

# Konštrukcia pružného kolesa harmonického prevodu

## Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.\*

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

## Jozef Krajňák, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice.  
E-mail: jozef.krajnak@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2373

## 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

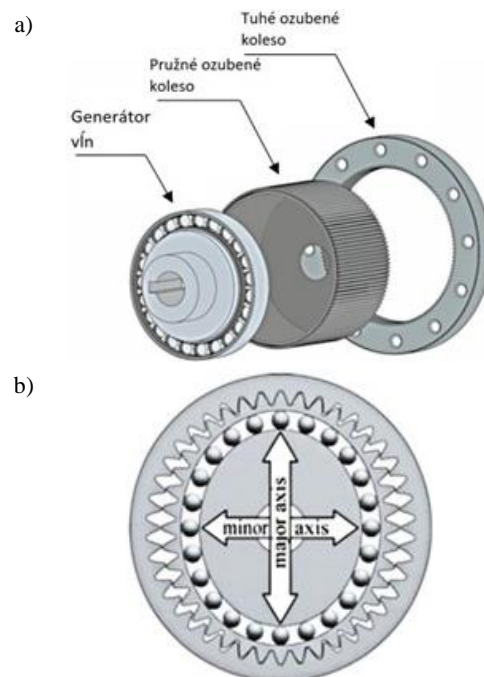
## The construction of a flexspline harmonic drive

**Abstract:** Flexspline is one of the most important components of harmonic drive. Flexspline is very adversely stressed during operation. In essence, stresses from deformation by the generator, stresses from the transmitted load and local stresses from the bending of the teeth in the tooth gaps act in it. Flexspline is radially flexible, but torsionally very stiff. When the wave generator is inserted into the Flexspline, the gear takes on its elliptical shape. When designing a flexible wheel, it is very important to determine and correctly choose its geometric properties.

**Keywords:** flexspline, harmonic drive, wave generator, construction.

## ÚVOD

Prevod s názvom *Harmonic Drive* bol navrhnutý v USA spoločnosťou *Muser* na zvýšenie krútiaceho momentu znížením rýchlosti otáčania motora ako zdroja energie. Harmonický prevod má štruktúru s tromi komponentmi: generátor vln (*wave generator WG*), pružné ozubené koleso (*flexspline FS*) a tuhé ozubené koleso (*circular spline CS*). Harmonické pohony majú oproti klasickým ozubeným prevodom množstvo výhod, ale aj nevýhod. Medzi hlavné výhody patrí: vysoký krútiaci moment, vynikajúca presnosť polohovania a opakovateľnosť, kompaktná konštrukcia, nulová vôľa, vysoký redukčný prevodový pomer a vysoká torzná tuhosť. Na druhej strane ich nevýhodou je vysoká elasticita, nelineárna tuhosť a tlmenie. Najbežnejší spôsob prevádzky pohonu s ozubeným kolesom harmonického prevodu využíva generátor vln ako vstupný článok a pružné koleso ako výstupný článok. V dôsledku toho, že pri harmonických prevodoch (obr. 1) je jeden člen poddajným, majú tieto prevody v porovnaní s planétovými prevodmi dve zvláštnosti. Prvá zvláštnosť harmonických prevodov spočíva v tom, že



**Obr. 1. Návrh harmonického pohonu:**  
a) hlavné prvky harmonického pohonu,  
b) interakcia harmonických hnacích prvkov

v dôsledku zmeneného tvaru poddajného kolesa od zaťaženia, alebo v dôsledku zvoleného tvaru vačky generátora, dochádza k veľmi malému relatívnemu pohybu medzi zubami, nachádzajúcimi sa v ozubenom zábere. Druhá zvláštnosť je taktiež podmienená tvarom poddajného kolesa, spočíva v zmenšení uhlov tlaku v kinematickej dvojici generátor vln - poddajné koleso, čo sa prejaví na zmenšení trecích strát tejto dvojice v porovnaní unášač- satelit pri planétovom prevode. Pružné koleso je hlavnou súčasťou harmonického prevodu, ktorý môže generovať opakované vibrácie generátora vln. Z tohto dôvodu by pružné koleso malo mať pružnosť a dobré vibračné charakteristiky.

