

Návrh a topologická optimalizace dílu pro vůz Formula Student

Tomáš Pítr

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

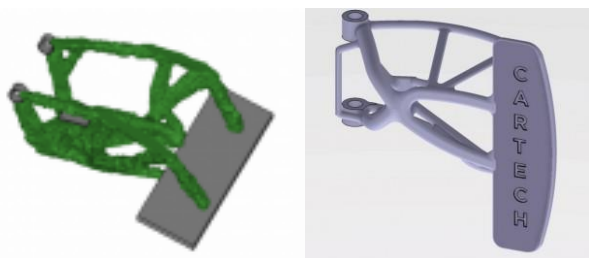
Článek popisuje návrh sloupku řízení pro vozidlo FS07 týmu CTU CarTech. Cílem návrhu sloupku řízení bylo zvýšit tuhost systému při dosažení minimální hmotnosti konstrukce. Za tímto účelem byla pro návrh použita metoda topologické optimalizace. Podle výstupu z topologické optimalizace byl následně vymodelován finální tvar sloupku řízení, který byl zkontrolován pomocí MKP analýzy. Díly navržené topologickou optimalizací mají většinou velmi složitý tvar, proto se už od začátku návrhu dílu počítalo s využitím technologie 3D tisku kovů.

Klíčová slova: Formula Student; Topologická optimalizace; sloupek řízení; Sintrování kovů;

1. Úvod

V roce 2014 tým CTU CarTech uzavřel partnerství s firmou Misan s.r.o., která disponuje technologií laserového spékání kovů, laicky nazývaného 3D tisk kovu.

Tato nová technologie byla poprvé použita na voze FS06. Jednalo se o pádla řazení umístěné na volantu (viz. Obr. 1.) Pádla řazení byly navrženy metodou topologické optimalizace, tak aby měly co nejnižší hmotnost a aby zároveň splňovaly zvolené požadavky na tuhost a pevnost ve zvoleném zátěžném stavu.



Obr. 1. Pádlo řazení [1]

Tato metoda návrhu a výroby mě natolik zaujala, že jsem se rozhodl touto metodou navrhnout sloupek řízení pro vůz FS07.

2. Návrh sloupku řízení

V následujících kapitolách bude popsán postup návrhu sloupku řízení metodou topologické optimalizace.

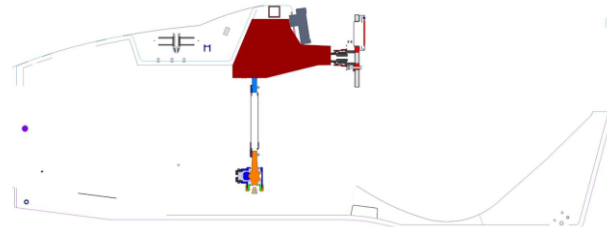
2.1. Požadavky na sloupek řízení

Cílem bylo tvarově optimalizovat sloupek řízení, aby splňoval zadané podmínky. Hlavním požadavkem na sloupek řízení bylo zvýšení tuhosti oproti předchozí variantě. Proto je omezený maximální možný průhyb v místě uchycení volantu o velikosti 0,5mm při zátěžné síle o velikosti 0,7kN působící taktéž v místě uchycení volantu. Dále

musí díl splňovat pevnostní podmínku – redukované napětí v konstrukci nesmí přesáhnout 100MPa. Cílovou funkcí je minimalizace hmotnosti dílu.

2.2. Určení návrhového prostoru

Postup topologické optimalizace začal určením návrhového prostoru. Návrhový prostor by měl mít maximální možné rozměry dílu tak, aby nevznikaly kolize s okolními díly.



