaku od valčekov. Dôvodom zjednodušenia sú malé rozmery kontaktných plôch. Jedna z plôch je zobrazená na Obrázku 7.12.

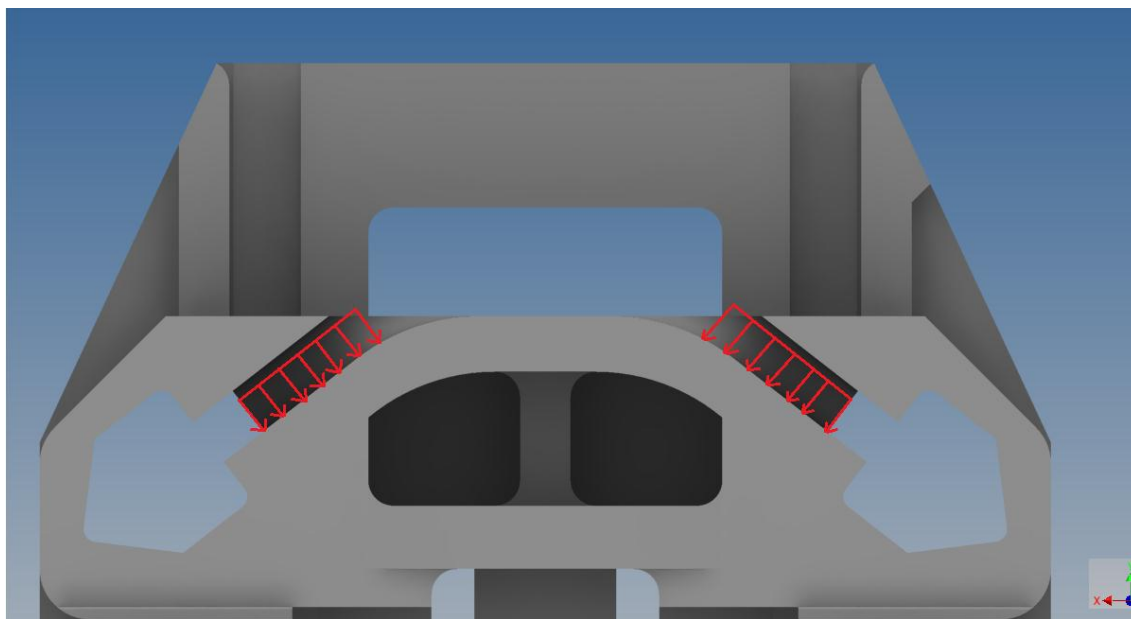


Obrázok 7.12 – Pôsobisko tlaku.

7.3.7.2 Pôsobisko sily

Kontaktný tlak oceľových lán na *Kocku* bol modelovaný silou, ktorou sú laná tlačené na kocku. Hodnota tejto sily, rozložená zložiek bola zadaná do jednotlivých uzlov na čiare v drážke, kadiaľ sú laná vedené (Obrázok 7.13)

Hodnoty sily pre jednotlivé výpočty boli spočítané z normálových zložiek výslednice pôsobiacich síl (kap. 7.2.5), ktoré boli podelené počtom uzlov. Ten bol v každom prípade 16.



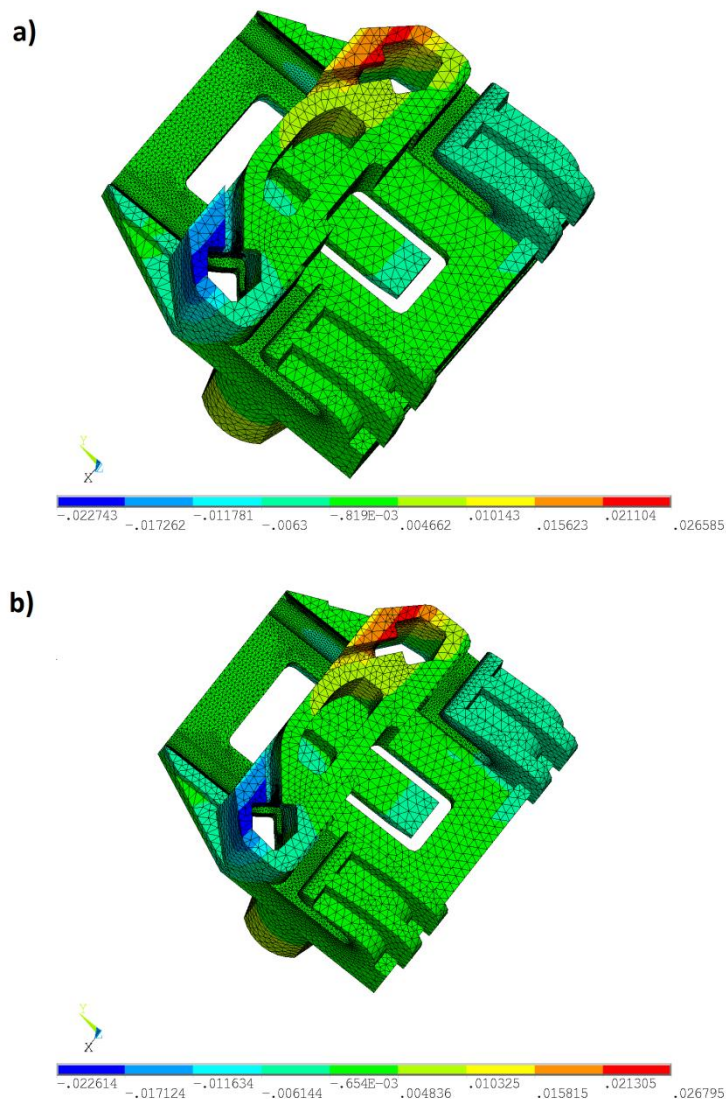
Obrázok 7.13 – Pôsobisko sily.

8 Realizácia algoritmu výpočtového modelovania

Numerický výpočet obsahuje výraznú nelinearitu, ktorá je spôsobená prítomnosťou kontaktných elementov. Táto skutočnosť má za následok nestabilitu riešenia. Preto bolo zvolený dostatočný počet substepov.

Ďalej bol skúmaný vplyv uvažovania malých, či veľkých deformácií. Ten sa ukázal byť zanedbateľný, ako je vidieť na Obrázku 8.1. Na základe tejto skutočnosti boli všetky ďalšie výpočty spúšťané s uvažovaním malých deformácií, a to z dôvodu kratšieho výpočtového času.

Riešič rovníc bol zvolený Pre- Condition CG s dostatočnou presnosťou. Rozdiel pri použití štandardného riešiča bol opäť zanedbateľný. Touto voľbou bol celý výpočet podstatne urýchlenný. Výpočtový čas sa pohyboval v rádoch niekoľkých hodín na zostave tvorenej štvorjadrovým procesorom s frekvenciou 2,8 GHz a operačnou pamäťou 8 GB RAM pod licenciou ANSYS Academic Research.



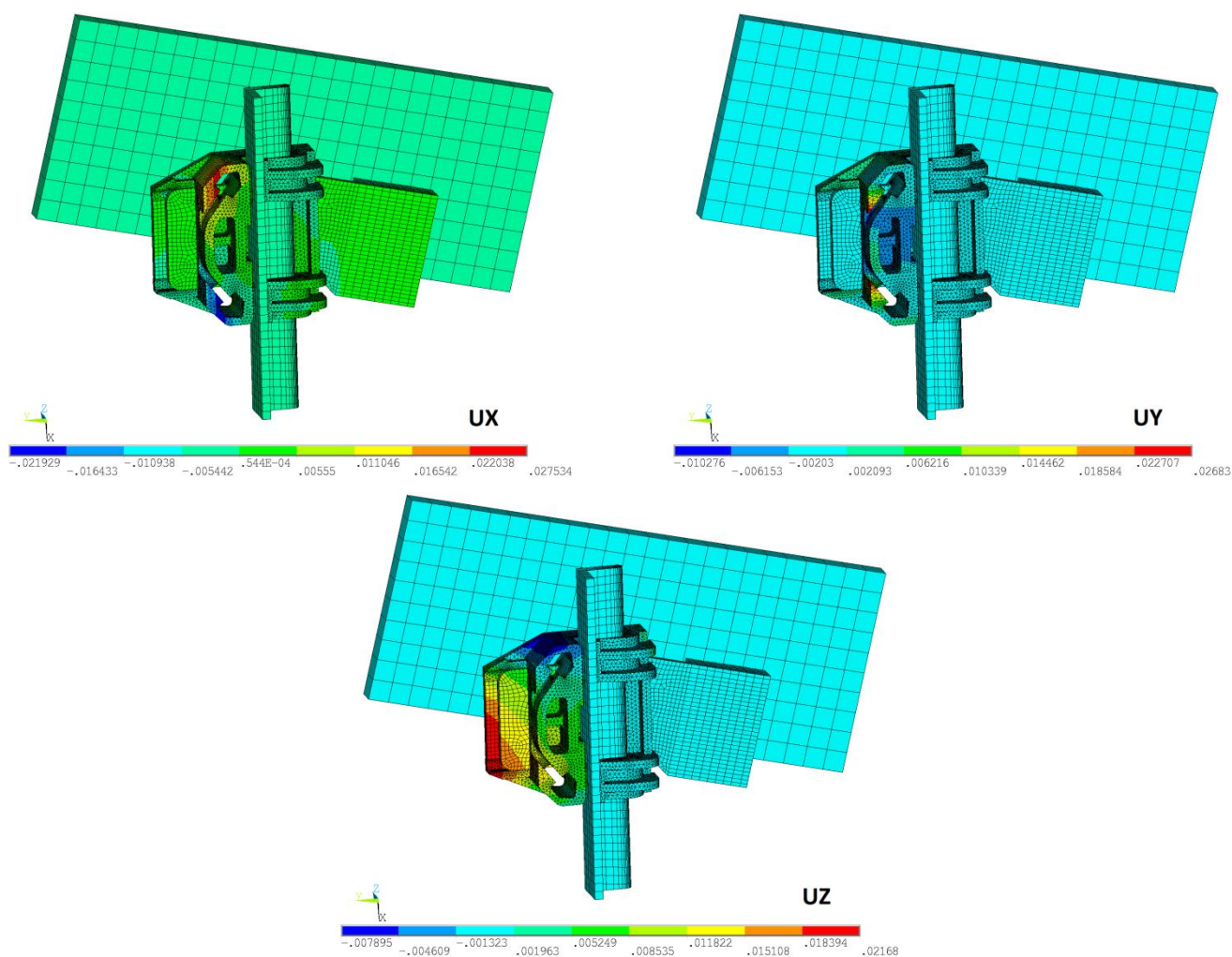
Obrázok 8.1 – Vplyv malých a veľkých deformácií: posuv v smere osy X.
a) malé deformácie, b) veľké deformácie. [mm]

9 Prezentácia a analýza výsledkov výpočtového modelovania

K zobrazení výsledkov boli použité osovú posuvy vo všetkých smeroch, všetky hlavné napätia a redukované napätie podľa podmienky HMH.

