
Generatívny dizajn pri konštrukčnom návrhu tvarov telies čelných ozubených kolies

Samuel Sivák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: samuel.sivak@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2355

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: silvia.malakova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2372

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00 Košice.
E-mail: daniela.kepen.harachova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2366

Generative design for constructional design of spur gear wheel bodies

Abstract: A paper was prepared related to current design engineering advancements. Topological optimization and generative design were some of these advancements. The process of topology optimization was explained in the following chapters. Each step is broken down into a paragraph, where it is explained and illustrated with a picture. In a *SolidWorks* program, topology optimization is detailed step-by-step. The last part, which lays out the subsequent approach and other possibilities, summarizes the benefits and drawbacks of this software's approach.

Keywords: Design; topology; structure optimization; topology optimization.

ÚVOD (DOTERAJŠIE POZNATKY)

Počas fázy koncepcného návrhu v procese vývoja výrobku inžinieri a dizajnéri vyvíjajú a posudzujú viaceré možnosti návrhu pri hľadaní najlepších riešení. Postupy zvolené a rozhodnutia urobené počas tejto fázy majú významný vplyv na všetky neskoršie fázy vývoja výrobku vrátane oblastí, ako je výroba, produkcia, kvalita, náklady a iné [1]. Podľa *Andersona* [2] možno údajne až 80 % nákladov na výrobok identifikovať počas fázy návrhu.

Vývoj technológií, najmä v oblasti výpočtového výkonu, strojového učenia a súvisiacich algoritmov, prispel k vytvoreniu inteligentných systémov automatizácie návrhu. Vďaka vysokovýkonnej výpočtovej kapacite, ktorú ponúka *cloud*, sú teraz realizovateľné zložité optimalizačné výpočty a iterácie, ktoré predtým nebolo možné dokončiť. To umožňuje konštruktérom rýchlo vykonávať zložité simulácie na testovanie rôznych konfigurácií výrobkov za rôznych okolností, ktoré poskytujú dôležité informácie na výber optimálnych možností konštrukcie. Na druhej strane rýchly pokrok aditívnej

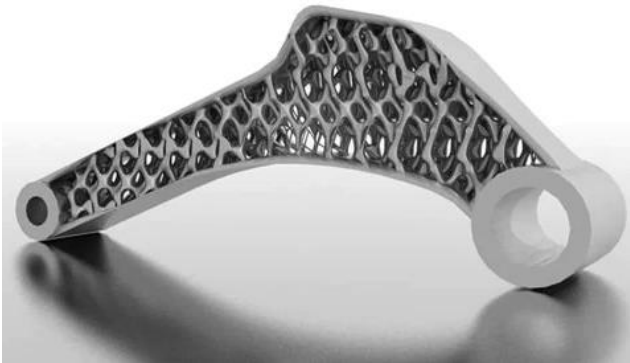
výrobnej technológie vedie k významným zmenám vo výrobe a navrhovaní výrobkov. Umožňujú vyrábať zložité geometrie, ktoré by inak nebolo možné vyrobiť pomocou konvenčných výrobných techník [3].

Využívanie *CAD* systémov sa čoraz častejšie začleňuje do procesu navrhovania a toto začlenenie je podporované rozširujúcim sa rozsahom a možnosťami systémov [4]. Inžinieri začali vytvárať softvér na optimalizáciu topológie založený na *CAD*, ktorý dokáže poskytnúť najlepšie návrhy pre určité konštrukcie [5]. Takéto programy môžu meniť súčasné návrhy, zahrnúť do návrhu explicitné funkcie a vytvárať úplne nové návrhy. Tento nedostatok sa vyriešil začlenením algoritmov generatívneho navrhovania do softvéru *CAD*. Hlavným cieľom týchto programov je podporovať kreativitu dizajnérov vytváraním širokej škály alternatív dizajnu.