Obr. 2. Návrhový prostor pro sloupek řízení

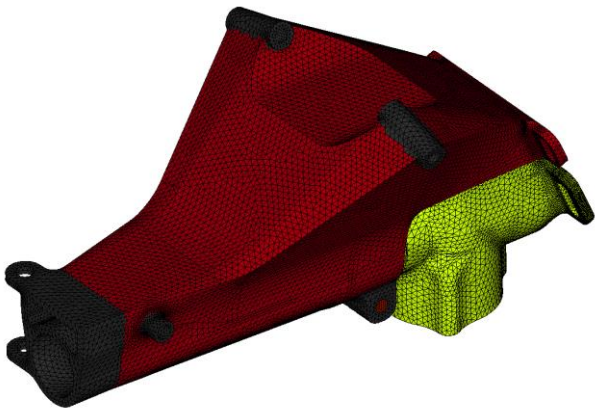
Na obrázku 2 je červenou barvou vyznačen maximální prostor pro sloupek řízení. Ohraničení návrhového prostoru je dáno tvarem monokoku, ve kterém jsou úchytné body pro sloupek řízení. Dále rychlospojkou, která definuje pozici volantu a poslední ohraničení udává AIM dataloger (na obrázku šedý obdélník)

S takto definovaným prostorem byla vytvořena geometrie modelu pro topologickou optimalizaci.

2.3. Model pro topologickou optimalizaci

Model pro topologickou optimalizaci by měl obsahovat přípojné body pro díly, které na ně navazují. Takto připravený model v CAD modeláři převedeme do MKP řešiče.

* Kontakt na autora: Tomas.Pitr@fs.cvut.cz



Obr. 3. Model pro topologickou optimalizaci

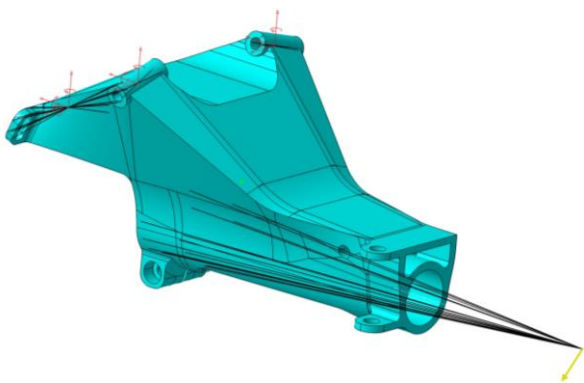
Pro tento díl byl zvolen program Hyperworks. V tomto programu se navržený model rozdělil na dvě části. První část (na obrázku 3 červenou barvou) je část dílu, kterou chceme tvarově optimalizovat. Druhá část (na obrázku 3 černou barvou) jsou místa, které tvarově optimalizovat nechceme – chceme je zachovat. Jedná se o místa přípojných bodů. Na obrázku je také díl se žlutou barvou. Tento díl nám vytváří kontakt s navrhovaným dílem tak, jak to bude ve skutečnosti a tím zlepšuje reprezentaci zatížení.

2.4. Zátěžné stavy

Při určování zatížení bylo vycházeno ze dvou zátěžných stavů. První a nejvýznamnější zátěžný stav je od pilota, když se opře do volantu, nebo když se za volant pověsí. Tento zátěžný stav je definován silou působící v místě uchycení volantu a má velikost 0,7kN.

Dalším zátěžným stavem je zachycení reakcí v ložiscích od kuželových kol uvnitř převodky řízení.

Dále bylo potřeba definovat podpory a materiál dílu. Podpory jsou umístěny v místech, kde je díl uchycen k nosné části vozu. Podpory odebírají dílu všechny stupně volnosti v prostoru.



