



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE OZUBENÉHO KOLA

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE GEAR WHEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Zařko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Tomáš Zařko
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Topologická optimalizace ozubeného kola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte rešerši popisující využití topologické optimalizace při návrhu strojních součástí. Dále pak pomocí topologické optimalizace navrhnete optimální tvar ozubeného kola.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dané problematiky.
Topologická optimalizace modelu ozubeného kola.
Zpracování získaných informací.

Seznam doporučené literatury:

MIRZENDEHDEL, Amir M a Krishnan SURESH. A hands-on introduction to topology optimization. Great Britain, 2017, 236 stran. ISBN 781976480607.

ZHANG, Weihong, Jihong ZHU a Tong GAO. Topology optimization in engineering structure design. London: Oxford, UK: ISTE Press Ltd. ; Elsevier, 2016, xix, 274 stran. ISBN 978-1-78548-224-3.

YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-55127-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o přiblížení konstrukční metody topologické optimalizace, její využití v praxi a porovnání různých softwarů pro realizaci této metody. Hlavním cílem této práce je implementace topologické optimalizace pro návrh optimálního tvaru ozubeného kola.

KLÍČOVÁ SLOVA

Topologická optimalizace, Optimalizace, Ozubené kolo

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the approach of the design method of topological optimization, its use in practice and comparison of various software for the implementation of this method. The main goal of this work is to use topological optimization to design the optimal shape of the gear.

KEYWORDS

Topology optimization, Optimization, Gear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAŤKO, Tomáš. Topologická optimalizace ozubeného kola. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Zeizinger, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Zeizingera, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 19. května 2021

.....

Zat'ko Tomáš

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Zeizingerovi, Ph.D., který mi svým zapálením pro téma a přístupem maximálně pomohl s vypracováním této práce. Dále velké díky patří mým rodičům, přítelkyni a kamarádům, které kolem sebe mám, za úžasnou podporu, jež mi byla při studiu poskytnuta.

OBSAH

Úvod.....	9
Cíl práce	10
1 Topologická optimalizace.....	11
1.1 Uvedení do problematiky.....	11
1.2 Princip topologické optimalizace	14
1.3 Postup topologické optimalizace	14
1.4 Metody optimalizace.....	17
1.4.1 Analýza konečných prvků.....	17
1.4.2 Typy síťování	18
1.4.3 SIMP	19
1.4.4 OMP.....	21
1.4.5 NOM	22
1.4.6 DDP	22
1.5 Využití topologické optimalizace v praxi	22
1.5.1 Aditivní technologie	23
2 Ozubené Kolo	24
2.1 Druhy ozubených soukolí.....	24
2.2 Základní profil.....	25
2.2.1 Evolventní ozubení	26
3 Návrh optimalizace ozubeného kola	27
3.1 Výchozí model pro optimalizaci.....	27
3.2 Návrh optimálního tvaru	27
3.2.1 Okrajové podmínky	28
3.2.2 Nastavení výpočtu	31
3.3 Úprava návrhu v CAD softwaru.....	33
3.4 výpočet neoptimalizovaného kola	35
3.4.1 Nastavení okrajových podmínek – MKP.....	35
3.4.2 Výsledek simulace pomocí MKP	37
3.5 Výpočet optimalizovaného kola	39
3.5.1 Nastavení okrajových podmínek – MKP.....	39
4 Výroba optimalizovaného dílu pomocí 3d tisku.....	43
5 Výsledky provedené optimalizace	44
Závěr	45
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	48

ÚVOD

Dnešní doba je brána za dobu velice rychlou. Lidé dnes mají možnost se rychle spojit s ostatními pomocí internetového spojení nebo mobilního telefonu. Ale nejde jen o rychlou komunikaci mezi námi, ale i rychlý přesun po planetě zemi. Díky všem technologiím je možné skoro cokoliv za velice krátký časový úsek.

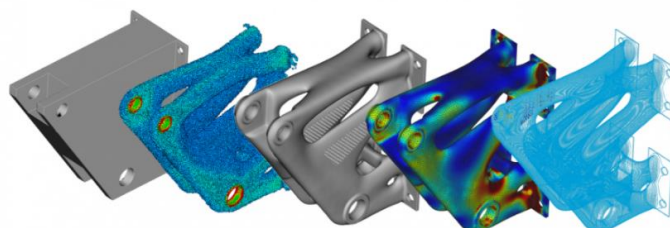
Práce konstruktéra spočívá v řešení různě složitých úkolů s neoptimálnějším řešením v co nejkratším časovém intervalu a co nejnižší cenou výsledku. Tyto požadavky reflektují moderní společnost a její obecné snahy vše urychlit. Naštěstí se nabízí spousta možností, jak tohoto cíle dosáhnout. Jedním z nich je optimalizování práce a nalezení optimální cesty k výsledku.

Realizace topologické optimalizace patří mezi moderní trendy dnešního konstruování. Tato metoda se vyznačuje velkou úsporou materiálu pro maximální zatížení součástky. Výpočet optimalizace vychází ze základního tvaru součásti, který splňuje rozměrová kritéria a dále musí splnit zadané parametry. Těmito parametry mohou být dané zatížení součásti, procento redukované hmotnosti, nebo také zadaná plocha, jež si má zachovat tvar k následnému zpracování. Jedná se o cestu tvorby součásti s optimálním tvarem daných požadavků v krátkém časovém horizontu.

Celý tento způsob konstruování se mnohem více zpřístupnil díky inovaci a zlepšování aditivních technologií, prostřednictvím kterých můžeme optimalizovanou součást vyrobit. Jelikož se jedná o tvarově velice složitou součást, byl by problém ji vyrobit tradičním způsobem, popřípadě by její výroba byla extrémně cenově a časově náročná. Díky různým metodám 3D tisku jsme schopni vyrobit kvalitní součást, která je optimalizována a následně ji pomocí klasického obrábění dokončit. Většinou se finišuje jen povrch „poškozený“ od podpor a funkční plochy dané součásti. Tímto je získán vylepšený produkt, který bude splňovat povrchová a rozměrová kritéria.

MOTIVACE

Toto téma mě natolik zaujalo, že jsem neváhal a hned jsem věděl, že bude tématem mé závěrečné práce bakalářského studia. Dle mého subjektivního názoru lze říci, že tento způsob konstruování bude v budoucnu mnohem více využíván. Ze softwarového hlediska se po čase doladí nedostatky pro lepší a rychlejší návrhy stejně tak jako inovace výrobního procesu. Jelikož jsem sám propadl 3D tisku a celkově jsem si zalíbil konstruování a kreslení v 3D CAD systémech, chci svoje obzory rozšířit a stát se tak lepším konstruktérem.



Obrázek 1. Průběh topologické optimalizace [1]

CÍL PRÁCE

Stěžejním výsledkem této práce je navrhnout optimální tvar ozubeného kola s využitím optimalizačních softwarů disponujících topologickou optimalizací. Dále získání optimálních výsledků spojených s hlavními rysy této optimalizace:

- Snížení hmotnosti součásti při zachování minimálně stejného nebo nižšího napětí v součásti

Dílčí cíle práce lze shrnout do následujících bodů:

- Rešeršní rozbor dané problematiky
- Topologická optimalizace modelu ozubeného kola
- Zpracování získaných informací

Práce je rozdělena do pěti obsáhlých kapitol a podkapitol, kde první kapitola se zaměřuje na obecný přehled optimalizací. Co to optimalizace vlastně je, jaké může mít dělení, základní principy vytváření topologické optimalizace společně s postupem optimalizace. V dalších podkapitolách první kapitoly je nahlédnuto na optimalizaci z matematického hlediska s uspořádáním základních metod konečných prvků, postupem analýzy konečných prvků, síťování těles dle struktury mřížky a v neposlední řadě samotné rozdělení několika metod topologické optimalizace pro základní přehled v této oblasti. Celou první kapitolu uzavírá stručný náhled na využití topologické optimalizace v praxi společně s výrobou těchto optimalizovaných součástí pomocí aditivních technologií.

V druhé kapitole jsou popsány základní informace o ozubených kolech, rozdělení a uspořádání ozubených soukolí společně se zaměřením na základní profil zubu a nejvyužívanějším typem ozubení.

Třetí kapitola se zaměřuje na hlavní průběh návrhu optimalizace ozubeného kola od počátku způsobu vytvoření základního 3D modelu až po optimalizační návrh v softwaru MSC Apex Generative Design. Dále s následnou úpravou geometrie optimalizované součásti v CAD softwaru SolidEdge od společnosti Siemens a kontrolním simulačním zatížením ozubeného kola metodou konečných prvků opět v softwaru SolidEdge. V třetí kapitole se nachází i simulační zatížení topologicky neoptimalizovaného ozubeného kola pro porovnání výsledků s optimalizovaným kolem.

Čtvrtá kapitola se jen okrajově zaměřuje na výrobu optimalizovaného a neoptimalizovaného ozubení pomocí aditivních technologií v domácích podmínkách. Jedná se o ukázkou finálních výsledků této práce.

V poslední páté kapitole byly shrnuty a vyhodnoceny veškeré výsledky získané během vypracování této práce.

1 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE

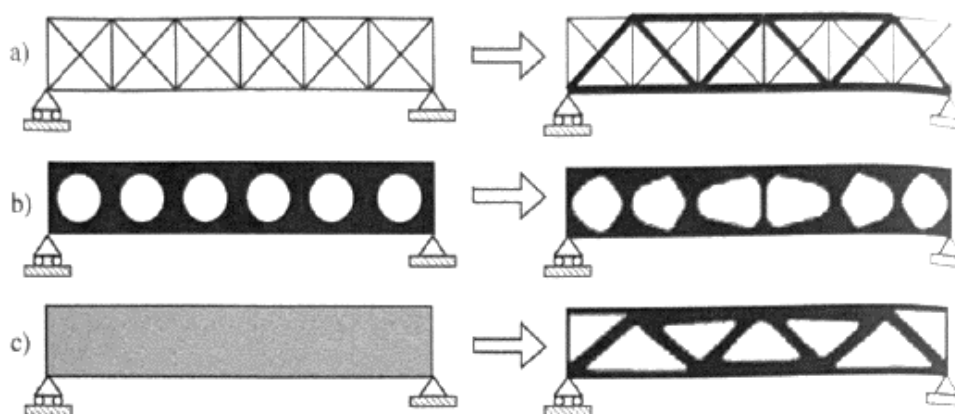
Lidstvo optimalizuje již od počátků věků a jedná se o přirozenou cestu vývoje. Optimalizace je proces hledání nejvhodnějšího a nejvýhodnějšího řešení při nejkratší cestě hledání výsledku. To znamená, že správně optimalizovaný díl nebo jakékoliv řešení není naprosto dokonalé, jak by třeba mohlo být při větší časové kapacitě, ale je to nejdokonalejší řešení v rámci stanoveného časového úseku. Proto je potřeba při optimalizačním procesu někdy ustoupit a přijmout kompromisy.

1.1 UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY

Topologická optimalizace jako taková se řadí mezi optimalizace, která je zaměřena na nalezení optimálního tvaru, designu součásti za účelem dosažení snížení hmotnosti součásti při zachování nebo dokonce i zlepšení pevnostních vlastností strojní součástky. Touto optimalizací je dosaženo koncepčního návrhu lehčí a pevnější struktury. [2]

Topologická optimalizace patří do odvětví optimalizačních metod, která se liší od metod rozměrových a tvarových, ale zároveň topologická optimalizace obě tyto metody zahrnuje v sobě. Jedná se o typ optimalizace, kde jsou konstantní parametry jako je použitý materiál součástky, zatížení součástky, objektivní funkce a omezení, která se mění pro každý problém a jako poslední je variabilita, kterou jsou parametry materiálového rozložení. [2]

Při porovnání tvarové, rozměrové a topologické optimalizace, se dá posoudit, že tvarová optimalizace se zaměřuje na nalezení optimální pozice členu dané struktury, zatím co rozměrová optimalizace hledá pouze dostatečnou velikost členu struktury a v obou případech nebude docházet ke změně počtu členů struktury tělesa. V případě topologické optimalizace dojde k odstranění struktury členů společně s vytvořením nového rozvržení. Obecně je lepší použít metodu konečných prvků, protože takzvané přesíťování (remeshing) usnadňuje pravděpodobnost nalezení lepší topologie. [2]



Obrázek 2. Kategorie konstrukčních optimalizací [4]

Obrázek 2 zobrazuje tři kategorie konstrukčních optimalizací pomocí distribuce izotropického materiálu. V levé části jsou zobrazeny původní řešení konstrukce bez využití optimalizace a vpravo se nacházejí již optimalizovaná řešení. V prvním případě je vyobrazena rozměrová optimalizace, v případě druhém se jedná o optimalizaci tvarovou a v posledním o optimalizaci topologickou.

Tato optimalizace není stále standardním postupem konstruování strojních součástí, proto se zatím využívá hlavně v leteckém, kosmickém a zřídka kdy v koncernovém automobilovém průmyslu. Přitom lze konstatovat, že úspora hmotnosti by velice zlepšila podmínky provozování těchto dopravních prostředků formou úspory paliva. Ale při momentálně dostupných možnostech výroby je tato metoda i nadále velice nákladná a ovlivnila by ceny těchto výsledných produktů, a tak není doposud využit celý její možný potenciál.

Proto se momentálně topologická optimalizace využívá v motorsportu v divizi Formule 1, Formule 2, anebo také ve velmi luxusním francouzském koncernu značky Bugatti, která byla využita pro návrh brzdových třmenů na vozidle Chiron. Využití optimalizace u těchto divizí je zcela pochopitelné, protože se jedná o velice movité společnosti, kde peníze nehrají tak velkou roli.



