ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Vítězslav Malínský

Návrh a optimalizace stavitelné hlavy řízení motocyklu

Bakalářská práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Vítězslav Malínský

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Návrh a optimalizace stavitelné hlavy řízení motocyklu**

Název tématu (anglicky): Design and optimization of adjustable motorcycle steering head

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- V obecné části pojednejte o problematice principu a konstrukci rámu motocyklu se zaměřením na způsob řízení motocyklu. Proveďte rešerši užívaných konstrukcí včetně použitých materiálů.
- Navrhněte a popište princip stavitelné hlavy řízení motocyklu. Vytvořte objemový CAD model a následně i CAE model pro optimalizaci celé sestavy. Numerický model doplňte o okrajové podmínky odpovídající předepsanému certifikačnímu testu soutěže MotoStudent a podrobte numerické analýze.
- Na základě výsledků procesu optimalizace vytvořte tvarově a funkčně optimalizovaný CAD model hlavy řízení motocyklu a ten podrobte strukturální analýze s okrajovými podmínkami odpovídající předepsanému certifiakčnímu testu soutěže MotoStudent.
- Získané výsledky z numerické analýzy vyhodnoťte, diskutujte, případně proveďte zpětnou optimalizaci, přepočet a znovu vyhodnocení na problematických místech konstrukce.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: FOALE, Tony. Motorcycle handling and chassis design: the art and the science. 1st. Tony Foale, 2002.

VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. 1. vyd. Brno: Vlk, 2004. ISBN 9788023916010;8023916017.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Přemysl Toman**

Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **26. června 2019**

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**

a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní

L. S.

.....

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků

vz.

.....

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

.....

Vítězslav Malínský
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 26. června 2019

Poděkování

Je mou příjemnou povinností na úvod poděkovat panu Ing. Janu Vyčichlovi, Ph.D. za velice obětavé vedení bakalářské práce a nespočet rad, které mi během naší spolupráce poskytl.

Dále bych rád poděkoval všem členům týmu CTU Lions, od kterých jsem měl možnost načerpat nespočet zkušeností, jak při návrhu elektrického prototypu, tak při práci v týmu nebo komunikaci s lidmi.

Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům Ivetě a Vítězslavovi Malínským, přítelkyni Justýně Jiráskové a celé rodině za podporu během doby studia.

Čestné prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 10. srpna 2020 …….

Vítězslav Malínský

Abstrakt

Bakalářské práce se zabývá návrhem, optimalizací o ověřením stavitelné hlavy řízení. V první části práce je popsáno řízení motocyklu a jsou uvedeny typy motocyklových rámů podle konstrukce a užitého materiálu. Cílem práce je vytvořit funkční 3D model stavitelné hlavy řízení podle výsledků topologické optimalizace. V závěru práce je tento model ověřen pomocí metody konečných prvků.

Klíčová slova

CTU Lions, Motostudent, stavitelná hlava řízení, topologická optimalizace, 3D model, numerická analýza.

Abstract

The bachelor thesis is focused on designing, optimizing and validating adjustable steering head of a motorcycle. In the first part of the thesis the steering of the motorcycle is described and motorcycle frames are divided according to the type of the construction and used materials. The purpose of this thesis is to create a functional 3D model of the adjustable steering head of a motorcycle according to the results from the topology optimization. In the end of the thesis the model is validated by using finite element method.

Key words

CTU Lions, Motostudent, adjustable steering head, topology optimization, 3D model, numerical analysis

Obsah

1 Úvod 6
2 Tým CTU Lions v soutěži Motostudent 7
2.1 Tým CTU Lions 7
2.2 Soutěž Motostudent 7
3 Motocyklové rámy 9
3.1 Rozdělení motocyklových rámů 9
3.1.1 Samonosná nástavba 10
3.1.2 Trubkové rámy 10
3.1.3 Lité rámy 12
3.1.4 Lisované rámy 12
3.1.5 Smíšené rámy 13
3.2 Materiály motocyklových rámů 13
3.2.1 Ocel 13
3.2.2 Slitiny hliníku 14
3.2.3 Titan 14
3.2.4 Kompozitní materiály 14
4 Řízení motocyklu 15
4.1 Geometrické charakteristiky řízení 15
4.1.1 Úhel sklonu přední vidlice a úhel řízení 15
4.1.2 Závlek 16
5 Princip fungování stavitelné hlavy řízení 17
5.1 Uložení řízení v krku rámu 18
6 Topologická optimalizace 19
6.1 Tvorba modelu a materiál 20
6.2 Vazby 21
6.3 Diskretizace modelu 22
6.4 Okrajové podmínky 23
6.5 Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného objemu 24
6.5.1 Totální Deformace 24
6.5.2 Ekvivalentní napětí 25
6.5.3 Kontakty 25
6.6 Parametry topologické optimalizace a výsledný objem 26

7 Model stavitelné hlavy řízení 28
8 Numerická analýza stavitelné hlavy řízení 30
8.1 Materiál 30
8.2 Vazby 31
8.3 Diskretizace modelu 32
8.4 Okrajové podmínky 33
8.5 Průběh simulace 34
8.6 Vyhodnocení tranzientní analýzy 35
8.6.1 Totální deformace 35
8.6.2 Kontakty 36
8.6.3 Ekvivalentní napětí 36
8.6.4 Plastická deformace 38
8.7 Shrnutí výsledků 40
9 Závěr 41
Literatura 42
Seznam obrázků 44
Seznam tabulek 45
Seznam příloh 45

1 Úvod

V současné době moderních technologií, které se nevyhnuly ani světu motorsportu, jsou výkonnostní rozdíly mezi jednotlivými týmy minimální. To, že je lídr některé ze závodních sérií o několik vteřin na kolo rychlejší než tým ze spodních pater, je dávnou minulostí. Dnes se bavíme o rozdílech v rámci desetin, setin, ba i tisícin sekundy.

Aby jednotlivé týmy zůstaly konkurenceschopnými i nadále, musejí přicházet se stále novými inovacemi. Proto se zaměřují na každý, byť sebemenší, detail, jelikož každé kilo navíc může v celkovém součtu znamenat právě tu jednu desetinu sekundy, která je rozdílem mezi úspěchem a neúspěchem. Tato filozofie je každodenním chlebem konstruktérů závodních vozidel.

Jedním z možných přístupů, který se uplatňuje nejen na poli motorsportu, ale i v jiných průmyslových odvětvích, se zabývá tato bakalářská práce. Tímto přístupem je topologická optimalizace, což je iterační algoritmus, který dokáže zredukovat přebytečnou hmotu dané součásti za pouze minimální změny její celkové pevnosti.

Úvod práce se zaměří na typy motocyklových rámů podle druhu konstrukce či technologie výroby, se kterými se můžeme v praxi setkat. V rámci této kapitoly budou popsány i základní materiály, které se k výrobě rámu používají, a uvedeny jejich hlavní výhody a nevýhody. Současně s motocyklovými rámy bude prostudováno i řízení motocyklu.

Poté bude pomocí již zmíněného algoritmu topologické optimalizace vypočten vhodný tvar konstrukce stavitelné hlavy řízení. Na základě tohoto výpočtu se vyhotoví funkční 3D model stavitelné hlavy řízení.

Před začátkem výroby je nutné model stavitelné hlavy řízení nejprve otestovat. Za tímto účelem bude provedena numerická analýza, která odpovídá jednomu z testů, kterému se musí podrobit každý motocykl přihlášený do soutěže

2 Tým CTU Lions v soutěži Motostudent

Bakalářská práce byla vypracována v rámci fakultního projektu Bezpečný motocykl na Ústavu dopravních prostředků. Na základě tohoto projektu studenti pod dohledem tutorů navrhují a následně konstruují závodní motocykl pro mezinárodní soutěž Motostudent (viz podkapitola 2.2).

2.1 Tým CTU Lions

Projekt vznikl v roce 2015, kdy byl v rámci dvouletého vývojového cyklu postaven závodní motocykl s benzínovým motorem. V celosvětové konkurenci se tým CTU Lions umístil v celkovém žebříčku na šestadvacátém místě ze 47 účastníků. Pro následující dvouleté období (2017-2018) se tým rozrostl natolik, že do soutěže jeho členové přihlásili nejen benzínový motocykl, nýbrž i motocykl na elektrický pohon. Výsledky dopadly znovu pozitivně, kdy se tým se zkušenostmi z minulého cyklu umístil v kategorii Petrol na čtyřiadvacátém místě z 45 přihlášených a v kategorii Electric dokonce na devátém místě ze 27 soutěžních týmů. V současné době studentský tým CTU Lions soutěží v kategorií Electric a v období vzniku této práce vyvíjí druhou evoluci elektrického motocyklu.

Tým se skládá ze studentů vícero fakult ČVUT, od dopravní, přes elektrotechnickou, až po fakultu strojní. Hlavní týmovou motivací je kromě co nejlepšího umístění v závěrečném žebříčku soutěže také zkoušení nových postupů a technologií či zlepšení, popř. realizace nápadů z minulých let.

2.2 Soutěž Motostudent

Jak již bylo zmíněno dříve, Motostudent je mezinárodní univerzitní soutěž, kde mezi sebou měří síly studentské týmy v návrhu a konstrukci závodního motocyklu. Vývoj probíhá ve dvouletém cyklu, který je zakončen závodním víkendem na španělském okruhu Ciudad del Motor de Aragón. Ten mimo jiné hostí i závody nejprestižnější série v oblasti motocyklového motorsportu MotoGP. Pro svůj návrh dostane každý tým balíček komponentů, které musí na svém prototypu použít. Těmito komponenty v kategorii Electric jsou:

- Elektrický motor a příslušenství
- Pneumatiky a ráfky
- Brzdy (přední a zadní třmen, brzdová pumpa)

Ostatní prvky prototypu mohou týmy zakoupit, navrhnout a nechat zhotovit externí firmou, popř. navrhnout a zhotovit svépomocí. Které prvky možné zakoupit není definují pravidla soutěže.

Předmětem hodnocení jednotlivých týmů není pouze výsledek finálního osmikolového závodu, nýbrž i zprávy (Milestones), které ve stanovených termínech týmy odesílají organizátorům soutěže. Obsahem zpráv je kromě postupu návrhu závodního motocyklu i konstrukční řešení, pevnostní simulace, CFD simulace, technologické postupy, zvolené materiály i ekonomické zhodnocení potenciální sériové výroby motocyklu či business plán fiktivní společnosti.

Bodové ohodnocení vývoje	
Akce	**Počet bodů**
A. Vývojový concept	50
B. Konstrukční řešení prototypu	75
C. Test prototypu	75
D. Inovace	100
E. Business plán	100

Tabulka 1: Bodové ohodnocení zpráv

Další bodové ohodnocení probíhá až při finálovém závodním víkendu. Každý prototyp musí splnit požadavky dané organizátorem, a to konkrétně zátěžový test, test brzd a vizuální kontrolu. Po absolvování této kontroly dostává motocykl do rukou profesionální jezdec, který ověří chování motocyklu za jízdy – brždění z různých počátečních rychlostí a průjezd obloukem. Pokud prototyp i zde vyhoví, je připuštěn k bodovaným disciplínám. Těmi jsou např. brždění z dané počáteční rychlosti do zastavení, jízda mezi kužely či zrychlení z nuly na určitou rychlost.

Poslední body se týmům rozdělí po vyvrcholení celého závodního víkendu, potažmo i celého dvouletého cyklu, a to za první místo na startovním roštu v kvalifikaci, nejrychlejší kolo v závodě a za celkové umístění v závodě.

Bodové ohodnocení závěrečného závodního víkendu		
Event	**Test**	**Počet bodů**
Kolo 1 a 2	Test brzd	60
	Gymkhana	100
	Accelerace	60
Volný trénink 1	Maximální rychlost	30
Volný trénink 2	Konzistence času na kolo	30
Kvalifikace	Pole Position	40
Závod	Nejrychlejší kolo	30
	Celkové umístění	150

Tabulka 2: Bodové ohodnocení závěrečného závodní víkendu

3 Motocyklové rámy

Rám je jednou z nejdůležitějších částí motocyklu, jejímž hlavním úkolem je spojení jednotlivých komponentů, a to např. spojení motoru, sedla nebo podvozku v jeden kompaktní celek. Správně zvolená konstrukce má zajistit dostatečnou ovladatelnost motocyklu, která s sebou přináší vyšší jízdní komfort uživatele a zvyšuje bezpečnost jízdy jako takové.

Rám musí být dostatečně pevný, aby mohl přenášet zatížení vyvolaná charakterem jízdy bez nežádoucích deformací a zároveň dostatečně lehký, což se projevuje zlepšením jízdních vlastností. Tyto vlastnosti zásadně ovlivňuje konstrukce rámu, použitý materiál a jeho průřez. [5]

3.1 Rozdělení motocyklových rámů

Narozdíl od automobilového průmyslu, kde rámovou konstrukci karoserie zcela nahradila karoserie samonosná, je trend ve světe motocyklů zcela opačný. Nosný rám je základní prvek téměř všech typů motocyklů. Krom toho, že motocyklu dává tvar také nese motor, drží hlavu řízení a v zadní části přidržuje vidlici zadního kola.

Výjimku tvoří skútry, u nichž je samonosná nástavba vcelku běžná, nicméně se nejedná o jediný možný typ konstrukce karoserie.

3.1.1 Samonosná nástavba

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, samonosná nástavba je doménou především skútrů. Je to dáno tím, že je využíváme při cestách na krátké vzdálenosti, nejčastěji ve meště, a proto na ně klademe mírně odlišné požadavky než na klasické motocykly. Těmito požadavky je myšleno:

- Snadné nastupování bez nutnosti přehození nohy přes zadní kolo
- Ochrana nohou proti blátu a dešti
- Uložení menších příručních zavazadel.

Nástavba je vytvořena svařením větších částí v jeden kompaktní celek, který může být ještě vyztužen jednoduchou, či zdvojenou trubkou mezi kritickými místy – krkem řízení a uchycením zadního výkyvného ramene.