1 GENERATÍVNY DIZAJN

Rozvoj generatívneho dizajnu začal už v osemdesiatych rokoch minulého storočia, kde

väčšina publikácií a informácií bola len v teoretickej rovine bez nejakej konkrétnej aplikácie v akomkoľvek priemysle. Prvým odvetvím, v ktorom sa začal používať generatívny dizajn bola architektúra [6]. To odštartovalo záujem aj zo strany akademických pracovníkov, ktorí začali tento druh dizajnu rozvíjať, nakoľko sa tu nachádzal potenciál v spojení výpočtovej techniky a evolučných postupoch pre doposiaľ neštandardné a kvalitné výstupy. V oblasti dizajnu *Vajna a kol.* [7] vyvinuli auto genetickú teóriu dizajnu skúmaním podobností medzi procesom dizajnu v súvislosti s tvorbou dizajnu a prirodzeným procesom evolúcie (obr. 1).



Obr. 1. Výsledok generatívneho dizajnu

Podľa evolučnej teórie možno proces postupu metódy opísať ako neustále zlepšovanie základného riešenia riadiaci sa počiatočnými podmienkami, okrajovými podmienkami a obmedzeniami. Tieto faktory ovplyvňujú postup dizajnu a otvárajú mu nové priestory. Vzhľadom na rôznorodosť použitia, generatívny dizajn v súčasnosti nemá všeobecne akceptovanú koncepciu. Podľa *Shea a kol.* [6] sú "systémy generatívneho navrhovania zamerané na vytváranie nových procesov navrhovania, ktoré poskytujú priestorovo vynaliezavé, ale efektívne a zostaviteľné návrhy s využitím súčasných výpočtových a výrobných možností". Podľa *Krishna* [8] je "generatívny dizajn" dizajnérsky riadená, parametricky obmedzený proces skúmania dizajnu, ktorý využíva parametrické nástroje CAD určené na podporu dizajnu ako vznikajúceho procesu. V súčasnosti však existujú aplikácie používané pri návrhu, ktoré presahujú použitie štandardných nástrojov CAD a nie sú obmedzené parametrickými modelmi [9].

Pomocou procesu taktiež známeho ako generatívny dizajn, ktorý zahŕňa určitú automatizáciu a autonómiu procesu, sa vytvorí niekoľko návrhov. Proces návrhu napodobňuje evolučný proces v prírode tým, že začína s jedným alebo viacerými rôznymi návrhmi a časom ich mení na riešenia, ktoré sú vhodnejšie pre požiadavky ohraničené konkrétnymi podmienkami. Riešenia Kritérií návrhu, ktoré nie sú splnené, alebo obmedzené, ktoré nie sú vyhovujúce, sa vyradia a

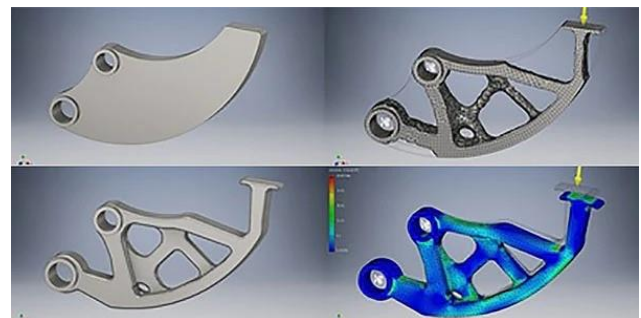
proces hľadania (evolúcie) sa posúva iným/novým smerom.

Termín "generatívny dizajn" sa často používa na označenie počítačom podporovaného dizajnu napriek tomu, že ho možno vykonať aj pomocou pera, papiera a súboru pravidiel. Vytvorené výsledky môžu mať rôzne formáty vrátane obrázkov, modelov, zvukov a animácií.

2 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZÁCIA

Metóda nazývaná topologická optimalizácia má za cieľ maximalizovať rozloženie materiálu v danom zvolenom priestore, pričom zohľadňuje zaťaženie a medzné podmienky. Často sa využíva v počiatočnej fáze návrhu na štúdium a posúdenie rôznych možností konštrukcie v súlade s vopred stanovenými kritériami, ako je okrem iného zníženie hmotnosti, zvýšenie tuhosti, zníženie napätia a zníženie deformácie [5].

Programy na optimalizáciu topológie sú vytvorené s cieľom uľahčiť prácu používateľom, ktorí sa zaoberajú iteračnými procesmi návrhu a analýzami viacerých variantov. Podporujú tiež kreativitu, ktorá ponúka často prehliadané riešenia. Spolu s tvarovou a rozmerovou optimalizáciou je topologická optimalizácia jednou z troch základných podkategórií konštrukčnej optimalizácie. Zatiaľ čo pri optimalizácii tvaru treba zabezpečiť kritéria a ciele konštrukcie (napríklad zníženie koncentrácie napätia alebo predĺženie únavovej životnosti), pri optimalizácii tvaru sa zohľadňujú špecifické charakteristiky obrysu určené umiestnením uzlov (obr. 2).



