

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Úvod:	12
1. Brzdový pedál vozidla	13
1.1. Osobní vozidla	13
1.2. Vozidla vyšší třídy	15
1.3. Užitkové vozy	16
2. Formule Student	17
2.1. FS TUL Racing	18
2.2. Pravidla závodů	18
2.2.1. Pravidla pro brzdový systém [4]	19
3. Brzdový pedál pro formuli Eliška	20
3.1. Výběr pedálu	20
3.2. Popis Brzdového pedálu	22
3.3. Cíle pro zlepšení na sezónu 2017/2018	23
4. Návrh Pedálu pro formuli Markétka	24
4.1. Materiál pedálu	24
4.2. Uspořádání Pedálové soustavy	24
4.3. Ergonomie řidiče	25
4.4. Tvar pedálu	26
4.4.1. První verze	26
4.4.2. Simulace prvního pedálu	27
4.4.3. Druhá verze	28
4.4.4. Simulace druhého pedálu	29
4.5. Porovnání navržených verzí	30
4.6. Povrchová úprava	30
4.7. Poškození pedálu	31
5. Pedál 2018/2019	32
5.1. Způsob výroby	32
5.2. Zvolení materiálu	33
5.3. Tvar pedálu	33
5.3.1. Reakční síla	35
5.4. Simulace navržené verze	36
5.5. Dokončovací práce	36

5.6.	Testování skutečné součásti	37
5.6.1.	Vyhodnocení zkoušky	39
6.	Pedál 2019/2020	41
6.1.	Způsob výroby a zvolený materiál	41
6.2.	Uspořádání pedálové soustavy	41
6.3.	Tvar pedálu	44
6.3.1.	První verze	44
6.3.2.	Simulace první verze	46
6.3.3.	Druhá verze	46
6.3.4.	Simulace druhé verze	48
6.4.	Dokončovací práce	48
6.5.	Testování skutečné součásti	49
6.5.1.	Vyhodnocení zkoušky	50
7.	Celkové zhodnocení průběhu vývoje	52
8.	Závěr	53
	Seznam příloh	54
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Použité informační zdroje	57

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Jednotky	Popis veličiny
A_1	mm	Vzdálenost osy rotace od osy rozdělovače tlaku pedálu v sezóně 2016/2017
A_2	mm	Vzdálenost osy rotace od osy rozdělovače tlaku pedálu v sezóně 2017/2018
A_3	mm	Vzdálenost osy rotace od osy rozdělovače tlaku pedálu v sezóně 2018/2019
A_4	mm	Vzdálenost osy rotace od osy rozdělovače tlaku pedálu v sezóně 2019/2020
B_1	mm	Vzdálenost osy rotace od působíště zatěžující síly pedálu v sezóně 2016/2017
B_2	mm	Vzdálenost osy rotace od působíště zatěžující síly pedálu v sezóně 2017/2018
B_3	mm	Vzdálenost osy rotace od působíště zatěžující síly pedálu v sezóně 2018/2019
B_4	mm	Vzdálenost osy rotace od působíště zatěžující síly pedálu v sezóně 2019/2020
D_{o3}	mm	Průměr otvorů pro kluzná pouzdra
D_{o4}	mm	Průměr otvorů pro kluzná pouzdra
D_p	mm	Vnější průměr pouzdra rozdělovače tlaku
d_{o3}	mm	Průměr osičky použité v přípravku
d_p	mm	Průměr pístků v použitých třmenech Brembo
d_{pv}	mm	Průměr pístků v použitých brzdových válcích Brembo
d_{z2}	mm	Průměr otvorů pro závit
d_{z3}	mm	Průměr otvorů pro závit
d_{z4}	mm	Průměr otvorů pro závit
F_{max}	N	Maximální zatěžující síla
$F_{př}$	N	Síla předpětí trhacího stroje
$F_{př2}$	N	Síla předpětí trhacího stroje
F_{R1}	N	Reakční síla pedálu v sezóně 2016/2017
F_{R3}	N	Reakční síla pedálu v sezóně 2018/2019
k_{min}	-	Minimální dovolená bezpečnost
l_2	mm	Celková délka pedálu v sezóně 2017/2018
m_1	g	Hmotnost pedálu v sezóně 2016/2017
m_{21}	g	Hmotnost první navržené verze pedálu v sezóně 2017/2018
m_{lim}	g	Zvolená limitní hmotnost
n_p	-	Celkový počet pístků v předních třmenech
$P_{př}$	-	Poměr přepákování pedálu v sezóně 2016/2017
$P_{př3}$	-	Poměr přepákování pedálu v sezóně 2018/2019

R_e	MPa	Mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti
S_p	mm	Dráha jednoho pístku v použitých třmenech Brembo
S_{pv}	mm	Dráha pístku v brzdovém válci Brembo pro přední okruh
t_{pa}	mm	Tloušťka hlavní části přípravku
t_{pb}	mm	Tloušťka upevňujících částí přípravku
t_{pc}	mm	Tloušťka přídatných výztuží přípravku
V_p	mm ³	Objem kapaliny vytlačovaný jedním pístkem třmenu
V_{pc}	mm ³	Celkový vytlačovaný objem kapaliny
V_{pv}	mm ³	Objem kapaliny vytlačovaný brzdovým válcem
V_{ph}	mm/min	Rychlost posuvu zatěžovací hlavice
α_{min}	°	Minimální úhel mezi pedálem a brzdnými válci
α_{max}	°	Maximální úhel mezi pedálem a brzdnými válci

Úvod:

V každém automobilu dnešní doby nalezneme brzdový systém, který patří k nejdůležitějším částem vozidla. Díky němu totiž můžeme upravit svou rychlost v závislosti na okolním provozu nebo místu na vozovce, například pokud jedeme z kopce, před zatáčkou či v jiných situacích. Umožňuje nám také bezpečně zastavit, pokud se před námi vyskytne překážka. Aby bylo možné tento systém ovládat, musí zde být ovládací prvek. Tím je právě brzdový pedál.

Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem brzdového pedálu pro projekt studentské formule, který je následně přímo použit na konstruovaném závodním stroji. Tento vůz se následně účastní závodů mezinárodní soutěže Formule Student. Při jeho návrhu je tedy potřeba dbát především na pravidla soutěže. Dalšími faktory, kterými se vývoj řídí, jsou ergonomie řidičů, jejich požadavky a v neposlední řadě i technické problémy.

1. Brzdový pedál vozidla

Běžné automobily, jaké dnes vidáme na ulicích, byly vytvořeny ve velkosériové výrobě čítající někdy i tisíce kusů. V dnešní době existuje mnoho výrobců různých značek automobilů. Některé vyvíjejí a vyrábí své vozy v takzvaných koncernech. V tomto uskupení firem jde jeden vyvinutý díl do mnoha různých značek a modelů automobilů. Jedná se tak o univerzální díly. Ty mohou být následně vyráběny ve velkých sériích na automatizovaných linkách. Tím pádem se snižuje jejich výrobní cena.

Naprostá většina automobilů má upevněnou pedálovou soustavu na přední stěně kabiny vozidla oddělující interiér od motorového prostoru. Umístěna je v horní části této přepážky, takže pedály z ní tzv. visí směrem dolů. Jelikož před místem, kde má řidič nohy, se nachází podběh vozidla s kolem, musí být pedálová soustava mírně odsazena od polohy řidiče směrem ke středu vozidla. To má přímý vliv na výsledný tvar brzdového pedálu. Aby mohl být spojen se soustavou a zároveň aby bylo zaručeno jeho bezpečné, a ergonomicky pohodlné ovládání, musí mít svůj charakteristicky prohnutý tvar, který můžete vidět na následujících obrázcích.

1.1. Osobní vozidla

V osobních vozidlech s běžnou dostupností se můžeme setkat převážně s dvěma typy brzdových pedálů. První typ se vyskytuje v automobilech se starším datem výroby. Jeho design tomu také odpovídá. Hlavní část je tvořena ocelovým plechem o tloušťce pohybující se v rozmezí od 4mm do 7mm. Pro zvýšení tuhosti a omezení kroucení je po celé délce vytvořen prolis. Jedná se o jednoduchou, avšak účinnou metodu. Na spodní části se nachází ocelový nášlap, který je k tělu přivařen.

V horní části je jako výztuha kolem osy otáčení a otvorem pro páku hlavního válce použit rovný ocelový plech o stejné tloušťce jako tělo pedálu a jsou spojeny bodovými sváry. Váleček, sloužící k upevnění pedálu je k hlavnímu tělu upevněn slisováním osazení na jeho vnějším průměru. Tímto válečkem prochází ocelové pouzdro přesného průměru s lícovaným šroubem. Po upevnění pedálu tedy nedochází k radiální vůli.



Obrázek 1: Brzdový pedál automobilu staršího data výroby s popisky

Druhý typ se vyskytuje v modernějších vozidlech. Jak můžete vidět na Obrázku 2, jeho hlavní část, tedy tělo pedálu, se skládá z jednoho kusu plechu profilem připomínající písmeno „U“. Tloušťka použitého materiálu je zde od 2 mm do 4 mm. To dovoluje používání modernějších slitin ocelí zajišťujících stejnou nebo vyšší pevnost při menších tloušťkách.

Pro zjednodušení výroby je nyní nášlapná deska součástí těla, které se v tomto místě rozšiřuje kvůli pohodlnější ovladatelnosti. Na tuto část je nasazená gumová krytka, která má za úkol zvýšit bezpečnost při brzdění. Zároveň však její spodní část slouží jako mechanický doraz pro případ dlouhého kroku pedálu.



Obrázek 2: Brzdový pedál soudobého vozidla s popisky

Na těle pedálu je několik pomocných prolisů, z nichž každý má svůj smysl. Boční, které jsou umístěny na okrajích, zabraňují zvlnění bočních stran a následnému zborcení pedálu. Prolis, na Obr. 2 označen jako „Domeček osičky“, slouží k přesnému opření konce osičky hlavního brzdového válce. Tento konec má kulový tvar a tím se docílí kloubového přenosu síly. Hned pod ním se nachází mechanický doraz pro brzdové čidlo. Při sešlápnutí pedálu dojde k rozepnutí čidla, a to má za následek rozsvícení brzdových světél.

Na bočních stranách se nacházejí otvory, ve kterých je nacvaknuté plastové pouzdro pro usazení ovládací osičky hlavního válce. Váleček pro upevnění pedálu je spojen s tělem stejným způsobem jako v předchozím případě, tedy lisováním. V tomto případě, však mezi upevňovací váleček a ocelové pouzdro přibyla také dvě kovová pouzdra s přírubou a teflonovou úpravou povrchu. Ta zajišťují plynulejší chod pedálu a menší pracovní odpor.

1.2. Vozidla vyšší třídy

Jedná se o modely vozidel s luxusnější výbavou zajišťující větší komfort při jízdě. Zároveň však je kladen důraz na vyšší míru bezpečnosti. Jejich vyšší cena je způsobena nejen lepší výbavou, ale také lepšími bezpečnostními prvky. K nim samozřejmě patří i brzdový pedál. Jeho hlavní tělo se skládá ze dvou kusů plechu, které také svým profilem připomínají písmeno „U“. Horní profil má širší základnu a součástí jeho spodní části je tvarovaný nášlap. V porovnání s předchozím pedálem je nášlap širší, za účelem pohodlnějšího ovládnutí. I zde je nasazená gumová krytka, sloužící jednak k zamezení sklouznutí nohy z pedálu, zároveň i jako mechanický doraz.

Horní část má v sobě vsazený upevňovací váleček, který je zde (přivařen nikoli upevněn lisovaným spojem). Pod ním se nachází osazení z každé strany horního profilu s otvory. Ty slouží k upevnění plastového vedení osičky hlavního válce. Na přední straně je vytvořen prolis, který je zde jako mechanický doraz čidla světla.

Spodní profil má menší základnu. Je tedy užší než jeho protějšek, a to přesně o tolik, aby mohl být vsazen do horního profilu. Na jeho zadní straně je vytvořen jeden z mála potřebných prolisů. Jedná se opět o „Domeček osičky“, který má stejnou funkci jako v předchozím případě. Tyto dvě části jsou následně spojeny svařením. Výsledkem toho je větší tuhost pedálu v porovnání s předchozím modelem. Tím, že hlavní tělo ve výsledku tvoří pevný čtvercový profil, nemůže dojít ke zvlnění jeho bočních stěn. Odpadá tak potřeba tvorby prolisování na bočních stranách, a tím se zjednodušuje výroba. Pedál má dále menší náchylnost k nepříjemnému kroucení při sešlápnutí.



Obrázek 3: Brzdový pedál vozidla vyšší třídy s popisem

1.3. Užitékové vozy

Hlavní skupinou užitékových vozů jsou dodávky. Vozidla, ve kterých řidič sedí ve zvýšené poloze nad předním kolem. Tím, že je řidič oproti normálnímu vozidlu v dodávce výš, vzniká více prostoru pro možnosti upevnění pedálové soustavy. Ta tak ve většině případů je upevněna ve stejné ose s řidičem bez nutnosti odsazení. Odpadá tedy potřeba kompenzovat odsazení pedálové soustavy při výrobě pedálu. Jeho výroba je tedy znatelně jednodušší a náklady spojené s výrobou jsou nižší. Což je potvrzeno na následujícím obrázku.

Hlavní tělo pedálu je tvořeno pouze rovným ocelovým plechem o tloušťce pohybující se okolo 6 mm. Nejsou zde vytvořeny žádné zpevňující prolisy, jako tomu bylo u předchozích případů. Tím, že se nejedná o profil s širokou základnou, ale jen o plech, je nášlapná deska k tělu pedálu přivařena. Na ní je opět nasazena gumová krytka. V tomto případě plní pouze úlohu bezpečnostní. Mechanický doraz je řešen jiným způsobem.

Koncový doraz pro čidlo světel je zde tvořen malým kusem plechu připevněným k hlavnímu tělu svarovým spojem. Uchycení osičky je zde řešeno levnější variantou než u předchozích dvou případů, a sice otvorem pro spojovací čep. Upevňovací váleček je k tělu pedálu připevněn slisováním osazení na jeho vnějším průměru. V našem případě, zde není použito ložiskových pouzder pouze ocelové vložky s přesným průměrem.



Obrázek 4: Brzdový pedál užitékového vozu s popisky

2. Formule Student

Projekt Formule Student je prestižní mezinárodní soutěž, do které se každým rokem přihlásí více než 500 univerzitních týmů z celého světa. Úkolem každého z týmů je navrhnout a sestavit závodní vůz, se kterým bude soutěžit proti ostatním týmům v několika různých závodech a disciplínách, testujících vlastnosti vozu a schopnosti celého týmu.

Závody jsou rozděleny do několika skupin. Hlavními třemi jsou přejímky, statické disciplíny a dynamické disciplíny, ze kterých tým získává určitý počet bodů. Vítězem se stane ten, kdo získá nejvíce z 1000 možných bodů.

Přejímky neboli bezpečnostní kontroly vozidla, jsou nutnou podmínkou pro účast v dynamických disciplínách. Nejdůležitější částí je ověření bezpečnosti pilota. Proto se vozidlo při vstupní přejímce důkladně porovnává s předepsanými pravidly, jestli jim odpovídá. Kontroluje se například spolehlivost brzd, těsnost palivového systému, kvalita svarů, velikost nárazových zón, rozměry kokpitu a tak dále...

Pokud se stane, že tým neprojde přejímkou, stále má možnost zúčastnit se statických disciplín. V těch každý tým nejprve prezentuje konstrukční řešení a vyspělost technické stránky svého návrhu. Konzultuje s komisaři, proč je jejich řešení pro ně to nejlepší. Na straně ekonomické se představuje business plán sériové výroby a analýza nákladů všech dílů vozidla.