Jednotlivé části nástavby jsou obvykle vylisovány z duralového plechu, popř. některé konkrétní dílce tvoří plastické hmoty, jako je například laminát. V přední části je konstrukce obvykle ještě vyztužena plechovými výlisky v oblasti sloupku řízení a chrání oblast kolen řidiče. Spodní část nahrazuje stupačky a zároveň má stejně jako přední i funkci ochrannou. Vzadu nástavba obvykle supluje blatník, poskytuje úložný prostor, a někdy i zastává funkci nádrže a nosné kostry sedla. [1,2,3]

Za zmínku ještě stojí bezrámová konstrukce některých závodních motocyklů. Zde nosnou funkci namísto rámu plní obvykle palivová nádrž, kostra sedla a motor. Hlavní výhodou tohoto provedení je značná úspora na váze stroje. I přes toto pozitivum se s bezrámovou koncepcí na závodním okruhu příliš často nepotkáme.

Průkopníkem v této oblasti byl novozélandský konstruktér John Britten, který roku 1995 přišel se strojem Briten V1000, který vážil pouhých 138 kg. Ze známějších firem motocyklového průmyslu experimentovala s tímto typem konstrukce firma Ducati pro závody MotoGP, ale setkala s o poznání menším úspěchem. [2, 4]

3.1.2 Trubkové rámy

Trubkový rám je nejstarší typ konstrukce a je odvozeninou rámu jízdního kola. Jeho využití v motocyklovém průmyslu je velmi výhodné, protože je lehký, pevný a při vhodné konstrukci zároveň tuhý. Základním prvkem tohoto typu rámu jsou trubky obvykle kruhového či oválného průřezu.

Trubky mohou být i tenkostěnné, což je sice dražší řešení, nicméně zamezuje vnitřnímu pnutí. U běžných trubek lze tento efekt eliminovat žíháním. Jednotlivé trubky se obvykle spojují svařováním, a to zejména kvůli nízké ceně při použití běžného vybavení.

Nejkritičtějším místem trubkového rámu bývá obvykle jeho spojení s hlavou řízení, kde je nutné se vyvarovat tzv. špičkových napětí, která se objevují v místech, kde přechází silný profil ve slabý. Z tohoto důvodu bývá rám často vyztužen svařením tenkých plochých plechů v místech, kde se trubky rámu spojují s hlavou řízení.

Trubkové rámy můžeme nadále dělit na otevřené a uzavřené, popř. na jednoduché a dvojité. U otevřených rámů chybí část spodního nosníku, namísto nějž je k rámu uchycen motor, který slouží jako nosný prvek. Výhodou je zde úbytek hmotnosti. V případě uzavřených rámu je tomu naopak. Spodní nosník se napojuje na zbytek rámu v oblasti stupaček a motor je na něj zavěšený tzn. netvoří nosný prvek rámu.

Hlavní rozdíl mezi jednoduchými a dvojitými rámy je podle názvu, vcelku očekávaně, v počtu trubek konstrukce. Zatímco u jednoduchých rámů tvoří dolní i horní část jeden nosník, u dvojitých rámů je tento nosník zdvojený, což se projevuje větší tuhostí rámů. Zároveň je ale třeba počítat s navýšením hmotnosti rámu z důvodu většího množství materiálu, s čímž je spojena i vyšší pořizovací cena. [1, 2]

Obr. 1: Trubkový rám Ducati 1098 [6]

3.1.3 Lité rámy

Lité rámy jsou obvykle využívány ve velkovýrobě a to proto, že odlévání je technologicky obtížní proces, ke kterému je třeba drahé vybavení a určitá zkušenost.

Nejčastěji používaným materiálem pro lité rámy bývá hliník, pro nějž je typická nízká hmotnost oproti oceli. Dá se tvrdit, že hliníkový rám je zhruba třikrát lehčí než totožný ocelový. Rámy, které jsou celé odlité, dovolují pouze minimální pružné deformace, což může vést k praskání vlivem jízdních otřesů.

Nevýhodná je i oprava zprohýbaného rámu, který se sice vyrovnat dá, ale kvůli malé elastičnosti vysokopevnostních hliníkových slitin může dojít k popraskání. Z těchto důvodu se jeví jako výhodné vytvořit pouze část rámu jako odlitek a zbytek jako trubkovou konstrukci, která dokáže částečně utlumit otřesy a chvění motoru. [1, 2]

Obr. 2: Litý rám typu deltabox Yamaha TZR 250 [7]

3.1.4 Lisované rámy

Technologie lisování při výrobě rámů se používá v případě, kdy hlavním požadavkem na rám je nízká hmotnost. Z tohoto důvodu se nejčastěji s lisovaným rámem setkáme u lehkých motocyklů a motokol. Nutností je velkosériová výroba, jelikož pouze v tomto případě je levná.

Lisované rámy existuji ve velkém množství provedení. To nejčastější je ve formě dvou navzájem ozrcadlených výlisků spojených příčkou, popř. pomocí svařování. Dále je možno se setkat s vylisovanými nosníky spojené buďto znovu svařováním či nítově. Takovýto rám náramně připomíná rám trubkový. Největší devízou lisovaných rámů je již zmíněná hmotnost ale i pevnost. [1, 2]

3.1.5 Smíšené rámy

Smíšené rámy jsou převážně rámy trubkové konstrukce doplněné o výlisek, či výkovek nějaké podstatné části rámu. Typicky odlitá ze slitin lehkých kovů bývá hlava řízení, spodní přední část rámu s upevněním pro motor. Naopak trubková bývá horní a zadní část rámu. Předností tohoto provedení je fakt, že některá více namáhaná místa nemusí být porušena svary tzn. nedochází zde k hromadění dalšího napětí [1, 2]

3.2 Materiály motocyklových rámů

Volba materiálu má pro motocyklový rám zásadní charakter. Důležitá není pouze pevnost, popřípadě hmotnost zvoleného materiálu, ale také jeho cena a zpracovatelnost. Jinými slovy materiál musí být vhodný jak pro konstrukci, tak i pro výrobu.

3.2.1 Ocel

Konkrétní mechanické vlastnosti oceli závisí na jejím chemickém složení a tepelném zpracování. Obvyklé typy ocelí obsahují do $0{,}2\ \%$ příměsi uhlíku. Zvyšování mechanických vlastností uhlíkem nad tuto procentuální hodnotu je nevhodné, proto se za tímto účelem přidávají další prvky. Těmi nejčastějšími jsou:

- mangan – zvýšení pevnosti a tažnosti
- křemík – zvýšení pevnosti a zlepšení korozních vlastností
- měď – zvýšení pevnosti a zlepšení korozních vlastností
- molybden – zvýšení pevnosti při nízkých teplotách a zlepšení korozních vlastností

Historicky je ocel nejpoužívanějším materiálem při konstrukci motocyklových rámů z mnoha důvodů. Je pevná, snadno zpracovatelná a relativně levná. Typický bývá ocelový trubkový rám. Nejčastějšími typy oceli, které se používají ve velkovýrobě jsou konstrukční oceli (třídy 12 a 14) nebo chrom-molybdenová ocel. [18]

3.2.2 Slitiny hliníku

Postupem času se slitiny hliníku při konstrukci motocyklových rámu objevují čím dál častěji. Čistý hliník je pro použití v konstrukcích příliš měkký. Z toho důvodu bývají jeho mechanické vlastnosti zlepšeny tzv. legováním – přidáním příměsi jiných látek. Těmi jsou nejčastěji měď, hořčík nebo křemík.

Mezi konstruktéry je velice oblíbeným materiálem dural, který je slitinou hliníku a mědi. Tento materiál nabízí až pětinásobnou pevnost v tahu oproti čistému hliníku. Oproti oceli je hlavní nevýhodou hliníku pořizovací cena a složitější svařování, pro které je vhodná pouze určitá skupina slitin. [8, 9]

3.2.3 Titan

Čistě z hlediska mechanických vlastností a hmotnosti se jako nejvýhodnější materiál pro konstrukci motocyklových rámu nabízí titan. Oproti oceli je zhruba o 70 % lehčí při podobné pevnosti. Jeho poměr pevnosti ku hmotnosti ho řadí na špici mezi kovovými materiály.

Nicméně zásadním omezením globálního využití tohoto materiálu je jeho cena a náročnost na zpracování. V minulosti s tímto materiálem experimentovala firma Ducati ve svých závodních speciálech. V současné době se titan nejčastěji používá jako materiál pro motorové ventily. [10]

3.2.4 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály se skládají ze dvou a více vzájemně chemicky rozličných složek neboli fází. Složka tužší a pevnější se nazývá výztuž, kdežto složce spojité a poddajnější říkáme matrice. Různé typy kompozitů se užívají ve stavebnictví, strojírenství a v jiných odvětvích. V případě strojírenství, a tudíž i motocyklových rámů, mají největší význam tzv. mikrokompozitní materiály, u kterých se rozměry příčné výztuže pohybují od 10^0 do 10^2 μm.

Mikrokompozity můžeme dále dělit podle materiálu matrice. Pro konstrukci motocyklových rámů jsou nejvýznamnější uhlíkové kompozity.

Mezi hlavní přednosti uhlíkových kompozitů patří zejména nízká hmotnost oproti konkurenčním materiálům. Porovnáním například s ocelí nabízí vyšší pevnost za nižší hustoty. Kompozity jsou anizotropním materiálem, tudíž mají v různých směrech různé mechanické vlastnosti. Ve směru orientace vláken je pevnost značná. V ostatních směrech klesá, nejkřehčí

je v kolmém směru. Za různých kombinací směrů a průřezů jednotlivých vláken můžeme zkonstruovat velice pevný motocyklový rám.

Mezi nevýhody uhlíkových kompozitů se řadí jejich vysoká cena, složité technologické zpracování a obtížná oprava poškozených dílů. [17]

4 Řízení motocyklu

Řízení je jedna ze základních částí každého motocyklu, potažmo i každého motorového vozidla. V případě jednostopých vozidel se řízení skládá z hlavy řízení, což jsou obvykle dvě těla, která přidržují přední tlumiče, a zároveň jsou spojeny tzv. krkem. Osa krku je zároveň osou řízení. Krk se skládá z čepu řízení, který je obvykle uložen v hlavě řízení přes horní a dolní ložisko. Ta bývají buďto kuličková nebo kuželíková.

Samotné tlumiče jsou spíše systémem odpružení, nicméně změnou některé z jejich geometrických charakteristik např. úhlem, který svírají se svislicí procházející středem předního kola, můžeme ovlivnit chování motocyklu při řízení.

K řízení neodmyslitelně patří také řídítka. Ta bývají obvykle uchycena k přední vidlici, popřípadě k vrchnímu tělu, či sloupku hlavy řízení. Pro různé druhy motocyklů bývají typické různé úhly zahnutí řídítek. U motocyklů typu chopper nebo jiných, kde je pohodlí jezdce na prvním místě, bývají řídítka zahnuta výrazně směrem k podélně rovině motocyklu. U sportovních vozů bývají řídítka spíš rovná, což přináší stabilnější a jistější řízení ze strany jezdce.

4.1 Geometrické charakteristiky řízení

Samotné řízení závisí na několika základních geometrických charakteristikách každého motocyklu. V této podkapitole budou vyjmenovány a popsány ty nejdůležitější.

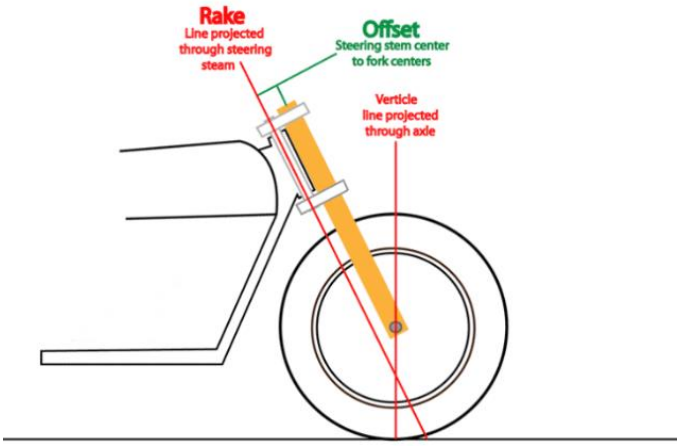
4.1.1 Úhel sklonu přední vidlice a úhel řízení

Úhel sklonu přední vidlice je jedním z parametrů, který ovlivňuje ostatní geometrické parametry jako je např. rozvor kol. Jeho hodnota je dána úhlem, který svírá přední vidlice a

svislice procházející středem předního kola. Obvykle bývá stejný jako úhel řízení, nicméně to není podmínka.

Větší úhel sklonu přední vidlice předsunuje přední kolo více před motocykl, čímž zvětšuje rozvor a přináší stabilnější jízdu, což jezdec ocení zejména při jízdě rovným úsekem. Menší úhel naopak funguje lépe v zatáčkách. Nevýhodou těchto motocyklů je jejich tendence k vlastnímu kmitání přední vidlice. Zde je důležité dbát na vhodné dotažení ložisek hlavy řízení.

Dále je třeba zmínit, že osa přední vidlice je pouze rovnoběžná s osou řízení, nikoliv totožná. Osa řízení bývá odsazená, pro což máme parametr nazvaný offset. [2]

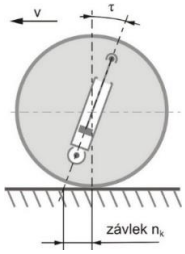


Obr. 3: Osa řízení, svislice kolmá k ose kola a offset [11]

4.1.2 Závlek

Závlek neboli stopa je vzdálenost bodu, který je průsečíkem osy řízení a podložky od bodu kontaktu pneumatiky s podložkou. Větší závlek přináší více stability při jízdě ve vysokých rychlostech, na druhou stranu je třeba na řízení vynaložit větší sílu.