Obrázek 3. Brzdový třmen pro Bugatti Chiron [5]

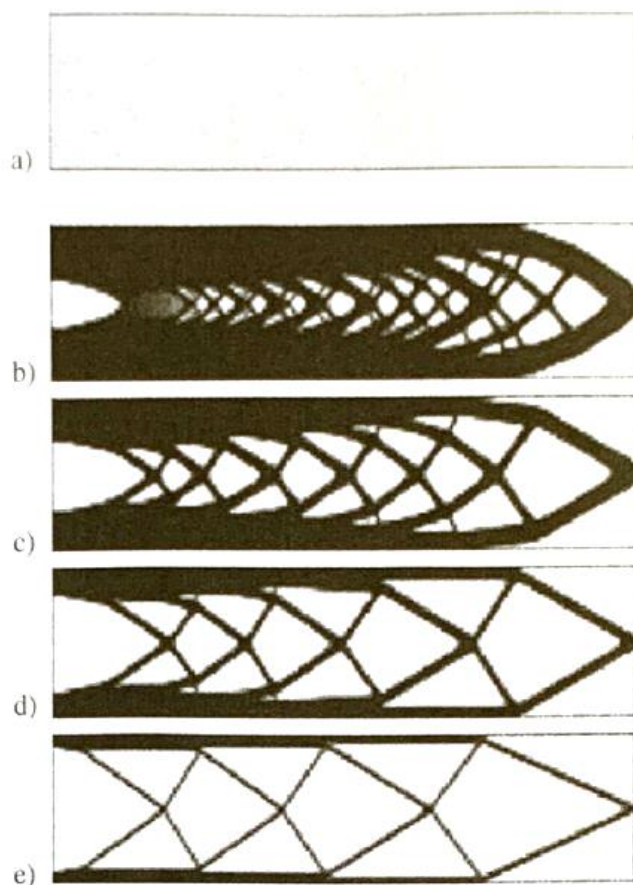
Tato metoda umožňuje konstruktérům vytvořit optimalizovaný návrh v krátkém čase. A to vzhledem k simulačním procesům, které při správném nastavení dokážou nejvíce přiblížit realitu. Těmito simulačními procesy konstruktér eliminuje výrobu několika revizních dílů, které by byly vyrobeny, a tím šetří čas a materiál. Jelikož je realita jiná a většina podniků nemá přístup k simulačním softwarům, je v průmyslovém světě stále naživu metoda „pokus omyl“, která je časově a materiálově určitě náročnější. Proto využití simulací není jen tak k zahazení a stojí za zvážení.

Topologická optimalizace díky simulování ušetří spoustu času a díky proběhlým simulacím se vytvoří kvalitní součást odolávající zátěži, která je na součást v provozní podmínkách vyvinutá. Při pohledu na optimalizovanou součást je zřejmé, že součást není kvalitní jen z mechanické a funkční stránky, ale i z té estetické. [2][3]

V průběhu evoluce počítačových technologií se výpočet optimalizace postupně zrychluje, a tím je tato metoda dostupnější i pro tvarově složitější a rozměrově větší dílce. V dnešní době máme k dispozici softwary, které se zaměřují přímo na optimalizování dílů nebo jsou dostupné ve formě doplňků v ostatních CAD softwarech.

Mezi hlavní výhody této metody patří níže zmíněné:

- Snížení hmotnosti součásti
- Zachování stejné pevnosti, popř. zlepšení pevnostních vlastností
- Optimální tvary pro výrobu pomocí 3D tisku
- Efektivní design



Obrázek 4. Vliv objemové frakce vetknutého nosníku [4]

Na obrázku 4 je možné vidět pod indexem a) základní tvar nosníku. Ostatní indexy zobrazují možnosti redukce hmotnosti nosníku výchozího tvaru. Konkrétně se jedná o b) 80% redukci, dále c) 60%, d) 40% a jako poslední e) 20% redukci hmotnosti.

1.2 PRINCIP TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

Princip fungování topologické optimalizace byl lehce nastíněn v předchozí kapitole 1. Tedy, topologická optimalizace funguje a je založena na výpočtech metody konečných prvků, kdy se jedná o iterační algoritmus, který provede konečně prvkový výpočet a zanalyzuje vypočítaný výsledek. Vzhledem k vypočítanému výsledku si algoritmus upraví samotnou topologii modelu a uloží jej jako výchozí strukturu. Jestliže se tento výsledek přibližuje k požadavkům uživatele a splňuje všechny dané podmínky, tak je výpočet algoritmu úspěšně ukončen a software dodá uživateli teoretickou strukturu topologie dle daných požadavků. V opačném případě se může stát, že se výpočet algoritmu nebude přibližovat k daným požadavkům uživatele a nebude splňovat podmínky, tudíž výpočet bude probíhat stále dokola. Proto existuje možnost nastavit maximální počet iteračních kroků, právě z důvodu nepřibližujícího se výpočtu k výsledku. Kdyby uživatel měl nekonečný počet iteračních kroků, tak by se mohlo při složitějším výpočtu stát, že by se výpočet opakoval do nekonečna. [6]

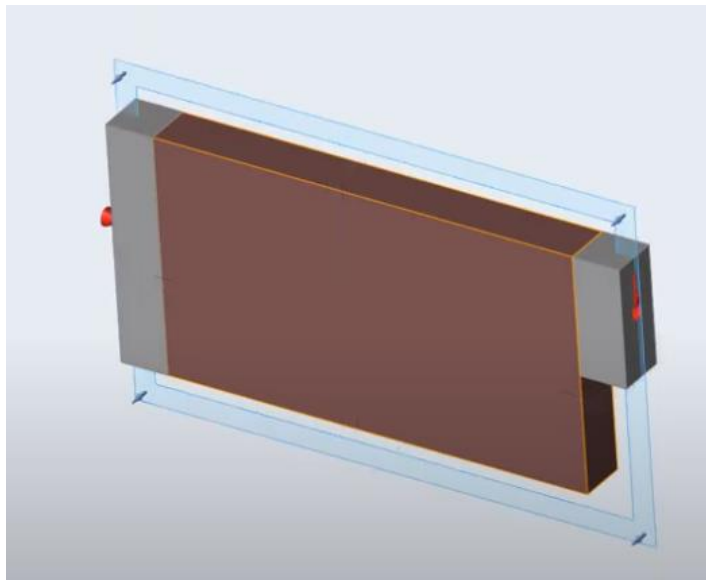
1.3 POSTUP TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

Základem tvorby topologické optimalizace je potřeba mít vstupní data. Těmito daty je myšlen model v různých formátech. Mezi základní formáty patří STEP., STL. a IGES. Toto jsou formáty, které by měla většina CAD softwarů přečíst a dokázat zpracovat. Pro vypracování topologické optimalizace se nabízí dvě možnosti. Buď využití samotného CAD softwaru, který disponuje optimalizačním doplňkem, rozšířením pro výpočet a tvorbu této optimalizace nebo lze využít specializované výpočetní softwary. V této práci byl využit pro optimalizaci ozubeného kola software MSC Apex – Generative design. Dnešní doba nabízí spoustu produktů, kde můžeme tuto optimalizaci provést:

- SolidWorks
- Simens NX
- Altair Inspire
- SolidEdge
- Inventor
- MSC Apex Generative design

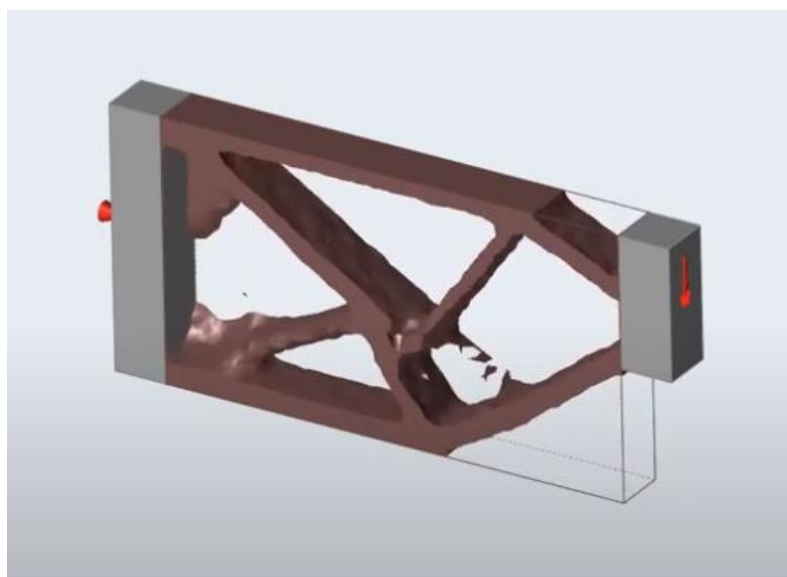
Vzhledem k hojnému počtu softwarů umožňujících vytvoření topologické studie je zřejmé, že postupy se v každém z nich budou mírně lišit. Obecně je potřeba zadat okrajové podmínky, které pomůžou najít výsledek návrhu. Zaprvé, uživatel musí zadat všechny síly, popřípadě vazby, kterými je těleso někde upevněno. Jako dalším krokem je určení materiálu, ze kterého se bude vyrábět nově navržená součást. Dále jsou už méně potřebné kroky jako například dělení součásti pro ulehčení a zrychlení výpočtu. V posledním kroku si uživatel určí, co požaduje za výsledek v dané výpočtové studii. Jestli se zaměřuje na redukci hmotnosti, maximální pevnost nebo se zaměřuje na to, aby součást byla vhodná pro určité frekvenční kmitání. Po výpočtu se uživateli zobrazí studie, kterou může dopravit do finální podoby.

Na obrázku 5 je k nahlédnutí těleso, které hnědou barvou zobrazuje designový prostor k vytvoření návrhu optimalizace. Právě tento prostor se z „kvádrů“ přemění na organický tvar, který bude výsledkem topologické optimalizace. Před spuštěním výpočtu je potřeba zadat uživatelské požadavky jako jsou výše zmíněné.



Obrázek 5. Těleso s vyznačeným designovým prostorem [7]

Po výpočtu, který může trvat i několik hodin se zobrazí návrh vypočítaný počítačem. Jedná se jen o základní návrh. Software Altair Inspire, který byl pro tuto ukázkou zvolen, nabízí uživateli dvě možnosti, jak dokončit celou optimalizaci. První možností je využít automatického rozložení z vypočítaného návrhu, kdy program za uživatele vytáhne solid prvky podle vypočítané struktury. Druhou možností se nabízí, že si tuto proceduru udělá uživatel ručně sám a podstatně lépe než systém podle svých preferencí a konstruktérských zkušeností.



Obrázek 6. Návrh po výpočtu optimalizace tělesa [7]



Obrázek 7. Dokončování optimalizace ručním způsobem [7]

Na obrázku 7 je zobrazena rozpracovaná optimalizovaná součást, která je dokončována ručním způsobem za pomoci tzv. PolyNurbů. Tato funkce si zachytí průřez vypočítané struktury (hnědé oblasti) a pomocí zakliknutí a tažení uživatel vysune solid část prvku. Tímto stylem si pospojuje velké hlavní části, které později spojí pomocí mostové funkce, a tím vznikne finální optimalizovaná součást.

1.4 METODY OPTIMALIZACE

V této kapitole jsou stručně popsány základní tři metody pro řešení topologické optimalizace. Topologická optimalizace využívá MKP (metoda konečných prvků), jak již bylo popsáno v kapitole 1.2. Samotná metoda konečných prvků, se rozděluje podle použití elementů viz. Tabulka 1.

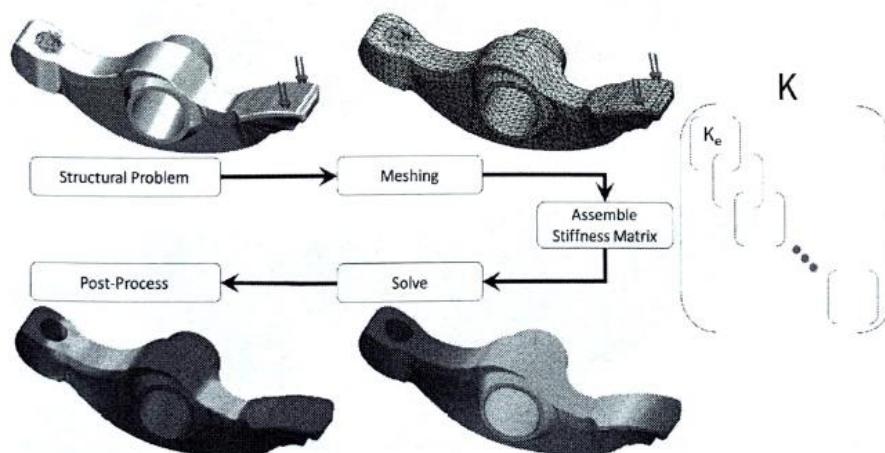
Tabulka 1. Souhrn metod optimalizací MKP

ISE	Isotropic Solid or Empty element	Izotropní pevný nebo prázdný element
ASE	Anisotropic Solid or Empty element	Anizotropní pevný nebo prázdný element
ISEP	Isotropic Solid, Empty or Porous element	Izotropní pevný, prázdný nebo porézní element

Co se týče jednotlivých metod, tak podle tabulky 1 je vidět základní souhrn metod konečných prvků podle použití elementů. Uspořádání elementů ISE (izotropních pevných nebo prázdných elementů) využívá elementy tvořené jedním materiálem se známými vlastnostmi, ale zároveň je možnost vybrat materiál ze skupiny několikatero materiálů. Dále uspořádání elementů ASA (anizotropní pevný nebo prázdný element) využívá elementy, kde jsou jasné dané mechanické vlastnosti, které se liší element od elementu. Jako posledním zmíněným uspořádáním je ISEP (izotropní pevný, prázdný nebo porézní element) element, který využívá elementy s prázdným a současně jedním nebo vícero materiálech o známých vlastnostech. [4][8][9]

1.4.1 ANALÝZA KONEČNÝCH PRVKŮ

Analýza metody konečných prvků je mocná numerická metoda pro simulaci fyzikálních jevů v tomto světě a hraje zásadní roli v topologické optimalizaci. Při topologické optimalizaci může být použita obecná analýza konečných prvků, ale vysoce efektivní a přizpůsobená analýza pro topologickou optimalizaci může celý proces výpočtu značně urychlit. [10]

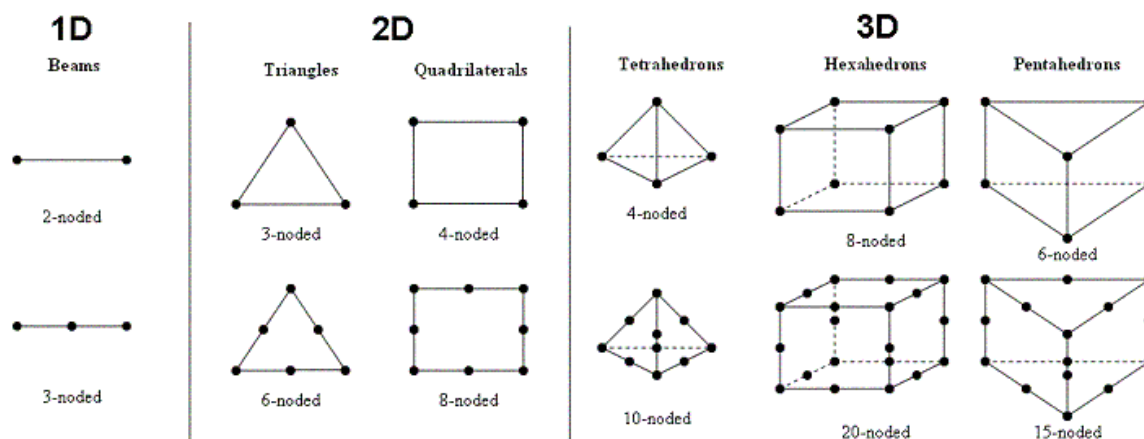


Obrázek 8. Postup analýzy konečných prvků [10]

