
Vplyv tvaru telesa na deformáciu čelného ozubenia

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

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

The influence of the shape of the body on the teeth deformation of the spur gear

Abstract: The article is devoted to the analysis of the influence of the basic parameters of the body of the spur gear on the deformation of the teeth in meshing. The problem is solved for spur gears of large dimensions, the semi-finished product of which can be a weldment, casting or forging. Gear deformations are determined by the finite element method. Examples of simulation and subsequent processing of the results demonstrate the extent of the influence of individual parameters of the gear body on the deformation of the gearing. At the same time, the results point to suitable designs of shape and dimensions to achieve the desired deformation of the teeth but with the smallest possible weight of the gears.

Keywords: spur gear, deformation, shape of wheel.

ÚVOD

K najrozšírenejším druhom prevodových mechanizmov v praxi patria ozubené prevody. Používajú sa v rôznej forme a veľkosti, od jednoduchých súkolesí, až po komplikované systémy ozubených prevodov. Základnou jednotkou ozubených prevodov sú ozubené kolesá. Je to jedna zo základných zložiek mechanizmov a častí strojov, predstavujú dôležitý a v mnohých prípadoch nezastupiteľný konštrukčný prvok.

Ozubené prevody používané v automobilovom priemysle sa dnes navrhujú tak, aby boli čo najľahšie, aby sa okrem iného znížila spotreba paliva a tým aj emisie CO_2 . Zníženie hmotnosti ozubeného prevodu je dôležité aj pri domácich spotrebičoch, kde sa ozubené kolesá získavajú vstrekovacími metódami z polymérnych materiálov, pri ktorých je zníženie ich hmotnosti dôležité pre úsporu materiálu pri zachovaní životnosti a odolnosti proti opotrebovaniu a pri zabezpečení ich správnej funkcie. Mimoriadny

význam zníženia hmotnosti ozubených prevodových mechanizmov je aj v automobilovom a leteckom priemysle, čím sa zlepší pomer hmotnosti prevodovky k prenášanému výkonu a zníži sa negatívny vplyv dynamických javov vyskytujúcich sa pri jej prevádzke. Teda súčasným trendom je návrh ozubených prevodov s minimálnou hmotnosťou, ale pri zachovaní prevádzkových parametrov.

Ozubené súkolesia sa konštruujú pre zadaný prenášaný výkon, otáčky a prevodový pomer. Je potrebné vziať do úvahy prevádzkové podmienky, požadovanú trvanlivosť a ďalšie parametre. Prvým krokom je určenie hlavných rozmerov ozubenia. Konštrukčný tvar telesa ozubeného kolesa môže mať rôzny tvar, ale musí spĺňať základné požiadavky tuhosti a pevnosti, a to pri čo najľahšej konštrukcii telesa ozubeného kolesa.

Príspevok sa zaoberá optimálnym návrhom vhodného tvaru telesa čelných ozubených kolies tak, aby

hmotnosť telesa bola čo najmenšia ale pri zachovaní tuhosti ozubenia.

1 KONŠTRUKCIE TELIES ČELNÝCH OZUBENÝCH KOLIES

Konštrukčné tvary ozubených kolies sú závislé od rozmerov ozubených kolies, materiálu a od spôsobu výroby telesa ozubeného kolesa.

Ozubené kolesá malých rozmerov (pastorky) v prípade, ak nie je splnená podmienka minimálnej hrúbky stojiny sa vyrábajú ako súčasť hriadeľa (obr. 1a).



Obr. 1. Čelný pastorok: a) vyrobený priamo na hriadeľi, b) samostatný

V sériovej výrobe, pokiaľ to rozmery umožňujú býva pastorok spravidla samostatný (obr. 1b), čo umožňuje používať vhodnejší materiál ako sa používa na hriadele.

Polotovary telies spolu zaberajúcich čelných ozubených kolies môžu byť vyrobené zvaráním (obr. 2), odlievaním alebo kovaním (obr. 3).