I motocykl s velice malým úhlem řízení je ovladatelným bez větších obtíží, pokud má dostatečný závlek. S tímto jevem se můžeme v každodenním životě setkat u nákupního vozíku. Ten má totiž rejdový čep kolmý k podložce (úhel řízení je roven 0°) a právě kvůli jeho dostatečnému závleku ho kolo následuje a je ovladatelný. Typická hodnota závleku se pohybuje v rozmezí 100-170 mm. [12]

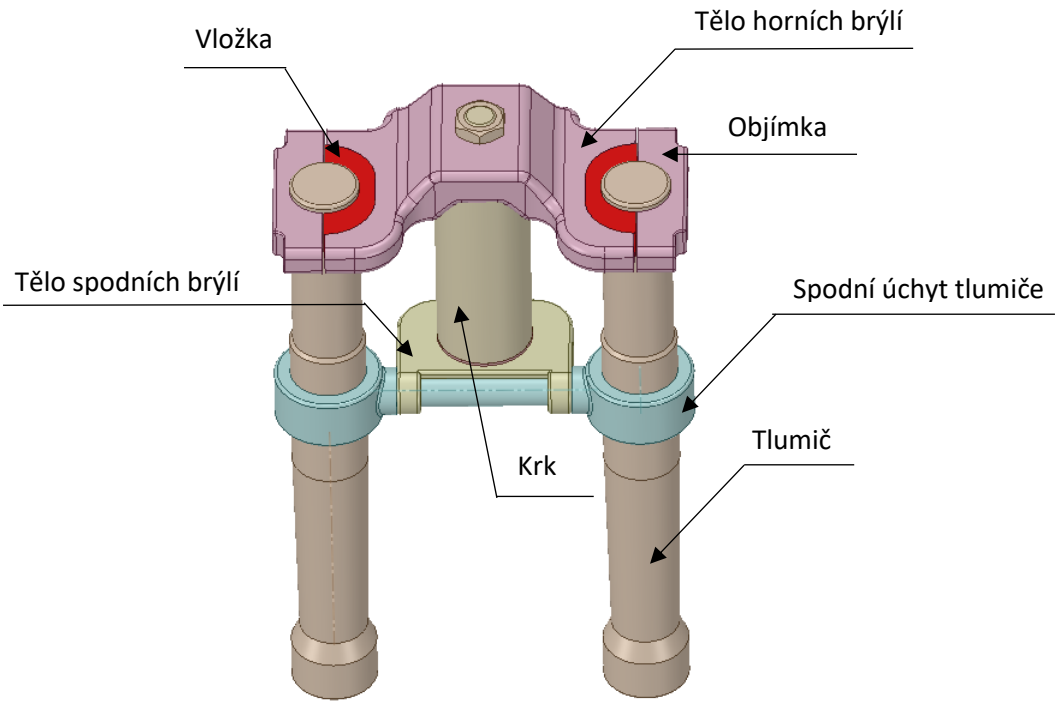


Obr. 4: Schéma závleku předního kola [13]

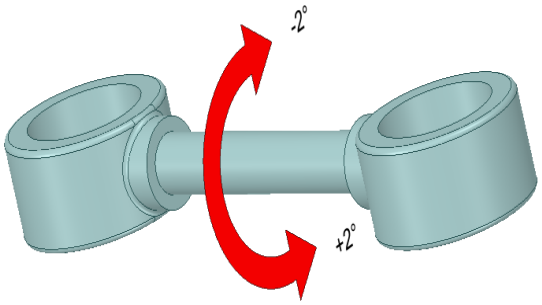
5 Princip fungování stavitelné hlavy řízení

Idea stavitelné hlavy řízení pochází od týmových kolegů Davida Abrahama a Jindřicha Zemana (oba FS ČVUT). Princip fungování spočívá ve změně úhlu, který svírá osa tlumičů se svislicí procházející středem předního kola. Změna úhlu je možná ve i proti směru hodinových ručiček o dva stupně, dohromady je tedy k dispozici pět různých poloh.

Přehled jednotlivých částí, ze kterých se stavitelná hlava řízení skládá je znázorněn níže.

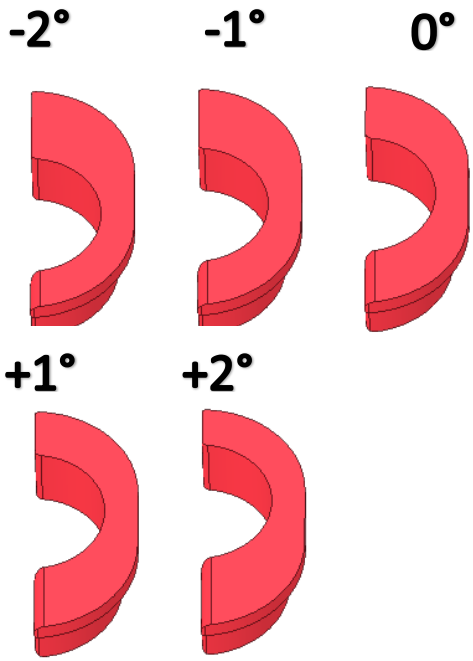


Obr. 5: Části stavitelné hlavy řízení



Obr. 6: Rotace tlumičů v dolní části hlavy řízení

Osa, kolem které dochází k otáčení, je zároveň osa čepu spodního úchytu tlumičů. Ten je pohyblivý vůči spodnímu tělu hlavy řízení a spolu s ním dochází k rotaci tlumičů. Takovýmto způsobem je řešena stavitelná hlava řízení ve své spodní části.



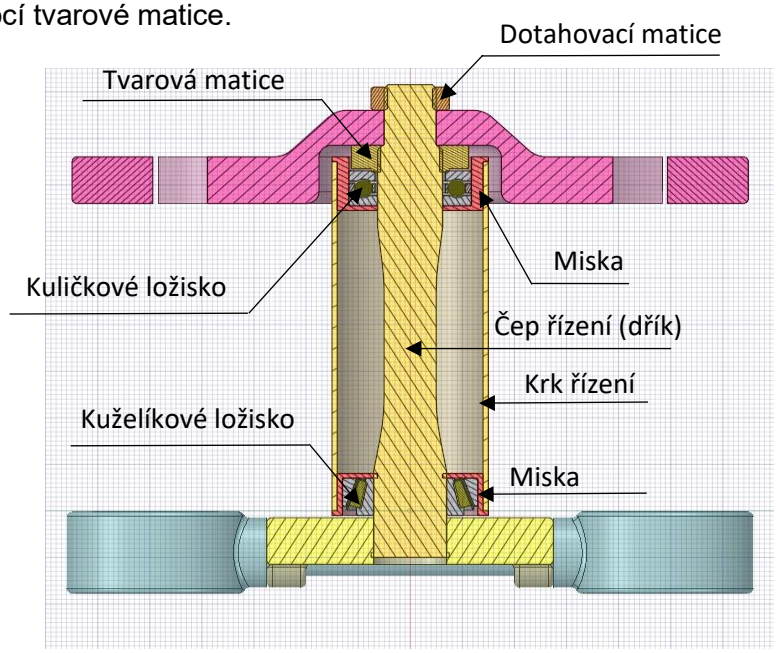
Obr. 7: Jednotlivé vložky

Rotace tlumičů v horní části stavitelné hlavy řízení je řešena pomocí vložek, které jsou umístěny na vnitřní polovině tlumiče, a šroubově dotáhnuty vnější objímkou. Pro každou z poloh tlumičů (celkově 5) je vytvořena unikátní vložka i objímka.

S různým nakloněním přední vidlice dochází ke změně některých se základních geometrických charakteristik motocyklu[1]. To umožňuje jednotlivým jezdcům měnit nastavení podle jejich jezdeckých preferencí.

5.1 Uložení řízení v krku rámu

Uložení řízení v krku rámu znovu pochází od týmového kolegy Davida Abraháma. Uložení je řešeno přes kuželíkové ložisko ve spodní části krku a přes kuličkové ložisko v horní části. Obě ložiska budou nalisována na čep řízení, a poté vložena do misek. Horní kuličkové ložisko je zajištěné pomocí tvarové matice.



Obr. 8: Uložení řízení v krku rámu

[1] Rozvor, závlek, světlá výška

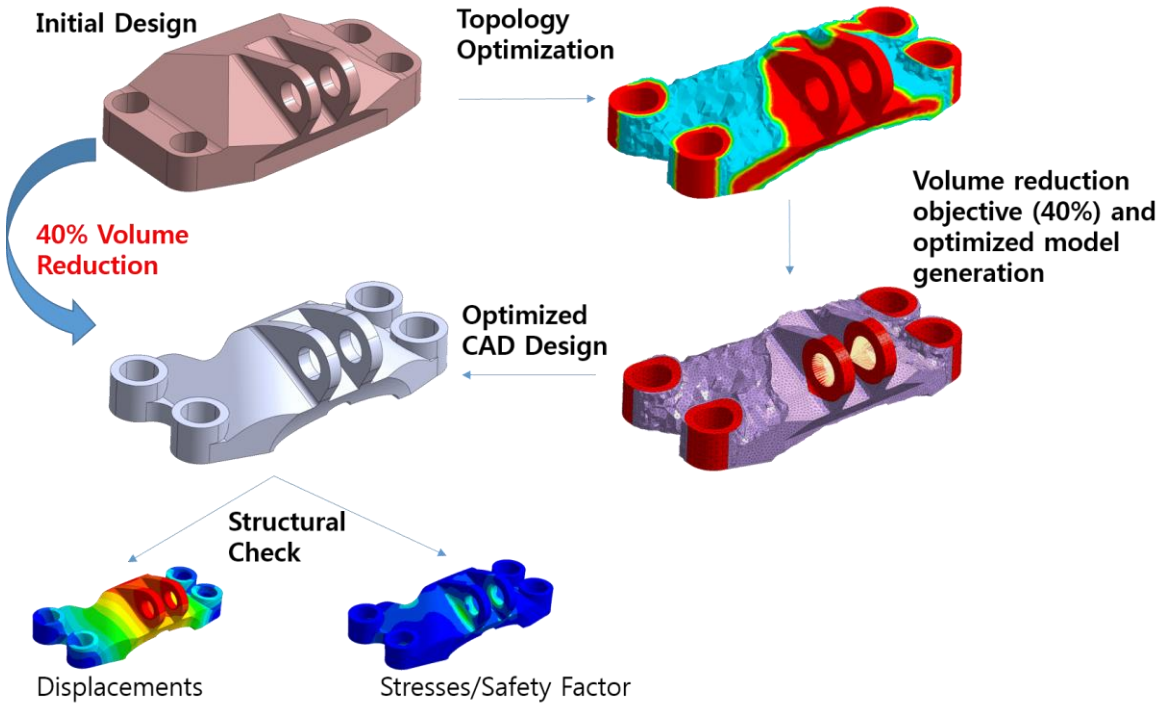
6 Topologická optimalizace

Topologická optimalizace je jednou z matematických metod využívající principu metody konečných prvků (MKP). Hojně se využívá ve strojírenství, automobilovém či leteckém průmyslu a v dalších odvětvích.

Jejím cílem je optimalizace rozložení hmoty zkoumané součásti v předem daném objemu za definových okrajových podmínek, zatížení a výrobních omezení. V jednotlivých iteracích tohoto algoritmu dochází k redukci množství hmoty či její redistribuci, čímž se snižuje zejména hmotnost dané součásti za minimální změny její pevnosti. Výsledkem je genericky vytvořený objem, který může být nadále upravován.

Proces topologické optimalizace se skládá z následujících kroků:

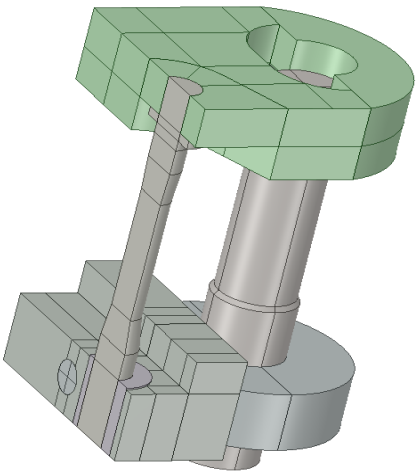
- vytvoření prvotního objemu a provedení strukturální analýzy
- optimalizace původního objemu dle počátečních podmínek
- úprava výsledného objemu
- strukturální analýza upraveného výsledného objemu – verifikace



Obr. 9: Schéma procesu topologické optimalizace [14]

6.1 Tvorba modelu a materiál

Veškerá geometrie v rámci této bakalářské práce byla vytvořena v programu SpaceClaim Direct Modeler. SpaceClaim je neparametrický 3D modelář, který je součástí instalačního balíčku ANSYS R2. Hlavní výhodou oproti konkurenčním modelářům je zejména jeho uživatelská přívětivost, kterou ocení jak začátečníci, tak i zkušení uživatelé.



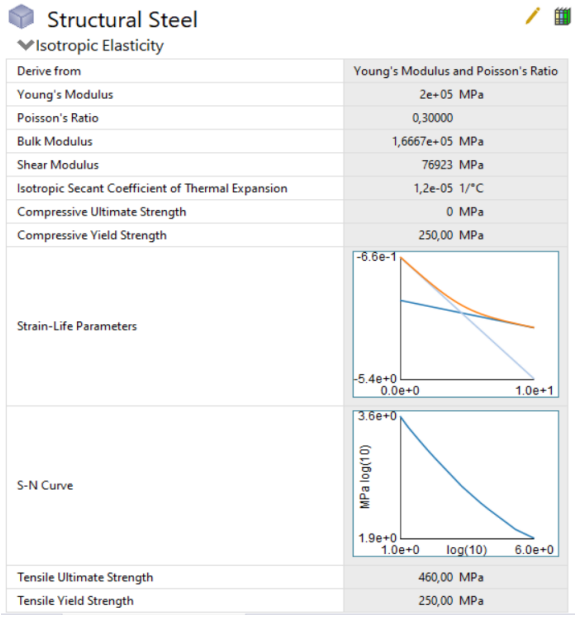
Obr. 10: Původní objem stavitelné hlavy řízení

Nejprve byl vytvořen výchozí objem, který udává vnější hranice optimalizované součásti. Ten obsahuje veškeré části stavitelné hlavy řízení – horní a spodní tělo, vložku, spodní úchyt tlumiče, čep řízení včetně ložisek, a tlumič.

Jelikož je model symetrické podle střední roviny, stačilo vytvořit pouze jeho polovinu.

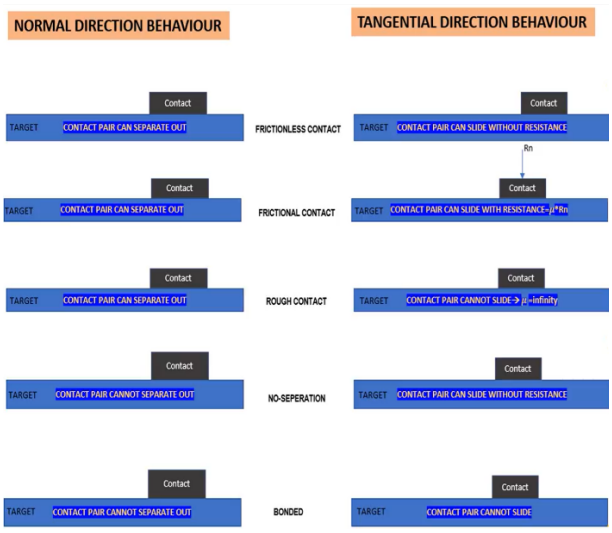
Po nahrání do prostředí řešiče je nutné jednotlivým tělesům přiřadit materiál. V této fázi vývoje nebylo vzhledem k celkovému rozpočtu a možnostech výrobních technologií jasné, jaký materiál bude pro stavitelnou hlavu řízení použit.

