

Posouzení a optimalizace nosného rámu studentské formule

Vypracoval: Martin Hloucal

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Zeman, Ph.D.

Co to je Formula Student/SAE

Soutěž pro studenty technických vysokých škol, aby získali praktické dovednosti

Vznikla v 80. letech v USA na popud SAE, nyní celosvětově rozšířená

V současnosti více než 500 týmů z celého světa

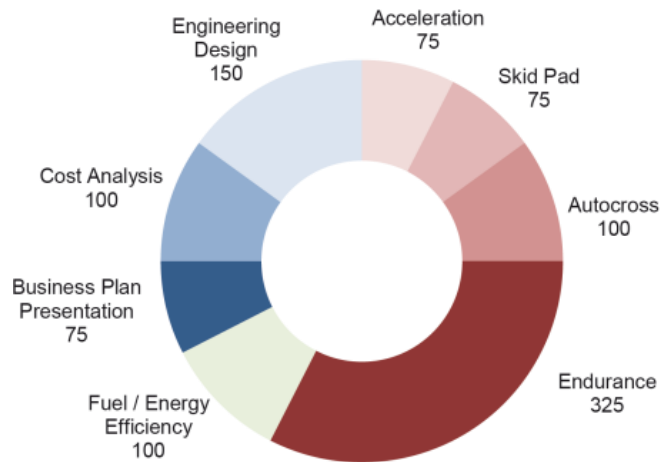
**Design
it!**

Build it!

Race it!

Disciplíny

- Statické disciplíny
 - Hodnotí se technické a ekonomické kvality návrhu
- Dynamické disciplíny
 - Hodnotí se jízdní vlastnosti vozu



Pravidla FSAE

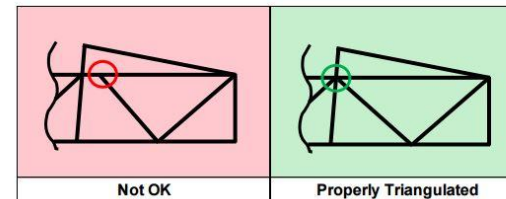
- Kladen velký důraz na bezpečnost

T3.6 Alternative Steel Tubing Minimum Wall Thickness Allowed

MATERIAL & APPLICATION	MINIMUM WALL THICKNESS
Steel Tubing for Front and Main Roll Hoops, and Shoulder Harness Mounting Bar	2.0 mm (0.079 inch)
Steel Tubing for Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment (except as noted above), Protection of HV accumulators, and protection of HV tractive systems	1.2 mm (0.047 inch)

Minimum Wall Thickness Allowed for teams satisfying physical testing requirements:

MATERIAL & APPLICATION	MINIMUM WALL THICKNESS
Steel Tubing for Front and Main Roll Hoops, and Shoulder Harness Mounting Bar	1.6 mm (0.065 inch)
Steel Tubing for Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment (except as noted above), Protection of HV accumulators, and protection of HV tractive systems	0.9 mm (0.035 inch)



T3.4 Minimum Material Requirements T3.4.1

Baseline Steel Material
The Primary Structure of the car must be constructed of:
Either: Round, mild or alloy, steel tubing (minimum 0.1% carbon) of the minimum dimensions specified in the following table,
Or: Approved alternatives per Rules T3.5, T3.6 and T3.7.

ITEM or APPLICATION	OUTSIDE DIMENSION X WALL THICKNESS
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) or Round 25.0 mm x 2.50 mm metric
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment (except as noted above)	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) or Round 25.0 mm x 1.75 mm metric or Round 25.4 mm x 1.60 mm metric or Square 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch

© 2015 SAE International. All Rights Reserved

2016 Formula SAE® Rules – May 11, 2015



EV: Accumulator Protection Structure	or Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm metric
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) or Round 25.0 mm x 1.5 mm metric
EV: Tractive System Components	or Round 26.0 mm x 1.2 mm metric

CTU CarTech

- Imaginární automobilka
- Vznik týmu 2008 – vývoj FS.01
 - Fakulta strojní ČVUT
- Studenti z různých fakult



FS.07

Výkonný lehký prototyp navržený a vyrobený studenty během 10 měsíců.

