

Súčasnú materiálovú riešenia pre ozubené kolesá

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

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

Current material solutions for gear wheels

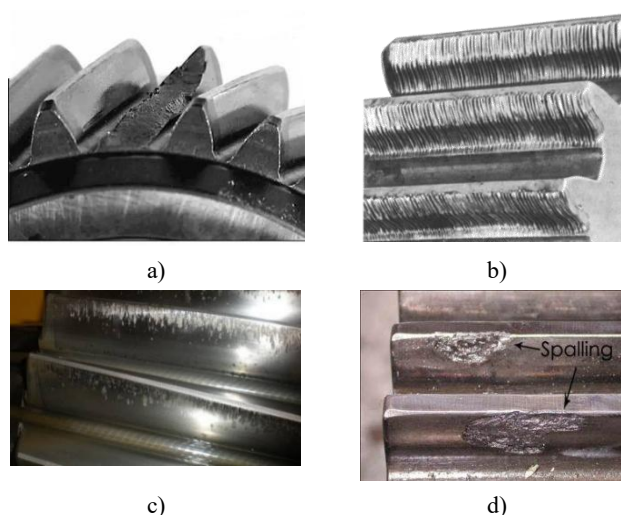
Abstract: Gears are very common machine components that enable precise transmission of rotational motion and power transmission from shaft to shaft. High demands are placed on the function of gears in operation. They must enable precise, uniform transmission, must not cause noise, often have to transmit large forces, etc. Gears are manufactured from a variety of materials and with different performance specifications depending on the industrial application. Gear materials are required to have high strength, toughness and wear resistance because gears rely on their own design size and material strength to withstand external loads. Material manufacturability is also necessary due to the complex shape of the gear and the high precision requirements of the gear. This study highlights trends in gear materials that are moving towards ultra-high strength, high wear resistance, high temperature resistance, corrosion resistance, and low weight.

Keywords: gears, material, surface treatment, composite materials, hybrid gears.

ÚVOD

Ozubené kolesá sú dôležitými mechanickými súčastami mnohých strojov a zariadení, ako sú priemyselné stroje, textilné stroje, obrábacie stroje, elektronické zariadenia, automobily a mnoho ďalších zariadení. Pri zábere dvoch ozubených kolies zapadajú zuby jedného kolesa do zubových medzier druhého kolesa, pričom sa zaberajúce zuby dotýkajú svojimi bokmi. Tým prenášajú krútiaci moment (výkon) z hnacieho hriadeľa na hnaný pri konštantnom prevodovom pomere spoluzaberajúcich kolies bez sklzu. S rozvojom priemyslu sa materiály ozubených kolies vyvíjajú smerom k ultra vysokej pevnosti, vysokej odolnosti voči opotrebovaniu, odolnosti voči vysokým teplotám, odolnosti voči korózii a nízkej hmotnosti. Existuje množstvo problémov, ktorým odborníci zvyčajne čelia pri výrobe ozubených kolies. Opatrebovanie ozubených kolies je postupná strata materiálu v dôsledku relatívneho pohybu zaberajúceho povrchu zubov. Šírenie opotrebovania ozubených kolies skracuje životnosť povrchu ozubeného kolesa, zhoršuje kontaktné mazanie zaberajúcich ozubených kolies, zvyšuje trenie/hluk a vedie k tvorbe koncentrácií napätia. Medzi najčastejšie poruchy patria:

opotrebenie, náraz, deformácia profilu zubov, praskliny, lomy zubov, odlupovanie povrchovej vrstvy, jamková korózia atď. (obr. 1).



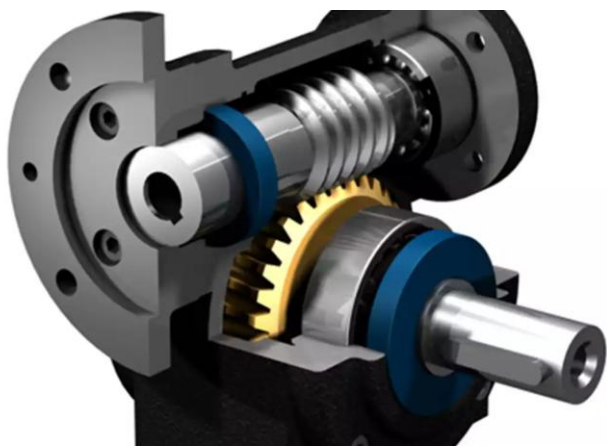
Obr. 1. Príklad opotrebovania ozubeného kolesa: a) únavový lom v koreni zuba, b) opotrebovanie ozubeného kolesa, c) odieranie, d) štiepenie

Povrch zuba by mal mať vysokú odolnosť voči opotrebovaniu, bodkovej korózii a koreň zuba by mal mať vysokú odolnosť voči lomu. Materiál ozubených

kolies je primárne určený mechanickým namáhaním v konkrétnej aplikácii. Medzi bežne používané materiály patrí oceľ, liatina, hliník, rôzne plasty a kompozity. Mnohé priemyselné odvetvia čelia problému, zvolenia správneho materiálu, ktorý by bol pevný a flexibilný, ale zároveň ľahký. Kompozitné materiály môžu tento problém vyriešiť. Môžu kombinovať silné stránky rôznych materiálov, aby sa dosiahli lepšie a efektívnejšie výsledky. Kompozitné materiály sa používajú v odvetviach, ako je letecký a kozmický priemysel, automobilový priemysel, stavebníctvo atď. Kompozitné materiály poskytujú dostatočnú pevnosť pri zníženej hmotnosti a ukázali sa ako lepšia alternatíva k nahradeniu kovových ozubených kolies.