Obr. 2. Postup a výsledok topologickej optimalizácie

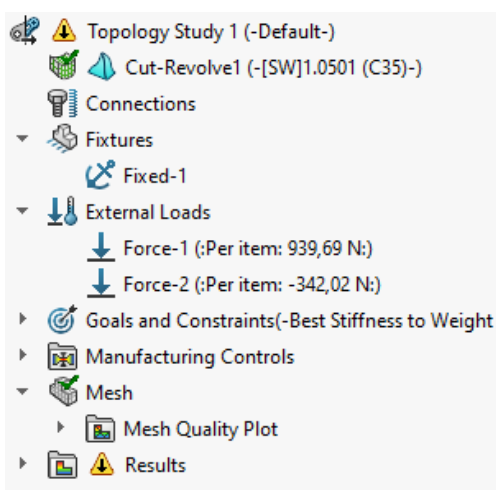
S cieľom získať najlepšie riešenie z hľadiska hmotnosti, napätia, deformácie a ďalších faktorov sa pri rozmerovej optimalizácii upravujú hodnoty konštrukčných parametrov súvisiacich s plochami prierezu prvkov. Často je to používané pri riešení problémov s nosnými tyčami, ráhami budov a nosníkovými konštrukciami. Tieto metódy na rozdiel od topologickej optimalizácie umožňujú len zmenu hodnôt ich parametrov, nie pridávanie alebo odstraňovanie nových prvkov alebo dutín v konštrukcii prvkov [10]. Na rozdiel od topologickej optimalizácie, ktorá jednoducho potrebuje zadaný počiatočný objem, prístupy tvarovej a rozmerovej

optimalizácie potrebujú počítačový parametrický model, ktorý umožní optimalizáciu.

3 APLIKÁCIA PRI NÁVHRU TVAROV TELIES ČELNÝCH OZUBENÝCH KOLIES

Na digitalizáciu modelu sa využili možnosti 3D modelovania a účinné nástroje na automatizáciu návrhu zabudované v programe *SolidWorks*. Konštruktér brať do úvahy, že optimalizovaný model nemôže byť rozdelený na viacero telies ako jedno a musí byť jednotný. Ide o zásadnú požiadavku, pretože modul optimalizácie topológie *SolidWorks* nepodporuje súčasnú optimalizáciu viacerých dielov/telies alebo zostáv. Hoci je potrebné vziať do úvahy, že niektoré prvky musia byť z hľadiska geometrie nezmenené (otvory, funkčné profily...). V takom prípade musí mať model hranice definujúce túto oblasť

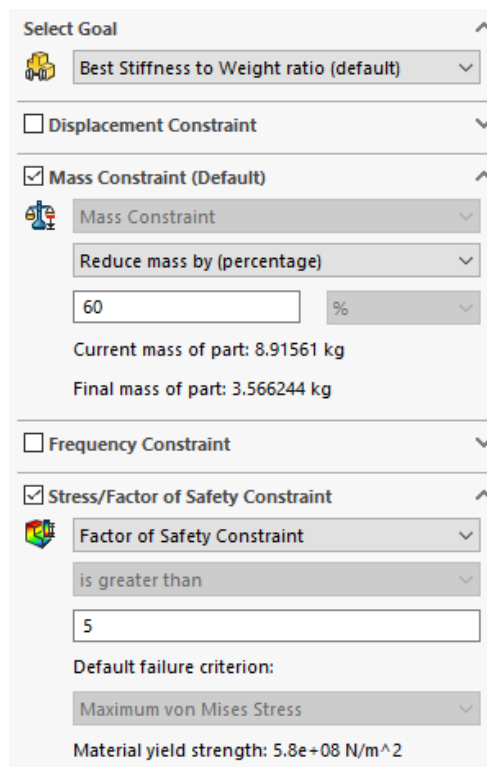
Vonkajšie zaťaženia a votknutia sa definujú rovnakým spôsobom ako pri simulácii metódou konečných prvkov. Jediný rozdiel je v tom, že silové zaťaženie sa umiestni na každý zub ozubeného kolesa, aby sa zabezpečil "vzorový" (opakovaný) tvar optimalizovaného ozubeného kolesa, čo znamená, že nebudú existovať úseky s menšou alebo žiadnou podporou (obr. 3).