196 kg, 64 kW, 0-100 km/h za 3,5 s, až 3,2 G



FS.08



Nosná konstrukce

- Monokok

- Uhlíkový
- Jediný v ČR
- Kabina pro pilota
- Zavěšení přední nápravy



- Zadní rám

- Trubkový prostorový rám
- Uchytení motoru
- Zavěšení zadní nápravy



Zadní rám

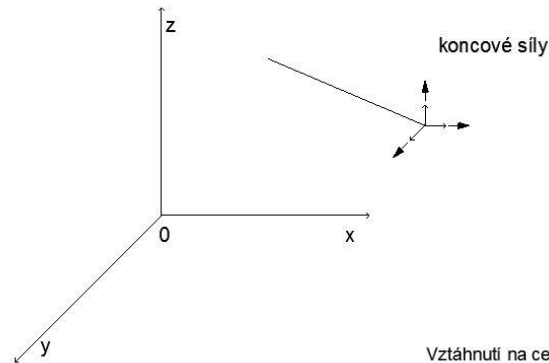
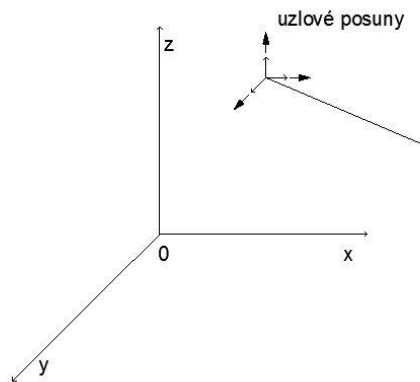
- **Poslední posouzení FS.04**
 - Trubkový rám celého vozu
 - Výsledek
 - Při vyhovění bezpečnostním požadavkům, mechanické požadavky splněny bez problémů
- **Dnes FS.08**
 - Rám pouze zadní část
 - 4 roky prodleva od důkladnější analýzy

Posouzení na základě metody konečných prvků

- MKP

- patří mezi metody numerické (přibližné) – přesné řešení diferenciálních rovnic, popisujících daný inženýrský problém, je nahrazeno řešením přibližným (ne v tomto případě)
- výsledkem řešení jsou primárně hodnoty hledané funkce (např. posuny) v diskrétních bodech oblasti
- metoda konečných prvků využívá speciální volbu bázových funkcí, které předurčují pásovost matice tuhosti výsledné soustavy rovnic

Posouzení na základě metody konečných prvků



Vztáhnuti na celou konstrukci

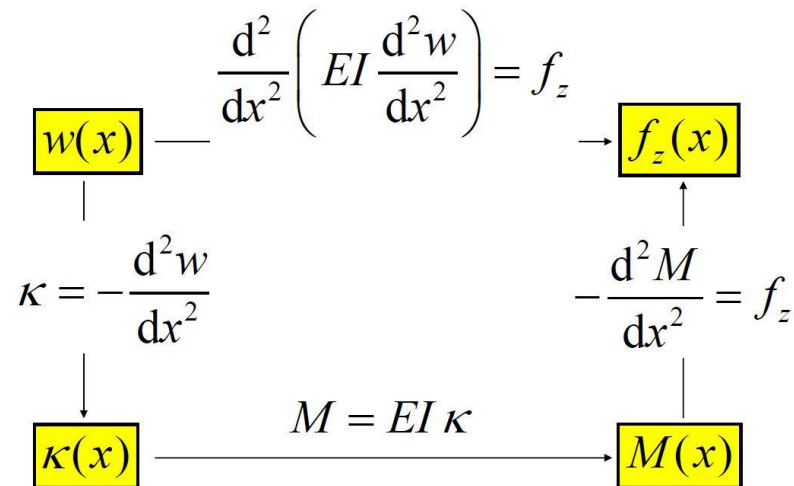
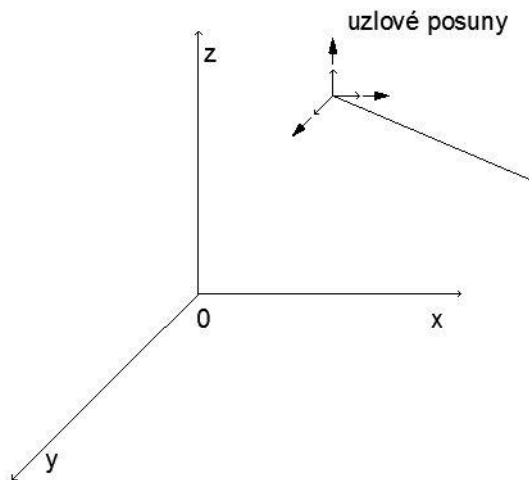