1 VÝBER SPRÁVNEHO MATERIÁLU OZUBENÝCH KOLIES

Návrh a výroba materiálu ozubených kolies je komplikovaný. Návrh materiálu bude závisieť o aký typ ozubeného kolesa sa bude vyrábať a kde sa bude používať. Vždy je potrebné vyhodnotiť kompatibilitu s materiálom, chemickým zložením, mechanickými vlastnosťami a cenou protíľahkého ozubeného kolesa. Pri navrhovaní jednotlivého ozubeného kolesa alebo ozubeného súkolesia [9] bude výber materiálu buď primárnym faktorom, na ktorom je založená geometria ozubeného kolesa, alebo výkon ozubeného kolesa bude určovať správny výber materiálu. Výber materiálu ovplyvňuje nielen schopnosť prevodovky prenášať výkon, ale aj jej odolnosť voči opotrebovaniu a environmentálnym faktorom. Výber správneho materiálu na obrábanie ozubených kolies je kľúčový, pretože priamo ovplyvňuje výkon, životnosť a účinnosť výroby ozubených kolies.



Obr. 2. Výber správnych materiálov ozubených kolies

Pri výbere materiálu prevodovky je veľmi dôležité zvážiť nasledujúce faktory:

- a) *Pevnosť* - ozubené kolesá sú počas prevádzky vystavené značnému zaťaženiu. Zvolený materiál musí mať dostatočnú pevnosť, aby odolal týmto silám bez deformácie alebo zlomenia.

- b) *Odolnosť proti opotrebovaniu* - ozubené kolesá sú v neustálom kontakte, čo vedie k opotrebovaniu v priebehu času. Výber materiálu hrá dôležitú úlohu pri minimalizácii opotrebovania a maximalizácii životnosti prevodovky.
- c) *Odolnosť proti únave* - ozubené kolesá sú vystavené opakovaným cyklom namáhania. Materiál musí vykazovať dobrú odolnosť proti únave, aby sa zabránilo praskaniu a prípadnému zlyhaniu.
- d) *Hmotnosť* - v závislosti od aplikácie môže byť hmotnosť rozhodujúcim faktorom. Výber ľahkého materiálu môže zvýšiť účinnosť a znížiť celkovú hmotnosť systému.
- e) *Náklady* - na materiál sú významným faktorom, najmä pri veľkoobjemovej výrobe. Dosiahnutie rovnováhy medzi výkonom a nákladmi je nevyhnutné.
- f) *Podmienky zaťaženia* - veľkosť a typ zaťaženia ozubeného kolesa ovplyvní maximálnu pevnosť a odolnosť materiálu proti opotrebovaniu.
- g) *Prevádzkové prostredie* - vystavenie extrémnym teplotám, korozívnym prvkom alebo vlhkosti môže ovplyvniť výber materiálu.
- h) *Požiadavky na hlučnosť* - niektoré materiály môžu počas prevádzky generovať viac hlučnosť ako iné.
- i) *Tepelná stabilita* - materiál by si mal zachovať svoje vlastnosti aj pri vysokých prevádzkových teplotách.
- j) *Odolnosť proti korózii* - v špecifických prostrediach je táto vlastnosť nevyhnutná na predĺženie životnosti prevodovky.
- k) *Typ aplikácie* - vysokorýchlostné prevody v pretekárskych aplikáciách vyžadujú odlišné vlastnosti v porovnaní s pomaly sa pohybujúcimi prevodmi v dopravníkovom systéme.

1.1 Typy materiálov ozubených kolies

Materiál ozubeného kolesa a tepelné spracovanie majú veľký vplyv na kvalitu a výkon ozubeného kolesa.

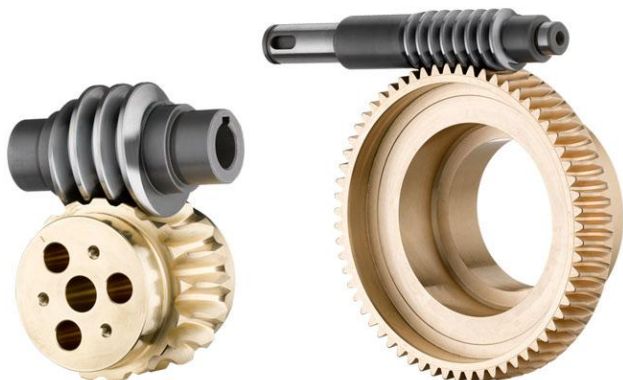
Základné požiadavky na vlastnosti materiálov zubov ozubených kolies sú:

- povrch zuba musí byť tvrdý,
- jadro zuba musí byť húževnaté.