## 1 KONFIGURÁCIA GENERÁTORA VĽN

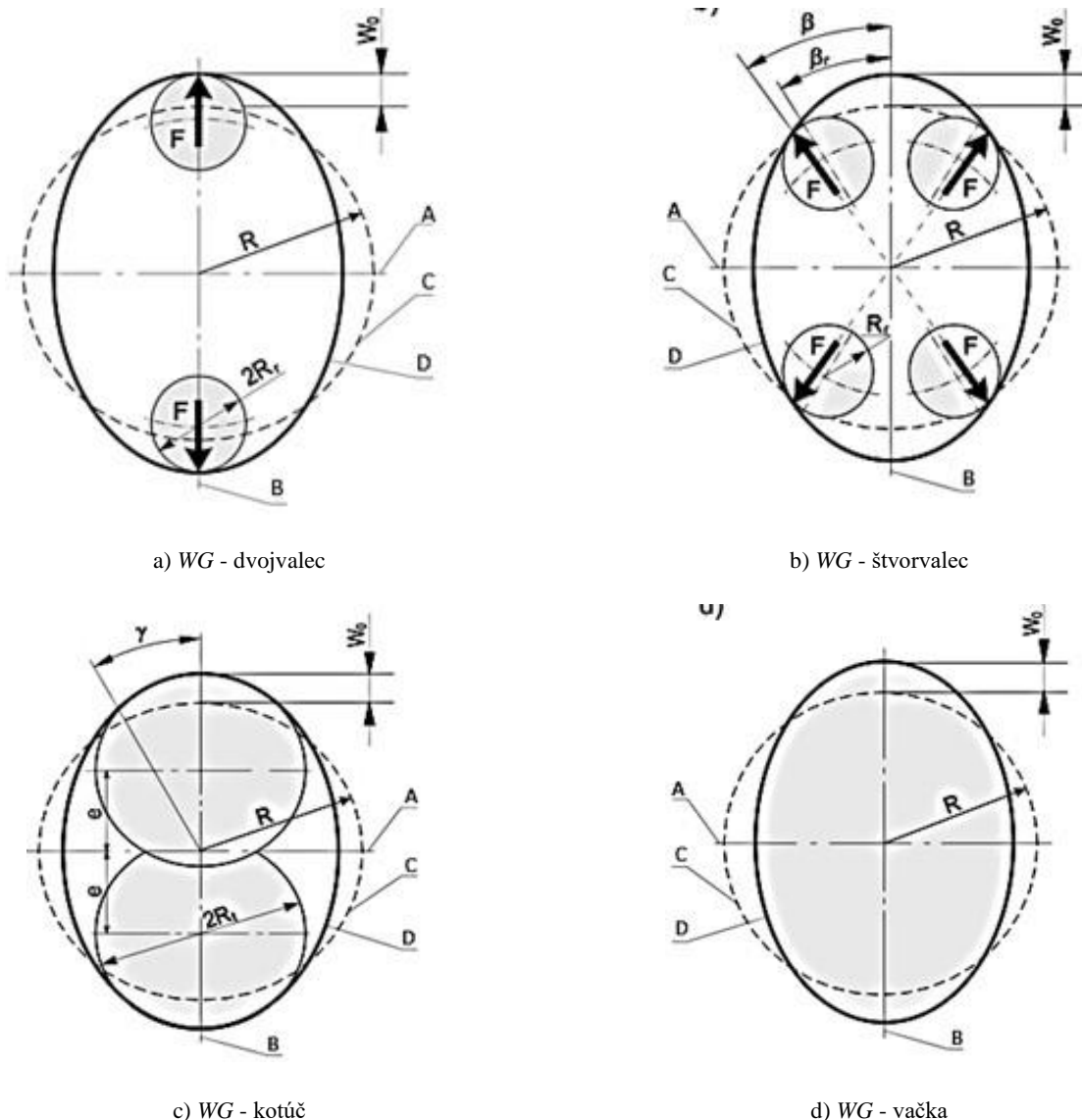
Vlnový generátor môže mať rozličnú konfiguráciu, pričom pri každom z nich dochádza k deformácii pružného kolesa iným spôsobom.