Závislost koncových sil n auzlových posunech

$$\begin{matrix} \text{koncové síly} \\ \left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right] \\ 12 \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \text{matice tuhosti} \\ \left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right] \\ K \\ 12 \times 12 \end{matrix} \begin{matrix} \text{uzlové posuny} \\ \left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right] \\ 12 \times 1 \end{matrix}$$

Posouzení na základě metody konečných prvků

Bázová funkce



- $w(0)$ je průhyb
- $w'(0)$ je pootočení (záporné)
- $w''(0)$ je úměrná ohybovému momentu
- $w'''(0)$ je úměrná posouvající síle (pokud $EI = \text{konst.}$)

Výpočet

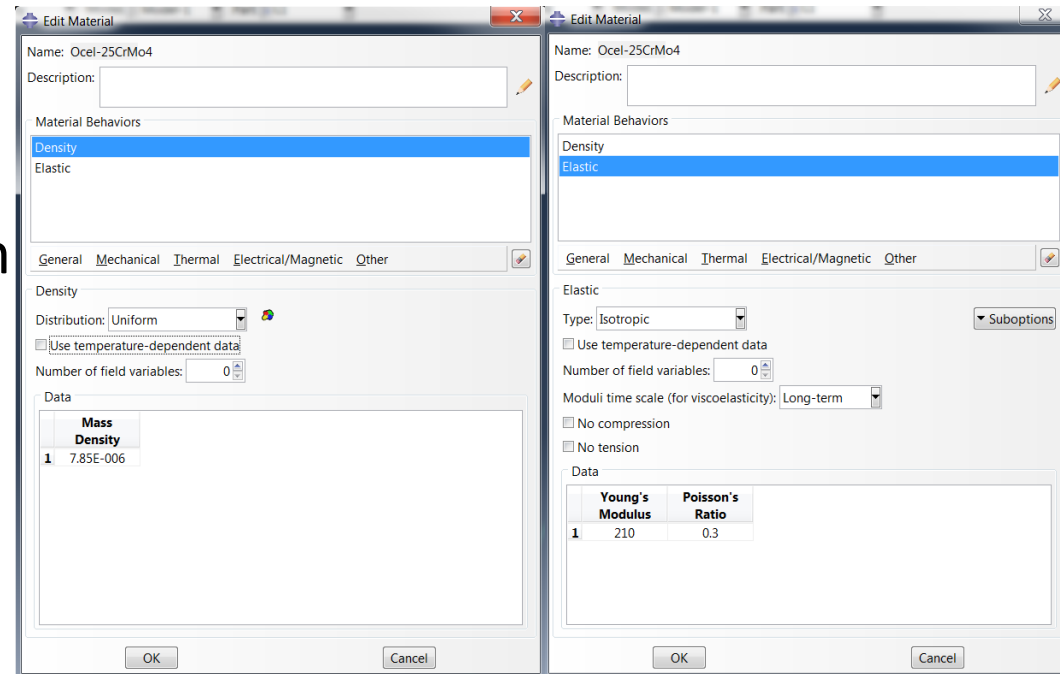
- Dassalut Systems
 - Abaqus
 - Výpočet konstrukce MKP
 - Catia V6
 - Návrh konstrukce
 - Import do Abaqusu

