
Výroba ozubených kolies pomocou 3D tlače

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 Kepen 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

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

Manufacturing of gear wheels using 3D printing

Abstract: Gear transmission can consist of gear wheels that are made of different materials and technologies. The manufacturing process of gear wheels depends mainly on the required properties and the choice of material. Less expensive methods can be used for gears where the load is minimal and high precision is not required. Such methods include, for example, the production of plastic wheels by injection into molds or additive manufacturing. Today, additive technologies are being used more and more, which, among other things, are also used to produce gears. In this article, various types of additive technology are described, as well as materials that are often used in this method of production.

Keywords: gear wheel, manufacturing, additive manufacturing.

ÚVOD

Postup výroby čelných ozubených kolies závisí hlavne na požadovaných vlastnostiach a na voľbe materiálu. Presnosť ozubení pri obrábaní ovplyvňuje najmä kinematika obrábacieho procesu, technologické základne, nástroj, spôsob upnutia obrobku a rezné prostredie [1-5]. Pri ozubeníach, kde je minimálne zaťaženie a nie je vyžadovaná vysoká presnosť, je možné použiť menej nákladné metódy [6, 7]. K takýmto metódam patrí napríklad výroba plastových kolies vstrekom do foriem alebo aditívna výroba.

Aditívna výroba je synonymom k dnes stále viac populárnej 3D tlačí. V minulosti bola táto technológia nazývaná tiež *rapid prototyping*, avšak dnes to už nie je úplne správne pomenovanie, keďže tento pojem označuje spôsob výroby vhodný k rýchlemu a relatívne lacnému vytváraniu prototypov, nie konečných výrobkov.

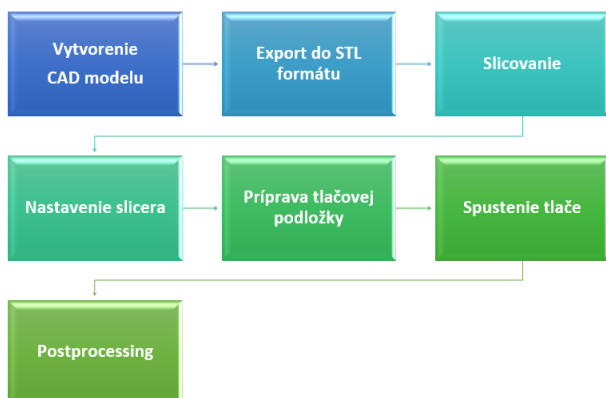
Na rozdiel od obrábania, kedy sa pre získanie požadovaného tvaru objektu materiál odoberá,

aditívna technológia je proces, pri ktorom vzniká výrobok postupným nanášaním tenkých vrstiev materiálu na seba, zvyčajne jednotnej hrúbky [8-12]. Takýmto spôsobom pridávania 2D vrstvy na vrstvu vznikne 3D objekt. Každá vrstva je prierezom danej časti objektu. Pretože vrstva nemôže byť nekonečne tenká, bude väčšinou finálny výrobok vykazovať nejaké známky nanášaných vrstiev. Čím bude vrstva tenšia, tým sa bude hotový výrobok podobat prvotnému modelu. Výhodou aditívnej výroby je možnosť zhotoviť takmer akýkoľvek tvar. Naopak nevýhodou je isté obmedzenie v materiáloch, ktoré je možné použiť.

Ozubené prevody môžu pozostávať z kolies, ktoré sú vyrobené z rôznych materiálov a rôznymi technológiami [13]. Dnes sa čím ďalej, tým viac používajú aditívne technológie, ktoré sa okrem iného používajú aj na výrobu ozubených kolies. V tejto príspevku sú popísané rôzne druhy aditívnych technológií a taktiež materiály ktoré sa často používajú pri tomto spôsobe výroby.

1 PROCES VÝROBY POMOCOU ADITÍVNEHO MODELOVANIA

Celý proces aditívnej výroby obsahuje radu krokov od vytvorenia digitálneho CAD modelu k fyzickému objektu (obr.1).