9.1 Analýza pokojového stavu

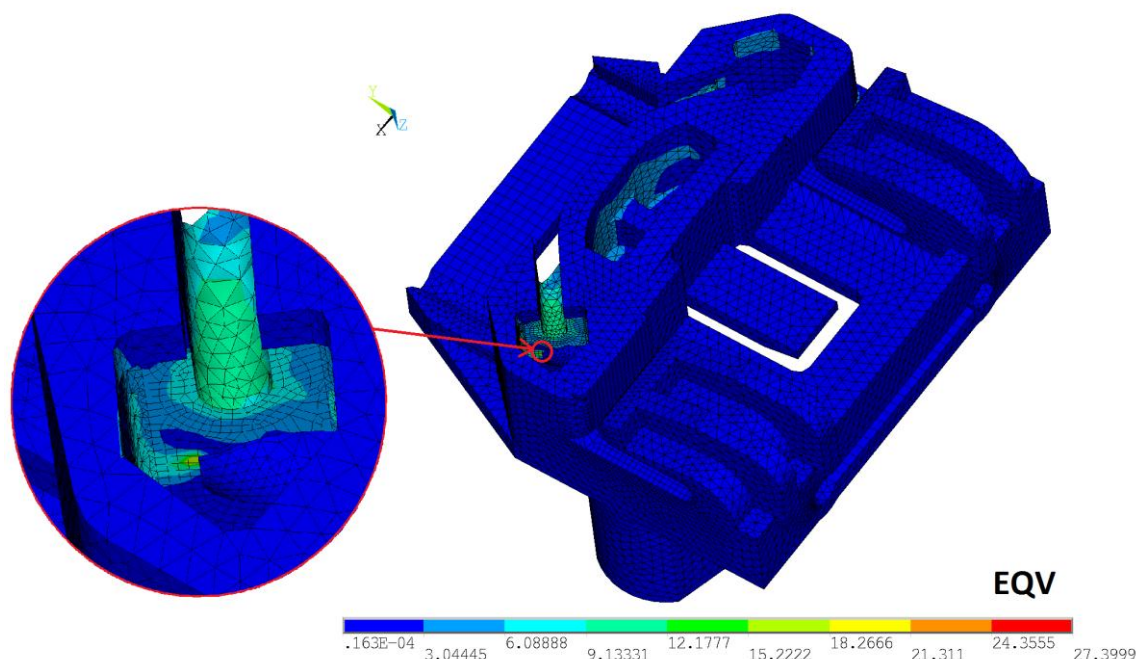
Ako prvé bolo treba overiť správnosť výpočtu. Tú je možno vidieť na zobrazení osových posuvov celej zostavy.



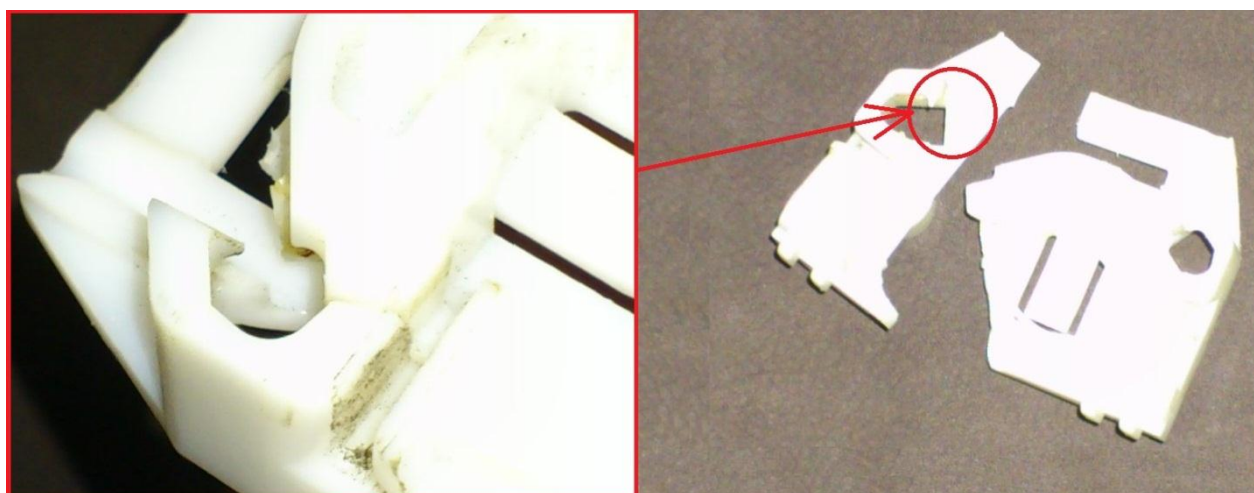
Obrázok 9.1 – Osové posuvy zostavy: pokojový stav [mm]

Hodnoty jednotlivých posuvov sa pohybujú v rádoch stotín milimetra, preto sú považované za zanedbateľné.

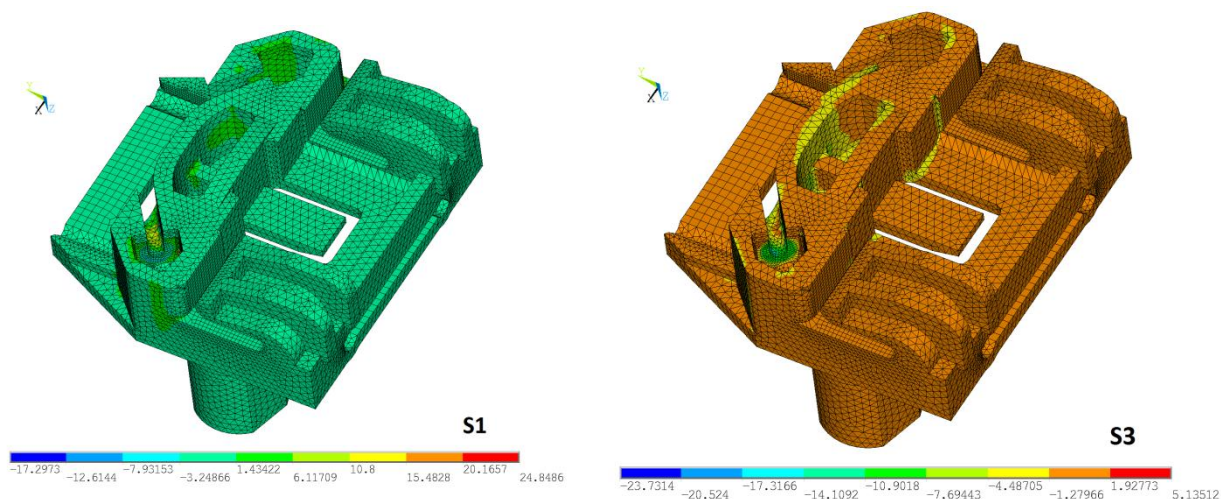
Rozloženie napätia je vykresľované na komponente *Kocke*, ako na kľúčovom prvku analýzy. Zo zobrazenia redukovaného napätia podľa podmienky HMH je možné lokalizovať kritické miesto na výpočtovom modeli *kocky* (Obrázok 9.2) a porovnať so skutočnou rozlomenou *kockou*. Jedná sa miesto styku komponentov *Držiak skla* a *Kocka* v oblasti pôsobenia zaťažovacieho tlaku ocelových valčekov. V tomto mieste je ostrá hrana, ktorá pôsobí ako koncentrátor napätia, čím zvyšuje hodnotu napätia nominálneho.



Obrázok 9.2 – Kritické miesto a redukované napätie : pokojový stav [MPa]



Obrázok 9.3 – Skutočná rozlomená kocka s vyznačeným kritickým miestom



Obrázok 9.4 – Prvé a tretie hlavné napätie: pokojový stav. [MPa]

Hodnoty napätia v kritickom mieste sú zhrnuté v Tabuľke 9.1. Je vidno, že všetky hodnoty napätí sú nižšie, ako je medza sklzu materiálu, ktorá má hodnotu 39,8 MPa (5).

Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	24,85
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	5,14
Redukované napätie podľa HMH	EQV	[MPa]	27,40

Tabuľka 9.1 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: pokojový stav.