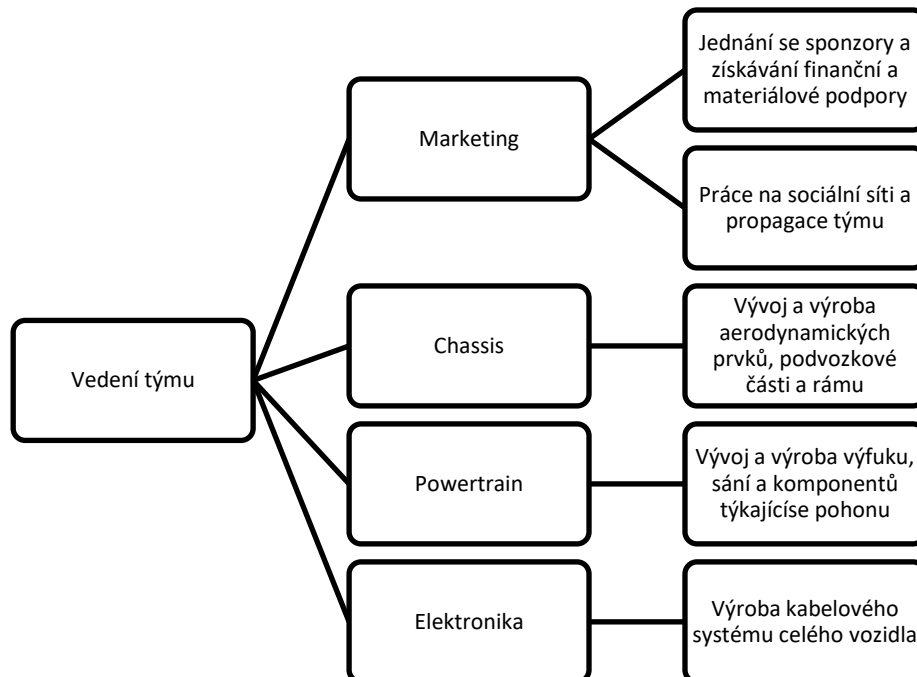
V dynamických disciplínách se týmy utkají v několika různých závodech. Prvním z nich je akcelerační závod, jinak nazývaný jako drag race. Dalšími je průjezd několika kol osmičkou a autokros testující celkovou ovladatelnost vozidla při statickém i dynamickém zatížení. Vrcholem soutěže je vytrvalostní závod na 22 kilometrů zahrnující výměnu pilotů. Při tomto závodě se měří spotřeba vozidla. Její výsledek výrazně ovlivňuje počet dosažených bodů. [1]



Obrázek 5: Zúčastněné týmy na závodech FS Czech 2018 [8]

2.1. FS TUL Racing

FS TUL Racing je tým studentů z Technické Univerzity v Liberci, který se zúčastňuje mezinárodní vysokoškolské soutěže Formule Student. Rozdělení týmu do jednotlivých skupin je znázorněno v následujícím obrázku, přičemž každá skupina má za úkol něco jiného. Dohromady však tvoří celek, který je schopný postavit závodní vůz. V současné době se náš tým skládá z 25 členů. Všichni studují bakalářské nebo magisterské studium, a to nejen Fakulty strojní, ale i Fakulty mechatroniky, elektrotechnické a ekonomické. Každý, kdo je studentem TUL, má možnost se přidat do týmu a podílet se tak na tvorbě naší formule. Díky tomuto projektu student získává nové vědomosti a zkušenosti nejen z oblasti konstrukce a stavby formule, ale i z testování a ze závodů. [1]



Obrázek 6: Hierarchie týmu

2.2. Pravidla závodů

Pravidla pro soutěž Formule student, podle kterých se řídíme, jsou tvořena dvěma organizacemi. Formula Student Germany (FSG) a Society of Automotive Engineers (SAE) organizací. Jako první vznikla pravidla tvořená podle SAE, a to v roce 1980. Byla to jediná pravidla pro tuto soutěž přibližně do roku 2017, kdy se organizátoři FSG rozhodli pro vytvoření vlastních pravidel podle vzoru SAE. Tato pravidla se nejprve používala jen na jejich závodech, postupně je však převzaly evropské soutěže a dnes jsou evropským standardem. Jedná se přibližně o 130 stránek pravidel, podle kterých se celý závodní vůz navrhuje. Příkladem je omezení výkonu motoru, strukturování rámu nebo dokonce i šířka závodní tratě. Ačkoliv se pravidla liší v maličkostech, tak z našeho pohledu jsou přísnější pravidla podle FSG, tudíž jsme se rozhodli stavět formule podle jejich standardů. Tato pravidla jsou povolena na všech závodech, kterých se náš tým zúčastnil. [2,3]

2.2.1. Pravidla pro brzdový systém [4]

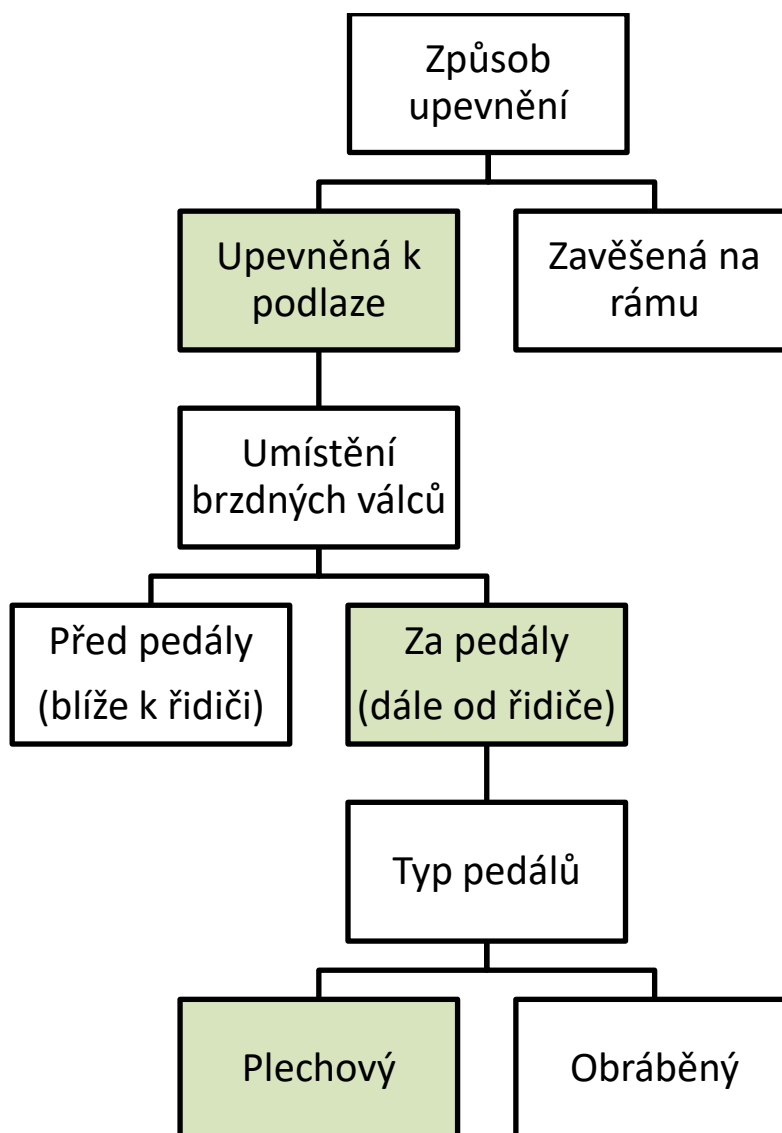
- Vozidlo, které studenti navrhli, musí být vybaveno hydraulickým brzdovým systémem působícím na všechna čtyři kola zároveň. Celý brzdový systém je ovládaný pouze jedním členem.
- Brzdový systém studentské formule musí mít dva oddělené, na sobě nezávislé, hydraulické systémy z důvodu možného selhání jakékoliv části prvního nebo druhého okruhu brzdného okruhu. Tím bude zajištěno brzdění alespoň dvou kol závodního vozu. Každý hydraulický okruh musí mít svůj vlastní zásobník kapaliny.
- Je povoleno použití jedné brzdy na zadní nápravě, pokud tým používá diferenciál s omezenou svorností. Tím je zaručeno účinné brzdění zadních kol jednou středovou brzdou.
- Systém elektronického pomocného brzdění nazývaný „Brake-by-wire systém“ není povolen.
- Veškeré hadice tvořící tlakové části obou brzdových okruhů musí mít na sobě kovový opleť. Ten zaručuje bezpečné používání plastových hadic při vysokých tlacích.
- Použitý brzdový systém musí být opatřen kryty, které zabrání porušení systému při nečekaném selhání vozu nebo případným kolizím s ostatními částmi za provozu.
- Při bočním pohledu na formuli jakákoli část brzdového systému nesmí být pod spodní plochou rámu, aby nedošlo k jejímu poškození.
- Brzdový pedál musí být navržen tak, aby vydržel kritické zatížení 2000 N bez jakéhokoli selhání brzdového systému či pedálové soustavy. Toto může být testováno sešlápnutím pedálu maximální možnou silou pořadatelem sedícím v pozici jezdce.
- Tělo brzdového pedálu musí být vyroben z oceli, hliníku nebo titanu. Nejsou tedy povoleny žádné plastové ani kompozitní materiály.

3. Brzdový pedál pro formuli Eliška

Při stavbě první Studentské formule naší univerzity se tým skládal, až na výjimky ve vedení, převážně ze studentů prvních ročníků. Většina týmu neměla se stavbou takového stroje žádné nebo malé zkušenosti. Proto bylo rozhodnuto, že díly a komponenty, které jsou důležité pro bezpečnost a provoz tohoto stroje, se koupí jako hotové díly.

3.1. Výběr pedálu

Výše zmíněná podmínka platila taktéž pro brzdový pedál. V tomto případě se však nevybíral pedál samostatně, nýbrž jako jeden z dílů pedálové soustavy. Proto se zde uvádí postup výběru celé sestavy.



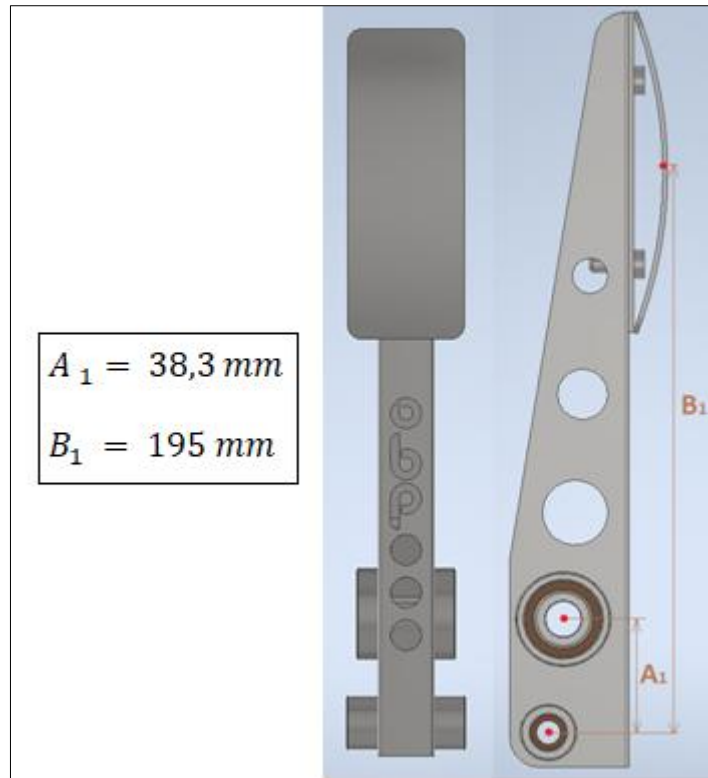
Obrázek 7: Postup výběru pedálové soustavy

Postup výběru, který je znázorněn na Obrázku 7, byl vytvořen na základě porovnávání jednotlivých možností jak z automobilového průmyslu, tak i z odvětví studentské formule. Jako první se musí určit způsob upevnění. Hlavní výhodou soustavy zavěšené na rámu je dobrý přístup při obsluze, protože při úpravách je z formule sundána horní kapotáž, nikoliv však boční krytování. Oproti tomu soustava připevněná k podlaze má níž umístěné těžiště a nepotřebuje ke svému upevnění složitou a těžkou soustavu. Dále bylo třeba vybrat, kde budou umístěny hlavní brzdové válce. Poloha, při které jsou umístěny před pedály, tedy blíže k řidiči, umožňuje mít kratší verzi rámu při poloze soustavy, která vyhovuje řidičům. Tato varianta se často objevuje právě u vozů studentké formule. Na druhou stranu je zapotřebí druhé podlahy uvnitř formule, aby nedošlo k poškození některé z částí brzdných okruhů (viz 2.2.1.). Proto se určilo, že válce budou za pedály i za cenu delšího rámu. Dalším důvodem byl omezený prostor mezi pedály a sedadlem řidiče. Jako poslední se určoval typ pedálů. Ten závisel na ceně celé soustavy. Z finančních důvodů se určilo, že pedály budou z ohýbaného plechu.



Obrázek 8: Pedálová soustava OBP

Tímto výběrem se určila pedálová soustava značky OBP Motorsport. Brzdový pedál, stejně jako zbytek sestavy byl vytvořen z uhlíkové oceli. Nebylo bohužel možné zjistit od výrobce přesné vlastnosti použitého materiálu. To je jeden z důvodů, proč nebyly vytvořeny kontrolní simulace pro ověření bezpečnosti daného dílu. Dalšími důvody byly nedostatek zkušeností s programy na simulování takovýchto součástí a fakt, že se jednalo o díly, které se používají v závodních autech.



Obrázek 9: Model původního pedálu

3.2. Popis Brzdového pedálu

Jelikož se jedná o důležitou součást formule, byl tento pedál vyjmut ze sestavy, aby mohl být alespoň změřen a výsledky těchto měření mohly posloužit k dalšímu vývoji. Jako první se zjistil poměr přepákování, který je zde dán geometrií od výrobce.

$$p_{př} = \frac{B_1}{A_1} \quad (1)$$

$$p_{př} = \frac{195}{38,3}$$

$$p_{př} = 5,09$$

Při maximální zatěžující síle $F_{max} = 2000 \text{ N}$ dostaneme při daném poměru přepákování reakční sílu působící v umístění rozdělovače brzdného tlaku. Chod pedálu uvažují tak malý, že reakční síla zůstává rovnoběžná se zatěžující silou po celou dobu chodu pedálu.

$$F_{R1} = F * p_{př} \quad (2)$$

$$F_{R1} = 2000 * 5,1$$

$$F_{R1} = 10200 \text{ N}$$

Další neméně důležitou hodnotou je hmotnost pedálu. Ta byla zjištěna pomocí váhy od výrobce Silver Crest vyrábějící přesné kuchyňské váhy. Tato s označením SNAW 1000 B1 má přesnost do 2g.

$$m_1 = 506 \text{ g} \quad (3)$$

Poslední věcí, která se zjišťovala, byl způsob uložení. V těle pedálu jsou nalisována dvě bronzová, kluzná pouzdra o rozměrech 12 x 8 x 12 mm. Skrz ně je prostrčen šroub M8 se závitem až k hlavě šroubu. Při závodech se došlo k závěru, že právě to mělo za následek velkou vůli při otáčení a šroubovitý tvar závitu způsobil na vnitřním průměru ložisek drážky, takže docházelo k zadírání a nepravidelnému chodu pedálu.

Při opětovné kontrole na závodech se přišlo na závadu týkající se rozdělovače tlaku. Vnější kroužek kloubového ložiska je v tomto případě vyroben z bronzu. Tento fakt a také možná nepřesnost výroby měly za následek trvalou deformaci tohoto členu a jeho následné úplné odstavení provizorním řešením.

3.3. Cíle pro zlepšení na sezónu 2017/2018

- Nižší hmotnost
I přes jednoduchost konstrukce byla hmotnost brzdového pedálu velká a muselo dojít k výrazné redukci. Rozhodlo se tedy, že limitní hmotnost pedálu další generace bude polovičních $m_{lim} = 250 \text{ g}$.
- Optimální tuhost
Zajistit správným tvarem dostatečnou tuhost pedálu při nižší váze tak, aby byl materiál co nejvíce využit.
- Lepší montáž
K namontované pedálové soustavě byl ve formuli velice obtížný přístup a úpravy související s pedály často měly za následek demontáž celé soustavy a ne jen samotných pedálů.

4. Návrh Pedálu pro formuli Markétka

Základními prvky při tomto návrhu byla data zjištěná změřením předchozího pedálu, který byl kupovaný. Dalšími určujícími faktory jsou samozřejmě pravidla a v neposlední řadě stanovené cíle, jejichž dodržení je neméně důležité.

4.1. Materiál pedálu

Prvním krokem ve tvorbě nového pedálu byla volba materiálu. Za ten byl zvolen Hliník s normou EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5). Z tohoto materiálu se vyrábějí veškeré hliníkové pevnostní díly na naší studentské formuli. Jedná se o slitiny obsahující hliník, zinek a hořčík. Ty jsou, stejně jako slitiny obsahující hliník, hořčík a křemík ze skupiny 6000, tepelně vytvrditelné. Na rozdíl od skupiny 6000 je námi používaná slitina hliníku schopna dosáhnout významně vyšší tvrdosti a pevnosti. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je zvýšená náchylnost ke korozi z vnitřního pnutí. To se do jisté míry snižuje, pokud se ke slitinám AlZnMg přidá měď. Na druhou stranu se zvyšuje dosažitelná pevnost. Možné nevýhody především AlZnMg slitin s obsahem mědi jsou snížená odolnost proti atmosférické korozi a náchylnost této slitiny k vrubům. [6]

Rozměry polotovaru, ze kterého se bude pedál vyrábět, jsou 55 x 55 x 280 mm. Přes specifickou tloušťku polotovaru určíme, že mez pevnosti v tahu bude $R_m = 525 \text{ MPa}$ a mez kluzu $R_e = 440 \text{ MPa}$.