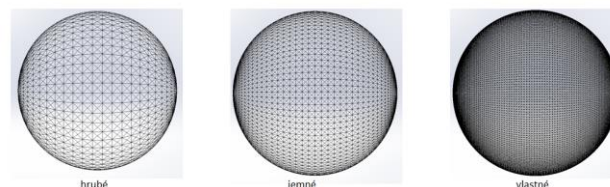
Obr. 1. Proces výroby pomocou aditívneho modelovania

1.1 Vytvorenie CAD modelu

Vytvorenie 3D modelu v CAD systéme. Všetky časti sú popísané modelom, ktorý plne popisuje povrch modelovaných objektov. Túto požiadavku splňuje pravdepodobne akýkoľvek profesionálny CAD softvér, ale taktiež množstvo voľne dostupných programov. 3D model je možné získať vymodelovaním vlastného modelu, stiahnutím už hotového modelu alebo 3D skenovaním existujúceho objektu.

1.2 Export do STL formátu

Hotový a uložený 3D objemový model je možné konvertovať do špeciálneho súborového formátu, známeho ako STL (*Standard Triangulation Language*). Tento formát sa často využíva v aditívnej výrobe pre export modelov pre prípravu výroby 3D tlačou, teda stavbou kovových a plastových dielov vrstvou po vrstve. Zápis STL súboru môže byť buď textový (ASCII), alebo binárny, ktorý sa používa bežnejšie, pretože je oveľa kompaktnejší a má menšiu veľkosť. Pri 3D tlači sa tento formát označuje ako prechodový. Služi spravidla len pre prevod súboru z CAD softwaru do 3D tlačiarne. Model, ktorý sa prevedie do STL formátu reprezentuje povrch ako súbor trojuholníkov rôznych veľkostí v závislosti na požadovanom rozlíšení. Čím je rozlíšenie vyššie, tým budú trojuholníky menšie, tzn. že povrch modelu bude hladší ale čas výpočtu modelu bude dlhší. STL model je rozdelený do veľmi tenkých vrstiev pozdĺž roviny osí X a Y. Každá vrstva je postavená na predchádzajúcu vrstvu a pohybuje sa nahor smerom v smere osy Z. Pre 3D tlač je nevyhnutné, aby všetky normály boli správne nastavené smerom z daného objektu. Pri exporte modelu pre 3D tlač si môžeme zvoliť rozlíšenie ako hrubé, jemné alebo vlastné (obr. 2).



Obr. 2. Možnosti rozlíšenia pri exporte do formátu STL

1.3 Vytváranie vrstiev (Slicovanie)

Formát STL je pre tlačiareň nezrozumiteľný a nie je možné ho ihneď tlačiť. STL súbor je vstupom pre program, ktorý sa obecné nazýva krájač (*slicer*) (napr. *PrusaSlicer*, *Simplify3D*, *Cura*). Ďalším vstupom do slicera sú parametre a nastavenia, ktoré určujú kvalitu tlače, chladenie, teplotu, typ filamentu a pod. Výstupným súborom zo slicera je súbor vo formáte G-code. Prevod STL do formátu G-code spočíva v tom, že model je v sliceri rozrezaný na tenké vrstvy sú vytvorené cesty pohybov extrudera v jednotlivých vrstvách. Najčastejšie sa 3D modely šíria pomocou formátu STL a potom je už na každom užívateľovi ako tzv. naslicuje model podľa svojich požiadaviek a potrieb v závislosti na použítom materiáli a tlačiarne.

1.4 Nastavenie slicera

Medzi základné nastavenia slicera patria:

- teplota filamentu a podložky,
- výška vrstvy,
- *vertical shells/Perimeters* (obvody),
- *horizontal shells/Solid layers* (plné vrstvy),
- *infill* (výplň),
- *supports* (podpery),
- *brim* (golier),
- *skirt* (obrys),
- *raft*,
- chladenie.

1.5 Príprava tlačovej podložky

Aby bola tlač úspešná je dôležitá správna príprava tlačovej podložky. Zlá príprava by mohla mať za následok odlepenie tlačeného objektu od podložky a tým by tlač neúspešná. Tlačové podložky, ako aj iné časti 3D tlače prešli svojím vývojom. Od nevyhrievaných k vyhrievaným podložkám, tlač na zrkadlo, používanie laku na vlasy pre zvýšenie adhézie a pod. Zmenu priniesol povrch v podobe PEI fólie. Tento povrch pred tlačou netreba nijako špeciálne upravovať okrem jeho odmastenia.

1.6 Spustenie tlače

Jedná sa vlastne o čítanie vygenerovaného G-code a posielanie ho do tlačiarne. Počas celej doby tlače musí

byť zaručené, že tlačiareň bude postupne dostávať inštrukcie z *G-code* súboru.