Obr. 3. Definovanie zaťaženia a votknutí

Ďalej je potrebné určiť optimalizačné ciele a kritéria topologickej optimalizácie. Pri danej podmienke redukcie materiálu bude cieľom topologickej optimalizácie zredukovať objem telesa na požadované kritérium, ale zároveň aby výsledná geometria dosahovala najvyššiu tuhosť telesa. Definícia cieľa a kritérií ovplyvní úbytok materiálu. Geometria riešenia s najväčšou tuhosťou je daná úbytkom materiálu a finálnym tvarom optimalizovaného telesa, takým spôsobom, že objemy sa odstraňujú z „plného“ telesa (obr. 4). Obmedzenia definujú horné a dolné kritéria pre najväčšie posunutie, ktoré sa môže zobrazit' v 3D modeli, alebo

zadávať obmedzenia na podiel hmoty, ktorá sa môže odstrániť.

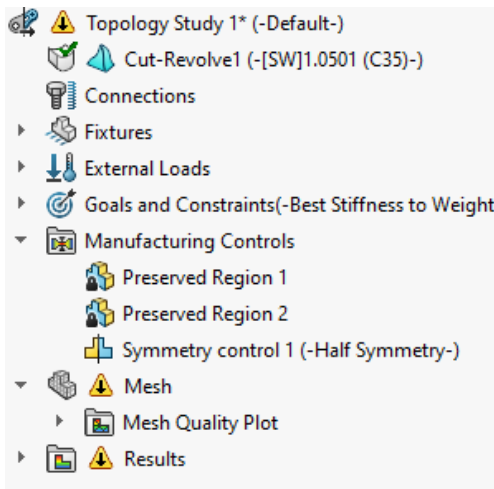


Obr. 4. Definovanie cieľov optimalizácie

Materiál sa v procese optimalizácie topológie rozloží tak, aby sa dodržal cieľ optimalizácie pri daných geometrických kritériách. Využitie konvenčných výrobných postupov, ako je odlievanie alebo kovanie, však môže spôsobiť problémy pri vytváraní 3D modelu. Aplikácia vhodných kritérií riadenia výroby optimalizačnom modeli môže zabrániť vzniku podrezaní a dutých kusov. Kritériá riadenia výroby zaručujú, že optimalizovaný 3D model sa dá napríklad správne vylisovať alebo vybrať z formy. V simulácii *SolidWorks* sú k dispozícii štyri rôzne typy výrobných podmienok:

- kritérium hrúbky - udáva kritérium pre optimalizáciu topológie modelu, aby sa zabránilo vytváraniu častí s ťažko vyrobiteľnými stenami, ktoré sú príliš tenké, alebo častí, ktoré sú príliš hrubé,
- zachovanie plôch - toto kritérium pridá do 3D modelu zachované časti (plôch), ktoré sa počas optimalizácie topológie nezmenia, čím sa zachová geometria týchto povrchov, ktoré sú pre funkčnosť modelu kľúčové (obr. 5),
- kritérium symetrie - optimalizovaný 3D model je symetrický voči jednej alebo viacerým vopred určeným rovinám pomocou kritéria symetrie. V závislosti od rozloženia konštrukcie možno zvoliť rovinnú symetriu, ktorá je buď polovičná, štvrtinová alebo osminová,

- kritérium formy - táto funkcia simuluje extrakciu optimálneho 3D modelu z formy.