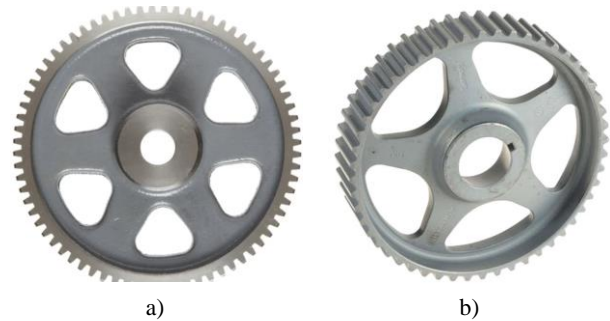


Obr. 2. Zvárané teleso čelného ozubeného kolesa

Pri priemeroch ozubených kolies od 150 mm do 200 mm sa používa kovanie. Kovanie sa využíva sa prevažne na výrobu polotovaru pre ozubené kolesá, ktorý bude neskôr opracovaný do konečnej podoby. Tieto polotovary sú tvorené operáciami ako je voľné kovanie alebo zápustkové kovanie. Zuby kolesa sú kované s prídavkom materiálu okolo profilu zuba. Na výrobu kovaných ozubených kolies sa môžu používať železné aj neželezné kovy ako je uhlíková oceľ,

legovaná oceľ, antikorozívna oceľ, titán, nikel, hliník a nástrojová oceľ.

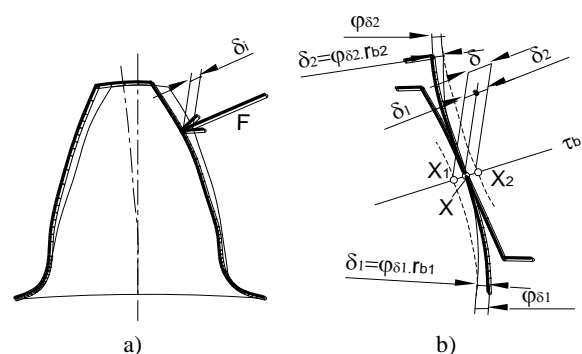
Pre ozubené kolesá väčších rozmerov sa ako polotovary používajú odliatky. Spojenie náboja s vencom sa v tomto prípade realizuje pomocou ramien s rôznym prierezom. Odlievania sa používa väčšinou na vytváranie polotovarov pre ozubené kolesá veľkých rozmerov. Sú menej únosné ako kolesá kované. Vyrábajú sa zo sivej liatiny pre obvodovú rýchlosť $v < 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a z oceleliatiny pre obvodovú rýchlosť $v < 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pre priemer čelného ozubeného kolesa $d > 500 \text{ mm}$.



Obr. 3. Tvar telesa: a) kovaného, b) odlievaného ozubeného kolesa

2 DEFORMÁCIA OZUBENIA

Zuby ozubených kolies sa vplyvom zaťaženia deformujú. Pôsobením výslednej normálovej sily F sa zub jedného kolesa deformuje tak, ako je to na obr. 4a) znázornené hrubou čiarou. Výsledná deformácia zuba v smere pôsobenia normálovej sily δ_i ($i = 1, 2$ - index, ktorý udáva, či ide o zub pastorka - hnacieho kolesa alebo zub hnaného kolesa) sa skladá z deformácie od ohybu, šmyku, deformácie v mieste votknutia a od dotykovej deformácie.



Obr. 4. Deformácia: a) zuba, b) páru spolu zaberajúcich zubov

V skutočnosti je však potrebné určiť deformáciu spolu zaberajúcich zubov, čiže deformáciu páru zubov, ktorá sa dá predstaviť a ilustrovať na obr. 4b. Na tomto obrázku je znázornená časť páru zubov, ktoré sa na záberovej priamke τ_b v nezaťaženom stave dotýkajú v bode X . Po zaťažení sa profily oboch spolu zaberajúcich zubov deformujú do tvaru znázorneného čiarkovanou čiarou na príslušnom

obrázku. Tieto už deformované profily zubov pretnú priamku záberu v bodoch X_1 a X_2 . Celková deformácia tohto páru zubov δ sa môže potom určiť ako súčet deformácií oboch zubov $\delta_1 + \delta_2$. Na obrázku sú ďalej zobrazené uhly $\varphi_{\delta 1}$ a $\varphi_{\delta 2}$. Sú to uhly, o ktoré sa musia jednotlivé kolesá pootočiť, aby sa znova stretli v bode X , tak, ako je to v skutočnosti.

Deformácia jednotlivých párov zubov sa mení po dráhe záberu. Zub má maximálnu deformáciu, ak pôsobí sila na špičke zuba, a to následkom veľkej deformácie zuba od ohybu.

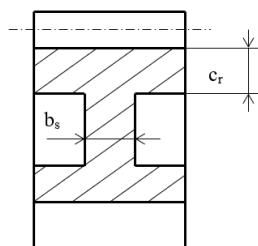
3 VPLYV TVARU A ROZMEROV TELESA OZUBENÉHO KOLESA NA DEFORMÁCIU OZUBENIA

Analýza vplyvu tvaru telesa čelného ozubeného kolesa na záberovú tuhosť ozubenia je riešená na základe výsledkov deformácie ozubenia. V tejto práci je deformácia ozubenia riešená pomocou metódy konečných prvkov. Podmienkou úspešného zvládnutia tejto problematiky bolo vytvorenie výpočtového modelu skúmaného ozubeného súkolesia, ktorý je podkladom pre riešenie úloh statickej deformačnej analýzy metódou konečných prvkov použitím programu *SolidWorks*.