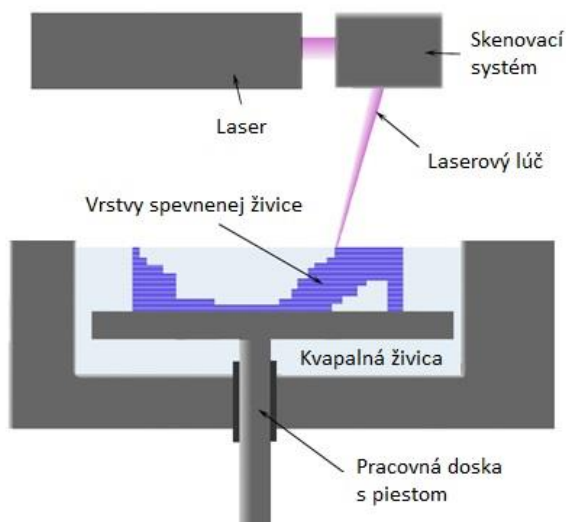
1.7 Postprocessing

Vytlačené modely môžeme väčšinou ihneď po vytlačení použiť ako funkčné diely. *Postprocessing* je potrebný ak máme vyššie nároky na vzhľad výtlačku. Hotový model je možné následne brúsiť, laminovať, maľovať akrylovými farbami, striekať farbou, pieskovať, vŕtať alebo frézovať.

2 DRUHY ADITÍVNYCH TECHNOLOGIÍ

Existuje množstvo druhov aditívnych technológií, ktoré sa odlišujú v spôsobe vytvárania jednotlivých vrstiev modelu a použitými materiálmi.

Stereolitografie (SLA) je najstaršou technológiou 3D tlače, ktorá bola vynájdená už v roku 1986 (*Charles Hull*). Je to metóda založená na princípe vytvrdzovania tekutej živice za pomoci ultrafialového lasera (obr. 3). Zo všetkých technológií aditívnej výroby je najkomplikovanejšia, ale zato aj najdetailnejšia, preto výsledkom je najlepšia kvalita povrchu a najlepšie prevedenie detailov.



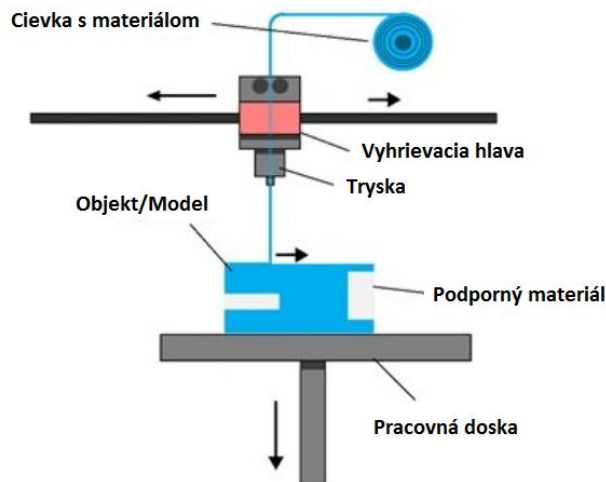
Obr. 3. Princíp stereolitografie technológie 3D tlače

SLA je vhodnou technológiou vtedy, keď je požadovaná vysoká presnosť, vzhľad a detail súčiastky. Naopak nie je to vhodná technológia ak je rozhodujúcim kritériom rýchlosť výroby modelu.

FDM (Fused Deposition Modeling) alebo tiež *FFF (Fused Filament Fabrication)* je asi najpopulárnejšia technológia 3D tlače, vzhľadom k počtu dostupných tlačiarní na trhu od základných po profesionálne tlačiarne vysokej kvality.

Princíp technológie *FDM* (obr. 4) spočíva v tavení a vytlačovaní materiálu dýzou vo forme vlákna na podložku, kde je svojím pohybom vo dvoch osiach postupne nanášaná veľmi tenká vrstva materiálu v rovine horizontálneho prierezu budúceho výrobku,

ktorá ihneď po nanesení stuhne. Model vzniká od spodnej časti k hornej. Materiál (*filament*) sa privádza z cievky k pohyblivej hlave, ktorá je riadená servomotormi. Vlákno prechádzajúce cez tlačovú hlavu je roztavené vyhrevnými telesami. Takto roztavený materiál je cez dýzu vytlačovaný na povrch vyrábanej súčiastky.