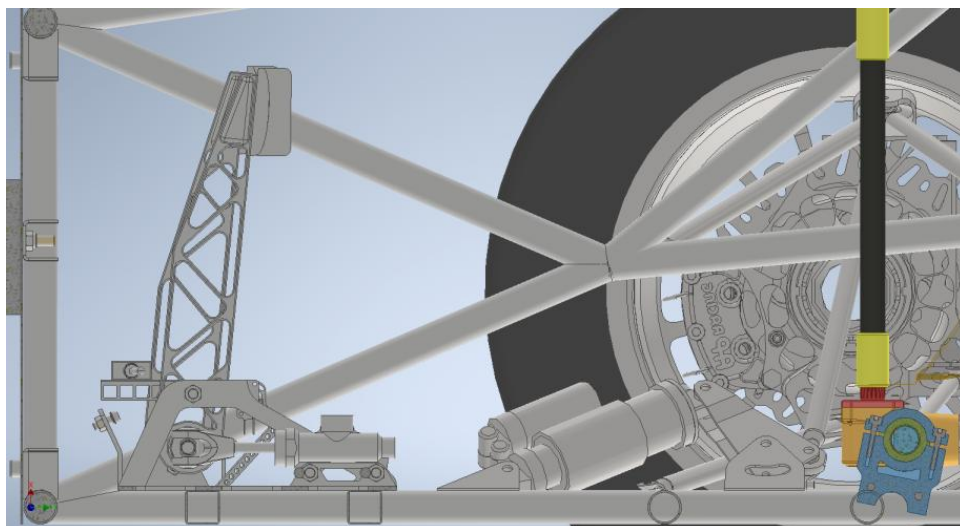
Tabulka 1: Materiálové vlastnosti EN AW-7075 T6 [6]

EN AW -	Specifikovaná tloušťka mm		Pevnost v tahu N/mm^2	0,2% mez kluzu N/mm^2	Tažnost min. %		Poloměr oblouku (zakřivení) $^{\circ}$	Tvrdost $^{\circ}$ HBS	
	nad	do			min.	A			
7075 T6 0,8	$\geq 0,4$	0,8	525	460	6	5,5 t	4,5 t	157	
	1,5	540	460	6	8		160		
	1,5	3,0	540	470			7		6,5 t
	3,0	6,0	545	475			8		8,0 t
	6,0	12,5	540	460			8		12 t
	12,5	25,0	540	470	6	6	161		
	25,0	50,0	530	460	5	5	158		
	50,0	60,0	525	440	4	4	155		
	60,0	80,0	495	420	4	4	147		
	80,0	90,0	490	390	4	4	144		
	90,0	100,0	460	360	3	3	135		
	100,0	120,0	410	300	2	2	115		
	120,0	150,0	360	260	2	2	104		

4.2. Uspořádání Pedálové soustavy

Jak již bylo řečeno, první pedálová soustava měla brzdové válce umístěné vodorovně za brzdovým pedálem. To mělo za následek buď umístění soustavy blíže k řidiči (a ten by měl tudíž méně pohodlnou polohu nohou při řízení) nebo prodloužení přední části rámu a značné zvýšení hmotnosti.

Rozhodlo se tedy, že brzdové válce budou umístěny pod chodidly řidiče. Ten bude mít sice o něco výše položené nohy, může je však více natáhnout díky celkovému zkrácení soustavy a jejímu možnému posunu blíže k přední části rámu. Brzdové válce budou schovány pod vnitřní podlahou, která zároveň zakrývá i spodní převodku řízení.



Obrázek 10: Uspořádání pedálové soustavy

4.3. Ergonomie řidiče

Ergonomií řidiče se myslí to, jak daný řidič sedí ve vozidle. V jakém místě má upevněnou sedačku, do jaké výšky a pod jakým úhlem si nastaví volant, ale také v jaké vzdálenosti od sedačky a výšce od podlahy má umístěné pedály. Byl proto vytvořen jednoduchý ergonomický přípravek, kterým se daly tyto informace zjistit. Za tímto účelem byli do přípravku posazeni čtyři jezdci z minulé sezóny. Každému z nich byl přípravek nastaven tak, aby mu nejvíce vyhovoval. Kromě výše uvedených rozměrů, se dále zjistila výška pedálů podle toho, v jakém místě se řidiči dotýkaly přípravku. K tomuto rozměru se následně upravovala délka spodní části pedálu, a to pro dosažení přibližně stejného poměru přepákování jako u předchozího pedálu. Muselo se však počítat i s umístěním brzdových válců, aby reakční síla působila co nejvíce kolmo na brzdové válce.



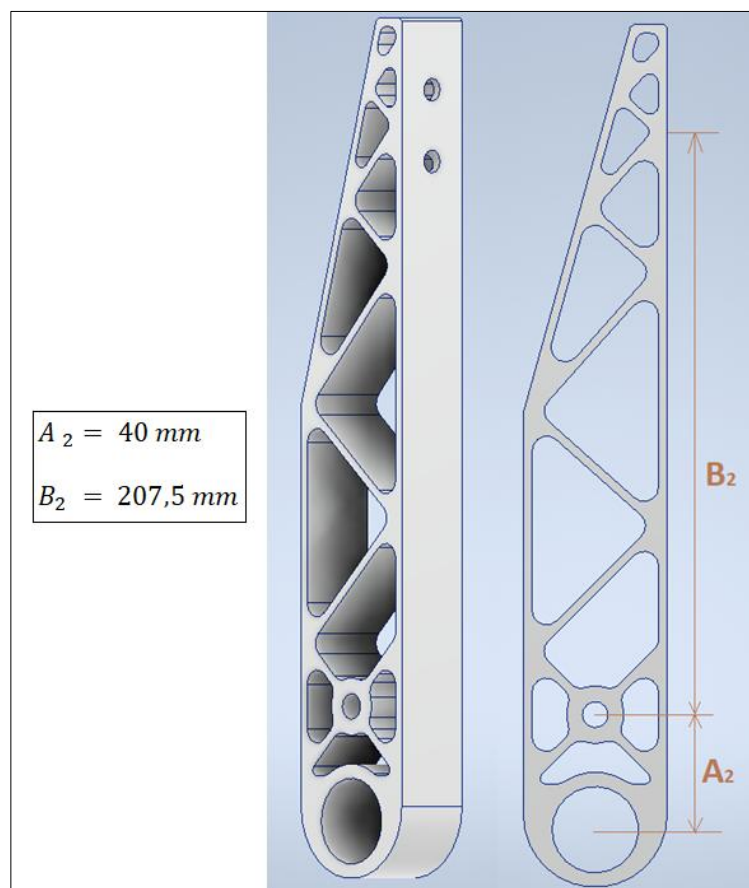
Obrázek 11: Ergonomický přípravek

4.4. Tvar pedálu

Výsledný tvar ovlivňuje zejména způsob, kterým se bude pedál vyrábět. Podle toho se následně volí jednotlivé úpravy, jako jsou například velikosti použitých rádiusů či konečná drsnost povrchu.

4.4.1. První verze

Rozhodnutí o změně polohy válců mělo za následek přesunutí osy otáčení nad umístění rozdělovače tlaku. Výsledkem je celková délka $l_2 = 285 \text{ mm}$. Další důležitou částí, která ovlivňovala tvar pedálu, byla výroba. Z finančních důvodů se dbalo na co nejmenší výrobní náklady. Jak můžete vidět na *Obrázku 12*, první verzí byl pedál ve tvaru příhradové konstrukce. Samotný tvar byl vytvořen tak, aby vyhovoval řezání vodním paprskem.



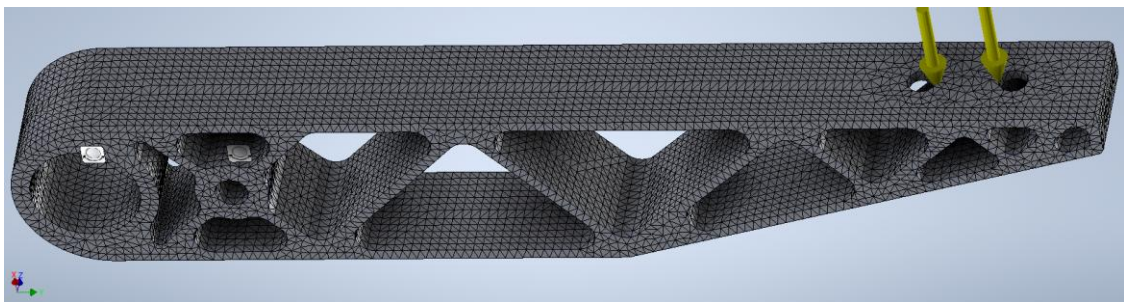
Obrázek 12: První návrh pedálu

Hlavní část výroby by proběhla již dříve zmíněnou metodou. Díry se závity pro uchycení nášlapu by se následně vyrobily ručním způsobem na dílně. Nejprve se na stojanové vrtačce předvrtají dvě díry o průměru $d_{z2} = 7 \text{ mm}$. Následně se ručním vratidlem vytvoří závity M8. Otvory pro montáž kluzných pouzder a rozdělovače tlaku by byly vyřezány s pracovním odsazením. Následovalo by ruční vyhrubování a vystružování na požadovaný tolerovaný rozměr. [10]

4.4.2. Simulace prvního pedálu

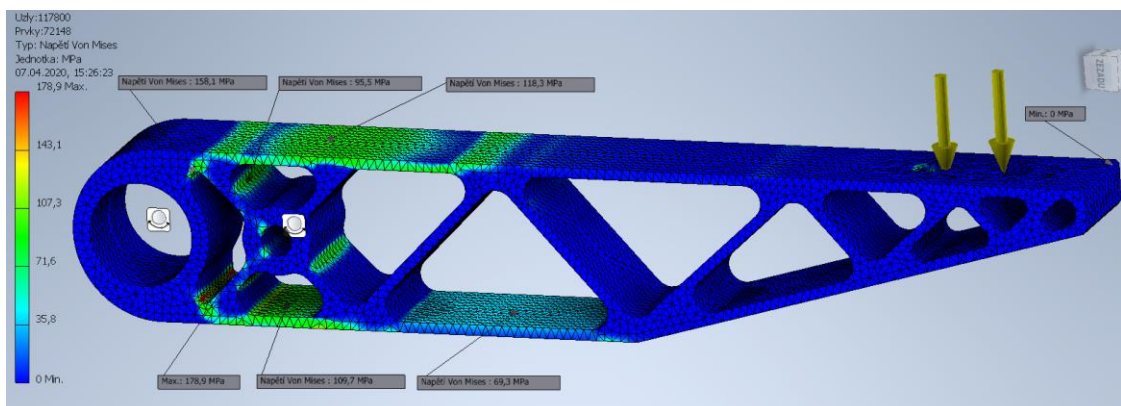
Modelování i samotná simulace probíhala v programu Inventor 2018. Nebylo tedy nutné žádné importování modelu do jiné verze. Jako první bylo potřeba zvolit materiál z výběrové tabulky. Pro simulační výpočty byl zvolen materiál EN AW 6061 T6, který (až na velikost meze pevnosti a kluzu) má obdobné mechanické vlastnosti. Jedná se o Poissonovo číslo a modul pružnosti a zvýšená mez kluzu u reálně použitého materiálu pouze zvyšuje bezpečnost.

Dalším krokem bylo zavazbení simulované součásti. K tomu byly použity dvě vazby typu „Přichytit“ s omezením pohybu v radiálním a axiálním směru. Povolena byla rotace kolem osy Z. Následně se potom určila zatěžující síla v místě uchycení nášlapu. Před samotnou simulací se provedla tvorba sítě. Z důvodu potřeby stejné přesnosti ve všech částech modelu byla velikost prvků sítě upravena na průměrnou hodnotu 0,01 [-]. Jedná se o zlomkovou délku celkové délky modelu. Výpočet takto zadané sítě bude sice trvat o něco déle, než když by tato síť byla mapovaná, avšak časový rozdíl není nijak velký.



Obrázek 13: Vygenerovaná síť a okrajové podmínky

Po úspěšném dokončení simulace bylo vygenerováno zobrazení redukovaného napětí „von Mises stress“, což je redukované napětí podle teorie HMM. Jak je zobrazeno na *Obrázku 14* největší napětí má hodnotu 178,9 MPa. Tomuto napětí odpovídá bezpečnost o velikosti 1,54. I když se tedy jedná o materiál, který je méně pevný, než jaký bude ve skutečnosti použit, má tento model vyhovující pevnost. Maximální deformace u tohoto modelu činila 1,6 mm, a to v horní části pedálu.

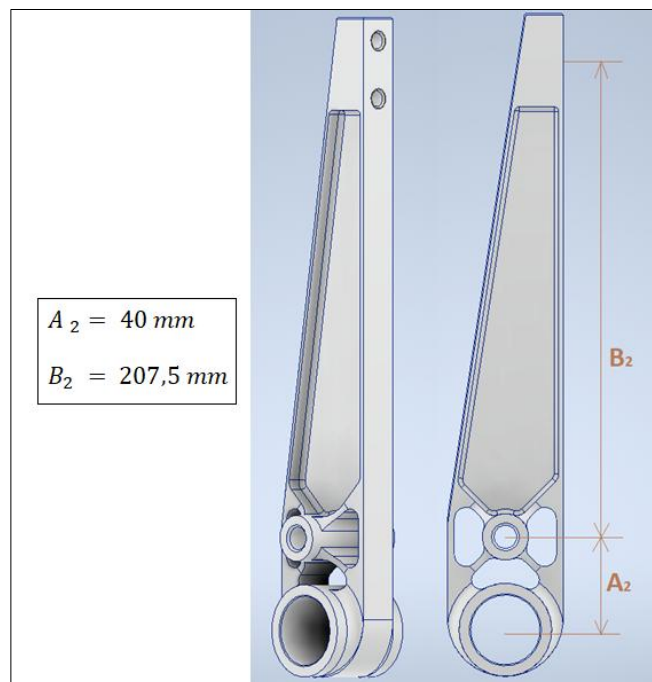


Obrázek 14: Napětí v pedálu

4.4.3. Druhá verze

První verze pedálu byla vyhovující, co se týče jednoduchosti výroby, avšak měla jeden nedostatek. Tím byla hmotnost, která činila $m_{2_1} = 358 \text{ g}$. Proto se začalo uvažovat o nové verzi a tato by zůstala jako náhradní řešení. Marketingové sekci týmu se podařilo zajistit firmu zabývající se obráběním kovových dílů pomocí tříosých a pětiosých obráběcích strojů, která formou sponzorského daru obrobí díly na formuli.

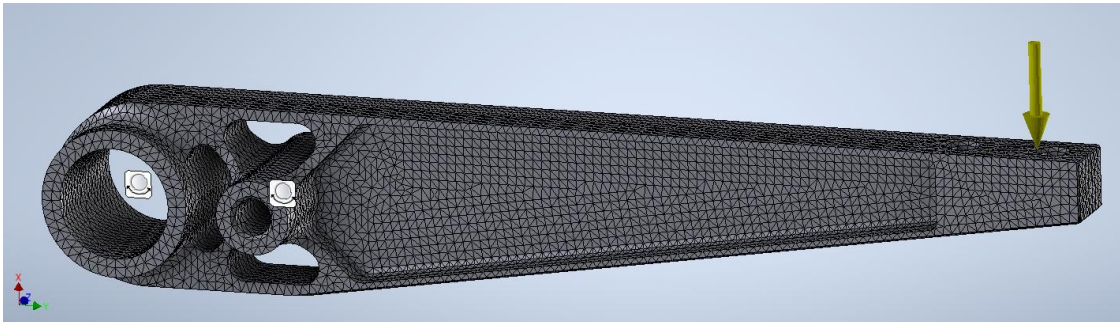
Přezkoumáním předchozí verze se došlo k závěru, že pedál je značně předimenzován a po dohodě s vedením týmu bylo rozhodnuto o stanovení nové minimální hodnoty bezpečnosti $k_{min} = 1$. Tvar pedálu tak bylo možno podrobit razantnějším úpravám.



Obrázek 15: Druhý návrh pedálu

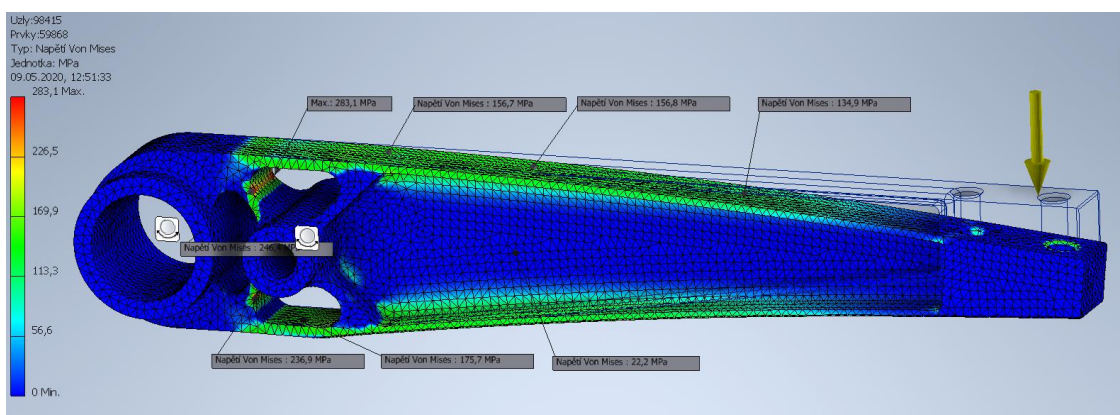
4.4.4. Simulace druhého pedálu

I v tomto případě probíhala simulace v programu Inventor 2018. Materiál pro simulování byl zvolen stejný, tedy hliníková slitina EN AW 6061 T6. Jako v předchozím případě byly za okrajové podmínky použity dvě vazby typu „Přichytit“ v místě osy otáčení pedálu a umístění rozdělovače brzdného tlaku. Obě vazby jsou omezeny v pohybu v radiálním a axiálním směru. Zatěžující síla byla umístěna do míst upevnění nášlapu a je kolmá k danému povrchu pedálu. Nastavení samotné sítě potřebné pro provedení simulace zůstalo stejné jako v předchozím případě.



