
Interakcia medzi materiálom, tepelným spracovaním a pevnostným výpočtom v návrhu ozubených prevodov

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

Interaction between Material, Heat Treatment, and Strength Calculation in Gear Transmission Design

Abstract: This paper investigates the complex interaction between material selection, heat treatment processes, and strength calculation methodologies in the design of gear transmissions. The mechanical performance and durability of gears are highly dependent on the choice of base material and the subsequent thermal treatments applied to optimize their microstructure and mechanical properties. We analysed how different heat treatment techniques, such as carburizing, quenching, and tempering, influence the microstructural characteristics and fatigue strength of common gear materials. Furthermore, the study evaluates how these material and heat treatment factors are integrated into strength calculation models used in gear design to predict operational lifespan and reliability. Experimental data and numerical simulations are employed to validate the correlation between processing parameters and gear performance. The findings highlight the critical role of a holistic design approach that considers material properties, heat treatment parameters, and accurate strength calculations to enhance gear transmission efficiency and longevity.

Keywords: gear transmission, material selection, heat treatment, strength calculation, fatigue life, Design, thermal processing.

ÚVOD

Ozubené prevody patria k najstarším a zároveň najrozšírenejším mechanickým prvkom používaným na prenos pohybu a krútiaceho momentu medzi rôznymi časťami strojov. Ich história siaha až do staroveku, keď už v starovekom Grécku a Ríme používali jednoduché mechanizmy s ozubenými kolesami na prenášanie pohybu v rôznych strojoch, napríklad v hodinách alebo mlynských zariadeniach. S nástupom priemyselnej revolúcie v 18. a 19. storočí sa použitie ozubených prevodov výrazne rozšírilo a zdokonalilo, čím sa stali nevyhnutnou súčasťou prakticky všetkých moderných strojov a zariadení - od automobilov cez letecké pohonné systémy až po presné priemyselné stroje. V súčasnosti sú ozubené prevody považované za najpoužívanejší a najspoľahlivejší prevodový mechanizmus v strojárstve vďaka ich schopnosti prenášať veľké

krútiace momenty s vysokou účinnosťou a presnosťou.

Spoločnosť a životnosť prevodového mechanizmu však nezávisia len od jeho správneho geometrického návrhu, ktorý zabezpečuje optimálne prevodové pomery a zníženie strát, ale aj od vhodného výberu materiálu a následného tepelného spracovania jeho komponentov. Materiál a jeho spracovanie zásadne ovplyvňujú mechanické vlastnosti ozubených kolies, ako sú tvrdosť, húževnatosť, odolnosť proti opotrebeniu a únave materiálu [1, 2]. Tieto vlastnosti následne určujú schopnosť prevodu odolávať namáhaniu počas prevádzky a zabraňujú vzniku porúch, ktoré by mohli viesť k zlyhaniu celej mechanickej sústavy. Preto je výber materiálu a správne nastavenie tepelného spracovania nevyhnutné pre dosiahnutie optimálnej kombinácie mechanických vlastností, ktoré zabezpečia spoľahlivý

a dlhodobý chod ozubených prevodov v rôznych pracovných podmienkach.

Pevnostný výpočet ozubených kolies predstavuje základný nástroj pre správne dimenzovanie a návrh prevodov. Tento výpočet umožňuje určiť dovolené napätia a únosnosť jednotlivých prvkov ozubeného prevodu tak, aby sa minimalizovalo riziko vzniku trhlín, únavových porúch alebo nadmerného opotrebenia. Historicky sa pevnostné výpočty vykonávali na základe empirických vzorcov a jednoduchých materiálových tabuliek, ktoré často vychádzali z obmedzených experimentálnych dát a skúseností z prevádzky. V posledných desaťročiach však došlo k významnému pokroku v oblasti materiálovej vedy, numerických metód a simulácií, čo umožňuje oveľa presnejšie modelovanie a hodnotenie pevnostných vlastností ozubených prevodov.

Moderné pevnostné výpočty integrujú detailné informácie o mechanických vlastnostiach materiálov vrátane vplyvu rôznych metód tepelného spracovania na tvrdosť, mikroštruktúru a únavové správanie. Často využívajú *metódy konečných prvkov (FEM)* a pokročilé simulačné techniky, ktoré umožňujú komplexne hodnotiť vplyv prevádzkových podmienok a materiálových parametrov na životnosť ozubených kolies. Tento prístup optimalizuje návrh prevodov nielen z hľadiska geometrie, ale aj materiálových vlastností, čím zvyšuje spoľahlivosť a efektivitu prevodových systémov.