Definování vlastností prutů

- Materiál
- Průřez
- Rozsítování prutů
- Vazby mezi sebou

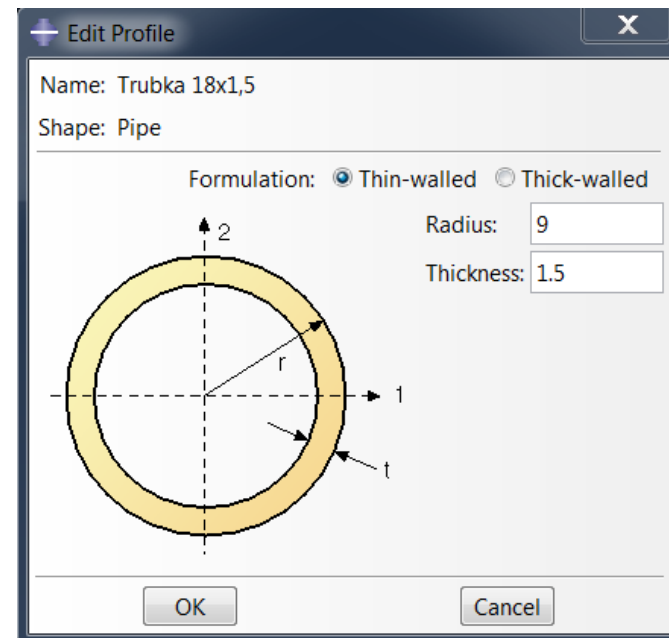
Definování materiálu

- Materiál
 - 25CrMo4
 - Hodnoty pro program
 - Hustotu
 - E
 - Poissonovo číslo



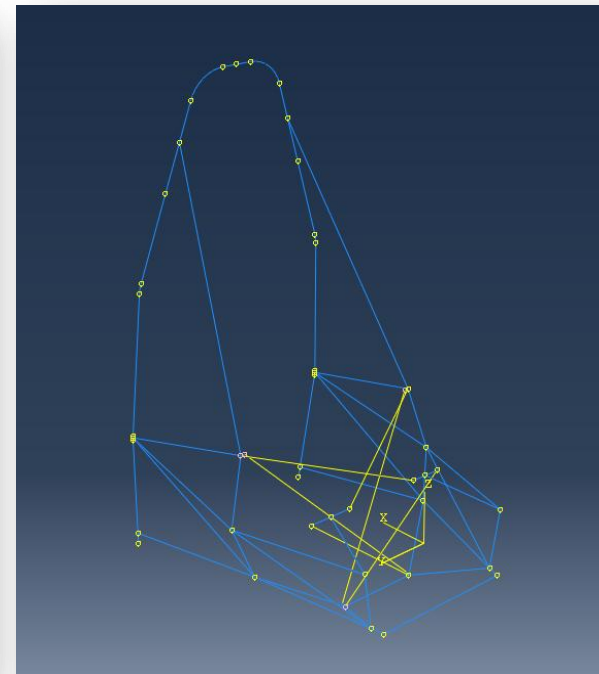
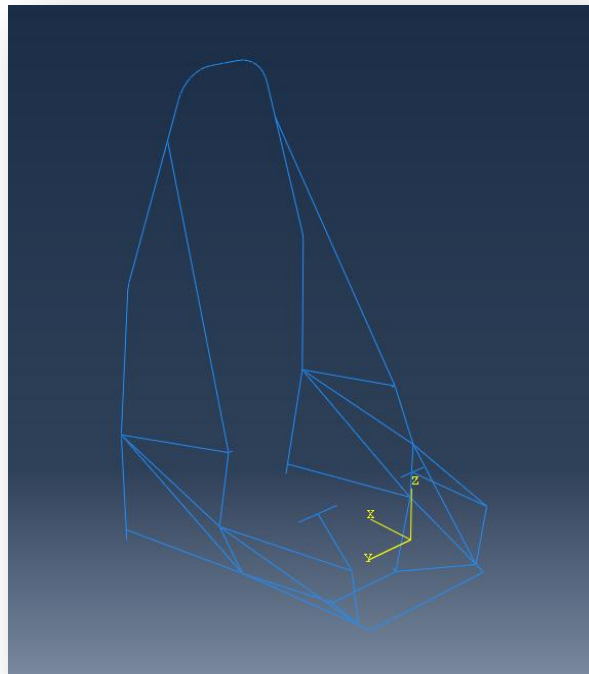
Definování průřezu

- Tenkostěnná trubka
 - Hlavní oblouk, úchyty motoru – triangulace
 - Imperiální rozměry
 - Problém - dodání, cena
 - Zbytek rámu
 - Metrické rozměry
 - Hodnoty pro program
 - Poloměr průřezu
 - Tloušťka stěny