Z tohoto důvodu byla pro topologickou optimalizace použita strukturální ocel („*structural steel*" v materiálové knihovně Ansys), která se v tuto chvíli jevila jako nejpravděpodobnější řešení.



Obr. 11: Materiálové vlastnosti strukturální oceli z knihovny Ansys

6.2 Vazby



Obr. 12: Typy kontaktů v řešiči Ansys [19]

Použité kontakty		
Typ kontaktu	**Těleso 1**	**Těleso 2**
Bonded	Vložka	Tlumič
Bonded	Horní tělo hlavy řízení	Tlumič
Bonded	Spodní úchyt tlumiče	Tlumič
Bonded	Vložka	Horní tělo hlavy řízení
Bonded	Čep řízení	Krk řízení
Bonded	Spodní tělo hlavy řízení	Spodní ložisko hlavy řízení
Bonded	Horní ložisko hlavy řízení	Čep řízení
Bonded	Čep řízení	Horní tělo hlavy řízení
Bonded	Čep řízení	Spodní ložisko hlavy řízení
Frictionless	Spodní ložisko hlavy řízení	Krk řízení
Frictionless	Horní ložisko hlavy řízení	Krk řízení
Bonded	Čep spodního úchytu tlumiče	Spodní tělo hlavy řízení
Frictionless	Spodní tělo hlavy řízení	Spodní úchyt tlumiče

Tabulka 3: Použité kontakty

V případech, kdy provádíme simulace sestav tvořených více tělesy, je nutné mezi nimi nadefinovat vazby.

Vazby určují, jak se budou jednotlivá tělesa vůči sobě pohybovat, a zabraňují vzájemné penetraci. Software Ansys nabízí širokou škálu různých typů vazeb – kontakt, kloub, pružinová vazba atp.

V rámci této simulace byly využity vazby typu kontakt. Kontakty se následně dělí do několika podkategorií, z nichž pro potřeby této simulace byly zvoleny následující:

- Bonded („*spojený*“)
- Frictionless („*bez tření*“)

Kontakt typu bonded zamezuje jakémukoliv posunu a oddělení kontaktních ploch nebo hran. Byl využit v místech, kde by principiálně nemělo k vzájemnému pohybu těles docházet.

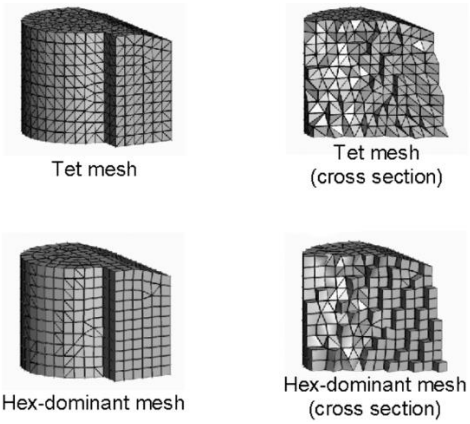
Kontakt typu frictionless naopak umožňuje posun i oddělení kontaktních ploch. Koeficient tření je v tomto případně zanedbán. Tento kontakt byl užit v místech, kde je vzájemný pohyb těles žádoucí viz tabulka 3.

6.3 Diskretizace modelu

Diskretizací modelu se rozumí pokrytí zkoumaného tělesa konečně prvkovou sítí, jinými slovy nahrazení nekonečného objemu modelu konečným počtem elementů. Každý element se skládá z několik tzv. uzlových bodů, u kterých jsou hledány neznámé parametry (např. posuny, ze kterých je dále odvozeno napětí).

Při diskretizace modelu platí, že čím je síť jemnější, tedy čím větší počet elementů použijeme, tím přesnější bude řešení. S počtem elementů však rostou i nároky na výkon počítačového vybavení a tím pádem na celkový čas řešení, který při složitějších úlohách není zanedbatelný. V praxi je tedy nezbytné nalézt vhodný poměr mezi přesností řešení a efektivitou výpočtu.

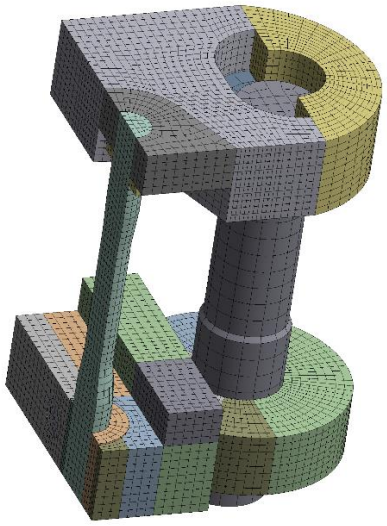
Většina řešičů dovede konečně prvkovou síť vygenerovat automaticky, nicméně takováto síť nemusí být vždy vhodná.



Obr. 13: Porovnání elementů [15]

Automatická síť v řešiči Ansys generuje elementy typu tetrahedron (nepravidelný čtyřstěn). Vzhledem k tomu, že se řešený model skládá povětšinou z přímých, pravoúhlých těles, je žádoucí, aby byl síťován krychlovými či kvádrovitými elementy, které model lépe pokryjí. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda síťování „*hex dominant*“, která standardně používá elementy typu hexahedron.

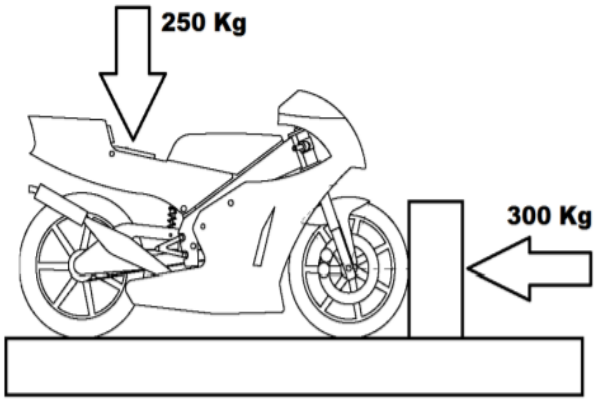
Defaultní rozměr elementů 10 mm byl ponechám pouze na tělesech, které nebyly předmětem optimalizace (vložka, tlumič). Na ostatních tělesech byly voleny rozměry elementu 5 mm. Jedinou výjimku byl krk řízení, který také nebylo cílem optimalizovat, a na který bylo pouze aplikováno zatížení. Zde byl udán rozměr elementu hodnotou 7,5 mm.



Obr. 14: Diskretizovaný model

6.4 Okrajové podmínky

Okrajovými podmínkami rozumíme soubor počátečních parametrů, které známe, a které jsou nezbytné ke správnému provedení výpočtu. V mechanice jsou tímto pojmem nazvány tzv. vazby (vetknutí, podepření atp.) a zatížení. Nevhodné určení počátečních podmínek může mít za následek hrubou chybu ve výsledném řešení, jelikož bychom docházeli k jiným napěťovým stavům a deformacím. V praxi se jedná o nelehký úkol i pro zkušené výpočtáře.



Obr. 15: Silový diagram

Obr. 16: Zkušební lavice [4]

V rámci této úlohy byly okrajové podmínky dány certifikačním testem soutěže Motostudent. Jedná se o jednu z přejímek, které se musí podrobit každý motocykl přihlášený do soutěže.

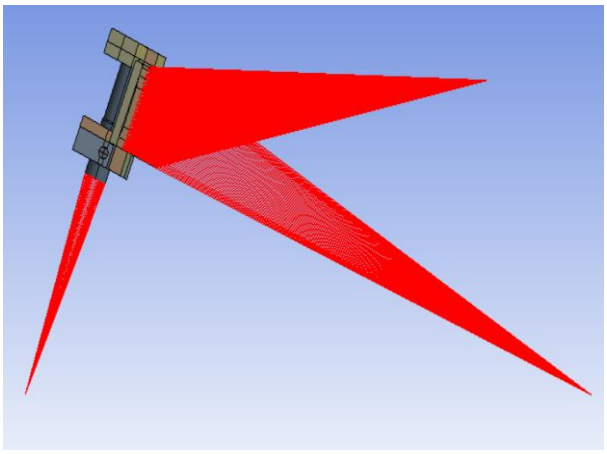
Test se vykonává v závěrečném víkendu na závodním okruhu a spočívá v progresivním zatížení dvojící sil:

- Vertikální v oblasti sedla: 250 kg
- Horizontální v oblasti předního kola: 300 kg

Řešený model byl podepřený dvěma vazbami typu „*remote displacement“,* které umožňují vytvořit podepření ve vzdáleném bodě, který se může vyskytovat mimo geometrii.

První podpora byla definována ve středu předního kola a byla jí dána volná rotace kolem jeho osy.

Druhou podporu nalezneme ve středu zadního kola a je jí povoleno znovu rotace kolem této osy a posun v podélném směru motocyklu.



Obr. 17: Grafické znázornění propojení vzdálených okrajových podmínek se zkoumanou konstrukcí

Zatížení bylo řešeno v podobném duchu jako podepření. Jeho působiště bylo opět v bodě mimo stávající geometrii, k čemuž se používá funkce „*remote force*“. Obě působící síly byly zmenšeny o polovinu, z důvodu využití symetrie modelu, a následně jedenapůlkrát zvětšeny z bezpečnostních důvodů. Výsledné velikosti zatěžujících sil byly následovné:

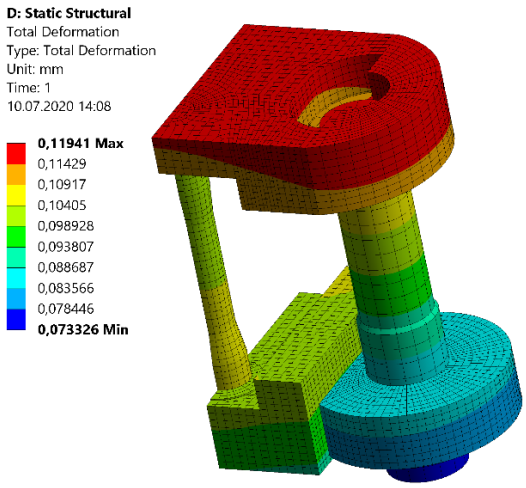
- Vertikální v oblasti sedla: 1875 N
- Horizontální v oblasti zadního kola: 2250 N

6.5 Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného objemu

Jak již bylo zmíněno v popisu topologické optimalizace, před samotným optimalizujícím výpočtem je nutné nejprve provést strukturální analýzu neoptimalizované součásti, se kterou je poté srovnána strukturální analýza na již optimalizovaném modelu.

Základními výstupy z tohoto výpočtu je celková (totální) deformace a rozložení napětí.

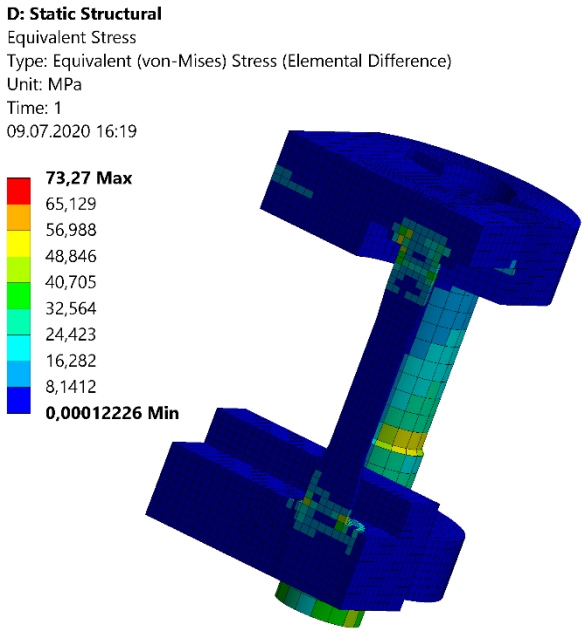
6.5.1 Totální Deformace



Obr. 18: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného modelu – deformace

Maximum deformace se pohybuje okolo hodnoty $0{,}1\ mm$. Spíše než samotné hodnoty je zde důležitý pohyb konstrukce, který by měl odpovídat simulovanému zatížení a dokážeme díky němu odhalit případné chyby ve vazbách mezi jednotlivými částmi konstrukce.

6.5.2 Ekvivalentní napětí

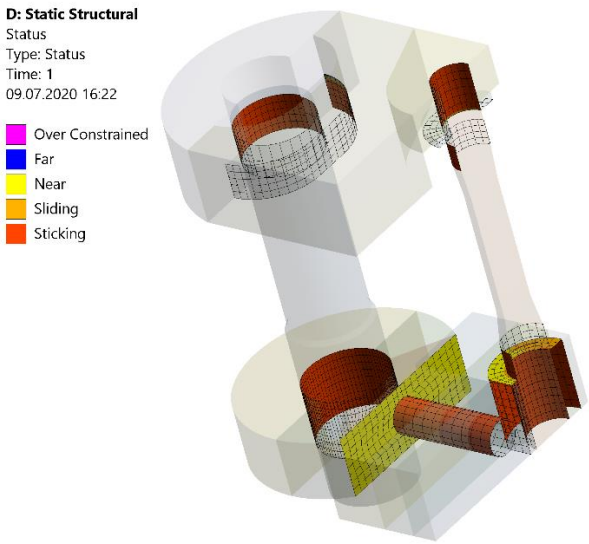


Obr. 19: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného modelu – Von Misesovo napětí

Maximální Von Misesovi napětí se nachází na tlumiči v místě kontaktu mezi ním a jeho spodním úchytem a činí *73, 72 MPa.* Jelikož tlumič není prvkem optimalizace, není pro nás tento jev důležitý.

Vyšší koncentraci napětí nalezneme na čepu řízení v místech, kde je přes ložiska upevněn v horním a spodním těle hlavy řízení, a na čepu spodního úchytu tlumiče, což indikuje potenciální kritická místa, která by mohla být hodně namáhána ve finálním modelu.