To znamená, že deformovaný tvar pružného kolesa je definovaný tvarom WG. V praxi sa využívajú nasledovné typy vlnového generátora:

- *WG typu ideálnej elipsy* (štandardný),
- *WG typu vačky* (obr. 2a),
- *WG typu dvoch diskov* (obr. 2b),)
- *WG typu dvoch odvaľujúcich sa elementov* (obr. 2c),
- *WG typu štyroch odvaľujúcich sa elementov* (obr. 2d).

Pre analytický popis strednicovej plochy pružného ozubeného kolesa jednotlivých konfigurácii WG je potrebné zaviesť niekoľko predpokladov, za ktorých budú nami popísané rovnice platné:

- neutrálna krivka pružného kolesa má konštantnú dĺžku (nemení sa počas deformácie),

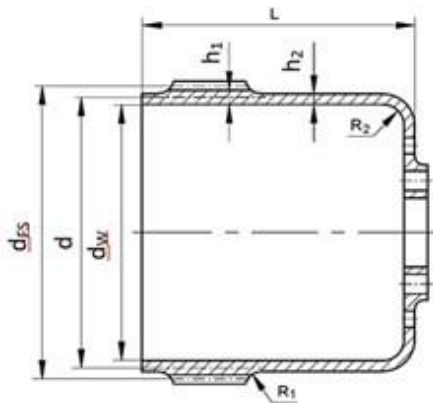


Obr. 2. Schematické znázornenie typických konfigurácií WG: a) – vedľajšia os generátora, b) – os generátora, c) – neutrálna vrstva pružného kolesa pred deformáciou, d) - neutrálna vrstva pružného kolesa po deformácii

- jednotlivé zuby pružného kolesa považujeme za tuhé, k deformácii dochádza len v koreni zuby,
- pričný rez geometriou zuby považujeme za nemenný počas deformácie a v každom bude kolmý na strednicovú plochu,
- uvažujeme, že zub je v zdeformovanom stave pružného kolesa „odrezaný“ od povrchu pružného kolesa (oddelenie v koreni zuby).

## 2 PRUŽNÉ OZUBENÉ KOLESO

Kľúčovým elementom harmonického prevodu slúžiace na prenos pohybu je pružné ozubené koleso, ktoré je tvorené tenkostenným valcom, pričom na jeho vonkajšom okraji (otvorenom) sa nachádza vonkajšie ozubenie. Uzavretá časť valcovej nádoby je vo väčšine prípadov zosilnená (hrubšia ako valcový povrch pružného kolesa), keďže sa k nej priamo pripája výstupný hriadeľ prevodovky prenášajúci vysoké krútiace momenty.



Obr. 3. Základná konštrukcia pružného kolesa:  $d_{FSw}$  - rozstupový priemer,  $d$  - stredný výpočtový priemer,  $d_w$  - vnútorný priemer,  $h_1$  - hrúbka „hrnca“ deformátora pod ozubením,  $h_2$  - hrúbka „hrnca“ bez ozubeného krúžku

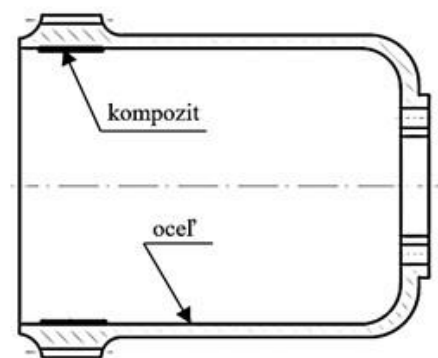
Tvar pružného kolesa (obr. 3) závisí od typu vlnového generátora, ktorý sa zasúva pri montáži do otvorenej časti pružného kolesa [12]. Cez uzavretú časť valcovej nádoby sú vedené diery. Pomocou skrutiek vedených cez tieto diery je následne primontovaný výstupný člen prevodového stupňa, ku ktorému sa dajú pripájať záťaž potrebným spôsobom.