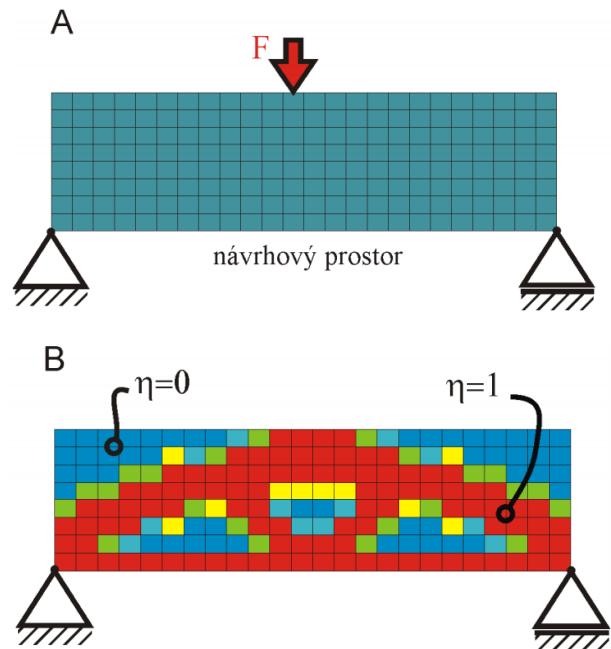
Obr. 4. Místa podpor a působící síly

Díl se bude vyrábět technologií 3D tisku kovu. Materiál používaný pro tuto technologii je ve formě prášku. Prášek z hliníkové slitiny má označení CL31AL (AlSi10Mg). Materiál má mez kluzu 170-220MPa a mez pevnosti 310-325MPa.

2.5. Topologická optimalizace

Metoda topologické optimalizace zjednodušeně řečeno analyzuje potenciál (využití) materiálu v návrhovém prostoru pro zadané zatížení a okrajové podmínky. Pro návrh dílu byla použita metoda hustot.

Metoda hustot pracuje s pseudohustotou elementu v návrhovém prostoru. Pro jednodušší popis metody je metoda popsána na jednoduchém nosníku na obrázku 5A a 5B. Pseudohustota nabývá hodnot od 0 do 1. V místě, kde je materiál potřeba, pseudohustota nabývá hodnoty 1 (na obrázku 5B - červená barva). V místech, kde materiál není potřeba, pseudohustota nabývá hodnoty 0 (na obrázku 5B - modrá barva). Oblasti žluté, zelené a světlé modré barvy znázorňují pseudohustotu ležící mezi 0 a 1. Pro tyto oblasti je obtížné rozhodnout, zda jsou optimálním řešením a proto musí metoda hustot obsahovat tzv. penalizaci středních hustot, aby byl výsledný tvar reprezentovaný pouze pseudohustotami blízkými 0 a 1. [2]

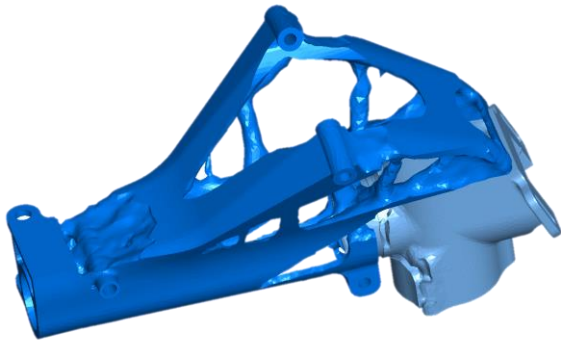


Obr. 5. Topologická optimalizace – metoda hustot

Topologická optimalizace dílu proběhla pomocí řešiče OptiStruct. Jedná se o iterační metodu. Minimální počet iteračních kroků by měl být 30. Metoda se snaží konvergovat k optimálnímu výsledku. Během každé iterace algoritmus upravuje hodnoty pseudohustot, tímto způsobem „odebírá“ materiál v nejméně namáhaných místech. Po každé iteraci probíhá MKP analýza součástí. Výsledky z MKP analýzy slouží jako vstup do dalšího iteračního kroku a smyčka se znovu opakuje. [1]

Jakmile se metoda dostane do fáze, kdy je mezi jednotlivými iteracemi minimální odchylka v hodnotě cílové funkce výpočet se ukončí. Pokud úloha za stanovený počet iteračních kroků nezkonverguje k optimálnímu výsledku, tak řešič bere za výsledek poslední iteraci.

Navrhovaný díl dokonvergoval k optimálnímu výsledku po 46 iteracích. Výsledek 46 iterace je zobrazen na obrázku číslo 6.