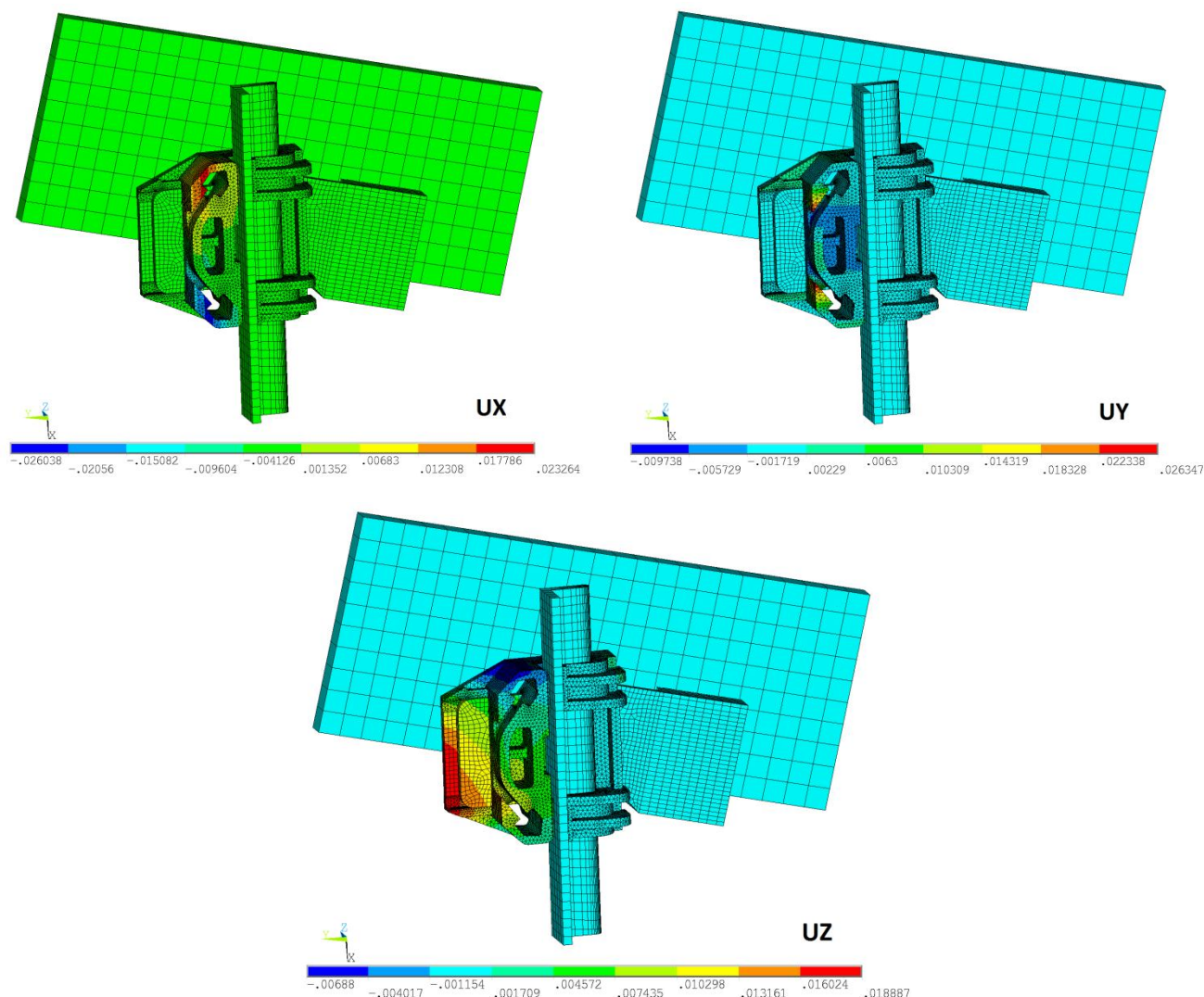
Koeficient bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti sa spočíta podľa vzťahu (3, str. 161):

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}} = \frac{39,8}{27,4} = 1,45 \quad (9.1)$$

Hodnota bezpečnosti je vyššia ako jedna, to znamená, že v komponente nevznikajú plastické deformácie.

9.2 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,1 s

Na Obrázku 9.5 sú zobrazené posuvy v osových smeroch analýzy tesne po rozjazde. Ich hodnoty sú opäť veľmi malé.



Obrázok 9.5 – Osové posuvy zostavy: rozjazd 0,1s [mm]

Rozloženie napätia je rovnaké, ako v predchádzajúcom výpočte, to znamená, že je rovnaké aj kritické miesto. Graficky je rozloženie zobrazené na Obrázku 9.6 a hodnoty napätí sú zhrnuté v Tabuľke 9.2.

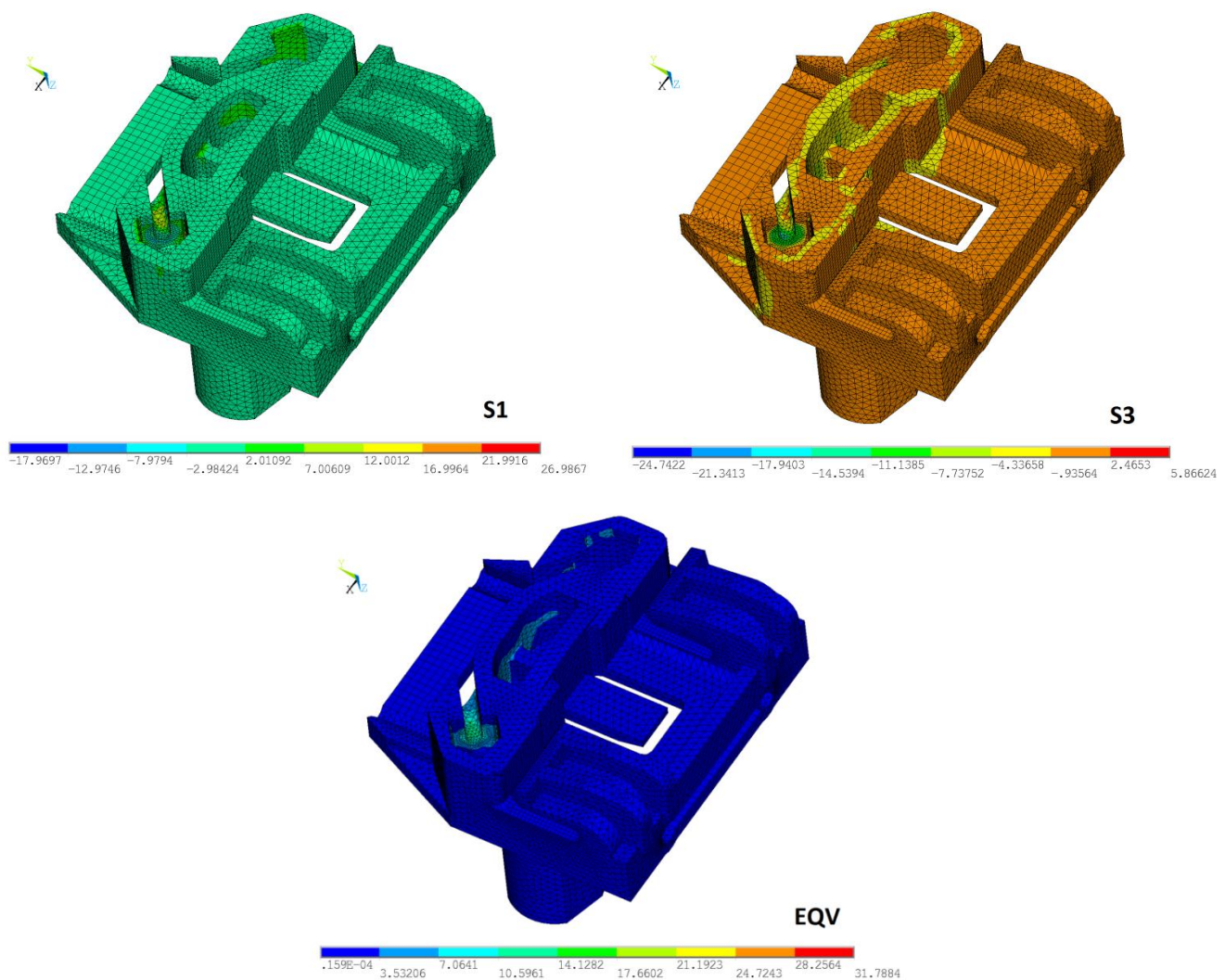
Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	26,99
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	5,87
Redukované napätie podľa HMH	EQV	[MPa]	31,79

Tabuľka 9.2 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: rozjazd 0,1s.

Všetky hodnoty napätí sú opäť nižšie ako je medza sklzu materiálu. Koeficient bezpečnosti voči MSP:

$$k_{k0,1} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red0,1}} = \frac{39,8}{31,79} = 1,25 \quad (9.2)$$

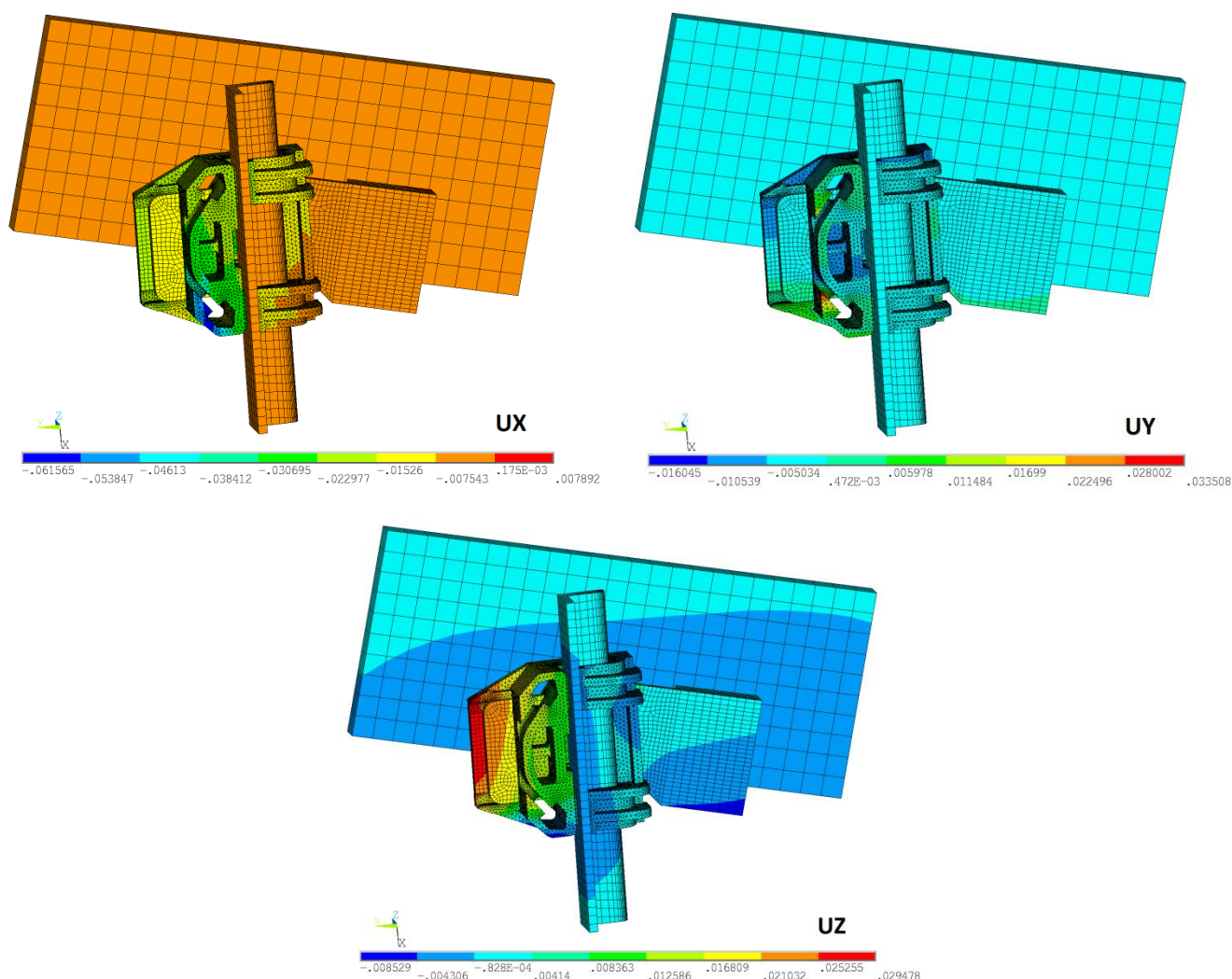
Jeho hodnota je vyššia ako jedna a v komponente plastické deformácie nevzniknú.