V odbornej literatúre bola v posledných desaťročiach venovaná značná pozornosť vplyvu techník tepelného spracovania na únavové vlastnosti ocelových ozubených kolies [3]. Tepelné spracovanie zásadne ovplyvňuje mikroštruktúru materiálu a jeho mechanické vlastnosti, ako tvrdosť, húževnatosť a odolnosť proti opotrebeniu a únavovému poškodeniu.

Medzi najpoužívanejšie techniky patria *kalenie, cementovanie, nitridovanie a indukčné kalenie* [4, 5]. Každá metóda prináša odlišné mikroštruktúralne a mechanické vlastnosti, ktoré ovplyvňujú výkon a spoľahlivosť prevodov [6]. *Cementovanie* vytvára tvrdý povrch s odolnosťou voči opotrebeniu, zatiaľ čo jadro zostáva húževnaté, čo je dôležité pre absorbovanie dynamických namáhání [7]. *Nitridovanie* poskytuje tvrdý povrch s vynikajúcou odolnosťou voči únavovým poškodeniam, no s menšou hĺbkou účinku [8].

Správna kombinácia materiálu a tepelného spracovania významne zlepšuje únavovú životnosť ozubených kolies [9]. Experimenty ukazujú, že vhodne spracované diely dosahujú podstatne vyšší počet cyklov do vzniku únavovej poruchy v porovnaní s dielmi bez tepelných úprav alebo s nevhodným spracovaním [10].

Okrem výberu metódy kladú autori dôraz na kontrolu technologických parametrov - teploty, doby

spracovania, rýchlosti ochladzovania a atmosféry, ktoré ovplyvňujú kvalitu povrchu, hrúbku kalenej vrstvy a homogenitu mikroštruktúry. Nedostatočná kontrola môže viesť k vnútorným napätiam, mikrotrhlinám a nerovnomernej tvrdosti, predpokladom predčasného zlyhania [11].

Návrh a výroba ozubených prevodov je interdisciplinárna úloha kombinujúca poznatky materiáloveho inžinierstva, výrobnjej technológie a konštrukcie mechanických systémov [12]. Zahnutie materiálových vlastností po tepelnom spracovaní do pevnostných výpočtov a simulácií je dôležité pre spoľahlivejší a ekonomicky efektívny návrh prevodov [13].

Z pohľadu konštruktéra je dôležité pochopiť vzájomné prepojenie medzi materiálom, spôsobom jeho spracovania a výpočtovým modelom. Len komplexný prístup umožní optimalizovať ozubený prevod tak, aby bol nielen pevnostne spoľahlivý, ale aj ekonomicky výhodný, ľahší a energeticky efektívnejší.

Cieľom tejto práce je analyzovať interakciu medzi materiálovými vlastnosťami, spôsobom tepelného spracovania a výpočtovými postupmi používanými pri návrhu ozubených prevodov. Práca sa zameriava na ukážku toho, ako tieto tri faktory navzájom ovplyvňujú konečný výsledok výpočtu a prevádzkovú spoľahlivosť prevodového mechanizmu.

1 ZÁSADY PEVNOSTNÉHO DIMENZOVANIA OZUBENÝCH PREVODOV

Pevnostný výpočet ozubených kolies vychádza z analytických metód popísaných v medzinárodných a národných normách, ktoré stanovujú postupy na hodnotenie únosnosti zubov pri rôznych druhoch namáhania, najmä pri kontakte (*pitting*) a ohybovom namáhaní (zlomenie zuba). Medzi najpoužívanejšie normy patrí v rámci Európskej únie norma *STN EN ISO 6336*, ktorá predstavuje jednotný štandard na vyhodnocovanie pevnosti ozubených prevodov a stanovuje kritériá pre kontaktné a ohybové napätia, bezpečnostné faktory a dovolené hodnoty materiálových napätí v rámci daných prevádzkových podmienok.

Je však potrebné dodať, že mechanizmus pevnostného výpočtu môže do istej miery závisieť od krajiny či regiónu, kde sa prevod vyrába alebo používa, pretože rôzne krajiny môžu akceptovať či preferovať odlišné normy. Napríklad v Spojených štátoch sa bežne používa norma *AGMA 2101-D04*, ktorá má podobný cieľ, no mierne odlišné metodiky hodnotenia únosnosti a bezpečnostných kritérií. V Japonsku sú zas používané normy *JIS (Japanese Industrial Standards)*, ktoré reflektujú špecifiká tamojšieho priemyslu. Tento rozdiel v normách poukazuje na

rôzne prístupy k návrhu a hodnoteniu ozubených prevodov podľa regionálnych požiadaviek a štandardov.