Jako první operací při analýze je potřeba geometricky definovat problém. To znamená, zadané těleso společně s jeho zatížením a ukotvením. Tato geometrie je zdiskretizována do konečných prvků tedy „meshe“ neboli mřížkové struktury. Dalším krokem v tomto postupu je, že pro každý element je vytvořena matice tuhosti jednotlivého elementu, tyto matice elementů jsou následně spojeny do globální matice tuhosti. Výsledný systém rovnic je dále vyřešen k nalezení neznámého pole. Posledním krokem analýzy je následné zpracování pro výpočet dalších odvozených polí. [10]

1.4.2 TYPY SÍŤOVÁNÍ

V předchozí kapitole byla zmíněna jedna část z procesu pojmenovaná síťování. Jednotlivé konečné elementy této sítě jsou často tvaru trojúhelníkového nebo čtvercového pro 2D zobrazení a pro 3D jsou zde typy čtyřhranů a šestihranů. Ostatní typy podle obrázku 9. Je samozřejmé, že vícebodé elementy zaručují přesnější výsledek, ale za cenu náročnějšího výpočtu. [10]



Obrázek 9. Typy síťování [11]

Pro řešení topologické optimalizace jsou se využívají tři základní výpočetní strategie s využitím metody ISE (izotropních pevných nebo prázdných elementů). Těmito základními strategiemi jsou:

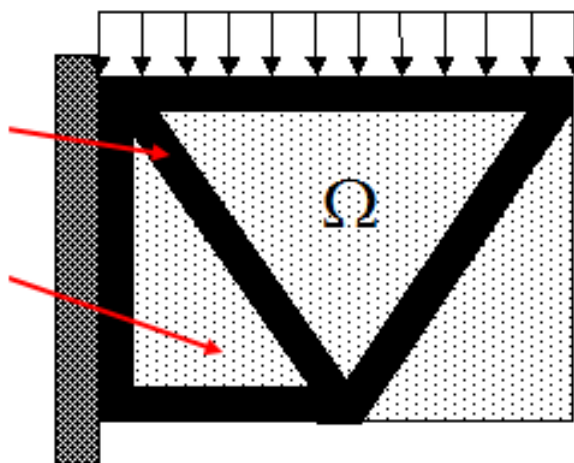
- Metoda SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization)
- Metoda OMP (Optimal Microstructure with Penalization)
- Metoda NOM (NonOptimal Microstruture)

1.4.3 SIMP

Metoda SIMP neboli pevná izotropní mikrostruktura s penalizací je jedna z nejpoužívanějších a nejdílenějších metod pro tvorbu návrhu topologické optimalizace a její formulaci uvedl M. P. Bendsoe v roce 1989. Jak už z názvu vyplývá, tak tato metoda využívá pevnou izotropní mikrostrukturu s penalizací pro střední hodnoty. Podle pana Bendsoeho má „*optimalizace tvaru v tom nejobecnějším nastavení tvořit určení tvaru v každém bodu nezávisle na tom, zda se v něm materiál nachází či ne.*“ [4] Z tohoto výroku pana Bendsoeho vyplývá, že materiálová hustota může nabírat hodnoty 0 až 1. Hodnotová oblast 0 znázorňuje, že model bude v této oblasti nulový, to znamená, že se zde nebude nacházet žádný materiál. Zatímco oblast 1 je popisována jako oblast s fiktivním materiálem. Optimalizace je běžně řešena pomocí náhrady působíště do oblasti konečných prvků. To znamená, že každý prvek má dvě možnosti. Buď je vyplněn materiálem v místech, kde to optimalizovaná součást vyžaduje, nebo je zde druhá možnost, kdy si optimalizace vytyčí oblast, ze které může materiál odebrat. Rozložení hustoty použitého materiálu uvnitř působíště návrhu ρ je dána pro každý prvek binární hodnota. [8][9][12]

- $\rho_e = 0$ pro oblast, kde materiál není potřeba a je odebrán (bílá oblast)
- $\rho_e = 1$ pro oblast, kde je materiál potřebný (černá oblast)

Popis rozložení hustot materiálu uvnitř návrhu je předveden na obrázku 10.



Obrázek 10. Optimalizovaný návrh hustot vetknutého nosníku [12]

Pro realizaci vyhnutí se těmito jedinými dvěma stavům 0 a 1, je potřeba zavést souvislé distribuce relativní hustoty. Ke každému elementu se tato relativní hustota může pohybovat mezi minimální hodnotou ρ_{min} a právě maximální hodnotou 1, která dovoluje přiřazení mezilehlých hustot elementům.

- ρ_{min} je minimální možná hodnota relativní hustoty pro prázdné elementy, která se nerovná nule. Zajišťuje stabilitu analýzy metody konečných prvků.

Tato relativní hustota materiálu má schopnost se spojitě měnit, a to zároveň ovlivňuje i to, že se mohou spojitě měnit Youngovy moduly materiálu pro každý element. Proto je pro každý element počítán vztah mezi součinitelem hustoty materiálu ρ_e a výše zmíněným Youngovým modulem pružnosti vybraného modelu izotropního materiálu E_0 vycházejícího ze zákona síly. [12]

$$E_{(\rho_e)} = \rho_e E_0 \quad (1)$$

V definici této metody se objevuje ještě jeden pojem, který v této práci nebyl dosud objasněn. Penalizace – penalizací se myslí součinitel penalizace „p“, který snižuje výhodu elementů s mezilehlými hustotami k celkové tuhosti. Tento zmiňovaný součinitel penalizace předává řešení na elementy, pro které platí $\rho_e = 0$ nebo $\rho_e = 1$.

- $\rho_e = 0$ – prázdný element
- $\rho_e = 1$ – tuhý element

Tato redukce elastického modulu materiálu má i menší mínus, a to takové, že návrh optimalizace sníží tuhost elementu. Proto se musí při metodě SIMP počítat globální tuhost, a to podle rovnice:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + 1(1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (2)$$

Kde K_e – matice tuhostí elementu,

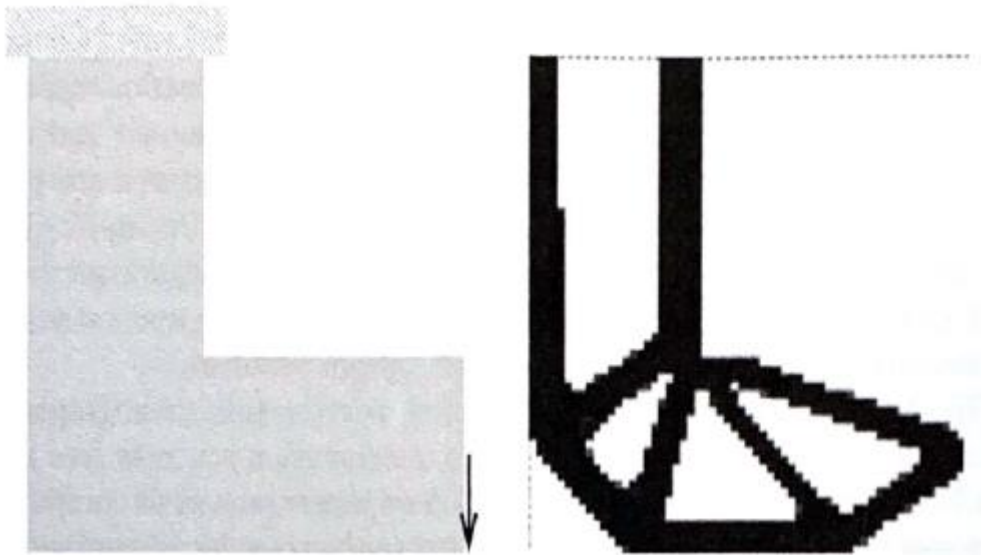
ρ_e – relativní hustota elementu,

ρ_{min} – minimální relativní hustota,

P – součinitel penalizace,

N – počet elementů v navrhovaném působišti.

Návrh L-profilu z vetknutého nosníku na obrázku 11 zatíženého jednou silou umístěnou ve vertikálním směru. Jedná se o optimalizování hustot získaným interpolačním schématem SIMP, kdy je objem materiálu omezen na 47 %, při diskretizaci 60x60 elementů.



Obrázek 11. L-profil před a po optimalizaci [4]

Výhoda této metody spočívá v jednoduchosti výpočtu, proto je velice efektivní pro použití. SIMP metoda nevyžaduje homogenizaci mikrostruktury.

- Vysoká efektivita
- Nevyžaduje homogenizaci mikrostruktury

1.4.4 OMP

Metoda OMP (Optimal Microstructure with Penalization), využívá optimální mikrostrukturu s penalizací středních hustot. Celá tato metoda spočívá v hledání konečné optimální mikrostruktury pro finální element. Tato metoda je využívána pro úlohy s minimální či maximální tuhostí, nebo úlohy, kde tato tuhost vystupuje ve vedlejších podmínkách. Tyto úlohy jsou děleny na 2D a 3D úlohy. Pro 2D má optimální mikrostruktura tři volné parametry, a to v podobě dvou hustot a jedné orientace. V 3D úlohách je 5 volných parametrů, konkrétně tři hustoty a dvě orientace. Hlavní nevýhodou této metody je použití mikrostruktur a nevyhovující penalizace, protože obsahuje velké množství středních hustot. Další nevýhodou je velké množství proměnných, zhoršená efektivita výpočtu a celkově tato metoda využívá vyššího stupně matematické úrovně. [8][9]

- Velké množství proměnných
- Vyžaduje homogenizaci mikrostruktury
- Výsledek je nekonvexní

1.4.5 NOM

Metoda NOP (NonOptimal Microstructures), je založena na možnosti využití neoptimální mikrostruktury a zároveň pracuje bez penalizace. U metody neoptimálních mikrostruktur bývá počet neznámých parametrů menší než u výše zmíněné metody OMP.

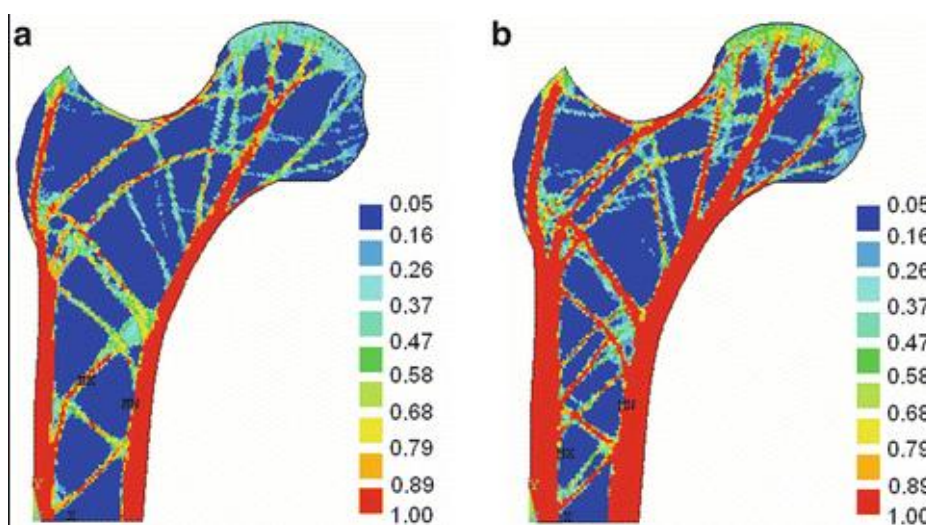
- Výsledek je nekonvexní
- Vyžaduje homogenizaci mikrostruktury
- Fixní stupeň penalizace

1.4.6 DDP

Poslední zmíněnou metodou v této práci je metoda DPP (Dual Discrete Programming), která užívá pevnou izotropní mikrostrukturu a nepoužívá penalizaci. Konvexními aproximacemi původního problému se tato metoda dostane k požadovanému cíli návrhu.

1.5 VYUŽITÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE V PRAXI

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1. topologická optimalizace se zatím nevyužívá pravidelně a v nějakém hojném počtu v praxi. Samozřejmostí je ale i to, že topologická optimalizace není zastoupena jen ve strojírenství, ale má mnoho využití jak v dentálním průmyslu, který tuto metodu využívá pro návrh korunek či můstků nebo zdravotnického průmyslu, ze kterého tato metoda v podstatě mírně vychází. Při pohledu na strojní součást navrhnutou pomocí topologické optimalizace, je na první pohled vidět, že je dost podobná stavbě kostí v našem těle, které disponují vysokou odolností.



Obrázek 12. Topologie vnitřní výplně kosti [14]

Na obrázku 12 jde vidět topologický návrh vnitřní výplně kosti. Levý obrázek „a“ zobrazuje návrh s procentuálně nižší hustotou výplně a obrázek pravý „b“ má pro kost optimálnější hustotu výplně. Lze tedy vidět, že zajímavé tvary, jaké topologická optimalizace nabízí, jsou s námi už od pradávna.

1.5.1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie v dnešní době nabírají na významu společně s prodejem desktopových tiskáren, které jsou mnohem dostupnější k domácímu použití. Jedním z největších klenotů v 3D světě je populární desktopová tiskárna Průša. Majitel firmy Prusa Research označovaný jako Král 3D tisku Josef Průša získal začátkem roku ocenění podnikatele roku za výrobu a distribuci českých tiskáren po celém světě.



Obrázek 13. Desktopová 3D tiskárna Prusa i3 MK3S+ [17]

Aditivní technologie neboli 3D tisk se odlišuje od konvenčních způsobů výroby. Na rozdíl od klasického obrábění, kde je materiál odebírán, 3D tisk využívá úplně opačného principu. Záleží, jakou metodou danou součástku tiskneme, ale princip tisku spočívá v nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe v určité výšce vrstvy, která udává i kvalitu výsledného výtisku.



Obrázek 14. Topologický návrh konzole nástěnné police FDM [15]

V dnešní době už existuje vícero možností, z jakých materiálů je možné tisknout. Zpočátku měli tiskaři možnost tisku jen pomocí různých druhů termoplastů, jako jsou PLA, ABS, NYLON, PETG, ale v posledních letech se objevila metoda SLM (Selective Laser Melting), která používá jako materiál různé druhy prášku na bázi kovu. Tím se ve světě strojírenství stává topologie úplně do jiné pozice. Oproti plastům jsou kovy mnohonásobně pevnější a je zde větší prostor pro realizaci v praxi.