Obrázok 9.6 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie: rozjazd 0,1s [MPa]

9.3 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,01 s

Na Obrázku 9.7 sú zobrazené posuvy v osových smeroch analýzy tesne po rozjazde. Ich hodnoty sú opäť veľmi malé.



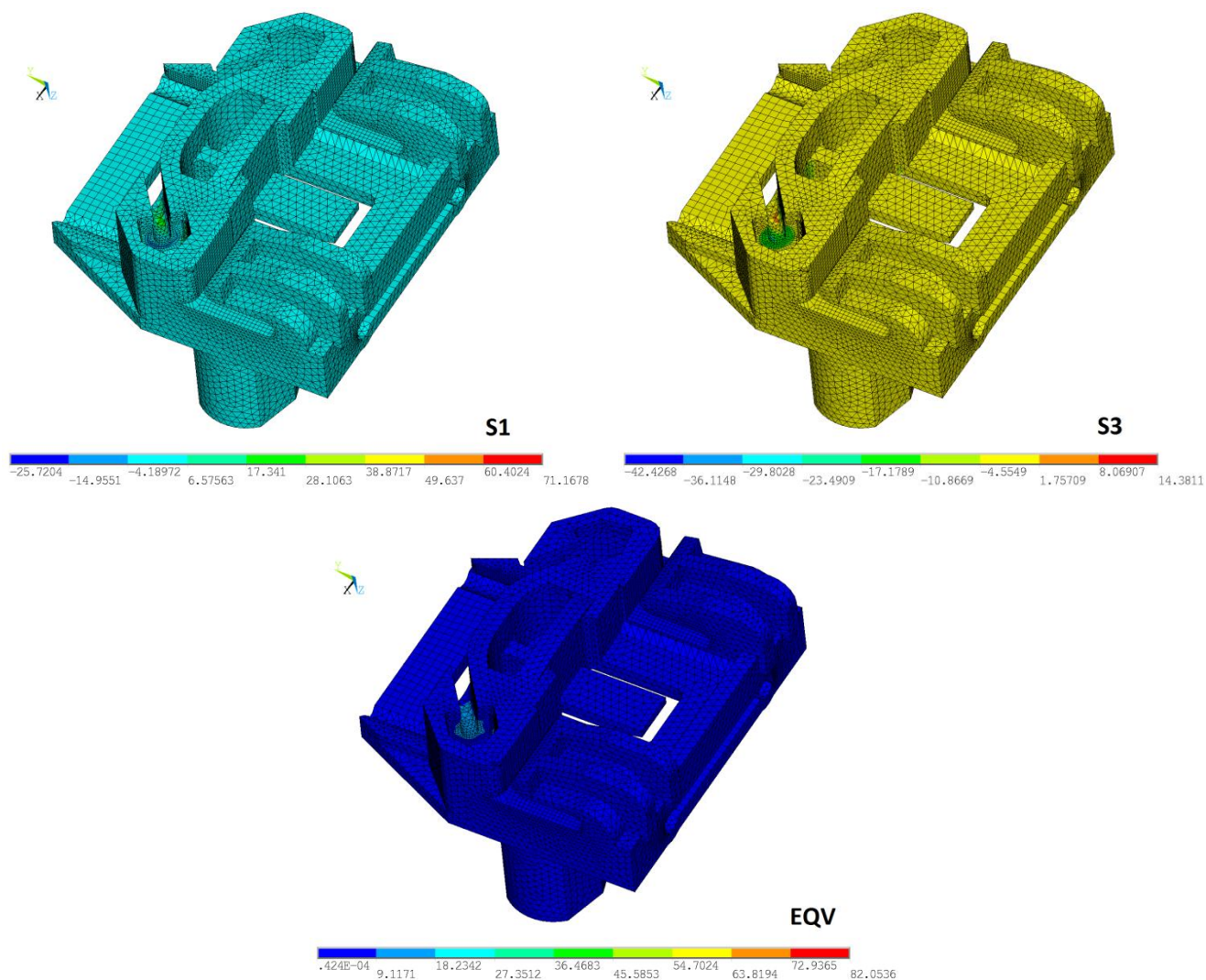
Obrázok 9.7 – Osové posuvy zostavy: rozjazd 0,01s [mm]

Rozloženie napätia je rovnaké, ako v predchádzajúcom výpočte, to znamená, že je rovnaké aj kritické miesto. Graficky je rozloženie zobrazené na Obrázku 9.7 a hodnoty napätí sú zhrnuté v Tabuľke 9.3.

Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	71,17
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	14,38
Redukované napätie podľa HMH	EQV	[MPa]	82,05

Tabuľka 9.3 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: rozjazd 0,01s.

Hodnota redukovaného napätia je vyššia ako medza pevnosti materiálu, ktorá je 65 MPa. To znamená, u kocky dôjde k lomu.



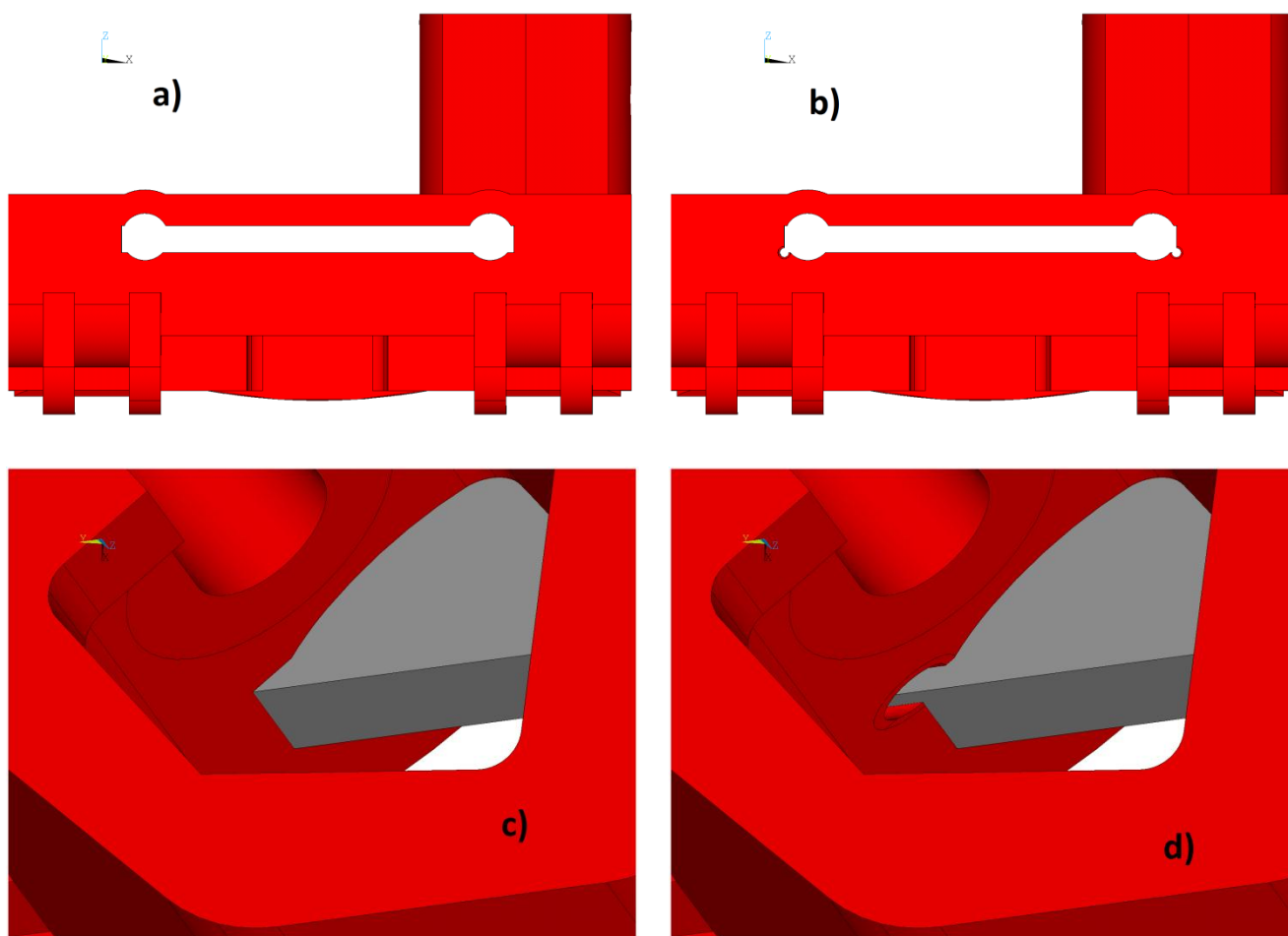
Obrázok 9.8 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie, : rozjazd 0,01s [MPa]

10 Tvarová úprava

Kritickým miestom je ostrá hrana v oblasti styku *kocky* a *držiaku okna*. Bola navrhnutá tvarová úprava, ktorá túto hranu odstránila. Po celej dĺžke kocky boli vytvorené kruhové diery o priemere 0,5 mm. Dôvodom bol fakt, že diera má menší vrubový účinok ako ostrá hrana. Všetky časti analýzy boli totožné, ako pri telese bez úpravy, okrem modelu geometrie a z neho vyplývajúcej diskretizácie modelu geometrie.