Obrázek 16: Vygenerovaná síť a okrajové podmínky druhého návrhu

Výsledné napětí v pedálu je taktéž „von Mises stress“, což je redukované napětí podle teorie HMM. Na Obrázku 17 je zobrazen průběh napětí v celém pedálu. Pokud porovnáme maximální napětí obou verzí zjistíme, že maximální napětí se zvýšilo z 178,9 MPa na hodnotu 283,1 MPa. Maximální průhyb této verze narostl na 3,4 mm, což je více jak dvojnásobná hodnota předchozího pedálu. Minimální bezpečnost klesla pod stanovenou minimální hodnotu $k_{min} = 1$ na hodnotu 0,97, avšak po dohodě s vedením týmu byla tato hodnota bezpečnosti odsouhlasena jako dostačující.





Obrázek 17: Napětí v druhé verzi pedálu

4.5. Porovnání navržených verzí

V následující tabulce jsou uvedeny a porovnány veškeré důležité parametry obou navržených verzí. Hodnoty nazvané jako určující mají velikosti, které byly zjištěny v předcházejícím vývoji nebo byly zvoleny a slouží k porovnání a vyhodnocení výsledů jednotlivých návrhů.

Tabulka 2: Porovnání výsledků obou verzí pedálu

	Jednotky	První verze	Druhá verze	Určující hodnota
				
Hmotnost	[g]	358	253	250
Napětí	[MPa]	178,9	283,1	470
Posunutí	[mm]	1,6	3,4	5
Bezpečnost	[-]	1,54	0,97	1
Přepákování	[-]	5,18	5,18	5,09

4.6. Povrchová úprava

Jak již bylo řečeno, má EN AW-7075 T6 v atmosférických podmínkách poněkud nižší odolnost proti korozi kvůli legování mědí. Z tohoto důvodu byl k povrchové úpravě použit tvrdý eloxovací proces. Tím se docílilo nejen větší tvrdosti povrchu pedálu, ale i zlepšení odolnosti vůči korozi. Tento druh Eloxování zajistí, že si povrch součásti zachová stejnou barvu.[6]

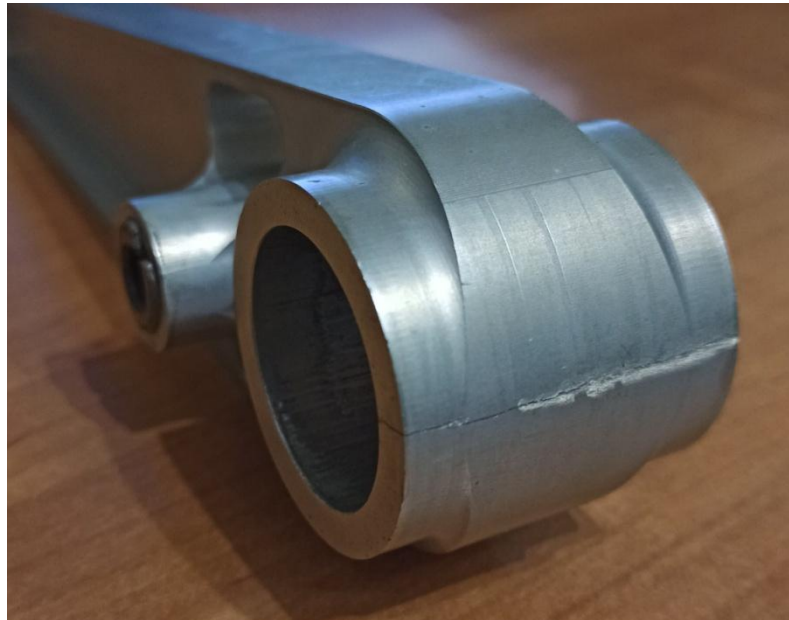
Eloxování je průmyslový název pro anodickou oxidaci. Jedná se o elektrolytický proces, který se využívá k vytvoření ochranné oxidové vrstvy na povrchu hliníkových součástí. Tloušťka vytvořené vrstvy stejně jako její zabarvení záleží na slitině hliníku a provozních podmínkách eloxování. Takto vytvořená vrstva zlepšuje provozní vlastnosti materiálové slitiny výrobku. Především zvyšuje jeho korozní odolnost, tvrdost a otěruvzdornost takto povrchově upravených dílů. Proces Eloxování je příznivý vůči životnímu prostředí, protože oxidační proces, který při něm probíhá, je pouze posílením přirozené oxidace hliníku. Neprodukuje se tak žádné vedlejší škodlivé produkty.[7]



Obrázek 18: Součásti v přípravku před eloxováním [7]

4.7. Poškození pedálu

Na konci sezóny, kdy se celá formule kontroluje, zdali jsou některé díly poškozeny, se našlo viditelné poškození brzdového pedálu v jeho spodní části. Proto byl tento díl z vozidla demontován a nahrazen levnější variantou svařovaného výrobku z ocelových součástí. Tato výměna slouží k tomu, aby formule byla i nadále pojízdná.



Obrázek 19: Poškození brzdového pedálu

Ocelové pouzdro, které je součástí rozdělovače brzdového, bylo nalisováno do spodní části pedálu, aby nedocházelo k deformaci samotného těla pedálu z hliníkové slitiny. Pro nalisování byla zvolena tolerance otvoru H7 a k tomu odpovídající tolerance n6, tedy přechodné uložení mající ve většině případů malý přesah. Ovšem tolerance na ocelovém pouzdře nebyla při montáži zkontrolována a proběhlo zalisování pouzdra do těla pedálu za studena.

Po nalezení poškození pedálu bylo ocelové pouzdro vylisováno a přeměřeno. Zjistilo se, že vnější průměr tohoto pouzdra má velikost $D_p = 30,4 \text{ mm}$. Při průměru otvoru v těle pedálu 30 mm je vzniklý přesah několikanásobně větší než jaký měl původně být. V důsledku tohoto přesahu vzniklo v okolí spoje vnitřní pnutí, se kterým nebylo při výrobě pedálu počítáno. Tato skutečnost je jedním z faktorů ovlivňující výsledný tvar pedálu navrhovaného pro nadcházející sezónu.

5. Pedál 2018/2019

Verze pedálu, která byla použita v sezóně 2017/2018 splňovala veškeré podmínky zadané pro zhotovení výsledného pedálu. Jak je ale patrné z *Obrázku 17*, tak velká část materiálu vyrobeného pedálu nebyla nijak zvlášť zatěžována. To dokazují modře vyobrazené části. Proto se přemýšlelo o takovém způsobu výroby, který dokáže zajistit dostatečné využití každé jednotlivé části dílu co největším způsobem. Díky tomu, že se oproti předchozímu roku navýšil rozpočet zásluhou Marketingové části, tak bylo možné uvažovat i nad nákladnějšími způsoby výroby, které však mohou zajistit jak zlepšení funkčnosti daných dílů na voze, tak i snížení jejich hmotnosti, což je koneckonců důvodem, proč se časem přechází na nekonvenční způsoby výroby.

5.1. Způsob výroby

Našemu týmu se naskytla příležitost využití školních laboratoří zabývajících se možnostmi a způsoby výroby pomocí 3D tisku. Tento druh výroby se používá především u prototypových dílů nebo u dílů s velmi malou až kusovou sérií, jelikož náklady s ní spojené jsou vyšší než u konvenčního druhu. 3D tisk umožňuje zhotovení dílu prakticky s jakýmkoli tvarem, vlastnostmi a velikostí, pokud na to je uzpůsobena daná tiskárna. Proto jsme se rozhodly pro tento druh výroby. Aby bylo možné splnění pravidel, kterými se týmy řídí při stavbě svých formulí, bylo zapotřebí využít jednu konkrétní tiskárnu dostupnou v laboratořích školy. Jedná se o tiskárnu SLM280HL umožňující vyrábět kovové díly pomocí prášků různých kovových slitin. Prášek vybrané kovové slitiny je v tiskárně nanášen v tenkých vrstvách po celé pracovní ploše a za pomoci laserů spékán dohromady v místech vznikajícího produktu. Přebytný prášek je po dokončení výrobního procesu odstraněn [12]



Obrázek 20: Tiskárna SML 280 na kovové prášky [12]

5.2. Zvolení materiálu

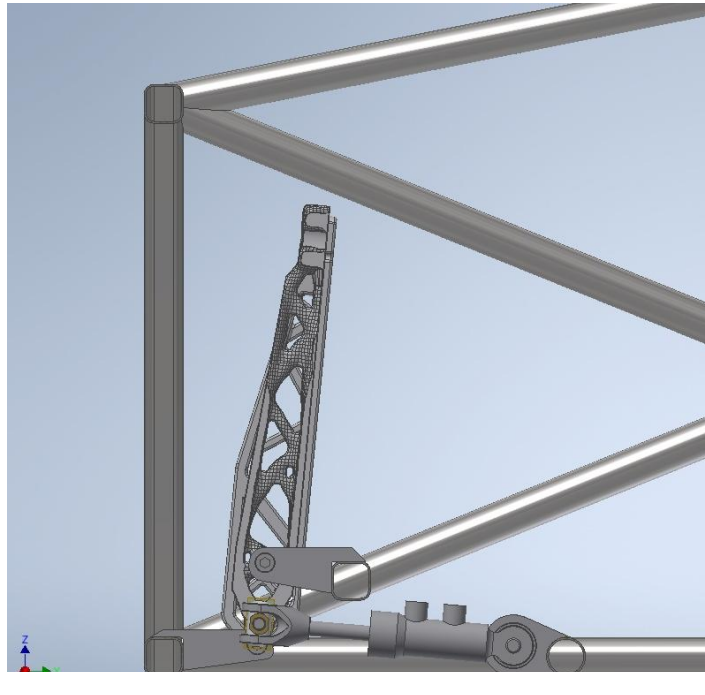
Za materiál byla zvolena hliníková slitina AlSi10Mg, která se používá při tisku ve školních laboratořích. Se svou pevností v tahu až 450 MPa je dostatečně vhodnou náhradou za slitinu EN AW-7075 T6 užívanou při konvenční výrobě. Při volbě materiálu se uvažovalo i nad slitinou titanu, která je pro tento způsob výroby také k dispozici. Od ní se však v tomto případě upustilo z důvodu velmi vysokých materiálových nákladů, které by nebyly dostatečně vykompenzovány ušetřenou hmotností zhotoveného dílu. [11]

Tabulka 3: Materiálové vlastnosti AlSi10Mg [11]

Mechanical data ¹	Formula symbol and unit	As-built ²	Heat-treated ²
Tensile strength	R_m [MPa]	450	260
Offset yield strength	$R_{p0.2}$ [MPa]	275	145
Elongation at break	A [%]	5	11
Reduction in area	Z [%]	5	30
Young's modulus	E [GPa]	75	55
Vickers hardness	HV5	125	80
Roughness average	Ra [μm]	10	10
Mean roughness depth	Rz [μm]	65	65

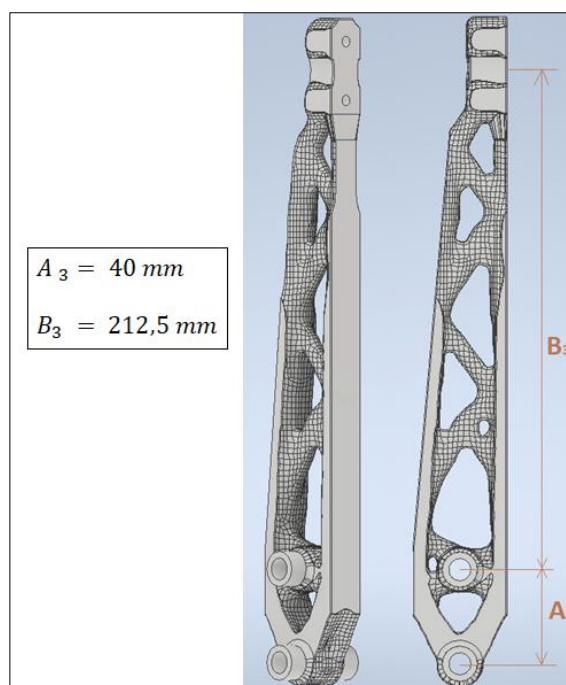
5.3. Tvar pedálu

Tvar brzdového pedálu určovalo jako v předchozích případech několik kritérií. Jako první byla poloha brzdových válců. Ta zůstala stejná jako v předchozím roce, tedy pod chodidly řidiče. Došlo však k menšímu prodloužení horní části pedálu z $B_2 = 207,5 \text{ mm}$ na $B_3 = 212,5 \text{ mm}$. To mělo za následek změnu v poměru přepákování. Důvodem této změny byla upravená ergonomie řidiče, ve které bylo zapotřebí posunout umístění pedálové soustavy. K další změně ve tvaru pedálu vedlo rozhodnutí, změnit umístění rozdělovače brzdného tlaku z pedálu na konstrukci v rámu. Toto rozhodnutí bylo podníceno novým typem brzdných válců od společnosti Brembo a jejich způsobem upevnění. Oproti předchozímu typu, který se upevňoval pomocí dvou šroubů k podlaze (viz. Obr. 10), se tento typ válců upevňoval za pomoci jednoho kloubového oka přímo na rozdělovač brzdného tlaku. Docílilo se tak odlehčení nejen samotného pedálu, ale i celé pedálové soustavy, která se tím i výrazně zjednodušila (viz. Obr 21).



Obrázek 21: Uspořádání nové pedálové soustavy

Porovnáním Obrázků 10 a 21 je patrné posunutí celé pedálové soustavy níže. To přispělo ke snížení bodu těžiště celého vozu a tedy i k jeho lepší ovladatelnosti. Dále je zde vidět výše zmíněné zjednodušení celé soustavy. Samotný pedál pak má zmenšenou spodní část, ve které je pouze zalisována osička na uchycení vidliček k válcům.



Obrázek 22: Návrh pedálu topologickou optimalizací

V rámci spolupráce s firmou EDAG, mající přístup k placeným licencím programu ANSYS, vznikl pomocí topologické optimalizace výše zobrazený návrh brzdového pedálu. Principem tohoto způsobu optimalizace je odebrání přebytečného materiálu ze zadaného polotovaru, který byl odvozen z předchozího modelu pedálu. Jako části pedálu, které mají být zachovány, byly označeny dva válce ve spodní části sloužící pro upevnění pedálu a dosedací plocha v horní části, a to i s potřebným materiálem pro vytvoření závitů. V tomto místě bude upevněna nášlapná deska dvěma šrouby se závitem M6. Tím je dána další změna oproti předchozímu modelu pedálu, kde toto uchycení zajišťovaly dva šrouby se závitem M8.