Obrázek 15. Výroba dílu pomocí technologie SLM [16]

2 OZUBENÉ KOLO

Ozubené kolo je válcová součást, která má po obvodu tvarově definované ozubení, které zapadá do jiného ozubeného kola s odpovídajícím ozubením a přenáší tak mechanickou energii mezi hřídelemi nebo otočnými součástkami stroje. Takto zabírající kola jsou obecně nazývána ozubeným soukolím. Ozubené kolo patří mezi základní konstrukční součásti různých strojů a převodovek. [18]



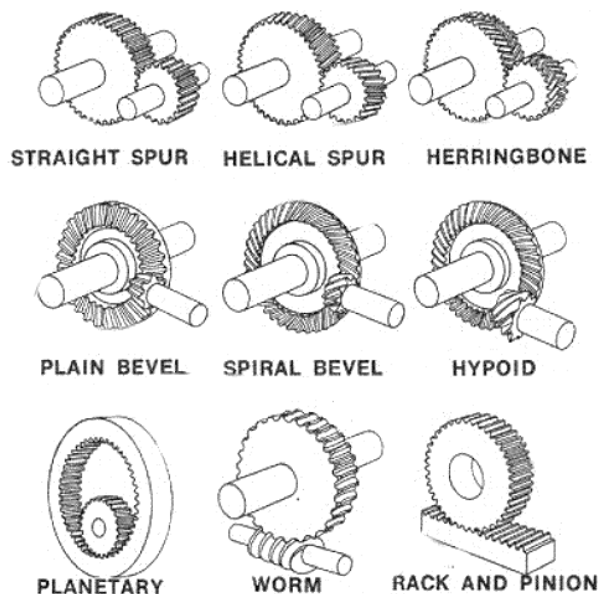
Obrázek 16. Ozubené kolo [19]

2.1 DRUHY OZUBENÝCH SOUKOLÍ

Druhy ozubených soukolí se dělí podle vzájemné polohy os hřídelů, mezi kterými je mechanická energie přenášena.

- Čelní s vnějším nebo vnitřním ozubením, určené pro přenos pohybu mezi rovnoběžnými osami. (přímé a šikmé zuby)
- Kuželová, určená pro přenos pohybu různoběžných os s přímými, šikmými nebo zakřivenými zuby.
- Šroubové, hypoidní, válcová kola, šnekové a spiroidní, určené pro přenos pohybu mezi mimoběžnými osami.

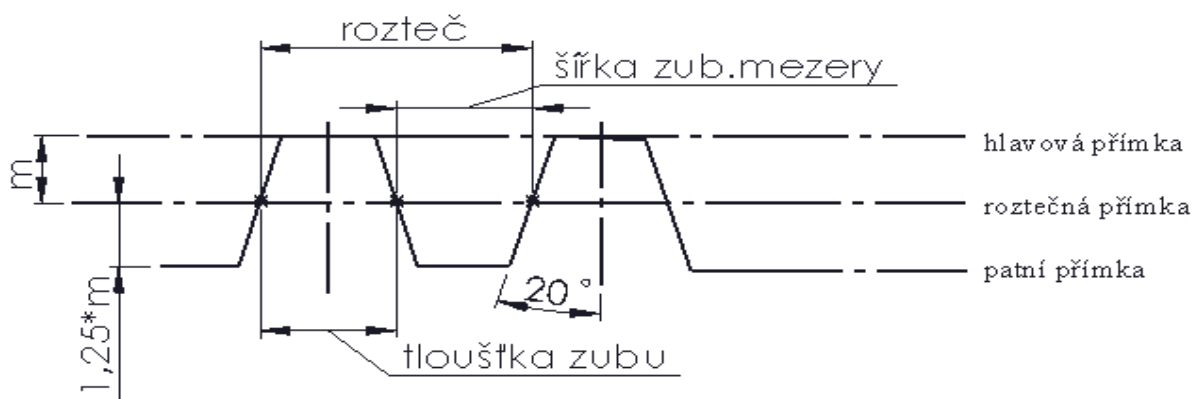
TYPES OF GEARS



Obrázek 17. Druhy ozubených soukolí a jejich uspořádání [20]

2.2 ZÁKLADNÍ PROFIL

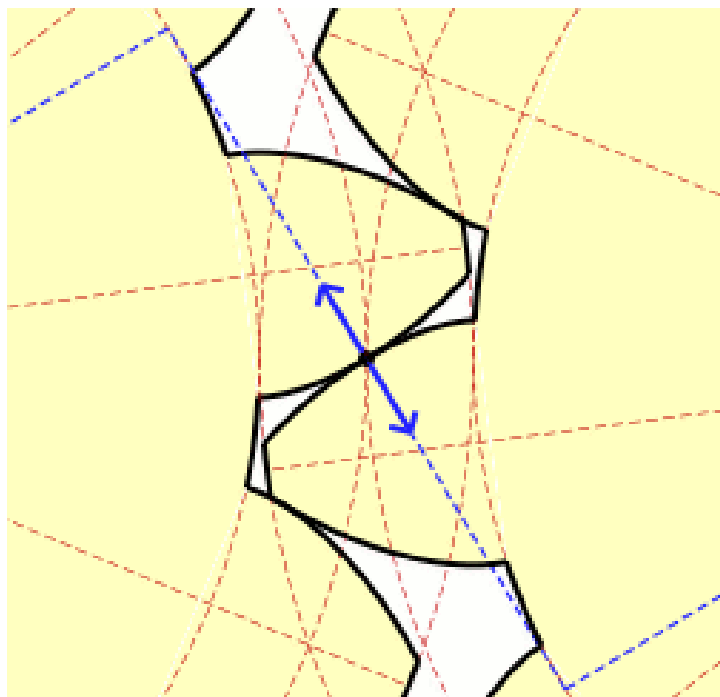
Základní profil nese několik hlavních pojmů. Jedním z hlavních je modul ozubeného kola. Modul je základním rozměrem základního profilu ozubených kol. Velikosti modulů jsou normalizovány. Pro úplné určení ozubeného kola stačí pouze velikost modulu a počet zubů kola. Jedním nástrojem jsme schopni vyrobít ozubená kola s jakýmkoliv počtem zubů. Další parametry ozubených kol jsou rozepsány níže na obrázku 18.



Obrázek 18. Základní profil ozubeného kola

2.2.1 EVOLVENTNÍ OZUBENÍ

Evolventní ozubení patří mezi nejčastěji využívaný typ ozubení. Je výjimečné z důvodu bočního činného tvaru zubu. Tvar zubu je tvořen malou částí evolventy neboli spirálové křivky, kterou tvoří bod přímky, odvalující se po nehybné základní kružnici. Právě při záběru dvou ozubených kol se bod, ve kterém se dva zuby dotýkají, pohybuje po přímce záběru, která je zároveň i nositelkou přenášené síly ozubených kol. Kolmá vzdálenost této přímky na ose otáčení je konstantní, díky tomu jsou síly v daném okamžiku stejné a tím i přenášený kroutící moment. [21]



Obrázek 19. Záběr ozubených kol s evolventním ozubením [21]

Na obrázku 19 jsou vidět dvě modré šipky, které znázorňují síly, konkrétně akci a reakci v bodě dotyku dvou evolventních zubů. Modrá čárkovaná čára, po které se posouvá dvojice sil se nazývá dráha záběru. [21]

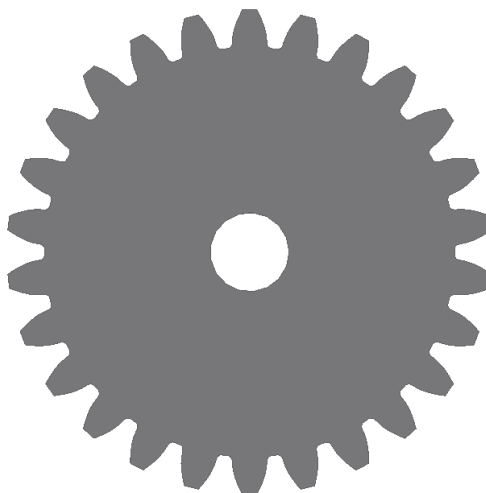
U evolventního ozubení jsou dva hlavní druhy kol:

- Přímoboké ozubení – Nejjednodušší ozubená kola. Toto ozubení je levné na výrobu, ale v provozu je hlučné a relativně málo účinné.
- Šikmобoké ozubení – Evolventa je navinuta na šroubovou plochu pod určitým úhlem stoupání. Při kombinaci dvou kol musí být jedno kolo levé, druhé kolo pravé. Tato soukolí jsou tišší, mají vyšší účinnost. Hlavní nevýhodou je vznik axiální síly, kterou je potřeba eliminovat.

3 NÁVRH OPTIMALIZACE OZUBENÉHO KOLA

3.1 VÝCHOZÍ MODEL PRO OPTIMALIZACI

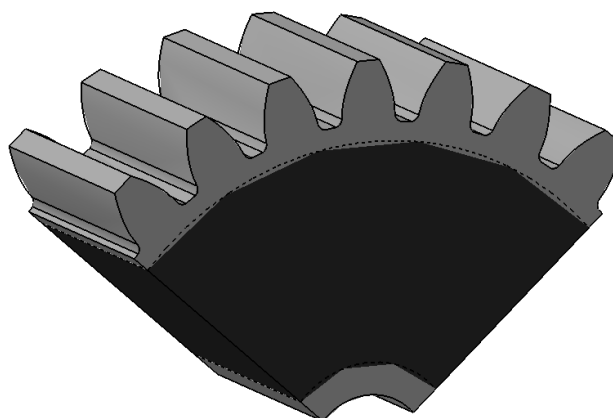
Základní ozubení bylo vymodelováno v softwaru SolidEdge 2020 od společnosti Siemens. SolidEdge disponuje funkcí generátoru čelního ozubení, díky kterému je možné si tabulkově vymodelovat vlastní ozubené kolo. Pro tuto práci bylo vygenerováno ozubené kolo s modulem 3,5 mm a počtem zubů 26 o šířce 30 mm. Toto ozubené kolo bylo vybaveno válcovým otvorem pro pozdější nalisování případné hřídele.



Obrázek 20. Ozubené kolo SolidEdge

3.2 NÁVRH OPTIMÁLNÍHO TVARU

Výpočet takto celého kola je zbytečný, a proto je na zvážení využít symetrii kola a celý model ořezat pomocí symetrických rovin. V tomto případě bylo kolo oříznuto na výseč 90 stupňů pro pozdější využití funkce pole.

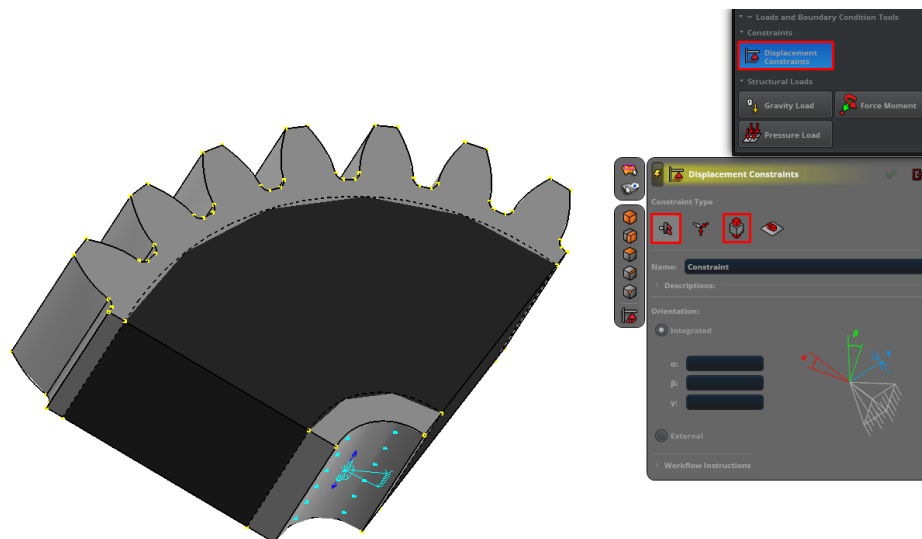


Obrázek 21. Výseč ozubeného kola – 90 stupňů.

Celý optimalizační proces byl proveden ve výpočtářském softwaru MSC Apex Generative Design, jak bylo zmíněno v kapitole 1.3.

3.2.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

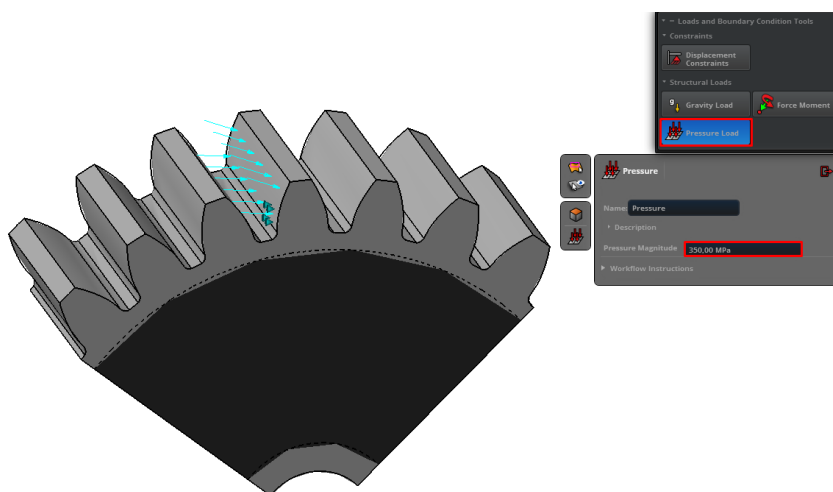
Jedním z hlavních zadání výpočtového úkolu je zadání okrajových podmínek v simulačním softwaru. Jedná se o ukotvení a zatížení modelu s definicí materiálu tělesa a popřípadě nasimulování okolních jevů v prostředí, kde se těleso nachází.



Obrázek 22. Nastavení okrajových podmínek – vazby

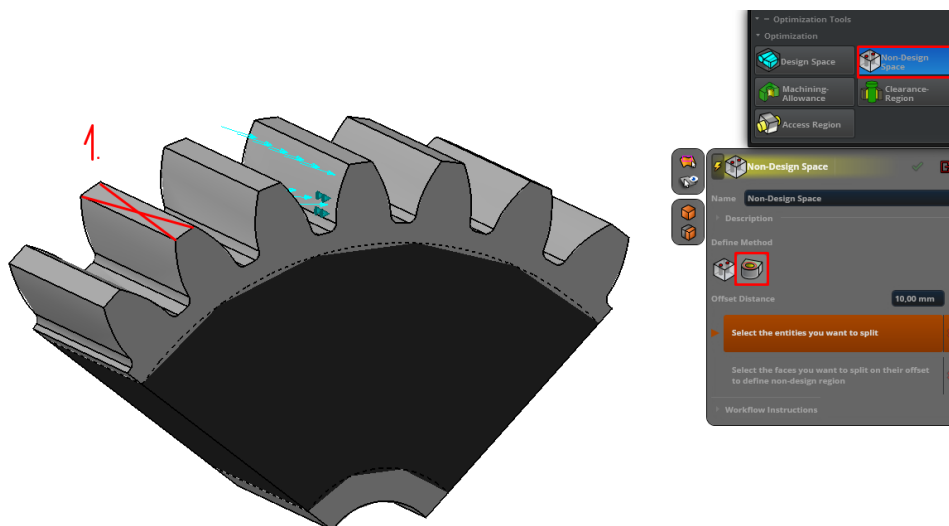
Prvním bodem bylo nastavení ukotvení části ozubeného kola. K tomuto ukotvení byla využita vazba vetknutí a vazba „axial“, která zamezila pohyb kola v axiálním směru. Těmito podmínkami bylo ozubené kolo pevně zavazbeno.