Spôľahlivosť pevnostného výpočtu ozubených kolies je výrazne podmienená presnosťou údajov o použitom materiáli. Nominálne materiálové vlastnosti, ako je medza klzu, tvrdosť, modul pružnosti či únavová pevnosť, tvoria základ vstupných parametrov pre výpočet. Avšak reálne správanie ozubeného zuba pri prevádzkovom zaťažení závisí aj od mikroštruktúry materiálu a technologických procesov, ktorými bol komponent vystavený, vrátane tepelného spracovania a povrchových úprav. Tieto faktory môžu výrazne ovplyvniť únosnosť, životnosť a spoľahlivosť prevodov.

V rámci Európskej únie platí norma EN ISO 6336, ktorá bola vypracovaná na základe konsenzu medzinárodných expertov a je harmonizovaná s normami ISO platnými globálne. Táto norma sa stala východiskom pre veľkú časť súčasného výskumu a praxe v oblasti pevnostných výpočtov ozubených prevodov. Norma definuje podrobný metodický rámec pre výpočet kontaktnej únosnosti, ohybovej únosnosti, a ďalších relevantných parametrov, pričom zohľadňuje rôzne prevádzkové a výrobné podmienky. Tento štandard predstavuje základ pre navrhovanie spoľahlivých, efektívnych a bezpečných ozubených prevodov používaných v priemysle.

2 MATERIÁLOVÉ FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE PEVNOSŤ OZUBENÝCH KOLIES

Pevnosť ozubených kolies je jedným z kľúčových aspektov pri ich návrhu a dimenzovaní. Okrem geometrických parametrov (ako sú modul, šírka zuba, tvar koreňa a pod.) zohrávajú rozhodujúcu úlohu aj materiálové vlastnosti, ktoré výrazne ovplyvňujú životnosť a spoľahlivosť prevodových mechanizmov.

Medzi hlavné materiálové faktory, ktoré ovplyvňujú pevnosť ozubených kolies, patria najmä:

- pevnosť v ohybe a ťahu,
- tvrdosť povrchu,
- únavové vlastnosti,
- tepelné spracovanie,
- modul pružnosti,
- húževnatosť materiálu.

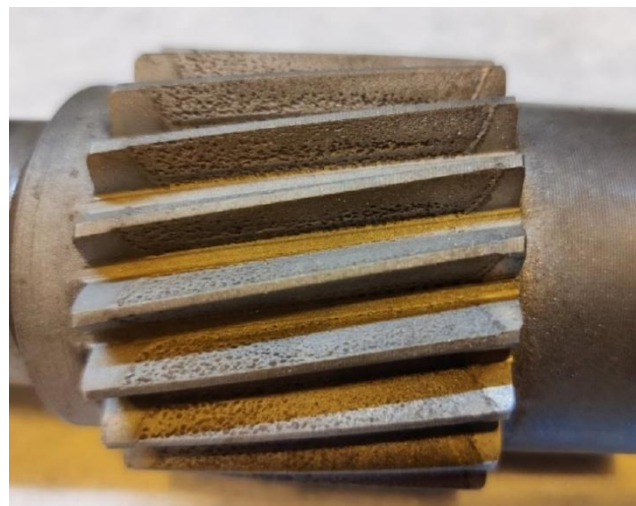
Pevnosť v ohybe a ťahu patrí medzi kľúčové mechanické vlastnosti materiálu, ktoré určujú jeho schopnosť odolávať pôsobeniu zaťaženia bez porušenia. V prípade ozubených kolies je táto vlastnosť mimoriadne dôležitá najmä v oblasti koreňa zuba, kde dochádza k sústredeniu napätia a ktoré je často vystavené únavovému namáhaniu. Nedostatočná pevnosť v týchto oblastiach môže viesť

k vzniku trhlín a následnému lomu zuba (obr. 1). Naopak, vyššia pevnosť materiálu znižuje pravdepodobnosť vzniku takéhoto poškodenia a prispieva k celkovej spoľahlivosti a životnosti prevodového mechanizmu [14].