10.1. Model geometrie tvarovej úpravy

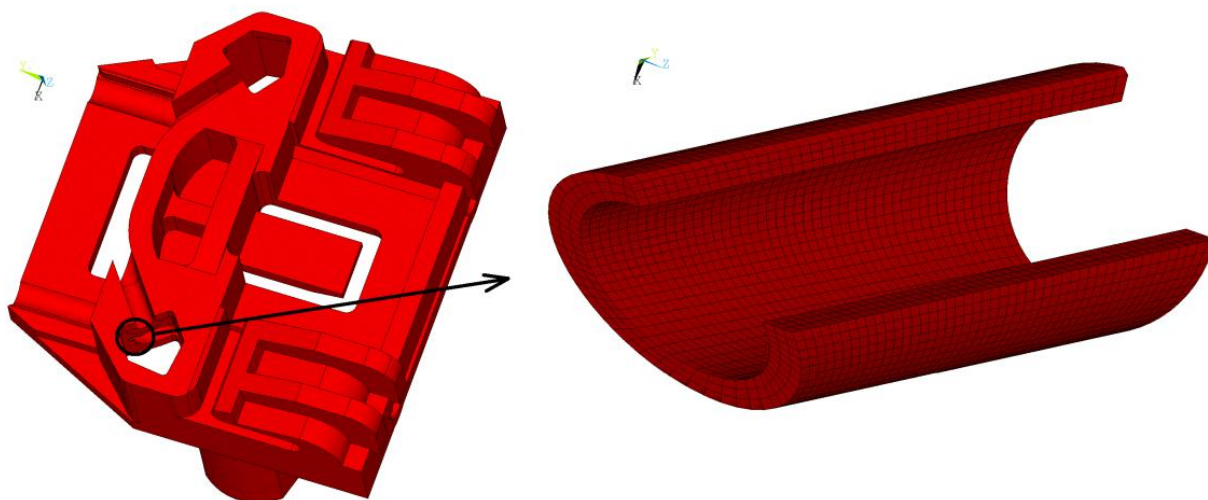
Na Obrázku 10.1 je zobrazený model geometrie *kocky* a kritického miesta (Obrázok 9.2) pred a po tvarovej úprave.



Obrázok 10.1 – Model geometrie úpravy kocky a) pred úpravou – pohľad zdola, b) po úprave – pohľad zdola. Kritické miesto c) pred úpravou, d) po úprave

10.2 Diskretizácia modelu geometrie tvarovej úpravy

V modeli geometrie *kocky* bol vytvorený podobjem, ktorý obsahoval kritické miesto. Dôvodom jeho vytvorenia bolo získanie pravidelnej siete v okolí kritického miesta. Všetky ďalšie časti diskretizácie boli rovnaké, ako v prípade analýzy bez tvarovej úpravy.

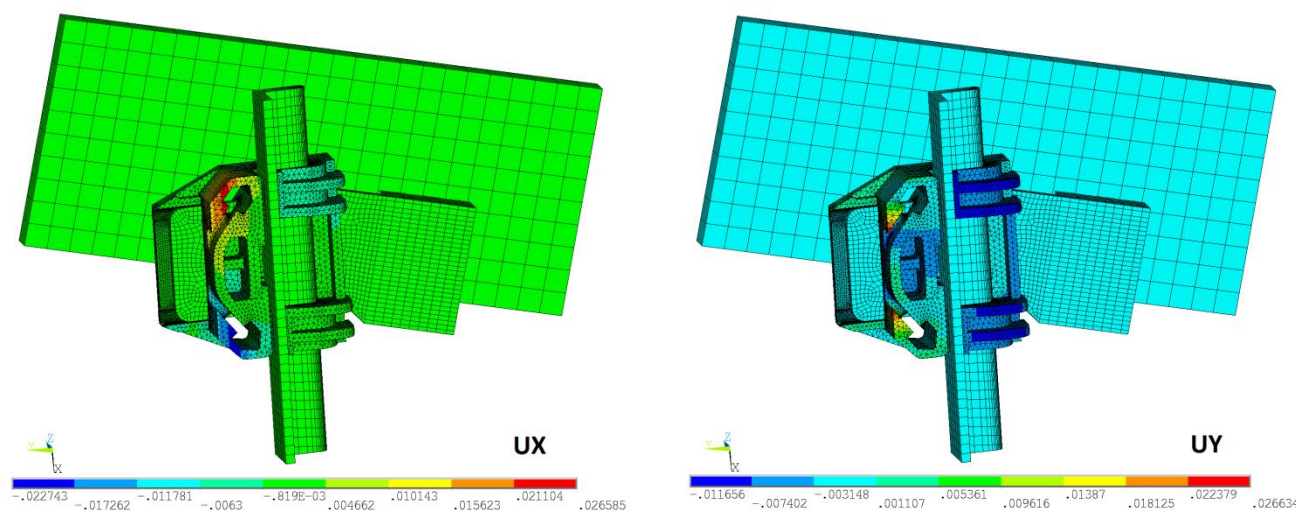


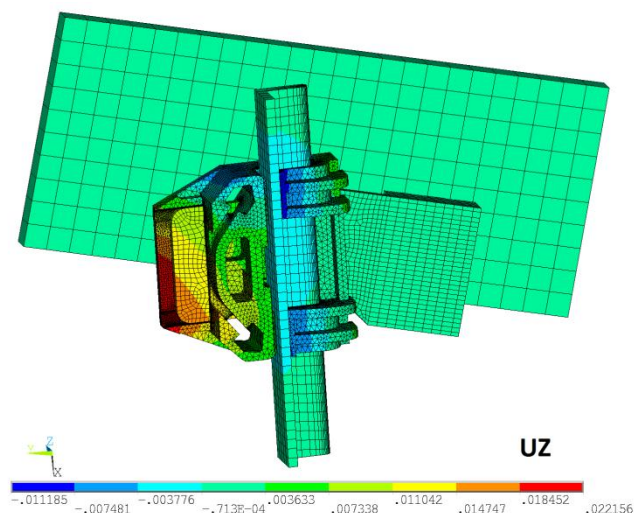
Obrázok 10.2 – Diskretizácia modelu geometrie v okolí kritického miesta

10.3 Prezentácia a analýza výsledkov výpočtového modelovania tvarovej úpravy

10.3.1 Analýza pokojového stavu

Na zobrazení osových posuvov vo všetkých smeroch na Obrázku 10.3. je opäť vidno správnosť výpočtu. Z dôvodu malých hodnôt sú tieto posuvy zanedbateľné.





Obrázok 10.3 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: pokojový stav [mm]

Rozloženie napätia rovnaké ako v predchádzajúcich výpočtoch, okrem okolia kritického miesta a je na Obrázku 10.4 vykresľované na podobjeme, vytvorenem za týmto účelom. Hodnoty sú zhrnuté v Tabuľke 10.1.

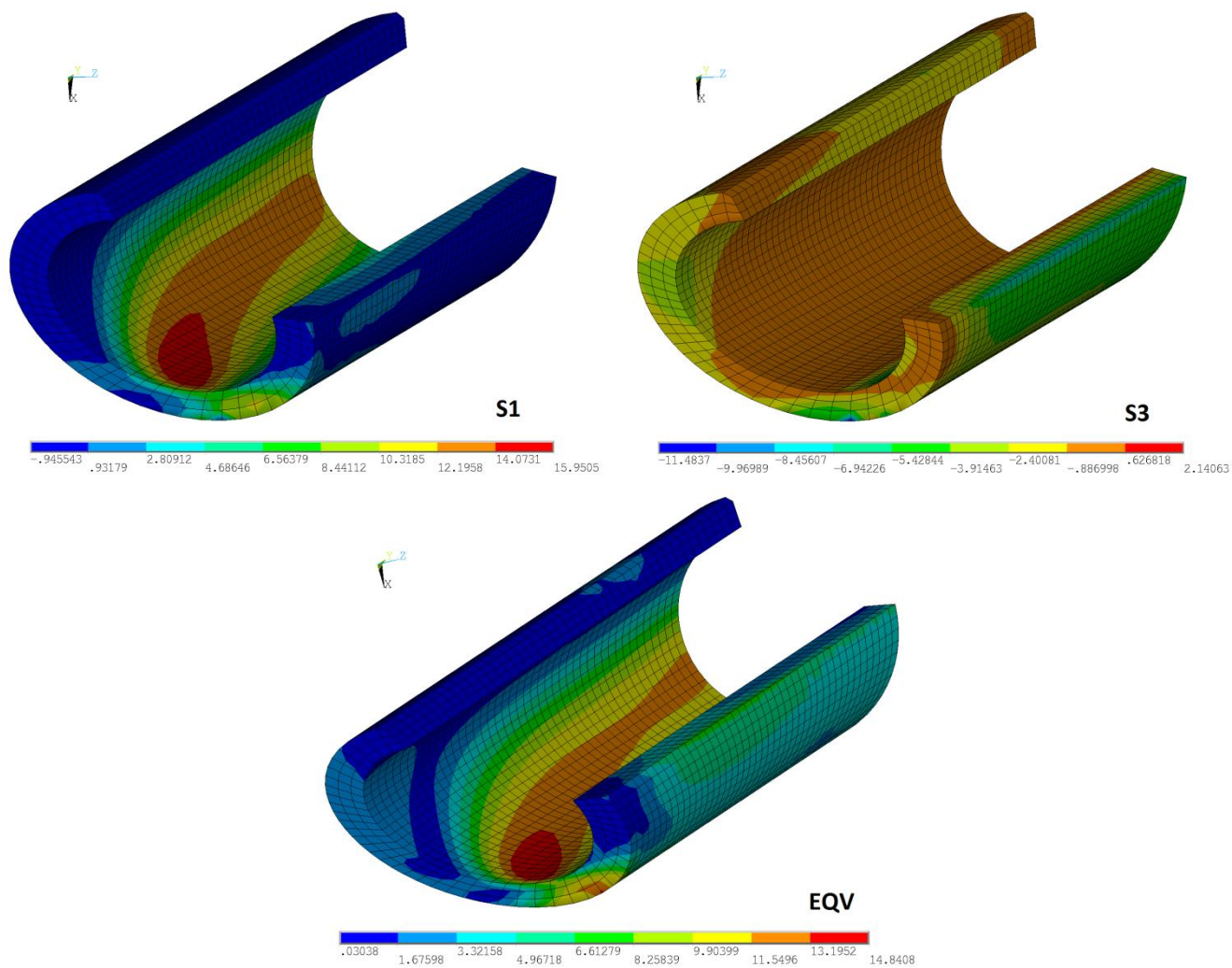
Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	15,95
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	0,88
Redukované napätie podľa HMM	EQV	[MPa]	14,84

Tabuľka 10.1 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: pokojový stav