Mezi hlavní okrajové podmínky také patří zatížení optimalizovaného tělesa. Zatížení může být zvoleno buď plošně pomocí tlaku, anebo pomocí vektorově nasměrované síly. V tomto případě byla zvolena varianta zatížení pomocí tlaku na zub. Jelikož je celá tato práce rešeršního charakteru a zároveň i o aplikování topologické optimalizace na ozubené kolo, tak zvolený tlak je jen orientační z důvodu nevyužití této optimalizace na konkrétním kole v nějakém strojním ústrojí. Pro tento případ byl zvolen tlak o velikosti 350 MPa na bok jednoho zubu.

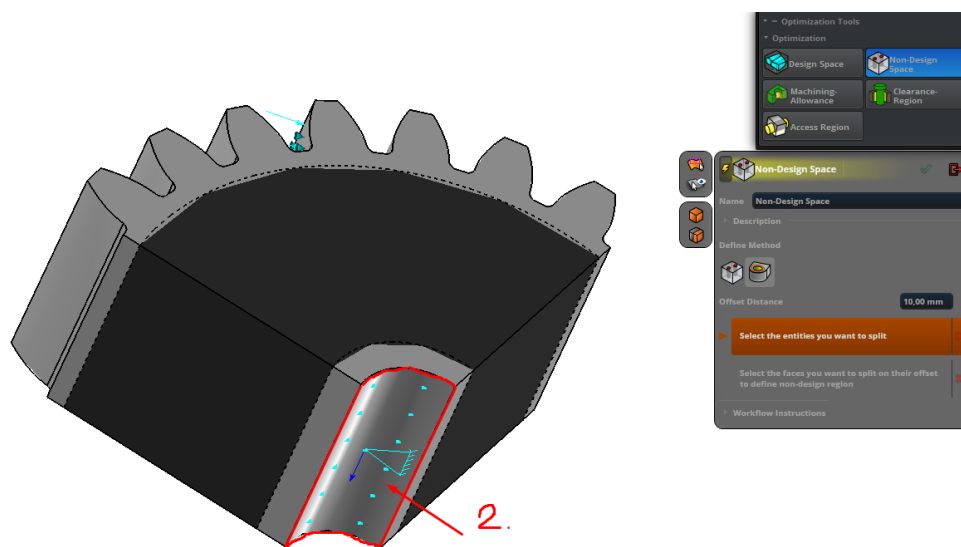


Obrázek 23. Nastavení okrajových podmínek – zatížení

V dalším kroku je třeba si vydefinovat designový prostor, který bude podléhat optimalizačnímu prostředí. Jedná se o prostor, kde se bude nacházet upravená struktura modelu. V tomto případě bylo zvoleno mezikruží pod úrovní paty zubů a nad válcovým nábojem. Tento prostor bude potřeba v pozdějších krocích ještě upravit do finální podoby v CAD softwaru.



Obrázek 24. Nastavení okrajových podmínek – Desing space 1



Obrázek 25. Nastavení okrajových podmínek – Desing space 2

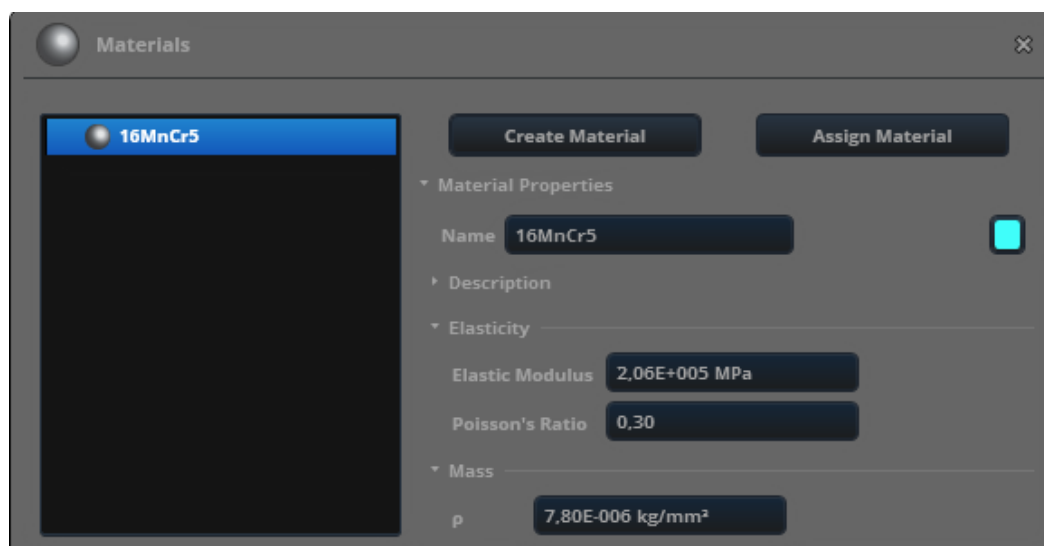
Pomocí funkce „Non-design space“ byl určen nedesignový prostor s využitím výběru odsazení od plochy. Od plochy č.1 bylo nastaveno 10 mm odsazení a pro plochu č.2, 5 mm odsazení. Toto odsazení vydefinuje designový prostor pro optimalizační strukturu.

Společně s definováním designového prostoru úzce souvisí i výběr materiálu, ze kterého bude kolo vyrobeno. Pro tuto práci byl zvolen materiál s označením 16MnCr5. Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou mangan-chromovou ocel vhodnou k cementování. Využívá se pro středně namáhané strojní součásti, jak pro vozidla, tak i do různých strojů.

Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCrS5)									1.7131 (1.7139)						
Druh oceli	Nízkolegovaná ušlechtilá mangan-chromová ocel k cementování														
TDP	ČSN EN 10084														
Dřívější označení	16MnCr5 (16MnCrS5) podle DIN 17210, 14 220 podle ČSN														
Charakteristika	Nejčastěji používaná cementační ocel pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Prokaluje do hloubky ca 30 mm. Ve stavu kaleném a popuštěném je použitelná pro průměry do ca 35 mm. Je svařitelná a vhodné tepelné zpracování též dobře tvařitelná za studena. Přísadou bóru (0,0008 až 0,0050%) se docílí zvýšené houževnatosti cementované vrstvy.														
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S ¹⁾ max.	Cr	Mo	Ni	Al						
	0,14-0,19	0,40	1,00 – 1,30	0,035	0,035	0,80 – 1,10	-	-	Při kontrolované velikosti austenitického zrna 0,015-0,050 (informativně; není uvedeno v normě).						
Dovolené odchylky od složení tavby ve výrobku ⁴⁾	± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	-	-							
Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popuštění při 150-200 °C (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084) ²⁾	Průměr v mm		Re min. MPa	Rm MPa		A min %	Z min %		KCU min. J.cm ²						
	d ≤ 11		735	1030 – 1375		8	-		25						
	11 < d ≤ 25		540	785 – 1080		9	-		30						
25 < d ≤ 40		490	685 – 930		10	-		30							
Hodnoty tvrdosti HB pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (S)			Žháno na měkko (A)			Zpracováno na rozmezí tvrdosti (TH)		Zpracováno na feriticko-perlitickou strukturu (FP)						
	max. 255			max. 207			156 - 207		140 - 187						
	Stav po válcování			Stav po normalizaci			Žháno na globulární cementit (vhodné pro tváření za studena)								
ca 250 ⁵⁾			ca 220 ⁵⁾			max. 178 ⁵⁾									
Prokalitelnost	Druh	Meze	Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm												
			Tvrdost v HRC												
			1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
	H	max.	47	46	44	41	39	37	35	33	31	30	29	28	27
	min.	39	36	31	28	24	21	-	-	-	-	-	-	-	
HH	max.	47	46	44	41	39	37	35	33	31	30	29	28	27	
	min.	42	39	35	32	29	26	24	22	20	-	-	-	-	
HL	max.	44	43	40	37	34	32	30	28	26	25	24	23	22	
	min.	39	36	31	28	24	21	-	-	-	-	-	-	-	

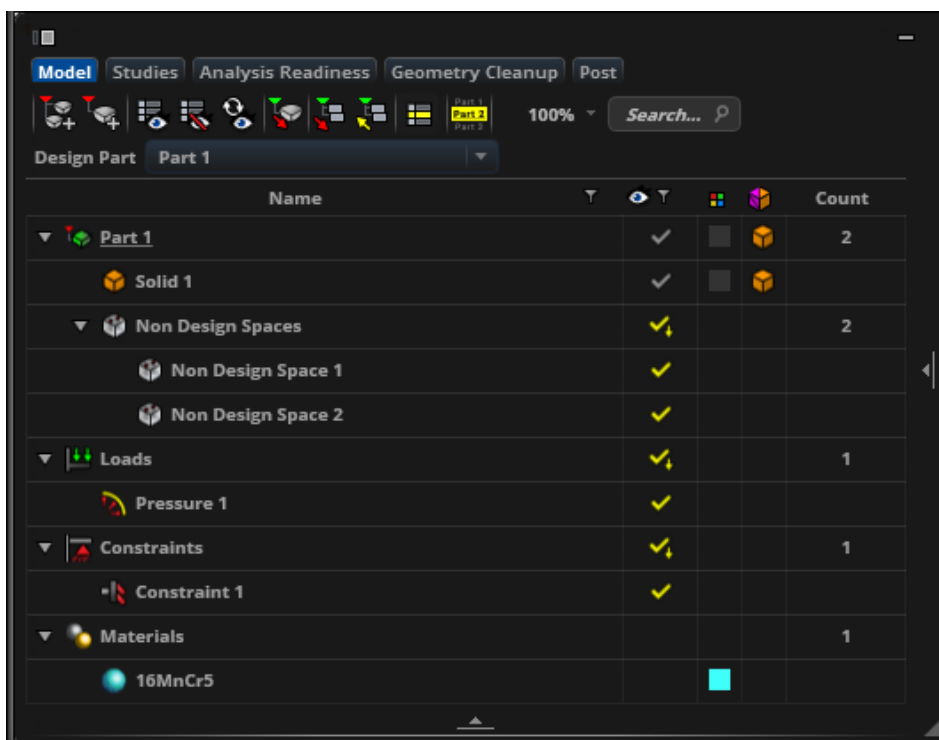
Obrázek 26. Přehled vlastností oceli [22]

Vlastnosti oceli se hodí pro pozdější nastavení výpočtu. Do softwaru MSC Apex je třeba definovat materiál 16MnCr5. K tomu slouží tabulka, do které je potřeba vepsat hodnoty daného materiálu.



Obrázek 27. Nastavení okrajových podmínek – materiál

Pro shrnutí okrajových podmínek, které se postupně vytvářejí vznikne tabulka v levé části obrazovky viz. obrázek 28. Tato tabulka je uživatelsky přehledná a její hodnoty lehce editovatelné.



Obrázek 28. Tabulka okrajových podmínek

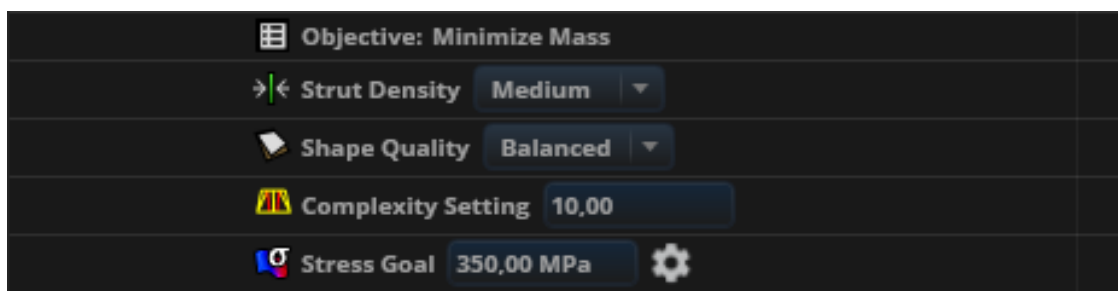
3.2.2 NASTAVENÍ VÝPOČTU

Výpočty takto složitých tvarů jsou obecně relativně dosti výpočetně náročné. Náročnost výpočtu, zároveň i jeho délku trvání můžeme ovlivnit následujícími nastaveními. Jednotlivé výpočty v softwaru MSC Apex Generative Design nazýváme studie. Studie obsahuje úkol, který má docílit zvoleného výsledku. V tomto případě byl zvolen úkol minimalizování hmotnosti ozubeného kola. Úkol je možné zaměřit i na frekvence kmitání, popřípadě nejvyšší pevnost součásti.

Co nejvíce ovlivňuje délku výpočtu jsou následující tři parametry ve studii. Jedná se o:

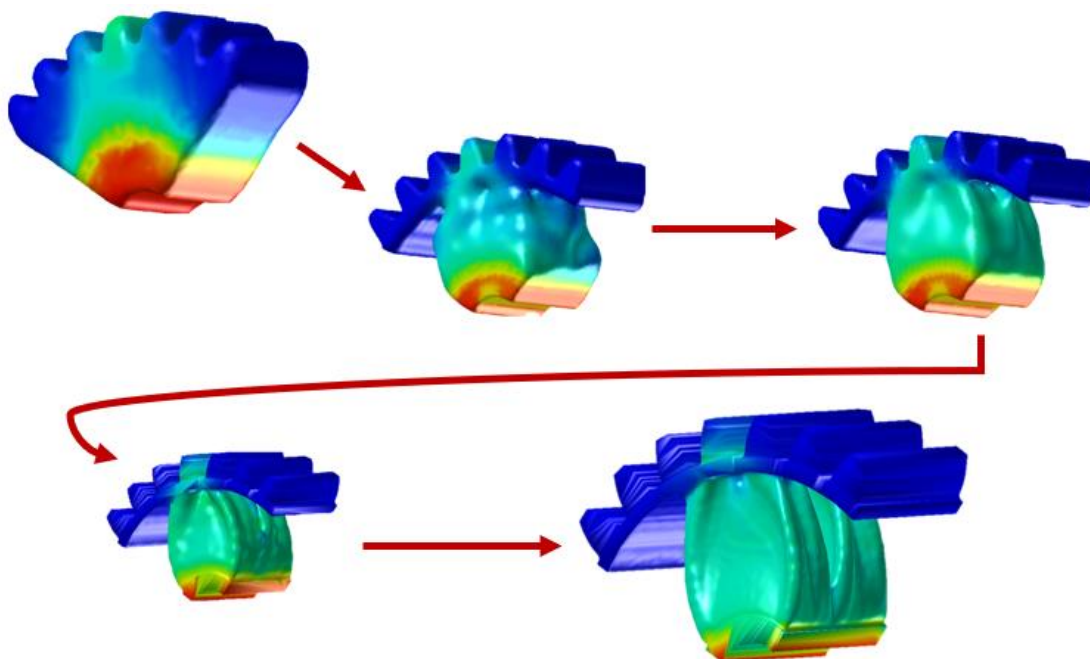
- Hustotu rozložení – hustá, střední, jemná,
- Kvalitu tvaru – náhledová, vyrovnaná, odladěná,
- Komplexnost výpočtu – od 1 – XX – čím vyšší hodnota, tím je výpočet složitější,
- Cílové napětí – hodnota v MPa.