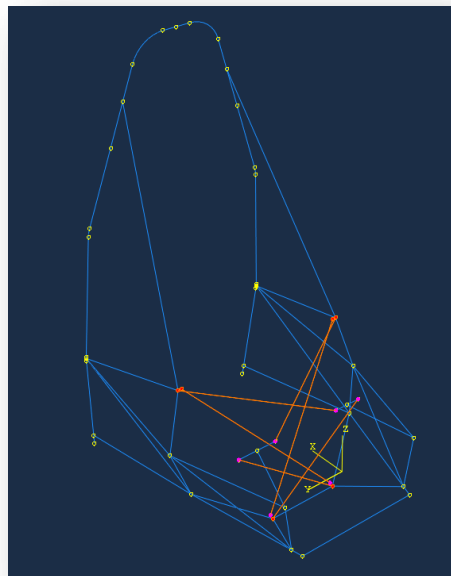
Zavedení vazeb

- Zavedení vazeb mezi jednotlivými pruty
 - Po importu jsou pruty umístěny v prostoru, ale bez vazeb
 - Více než 250 vazeb



Zavedení vazeb

- Zavedení vazby simulující osazení motoru
 - Motor považován jako ideálně tuhý
- Zavedení okrajových podmínek
 - Vetknutí v místě spojení s monokokem



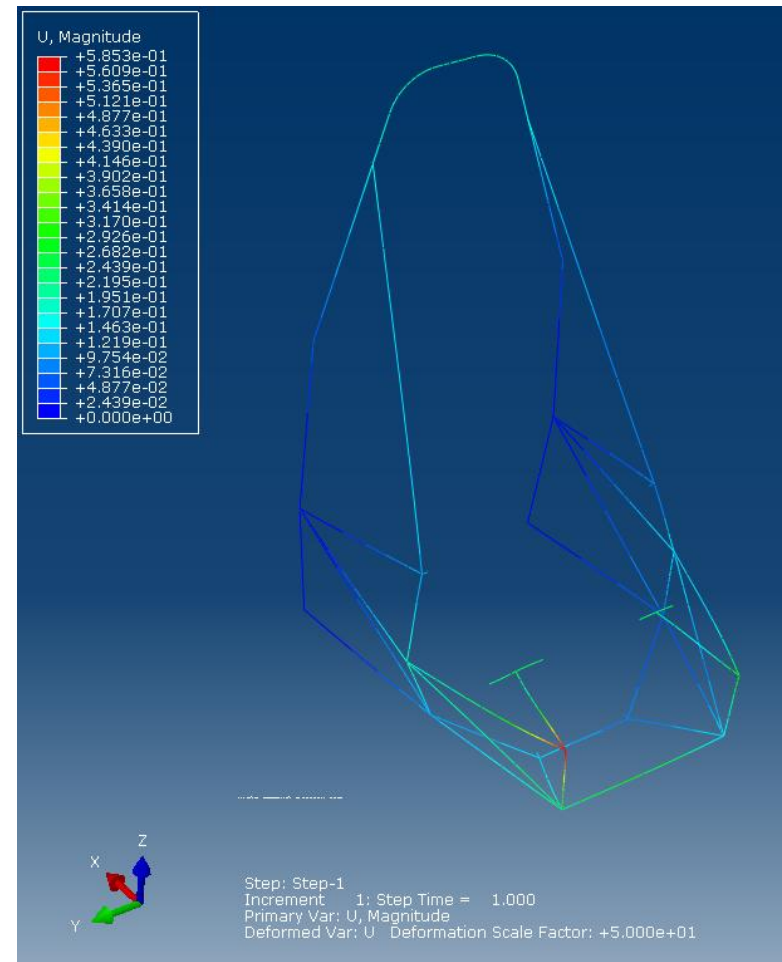
Vyhodnocení výsledku

- Posuny
 - Požadavek - maximální posun 0,8 mm
- Napětí
 - Požadavek - maximální napětí vychází z meze kluzu materiálu