Obr. 1. Poškodenie zuba lomom

Tvrdosť povrchu je dôležitým parametrom ovplyvňujúcim odolnosť ozubených kolies voči opotrebeniu, ako aj voči bodovému poškodeniu povrchu zubov, známemu ako *pitting* (obr. 2). Tvrdší povrch znižuje riziko poškodenia pri kontakte zubov počas prevádzky, čím sa predlžuje ich životnosť. Požadovaná tvrdosť sa zvyčajne dosahuje pomocou tepelno-chemického spracovania, ako je *cementovanie*, *nitridovanie* alebo *kalenie*, ktoré zabezpečujú tvrdý povrch pri zachovaní húževnatého jadra.

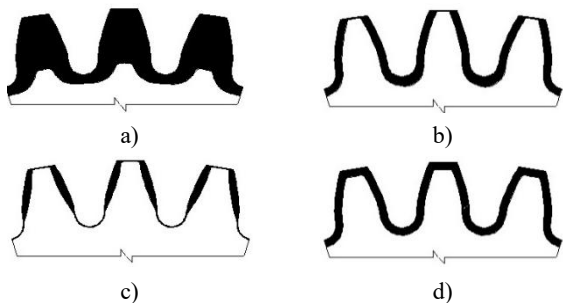


Obr. 2. Pitting na ozubení

Únavové vlastnosti materiálu sú taktiež kľúčové, keďže ozubené kolesá pracujú v podmienkach opakovaného cyklického zaťaženia. Materiál musí byť schopný dlhodobo odolávať únavovému namáhaniu bez vzniku trhlín. Veľký vplyv na vznik únavových porúch má aj kvalita povrchu - najmä prítomnosť mikrotrhlín alebo vrubov, ktoré môžu slúžiť ako iniciačné body pre poruchu.

Tepelné spracovanie zohráva významnú úlohu pri formovaní konečných mechanických vlastností materiálu ozubeného kolesa [15]. Má zásadný vplyv na mikroštruktúru materiálu, jeho tvrdosť, zvyškové napätia, ako aj húževnatosť [16]. Jedným z najčastejšie využívaných postupov je *kalenie*, ktorého cieľom je výrazne zvýšiť povrchovú tvrdosť zubov. Treba však brať do úvahy, že táto úprava môže súčasne znížiť húževnatosť jadra, čo je potrebné zohľadniť najmä pri návrhu komponentov vystavených rázovým zaťaženiám.

Veľmi účinnou metódou v tejto oblasti je povrchové *kalenie*, pri ktorom sa dosahuje tvrdý a voči opotrebeniu odolný povrch zubov, zatiaľ čo jadro zostáva relatívne mäkké a húževnaté (obr. 3). Pre túto úpravu sa používajú ocele s obsahom uhlíka približne 0,3 % až 0,5 % C, čo umožňuje účinné *zakalenie* povrchu bez nadmerného ovplyvnenia jadra. Ohrev prebieha indukčne alebo plameňom. V závislosti od rozmerov ozubeného kolesa sa *kalenie* realizuje buď jednorazovo (pri menších dieloch), zub po zube, alebo medzerovo - čo je výhodnejšia metóda pre ozubenie s väčšími modulmi (zvyčajne nad 6 mm). Z hľadiska ohybovej pevnosti je práve medzerové *kalenie* výrazne efektívnejšie než samostatné *kalenie* jednotlivých zubov. Takto spracované ozubenie dosahuje tvrdosť povrchu v rozmedzí HRC 45 až 55, čo významne prispieva k jeho odolnosti voči opotrebeniu a únave.



Obr. 3. Tvary tvrdenej vrstvy ozubenia: a - hlboké prekalenie, b - kalenie zub po zube, c - medzerové kalenie, d - obrysové kalenie cementovanej vrstvy

Modul pružnosti (*Youngov* modul) určuje mieru pružnej deformácie materiálu pri zaťažení. V prípade ozubených kolies má zásadný vplyv na rozloženie napätia v zuboch a na presnosť prenosu krútiaceho momentu. Materiály s vyšším modulom sú menej náchylné na elastickú deformáciu, čo prispieva k vyššej prevádzkovej presnosti a stabilite pohonu.

Húževnatosť vyjadruje schopnosť materiálu pohltiť energiu pred porušením, tzn. kombináciu pevnosti a plastickej deformácie. V kontexte ozubených kolies je dôležitá z hľadiska:

- odolnosti voči náhlym rázovým zaťaženiám, ktoré sa môžu vyskytnúť pri nepravidelnej prevádzke (napr. nábehy, zastavenia, kolízie, záseky),

- prevencie krehkého lomu, ktorý by mohol viesť k náhlej a fatálnej poruche celého mechanizmu bez predchádzajúceho varovania,
- zabezpečenia integrity koreňa zuba, ktorý býva najcitlivejším miestom na vznik poruchy.