Pružné koleso podlieha počas behu prevodovky neustálej deformácii od generátora vln a zároveň dochádza k viacnásobnému kontaktu v ozubení medzi pružným kolesom a tuhým kolesom. Z tohto dôsledku je dôležitá správna voľba materiálu pružného kolesa.

### 2.1 Materiál pružného kolesa

Pri navrhovaní pružného kolesa je veľmi dôležité určiť a správne zvoliť jeho geometrické vlastnosti. Adekvátny výber rozmerov pružného kolesa by mal zabezpečiť minimalizáciu napätí v nebezpečných

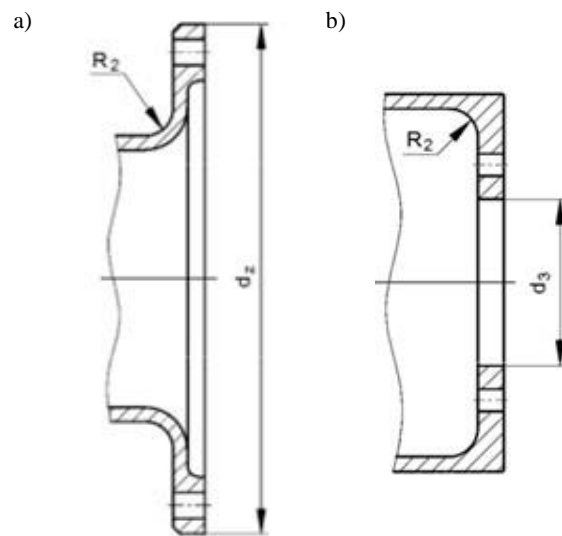
prierezoch a konštantnejšie rozloženie napätia pružného kolesa, ktorý musí byť pružný v radiálnom smere, ale musí byť tuhý v smere krútenia. Týmto javom sa nedá vyhnúť, keď pružné koleso je vyrobené z konvenčných izotropných materiálov, ako je oceľ. Preto je veľmi dôležitá vhodná aplikácia materiálov či technologických úprav. Použitie kompozitov pre pružné ozubené koleso umožňuje zníženie hmotnosti pružného kolesa a výrazne zvyšuje jeho radiálnu náchylnosť a tlmenie vibrácií [4, 5]. Výroba pružných kolies vyrobených výhradne z kompozitov je však obmedzená technologickými ťažkosťami spojenými s vytváraním ich ozubeného venca. Tento problém môže byť vyriešený aplikáciou tzv. „komplexné“ oceľovo-kompozitné hybridné pružné kolesá (obr. 4) [3].



Obr. 4. Konštrukcia tzv. „hrncového“ tvaru pružného kolesa z materiálu oceľ - kompozit

## 3 TYPY PRUŽNÉHO KOLESÁ

Geometrické parametre konštrukcií, s ktorými sa najčastejšie stretávame, sú uvedené na obr. 3. Klasické pružné kolesá môžu mať vonkajšie (obr. 5a), alebo vnútorné (obr. 5b) príruby.