Obr. 4. Princíp technológie *FDM* 3D tlače [13]

4 VÝROBA OZUBENÝCH KOLIES 3D TLAČOU

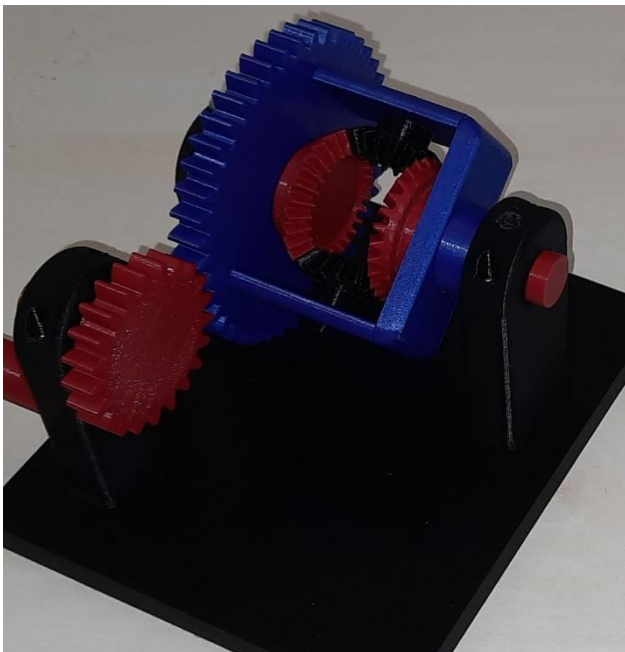
Výroba ozubených kolies je jednou z najnáročnejších oblastí strojárkej výroby, závisí od mnohých faktorov. Na výrobcov ozubených kolies sú kladené neustále väčšie a väčšie nároky. Ozubené kolesá musia byť vyrábané rýchlejšie, lacnejšie a vo vyššej kvalite.

Aby sa výroba neustále posúvala vpred a boli uspokojené požiadavky trhu musia technológovia, konštruktéri a iní odborní pracovníci neustále vyvíjať nové technológie a metódy výroby, ktoré budú efektívnejšie a produktívnejšie [14].

Výroba funkčných dielov pre koncové použitie už nie je doménou výhradne konvenčných technológií. Oblasť, ktorá v súčasnosti začína vzostup a to platí aj pri výrobe ozubených kolies sú aditívne technológie.

Použitie ozubených kolies aditívnou technológiou v súčasnosti je možné, ale závisí od funkcie ozubení a od požiadaviek na ich prevádzku. Zároveň je potrebné brať do úvahy aj sériovosť výroby. Pri potrebnom veľkom množstve ozubených kolies je vhodnejšie zvoliť konvenčný spôsob výroby ozubených kolies. Pri malých výrobných sériách a pri zložitejších tvaroch ozubených kolies by bolo možné zvoliť aj spôsob výroby ozubených kolies aditívnymi technológiami. Aditívne technológie, hlavne tie ktoré sa venujú výrobe súčiastok z kovu je málo preskúmaná téma a preto výskum venovaný aditívnym technológiám má vysoký potenciál.

Na obr. 5 sú modely ozubených kolies vyrobené pomocou 3D tlače. Tieto modely slúžia ako učebné pomôcky pri výučbe prevodových mechanizmov.



Obr. 5. Modely ozubených kolies vyrobených pomocou 3D tlače

Existuje mnoho spôsobov, ako vyrobiť ozubené kolesá 3D tlačou, ktoré budú rovnako odolné ako konvenčne vyrobené kolesá. Toto sú niektoré z nich:

- teplota filamentu - väčšina vlákien používaných na výrobu 3D tlačených ozubených kolies je termoplastická. Je potrebné si uvedomiť, že každý materiál má svoje jedinečné vlastnosti vrátane požiadaviek na teplotu. Pri 3D tlači je dôležité poznať teplotné požiadavky filamentov, aby sa dosiahol čo najlepší výsledok. Môžu sa použiť vyhrievacie podložky, aby sa vytlačené plasty ochladzovali pomalšie. Vyhneme sa tak deformácii, zmršťovaniu a vrstvy budú dobre priľnavé. Z tohto dôvodu by sa pri 3D tlači s termoplastickými vláknami mali vypnúť chladiace ventilátory,
- prekrytie výplne - na rozdiel od konvenčnej výroby nám aditívne technológie dávajú možnosť nastavenia výplne výrobkov. 3D tlačiarne majú túto jedinečnú funkciu s názvom „Prekrytie výplne“, pomocou ktorej môžeme nastaviť, koľko výplne chceme použiť. Pri 3D tlači je to veľmi dôležitý parameter, pretože správne nastavenie prekrytia výplne nám zvyšuje pevnosť medzi výplňou a obvodom modelu. Vo všeobecnosti platí, čím vyššie je percento prekrytia výplne, tým pevnejší bude vytlačený objekt. Avšak nastavenie príliš vysokého percenta výplne, spôsobí značnú spotrebu materiálu a predĺži čas tlače. Je preto potrebné nastaviť primerané prekrytie výplne (väčšinou $15\% \div 50\%$), aby bol výsledný model dostatočne pevný, ale na druhej strane ekonomicky výhodný,
- zníženie chladenia - niektorí výrobcovia využívajú chladenie na zlepšenie kvality povrchu 3D tlačených predmetov. Tento proces však môže spôsobiť slabé miesta, ak sa vykoná neefektívne. Vystavenie 3D tlačených modelov náhlej zmene teploty môže viesť k nárastu amorfných štruktúr, ktoré by mohli ovplyvniť celistvosť ozubených kolies. Navyše rýchle ochladenie vytvrdí vytlačený predmet rýchlejšie. To môže spôsobiť, že sa vrstvy ľahko oddelia, pretože materiály majú menej času na spojenie. Každé plastové vlákno vydrží rôzne úrovne teplôt. PLA je zatiaľ jediný materiál, ktorý veľmi dobre funguje so silnými chladiacimi ventilátormi. Ak teda použijeme iný plastový materiál, je lepšie znížiť výkon chladiaceho ventilátora, aby sa časti počas procesu tlače pevne spojili,
- výška vrstvy - pri 3D tlači nám definuje rozlíšenie alebo detail objektu. Čím je výška vrstvy nižšia, tým je model zložitejší. Uprednostňuje sa nižšia výška vrstvy aj kvôli tomu, že vrstvy budú mať lepšiu priľnavosť, čo zvyšuje pevnosť a trvanlivosť. Okrem toho bude menej otvorených priestorov, ktoré môžu tvoriť

slabé miesta vo vytlačenom modeli.

Ozubené kolesá vyrobené 3D tlačou sú dnes aplikované aj v rôznych priemyselných odvetviach. Na obr. 6 je model komerčne vyrábanej planétovej prevodovky, kde boli ozubené kolesá nahradené kolesami vyrobenými.

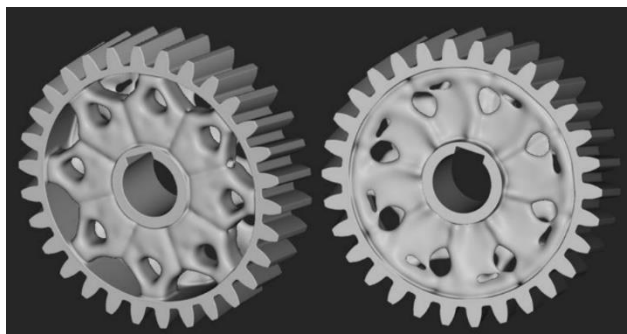


Obr. 6. Planétová prevodovka s ozubenými kolesami vyrobenými pomocou 3D tlače

Jedná sa o funkčnú náhradu pôvodného strojovo obrábaného hliníkového kolesa. Pre výrobu satelitov bola použitá technológia tavenia plastovej struny *FDM* a kompozitný materiál s prímiesou 15 % uhlíkových častíc, ktoré zabezpečili vysokú tuhosť a pevnosť planétového kolesa. Vďaka nízkej hustote kompozitu $1,08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oproti $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ hustoty hliníku a použitím optimálnej vnútornej výplne sa dosiahlo zníženie hmotnosti o vyše 60 % pôvodnej hmotnosti, pri zachovaní funkčnej pevnosti a tuhosti.



Obr. 7. Rôzne tvary telies ozubených kolies vyrobených pomocou 3D tlače



Obr. 8. Využitie generatívneho dizajnu pri optimalizácii tvaru telesa ozubeného kolesa

Ďalšou výhodou je možnosť vyrobiť tvary telies ozubených kolies, ktoré nie je možné vyrobiť štandardnými technologickými postupmi výroby (obr. 7).