6.5.3 Kontakty



Obr. 20: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného objemu – Kontakty

Nástroj „*contact status*“ v řešiči Ansys ilustruje vzájemnou interakci kontaktních ploch. Slouží nám jako jakási vizuální kontrola, zda se námi definované kontakty chovají dle předpokladu.

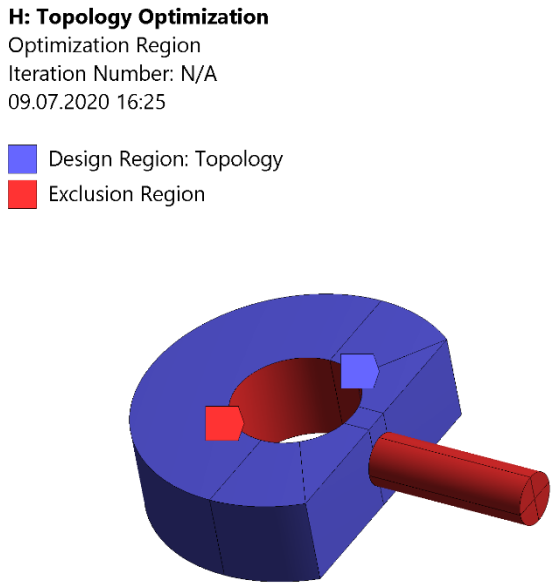
Ve světle červenou barvu označených místech, vyhodnocených řešičem jako „*sticking*“, nedochází k tangenciálnímu posunu, což je správně, jelikož mezi těmito kontaktními plochami bylo nastaveno pevné spojení.

V místech vyhodnocených jako „*near*“ dochází dle řešiče k malému posunu, což je opět v pořádku, protože je zde pohyb očekáván dle nastavení kontaktů.

6.6 Parametry topologické optimalizace a výsledný objem

Před spuštěním samotného algoritmu je nutno zvolit parametry a omezení, podle kterých bude topologická optimalizace probíhat. V rámci této simulaci byly nastaveny následující tři:

- Optimalizovaný prostor (optimization region)
- Cíl (objective)
- Okrajová omezení (response constraint)



Obr. 21: Příklad ploch vyjmutých z optimalizace na spodním úchytu tlumiče

Nástroj „*optimization region*“ nám umožňuje označit plochy, které chceme zachovat. Typicky nimi mohou být různé úchyty, šroubové díry atp.

V nastavení cílů definujeme, podle jakých kritérií bude optimalizace probíhat. V základu vybíráme mezi třemi možnostmi:

- Minimalizace hmotnosti
- Minimalizace objemu
- Maximalizace pevnosti

V rámci této optimalizace byla vybrána volba maximalizace pevnosti výsledné součásti.

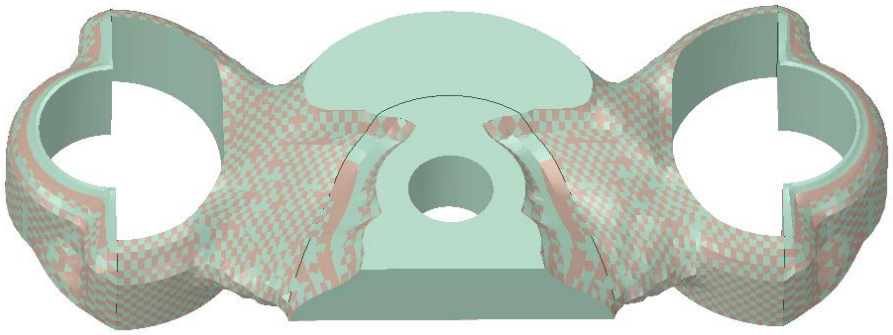
Details of "Response Constraint"

Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region
Definition	
Type	Response Constraint
Response	Mass
Define By	Range
Percent to Retain (Min)	10 %
Percent to Retain (Max)	30 %
Suppressed	No

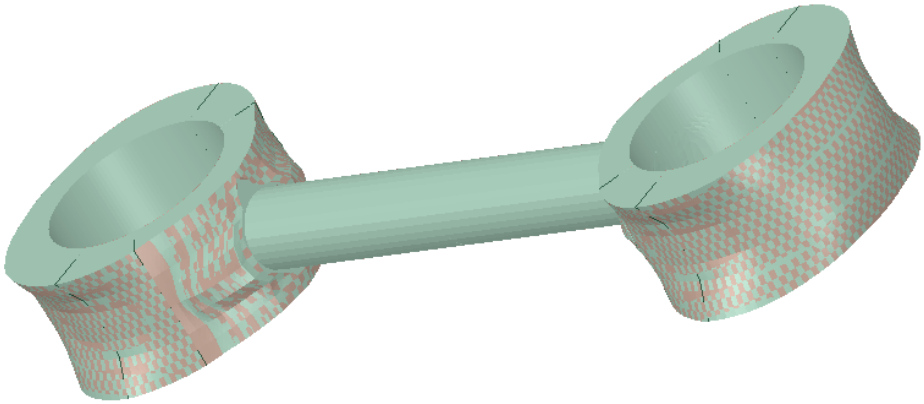
Obr. 22: Nastavení okrajových omezení v řešiči Ansys

V okrajových omezení definujeme parametr, podle kterého bude algoritmus redukovat původní model a v jakém rozsahu. Parametrů je k dispozice několik, příkladem hmotnost, objem, ekvivalentní Von Misesovo napětí a další.

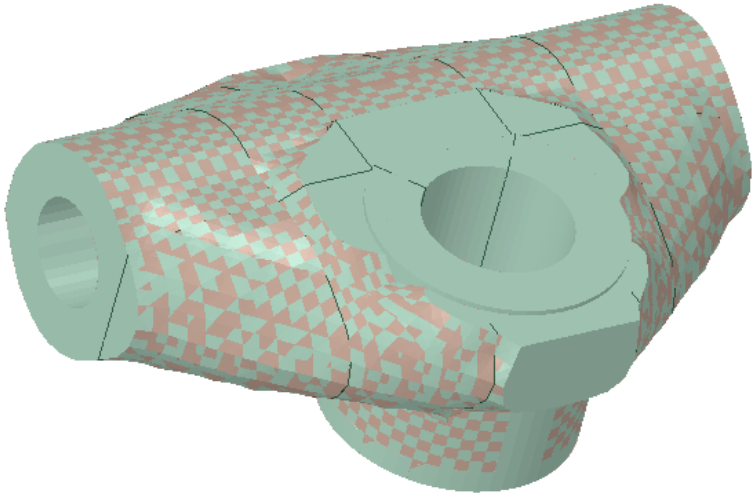
V tomto případě byla nastavena jako parametr hmotnost. Rozsah byl dán intervalem – ponechat minimálně 10 % a maximálně 30 % původního.



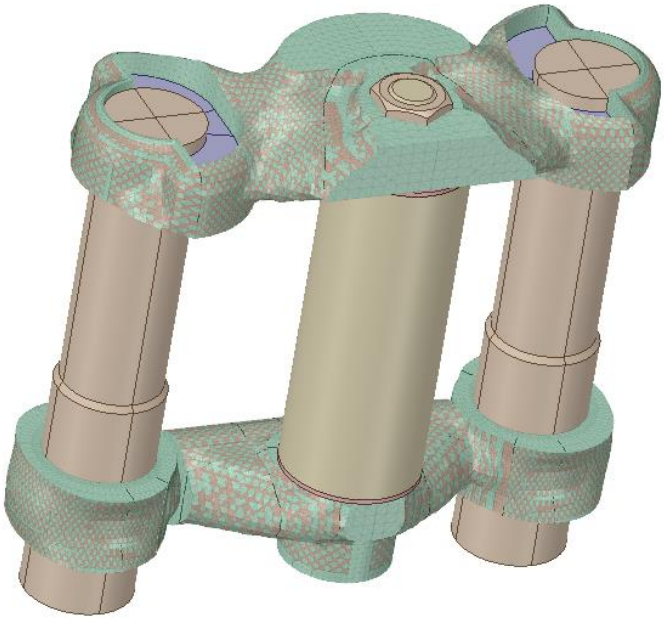
Obr. 23: Výsledný objem – Horní tělo hlavy řízení



Obr. 24: Výsledný objem – Spodní úchyt tlumičů



Obr. 25: Výsledný objem – Spodní tělo hlavy řízení

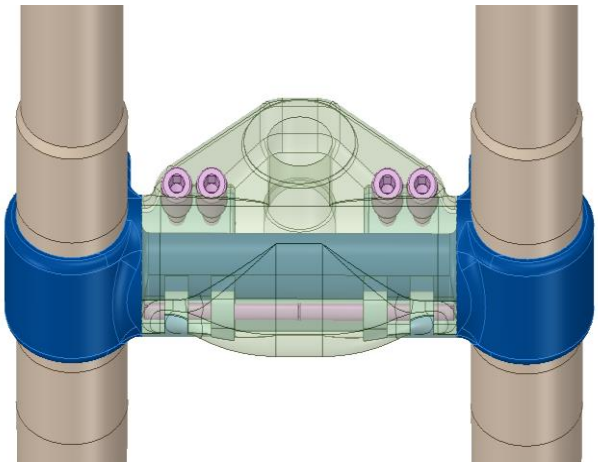


Obr. 26: Výsledný objem - sestava

7 Model stavitelné hlavy řízení

Výsledný STL objem vzniklý z topologické optimalizace je třeba nejprve upravit. V takovémto stavu by byla optimalizovaná součást velice obtížná na výrobu.

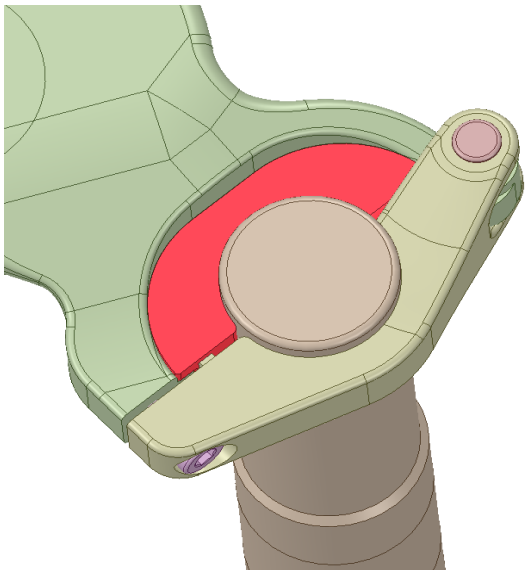
Ke zmíněné úpravě existují dva přístupy. Možná je modifikace samotného STL objemu (modelář SpaceClaim nabízí několik základních nástrojů) nebo vymodelování samostatné součásti, kde vzniklý objem slouží pouze jako šablona. V rámci návrhu stavitelné hlavy řízení bylo užito druhého zmíněného přístupu.



Obr. 27: Spojení spodního těla brýlí a čepu úchytu

Při tvorbě modelu stavitelné hlavy řízení, bylo třeba vyřešit několik funkčních skutečností, které model určený k topologické optimalizace neobsahoval.

Tou první bylo sestavení spodního těla hlavy řízení a čepu spodního úchytu tlumičů. Spodní tělo bylo proto rozděleno na dvě samostatné časti, které jsou po vložení čepu úchytu spojeny dvěma páry šroubů vzadu a osou vpředu.



Obr. 28: Objímka

Objímka byla vyřešena jako vyklápěcí s jedním šroubovým spojem. Zároveň byl na zadní straně objímky vytvořen zub, který přidržuje vložku.

Stejně jako v případě vložek byla vytvořena unikátní objímka pro každou polohu přední vidlice, tzn. celkem 5 párů objímek.

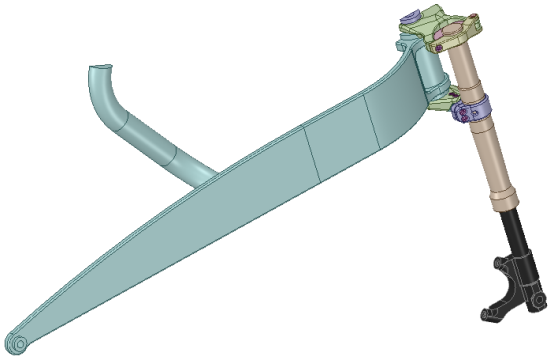
Finální vzhled stavitelné hlavy řízení byl po vymodelování vyrenderován opět v softwaru SpaceClaim. K modelu stavitelné hlavy řízení byla přidána přední vidlice, která je jedním z komponentů, který byl týmem zakoupen. Jejich počítačový 3D model je k dispozici už z minulých let.

Obr. 29: Renderovaný model stavitelné hlavy řízení

8 Numerická analýza stavitelné hlavy řízení

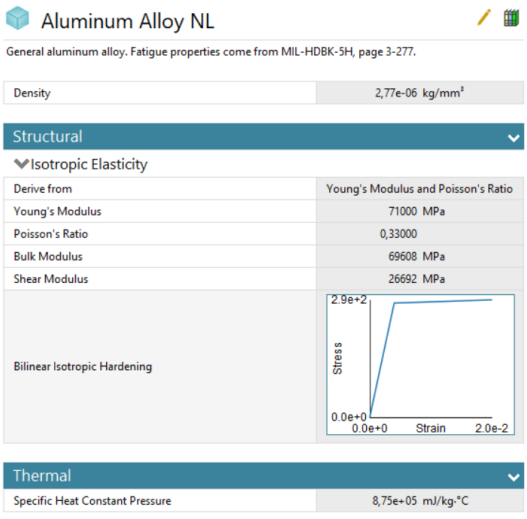
Po vytvoření modelu stavitelné hlavy řízení dle výsledků topologické optimalizace, bylo nutné provést napěťovou analýzu tohoto modelu. K tomuto účelu byla použita transientní analýza, která na rozdíl od klasické statické probíhá v delším časovém intervalu s proměnným zatížením.

Kromě samotné stavitelné hlavy řízení byl pro potřeby simulaci namodelován i provizorní rám, který byl nastaven jako rigidní (na daném tělesu nedochází k deformacím), a byly na něm pouze definovány okrajové podmínky. Současně byla jako rigidní těleso uvažována i přední vidlice.