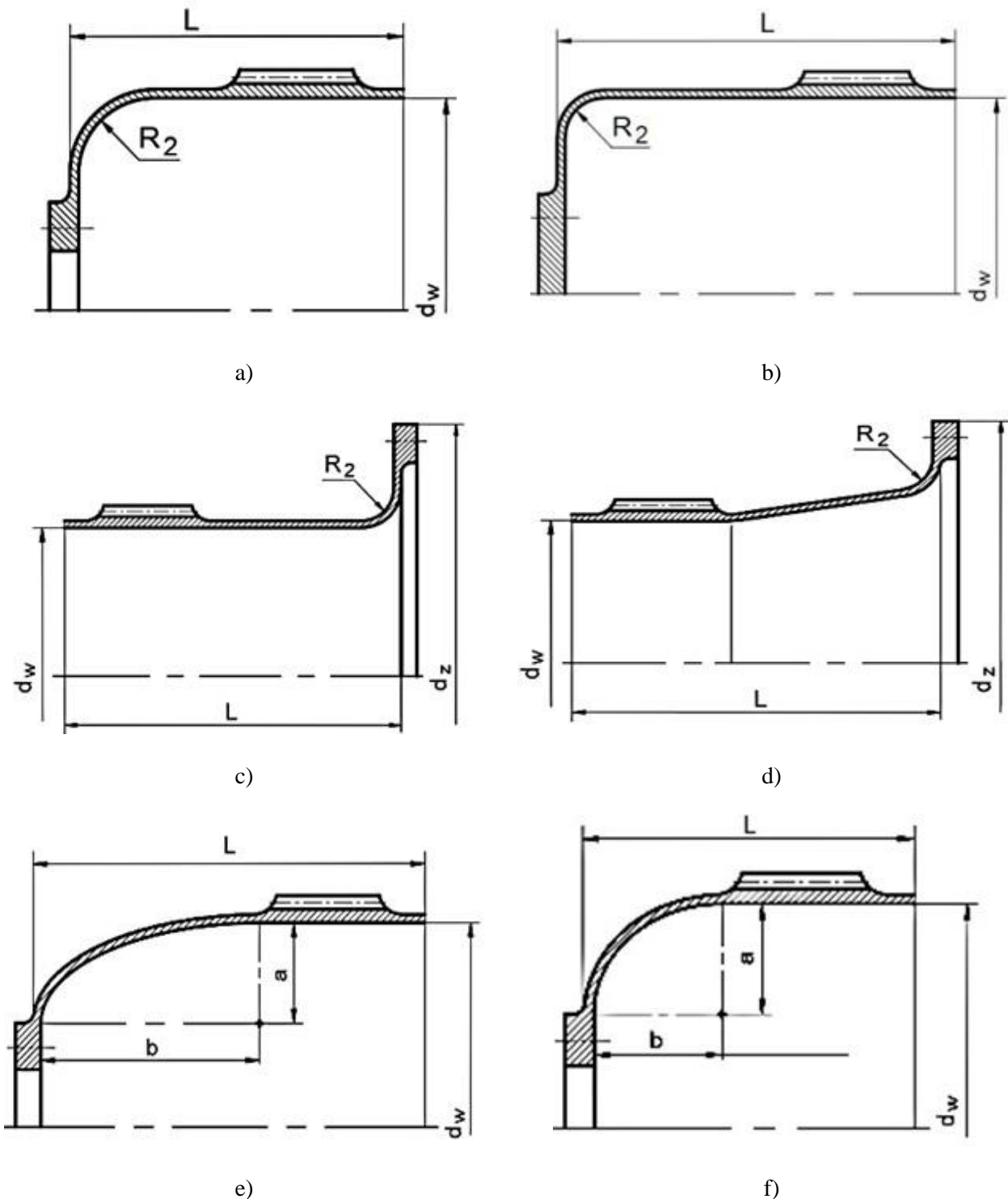


Obr. 5. Konštrukcia pružného kolesa harmonického prevodu: a) vonkajšia príruha, b) vnútorná príruha,  $d_z$  - priemer vonkajšej príruby,  $d_3$  - priemer vnútornej príruby,  $R_2$  - polomer zaoblenia

Pružné koleso harmonického prevodu má elasticke vlastnosti a v závislosti od generátora vln môže nadobúdať špecifické tvary. Na obr. 6 sú znázornené najčastejšie používané tvary pružného kolesa harmonického prevodu. Mnohé zo skúmaných tvarov pružného kolesa sa ukázali ako úplne zbytočné pre ich malú odolnosť. Cieľom rôznych analýz konštrukcií pružného kolesa harmonického prevodu je získať taký tvar pružného kolesa, ktorým by sa zlepšila jeho životnosť a spoľahlivosť.