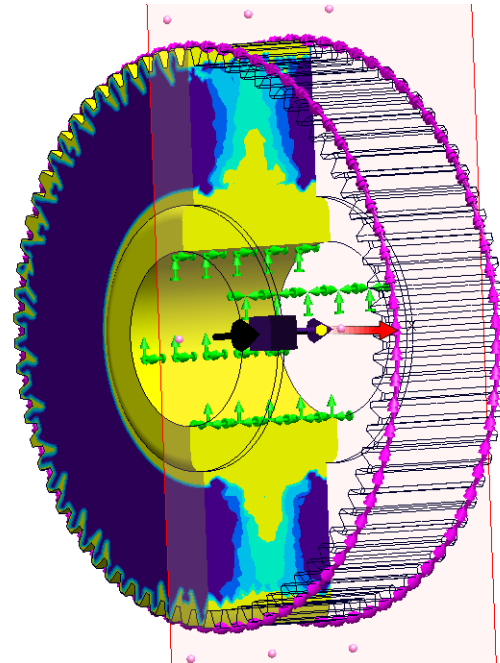


Obr. 5. Definovanie kritérií riadenia výroby

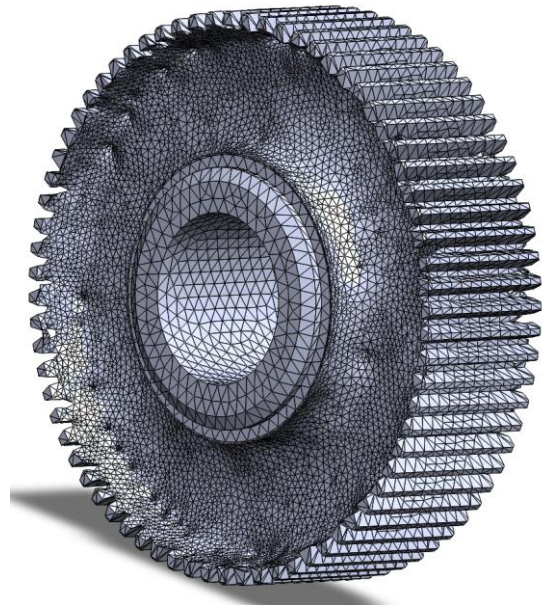
Po nadefinovaní kritérií optimalizácie a zvolení hraničných podmienok nasleduje samotná optimalizácia. Proces je automatický, riadený algoritmi, avšak je vhodné pred je ho začiatkom nastaviť počet iterácií, ktoré ma vykonať. Iterácie slúžia ako čiastkové simulácie upravených objemov, pričom každá nasledujúca iterácia má za cieľ vytvoriť optimalizovanejší tvar ako predošlá. Prirodzene čím väčšie množstvo iterácií je zvolených tým lepšie výsledky avšak je to na úkor času kde sa doba optimalizácie predlžuje. Výsledok optimalizácie je vo forme farebne odlíšeného modelu (podobne ako pri MKP) kde farby delia objemy od „prebytočných“ cez „vhodných na ponechanie“ až po „nutné na ponechanie“ (obr. 6).

Výsledné modely sa exportujú to či už objemových alebo plošných formátov. Avšak tie je potrebné upraviť „vyhladiť“ nakoľko výsledky sú vzťahované na geometriu vytvorenú sieťou konečných prvkov (obr. 7).

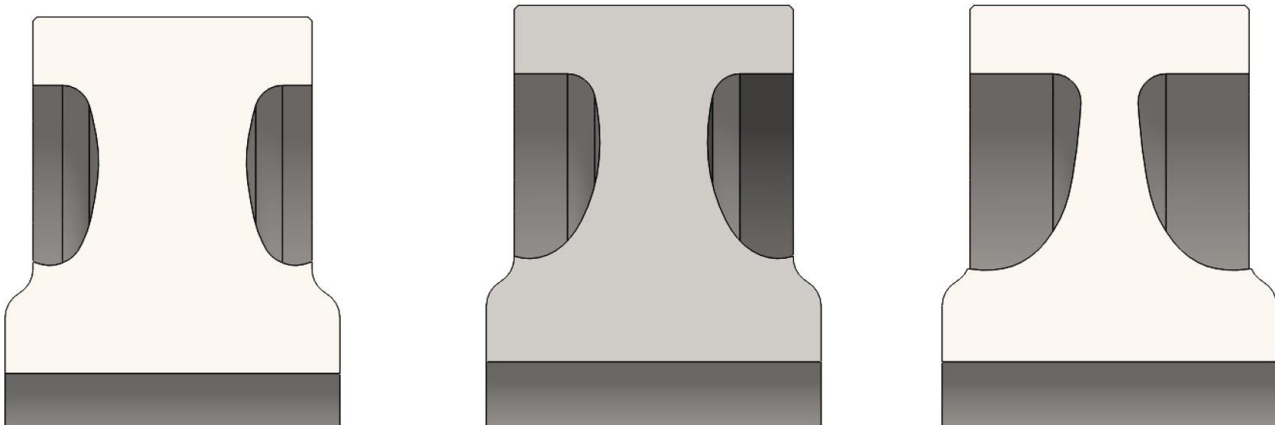
Cieľom bolo navrhnuť ozubené koleso s čo najnižšou hmotnosťou pri čom ďalším posudzovaným paramet-