Přehled vlastností oceli 25CrMo4 (25CrMoS4)								1.7218 (1.7213)		
Druh oceli	Nízkolegovaná ušlechtilá chrom - molybdenová ocel k zušlechťování									
TDP	ČSN EN 10083-3: 2007									
Dřívější označení	25CrMo4 (25CrMoS4) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; 25CrMo4 (25CrMoS4) podle DIN 17200; 15 130 podle ČSN									
Použití	Ocel s nižší prokalitelností pro středně namáhané strojní díly. Je svařitelná a vhodná pro výrobu bezešvých trub. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 48 HRC. V zušlechťeném stavu dosahuje středních hodnot pevnosti a meze kluzu při relativně vysoké houževnatosti. Není náchylná k popouštění křehkosti.									
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr	Mo	Ni	V	
	0,22-0,29	0,40	0,60-0,90	0,025	0,035	0,90-1,20	0,15-0,30	-	-	
Složení hotového výrobku ²⁾	0,20-0,31	0,43	0,56-0,94	0,030	0,040	0,85-1,25	0,12-0,33	-	-	
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm		R _e min. MPa		R _m MPa		A min. %		Z min. %	KV min. J
	d ≤ 16		700		900 – 1100		12		50	-
	16 < d ≤ 40		600		800 - 950		14		55	50
	40 < d ≤ 100		450		700 - 850		15		50	50
	100 < d ≤ 160		400		650 - 800		16		60	45

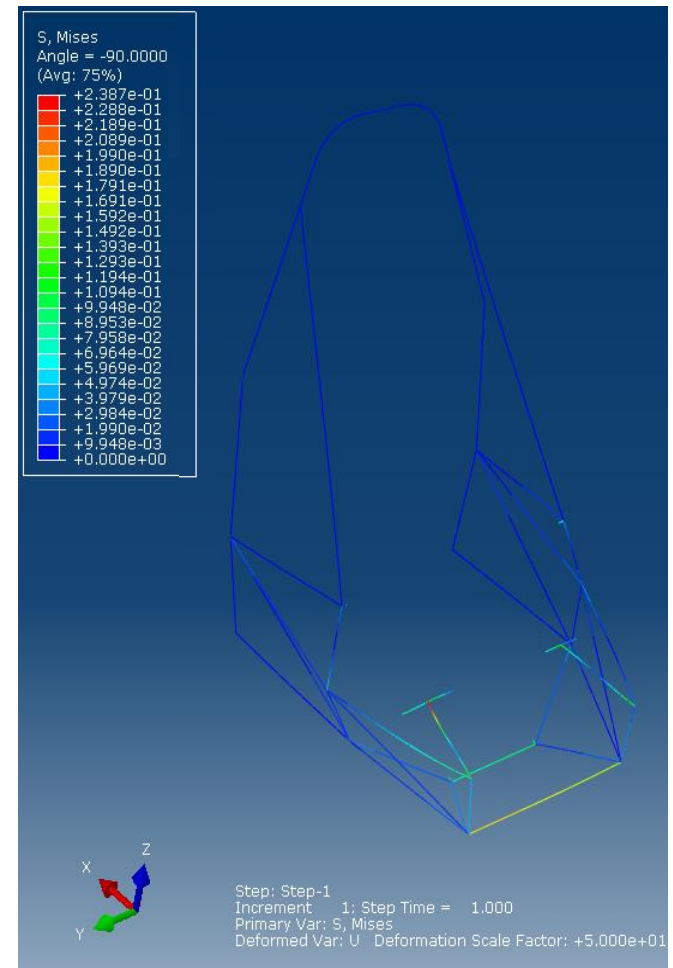
Posuny

- Posuny
 - Požadavek - maximální posun 0,8 mm
- Splněno
 - Maximální posun = 0,585 mm



Napětí

- Napětí
 - Požadavek - 600 MPa
- Splněno
 - Maximální napětí = 238 Mpa
 - Bezpečnost 2,5



Vyhodnocení výsledku

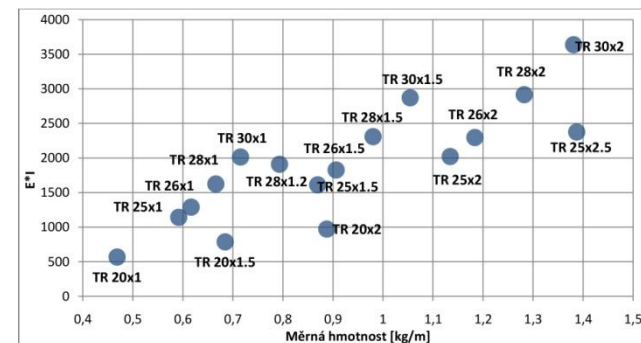
- Splněny vstupní požadavky
- Potvrzeno původního tvrzení
 - Při vyhovění bezpečnostním požadavkům, mechanické požadavky splněny bez problémů