Vyváženie húževnatosti a tvrdosti je kľúčové - napríklad kalené ocele majú síce tvrdý povrch (odolný voči opotrebeniu), ale zároveň musia mať dostatočne húževnaté jadro, aby odolalo rázovým silám a únavovému poškodeniu.

4 REALIZÁCIA ŠTÚDIE A ANALÝZA VÝSLEDKOV

4.1 Výber materiálov

Pre účely analýzy boli vybrané tri typické ocele často používané pri výrobe ozubených kolies:

C45 (nelegovaná uhlíková oceľ) - táto oceľ je charakteristická stredným obsahom uhlíka (~0,45 % C), čo jej zabezpečuje dobrú pevnosť a tvrdosť po tepelnom spracovaní. *C45* je relatívne cenovo dostupná a vhodná pre výrobu ozubených kolies, kde nie sú kladené extrémne nároky na mechanické vlastnosti a odolnosť voči opotrebeniu. Používa sa najmä tam, kde je možnosť povrchového kalenia alebo cementovania na zvýšenie tvrdosti zubov.

16MnCr5 (legovaná oceľ na cementovanie) - ide o legovanú *nízkouhlíkovú* oceľ s prídavkom mangánu a chrómu, optimalizovanú pre cementovanie - proces, pri ktorom sa povrch materiálu obohacuje uhlíkom, čím sa dosahuje tvrdý a odolný povrch pri zachovaní húževnatého jadra. Táto oceľ je veľmi často používaná pre ozubené kolesá vystavené vysokým zaťaženiám, kde je požadovaná kombinácia odolnosti proti opotrebeniu a dostatočnej húževnatosti.

18CrNiMo7-6 (*nízkouhlíková* legovaná oceľ pre kalenie a popúšťanie) - táto oceľ obsahuje chróm, nikel a molybdén, čo jej poskytuje veľmi dobrú kombináciu pevnosti, húževnatosti a tvrdosti po tepelnom spracovaní kalením a popúšťaním. Je ideálna pre výrobu náročných ozubených prevodov, kde sú požiadavky na dlhú životnosť, vysokú pevnosť a odolnosť voči únave mimoriadne vysoké. Vďaka svojej mikroštruktúre a vlastnostiam umožňuje presnejšie a odolnejšie spracovanie oproti bežným uhlíkovým oceliam.

4.2 Parametre ozubeného súkolesia

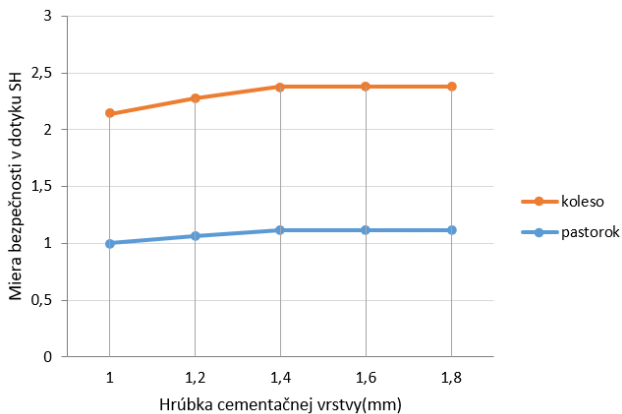
Problematika bola riešená pre čelné ozubené súkolesie so šikmými zubami a pre tieto parametre: prevodovku s výkonom $P = 800$ kW a požadovanou životnosť ozubenia 25000 hod. Parametre čelného prevodu prvého prevodového stupňa sú:

- počet zubov pastorka $z_1 = 22$,
- počet zubov kolesa $z_2 = 58$,

- uhol záberu $a = 20^\circ$,
- normalizovaná hodnota modulu $m_n = 10\text{mm}$,
- uhol sklonu ozubenia $\beta_1 = 27,266^\circ$,
- osová vzdialenosť $a = 450\text{ mm}$,
- výkon $P = 800\text{ kW}$,
- stupeň presnosti výroby IT8,
- vstupné otáčky $n_1 = 330\text{ min}^{-1}$.