## ZÁVER

Kľúčovým elementom harmonického prevodu slúžiace na prenos pohybu je pružné ozubené koleso. Tvar pružného kolesa závisí od typu vlnového generátora, ktorý sa zasúva pri montáži do otvorenej časti pružného kolesa. Pružné koleso je počas prevádzky namáhané veľmi nepriaznivo. Pôsobia v ňom napätia od deformácie generátorom, napätia od prenášaného zaťaženia a miestne napätia od ohybu zuba v zubových medzerách. Veľkosť



Obr. 6. Základné typy pružných elementov harmonického prevodu

deformácie pružného kolesa má značný vplyv na charakter a kvalitu záberu. Analýza tvaru pružného kolesa umožňuje posúdiť možnosť zmenšenia rozmerov harmonických pohonov bez obmedzenia ich pevnosti. Tvar činných bokov zubov pevného kolesa by mal byť taký, aby v mieste najväčšieho zaťaženia pružného kolesa po deformácií nedochádzalo k zvýšeniu napätí vplyvom nesprávneho záberu. Budúca práca sa môže zamerať na zistenie tvaru zdeformovaného zuba pružného kolesa a následne navrhnúť protiprofil, aby pri zábere pružného kolesa s tuhým kolesom harmonického prevodu nedochádzalo k interferencii.

## Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov:

KEGA 029TUKE-4/2021 - Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov.

KEGA 037TUKE-4/2024 - Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie.

VEGA 1 /0346/24 - Vývoj inovatívnych systémov a prvkov pre redukciu torzných vibrácií v mechanických pohonoch.

## LITERATÚRA

[1] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - ŽULOVÁ, 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 : Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Białej, pp. 299-306 [print], ISBN 978-83-66249-97-4.

[2] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. In: MM Science Journal, Praha (Česko): MM Publishing November, pp. 6014-6019 [print, online], ISSN 1803-1269.

[3] FOLEGA, P. - BURDZIG, R. - WEGRZYN, A. P. (2009): *Using new materials for flexsplines of harmonic drive*. In: Engineering' - Innovation and development, 5th Engineering Conference, Covilhã - Portugal.

[4] BORYSOVSKA, K. - VERBYLO, D. - PODREZOV, Y. - SZAFRAN, M. (1995): *The*

*structural optimization of ceramic-organic composites*. In: Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 54, No. 4, pp. 875-879.

[5] JEONG, S. - LEE, S. G. (1995): *Development of the composite flexspline for a cycloid-type harmonic drive using net shape manufacturing method*, In: Composite Structures, Vol. 32, pp. 557-565.

[6] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - ŽULOVÁ, L. - KAČÍR, M. - KAŠŠAY, P. - URBANSKÝ, M. (2023): *Innovative solution of torsional vibration reduction by application of pneumatic tuner in shipping piston devices*. In: Journal of Marine Science and Engineering. - Bazilej (Švajčiarsko): Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 11, Np. 2, pp. 1-15, [online], ISSN 2077-1312.

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

[8] Lightweight Harmonic Drive® Gears and Actuators Help Improve the Productivity of Factory Automation Systems: [online - www.harmonicdrive.net](http://www.harmonicdrive.net)

[9] CHEN, X. - LIU, Y. - XING, J. - LIN, S. - XU, W. (2014): *The parametric design of double-circular-arc tooth profile and its influence on the functional backlash of harmonic drive*. In: Mech. Mach. Theory, Vol. 73, pp. 1-24.

[10] MANTÍČ, M. - KULKA, J. (2022): *Effect of notch geometry change on draw rod durability*. In: Engineering Failure Analysis. Amsterdam (Nemecko): Elsevier Vol. 141, pp. 1-12, [print, online], ISSN 1350-6307.

[11] MONKOVA, K. et al. (2019): *Effect of the Weight reduction of a Gear Wheel on Model Characteristics*. In: MATEC Web Conf., No. 2, Vol. 299, pp. 1-6.

[12] HARMONIC GEAR STRAIN WAVE GEAR (2005): <https://harmonicdrive.de/en/technology/harmonic-drive-strain-wave-gears>.

[13] GHORBER, H. - GANDHI, S. - ALPETER, F. (2001): *On the Kinematic Error in Harmonic Drive Gears*. In: J. Mech. Des., pp. 90-97.

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