Obr. 30: Simulovaný model

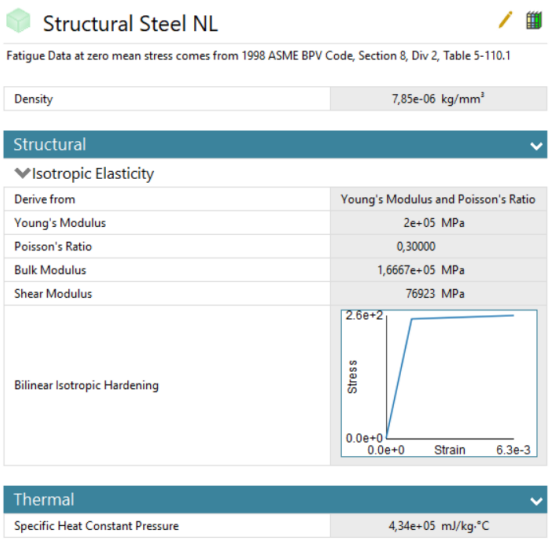
8.1 Materiál



Obr. 31: Materiálové vlastnosti hliníku z knihovny Ansys

V době, kdy byla dokončena práce na finálním modelu, se týmu naskytla možnost využít hliníkovou slitinu jako materiál pro stavitelnou hlavu řízení. Při topologické optimalizaci, ve které byla jako materiál použita ocel, se s tímto nepočítalo.

Po týmové poradě padlo rozhodnutí, že vzhledem k tomu, že výsledky topologické optimalizace sloužily pouze jako šablona pro finální model, bude následující analýza provedena pro hliníkovou slitinu.

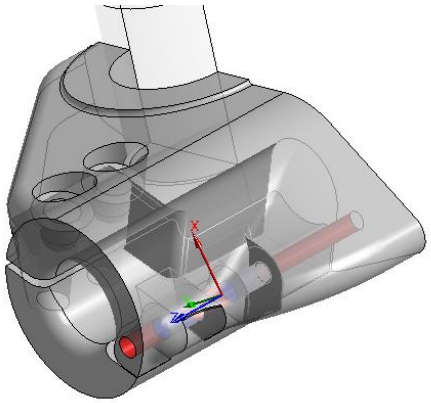


Obr. 32: Materiálové vlastnosti oceli z knihovny Ansys

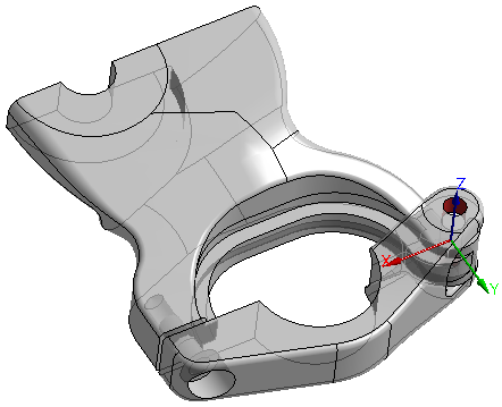
Všechny materiály použité v následujících simulacích byly vybrány z knihovny řešiče Ansys. Pro těla hlavy řízení, spodní úchyt tlumičů, vložku i objímku byl zvolen hliník („*Aluminium alloy, NL*“). Zkratka NL znamená „*non-linear*“, čili nelineární materiál. Nelineární proto, že v simulaci je využito nelineárních kontaktů.

Pro čep řízení, obě matky a tlumič byla zvolena ocel („*Structural steel, NL*). Rám, byl zvolen jako hliníkový („Aluminium alloy“).

8.2 Vazby



Obr. 33: Cylindrický kloub 1



Obr. 34: Cylindrický kloub 2

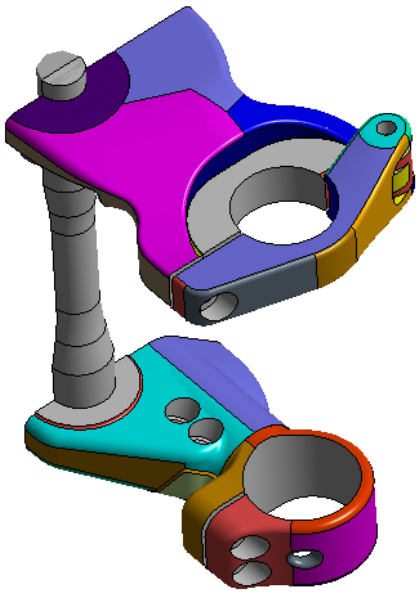
Z hlediska vazeb byl simulovaný model o poznání složitější než ten, který byl původně optimalizován. Přibyl kontakt typu „*frictional*“, který se chová stejně jako již použitý „*frictionless*“. Jediným rozdílem je koeficient tření, který byl stanoven na hodnotu *0,2*.

Vzájemné spojení těles je možné v řešiči Ansys definovat i pomocí kloubových vazeb. Zde máme na výběr širokou škálu typů kloubů, které se liší povolenými posunutími a rotacemi.

V rámci této simulace byl použit kloub typu „*cylindrical*“, který umožňuje posunutí a rotaci kolem jedné z os daného souřadného systému. Tyto klouby simulovaly čep spojující objímku s horním tělem hlavy řízení a osu pojící obě části spodního těla hlavy řízení.

Další spojení, které bylo v simulaci použito je šroubové spojení. To je vytvořeno pomocí prutového elementu („*beam*“ elementu), který je ohraničen z jedné strany podkladnicovou plochou pro hlavičku šroubu, a z druhé strany plochou závitu. Obě tyto plochy jsou deformovatelné.

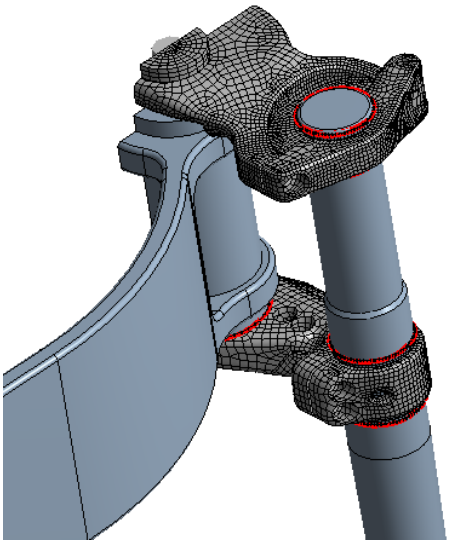
8.3 Diskretizace modelu



Obr. 35: Virtual topology

Při meshování byla pro zefektivnění výpočtu použita funkce „*virtual topology*“. Tato funkce spojuje vybrané plochy nebo hrany v takzvanou virtuální buňku, kterou nám poté řešič síťuje rovnoměrně.

Této funkce využíváme v případech, kdy řešič na styku složitějších ploch či křivek síť zhustí i přesto, že jsou tato místa pro nás ve výpočtu nezajímavá, a zbytečně by zvyšovala nároky na výpočetní výkon.



Obr. 36: Výsledná síť

Samotné meshovaní pak již probíhalo obdobně jako u topologické optimalizace. Byla užita metoda „*hex dominant*“, která generuje hexahedronové elementy.

Výchozí velikost elementu byla nastavena na hodnotu *5* mm. Čep řízení, na jehož koncích se v topologické optimalizace hromadilo napětí, byl síťován *3* mm elementy. Další výjimku tvořily kontaktní plochy, kde byly použity elementy o velikosti *2* mm.

Tělesa, která jsou v simulaci nastavena jako rigidní (tlumič, rám) nejsou síťována. Výjimku tvoří plochy, na kterých je u těchto těles definován kontakt.

8.4 Okrajové podmínky

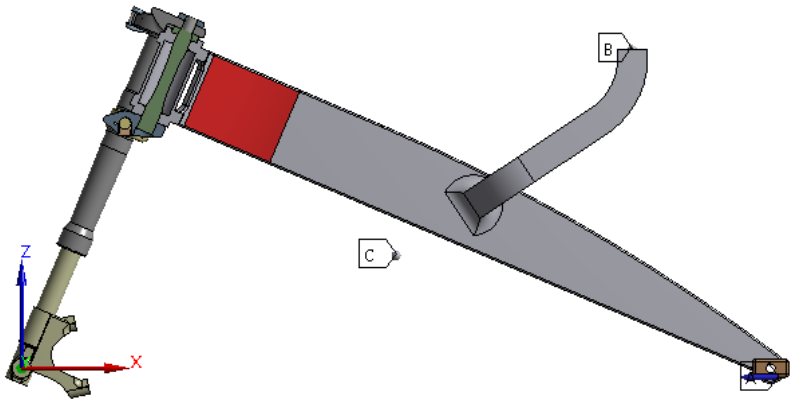
Okrajové podmínky z hlediska podepření byly na rozdíl od topologické optimalizace řešeny kloubovými vazbami. Klouby nám v prostředí Ansys Workbench umožňují spojení dvou těles („*body to body*“), anebo spojení s abstraktní pevnou podložkou („*body to ground*“).

Místa podepření, povolená posunutí a rotace byly zachovány. To znamená, že první podepření bylo definováno v oblasti předního kola, a byla povolena pouze rotace kolem osy a příčný posun. (kloub typu „*cylindrical*“). V oblasti zadního kola byla povolena rotace kolem osy tohoto kola, podélný a příčný posun (kloub typu „*planar*“).

Zatížení bylo opět definováno certifikačním testem soutěže Motostudent. Zadní kolo bylo progresivně zatěžováno až do maximálních *2250* N. Síla působící na sedlo byla nahrazena hmotným bodem o hmotnosti *187,5* kg.

Obě tato zatížení byla získána jako polovina předepsaného zatížení. Z důvodu symetrie modelu a vynásobena konstantou 1,5. Tímto postupem dostáváme o polovinu větší zatížení, než kterým musí motocykl v rámci předepsané přejímky vyhovět.

Dále je uvažována i vlastní hmotnost motocyklu. Ta je opět definována jako hmotný bod působící v předpokládaném těžišti. Cílená hmotnost motocyklu je 130 kg, v simulaci je uvažováno 150 kg, tedy 75 kg v rámci symetrie.



Obr. 37: Okrajové podmínky - zatížení

A – Zatížení zadního kola

B – Zatížení sedla

C – Hmotnost motocyklu soustředěná v těžišti

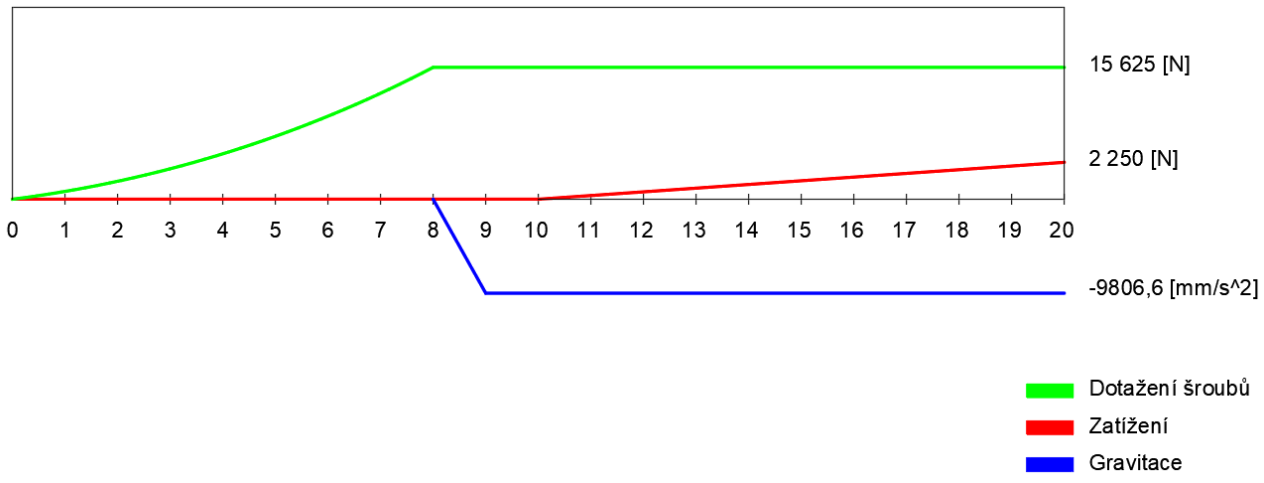
Jelikož hmotnost všech komponentů není zanedbatelná, je bráno v potaz i gravitační zrychlení země. Dále je ve výpočtu počítáno i s předepnutím šroubů. Šroubové spojení je definováno pomocí beam elementů (viz kapitola 7.2). Zatížení, na které je šroub předepnut, bylo vypočteno pro 8 mm šroub a činí *15 625* N.

8.5 Průběh simulace

Průběh simulace byl rozdělen do dvaceti kroků, kde délka jednoho kroku odpovídá jedné vteřině. V časovém intervalu $0\,s - 8\,s$ dojde k dotažení šroubů na vypočtené zatížení *15 625* N.

Po dotažení je od 9 vteřiny aplikováno gravitační zrychlení země. Důvod, proč je gravitace uvažována až po dotažení šroubů je takový, že v opačném případě dochází k nežádoucímu posunu spodního úchytu po tlumiči, dokud nejsou šrouby dotaženy a úchyt k tlumiči zafixován.

Od 10 vteřiny začíná působit zatížení na zadní kolo, které lineárně roste až do předepsané hodnoty, která je *2250 N*.

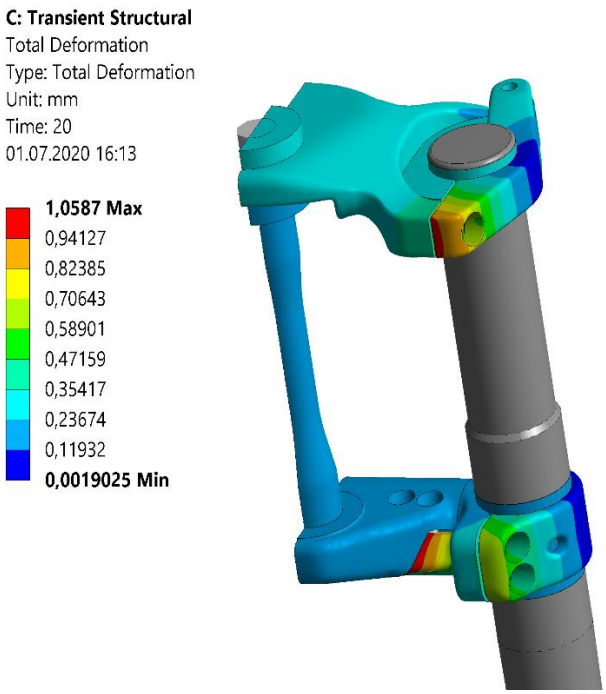


Obr. 38: Průběh simulace

8.6 Vyhodnocení tranzientní analýzy

Výsledky, které jsou ve vyhodnocení těmi nejdůležitějšími, jsou v tomto případě ekvivalentní napětí a plastická deformace. Ostatní veličiny jako například totální deformace nebo status kontaktů slouží spíše jako vizuální kontrola, zda se konstrukce vlivem zatížení chová podle předpokladu.