4.3 Vplyv hrúbky cementačnej vrstvy

Najčastejšie sa zuby ozubených kolies *cementujú* a následne *kalia*, čím sa dosahuje kombinácia tvrdého, odolného povrchu a húževnatého jadra. V štúdiu bol kladený zvláštny dôraz na vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na pevnostný výpočet ozubenia. So zväčšovaním hrúbky *cementačnej* vrstvy rastie aj miera bezpečnosti z hľadiska pevnosti, avšak norma pre pevnostný výpočet ozubenia stanovuje maximálny limit tejto vrstvy.



Obr. 4. Vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na mieru bezpečnosti v dotyku

Pre geometrické rozmery typické pre ozubené súkolesie, kde je modul $m_n = 10\text{ mm}$, norma uvádza maximálnu hrúbku *cementačnej* vrstvy na úrovni 2 mm, čo však nie je optimálna hodnota z hľadiska výkonu a presnosti.

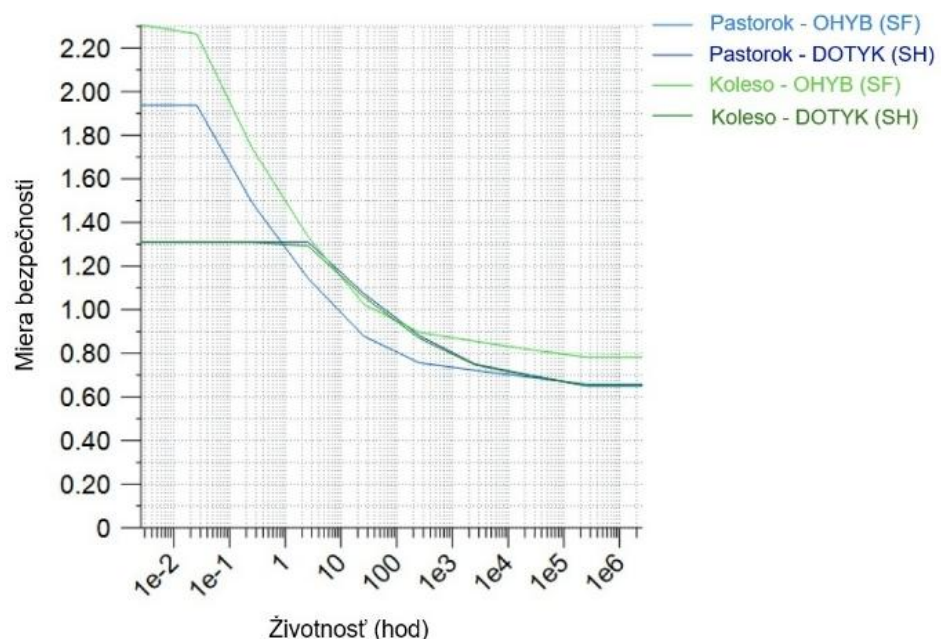
Podmienkou pre dosiahnutie smerodajných hodnôt časových pevností *cementovaného* materiálu je dodržanie dostatočnej hĺbky *cementačnej* vrstvy. Podľa normy by mala byť hrúbka vrstvy po konečnom opracovaní v rozmedzí 1,6 mm až 1,8 mm. Keďže *cementácia* nie je bezdeformačný proces, konečné spracovanie je potrebné voliť s ohľadom na požadovaný stupeň presnosti ozubenia. Po dosiahnutí požadovanej hrúbky *cementačnej* vrstvy je nevyhnutné zabezpečiť, aby pri brúsení zubov nedošlo k vzniku vrubov alebo k zbrúseniu *cementačnej* vrstvy v oblasti päty zuba, pretože tieto vplyvy znižujú únosnosť zubov v ohybe aj v dotyku. Na obr. 4. je znázornený vplyv hrúbky *cementačnej* vrstvy na mieru bezpečnosti v dotyku „SH“.

4.4 Výsledky výpočtu pevnosti ozubeného kola

Na obr. 5 je znázornený priebeh súčiniteľov bezpečnosti pre ozubené súkolesie vyrobené z materiálu 18CrNiMo6-7, ktoré bolo tepelne spracované *cementovaním* a následným *kalením*. Hrúbka *cementačnej* vrstvy bola 1,6 mm, čo zabezpečuje požadovanú tvrdosť povrchu a zároveň dostatočnú húževnatosť jadra.

Zobrazené sú dva hlavné súčinitele bezpečnosti:

- S_F - súčiniteľ bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v koreňovej oblasti zuba,



Obr. 5. Vypočítaná bezpečnosť ozubených kolies z ocele 18CrNiMo7-6

- S_H - súčiniteľ bezpečnosti proti únavovému poškodeniu bokov zubov (*pittingu*).