Tradičné výrobné metódy ponechávajú len obmedzený priestor na skutočnú optimalizáciu ozubených kolies, pretože je príliš nákladné vyrábať také tvary telies ozubených kolies, ktoré by boli prispôbené požiadavkám a výsledkom generatívneho dizajnu (obr. 8). Je to spôsobené najmä tým, že by bolo potrebné vykonať niekoľko jednotlivých krokov a v prípade potreby vytvoriť alebo zakúpiť vhodné nástroje. Jedným zo spôsobov, ako to obísť, je použitie 3D tlače, ktoré ponúka možné riešenie v tom, že prostredníctvom procesov je možné vyrobiť ozubené koleso v jednom kuse a bez ďalších nástrojov.

ZÁVER

Výroba ozubených kolies už nie je záležitosťou výhradne konvenčných technológií. Aditívna výroba sa dnes využíva v mnohých odvetviach (medicína, astronautika, umenie, móda, stavebníctvo a pod.) a výnimkou nie sú ani funkčné diely zariadení, ku ktorým patria aj ozubené kolesá. Neustály rast dopytu po týchto súčiastkach, núti výrobcov premýšľať o inovatívnych spôsoboch ako ich vyrábať rýchlejšie. Väčšina firiem v dnešnej dobe ponúka výrobu ozubených kolies pomocou *FDM* tlačiarň, keďže tieto zariadenia sú najviac dostupné a najrozšírenejšie. Teda materiálom takýchto kolies je väčšinou plast (*Nylon*, *PLA*, *PETG*, *ABS*). Preto sa takéto kolesá používajú skôr na prenos menších výkonov. Dalo by sa povedať, že ozubené kolesá vyrobené aditívnymi technológiami sú omnoho menej odolné ako klasicky vyrobené ich náprotivky z kovu, ale neustály vývoj, napredovanie a nové materiály v oblasti 3D tlače toto tvrdenie postupne spochybňujú.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov: 029TUKÉ-4/2021

„Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov“ a VEGA 1/0528/20 „Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav“.

LITERATÚRA

[1] PAGAC, M. - HAJNYS, J. - HALAMA, R. - ALDABASH, T. - MESICEK, J. - JANCAR, L. - JANSÁ, J. (2021): *Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L*. Applied Sciences 2021, 11(4), p.1656.

[2] CZECH, P. - ŁAZARZ, B. - TUROŃ, K. (2017): *Influence of conditions of vehicle motion on its economy*. In: *Autobusy* No. 6, p. 136-142 ISSN 1509-5878.

[3] CHEN, X. et al. (2018): *User-Driven Generative Design*. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2018*, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 1-12.

[4] MANTIČ, M. - KUČKA, J. (2022): *Effect of notch geometry change on draw rod durability*. In: *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam (Nemecko): Elsevier, Roč. 141, p. 1-12.

[5] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽUŠOVÁ, L. (2022): *Investigation of air temperature change in the flexible element depending on connecting holes number during compressing of this element*. In: *Projektowanie, badania i eksploatacja*. - Bielsko-Biala (Poľsko): Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej p. 299-306.

[6] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*, MMS 2017 MATEC Web of Conference, pp. 157.

[7] KOPAS, P. et al. (2019): *Fatigue characteristics of welded high strength steel in the low cycle region of loading*. MATEC Web of Conferences, Volume: 254, p. 1-10.

[8] KUČKA, J. a kol. (2018): *Failure analysis of the foundry crane to increase its working parameters*. Engineering Failure Analysis. No. 88, pp. 25-34.

[9] CZECH, P. (2018): *Autonomous vehicles: basic issues*. Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., 100, pp. 15-22.

[10] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - MORAVIČ, M. (2018): *Experimental verification of the impact of a technical gas-using pneumatic coupling on torsional oscillation*. Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport., č. 99, pp. 55-63.

[11] SAPIETOVÁ, A. (2018) *Simplified computation methodology for contact forces on tapered rolling bearing with flexible parts*. Scientific Journal of Silesian University of Technology, Volume 99, pp. 177-182.

[12] MANTIČ, M. a kol. (2016): *Autonomous online system for evaluating steel structure durability*. Diagnostyka. Vol. 17, no. 3 pp. 15-20. - ISSN 1641-6414.

[13] STRÁTESKÝ, O. (2019): *Základy 3D tisku*. Praha: Prusa Research a.s., p. 61.

[14] ZHANG, Y., MAO, K., LEIGH, S., SHAH, A., CHAO, Z. (2020): *A parametric study of 3D printed polymer gears*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107, pp. 4481-4492.