Zaťaženie zubov čelného evolventného súkolesia má spojitý charakter. Pre riešenie bežných úloh pevnostného výpočtu ozubenia, výpočtu hriadeľov, uloženia ozubených kolies a podobne, sa spojitě zaťaženie nahrádza osamelou silou. Skúmané boli maximálne deformácie, keď zaťaženie pôsobí na hlave zuba.

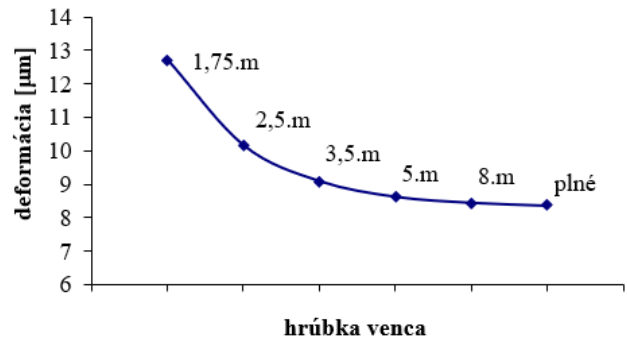
3.1 Vplyv hrúbky venca na deformáciu ozubenia

Vplyv hrúbky venca c_r (obr. 5) na deformáciu ozubenia sa bude zisťovať na modeli čelného ozubeného kolesa s priamymi zubami.



Obr. 5. Konštrukcia telesa: c_r - hrúbka venca, h - hrúbka stojiny

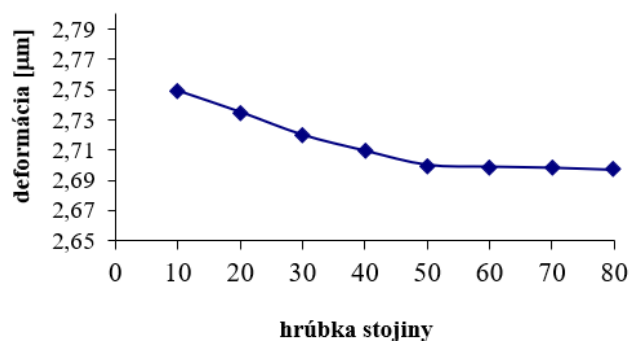
Na obr. 6 je znázornená závislosť deformácie ozubenia od hrúbky venca. Zistené výsledky ukazujú, že znižovaním hrúbky venca sa zväčšuje deformácia zubov. Ako zo zistených hodnôt vyplýva, do veľkostí venca 3,5 m sa deformácia mení väčšou zmenou. Pričom m je hodnota normalizovaného modulu.



Obr. 6. Vplyv hrúbky venca na deformáciu ozubenia

3.2 Vplyv hrúbky stojiny na deformáciu ozubenia

Z obr. 7 vidieť, že pri zväčšovaní šírky stojiny h , ktorá je umiestnená v strede šírky ozubeného kolesa sa deformácia mierne znižuje.

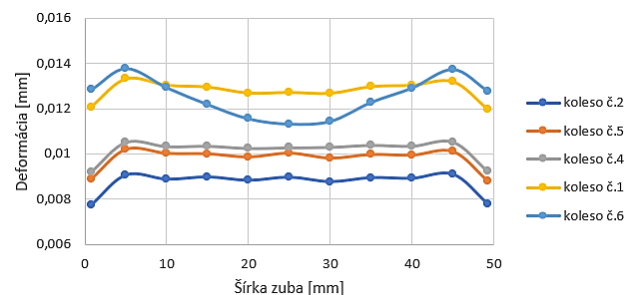


Obr. 7. Vplyv hrúbky venca na deformáciu ozubenia

Umiestnenie stojiny ovplyvňuje deformáciu ozubenia.