Pro tento výpočet bylo zvoleno nastavení těchto parametrů. Obecně byly zvoleny střední hodnoty hustoty rozložení a kvality tvaru z důvodu náročnosti výpočtu. Hodnota cílového napětí byla zvolena jako polovina meze kluzu materiálu 16MnCr5.



Obrázek 29. Tabulka nastavení výpočtu

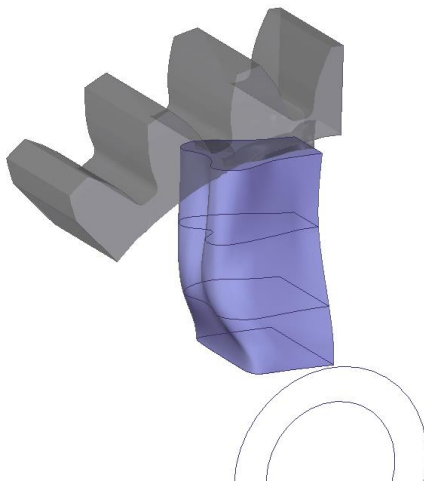
Posledním krokem je spuštění simulace s následným vygenerováním všech potřebných iterací výpočtu. Na obrázku 30 je zobrazeno pár vybraných iterací z celkových 64 celého procesu. Je zřejmé, že v prvních několika iteracích se budoval a hledal konkrétní tvar designového prostoru až po finální podobu návrhu.



Obrázek 30. Průběh iterací prvního výpočtu

3.3 ÚPRAVA NÁVRHU V CAD SOFTWARE

Výsledný návrh topologické optimalizace ze softwaru MSC Apex GD je exportován do souboru STL, který se následně upraví v CAD software. Takto vyexportovaný model byl dále rozdělen na dvě poloviny pro dosažení maximální symetrie modelu. Bohužel už v této fázi je zřejmé, dle obrázku 31, že optimalizace nebude absolutně vyhovovat podmínkám v praxi z důvodu absence materiálu pod některými zuby.



Obrázek 31. Skici průřezů tělesa z 1/8 tělesa

V prvním kroku bylo potřeba plochami rozdělit navrhnuté původní těleso a v rozdělených místech rozkreslit roviny se skicami pro převzetí původních křivek. Tyto křivky obsahují spoustu bodů, které je potřeba upravit pro následné tažení ploch. Jelikož je tvar po optimalizaci velice neucelený, je potřeba mu udělit strukturu a plošné těleso mírně uhladit.

V dalším kroku je potřeba navázat na zachovaná místa v ozubeném kole. SolidEdge disponuje funkcí nahradit plochu, kdy je možné vybranou plochu protáhnout do místa, kde je to potřeba. Konkrétně v tomto případě do místa pod ozubením a k mezikruží u náboje, jak je vidět na obrázku 32.



Obrázek 32. Navázání na zachovalé tvary

Jedním z posledních kroků pro dokončení úpravy modelu je zrcadlení tělesa, aby těleso mělo opět stejnou šířku jako při optimalizaci. Pro zajímavost je zde vidět, při pohledu na obrázek 33, jak optimalizovaný tvar připomíná kost. Tento tvar je ještě nutné zkopírovat pomocí pole okolo kružnice, a tím vytvořit podpory pod většinou zubů na ozubeném kole. Zkopírovaných instancí bylo pro tento případ zvoleno pět. V neposlední řadě je potřeba vysunout oblast ozubení a náboje pro hřídel.



Obrázek 33. Zrcadlený návrh topologické optimalizace

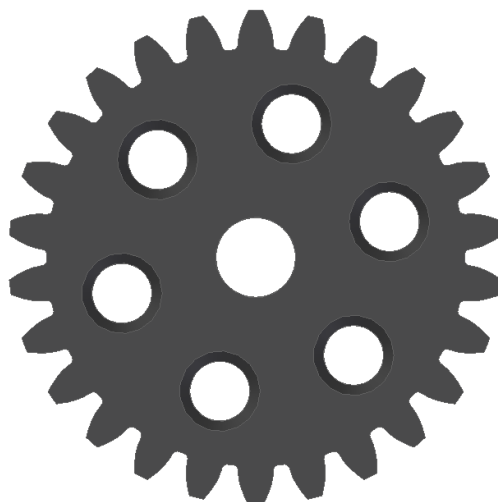


Obrázek 34. Finální podoba optimalizovaného ozubeného kola

Z finálního návrhu, který je zobrazen na obrázku 34 je zřejmé, že nebude dokonale vyhovovat v praxi, kvůli absenci materiálu pod některými zuby. Bohužel software MSC Apex Generative Design nedisponuje pro tento případ vhodnými symetrickými nástroji, které by dokázaly provést optimalizaci z celého kola jen se zadanými symetrickými rovinami, proto byl návrh lehce improvizovaně symetrizován ručně v CADu uživatelem. Ideálním případem by bylo symetricky optimalizovat jen výseč pod jedním zubem s daným mezikružím, a tento výsledek dále dopravit.

3.4 VÝPOČET NEOPTIMALIZOVANÉHO KOLA

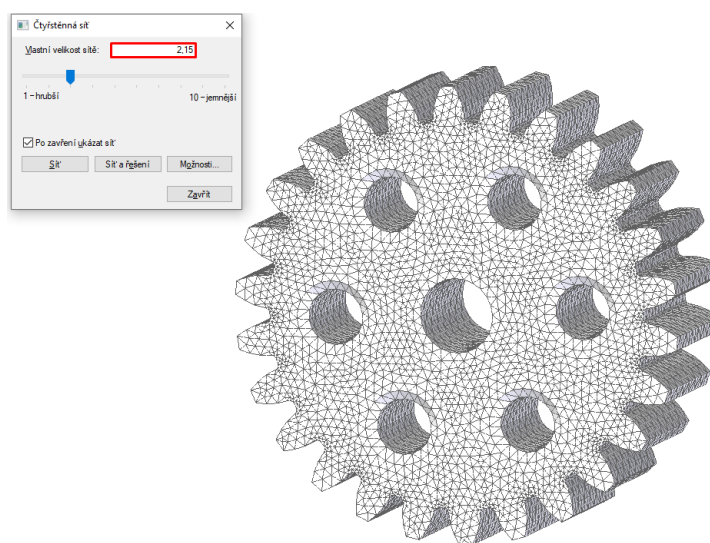
Pro závěrečnou analýzu je potřeba zatížit i původní výchozí kolo, abychom zjistili nějaké výsledky pro porovnání s optimalizovaným kolem. Toto kolo bude pro simulaci „optimalizace“ odlehčeno 6-ti dírami a 2 mm zkosením pod 45 stupni, tak jak se běžně v praxi používá pro snížení váhy. Cílem finálního výpočtu pomocí metody konečných prvků bude zjistit, jaké napětí a posuny se během zatížení zubu odehrávají v celém kole. Simulační výpočet nyní bude proveden v softwaru od společnosti Siemens – SolidEdge 2020.



Obrázek 35. Odlehčené ozubené kolo

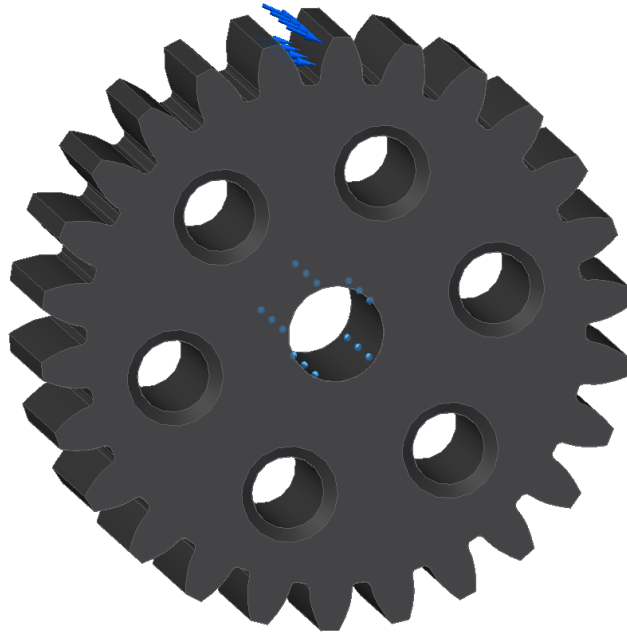
3.4.1 NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK – MKP

Stejně jako v předchozích kapitolách je potřeba nastavit okrajové podmínky. Místo zatížení, pevně zakotvená místa, materiál, popřípadě typy síťování počítaného tělesa. Pro tento model byla zvolena čtyřstěnná síť o velikosti 2,15 mm. Jedná se spíše o hrubší síťovanou strukturu, která umožní výpočet provést podstatně rychleji.



Obrázek 36. Nastavení sítě tělesa

Kolo bylo opět zatíženo tlakem o velikosti 350 MPa a zakotveno pevnou vazbou v místě pro pozdější nalisování hřídele.



Obrázek 37. Zatížení a kotvení ozubeného kola

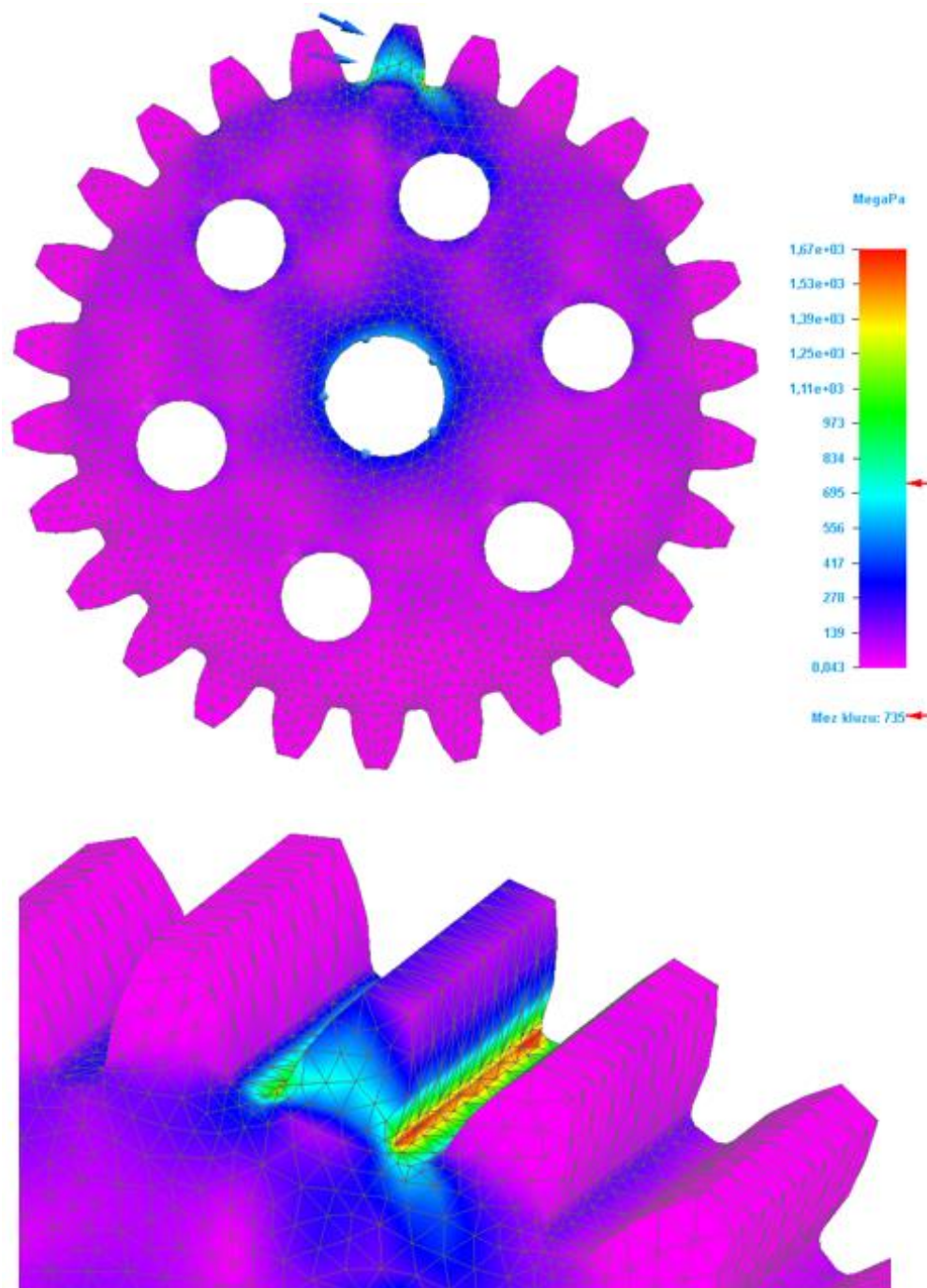
Nyní je kolo připraveno pro samotný výpočet této simulace. Po provedení výpočtu je potřeba upravit, jak má být deformace zobrazována. V SE máme tři možnosti nastavení deformace:

- Procentuální
- Normalizovaná
- Skutečná

Vzhledem k tomu, že při pevnosti materiálu a zadaného zatížení bude posunutí velice malé, tak byla zvolena procentuální deformace s hodnotou 2 %.

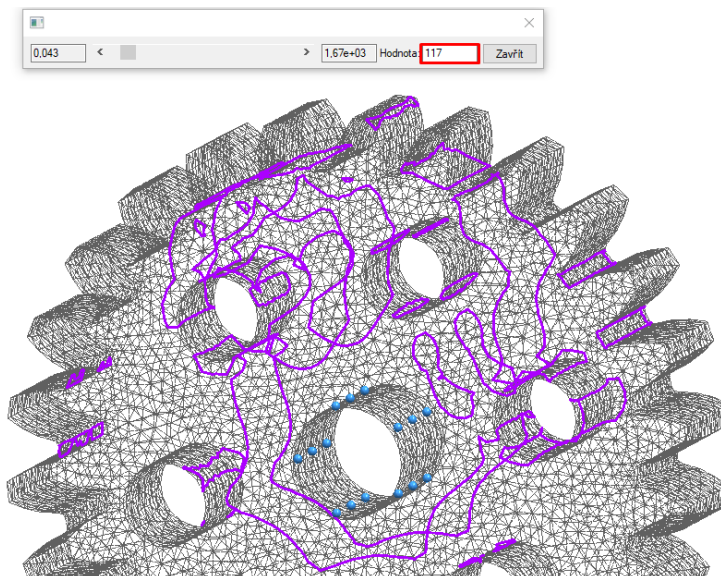
3.4.2 VÝSLEDEK SIMULACE POMOCÍ MKP

Prvním sledovaným výsledkem je napětí, které se vyskytuje v ozubeném kole. Hodnoty se pohybují v rozmezí 0,043 – 1,67e03 MPa. Oblast paty zubu je značně namáhána nad hodnotu meze kluzu materiálu.