Z grafu je zrejmé, že priebehy oboch súčiniteľov - pre pastorok aj ozubené koleso - sú si veľmi podobné, čo naznačuje vyvážené namáhanie oboch členov súkolesia. Táto symetria priebehov poukazuje na kvalitný návrh prevodového stupňa z hľadiska rozloženia zaťaženia aj výrobných tolerancií.

Podľa normy ISO 6336, ktorá sa bežne používa pri hodnotení únosnosti ozubených prevodov, sa za minimálne prípustné hodnoty súčiniteľov bezpečnosti považujú:

- $S_F \geq 1,4$ súčiniteľ bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v koreňovej oblasti zuba,
- $S_H \geq 1,1$ súčiniteľ bezpečnosti proti únavovému poškodeniu bokov zubov (*pittingu*).

Tieto hraničné hodnoty slúžia ako kritérium pre posúdenie spoľahlivosti súkolesia v prevádzke.

Takýmto spôsobom boli vyhodnotené aj priebehy súčiniteľov bezpečnosti pre ozubené súkolesia vyrobené z materiálov 16MnCr5 a 18CrNiMo7-6. Výpočty umožnili porovnať správanie sa jednotlivých materiálov z hľadiska odolnosti voči únave a identifikovať kritické oblasti namáhania.

Je zrejmé, že pevnosť materiálu ovplyvňuje očakávanú životnosť, no zároveň má vplyv aj na samotný mechanizmus porušenia. Koreň zuba prvého ozubeného kolesa z materiálu 18CrNiMo7-6 má jednoznačne najnižšiu životnosť v porovnaní s bokom zuba alebo s koreňom a bokom druhého ozubeného kolesa. Pri zmene na oceľ s nižšou pevnosťou sa ukazuje, že pevnosť koreňa zuba druhého kolesa zostáva relatívne vyššia v porovnaní s jeho bokom. To naznačuje, že pri nižších pevnostiach materiálu sa pomer medzi odolnosťou voči ohybovému a kontaktnému namáhaniu mení v prospech koreňovej oblasti.

ZÁVER

Správny návrh ozubených prevodov si vyžaduje komplexné zohľadnenie viacerých vzájomne prepojených faktorov. Kľúčovú úlohu zohráva výber materiálu, jeho následné tepelné spracovanie a pevnostný výpočet, ktoré spolu vytvárajú základ pre dosiahnutie požadovanej životnosti, únosnosti a spoľahlivosti prevodového mechanizmu.

Z vykonaných analýz vyplýva, že interakcia medzi použitým materiálom a jeho tepelným spracovaním významne ovplyvňuje výsledné mechanické vlastnosti ozubených kolies, predovšetkým ich odolnosť voči únave spôsobenej namáhaním na ohyb a dotyk. Napríklad vysokolegované ocele (ako 18CrNiMo7-6) po *cementovaní* a *kalení* poskytujú vyššiu tvrdosť povrchu, húževnaté jadro a lepšiu únavovú pevnosť v porovnaní s bežnejšími

materiálmi ako 16MnCr5, avšak za cenu vyšších výrobných nákladov.

Pevnostné výpočty podľa noriem (napr. ISO 6336) umožňujú spoľahlivo vyhodnotiť bezpečnostné súčinitele a identifikovať potenciálne kritické oblasti porušenia. Výsledky výpočtov ukazujú, že nedostatočný výber materiálu alebo nevhodné tepelné spracovanie môže spôsobiť výrazné zníženie životnosti súkolesia, aj pri správne dimenzovaných zuboch.

Odporúčania pre návrh ozubených súkolesí:

- voľba materiálu by mala byť podmienená nielen požiadavkami na únosnosť, ale aj predpokladaným režimom zaťaženia, náročnosťou prevádzky a ekonomickými možnosťami,
- tepelné spracovanie (napr. *cementovanie*, *kalenie*, *nitridovanie*) by malo byť optimalizované podľa hrúbky steny, typu materiálu a očakávaného namáhania - nedostatočná hĺbka cementovanej vrstvy môže viesť k predčasnemu zlyhaniu pri namáhaní na dotyk,
- bezpečnostné súčinitele pri namáhaní na ohyb a dotyk (S_F , S_H) je potrebné vždy porovnávať s minimálnymi požiadavkami podľa platných noriem, a pri rizikových aplikáciách odporúčame zavádzať vyššie hodnoty súčiniteľov bezpečnosti,
- dôležité je uvažovať interakciu medzi namáhaním na ohyb a na dotyk, pretože zmena materiálu alebo technológie tepelného spracovania môže ovplyvniť dominantný typ poruchy,
- výsledky pevnostných výpočtov je vhodné validovať experimentálne alebo simulačne (napr. *FEM*, *KISSsoft/KISSsys*), najmä pri vysoko zaťažených prevodoch alebo nových návrhoch.