5.3.1. Reakční síla

Nejprve se musí zjistit nový poměr přepákování, který se kvůli změně rozměrů brzdového pedálu liší od předchozího modelu.

$$p_{př3} = \frac{B_3}{A_3} \quad (4)$$
$$p_{př3} = \frac{212,5}{40}$$
$$p_{př3} = 5,31$$

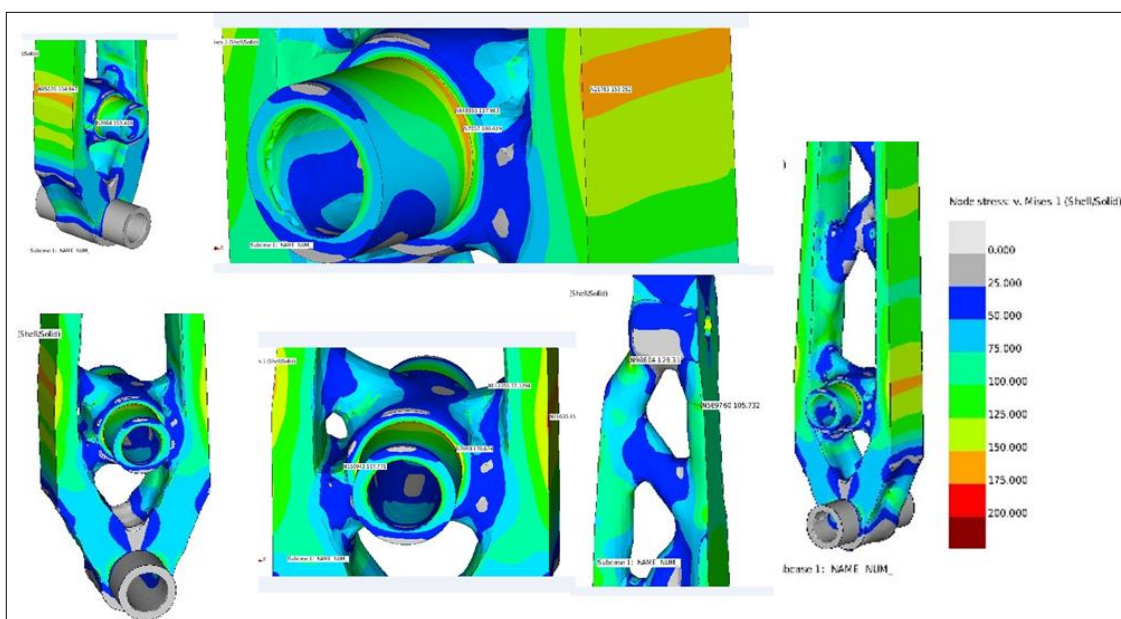
Poté se zjistí maximální reakční síla působící v místě osičky pro brzdové válce, která vzniká od zatížení pedálu daného v pravidlech uvedených výše.

$$F_{R3} = F * p_{př3} \quad (5)$$
$$F_{R3} = 2000 * 5,31$$
$$F_{R3} = 10620 \text{ N}$$

Tato reakční síla bude následně použita do okrajových podmínek v simulacích. Poloha pedálu vůči brzdovým válcům je nastavena tak, aby v nezátížené poloze svírali úhel 90° . Za ideálního stavu je chod pedálu ve spodní části tak malý, že můžeme uvažovat chod osy pro brzdové válce jako pohyb po přímce ($\sin(\alpha) \cong \alpha$; *pro* $\alpha = \pm 5^\circ$). Díky tomu se nemusí řešit rozložení reakční síly, protože ta tím pádem zůstává po celou dobu rovnoběžná se zatěžující silou.

5.4. Simulace navržené verze

Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace a s ní spojené simulace proběhly v programu ANSYS, konkrétně v části Workbench. Proto bylo za potřebí převést daný polotovar z typu „.ipt“ na typ „.igs“, aby bylo možné jej v programu použít. Jako okrajová podmínka byla použita nejprve vazba typu „Cylindrical support“, která omezuje pohyb modelu v radiálním směru a byla umístěna do osy otáčení brzdového pedálu. Následně v místě uchycení osičky pro brzdové válce bylo použito zavazbení „Bearing load“ simulující reakční sílu v tomto místě. Zatěžující síla pro testování se umístila opět na plochu dotyku s nášlapnou deskou.



Obrázek 23: Detailní zobrazení výsledného napětí v pedálu

Výsledné redukované napětí von-Mises, zobrazené na *Obrázku 23*, dosahovala nejprve nejvyšší hodnoty 180,6 MPa v místě zaoblení mezi upevňovacím válcem a hlavním tělem pedálu. Po zvětšení daného rádiusu se maximální hodnota snížila na 153,1 MPa a její působíště se přesunulo na přední stranu těla pedálu (viz *Obr. 23*). Maximální posuv při testovaném zatížení je 4,21 mm, a to v horní části pedálu.

5.5. Dokončovací práce

Ihned po dokončení tištění pedálu, byl zhotovený výrobek vložen do pece, kde se zahřál na předem stanovenou teplotu pro zlepšení homogenity materiálu a také jeho vlastností. Jelikož stroj neumožňuje tisknutí několika materiálů současně jako jiné druhy tiskáren, je podpurná stavba tvořena stejným druhem materiálu. To mělo za následek nedokonalé oddělení vzniklé podpurné struktury a části, které zůstaly na vzniklém produktu, musely být mechanicky odstraněny. Nejprve větší části ruční bruskou s brusným kotoučkem, následně menší části a ostré hrany pomocí pískování. Níže uvedené obrázky zobrazují hotový polotovar pedálu po očištění všech nepotřebných částí a jeho povrch je nyní hladký a lesklý.



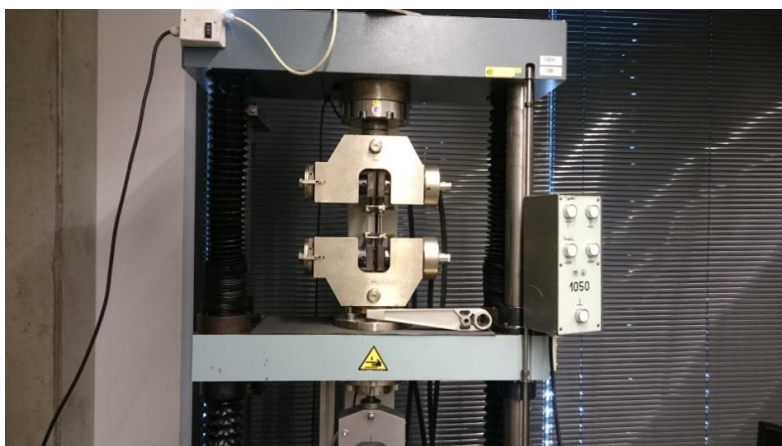
Obrázek 24: Brzdový pedál po dokončení tisku

Po dohodě s vedením laboratoře se části, kde mají být otvory, vyrobily v plném stavu, (viz. Obr 24) aby nedošlo k deformaci materiálu v těchto místech. Byly zde však vytvořeny středové důlky pro lepší orientaci a přesnost při následujícím postupu. Nejprve se v horní části pomocí stojanové vrtačky vyvrtaly dvě díry o průměru $d_{z3} = 5 \text{ mm}$, ve kterých byly následně vytvořeny ručním závitníkem závity M6 pro uchycení nášlapu. Otvory pro umístění kluzných pouzder a osičky od brzdových válců musí být přesné a s patřičnou tolerancí. Toho bylo docíleno pomocí tříosé frézky dostupné ve školních dílnách. Jako první se vyvrtaly dvě díry o průměru $D_{o3} = 9,25 \text{ mm}$. Následným vyhrubováním a vystružováním se docílilo požadované tolerance pro kluzná pouzdra, kterou udává jejich výrobce. Konkrétně se jedná o toleranci H7. Pro osičku brzdových válců byla zvolena tolerance s malým přesahem P6. [13, 14]

5.6. Testování skutečné součásti

Po zhotovení vytištěného dílu bylo zapotřebí ověření výsledků simulací, zdali takto vyrobená součást vydrží stejné zatížení jako součást vyrobená konvenční metodou. Dále tento test ověří homogenitu dílu a případný výskyt vnitřních vad, který by se projevil prasklinami na povrchu součásti.

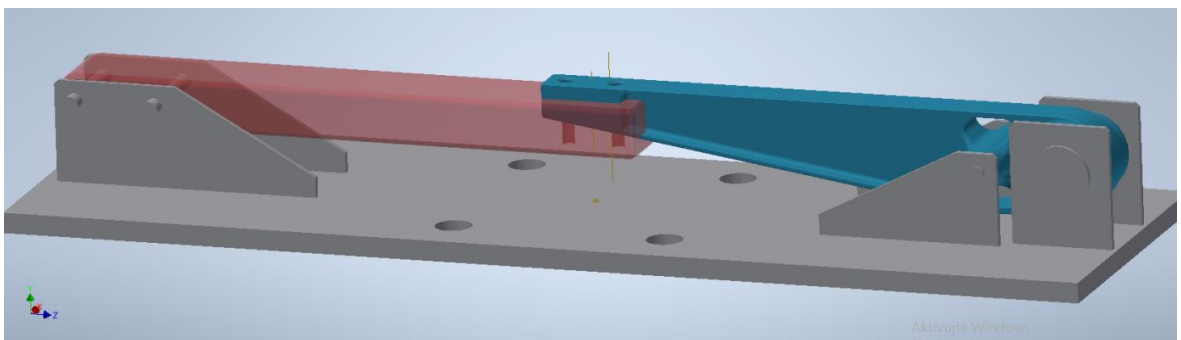
Stroj, na kterém zkouška proběhla, byla trhačka značky Tira Test 2300. Jak z obrázku uvedeného níže vyplývá, je tento stroj uzpůsoben svým příslušenstvím pouze pro tahové zkoušky vzorků materiálů předepsaných rozměrů. Bylo tedy zapotřebí vyrobit takový přípravek, aby se tato trhačka mohla použít pro testování pedálu na ohyb.



Obrázek 25: Trhačka Tira Test 2300

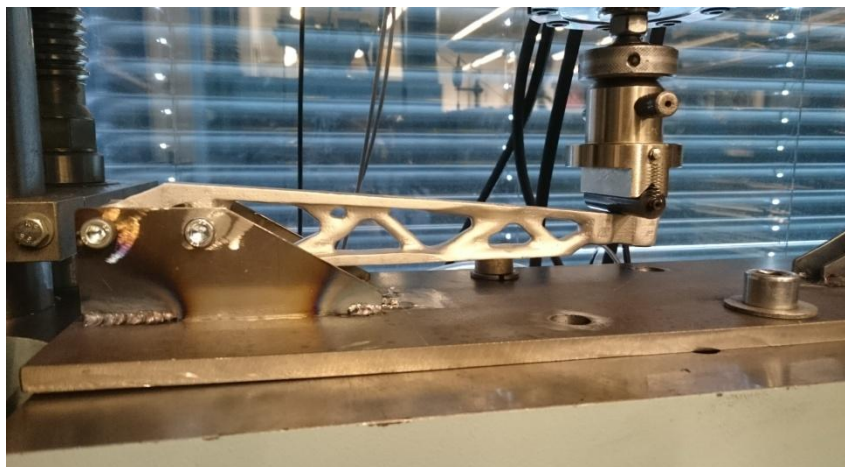
Tento přípravek musel zajistit, aby střed plochy zatěžování pedálu ležel v ose stroje. Byla proto navržena velmi jednoduchá konstrukce skládající se pouze z věcí dostupných a na škole snadno a rychle vyrobitelných. Důvodem toho byla časová zátěž, jelikož krátce po těchto testech bylo naplánováno testování funkčnosti celé studentské formule a nebylo tedy možné přípravek sestavit z komponentů vyrobených v externích firmách.

Hlavní část je tvořena pásem z oceli ČSN 11 373 o tloušťce $t_{pa} = 10 \text{ mm}$. Plechy, které budou kolmo přivařené na spodní desku, jsou ze stejného materiálu a díky své tloušťce $t_{pb} = 3 \text{ mm}$ se mohly nechat vyrobřit pomocí laserového řezacího stroje ve školních laboratořích. Osička použitá v přípravku je z oceli ČSN 15 230 (taktéž dostupné na dílně) a s průměrem $d_{o3} 10 \text{ mm}$ nahrazuje osičku pro brzdové válce. Aby bylo testování reálnější, byl na osu otáčení použit šroub M8 s dlouhým dříkem, který byl vsazen do kluzných pouzder jako při skutečném provozu.



Obrázek 26: Model navrženého přípravku

V modelu přípravku (viz. Obr 26) je znázorněna i druhá část sloužící ke kontrolnímu testování pedálu z předchozího roku pro porovnání a vyhodnocení naměřených výsledků. Bohužel toto testování nemohlo být realizováno z důvodu trvalého poškození předchozího modelu pedálu, které již bylo zmíněno. Levnější varianta, nahrazující originální pedál, nemohla být použita kvůli rozdílným materiálovým vlastnostem.

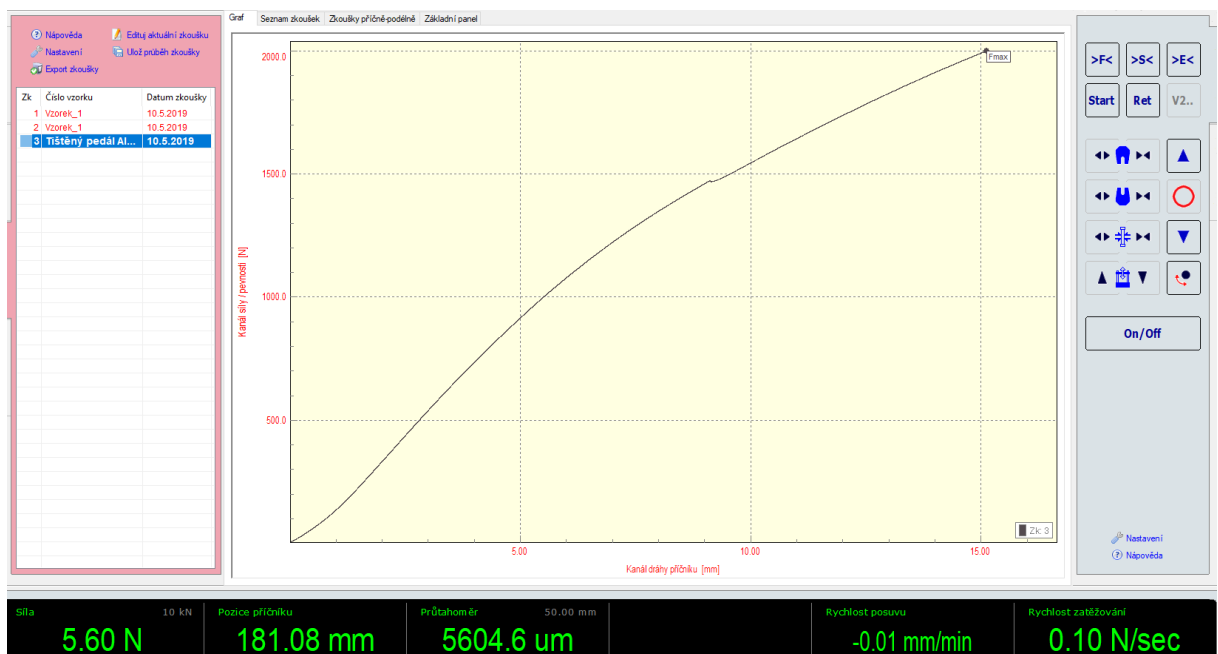


Obrázek 27: Reálné testování pedálu

K zajištění přípravku bylo použito dvou šroubů M12, které měly zajistit pouze stabilní polohu celé sestavy na daném místě. K zatěžování pedálu maximální silou bylo docíleno speciální tlačnou hlavicí, která je součástí vybavení trhačického stroje. Celý proces zatěžování měl lineární podobu a v momentě maximálního zatížení došlo k ustálení síly přibližně po dobu jedné minuty, aby se zjistilo, nedojde-li k nečekanému prasknutí pedálu.

5.6.1. Vyhodnocení zkoušky

Celý průběh zkoušky byl zaznamenáván programem LabControl spolupracujícím přímo s trhačickým strojem. Nejprve bylo ručně nastaveno zatížení o velikosti $F_{pr} = 5N$ kvůli nastavení nulové polohy stroje. Dále se nastavily zatěžovací parametry pro průběh testování. Rychlost posuvu zatěžovací hlavy byla nastavena na $v_{ph} = 5 \text{ mm/min}$ a maximální síla kterou má stroj dosáhnout na $F_{max} = 2000 \text{ N}$.



Obrázek 28: Průběh zatěžování pedálu

Jak je patrné z *Obrázku 28* byla celková deformace při maximálním zatížení $F_{max} = 2000 \text{ N}$ větší než 15 mm. Při bližším zkoumání celé sestavy se zjistilo, že deformace neproběhla jen u zkoušeného pedálu, ale i u vytvořeného přípravku (viz. *Obr. 27*). Tato skutečnost se promítla do výsledků zkoušky. Část zkoušky určená zjištění skutečné velikosti deformace brzdového pedálu byla neplatná. I přes tuto skutečnost a chybu v konstrukci přípravku bylo testování prohlášeno za úspěšné, protože na celém těle pedálu nebyly patrné žádné stopy po poškození a testovaný kus se mohl nadále používat.

V *Obrázku 28*, graficky znázorňujícím průběh zkoušky, můžeme vidět nepatrný pokles v grafu, těsně pod hodnotou zatížení rovnající se 1500 N. Tuto skutečnost zapříčinila nečekaná deformace použitých ložisek.