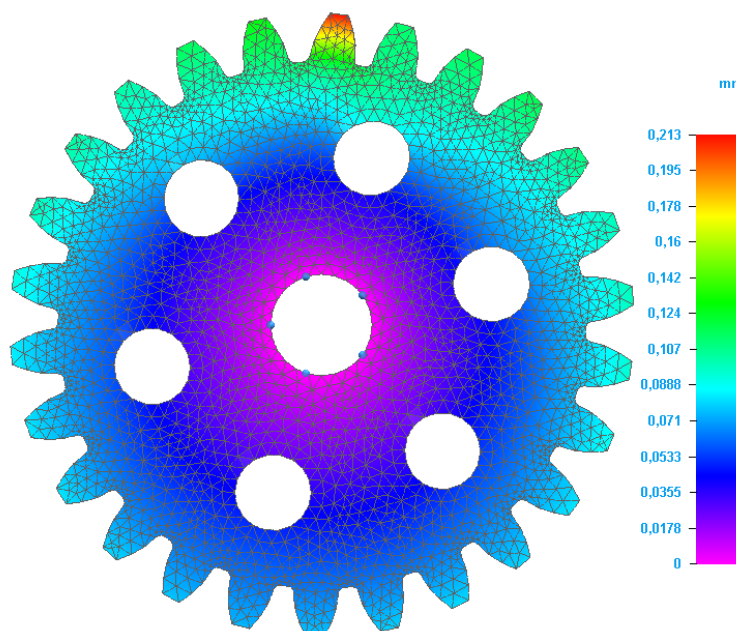
Obrázek 38. Napětí v ozubeném kole

Ale to momentálně není cílem této práce. Cílem je snížení hmotnosti celého kola při zachování jeho pevnosti. Oblast, kde proběhla optimalizace jako v tomto případě, tak i v případě provedení topologické optimalizace se nachází v hodnotách pod mezí kluzu materiálu. Hodnota 117 MPa obsadila největší oblast v celé součásti.



Obrázek 39. Největší výskyt napětí

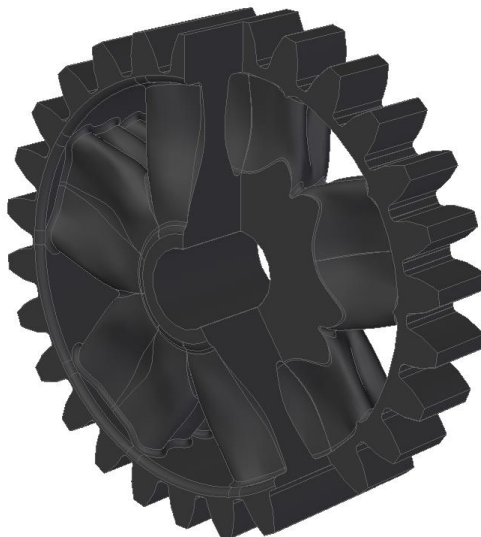
Dalším zkoumaným jevem simulace je posunutí v součásti. Tento jev je součástí prvního výpočtu a je jen zvoleným zkoumaným výsledkem. Podle obrázku 40 je vidět, že hodnoty posunutí se pohybují v rozmezí 0 – 0,213 mm.



Obrázek 40. Posunutí v součásti

3.5 VÝPOČET OPTIMALIZOVANÉHO KOLA

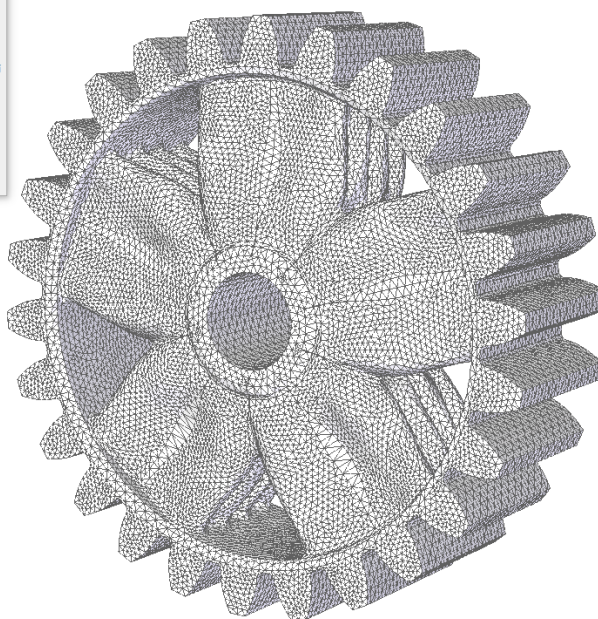
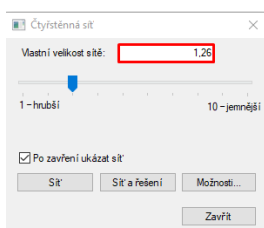
Na závěr bylo zatíženo i optimalizované kolo pro porovnání s výchozím kolem. Celý proces byl v podstatě zopakován. Cílem bude opět zjistit napětí v součásti a její posun.



Obrázek 41. Řez optimalizovaným kolem

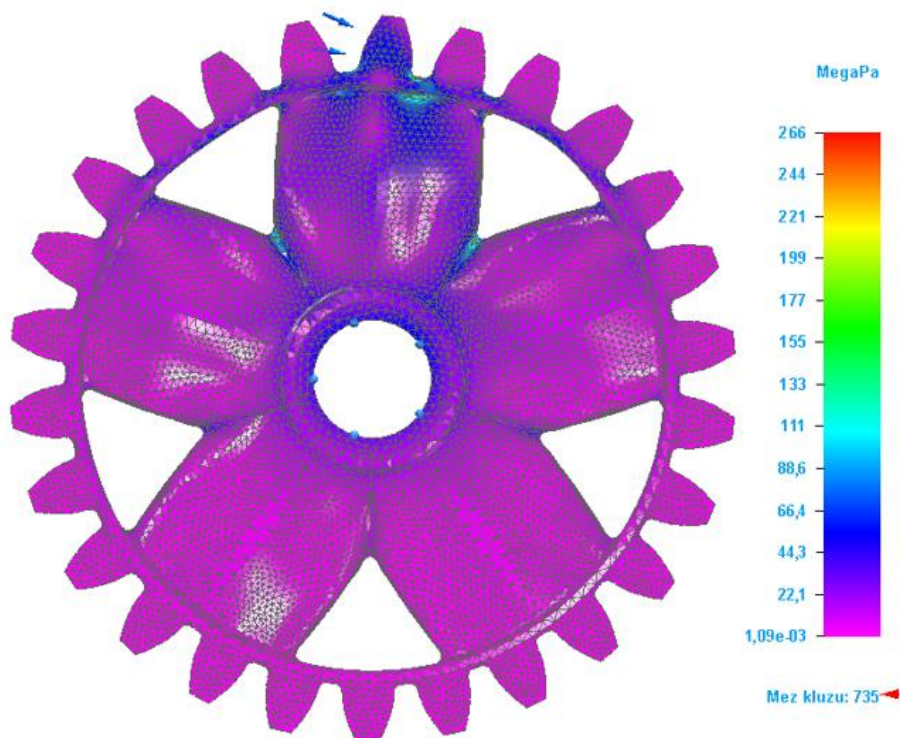
3.5.1 NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK – MKP

U optimalizovaného modelu byla zvolena opět čtyřstěnná síť hrubšího charakteru, ale oproti předchozímu výpočtu skoro jednou tak jemnější. Velikost sítě je v tomto případě 1,26 mm. Rozměr sítě je jemnější z důvodu komplikovanějšího tvaru modelu. Složitější tvar a jemnější síťování tělesa prodloužilo celkový výpočetní čas o cca 11 minut.

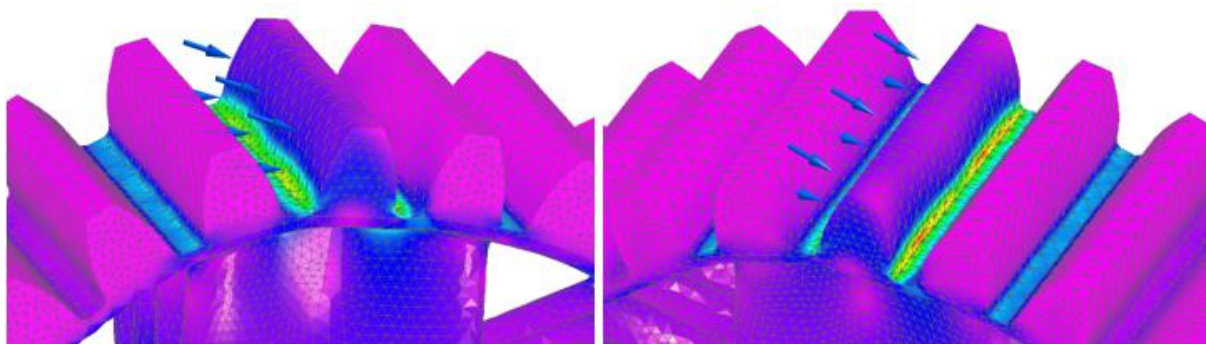


Obrázek 42. Nastavení sítě tělesa

Optimalizovaný model byl nastaven stejně jako simulovaný model v předchozí kapitole pomocí pevné vazby a tlakovém zatížení na zub o velikosti 350 MPa. Není překvapením, že optimalizovaný návrh ozubeného kola provedený topologickou optimalizací, vykazuje nižší hodnoty než neoptimalizovaný návrh. Hodnoty napětí se v modelu nachází v rozmezí $1,09e-03$ do 266 MPa.



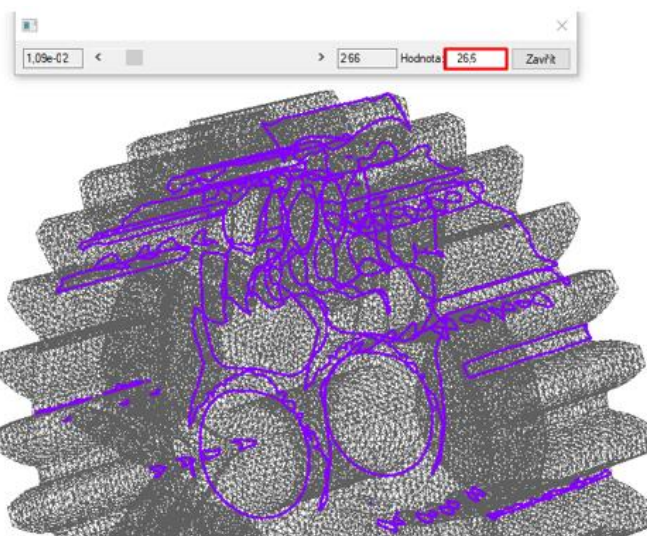
Obrázek 43. Výslední napětí v optimalizovaném kole



Obrázek 44. Přiblížení napětí v patě zubu

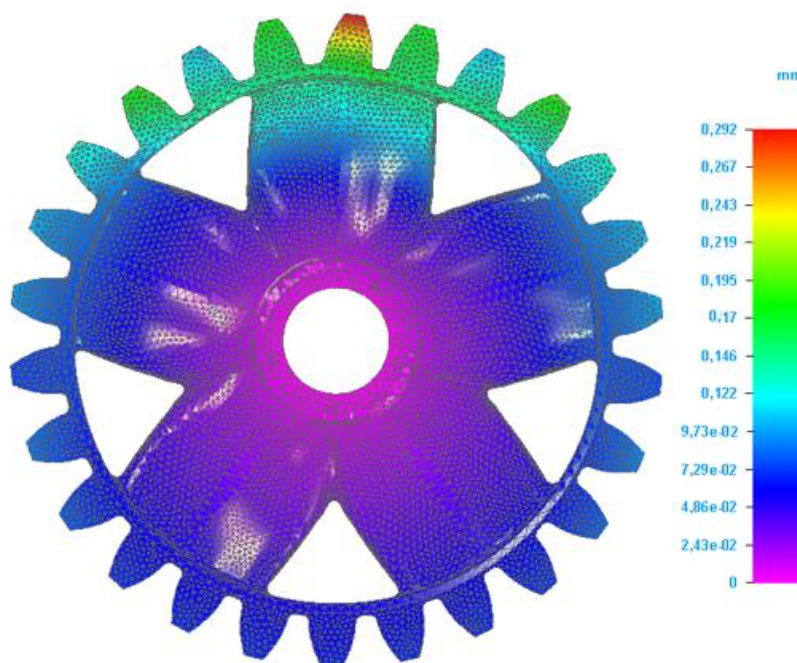
Při pohledu na patu zubu je zřejmé, že se zde nachází sice vyšší hodnota napětí, ale rozhodně v nižším plošném rozsahu než u neoptimalizovaného kola, což je velice přívětivé.

Pomocí dynamické izokontury je možné ověřit nejčastější výskyt napětí v součásti. Hodnota se pohybuje okolo 26,6 MPa, což je opravdu nízká hodnota oproti předchozí simulaci, kdy se hodnota pohybovala okolo 117 MPa.



Obrázek 45. Nejčastější výskyt napětí

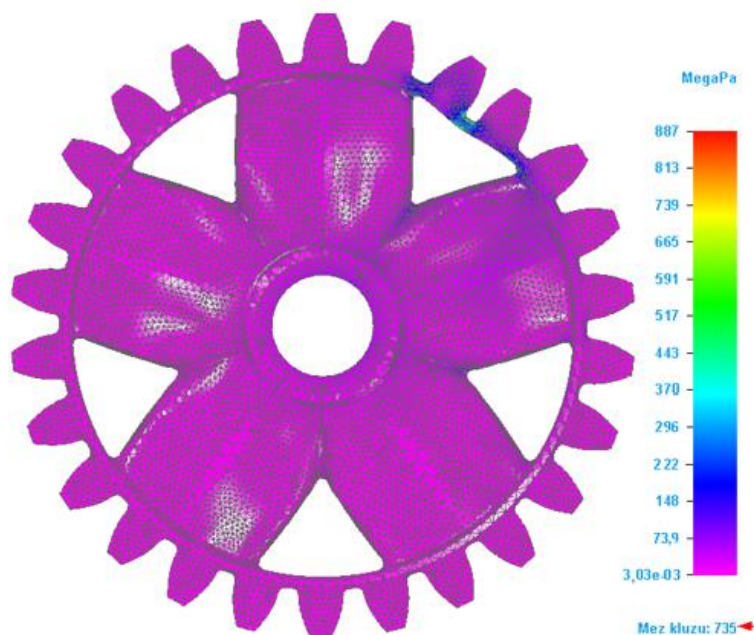
Posledním výpočtem pro kontrolu a porovnání obou kol bude výsledný posun v ozubeném kole. Ten, dle škálového sloupce v první části obrázku, je téměř nulový, protože jeho hodnoty se pohybují v rozmezí 0 – 0,292 mm. Hodnota maximálního deformačního posunutí je o něco vyšší než hodnota u neoptimalizovaného kola.