8.6.1 Totální deformace



Obr. 39: Výsledky transientní analýzy - deformace

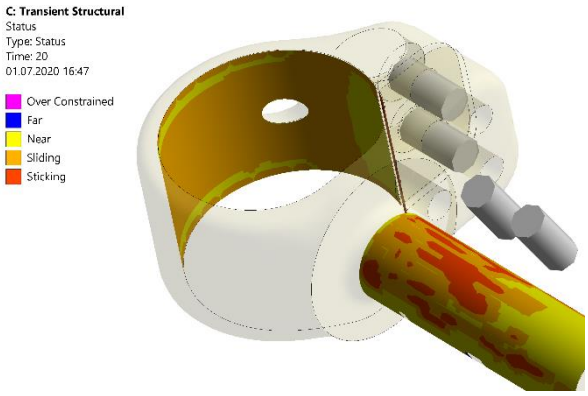
Maxima totální deformace po uplynutí časového intervalu dvaceti sekund se z hlediska hodnot pohybují okolo jednoho milimetru. Maximální hodnota, která se vyskytuje na spodním těle hlavy řízení, činí $1{,}0587\ mm$.

Zde je důležité si uvědomit, kde k těmto extrémům dochází. Je tomu poblíž šroubových spojů – spodní úchyt tlumiče, spodní tělo hlavy řízení a objímka tlumiče na horním těle hlavy řízení. Pohyb těchto součástí je způsoben dotažením šroubů, a proto je zde očekáván.

Hlavní závěr, který je z těchto výsledků usuzován je takový, že šroubové vazby zafungovaly, jsou správně nastavené, a že v žádné jiné oblasti nedochází k neočekávaným deformacím.

8.6.2 Kontakty

V případě kontaktů nám výsledky opět slouží jako jakási ucelená kontrola, zda jsou námi nastavené kontakty v pořádku a chovají se dle předpokladů. Můžeme sledovat nepřeberné množství informací jako například napětí vyvolané třením kontaktních ploch, mezeru mezi kontakty nebo vzdálenost, kterou kontaktní plochy v průběhu simulace urazí.



Obr. 40: Výsledky transientní analýzy - kontakty

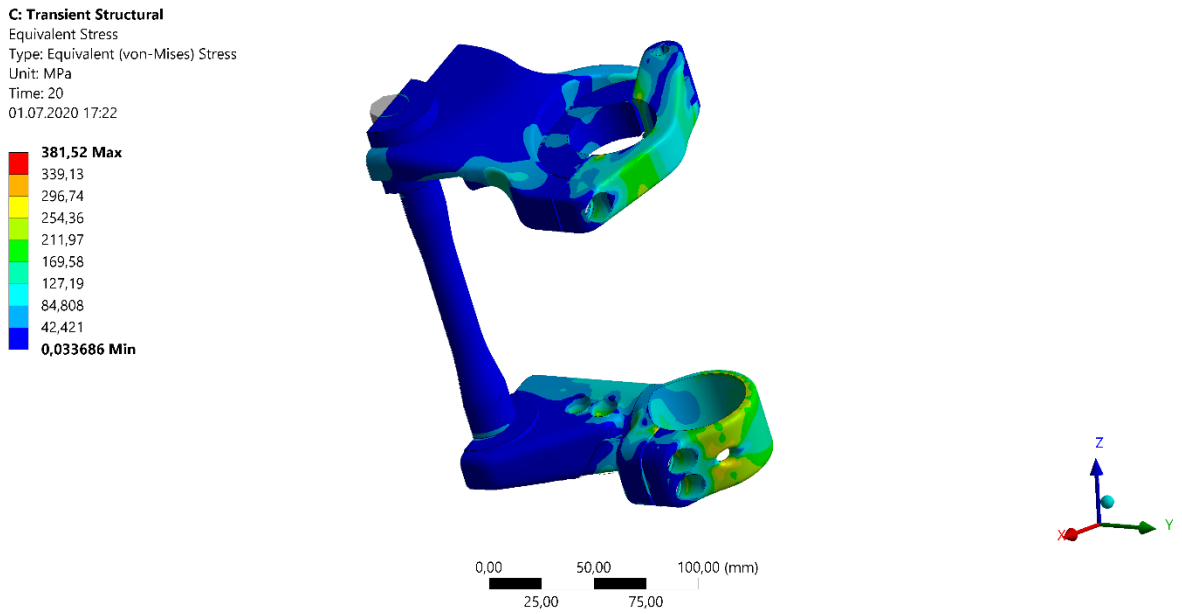
Na obrázku č. 40 je zobrazeno chování kontaktů z hlediska jejich pohybu. Pro znázornění, co z těchto výsledků můžeme vyčíst, byl vybrán kontakt mezi spodním úchytem tlumiče a tlumičem.

Kontaktní plocha na úchytu je ve většině vyplněna oranžovou barvou, která je reprezentována slovem „*sliding*“, což indikuje pohyb kontaktních ploch. V tomto místě v průběhu simulace dochází k dotažení šroubů, a tím pádem k posunu levého vnějšku úchytu po obvodu tlumiče. Z tohoto důvodu je výsledek simulace správný.

8.6.3 Ekvivalentní napětí

Z hlediska ekvivalentního Von-Misesova napětí maxima stoupají až k hodnotám okolo $380\,MPa$, což přesahuje mez kluzu přiřazeného materiálu (Alluminium alloy, NL), která je pouhých $290\,MPa$. Nicméně tyto extrémy se zpravidla vyskytují v rámci pouze jednoho elementu, a to na ostré hraně, nebo na kontaktní ploše.

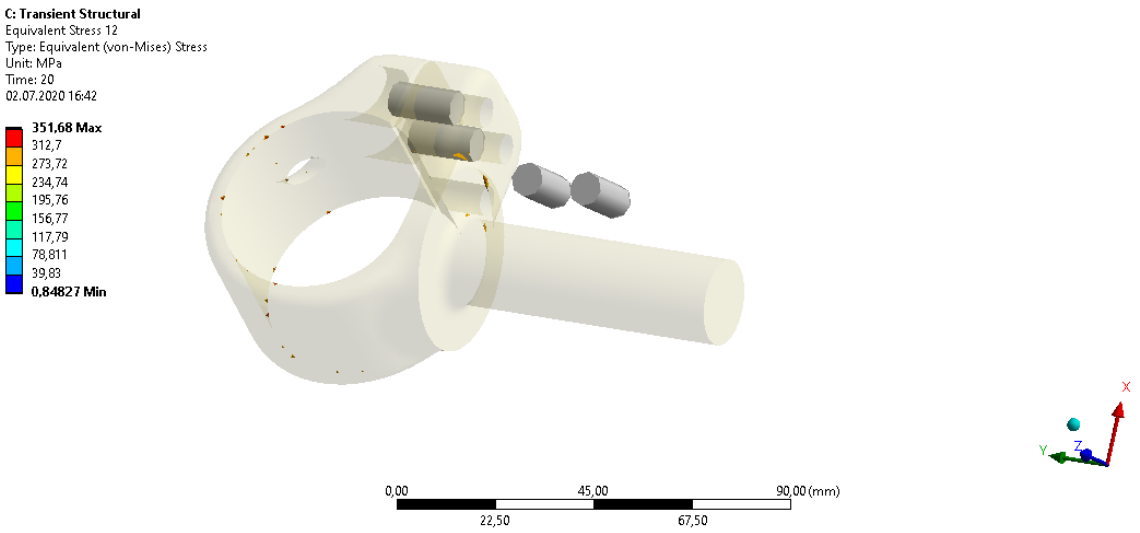
Je také nutné brát v potaz, že užité zatížení je o padesát procent vyšší, než kterému bude motocykl vystaven v realitě, a že samotná váha motocyklu bude v ideálním případě o nějakých dvacet pět kilogramů nižší.



Obr. 41: Výsledky transientní analýzy – ekvivalentní Von Misesovo napětí

Ostré hrany jsou typickými koncentrátory napětí. Z tohoto důvodu jsou například letadlová okénka v rozích zaoblena. V tomto případě se jako vhodné řešení jeví sražení problematických hran při výrobě stavitelné hlavy řízení.

Na obrázku č. 42 jsou znázorněny elementy na spodním úchytu tlumičů, jejichž napětí přesahuje mez kluzu $290\,MPa$. Je zde vidět trend popisovaný výše – pouze jednotlivé elementy, kontaktní plochy, ostrá hrana.

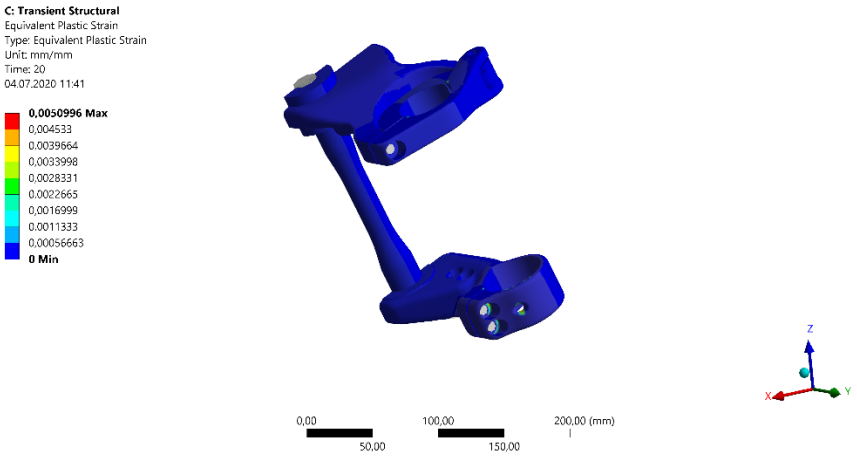


Obr. 42: Výsledky transientní analýzy – Hodnoty napětí vyšší než 290 MPa

8.6.4 Plastická deformace

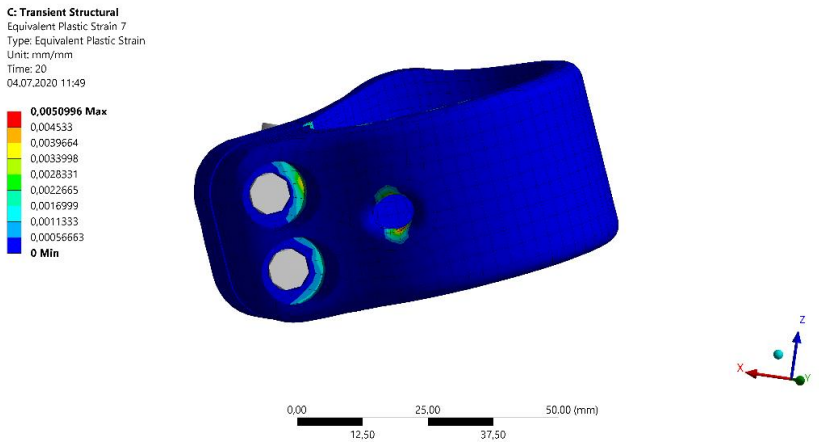
Důležitým hodnotícím ukazatelem je bezesporu plastická deformace – zóna, kde se materiál již nepohybuje v mezích Hookova zákona a po ukončení zatížení zůstává deformován, nevrací se do původní polohy.

Na horním i spodním těle hlavy řízení, čepu řízení, vložce a objímce je plastická deformace nulová. Nenulovou plastickou deformaci můžeme najít na spodním držáku tlumiče, kde odpovídá elementům na ostré hraně, ve kterých bylo koncentrováno vysoké napětí. Maxima se pohybují kolem 0,5 %.



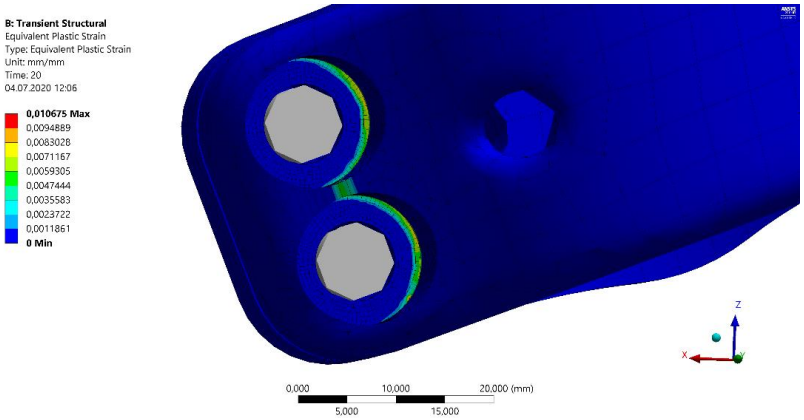
Obr. 43: Výsledky transientní analýzy – Plastická deformace

Další místa, kde se vyskytuje plastická deformace jsou podkladnicové plochy pro hlavičky šroubů. Tyto plochy jsou nicméně tak malé, že v tomto konkrétním výpočtu pro ně byla použita příliš hrubá síť. To znamená, že výsledky v těchto místech je nutné brát s velkou rezervou, protože nejsou dostatečně popsána.