Hodnota prvého hlavného napätia je vyššia ako hodnota redukovaného napätia. To znamená, že je možné očakávať krehké porušovanie komponenty. Z rôznych kritérií pre krehké porušovanie bolo vybrané Rankinove, pre jeho nenáročnosť na znalosť mechanických charakteristík materiálu. Toto kritérium vyberá maximálne napätie z troch hlavných napätí a porovnáva ich s medzou sklzu materiálu. Hodnota koeficientu bezpečnosti ku medznému stavu krehkého porušenia podľa Rankina je:

$$k_R = \frac{\sigma_k}{\sigma_1} = \frac{39,8}{15,95} = 2,49 \quad (10.1)$$

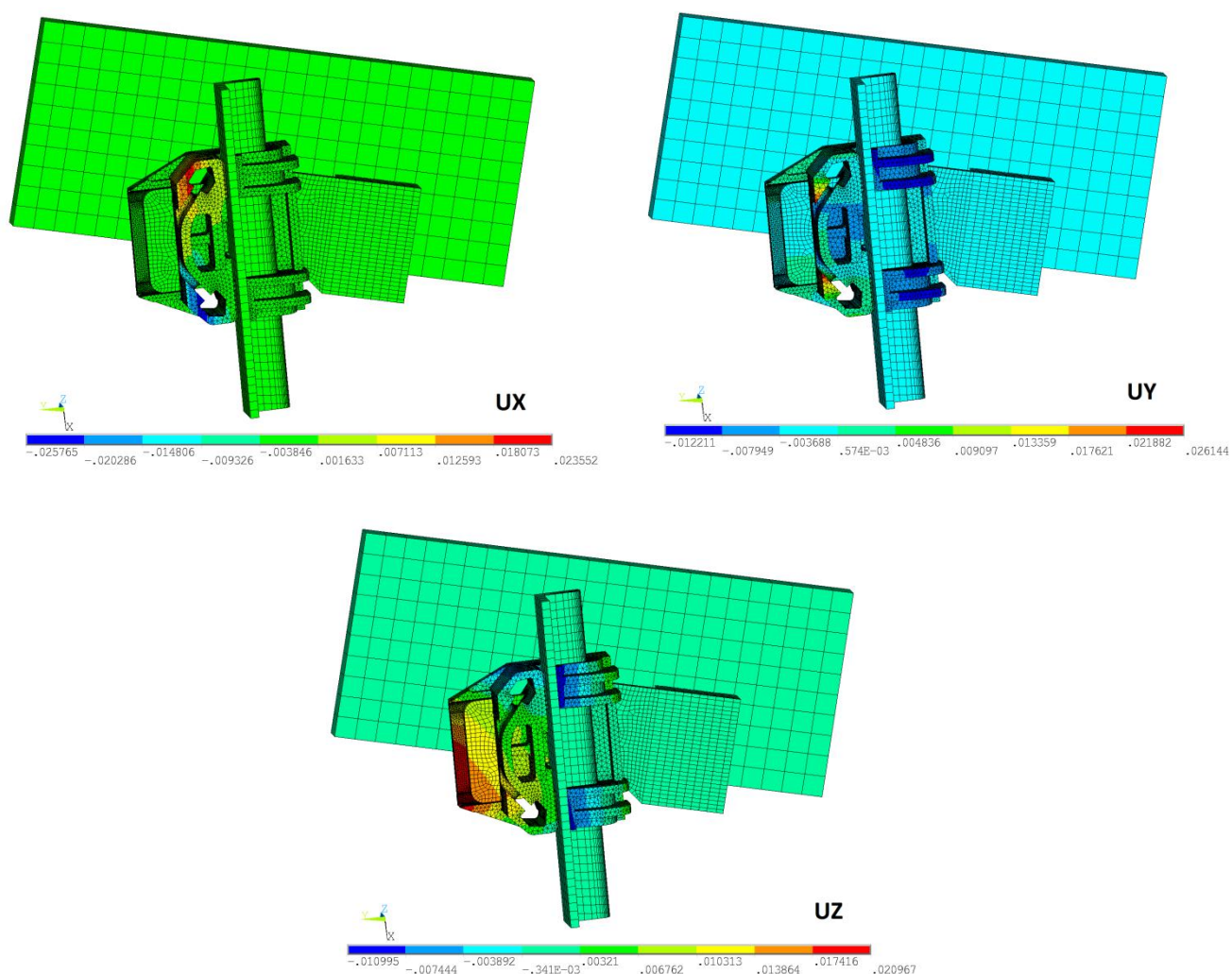
Táto hodnota je vyššia ako jedna, to znamená, že ku krehkému porušeniu pri daných hodnotách vonkajšieho zaťaženia nedôjde.



Obrázok 10.4 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: pokojový stav [MPa]

10.3.2 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,1 s

Na Obrázku 10.5 sú zobrazené posuvy vo všetkých osových smeroch analýzy tesne po rozjazde so zrýchlením trvajúcim 0,1 s. Ich hodnoty sú opäť zanedbateľné.



Obrázok 10.5 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: rozjazd 0,1s [mm]

Rozloženie napätia je rovnaké, ako v predchádzajúcom výpočte, to znamená, že je rovnaké aj kritické miesto. Graficky je rozloženie zobrazené na Obrázku 10.6 a hodnoty napätí sú zhrnuté v Tabuľke 10.2.

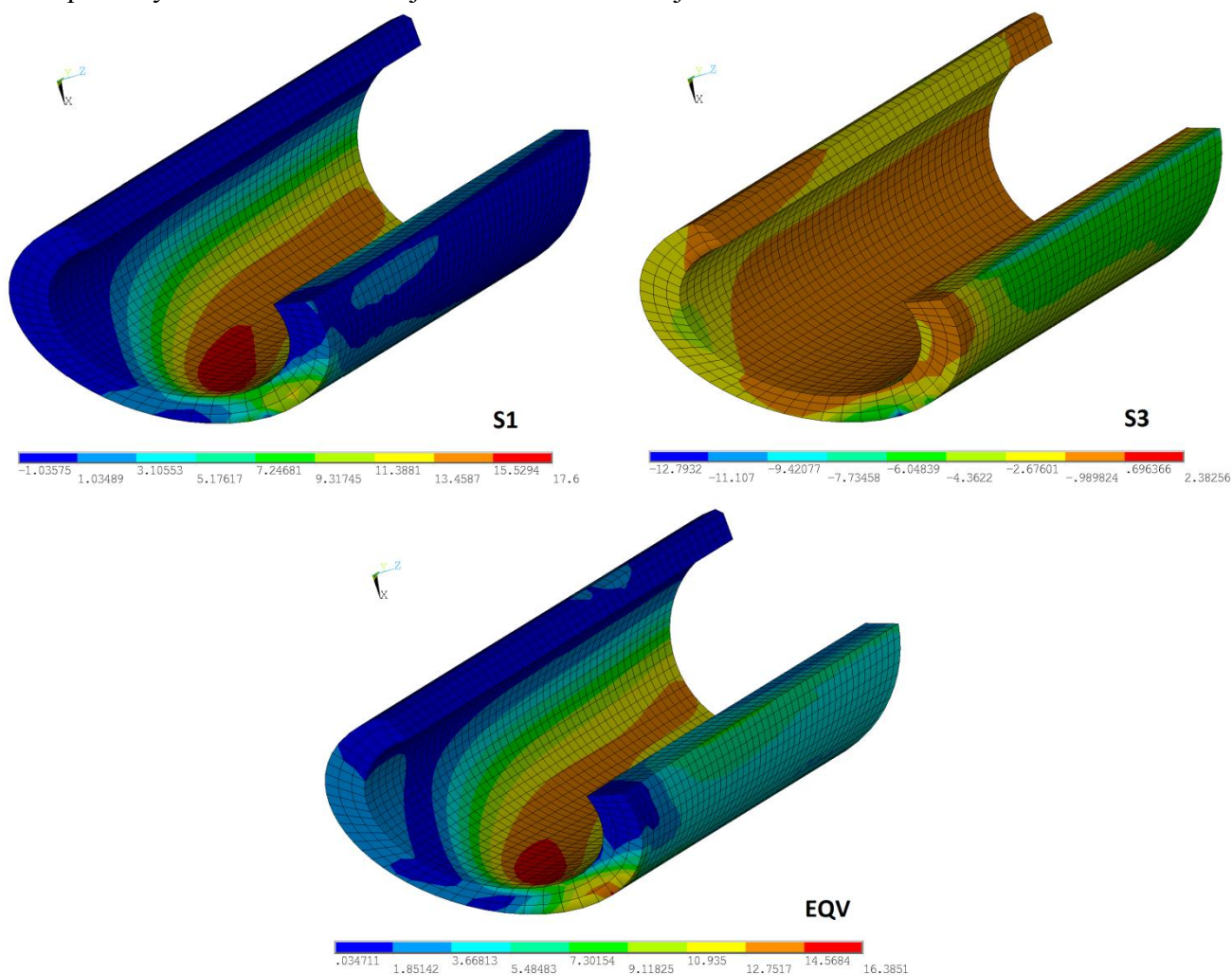
Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	17,6
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	0,98
Redukované napätie podľa HMM	EQV	[MPa]	16,39

Tabuľka 10.2 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: rozjazd 0,1s

Prvé hlavné napätie je opäť väčšie ako redukované napätie. . Hodnota koeficientu bezpečnosti ku medznému stavu krehkého porušenia podľa Rankina je:

$$k_{R0,1} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{1-0,1}} = \frac{39,8}{17,6} = 2,26 \quad (10.2)$$