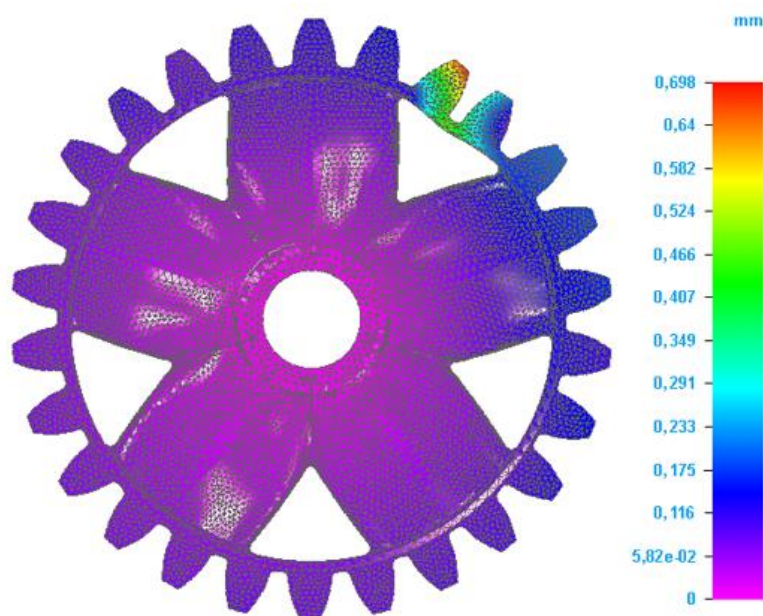
Obrázek 46. Výsledné posunutí v optimalizovaném kole

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, že tento typ rozložení loukotí se nejeví jako zcela optimální, tak po otestování zatížení zubu v meziprostoru, kde není podpůrný materiál, byl výsledek překvapivě pozitivní.

Samozřejmě, že napětí vyšlo podstatně vyšší než nad vyztuženou oblastí, což se dalo téměř stoprocentně předpokládat, ale stále nedosahuje tak vysokých hodnot jako tomu je u neoptimalizovaného kola. Hodnoty posuvu v součásti se pohybují od 0 do 0,698 mm.



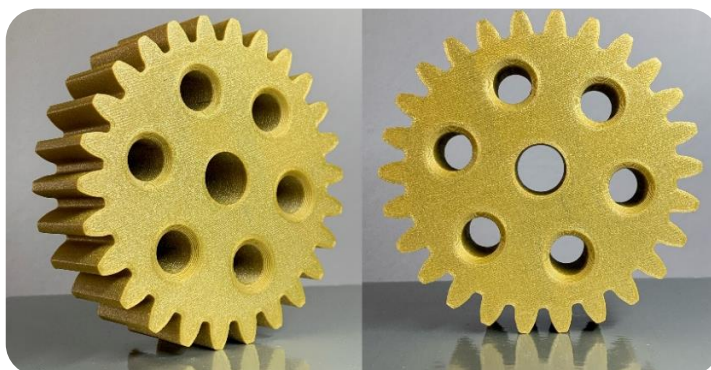
Obrázek 47. Napětí mimo vyztužené oblasti



Obrázek 48. Posuv mimo vyztužené oblasti

4 VÝROBA OPTIMALIZOVANÉHO DÍLU POMOCÍ 3D TISKU

Jelikož topologická optimalizace patří mezi optimalizace, která je spjatá s aditivními technologiemi, byl vytištěn prototyp topologicky optimalizovaného a neoptimalizovaného ozubeného kola v domácích podmínkách na desktopové tiskárně Průša I3 Mk3s. Oba programy pro tyto ozubená kola měly podobně nastavené programy. Hlavní odlišností v tvorbě těchto prototypů byla spotřeba materiálu, způsob tisku a délka tisku.



Obrázek 49. Topologicky neoptimalizované ozubené kolo

Materiál pro tvorbu těchto prototypů byl zvolen PLA pro jeho nenáročnost při tisku. Obě ozubená kola slouží pro ukázkou, a proto nebylo potřeba řešit materiál, který by měl splňovat různá mechanická zatížení. Topologicky neoptimalizované kolo bylo pro samotný tisk velice jednoduché svým tvarem a také díky absenci podpurného materiálu. Tisk topologicky optimalizovaného kola trval přibližně o hodinu a půl déle, což by nebyl až takový problém při kusové výrobě. Hlavní stinnou stránkou optimalizovaného návrhu je následné čištění od podpurného materiálu, který byl potřeba při tisku optimalizovaného ozubeného kola. Pro samotnou výrobu by bylo potřeba optimalizovat finální návrh, a tak předejít složitému odstraňování podpurného materiálu. Tisk by mohl být obohacen vícemateriálovým tiskem, kdy by samotné kolo bylo tištěno z hlavního materiálu a podpurný materiál by byl tištěn z PVA materiálu, který slouží pro pozdější rozpuštění podpor. Tato realizace je zatím možná jen pro tisk z plastů pomocí FDM tisku.



Obrázek 50. Topologicky optimalizované ozubené kolo

5 VÝSLEDKY PROVEDENÉ OPTIMALIZACE

Souhrn všech výsledků optimalizovaného a neoptimalizovaného ozubeného kola je obsažen v tabulce 2. Tabulka je rozdělená podle typu návrhů provedených v této práci. Tyto návrhy obsahují aspekty, na které je pohlíženo při porovnávání jednotlivých návrhů.

Po nahlédnutí na výsledky je zřejmé, že optimalizace byla úspěšně provedena. Po optimalizaci se podařilo zredukovat hmotnost ozubeného kola o téměř 300 g, což by v budoucnu mohlo, v leteckém průmyslu či oblasti motosportu, mít pozitivní dopad na celkovou redukci hmotnosti zařízení a tím snížení spotřeby energie a emisí. Hodnoty napětí jsou několikanásobně menší u optimalizovaného ozubeného kola než u neoptimalizovaného kola. Posun je však u optimalizovaného kola větší, což v sekundárním důsledku znamená nižší napětí, protože energie vložená do ozubeného kola se projeví větší deformací, ale nižším napětím.

Hodnoty v závorkách jsou hodnoty uvádějící napětí a posun v případě zatížení zubu nad nevyztuženou oblastí. Pozitivním aspektem je to, že i nad tímto místem je součást stále pevnější než neoptimalizované ozubené kolo, avšak po konzultaci s experty na ozubená kola a převodová ústrojí je to nevyhovující řešení.

Tabulka 2. Shrnutí výsledků práce

Návrh	Váha [Kg]	Napětí maximální [MPa]	Napětí běžné [MPa]	Posun [mm]
Neoptimalizovaný	1,324	1,67E+03	117	0,213
Optimalizovaný	1,059	226 (887)	22,6	0,292 (0,698)

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na provedení topologické optimalizace ozubeného kola s vyhodnocením získaných výsledků. V rámci práce byl vypracován stručný úvod pro pochopení této optimalizační metody společně se základními informacemi o ozubených kolech a soukolí. Navazující kapitola se zaměřovala na výrobu takto optimalizovaných součástí pomocí 3D tisku a přiblížení různých, dnes dostupných metod.

Na začátku této práce byl proveden stručný popis tvorby topologicky optimalizovaného návrhu nejen z pohledu samotné simulační části, ale také i z hlediska matematického, díky kterému je možné tuto optimalizaci využívat. Jedná se o velice složitý proces, který je v dnešní době velice ulehčen vzhledem k inovaci výpočetní síly strojů, na kterých je výpočetní návrh prováděn.

Hlavním cílem této práce bylo vypracování optimalizačního návrhu ozubeného kola pomocí topologické optimalizace. Pro vypracování návrhu bylo potřeba vymodelovat výchozí model ozubeného kola, který v práci není nějak podrobně popsán. Vytvořený výchozí model byl upraven dle symetrických rovin pro ulehčení simulačního výpočtu, a tak připraven pro samotnou simulaci.

Samotná topologická optimalizace byla provedena v optimalizačním softwaru MSC Apex Generative Design. Zde byl model zatížen tlakem na jeden zub o velikosti 350 MPa. Dále bylo provedeno zafixování ozubeného kola pomocí vazeb vetknutí v axiálním i radiálním směru. Nezbytnou součástí optimalizace byla definice a určení materiálu pro součást společně s náročností výpočtu a zvolení zobrazení struktury výsledného optimalizovaného modelu. Součást byla podrobena simulačnímu procesu, který se skládal z 64 iteračních procesů v časové délce několika hodin. Výpočetní proces trval neobvykle dlouho z důvodu použití horšího hardwaru, který byl využit pro vypracování této práce.

Výsledný optimalizační návrh byl dále upraven v CAD softwaru SolidEdge od společnosti Siemens. Byla provedena úprava struktury ploch a jejich vyhlazení. Pomocí průřezových skic byl tvar přemodelován a plošně odladěn. Následně bylo ozubené kolo obohaceno o další 4 výskyty tohoto optimalizačního návrhu a zkompletováno pro následné zatížení a shrnutí výsledků.

Použitý optimalizační software MSC Apex Generative Design nebyl vhodným kandidátem pro tuto aplikaci z důvodu absence cyklických symetrií, které by optimalizační návrh provedly podstatně více optimálně, a tak by nedocházelo k vytvoření takzvaných slepých míst, jež se v tomto návrhu vyskytovala. Po konzultaci s technickým oddělením je tento prvek ve stavu vývoje a určitě se v novějších verzích objeví.

Jedním z cílů bylo vyzkoušet si zoptimalizovat ozubené kolo. Výsledkem této práce byla úspěšná redukce hmotnosti optimalizovaného kola oproti neoptimalizovanému kolu, zlepšení pevnostních podmínek, a to i v případě absence vyztužení pod některými zuby kola. Právě díky absenci vyztužného materiálu není toto optimalizované kolo zcela vhodné pro přímé využití v praxi i přes přiložené kladně vycházející simulační výsledky, ale slouží jen jako ukázka, co topologická optimalizace představuje.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Průběh topologické optimalizace. *Product development* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://avidpd.com/knowledge-base/what-is-topology-and-why-optimize-it/>
- [2] KENTLI, Aykut. Topology Optimization Applications on Engineering Structures. KENTLI, Aykut, ed. *Truss and Frames - Recent Advances and New Perspectives* [online]. December 16th 2019. IntechOpen, 2020, 2020-3-4, s. 24 [cit. 2020-11-24]. ISBN 978-1-78985-321-6. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.90474
- [3] Stepanek3D: Co je Topologická optimalizace? In: *Plasticportal* [online]. Poľná 6727/100, Banská Bystrica, 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/stepanek3d-co-je-topologicka-optimalizace/c/6878/>
- [4] BENDSØE, Martin Philip a Ole SIGMUND. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Second edition, corrected printing. Berlin: Springer, 2004, xiv, 370 stran : ilustrace. ISBN 978-3-540-42992-0.
- [5] *Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing*, 43. Dostupné z: doi:DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.033
- [6] MENŠÍK, Martin. *Optimalizace konstrukce skořepiny vozu Praga R1*. ČVUT Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT Praha.
- [7] Návrh optimalizace Altair Inspire - youtube. In: <https://www.youtube.com/> [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Wrzt4M_8xj0&ab_channel=ThanhLeHoai
- [8] MAZOCH, Jan. *Topologické optimalizace v technické praxi*. Brno, 2019. Diplomová práce. VUT Brno.
- [9] MAREŠ, Tomáš. *Základy konstrukční optimalizace*. 2006. Praha: [Tomáš Mareš], 2006. Knižnice konstrukční optimalizace. ISBN isbn80-239-6508-5.
- [10] MIRZENDENHDEL, Amir M. a Krishan SURESH. *A hand-on Introduction to topology optimization*. 2017. ISBN 9781976480607.
- [11] Typy síťování. In: *Skill-lync* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://skill-lync.com/projects/project-2-482>
- [12] Metoda SIMP pro optimalizaci topologie. In: *Dassault systems* [online]. 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z:

- https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm
- [13] ROZVANY, G. I. N. a Niels OLHOFF. *Topology optimization of structures and composite continua*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN isbn07-923-6807-x.
- [14] *Topology Optimization for Human Proximal Femur Considering Bi-modulus Behavior of Cortical Bones*. 15 October 2014. Springer International Publishing Switzerland 2015: Springer, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-08377-3.
- [15] SANLADERER, Thomas. FDM - držák poličky. In: *Youtube* [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=3smr5CEdksc&ab_channel=ThomasSanladerer
- [16] Využití SLM technologie. In: *Materialise* [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/cases/materialise-3-matic-makes-topology-optimization-more-attractive>
- [17] Prusa MK3S+. In: *PrusaResearch* [online]. 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [18] Ozubené kolo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Ozuben%C3%A9_kolo#Rozd%C4%9Blen%C3%AD_ozuben%C3%BDch_kol
- [19] Ozubené kola modul 1. In: *CNCshop* [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/ozubene-kola-modul-1>
- [20] Types of gears. In: *Pinterest* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://tr.pinterest.com/pin/338544096983884410/>
- [21] Evolventní ozubení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Evolventn%C3%AD_ozuben%C3%AD
- [22] BOLZANO, Bohdan. *Přehled vlastností oceli 16MnCr5* [online]. In: . s. 1 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://bolzano.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

E_0	[MPa]	Youngův modul pružnosti
K_e	[MPa·mm]	Matrice tuhosti elementu
N	[-]	Počet elementů v navrhovaném působišti.
P	[-]	Součinitel penalizace
p	[-]	Penalizační faktor
ρ_e	[kg · m ⁻³]	Relativní hustota materiálu
ρ_{min}	[kg · m ⁻³]	Minimální relativní hustota

MKP – Metoda konečných prvků

ISE – Izotropní pevný nebo prázdný element

ASE – Anizotropní pevný nebo prázdný element

ISEP – Izotropní pevný, prázdný nebo porézní element

SIMP – Solid Isotropic Microstructure with Penalization

OMP – Optimal Microstructure with Penalization

NOM – NonOptimal Microstruture