Tabulka 4: Vybrané hodnoty průběhu měření

Řádek	Zatěžující síla [N]	Dráha stroje [mm]	Čas zkoušky [s]	Externí měření [mm]	Deformace tělesa [mm]
2	5,03	0	17,33	0	0
907	96,34	0,75	26,38	-4,40E-05	0,75
1814	231,27	1,51	35,45	-8,80E-05	1,51
2721	387,62	2,27	44,52	8,80E-05	2,27
3628	543,76	3,02	53,59	4,40E-05	3,02
4535	693,21	3,78	62,66	-4,40E-05	3,78
5442	833,12	4,53	71,73	0	4,53
6349	964,76	5,29	80,8	-4,40E-05	5,29
7256	1085,3	6,04	89,87	-4,40E-05	6,04
8163	1194,87	6,8	98,94	0	6,8
9070	1295,17	7,56	108,01	0	7,56
9977	1384,82	8,31	117,08	0	8,31
10884	1467,85	9,07	126,15	4,40E-05	9,07
11791	1526,94	9,82	135,22	-4,40E-05	9,82
12698	1603,35	10,58	144,29	4,40E-05	10,58
13605	1675,79	11,33	153,36	0	11,33
14512	1746,46	12,09	162,43	0	12,09
15419	1814,38	12,85	171,5	0	12,85
16326	1879,26	13,6	180,57	-0,000132	13,6
17233	1940,83	14,36	189,64	-8,80E-05	14,36
18153	1999,91	15,13	198,84	0	15,13

Program LabControl zaznamenával celý průběh měření do tabulky formátu „.xlsx“ skládající se celkem z 18 153 řádků naměřených hodnot během celého průběhu měření. *Tabulka 4* obsahuje přibližně každý devítistý sedmý řádek pro obecnou představu o celé zkoušce. Řádek č. 2 znázorňuje výše zmíněné předzatížení celé soustavy silou $F_{př} = 5N$. Dráha stroje i deformace tělesa jsou zde nastavena do nulových hodnot. Externí měřidlo, v tomto případě průtahoměr, který je součástí vybavení stroje, sloužící ke kontrolnímu měření, zde nebyl použit kvůli nemožnosti spojení s měřicí soustavou. Čas zkoušky je započítáván od prvního pohybu stroje, tedy od počátku posuvu zatěžovací hlavy do předzatížené polohy. Samotná zkouška pak trvala přibližně tři minuty.



Obrázek 29: Deformace ložisek po zkoušce

Výše zmíněná deformace ložisek byla způsobena několika faktory. Prvním z nich bylo neuvážené použití šroubu na osu otáčení pedálu s nedostatečně dlouhým dříkem. Tvar závitu tedy nejprve poškodil část kluzného pouzdra a jeho neporušená část následně nedokázala unést zvyšující se zatížení. Z toho důvodu se změnil typ použitých kluzných pouzder. Původní plastová kluzná pouzdra od firmy IGUS byla zaměněna za ocelová pouzdra s teflonovým povrchem PCMF 081009.5 E, která jsou od firmy SKF. Dalším faktorem byl samotný použitý šroub nevhodných rozměrů. Byl proto nahrazen lícovaným šroubem o rozměrech vyhovujících rozměrů pro tento účel. [15]

6. Pedál 2019/2020

Pedál pro tuto sezónu měl základy převážně v datech z předchozího roku, kde se ověřila použitelnost vybraného materiálu v tomto prostředí. Díky dostatečným finančním prostředkům se i v tomto případě bude pedál vyrábět stejnou nekonvenční metodou jako předchozí model.

6.1. Způsob výroby a zvolený materiál

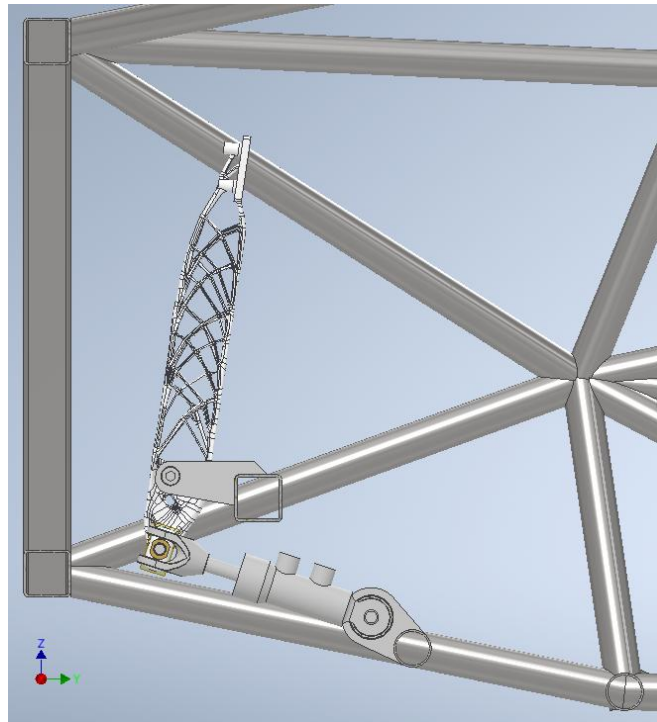
Jak již bylo výše zmíněno, tak se na základě nasbíraných poznatků zvolil stejný způsob výroby jako v předchozím roce, a to 3D tisk z kovových prášků. K této výrobě posloužila stejná tiskárna dostupná ve školních laboratořích SLM280HL.

Taktéž se nám pro tento typ výroby osvědčila hliníková slitina AlSi10Mg. Slitina titanu dostupná pro tuto výrobu ve škole má sice lepší materiálové vlastnosti, avšak porovnáním cenové relace obou materiálů není zlepšení ve vlastnostech dostatečně velké, aby mělo smysl tuto slitinu použít. Vlastnosti použitého materiálu jsou popsány v *Tabulce 3*.

6.2. Uspořádání pedálové soustavy

Hlavní části uchycení jednotlivých komponentů pedálové soustavy zůstaly principiálně stejné. Tak jako v předchozím roce je i zde rozdělovač brzdného tlaku uchycen přímo na rámu a samotný pedál je k rámu upevněn pomocí dvou jednoduchých ocelových výpalků. Podstatnou změnou je upravená poloha brzdových válců vůči samotnému pedálu.

Tato změna je způsobena odlišnou konstrukcí spodní části rámu v místech, kde je uchycena pedálová soustava. Nově navržený design rámu byl zhotoven na základě výsledků simulací týkajících se aerodynamického proudění vzduchu okolo celé formule. Takto vyvýšená přední část umožňuje zvětšit mezeru mezi předním křídlem a samotnou kapotáží formule. Zlepší se tak proudění vzduchu pod formulí, čímž se zvětší velikost vytvářeného přítlaku a závodní vůz má lepší ovladatelnost (viz. *Obr. 30*)



Obrázek 30: Uspořádání pedálové soustavy v novém rámu

Jak je patrné z Obrázku 30 brzdové válce v nezátížené podobě již s pedálem nesvírají ideální úhel 90° . Pokud je pedál nastaven v základní poloze, svírá s osou „Z“ úhel $8,5^\circ$. S novou polohou držáku rozdělovače brzdného tlaku je minimální úhel mezi pedálem a válci roven $\alpha_{min} = 13^\circ$. Měřením na předchozím modelu formule se pomocí setinových spárových měrek určila pracovní dráha jednotlivých pístků ve třmenech $s_p = 0,285 \text{ mm}$. Použité třmeny na přední nápravě od firmy Brembo, s označením X206101, mají čtyři pístky s jednotným průměrem $d_p = 24 \text{ mm}$ [17].

$$V_p = \frac{\pi * d_p^2}{4} * s_p \quad (6)$$

$$V_p = \frac{\pi * 24^2}{4} * 0,285$$

$$V_p = 128,93 \text{ mm}^3$$

Vypočtený objem V_p je objem kapaliny potřebné k vytlačení jednoho pístku ve třmenu. Protože jsou na přední nápravě použity dva třmeny a oba dva mají čtyři pístky, musí se tento objem vynásobit $n_p = 8$. Tím se dostane celkový potřebný objem vytlačované brzdové kapaliny pro přední nápravu [17].

$$V_{pc} = V_p * n_p \quad (7)$$

$$V_{pc} = 128,93 * 8$$

$$V_{pc} = 1031,44 \text{ mm}^3$$

Zadní náprava používá, dle pravidel, oddělený okruh se svým vlastním brzdovým válcem. Jelikož jsou zde použity třmeny taktéž od firmy Brembo, s označením X206001, které mají každý pouze dva pístky, předpokládám, že objem vytlačené kapaliny v tomto případě bude menší a tudíž i potřebné stlačení brzdového válce pro tento okruh bude menší než pro okruh přední. Proto počítám s dráhou stlačení předního brzdového válce. Pro výpočet této dráhy je dále potřeba znát průměr pístku v použitých válcích. V předním válci s označením P/N X97.54.11, je jeho velikost rovna $d_{pv} = 15 \text{ mm}$. Za ideálního stavu je celkový potřebný objem pro přední nápravu V_{pc} roven vytlačovanému objemu brzdovým válcem V_{pv} [17, 18].

$$V_{pc} = V_{pv} = \frac{\pi * d_{pv}^2}{4} * s_{pv} \quad (8)$$

$$s_{pv} = \frac{4 * V_{pv}}{\pi * d_{pv}^2}$$

$$s_{pv} = \frac{4 * 1031,44}{\pi * 15^2}$$

$$s_{pv} = 5,84 \text{ mm}$$

Typ pedálu z předchozího roku vyhovoval svými základními rozměry, které hlavně určují poměr přepákování, a proto bylo rozhodnuto tyto vzdálenosti neměnit, ale zachovat je i pro tento model. S danou základní geometrií pedálu a zjištěným chodem pístku v předním válci bylo možno zjistit maximální úhel mezi pedálem a válci při plném brzdění $\alpha_{max} = 22,3^\circ$. Osička brzdných válců na pedálu se při brzdění pohybuje po kružnici, ovšem na tak malé dráze, že vznikající změnu úhlu vzájemného natočení můžu pro zjednodušení považovat za lineární. Při uvažování lineárního zatěžování tak vzniká teoretický průběh brzdné síly působící na válce.

Tabulka 5: Teoretický průběh brzdné síly

	Poměr přepákování	[-]	5,31	Brzdná síla [N]	Rozdíl [N]
	Zatěžující síla [N]	Reakční síla v pedálu [N]	úhel sklonu [°]		
1	200	1062	13,1	1034,4	27,6
2	400	2124	14	2061,0	63,0
3	600	3186	15	3077,5	108,5
4	800	4248	16	4083,6	164,4
5	1000	5310	17	5078,2	231,8
6	1200	6372	18	6060,4	311,6
7	1400	7434	19	7029,4	404,6
8	1600	8496	20	7984,1	511,9
9	1800	9558	21	8923,8	634,2
10	2000	10620	22,3	9826,5	793,5

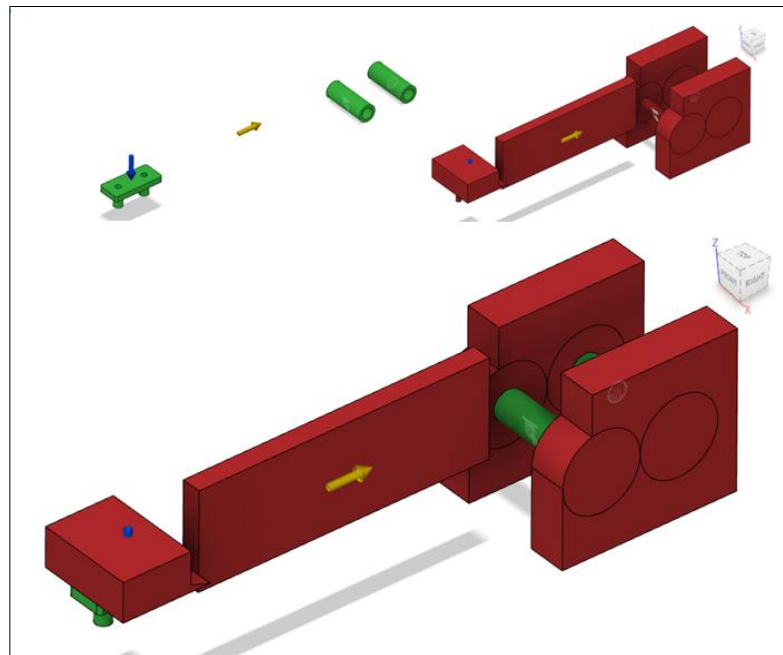
6.3. Tvar pedálu

Jak již bylo výše zmíněno, základní rozměry pedálu zůstaly stejné jako v předchozím roce. Stejně tomu tak je i u upevňovacích válečků ve spodní části pedálu. Nepotřebný objem materiálu, v upevňovací desce pro nášlap, byl z větší části odebrán. Tak vznikla základní okrajová podmínka pro nadcházející simulace.

Veškeré simulace navržených verzí proběhly v programu Fusion 360, který je dostupný ve studentské verzi. Začátkem roku 2020 se pro studenty zpřístupnila část programu umožňující vytvářet generativní design, což také ovlivnilo výsledný tvar pedálu. [16]

6.3.1. První verze

Tato verze pedálu byla primárně určena jako testování nově dostupného generativního designu. Na vyzkoušení všech jeho dostupných možností a co všechno tento program dokáže. Před samotnou generací je zapotřebí stanovit okrajové podmínky, kterými se bude program řídit. V tomto případě jich je více druhů než v simulacích předchozího pedálu. Zelené okrajové podmínky představují části pedálu, které jsou dané a mají polohu v základních rozměrech pedálu. Na tyto části jsou následně umístěny vazby a zatížení. Červené okrajové podmínky mají za úkol vytvářet zóny, kam program při tvorbě pedálu nesmí zasáhnout. Ve spodní části se jedná především o montážní prostor na stranách pedálu, ale také o vnitřní průmět upevňovacích válečků. Horní červená zóna má zajišťovat zachování děr pro závity a rovnou dosedací plochu pro nášlap. Jako poslední je zóna uprostřed těla pedálu. Ta určuje výsledný tvar s dvojitou strukturou (viz. Obr. 31).



Obrázek 31: Okrajové podmínky pro simulaci testovací verze s detaily samostatných částí

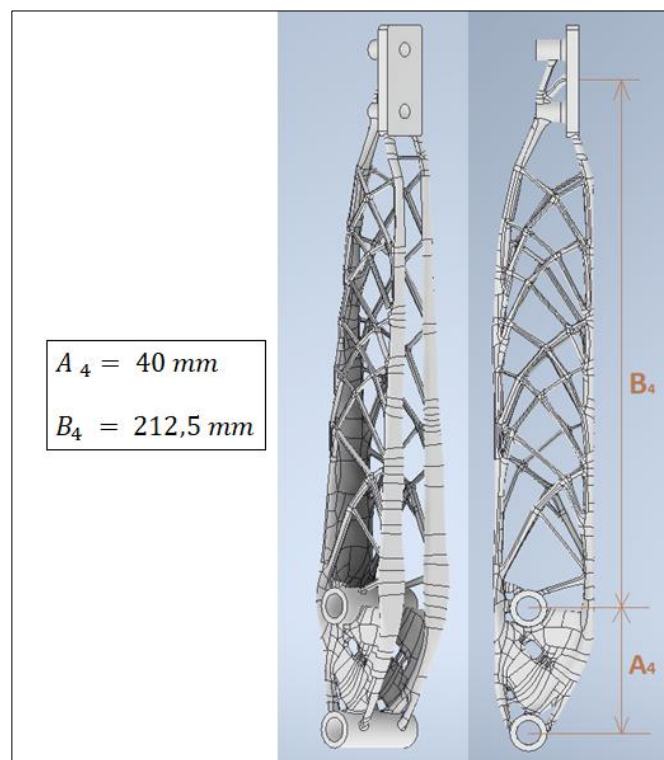
Jak je patrné z obrázku 31, není zde zadán žádný základní polotovár. To dává programu velké tvůrčí možnosti, co se týče designu. Dalším určujícím faktorem je způsob výroby. V tomto programu je možné přímo zadat výrobu pomocí 3D tisku a dokonce zde lze zvolit výrobní materiál, ze kterého bude skutečný pedál tištěn. Pokud porovnáme níže uvedené hodnoty s hodnotami z Tabulky 3, které udává výrobce, zjistíme, že jsou téměř totožné.

Tabulka 6: Materiálové vlastnosti AlSi10Mg v programu Fusion 360

Material	
Density	2.67E-06 kg / mm ³
Young's Modulus	71 GPa
Poisson's Ratio	0.33
Yield Strength	240 MPa
Ultimate Tensile Strength	460 MPa
Thermal Conductivity	0.165 W / (mm K)
Thermal Expansion Coefficient	2.1E-05 / K
Specific Heat	880 J / (kg K)

Done

Po zadání konečného způsobu výroby se musí ještě určit maximální dovolená deformace modelu. Ta byla snížena z předchozích 5 mm na 3 mm. Minimální dovolená bezpečnost zůstala i nadále stejná a to $k_{min} = 1$.