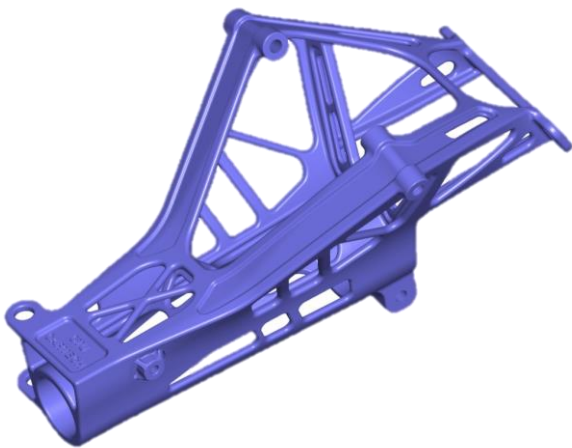


Obr. 6. Výsledný tvar topologické optimalizace (46 iterace)

2.6. Návrh finálního tvaru

Výsledek z topologické optimalizace posloužil jako vzor pro vytvoření finálního tvaru dílu, který byl vytvořen stejně jako geometrie modelu pro topologickou optimalizaci v softwaru CATIA V5. Při tvorbě finálního dílu by již mělo být rozhodnuto o technologii výroby, aby se dalo počítat s technologickými přídávky. Technologie 3D tisku kovu je velmi benevolentní k technologickým požadavkům.

Finální tvar nakonec obsahoval jen přídávky na obrábění. Jednalo se o přídávky na obrobení děr pro lícované šrouby, které spojují sloupek řízení s monokokem. Dále obsahoval přídávky děr na inserty, pro pádlo spojky a přídavek v díře pro závit na vymezování lanka spojky. Poslední přídavek byl v místě, kam se lisují ložiska.

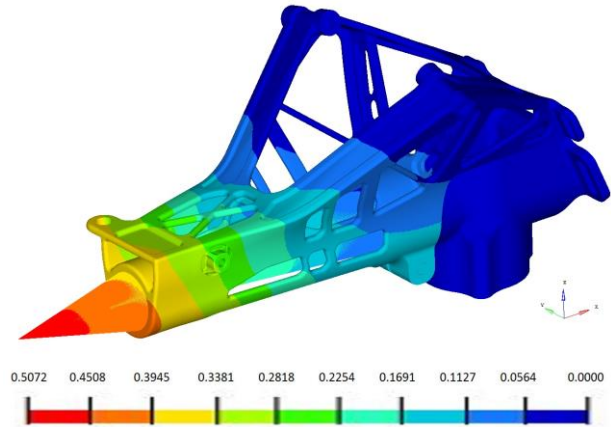


Obr. 7. Finální tvar dílu s přídávky

Tyto přídávky byly v modelu vytvořeny jako druhé těleso, které bylo nezávislé na hlavním dílu a neúčastnilo se MKP analýzy. Až když navržený díl prošel finální MKP analýzou, tak byl sloučen s přídávky do jednoho tělesa (viz obr. 7.) a vyexportován ve formátu .stl. Poté byl zaslán do výroby.

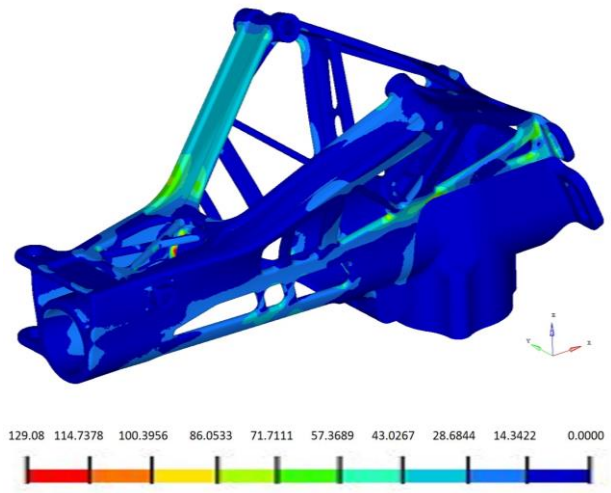
2.7. Kontrola finálního tvaru

Po vymodelování finálního tvaru bylo potřeba znovu provést MKP analýzu a ověřit, zda díl splňuje zadané požadavky na pevnost a tuhost. V tomto kroku se na základě MKP analýzy vyhodnocovaly kritická napětí a byla snaha je eliminovat například změnou zaoblení nebo změnou umístění žeber popřípadě tvaru vybrání.