Optimalizace bez ohledu na pravidla

- Hlavní požadavek snížení hmotnosti
- Varianty
 - Změna průřezů
 - Využití potenciálu materiálu na úkor bezpečnosti
 - Změna materiálu
 - Hliník
 - Titan

Vyhodnocení výsledku

- Změna průřezů
 - Posuny
 - Požadavek - maximální posun 0,8 mm
 - Napětí
 - Požadavek - maximální napětí vychází z meze kluzu materiálu
 - Maximální možné napětí 600 MPa

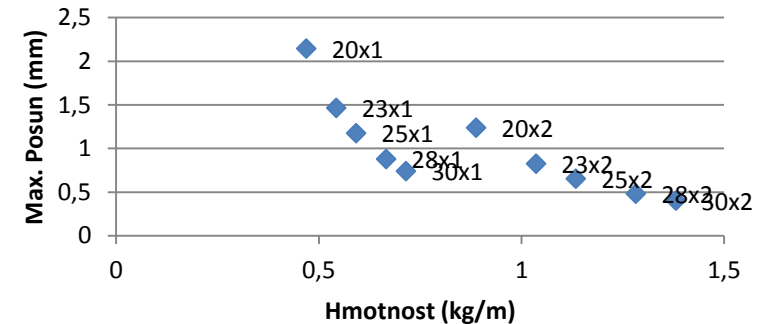


- Graf ohybové tuhosti

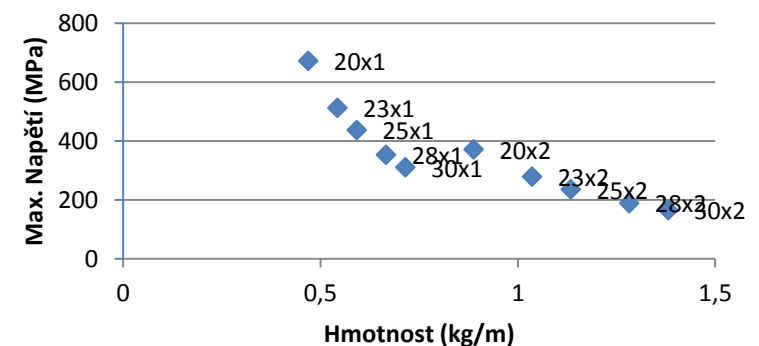
Vyhodnocení výsledku

- Změna průřezů
 - Posuny
 - Požadavek - maximální posun 0,8 mm
 - Napětí
 - Požadavek - maximální napětí 600 MPa
 - Ideální průřez
 - 28x1
 - Hmotnost 666g/m

Max. Posun x Hmotnost



Max. Napětí x Hmotnost



Vyhodnocení výsledku

- Změna materiálu - Hliník

- Posuny

- Požadavek - maximální posun 0,8 mm

- Napětí

- Požadavek - maximální napětí 400 MPa

- Ideální průřez

- 48x1
- Hmotnost 390g/m
- 37x2
- Hmotnost 593g/m

Průměr	Stěna	Poloměr 1	Poloměr 2	Plocha	Objem (mm ³)	Hmotnost (g/cm)	Hmotnost (kg/m)	Max. Posun (mm)	Max. Napětí (Mpa)	Průměr	Stěna	Poloměr
20	1	10	9	59,66	59660	161082	0,161082			20	1	10
20	2	10	8	113,04	113040	305208	0,305208			20	2	10
23	1	11,5	10,5	69,08	69080	186516	0,186516			23	1	11,5
23	2	11,5	9,5	131,88	131880	356076	0,356076			23	2	11,5
25	1	12,5	11,5	75,36	75360	203472	0,203472			25	1	12,5
25	2	12,5	10,5	144,44	144440	389988	0,389988			25	2	12,5
28	1	14	13	84,78	84780	228906	0,228906			28	1	14
28	2	14	12	163,28	163280	440856	0,440856			28	2	14
30	1	15	14	91,06	91060	245862	0,245862			30	1	15
30	2	15	13	175,84	175840	474768	0,474768	1,214	165,9	30	2	15
32	1	16	15	97,34	97340	262818	0,262818			32	1	16
32	2	16	14	188,4	188400	508680	0,508680			32	2	16
35	1	17,5	16,5	106,76	106760	288252	0,288252			35	1	17,5
35	2	17,5	15,5	207,24	207240	559548	0,559548			35	2	17,5
37	2	18,5	16,5	219,8	219800	593460	0,593460	0,8264	123,9	37	2	18,5
38	1	19	18	116,18	116180	313686	0,313686			38	1	19
38	2	19	17	226,08	226080	610416	0,610416	0,6793	106,4	38	2	19
40	1	20	19	122,46	122460	330642	0,330642	1,14	185,3	40	1	20
40	2	20	18	238,64	238640	644328	0,644328	0,603	96,88	40	2	20
45	0,6	22,5	21,9	83,6496	83649,6	225853,92	0,22585392			45	0,6	22,5
45	0,8	22,5	21,7	111,0304	111030,4	299782,08	0,29978208			45	0,8	22,5
48	1	24	23	147,58	147580	398466	0,398466	0,771	134,8	48	1	24
50	0,6	25	24,4	93,0696	93069,6	251287,92	0,25128792	1,162	206,5	50	0,6	25
50	0,8	25	24,2	123,5904	123590,4	333694,08	0,33369408	0,8788	156	50	0,8	25
50	1	25	24	153,86	153860	415422	0,415422	0,7088	125,6	50	1	25