Záverom možno konštatovať, že efektívne navrhnuté ozubené súkolesie je výsledkom dobrej synergie medzi materiálovou voľbou, presne definovaným procesom tepelného spracovania a dôslednou pevnostnou analýzou. Iba ich spoločným zohľadnením možno dosiahnuť spoľahlivý a ekonomicky efektívny návrh ozubených prevodov pre rôzne aplikácie.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov:

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

KEGA 044TUKE-4/2024 - Aplikácia virtuálnej a rozšírenej reality vo vzdelávaní s cieľom inovácie študijných programov.

VEGA 1/0573/25- Výskum, vývoj a testovanie ladičov torzných vibrácií.

LITERATÚRA

[1] KUCZAJ, M. et al. (2023): *Research on Vibroactivity of Toothed Gears with Highly Flexible Metal Clutch under Variable Load Conditions*. In: *Sensors*, 23, pp. 287.

[2] MORAVEC, J.; GRYC, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, 11, 1106.

[3] KUMAR, A. - SINGH, H. - SHARMA, A. (2023): *Effects of heat treatment techniques on the fatigue behaviour of steel gears: A review*. In: *Materials Today: Proceedings*, 78, pp. 1-9.

[4] ZHAO, Y. - WANG, J. - LIU, X. (2020): *Effects of carburizing and nitriding on gear performance*. In: *International Journal of Mechanical Sciences*, 171, 105-115.

[5] LEE, S. - PARK, J. (2019): *Microstructural evolution and fatigue behavior of induction-hardened gears*. In: *Materials Science and Engineering A*, 763, 138-146.

[6] 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*, 12, 1890.

[7] SINGH, A. - KUMAR, R. - SHARMA, V. (2018): *Fatigue behavior of heat-treated gear steels*. In: *Tribology International*, 124, 220-228.

[8] PARK, H. - KIM, S. (2021): *Influence of nitriding process parameters on gear surface properties*. In: *Surface and Coatings Technology*, 406, 126-134.

[9] 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.

[10] MALÁKOVÁ, S. et al. (2019): *A case study of gear wheel material and heat treatment effect on gearbox strength calculation*. In: *Journal of Mechanical Science and Technology*, roč. 33, č. 12, pp. 5817-5827.

[11] SINGH, R. - KUMAR, P. (2021): *Influence of heat treatment parameters on fatigue life of steel gears*. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, roč. 30, č. 4, s. 2500-2510.

[12] GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - ŽUĽOVÁ, 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, roč. 11, č. 2, pp. 1-15, online, ISSN 2077-1312.

[13] MALÁKOVÁ, S. - PUŠKÁR, M. - FRANKOVSKÝ, P. - SIVÁK, S. - HARACHOVÁ, D. (2021): *Influence of the shape of gear wheel bodies in marine engines on the gearing deformation and meshing stiffness*. In: *Journal of Marine Science and Engineering*, Bazilej (Švajčiarsko), Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Roč. 9, č. 10, pp. 1-22, ISSN 2077-1312.

[14] MALÁKOVÁ, S. - SIVÁK, S. - FEDORKO, G. - MOLNÁR, V. - TOMEK, M. (2023): *Analysis of damage origin of bevel gear wheels*. In: *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam: Elsevier, roč. 146, pp. 1-14, ISSN 1350-6307.

[15] WANG, Z. - HUANG, Y. - XING, Z. - WANG, H. - SHAN, D. - XIE, F. - LI, J. (2021): *Bending fatigue behaviour and fatigue endurance limit prediction of 20Cr2Ni4A gear steel after the ultrasonic surface rolling process*. In: *Materials*. roč. 14, č. 10, pp. 2516

[16] ZHANG, W. - LI, S. - LIU, J. et al. (2023): *Control of tooth form deformation in heat treatment of spiral bevel gears based on reverse adjustment of cutting parameters*. In: *Materials*. roč. 16, č. 11, pp. 4183.