Obr. 8. Posuvy sloupku řízení (stupnice v mm)

Na obrázku 8 je znázorněn průhyb dílu při stanoveném zatížení. Průhyb v místě uchycení volantu je 0,5072mm. Tato hodnota je lehce nad požadovanou hodnotou průhybu, která byla stanovena na 0,5mm. Avšak odchylka je tak malá, že průhyb 0,5072mm je dostačující.



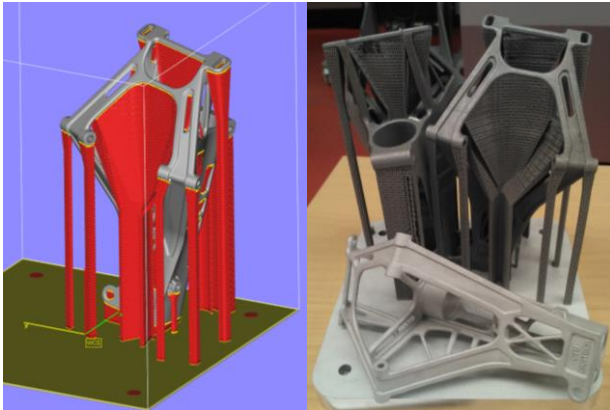
Obr. 9. Pevnost sloupku řízení (stupnice v MPa)

Na obrázku 9 je znázorněna deformace sloupku řízení při definovaném zatížení. K takto navrženému dílu se přidaly přídávky na obrábění, o kterých bylo psáno v předchozí části a zadal se do výroby.

2.8. Výroba

Výroba dílu proběhla ve společnosti Misan s.r.o. na stroji Concept Laser M2 cusing. Výroba dílu trvala 60 hodin čistého času. Poté se díl vložil do žíhací pece, aby se odstranilo vnitřní pnutí vzniklé při sintrování. Po vyžhání

se z dílu odstranily podpory (na obrázku 10 červenou barvou), které jsou potřeba, aby se díl při sintrování nezbořil. Poslední operace před obráběním je pískování.



Obr. 10. Výroba dílu technologii sintrování

Následné obrábění probíhalo částečně v dílně CTU CarTech, kde se obráběly díry pro lícované šrouby a pro inserty. Díry pro ložiska, které mají vyšší požadavek na přesnost, byly obrobené ve firmě DAE EU. Při návrhu dílu bylo zapomenuto na přídavek pro uchycení na obráběcí stroj. Proto byl vytvořen svařovaný přípravek (viz Obr. 11.), který umožnil upnutí dílu na obráběcím stroji.



Obr. 11. Přípravek pro upnutí dílu na obráběcím stroji

3. Závěr

Návrh pomocí topologické optimalizace s následným kovovým 3D tiskem se velmi osvědčil. Ve Formuli Student není hmotnostní omezení a touto metodou návrhu a výroby bylo snadné dosažení požadovaných parametrů.

Díl má 312 gramů a díky topologické optimalizaci byla dosažena 5x větší tuhost oproti dílu ve voze FS06, který měl 447 gramů.

Sloupek řízení absolvoval v sezoně 2015 500km ve voze FS07. Během sezony nevznikly na sloupku řízení žádné komplikace, vše fungovalo bez problému.



Obr. 12. Sestava sloupku řízení připravena na montáž do auta

Poděkování

Velké poděkování patří Ing. Michalovi Vašíčkovi, Ph.D. za poskytnutí důležitých rad, týkajících se pevnostních výpočtů a optimalizace dílů. Dále bych chtěl poděkovat kolegům z týmu CTU CarTech, kteří se mnou konzultovali konstrukční řešení dané sestavy a všem zmíněným společnostem za poskytnuté služby.

Seznam použité literatury

- [1] 3D TISK. CtuCartech [online]. [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/3d-tisk/>
- [2] KOPŘIVA, L.: Optimalizace žebra v křídle letounu. Brno Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 55 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=9054