Vyhodnocení výsledku

- Změna materiálu - Titan
 - Posuny
 - Požadavek - maximální posun 0,8 mm
 - Napětí
 - Požadavek - maximální napětí 800 MPa
 - Ideální průřez
 - 50x0,6
 - Hmotnost 412g/m
 - 38x1
 - Hmotnost 514g/m

Průměr	Stěna	Poloměr 1	Poloměr 2	Plocha	Objem (mm ³)	Hmotnost (g/cm ³)	Hmotnost (kg/m)	Max. Posun (mm)	Max. Napětí (Mpa)	Průměr	Stěna	Poloměr
20	1	10	9	59,66	59660	264293,8	0,2642938			20	1	10
20	2	10	8	113,04	113040	500767,2	0,5007672			20	2	10
23	1	11,5	10,5	69,08	69080	306024,4	0,3060244			23	1	11,5
23	2	11,5	9,5	131,88	131880	584228,4	0,5842284			23	2	11,5
25	1	12,5	11,5	75,36	75360	333844,8	0,3338448			25	1	12,5
25	2	12,5	10,5	144,44	144440	639869,2	0,6398692			25	2	12,5
28	1	14	13	84,78	84780	375575,4	0,3755754			28	1	14
28	2	14	12	163,28	163280	723330,4	0,7233304			28	2	14
30	1	15	14	91,06	91060	403395,8	0,4033958	1,374	311,9	30	1	15
30	2	15	13	175,84	175840	778971,2	0,7789712	0,747	166	30	2	15
32	1	16	15	97,34	97340	431216,2	0,4312162			32	1	16
32	2	16	14	188,4	188400	834612	0,834612			32	2	16
35	1	17,5	16,5	106,76	106760	472946,8	0,4729468			35	1	17,5
35	2	17,5	15,5	207,24	207240	918073,2	0,9180732			35	2	17,5
37	2	18,5	16,5	219,8	219800	973714	0,973714			37	2	18,5
38	1	19	18	116,18	116180	514677,4	0,5146774	0,7869	203,1	38	1	19
38	2	19	17	226,08	226080	1001534,4	1,0015344			38	2	19
40	1	20	19	122,46	122460	542497,8	0,5424978	0,7015	185,4	40	1	20
40	2	20	18	238,64	238640	1057175,2	1,0571752			40	2	20
45	0,6	22,5	21,9	83,6496	83649,6	370567,728	0,370567728	0,8887	247,4	45	0,6	22,5
45	0,8	22,5	21,7	111,0304	111030,4	491864,672	0,491864672	0,6728	187	45	0,8	22,5
50	0,6	25	24,4	93,0696	93069,6	412298,328	0,412298328	0,715	206,7	50	0,6	25
50	0,5	25	24,5	77,715	77715	344277,45	0,34427745	0,855	247,1	50	0,5	25

Závěr

- Prostor pro další optimalizaci
- Splněny původní požadavky
- Dostatečná bezpečnost
- Na základě výsledků možnost zahájení výroby
 - První závody konec července – Anglie

Děkuji za pozornost

Martin Hloucal