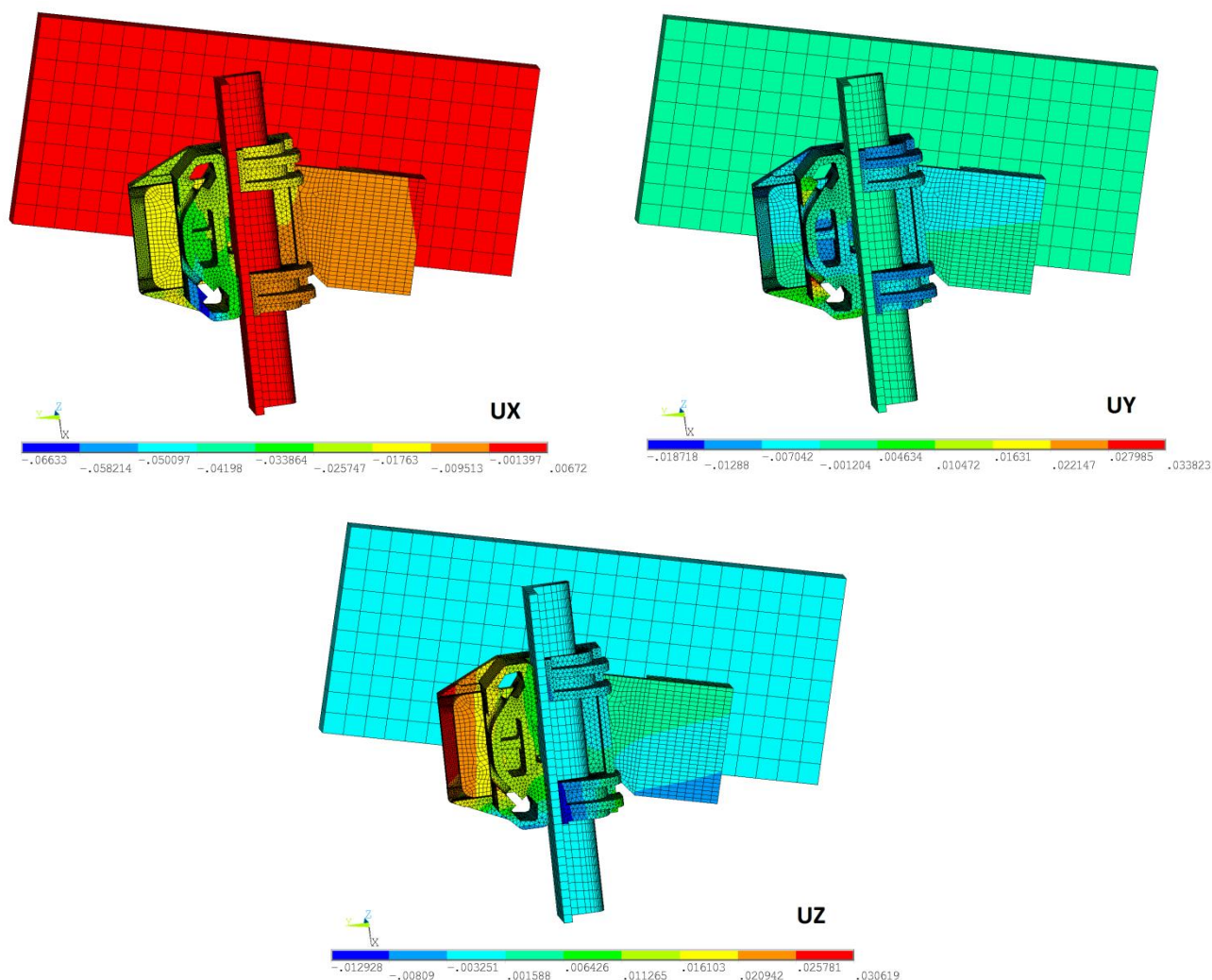
Táto hodnota je takisto vyššia ako jedna, to znamená, že ku krehkému porušeniu pri daných hodnotách vonkajšieho zaťaženia nedôjde.



Obrázok 10.6 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: rozjazd 0,1s [MPa]

10.3.3 Analýza rozjazdu so zrýchlením trvajúcim 0,01 s

Na Obrázku 10.7 sú zobrazené posuvy v osových smeroch analýzy tesne po rozjazde so zrýchlením trvajúcim 0,01 s. Ich hodnoty sú opäť veľmi malé.



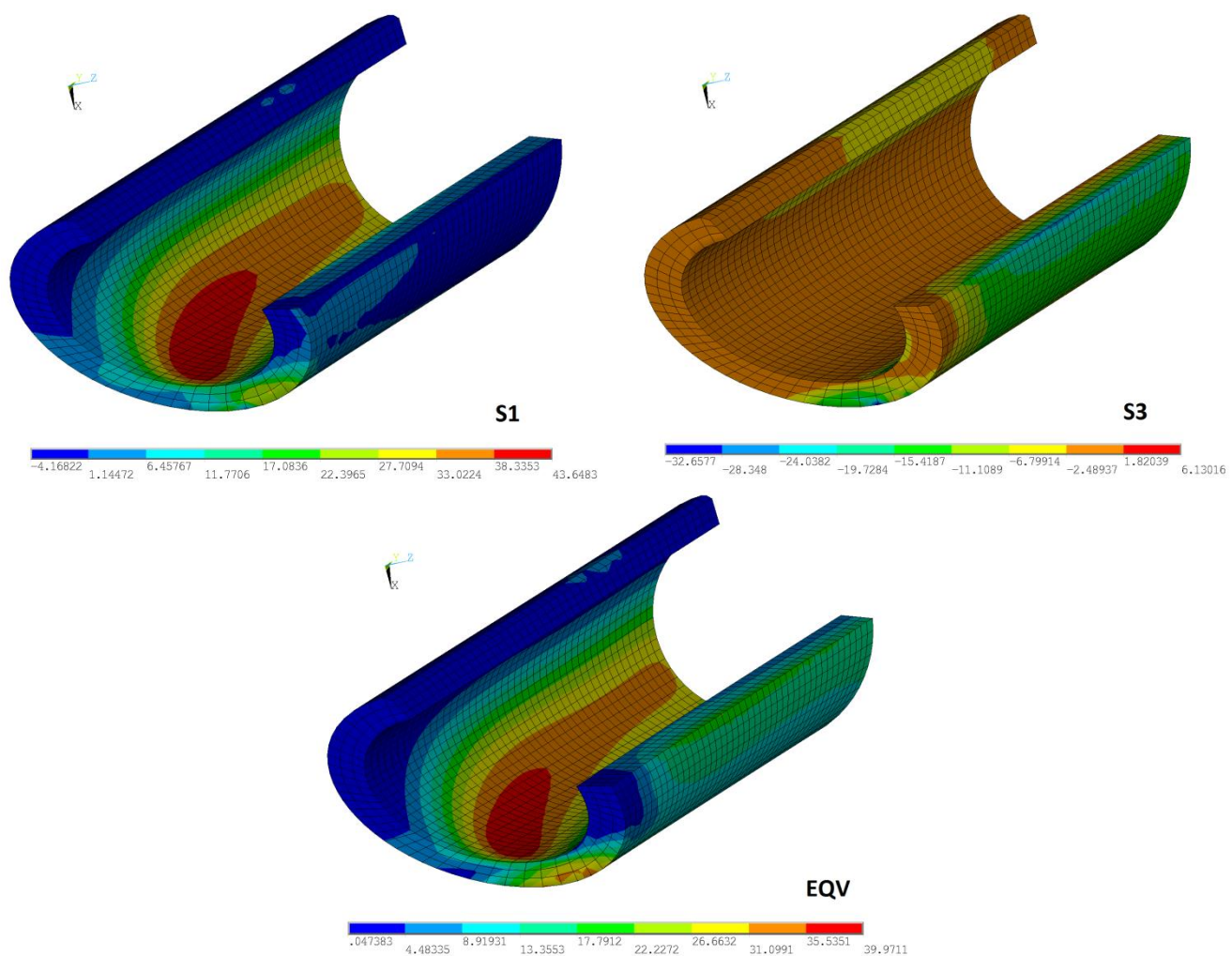
Obrázok 10.7 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: rozjazd 0,01s [mm]

Rozloženie napätia je rovnaké, ako v predchádzajúcom výpočte, to znamená, že je rovnaké aj kritické miesto. Graficky je rozloženie zobrazené na Obrázku 10.8 a hodnoty napätí sú zhrnuté v Tabuľke 10.3.

Veličina	Označenie veličiny	Jednotka	Hodnota
Prvé hlavné napätie	S1	[MPa]	43,65
Tretie hlavné napätie	S3	[MPa]	2,49
Redukované napätie podľa HMM	EQV	[MPa]	39,98

Tabuľka 10.3 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: rozjazd 0,01s

Prvé hlavné napätie je väčšie ako napätie redukované a zároveň je väčšie ako medza sklzu materiálu. To znamená, že materiál sa za daných hodnôt vonkajšieho zaťaženia poruší krehkým lomom.



Obrázok 10.8 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: rozjazd 0,01s [MPa]

11 Záver

Pomocou metódy konečných prvkov bola v práci vypracovaná deformačne napäťová analýza plastového prvku sťahovacieho mechanizmu okna osobného automobilu. Všetky vstupné hodnoty do výpočtu bolo potreba určiť výpočtom alebo experimentálne. Ďalej boli vybrané prevádzkové stavy, v ktorých bol prvok sťahovacieho mechanizmu analyzovaný.

Všetky výpočty boli realizované v systéme ANSYS na priestorovej geometrii, ktorá bola vytvorená v systéme Autodesk Inventor a následne do ANSYS-u exportovaná cez prevodný formát SAT. S ohľadom na zložitosť geometrie bola konečnoprvková sieť upravovaná za účelom získania čo najpresnejších výsledkov. Pri analýze získaných výsledkov je treba brať na zreteľ fakt, že boli počas riešenia prijaté určité zjednodušenia, ktoré sú v práci odôvodnené. Bolo uvažované napríklad rovnomerné rozloženie kontaktného tlaku oceľového valčeka a oceľového lana alebo lineárny priebeh rýchlosti okna.

Hodnoty osových posuvov sú pre ich malé hodnoty zanedbateľné. Analýza však odhalila kritické miesto na komponente (Obrázok 9.3). Bolo zistené, že pri bežných prevádzkových stavoch k porušeniu komponenty nedôjde. Pokiaľ sa však napríklad z dôvodu nečistôt *kocka* zadrhne vo *vodiacej lyžine*, tak vonkajšie zaťaženie dosiahne svojich medzných hodnôt a dôjde k porušeniu komponenty, čo má za následok nefunkčnosť celého sťahovacieho mechanizmu.

Na základe výsledkov deformačne napäťovej analýzy bola navrhnutá tvarová úprava prvku. Bolo zistené, že úprava mala za následok výrazné zníženie hodnoty redukovaného napätia v komponente, čím by v prípade jej realizácie významne predĺžila prevádzkovú dobu sťahovacieho mechanizmu. Ďalšou možnosťou ako predĺžiť životnosť prvku by bolo použitie inej tvarovej úpravy, alebo materiálu s vyššou hodnotou medze sklzu.