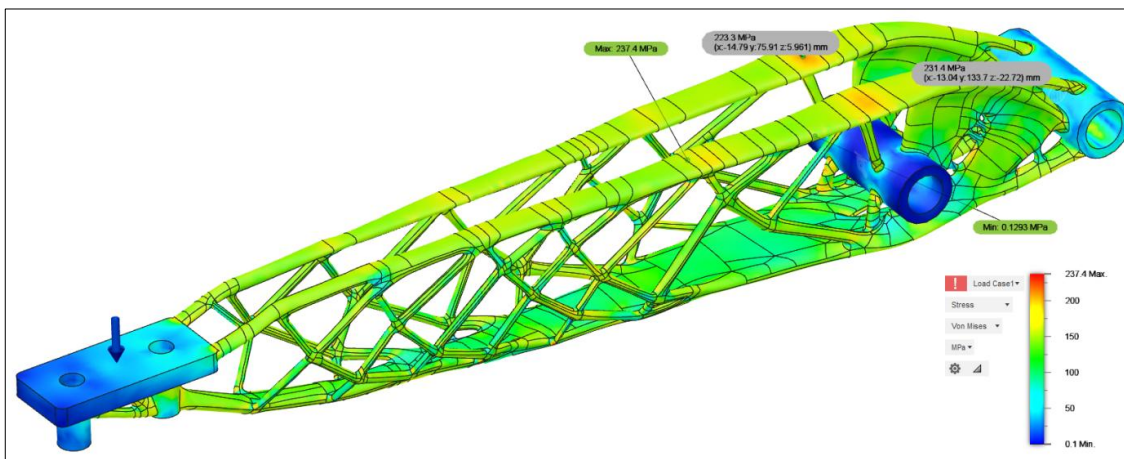


Obrázek 32: První verze pedálu pomocí generativního designu

Výsledný vygenerovaný model této verze pedálu vážil necelých 120 g, což je téměř poloviční hmotnost oproti pedálu z předchozího roku. Tato hmotnost je primárně způsobena charakteristickou strukturou celého modelu. Podíl na odlehčení má také již zmiňovaná úprava upevňovací desky pro nášlap.

6.3.2. Simulace první verze

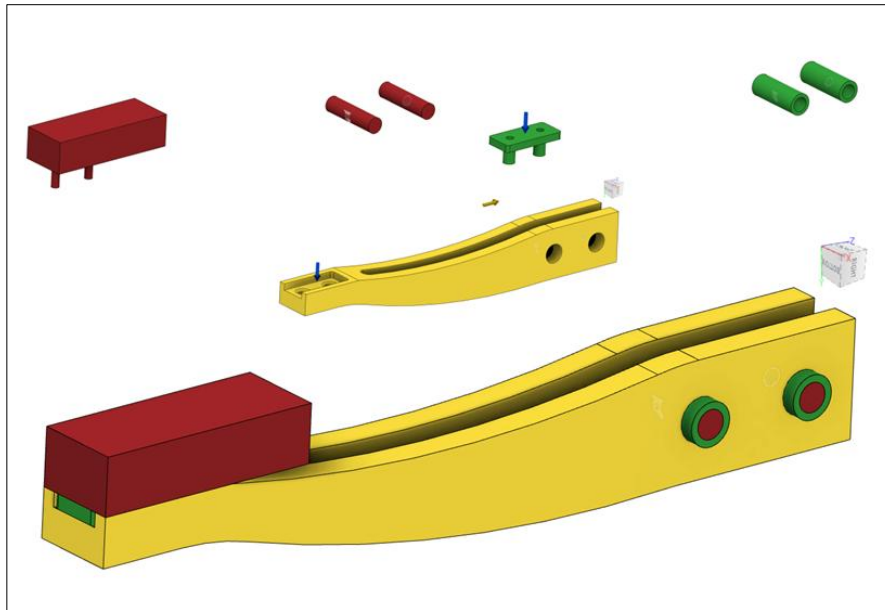
Pro ověření pevnosti a stanovené tuhosti generování proběhla následně simulace. Okrajové podmínky zatížení a uchycení byly nastaveny stejně jako při tvorbě pedálu. Po úpravách několika zaoblení a tloušťek struktury na modelu je výsledné rozložení napětí v celém pedálu rovnoměrně rozprostřeno, tedy až na části zadané ještě před samotnou generací jako třeba dosedací plocha pro nášlap. I zde je napětí v pedálu „von Mises stress“ neboli redukované napětí podle teorie HMH a dosahuje nejvyšší hodnoty 237,4 MPa. Bezpečnost tohoto modelu neklesla pod minimální hodnotu $k_{min} = 1$. Jedinou nesplněnou podmínkou se tedy stala deformace, která zde dosáhla hodnoty 3,57 mm.



Obrázek 33: Napětí v testovací verzi pedálu

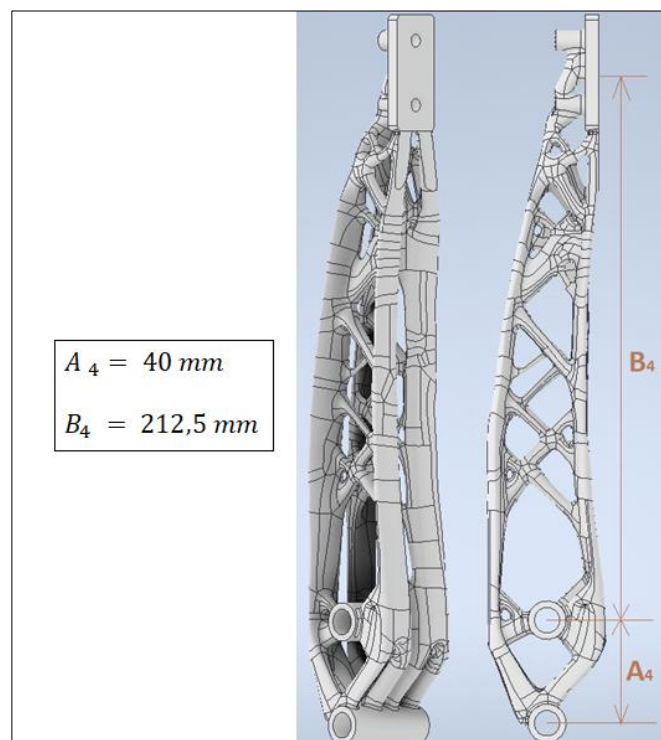
6.3.3. Druhá verze

Hlavním rozdílem mezi oběma verzemi je, že tato má již zadaný počáteční polotovár. Ten částečně vychází z tvaru testovacího modelu. Zelené zóny v tomto případě zůstaly nezměněny, jakož i způsob zatížení a zavazbení pedálu. Červené, jinak také zakázané zóny, jsou změněny. Jelikož tato generace má zadaný polotovár, není nutností program omezovat v montážním prostoru ve spodní části. Co však i nadále zůstalo omezeno, jsou otvory pro upevnění a pro závity v nášlapné desce. Zadaný polotovár se v tomto programu označuje žlutou barvou. Jeho tvar nesmí nijak kolidovat s ostatními zónami. Proto jeho tvar v určitých místech přímo kopíruje tvar zelených zón, které jsou hlavními částmi pedálu.



Obrázek 34: Okrajové podmínky pro simulaci druhé verze s detaily samostatných částí

Po konzultaci ohledně výrobního procesu se upravily i okrajové podmínky určující způsob výroby. Byla zadána minimální tloušťka modelu na 3 mm, protože u testovací verze byla tato hodnota nastavena na hodnotu 1 mm. To způsobovalo velice tenkou strukturu výsledného modelu, která bohužel nešla vyrobít daným způsobem. Maximální možná deformace zůstala na zmenšené hodnotě 3 mm a minimální bezpečnost taktéž zůstala stejná $k_{min} = 1$.

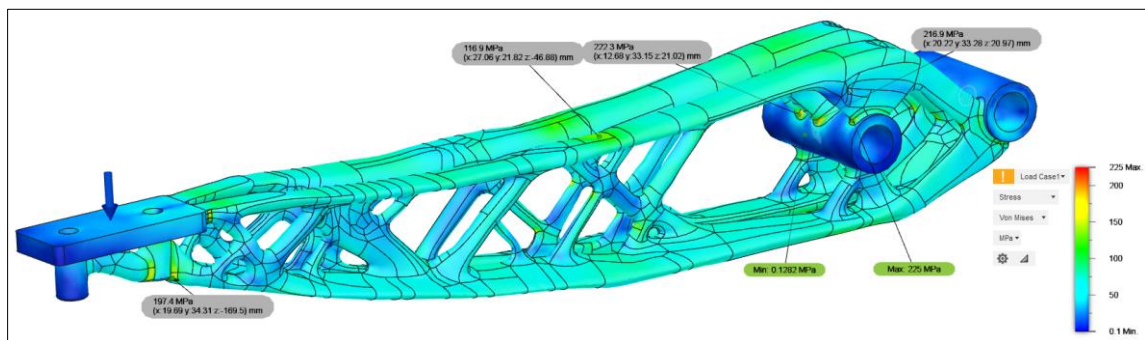


Obrázek 35: Druhá verze pedálu pomocí generativního designu

Vygenerovaný model s novými okrajovými podmínkami má hmotnost necelých 212 g. Je to tedy podobná hmotnost jako má pedál z předchozího roku. Pokud by hlavním cílem byla co nejmenší hmotnost, musel by se upravit počáteční polotovár, protože je zadána minimální výrobní tloušťka. Ovšem v tomto případě je stanovena maximální možná deformace a při dodržení této podmínky má pedál o něco vyšší hmotnost.

6.3.4. Simulace druhé verze

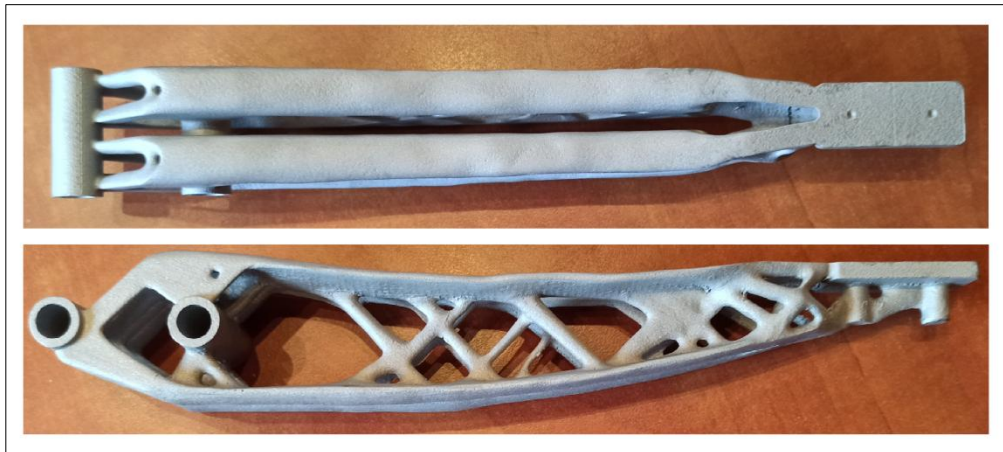
Následně po generaci nového designu proběhlo simulování nového modelu pro ověření pevnosti a stanovené tuhosti. Okrajové podmínky zatížení a uchycení byly nastaveny stejně jako při tvorbě pedálu. Jako v předchozím případě, i zde je napětí v celém modelu pedálu rovnoměrně rozloženo a nejvyšší hodnoty „von Mises stress“ jsou pouze v několika rádiusech. Ty však, z geometrického hlediska modelu, nelze více zvětšit, a proto zde bude o něco větší napětí. Minimální dosažená bezpečnost neklesla pod minimální hodnotu $k_{min} = 1$ a maximální deformace má hodnotu 2,14 mm, což splňuje zadanou podmínku.



Obrázek 36: Napětí v druhé verzi pedálu

6.4. Dokončovací práce

I tento výrobek byl po dokončení tisku vložen do pece, kde se zahřál na předem stanovenou teplotu pro zlepšení homogenity materiálu. Při tomto druhu výroby je podpurná stavba tvořena stejným druhem materiálu jaký má samotný výrobek. To mělo opět za následek nedokonalé oddělení vzniklé podpurné struktury a části, které zůstaly na vzniklém produktu, musely být mechanicky odstraněny. Nejprve větší části ruční bruskou s brusným kotoučkem, následně menší části a ostré hrany pomocí jehlových pilníků a pískování. Níže uvedené obrázky zobrazují hotový polotovár pedálu po očištění všech nepotřebných částí a jeho povrch je nyní hladký.

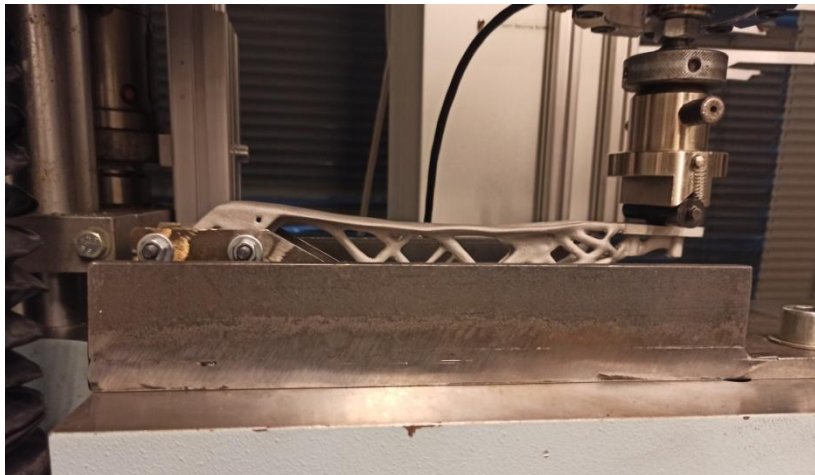


Obrázek 37: Brzdový pedál po dokončení tisku

Stejně jako v předchozím roce se části, kde mají být otvory, vyrobily v plném stavu (viz. Obr 37) aby nedošlo k deformaci materiálu v těchto místech. Na výše uvedeném obrázku jsou některé z těchto otvorů již obrobena do finální podoby. Nejprve se v horní části, pomocí stojanové vrtačky, vyvrtaly dvě díry o průměru $d_{z4} = 5 \text{ mm}$, ve kterých byly následně vytvořeny ručním závitníkem závity M6 pro uchycení nášlapu. Otvory pro umístění kluzných pouzder a osičky od brzdových válců musí být přesné a s patřičnou tolerancí. Toho bylo docíleno pomocí tříosé frézky dostupné ve školních dílnách. Jako první se vyvrtaly dvě díry o průměru $D_{o4} = 9,25 \text{ mm}$. Následným vyhrubováním a vystružováním se docílilo požadované tolerance pro kluzná pouzdra, kterou udává jejich výrobce. Konkrétně se jedná o toleranci H7. Pro osičku brzdových válců byla zvolena tolerance s malým přesahem P6. [13, 14]

6.5. Testování skutečné součásti

Po dokončení čištění a obrobení vytištěného dílu následovalo ověření výsledků reálnou simulací. Ta proběhla na stejném stroji jako u předchozího modelu, tedy na trhačce značky Tira Test 2300 (viz Obrázek 25). Přípravek použitý na testování byl vyztužen dvěma ocelovými pásy z ocele ČSN 11 373 o tloušťce $t_{pc} = 10 \text{ mm}$ přivařenými na horní plochu základové desky. Část přípravku sloužící k testování pedálu z roku 2017/2018 byla odstraněna a celá spodní plocha základové desky byla obrobena z důvodu odstranění nerovností. Na zkoušku byla použita kluzná ocelová pouzdra s teflonovým povrchem PCMF 081009.5 E, která jsou od firmy SKF. V těchto pouzdrech byly vsazeny lícované šrouby s přesným dříčkem a potřebnou vzdáleností, aby nedošlo k deformaci ložisek jako při minulé zkoušce.

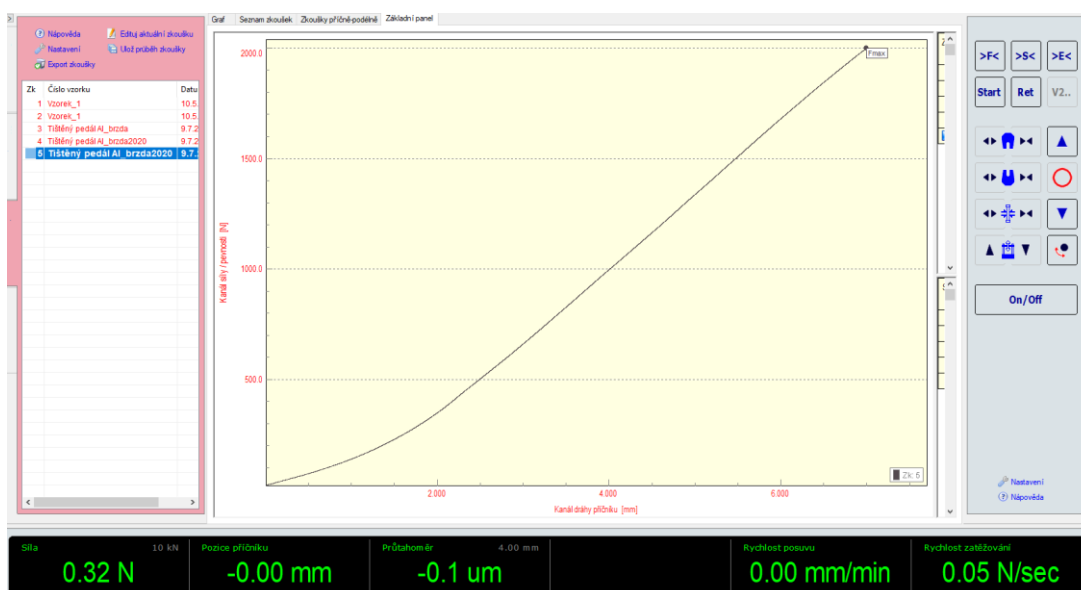


Obrázek 38: Reálné testování pedálu

K zajištění přípravku bylo použito čtyř šroubů M12, které měly zajistit stabilní polohu celé sestavy na daném místě. K zatěžování pedálu maximální silou bylo docíleno speciální tlačnou hlavici, která je součástí vybavení trhačního stroje. Celý proces zatěžování měl lineární podobu a v momentě maximálního zatížení došlo k ustálení síly přibližně po dobu jedné minuty, aby se zjistilo, nedojde-li k nečekanému prasknutí pedálu.