3.3 Vplyv voľby tvaru telesa ozubeného kolesa deformáciu ozubenia


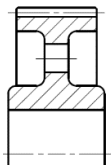

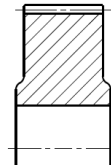

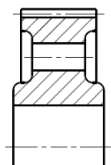
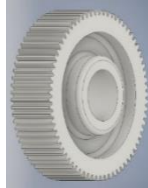
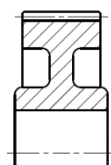
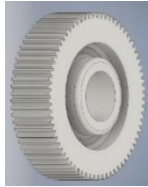
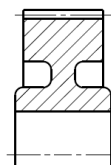

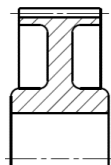
V tab. 1 sú udané tvary telies ozubených kolies, na ktorých bola skúmaná deformácia ozubenia. Veľkosť ozubenia je pre všetky ozubené kolesá rovnaká.



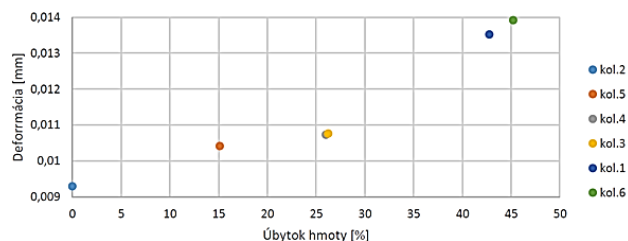
Obr. 9. Porovnanie deformácie zuba po šírke kovaného kolesa pre jednotlivé modely

Obrázok 9 zobrazuje rozloženie deformácie po šírke zuba, ak zaťaženie pôsobí na hlave zuba pre jednotlivé modely tvarov kovaných ozubených kolies.

Tab. 1. Tvary čelných ozubených kolies

Poradie	Model	
Koleso č. 1		
Koleso č. 2		
Koleso č. 3		
Koleso č. 4		
Koleso č. 5		
Koleso č. 6		

Z obrázku vyplýva, že rozloženie deformácie po šírke ozubenia je pre všetky skúmané tvary kovaných telies ozubených kolies porovnateľne rovnaká. Výnimku to tvorí model č. 6 (tab. 1), ktorého hrúbka venca je najmenšia.



Obr. 10. Vplyvu úbytku materiálu na maximálnu deformáciu ozubenia

Porovnanie vplyvu úbytku materiálu na deformáciu ozubenia je zobrazený na obr. 10. Čím je väčší úbytok hmoty, tým väčšia je výsledná deformácia ozubenia.

Porovnaním vplyvu percentuálneho úbytku hmoty na deformáciu ozubenia sa ako najvhodnejšie varianty javia kované kolesá s označením koleso č. 3 a č. 4 (tab. 1). Tieto kolesá majú veľmi podobnú deformáciu ozubenia aj úbytok hmoty, pričom sa tvarovo navzájom odlišujú. Výhodnejší sa javí variant tvarového riešenia pre koleso č. 4, pretože je z hľadiska ekonomiky výhodnejšie ako koleso č. 3, ktoré má na výrobu komplikovanejší tvar a je u neho nutnosť vyvrtávať odľahčovacie diery.

ZÁVER

Ozubené kolesá sú navrhované v rôznych vyhotoveniach. V súlade s presným návrhom ozubenia je potrebné venovať sa problematike návrhu vhodného tvaru telesa ozubeného kolesa. Na ich parametre sú v súčasnosti sú kladené stále vyššie nároky. Prejavuje sa to v raste a dynamickosti zaťaženi, pri ich čo najnižšej možnej hmotnosti a teda úspore materiálu avšak pre požadovanú životnosť a spoľahlivosť ozubených prevodov.

PodĎakovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov: KEGA 037TUKE-4/2024, KEGA 029TUKE-4/2021 a VEGA 1 /0346/24.

LITERATÚRA

- [1] 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.
- [2] KUCZAJ, M. et al. (2023): *Research on Vibroactivity of Toothed Gears with Highly Flexible Metal Clutch under Variable Load Conditions*. In: *Sensors*, Vol. 23, pp 287.
- [3] BUKOVSKÁ, Š. - MORAVEC, J. - SOLFRONK, P. - PEKÁREK, M. (2022): *Assessment of the Effect of Residual Stresses Arising in the HAZ of Welds on the Fatigue Life of S700MC Steel*. In: *Metals*, Vol. 12, 1890.
- [4] MORAVEC, J. - KOPAS, P. - JAKUBOVIČOVÁ, L. - LEITNER, B. (2018): *Experimental casting of forging ingots from model material*. In: *MMS 2017, MATEC Web of Conference*, pp. 157.
- [5] CZECH, P. (2018): *Autonomous vehicles: basic issues*. In: *Scientific Journal of Silesian University of Technology = Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Series Transport: Seria Transport*, Vol. 100, pp. 15-22.
- [6] MORAVEC, J. - GRYC, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, Vol. 11, 1106.