Obr. 6. Výsledky topologickej optimalizácie



Obr. 7. Vyexportovaný model



Obr. 8. Výsledné tvary stojiny kolesa

rom bola tuhosť ozubenia. Na tuhosť ozubenia vplýva výraznou mierou hrúbka venca pod zubami a tá bola stanovená na konštantnú hodnotu pre všetky novovzniknuté varianty. Upravené tvary stojiny kolies vyzerali po úprave nasledovne (obr. 8).

ZÁVER

Optimalizovaný 3D model môže byť exportovaný ako plošný model, pevné teleso alebo grafické teleso. Ak bude model vytvorený na 3D tlačiarni bez dodatočných dizajnových úprav, vhodné alternatívy sú "Surface body" (plošný model) a "Solid body" (pevné teleso). Keď sa vyberie možnosť "Graphic body" (grafické teleso), optimálny návrh sa exportuje vo formáte reprezentácie hraničnej geometrie, ktorý je vhodnejší na úpravy a dodatočné úpravy. V prvom 3D modeli SolidWorks umožňuje vloženie exportovaného grafického telesa. Po prekrytí dvoch 3D modelov je prvým krokom určenie ich rozdielov. Najjednoduchším postupom na dosiahnutie tohto cieľa je urobiť optimalizovaný model nepriehľadným a upraviť priehľadnosť pôvodného modelu na polopriehľadný.

V aplikácii SolidWorks sa vyskytol problém s plochami, ktorých tvar je potrebné zachovať. Náboj, ktorý zabezpečuje spojenie kolesa s hriadeľom a ozubenie s určitou hrúbkou venca pod ním, aby sa zachovala tuhosť ozubenia, sú zachované plochy pre optimalizáciu topológie. Skutočnosť, že hrúbka venca bola stanovená na konštantnú hodnotu a teda nebola optimalizovaná, je ďalším nedostatkom spomínaného postupu. Nasledujúce postupy budú zahŕňať a riešiť aj tieto nedostatky.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov KEGA 029TUKE-4/2021 „Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov“ a VEGA 1/0528/20 „Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav.“

LITERATÚRA

- [1] WANG, L. - SHEN, W. - XIE, H. - NEELAMKAVIL, J. - PARDASANI, A. (2002): *Collaborative conceptual design - state of the art and future trends*. Computer-Aided Design, 34(13), pp.981-996.
- [2] ANDERSON, D. (2014): *Design for Manufacturability*. CRC Press.
- [3] BICI, M. - BROGGIATO, G. - CAMPANA, F. (2016): *Topological Optimization in Concept Design: starting approach and a validation case study*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp.289-299.
- [4] HORVÁTH, I. (2004): *On some Crucial Issues of Computer Support of Conceptual Design*. Product Engineering, pp.123-142.
- [5] QUERIN, O. (2017): *Topology design methods for structural optimization*. London, United Kingdom: Academic Press.
- [6] VAJNA, S. a kol. (2005): *The Autogenetic Design Theory. An evolutionary view of the design process*. Journal of Engineering Design, 16(4), pp. 423-440.
- [7] KRISHNAN, S. (2011): *A practical generative design method*. Computer-Aided Design, 43(1), pp. 88-100.
- [8] CHEN, X. a kol. (2018): *Forte: User-Driven Generative Design*. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1-12.
- [9] KAZI, R.H. a kol. (2017): *DreamSketch: Early Stage 3D Design Explorations with Sketching and Generative Design*. Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 401-414.
- [10] TEJANI, G. - SAVSANI, V. - PATEL, V. - SAVSANI, P. (2017): *Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics*. Journal of Computational Design and Engineering, 5(2), pp.198-214.