6.5.1. Vyhodnocení zkoušky

Celý průběh zkoušky byl zaznamenáván programem LabControl spolupracujícím přímo s trhačím strojem. Zatížení pro nastavení nulové polohy stroje bylo v tomto případě nastaveno na $F_{př2} = 20N$. Dále se nastavily zatěžovací parametry pro průběh testování. Rychlost posuvu zatěžovací hlavy byla nastavena na $v_{ph} = 5 \text{ mm/min}$ a maximální síla kterou má stroj dosáhnout na $F_{max} = 2000 \text{ N}$.



Obrázek 39: Průběh zatěžování pedálu

Tímto měřením bylo ověřeno, že navržený pedál vydrží maximální zadané zatížení bez trvalých deformací. Díky tomu se může zkušební model použít v reálném provozu. Pro zjišťování reálné deformace pedálu by se musela zjistit tuhost používaného přípravku. Dále pak, aby se výsledky obou verzí, tedy jak té v počítači, tak i té reálné, co nejvíce shodovaly, bylo by zapotřebí nejprve vyrobit normalizovaná tělíska pro trhací zkoušku, která by prošla stejným výrobním procesem jako následně vyráběný pedál. Otestovat tyto zkušební vzorky a z naměřených dat následně upravit data v programu pro generaci a simulování pedálu. S těmito daty navrhnout, vyrobit a nechat otestovat pedál, jehož vlastnosti by byly založeny na reálných testech. Tento postup zjišťování reálných vlastností materiálu se bohužel z finančních důvodů nemohl uskutečnit. V tomto případě bylo hlavním cílem zjistit, zdali testovaný pedál vydrží maximální zadané zatížení bez jakýchkoliv trvalých deformací.

Tabulka 7: Vybrané hodnoty průběhu měření




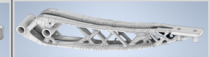
Řádek	Zatěžující síla [N]	Dráha stroje [mm]	Čas zkoušky [s]	Externí měření [mm]	Deformace tělesa [mm]
2	20,38	0,00	40,59	0,00	0,00
420	57,51	0,35	44,77	0,00	0,35
840	98,23	0,70	48,97	0,00	0,70
1260	147,66	1,05	53,17	0,00	1,05
1680	209,50	1,40	57,37	0,00	1,40
2100	284,70	1,75	61,57	0,00	1,75
2520	378,27	2,10	65,77	0,00	2,10
2940	487,68	2,45	69,97	0,00	2,45
3360	596,48	2,80	74,17	0,00	2,80
3780	710,69	3,15	78,37	0,00	3,15
4200	828,09	3,50	82,57	0,00	3,50
4620	947,16	3,85	86,77	0,00	3,85
5040	1064,01	4,20	90,97	0,00	4,20
5460	1181,86	4,55	95,17	0,00	4,55
5880	1302,91	4,90	99,37	0,00	4,90
6300	1422,86	5,25	103,57	0,00	5,25
6720	1543,79	5,60	107,77	0,00	5,60
7140	1663,85	5,95	111,97	0,00	5,95
7560	1780,21	6,30	116,17	0,00	6,30
7980	1892,98	6,65	120,37	0,00	6,65
8397	1999,85	7,00	124,54	0,00	7,00

Program LabControl zaznamenával celý průběh měření do tabulky formátu „.xlsx“ skládající se celkem z 8 397 řádků naměřených hodnot během celého průběhu měření. Tabulka 7 obsahuje přibližně každý čtyřtý dvacátý řádek pro obecnou představu o celé zkoušce. Řádek č. 2 znázorňuje zadané předzatížení celé soustavy silou $F_{př2} = 20N$ a zároveň počátek celého měření. Dráha stroje i deformace tělesa jsou zde nastaveny do nulových hodnot. Externí měřidlo není při této zkoušce zapojeno. Čas zkoušky je započítáván od prvního pohybu stroje, tedy od počátku posuvu zatěžovací hlavy do předzatížené polohy. Samotná zkouška pak trvala minutu a půl. Rozdíl v počtu řádků i v čase mezi jednotlivými měřeními je způsoben rozdílnou tuhostí použitých sestav při samotných měřeních.

7. Celkové zhodnocení průběhu vývoje

Jednou z hlavních podmínek, které určovaly průběh vývoje brzdového pedálu, je cena. V Tabulce 8 můžeme vidět její nárůst v průběhu let, který byl omezený dostupnými finančními prostředky v jednotlivých stádiích vývoje. Cena uvedená za první pedál je celková cena za zakoupenou pedálovou soustavu, protože samotný pedál nelze koupit. Jinak by tato cena byla samozřejmě nižší. V ceně za druhý pedál je započítávána pouze částka vypočtená za práci stroje, jelikož materiál na polotovár byl dodán formou sponzorského daru. U zbylých dvou cen hraje významnou roli velikost podpůrné stavby, která je dána úhlem, pod kterým se jednotlivé pedály tiskly. Takže i když je objem posledního modelu menší než ten předchozí, je celková cena větší z důvodu většího objemu podpůrné stavby, což dokazuje i celková stavební výška.

Tabulka 8: Porovnání jednotlivých verzí pedálu v průběhu vývoje

Model pedálu		2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
	<i>Jednotky</i> <i>Obrázek</i>				
Materiál	[-]	Uhlíková ocel	EN AW-7075 T6	AlSi10Mg	AlSi10Mg
Hmotnost	[g]	506,00	253,00	233,00	212,00
Maximální napětí	[MPa]	-	283,10	153,10	225,00
Posunutí	[mm]	-	3,40	4,21	2,14
Bezpečnost	[-]	-	0,97	1,56	1,10
Přepákování	[-]	5,09	5,18	5,31	5,31
Brzdná síla	[N]	10 200,00	10 360,00	10 620,00	9 826,50
Objem dílu	[mm ³]	60 922,30	93 668,50	106 135,00	96 189,00
Objem podpor	[mm ³]	-	-	32 296,00	55 105,00
Stavební výška	[mm]	-	-	98,50	138,00
Čas výroby	[h]	-	4,00	16,50	22,50
Cena výroby 1ks (bed DPH)	[Kč]	4 972,00	4 500,00	28 627,00	36 464,00

Hmotnost je jednou z hlavních zjišťovaných veličin a její velikost závisela na několika faktorech. Prvním a nejvíce ovlivňujícím byl použitý materiál pro výrobu jednotlivých pedálů. Druhým faktorem byla základní geometrie, která se v průběhu vývoje měnila tak, aby byly splněny veškeré požadavky pro co nejlepší funkčnost daných pedálů. V neposlední řadě to bylo samotné rozložení použitého materiálu, které zase bylo ovlivněno dostupnou výrobní technologií. Všechny tyto faktory měly nezanedbatelný vliv na celkovou cenu.

S měnící se základní geometrií souvisí také velikost poměru přepákování a výsledná brzdná síla. Ta se v průběhu vývoje měnila v závislosti právě na poměru přepákování. V prvních třech případech je reakce od brzdových válců rovnoběžná se zatěžující silou díky zanedbatelnému chodu pedálu a faktu, že pedál a válce svírají mezi sebou pravý úhel. Díky tomuto zjednodušení je její výpočet snadný. V posledním případě však úhel mezi pedálem a válci není roven 90 ° kvůli změnám v rámu formule a tento fakt přímo ovlivňuje velikost brzdné síly. Ta je ve výsledku menší než u předchozího modelu i při stejném poměru přepákování.

8. Závěr

V práci byl popsán výběr a návrh brzdových pedálů v průběhu několika po sobě navazujících let pro studentskou formuli vyvíjenou na Technické Univerzitě v Liberci. Prvotní výběr pedálu se odvíjel nejen od základního průzkumu uvedeného v úvodu této práce, ale i od zadaných pravidel, kterými se výroba celé studentské formule řídí. Dále také záleželo na dostupných finančních zdrojích. Pedál, vybraný podle těchto kritérií, byl následně zkoumán a zjištěné informace, týkající se například základní geometrie či hmotnosti, měly zásadní vliv na pokračování celého vývoje.

Následovala tvorba modelu druhého pedálu, jehož design se odvíjel od dříve zjištěných informací, ale současně závisel na způsobu, jakým se bude vyrábět. Zde bylo použito i procesu eloxování, což je povrchová úprava pro zlepšení provozních vlastností materiálové slitiny výrobku. I v tomto případě se zaznamenávaly veškeré potřebné informace, které by mohly být užitečné pro další pokračování vývoje.

Dalším stupněm vývoje byl model pedálu vytvořený pomocí topologické optimalizace, což zlepšilo celkovou využitelnost použitého materiálu. Mírně změněna byla základní geometrie pedálu v důsledku zjištěných informací z předešlého modelu. Novinkou byl také, zde použitý, nekonvenční způsob výroby pomocí 3D tisku. V tomto případě proběhlo i reálné testování vyrobeného dílu pro ověření zadaných parametrů jakým je například maximální zatěžující síla $F_{max} = 2000\text{ N}$, při které nesmí být pedál trvale poškozen.

Poslední částí vývoje je tvorba modelu brzdového pedálu pomocí generativního designu v programu Fusion 360. Základní geometrie, která vyhovovala již u předcházejícího modelu, zde byla zachována a primárně se řešilo splnění požadavků pro zvýšení celkové tuhosti brzdového pedálu. Také zde po vytištění následovalo testování hotového výrobku, zdali vydrží zadané zatížení.

Vyvíjený pedál nebylo možno otestovat v provozu z důvodu nedokončení stavby formule před odevzdáním této práce.

Pokud by výroba nejen brzdového pedálu, ale i dalších dílů, měla i nadále pokračovat nekonvenční metodou jako v případě posledních dvou modelů pedálu, bylo by vhodné uskutečnit testování používaného materiálu, jak je popsáno na *Straně 51*. Takto zjištěné reálné vlastnosti by dopomohly k zpřesnění výsledků počítačových simulací již při samotném vývoji daných součástí. Díky tomu by bylo možno dále snížit hmotnost budoucí verze.

Seznam příloh

- Příloha 1 Výkres: BRZDOVY_PEDAL_MARKETA
- Příloha 2 Výkres: BRZDOVY_PEDAL_ANICKA
- Příloha 3 Výkres: BRZDOVY_PEDAL_2020
- Příloha 4 Výkres: SCHEMA_ZASTAVBOVEHO_PROSTORU

Seznam obrázků

Obrázek 1: Brzdový pedál automobilu staršího data výroby s popisky	13
Obrázek 2: Brzdový pedál soudobého vozidla s popisky	14
Obrázek 3: Brzdový pedál vozidla vyšší třídy s popisky	15
Obrázek 4: Brzdový pedál užitkového vozu s popisky	16
Obrázek 5: Zúčastněné týmy na závodech FS Czech 2018 [4].....	17
Obrázek 6: Hierarchie týmu.....	18
Obrázek 7: Postup výběru pedálové soustavy.....	20
Obrázek 8: Pedálová soustava OBP.....	21
Obrázek 9: Model původního pedálu	22
Obrázek 10: Uspořádání pedálové soustavy	25
Obrázek 11: Ergonomický přípravek.....	25
Obrázek 12: První návrh pedálu	26
Obrázek 13: Vygenerovaná síť a okrajové podmínky	27
Obrázek 14: Napětí v pedálu.....	27
Obrázek 15: Druhý návrh pedálu.....	28
Obrázek 16: Vygenerovaná síť a okrajové podmínky druhého návrhu.....	29
Obrázek 17: Napětí v druhé verzi pedálu.....	29
Obrázek 18: Součásti v přípravku před eloxováním [7].....	30
Obrázek 19: Poškození brzdového pedálu.....	31
Obrázek 20: Tiskárna SML 280 na kovové prášky [12].....	32
Obrázek 22: Návrh pedálu topologickou optimalizací.....	34
Obrázek 21: Uspořádání nové pedálové soustavy	34
Obrázek 23: Detailní zobrazení výsledného napětí v pedálu	36
Obrázek 24: Brzdový pedál po dokončení tisku.....	37
Obrázek 25: Trhačka Tira Test 2300.....	37
Obrázek 26: Model navrženého přípravku	38
Obrázek 27: Reálné testování pedálu.....	38
Obrázek 28: Průběh zatěžování pedálu.....	39
Obrázek 29: Deformace ložisek po zkoušce	40
Obrázek 30: Uspořádání pedálové soustavy v novém rámu	42
Obrázek 31: Okrajové podmínky pro simulaci testovací verze s detaily samostatných částí	44
Obrázek 32: První verze pedálu pomocí generativního designu.....	45
Obrázek 33: Napětí v testovací verzi pedálu.....	46
Obrázek 34: Okrajové podmínky pro simulaci druhé verze s detaily samostatných částí.....	47
Obrázek 35: Druhá verze pedálu pomocí generativního designu	47
Obrázek 36: Napětí v druhé verzi pedálu.....	48
Obrázek 37: Brzdový pedál po dokončení tisku.....	49
Obrázek 38: Reálné testování pedálu.....	50
Obrázek 39: Průběh zatěžování pedálu.....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti EN AW-7075 T6 [6].....	24
Tabulka 2: Porovnání výsledků obou verzí pedálu	30
Tabulka 3: Materiálové vlastnosti AlSi10Mg [11].....	33
Tabulka 4: Vybrané hodnoty průběhu měření.....	40
Tabulka 5: Teoretický průběh brzdné síly.....	43
Tabulka 6: Materiálové vlastnosti AlSi10Mg v programu Fusion 360	45
Tabulka 7: Vybrané hodnoty průběhu měření.....	51
Tabulka 8: Porovnání jednotlivých verzí pedálu v průběhu vývoje.....	52

Použité informační zdroje

- [1] FS TUL Racing. *FS TUL Racing: Úvodní informace* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.fstulracing.cz>
- [2] *Formula Student Germany*: [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>
- [3] *Formula SAE: History of Formula SAE* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [4] *Formula Student Rules 2020: FSG Rules 2020* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- [5] *OBP Motorsport: Online Catalogue* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.obpltd.com/>
- [6] *Alunet: Technical Data Sheet* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-7075>
- [7] *Bomex: Technical information* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.bomex.cz/technologie/eloxovani>
- [8] *FS Czech: Formula Student Czech Republic* [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.fsczech.cz/>
- [9] *F1 News: Brake by wire system* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/technika/47973-symonds-o-systemu-brake-by-wire-jak-funguje-a-jak-ovlivnuje-cit-pilotu-video>
- [10] *Hobbyrobot: Doporučené předvrtání otvorů pro závity* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.hobbyrobot.cz/wp-content/uploads/Doporu%C4%8Den%C3%A9-p%C5%99edvrt%C3%A1n%C3%AD-otvor%C5%AF-pro-z%C3%A1vity.pdf>
- [11] *SLM Solutions: 3D Metals* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/200EN180924-02-POWDER_WEB.pdf
- [12] *Boris Kolář K&K: SLM 280 HL* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://www.kolarkk.cz/index.php/slm/51-slm-zarizeni/163-slm-280-hl>

- [13] *Lin-Tech: Katalog ložisek* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://lin-tech.hennlich.cz/vsechny-produkty.html?gclid=CjwKCAjwiLD4BRAiEiwAg5NBFuMcksYEJtAtvAGlsVcZCKhaAEA8gnm vbkUTS21Pd BeeWWumk8xyQRoCoTgQAvD BwE>
- [14] J. Řasa, J. Švercl. *Strojnické tabulky pro školu a praxi 1. a 2. díl*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6 a ISBN 978-80-86960-20-3
- [15] *SKF: Katalog ložisek* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group>
- [16] *Autodesk* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/education/home>
- [17] *Brembo: Katalog brzdových třmenů* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.mqmoto.it/wp-content/uploads/2015/05/Catalogo-Brembo-Racing.pdf>
- [18] *Brembo: Katalog brzdových válců* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: [https://www.brembo.com/en/Varie/2015-16%20BREMBO%20RACING%20CATALOGUE%20\(595\).pdf](https://www.brembo.com/en/Varie/2015-16%20BREMBO%20RACING%20CATALOGUE%20(595).pdf)
- [19] PEŠÍK, L.: *Části strojů. 1. díl*. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4.
- [20] PEŠÍK, L.: *Části strojů 2. díl*. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-939-2.
- [21] VLK, F.: *Karoserie motorových vozidel*. Nakladatelství a vydavatelství Vlk, Brno, 2000