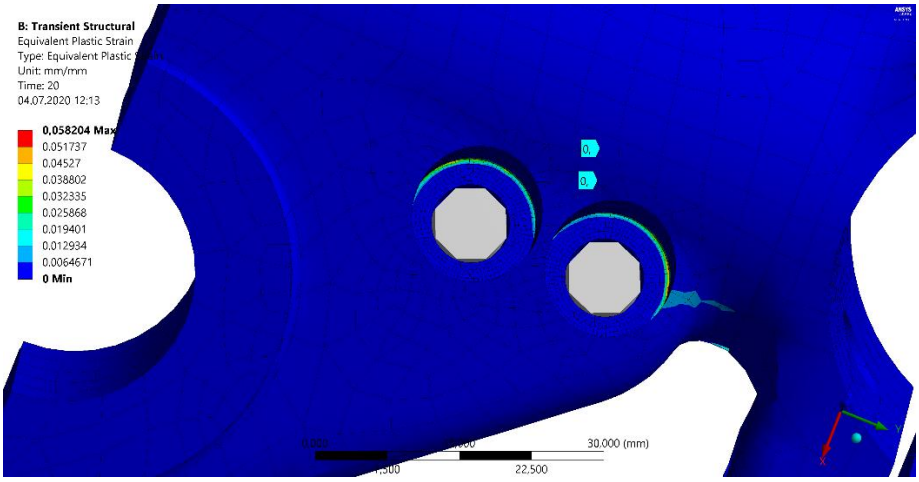
Obr. 44: Výsledky transientní analýzy – Detail plastické deformace

Pro tyto podkladnicové plochy byl následně vytvořen přepočet, který má za úkol lépe zmapovat chování součásti v této oblasti. Zatížení nebylo uvažováno, pouze dotažení šroubů. Na těchto plochách byla zjemněna síť, a to na velikost elementu $0{,}5\ mm$.



Obr. 45: Zpětná analýza plastické deformace 1

Po zmenšení velikosti elementu vidíme, že se plastická deformace objevuje v pouze zhruba půl milimetrovém pásu okolo ostré hrany, nikoli po celé podkladnicové ploše, jako tomu bylo v globálním výpočtu.



Obr. 46: Zpětná analýza plastické deformace 2

Totožný trend můžeme pozorovat i na spodním těle hlavy řízení. Plastická deformace se opět koncentruje v úzkém pásu okolo ostré hrany, na kterou navazuje podkladnicová plocha pro hlavičku šroubu.

8.7 Shrnutí výsledků

Jak již bylo zmíněno napětí simulované konstrukce přesahuje mez kluzu přiřazeného materiálu[2]. Po překročení meze kluzu dochází k tzv. plastické deformaci, kdy se materiál vlivem zatížení nevratně deformuje. Při dimenzování konstrukcí je tento jev samozřejmě nepřípustný, maxima napětí nesmí mez kluzu přesahovat.

Při posuzování výsledků je nicméně nutné vzít v potaz skutečnosti, které při simulaci mohou vzniknout. Na výše simulované konstrukci se nevyskytuje žádná oblast, kde by docházelo k systematickému seskupení většího množství elementů, jejichž napětí by přesahovalo mez kluzu. Při detailním pohledu se jedná o jednotlivé elementy, kolem kterých hodnoty napětí výrazně klesají, a které se koncentrují v ostrých hranách.

Dalším společným jmenovatelem těchto elementů je fakt, že se vyskytují na relativně malých plochách, kde je otázkou, jak dobře jsou tyto plochy popsány konečně prvkovou sítí. Platí poučka, že každá plocha by byla být osíťována alespoň třemi elementy v každém směru.

Kvalita každého výpočtu je bezesporu dána kvalitou konečně prvkové sítě. Čím vyšší počet elementů, tím vyšší je přesnost výsledků. Vzhledem k dostupnému výpočetnímu výkonu bylo použito 59 252 elementů a 205 228 uzlů. Otázkou je, jak by případná vyšší podrobnost konečně prvkové sítě ovlivnila výsledné hodnoty. Přepočet plastické deformace na podkladnicových plochách pro hlavičky šroubů ukázal, že s vyšší podrobností sítě se pole deformací velikostně výrazně zmenšilo a zkoncentrovalo do ostré hrany.

Vzhledem k těmto skutečnostem usuzuji, že konstrukce by měla vyhovět požadovanému certifikačnímu testu soutěže Motostudent. Na základě výsledků numerické analýzy bych týmu doporučil pravidelnou údržbu konstrukce a její kontrolu jak po zátěžovém testu, tak po každém závodě, kvalifikaci popřípadě tréninku.

[2] Aluminium alloy, NL; 290 Mpa

9 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo pomocí topologické optimalizace nalézt ideální tvar stavitelné hlavy řízení, vytvořit funkční 3D model a ten následně podrobit numerické analýze. Výstupem praktické části je tedy detailní konstrukce a její odezva na okrajové podmínky dané certifikačním testem soutěže Motostudent.

V první části práce byl představen studentský tým CTU Lions a jeho dosavadní působení v soutěži Motostudent. Krátce byly vysvětleny cíle této soutěže společně se systémem hodnocení jednotlivých týmů.

Poté následoval vhled do problematiky konstrukce motocyklových rámů. Byla sepsána rešerše základních typů podle konstrukce a technologie výroby. Zmíněny byly také nejčastější materiály, se kterými se při konstrukci rámů a motocyklů obecně můžeme setkat. Zároveň bylo popsáno řízení motocyklů včetně geometrických charakteristik, které mají vliv na jízdní vlastnosti.

V praktické části byl nejprve představen optimalizační proces, který nazýváme topologická optimalizace. Tímto výpočtem jsme schopni určit vhodné rozložení a redukci hmoty konstrukce za malého snížení její pevnosti. Dále byl popsán postup optimalizace stavitelné hlavy řízení.

Optimalizovaný objem byl nejzásadnější podklad pro samotný návrh stavitelné hlavy řízení. Zde bylo nutné vyřešit některé funkční skutečnosti, které původní model určený k optimalizaci neobsahoval. Těmi je myšleno například uložení čepu spodního úchytu tlumičů ve spodním těle hlavy řízení a objímka na horním těle hlavy řízení.

Posledním úkolem bylo podrobit již funkční 3D model numerické analýze pomocí MKP. Za tímto účelem byla provedena tranzientní analýza s okrajovými podmínkami, které jsou dány certifikačním testem soutěže Motostudent. Výsledky ekvivalentního napětí a plastické deformaci byly diskutovány vzhledem k okolnostem simulace a v případě plastické deformace byl vytvořen přepočet v místech hlaviček šroubů za použití podrobnější sítě.

Literatura

[1] JANSA, Vladimír. Konstrukce motocyklu: určeno konstruktérům a studujícím průmyslových a vysokých škol. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. Řada strojírenské literatury.

[2] VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.

[3] KALOUS, Miroslav. Anatomie skútrů. Motorkari.cz [online]. b.r. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/anatomie-skutru-30296.html

[4] POSPÍŠILOVÁ, Gabriela. Britten V1000: Závodní motocykl, který předběhl svoji dobu. Motoforum.cz [online]. b.r. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: http://www.motoforum.cz/supersporty/britten-v1000-z-vodn-motocykl-kter-p-edb-hl-svoji-dobu/

[5] ROLLINGER, Mirek. Technika motocyklu 8 – Podvozek. Motorkari.cz [online] b.r. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-8.-cast-podvozek-3456.html

[6] KADLČÍK, Roman. Technika motocyklu – karbonový rám GP9. Okruhari.cz [online] b.r. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.okruhari.cz/cs/technika-motocyklu-karbonovy-ram-gp9

[7] Yamaha Technology 1985: Aluminium deltabox frame. Yamahapart.com [online]. b.r. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.yamahapart.com/aluminumdeltaboxframe

[8] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5

[9] Hliník a jeho slitiny. Hlinikbronz.cz [online] b.r. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: http://www.hlinikbronz.cz/o-hliniku-obecne/

[10] Exploring lightweight materials on motorcycles. Motorcycle.com [online]. b.r. [cit 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.motorcycle.com/features/exploring-lightweight-materials-motorcycles.html

[11] What is the difference between rake and trail? Motorcycle.com [online]. b.r. [cit 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.motorcycle.com/ask-mo-anything/whats-the-difference-between-rake-and-trail.html

[12] JANOUŠEK, Marek. Geometrie řízení. Motorkari.cz [online] b.r. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/geometrie-rizeni-38287.html

[13] SAJDL, Jan. Záklon rejdové osy a závlek. Autolexicon.net [online] b.r. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/zaklon-rejdove-osy-a-zavlek/

[14] How to reduce CAD design cost using simulation? Feaforall.com [online] b.r. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: http://feaforall.com/reduce-cad-design-cost-using-simulation/

[15] YAMAKAWA, Soji. SHIMADA, Kenji. Hex-dominant mesh generation with directionality control via packing rectangular solid cells. Semanticscholar.org [online] b.r. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.semanticscholar.org/paper/Hex-dominant-mesh-generation-with-directionality-Yamakawa-Shimada/f0f576493e1a835d682b109490c7cec36245b2e1#citing-papers

[16] FRIGERIO, Luca. Motostudent 2016: sfida in pista tra universita di tutto il mondo. Moto.it [online] b.r. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.moto.it/sport/motostudent-2016-sfida-in-pista-tra-universita-di-tutto-il-mondo.html

[17] Kompozitní materiály. Praha: Ústav materiálového inženýrství Fakulta Strojní ČVUT v Praze. [online]. [cit. 2020-08-04].

[18] Prof. Ing. Jindřich MELCHER DrSc., Doc. Ing. Miroslav BAJER, CSc. Prvky kovových konstrukcí. [online] In: Brno: VUT v Brně Fakulta Stavební. [cit. 2020-08-04].

[19] Vishnuran Venkataraman. In:YouTube.com [online]. 24.05.2018 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ov7PAEwFZm8

Seznam obrázků

Obr. 1: Trubkový rám Ducati 1098 [6] ... 11
Obr. 2: Litý rám typu deltabox Yamaha TZR 250 [7] ... 12
Obr. 3: Osa řízení, svislice kolmá k ose kola a offset [11] ... 16
Obr. 4: Schéma závleku předního kola [13] ... 16
Obr. 5: Části stavitelné hlavy řízení ... 17
Obr. 6: Rotace tlumičů v dolní části hlavy řízení ... 17
Obr. 7: Jednotlivé vložky ... 18
Obr. 8: Uložení řízení v krku rámu ... 18
Obr. 9: Schéma procesu topologické optimalizace [2] ... 19
Obr. 10: Původní objem stavitelné hlavy řízení ... 20
Obr. 11: Materiálové vlastnosti strukturální oceli z knihovny Ansys ... 20
Obr. 12: Typy kontaktů v řešiči Ansys [19] ... 21
Obr. 13: Porovnání elementů [3] ... 22
Obr. 14: Diskretizovaný model ... 22
Obr. 15: Silový diagram ... 23
Obr. 16: Zkušební lavice [4] ... 23
Obr. 17: Grafické znázornění propojení vzdálených okrajových podmínek se zkoumanou konstrukcí ... 24
Obr. 18: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného modelu – deformace ... 24
Obr. 19: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného modelu – Von Misesovo napětí 25
Obr. 20: Výsledky strukturální analýzy neoptimalizovaného objemu – Kontakty ... 25
Obr. 21: Příklad ploch vyjmutých z optimalizace na spodním úchytu tlumiče ... 26
Obr. 22: Nastavení okrajových omezení v řešiči Ansys ... 26
Obr. 23: Výsledný objem – Horní tělo hlavy řízení ... 27
Obr. 24: Výsledný objem – Spodní úchyt tlumičů ... 27
Obr. 25: Výsledný objem – Spodní tělo hlavy řízení ... 27
Obr. 26: Výsledný objem - sestava ... 28
Obr. 27: Spojení spodního těla brýlí a čepu úchytu ... 28
Obr. 28: Objímka ... 29
Obr. 29: Renderovaný model stavitelné hlavy řízení ... 29
Obr. 30: Simulovaný model ... 30
Obr. 31: Materiálové vlastnosti hliníku z knihovny Ansys ... 30
Obr. 32: Materiálové vlastnosti oceli z knihovny Ansys ... 31
Obr. 33: Cylindrický kloub 1 ... 31
Obr. 34: Cylindrický kloub 2 ... 31
Obr. 35: Virtual topology ... 32
Obr. 36: Výsledná síť ... 32
Obr. 37: Okrajové podmínky - zatížení ... 33
Obr. 38: Průběh simulace ... 34
Obr. 39: Výsledky transientní analýzy - deformace ... 35
Obr. 40: Výsledky transientní analýzy - kontakty ... 36
Obr. 41: Výsledky transientní analýzy – ekvivalentní Von Misesovo napětí ... 37
Obr. 42: Výsledky transientní analýzy – Hodnoty napětí vyšší než 290 MPa ... 37
Obr. 43: Výsledky transientní analýzy – Plastická deformace ... 38
Obr. 44: Výsledky transientní analýzy – Detail plastické deformace ... 38
Obr. 45: Zpětná analýza plastické deformace 1 ... 39
Obr. 46: Zpětná analýza plastické deformace 2 ... 39

Seznam tabulek

Tabulka 1: Bodové ohodnocení zpráv…….....10
Tabulka 2: Bodové ohodnocení závěrečného závodního víkendu……11
Tabulka 3: Použité kontakty……..23

Seznam příloh

Příloha č. 1: Model stavitelné hlavy řízení
Příloha č. 2:
Příloha č. 2.1: Ekvivalentní napětí na horním těle hlavy řízení
Příloha č. 2.2: Ekvivalentní napětí na horním těle hlavy řízení vyšší než 290 MPa
Příloha č. 3:
Příloha č. 3.1: Ekvivalentní napětí na objímce
Příloha č. 3.2: Ekvivalentní napětí na objímce vyšší než 290 MPa
Příloha č. 4:
Příloha č. 4.1: Ekvivalentní napětí na vložce
Příloha č. 4.2: Ekvivalentní napětí na vložce vyšší než 290 MPa
Příloha č. 5:
Příloha č. 5.1: Ekvivalentní napětí na čepu řízení
Příloha č. 5.2: Ekvivalentní napětí na čepu řízení vyšší než 290 MPa
Příloha č. 6:
Příloha č. 6.1: Ekvivalentní napětí na spodním úchytu tlumičů
Příloha č. 6.2: Ekvivalentní napětí na spodním úchytu tlumičů vyšší než 290 MPa
Příloha č. 7:
Příloha č. 7.1: Ekvivalentní napětí na části spodního těla hlavy řízení
Příloha č. 7.2: Ekvivalentní napětí na části spodního těla hlavy řízení vyšší než 290 MPa
Příloha č. 8:
Příloha č. 8.1: Ekvivalentní napětí na části spodního těla hlavy řízení
Příloha č. 8.2: Ekvivalentní napětí na části spodního těla hlavy řízení vyšší než 290 MPa