Je možno konštatovať, že boli dosiahnuté všetky vytýčené ciele bakalárskej práce.

Zoznam použitej literatúry

1. HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 1198 s. ISBN 80-214-1868-0.
2. SHIGLEY, Joseph, MISCHKE, Charles, BUDYNAS, Richard. *Konstruovávni strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 80-214-2629-0
3. JANÍČEK, Přemysl, ONDRÁČEK, Emanuel, VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I*. Brno 1992. Studijní opory [online]. Dostupný z www: http://www.umat.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/Pruznost_pevnost_1_Janicek_Ondracek_Vrbka.pdf
4. ANSYS, Inc, *ANSYS 13.0 Help*
5. *MatWeb – Material property data* [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupný z www: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f0af0b756e604d1bb3c851c8518688ef&ckck=1>
6. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupný z www: http://www.idealautoteile.com/product_images/k/002_72467.jpg
7. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupný z www: http://windowregulatorrepairkits.com/listings/images/BoraGolf/FrontLeft_Ayak/2.jpg
8. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupný z www: [http://i.ebayimg.com/15/!Bine5\)QCGk~\\$\(KGrHqQOKkIEsnMU-pu8BLP89k\(Nhw~~_35.JPG](http://i.ebayimg.com/15/!Bine5)QCGk~$(KGrHqQOKkIEsnMU-pu8BLP89k(Nhw~~_35.JPG)

Zoznam požítých skratiek a symbolov

EQV		- redukované napätie
HMH		- podmienka plasticity pre obecnú napätosť
MKP		- metóda konečných prvkov
MSP		- medzný stav pružnosti
S1		- prvé hlavné napätie
S3		- tretie hlavné napätie
SAT		- prevodový formát
UX		- posuv v smere osi X
UY		- posuv v smere osi Y
UZ		- posuv v smere osi Z
FEA		- konečno prvková analýza
PE		- polyetylén
a	$[m \cdot s^{-2}]$	- zrýchlenie
a _{0,01}	$[m \cdot s^{-1}]$	- zrýchlenie okna na intervale $\langle 0; 0,01 \rangle$
a _{0,1}	$[m \cdot s^{-1}]$	- zrýchlenie okna na intervale $\langle 0; 0,1 \rangle$
a _g	$[m \cdot s^{-2}]$	- gravitačné zrýchlenie
E	[MPa]	- modul pružnosti v ťahu
F ₀	[N]	- experimentálna sila
F _D	[N]	- dynamická časť sily
F _{D0,01}	[N]	- dynamická časť sily, analýza so zrýchlením 0,01
F _{D0,1}	[N]	- dynamická časť sily, analýza so zrýchlením 0,1
F _G	[N]	- tiažová sila okna
F _L	[N]	- sila prenášaná lanom
F _{Lf0,01}	[N]	- sila prenášaná lanom v ľavej drážke, analýza so zrýchlením 0,01
F _{Lf0,1}	[N]	- sila prenášaná lanom v ľavej drážke, analýza so zrýchlením 0,1
F _{Lp0,01}	[N]	- sila prenášaná lanom v pravej drážke, analýza so zrýchlením 0,01
F _{Lp0,1}	[N]	- sila prenášaná lanom v pravej drážke, analýza so zrýchlením 0,1
F _N	[N]	- normálová zložka výslednice pre ľavú a pravú drážku
F _{Nf0,01}	[N]	- normálová zložka výslednice pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
F _{Nf0,1}	[N]	- normálová zložka výslednice pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
F _{Np0,1}	[N]	- normálová zložka výslednice pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
F _{Np00,1}	[N]	- normálová zložka výslednice pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
F _p	[N]	- sila predpätia pružiny
F _R	[N]	- reakčná sila pre ľavú a pravú drážku
F _{Rf0,01}	[N]	- reakčná sila pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
F _{Rf0,1}	[N]	- reakčná sila pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
F _{Rp0,1}	[N]	- reakčná sila pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
F _{Rp00,1}	[N]	- reakčná sila pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,01

F_V	[N]	- silová výslednica pre ľavú a pravú drážku
$F_{Vr0,01}$	[N]	- silová výslednica pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
$F_{Vr0,1}$	[N]	- silová výslednica pre ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
$F_{Vp0,1}$	[N]	- silová výslednica pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
$F_{Vp00,1}$	[N]	- silová výslednica pre pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
k	[N·m ⁻¹]	- tuhosť pružiny
k_k	[-]	- koeficient bezpečnosti k MSP
$k_{k0,1}$	[-]	- koeficient bezpečnosti k MSP, analýza so zrýchlením 0,1
k_R	[-]	- koeficient bezpečnosti k medznému stavu krehkého lomu
$k_{R0,1}$	[-]	- koeficient bezpečnosti k medznému stavu krehkého lomu, analýza so zrýchlením 0,1
m	[kg]	- hmotnosť okna
m_0	[kg]	- experimentálna hmotnosť
p	[MPa]	- tlak lana na ľavú a pravú drážku
$p_{r0,01}$	[MPa]	- tlak na ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
$p_{r0,1}$	[MPa]	- tlak na ľavú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
$p_{p0,01}$	[MPa]	- tlak na pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,01
$p_{p0,1}$	[MPa]	- tlak na pravú drážku, analýza so zrýchlením 0,1
S	[m ²]	- plocha valčeka
$s_{0,01}$	[m]	- dráha okna na intervale <0; 0,01>
$s_{0,1}$	[m]	- dráha okna na intervale <0; 0,1>
t	[s]	- čas, kedy na sústavu prestáva pôsobiť zrýchlenie
t_a	[s]	- čas, sledovaného intervalu
t_{ci}	[s]	- nameraný čas
$v_{0,01}$	[m·s ⁻¹]	- rýchlosť okna na intervale <0; 0,01>
$v_{0,1}$	[m·s ⁻¹]	- rýchlosť okna na intervale <0; 0,1>
v_k	[m·s ⁻¹]	- konštantná rýchlosť okna
x	[m]	- stlačenie pružiny merané na mechanizme
x_0	[m]	- experimentálne stlačenie pružiny
σ_k	[MPa]	- medza sklzu
σ_{red}	[MPa]	- redukované napätie
$\sigma_{red0,1}$	[MPa]	- redukované napätie, analýza so zrýchlením 0,1
σ_1	[MPa]	- prvé hlavné napätie
$\sigma_{1-0,1}$	[MPa]	- prvé hlavné napätie, analýza so zrýchlením 0,1

Zoznam obrázkov

Obrázok 5.1 – Názvy komponentov sťahovacieho mechanizmu	4
Obrázok 5.2 – Sťahovací mechanizmus vozidla BMW X3	5
Obrázok 5.3 – Tvarové časti kocky.	6
Obrázok 5.4 – Tvar kocky vozidiel vybraných značiek.	6
Obrázok 7.1 – Silové pôsobenie lana.....	11
Obrázok 7.2 – Normálová zložka výslednice: pokojový stav.....	12
Obrázok 7.3 – Normálová zložka výslednice: rozjazd so zrýchlením trvajúcim 0,1s.	13
Obrázok 7.4 – Normálová zložka výslednice: rozjazd so zrýchlením trvajúcim 0,01s.	13
Obrázok 7.5 – Model geometrie zostavy: pohľad 1.....	15
Obrázok 7.6 – Model geometrie zostavy: pohľad 2.....	15
Obrázok 7.7 – Model geometrie prvku	16
Obrázok 7.8 – Diskretizácia modelu geometrie zostavy	17
Obrázok 7.9 – Diskretizácia modelu geometrie Kocky	18
Obrázok 7.10 – Kontaktné dvojice	20
Obrázok 7.11 – Model okrajových podmienok.	21
Obrázok 7.12 – Pôsobisko tlaku.	21
Obrázok 7.13 – Pôsobisko sily.	22
Obrázok 8.1 – Vplyv malých a veľkých deformácií: posuv v smere osy X.	23
Obrázok 9.1 – Osové posuvy zostavy: pokojový stav	24
Obrázok 9.2 – Kritické miesto a redukované napätie : pokojový stav	25
Obrázok 9.3 – Skutočná rozlomená kocka s vyznačeným kritickým miestom	25
Obrázok 9.4 – Prvé a tretie hlavné napätie: pokojový stav.....	26
Obrázok 9.5 – Osové posuvy zostavy: rozjazd 0,1s	27
Obrázok 9.6 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie: rozjazd 0,1s.....	28
Obrázok 9.7 – Osové posuvy zostavy: rozjazd 0,01s	29
Obrázok 9.8 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie,: rozjazd 0,01s.....	30
Obrázok 10.1 – Model geometrie úpravy kocky	31
Obrázok 10.2 – Diskretizácia modelu geometrie v okolí kritického miesta.....	32
Obrázok 10.3 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: pokojový stav	33
Obrázok 10.4 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: pokojový stav	34
Obrázok 10.5 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: rozjazd 0,1s	35
Obrázok 10.6 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: rozjazd 0,1s	36
Obrázok 10.7 – Osové posuvy zostavy- tvarová úprava: rozjazd 0,01s	37
Obrázok 10.8 – Prvé, tretie hlavné napätie a redukované napätie- tvarová úprava: rozjazd 0,01s	38

Zoznam tabuliek

Tabuľka 7.1 – Vstupné a vypočítané hodnoty pre predpätie pružín	8
Tabuľka 7.2 – Namerané hodnoty času pre zdvih okna.....	10
Tabuľka 7.3 – Funkčné predpisy kinematických veličín	10
Tabuľka 7.4 – Použité materiály a ich mechanické charakteristiky	16
Tabuľka 7.5 - Kontakty medzi komponentmi.....	18
Tabuľka 9.1 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: pokojový stav.....	26
Tabuľka 9.2 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: rozjazd 0,1s.....	27
Tabuľka 9.3 – Hodnoty napätia v kritickom mieste: rozjazd 0,01s.....	29
Tabuľka 10.1 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: pokojový stav	33
Tabuľka 10.2 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: rozjazd 0,1s.....	35
Tabuľka 10.3 – Hodnoty napätia v kritickom mieste- tvarová úprava: rozjazd 0,01s.....	37

Zoznam príloh

Prílohy na CD:

[Príloha 1]	Elektronická verzia bakalárskej práce
[Príloha 2]	Súbor systému ANSYS – prvok bez tvarovej úpravy
[Príloha 3]	Súbor systému ANSYS – prvok s tvarovou úpravou