Pri navrhovaní ozubeného kolesa, ktoré bude vystavené korozívnemu prostrediu alebo musí byť nemagnetické, je zvyčajne najlepšou voľbou Cu zliatina (obr. 3).

Tri najbežnejšie zliatiny medzi používané pri ozubení sú *mosadz*, *fosforový bronz* a *hliníkový bronz*. *Mosadz* je zliatina *medi* a *zinku*. Nízky obsah *zinku* udržuje vysokú úroveň ťažnosti v *mosadznej* zliatine,

zatiaľ čo vyššia koncentrácia zinku znižuje ťažnosť zliatiny. Medený základ mosadzných zliatin prispieva k jeho ľahkému obrábaniu a antimikrobiálnemu prínosu. Ozubené kolesá zvyčajne vyrábané z mosadzných zliatin sú čelné ozubené kolesá a ozubené kolesá, ktoré sa budú používať v prostrediach s nízkym zaťažením [12].



Obr. 3. Ozubené koleso zo zliatiny medi

Hlinikový bronz je ďalšia Cu zliatina, ktorá sa nachádza v prevodovkách. Táto zliatina kombinuje med' s Al, Fe, Ni a Mn. Zliatiny hliníka a bronzu majú vyššiu odolnosť proti opotrebovaniu ako zliatiny fosforu a bronzu a majú tiež vynikajúcu odolnosť proti korózii. Pridanie železa zlepšuje odolnosť tejto zliatiny proti opotrebovaniu. Zliatiny hliníka a bronzu odolávajú korózii v dôsledku oxidácie, vystavenia slanej vode a organickým kyselinám. Dodatočná odolnosť týchto zliatin proti opotrebovaniu umožňuje konštrukciu ozubených kolies, ktoré zvládnu podstatne väčšiu záťaž ako ozubené kolesá podobnej veľkosti vyrobené zo zliatin fosforového bronzu.

Keď konštrukcia ozubeného kolesa vyžaduje vynikajúcu pevnosť materiálu, najlepšou voľbou sú zliatiny železa. Oceľ je zliatina železa, uhlíka a iných stopových prvkov. Existujú štyri hlavné označenia oceľovej zliatiny. Je to uhlíková oceľ, legovaná oceľ, nehrdzavejúca oceľ a nástrojová oceľ. Zliatiny uhlíkovej ocele sa používajú na takmer všetky typy ozubení, pretože sa ľahko obrábajú, majú dobrú odolnosť proti opotrebovaniu, dajú sa kaliť, sú široko dostupné a sú relatívne lacné. Zliatiny nehrdzavejúcej ocele majú minimálny obsah chrómu 11 % a sú zliatinou mnohých stopových prvkov vrátane Mn, Ni, Si, P, S a N. Delia sa na feritické nehrdzavejúce ocele, ktoré sú magnetické, austenitickú nehrdzavejúcu oceľ, ktorá je nemagnetická, martenzitická a precipitačne kalená.

Hlinikové zliatiny sú dobrou alternatívou k zliatinám železa v aplikáciách, ktoré potrebujú vysoký pomer pevnosti k hmotnosti, pretože majú zvyčajne jednu tretinu hmotnosti oceľových zliatin rovnakej veľkosti.



Obr. 4. Ozubené kolesá vyrobené zo zliatiny hliníka

Povrchová úprava známa ako pasivácia chráni hlinikové zliatiny pred oxidáciou a koróziou. Je to podobné ako hrdza na oceľových zliatinách; pokrýva však povrch a chráni ho pred ďalším poškodením. Hlinikové zliatiny sú drahšie ako uhlíková oceľ, ale lacnejšie ako nehrdzavejúca oceľ. Ľahko sa však obrábajú, čím kompenzujú nárast nákladov na materiál. Hlinikové zliatiny nemožno použiť v prostredí s vysokou teplotou, pretože sa začínajú deformovať pri 400°F. Ozubené kolesá vyrobené z hlinikových zliatin zahŕňajú čelné ozubené kolesá, špirálové ozubené kolesá, kuželové kolesá s rovnými zubami a ozubené kolesá.

Termoplasty sú najlepšou voľbou pre prevody, kde je najdôležitejším kritériom hmotnosť. Ozubené kolesá vyrobené z plastov (obr. 5) môžu byť obrábané ako kovové ozubené kolesá.



Obr. 5. Nylonové ozubené koleso

Niektoré termoplasty sú však vhodnejšie na výrobu vstrekovaním. Jedným z najbežnejších

vstrekaných termoplastov je *acetal*. Tento materiál je tiež známy ako *polyacetal* alebo *polyoxymetylén (POM)*. Výhodou *POM* je jeho rozmerová stabilita vo veľkých teplotných rozsahoch, nízky koeficient trenia a odolnosť proti tečeniu. Je to vynikajúci materiál pre opotrebitelné povrchy, pretože je samomazací, ale *POM* je zlý materiál pre aplikácie vystavené nárazovému zaťaženiu kvôli svojej krehkosti.



Obr. 6. Materiál je známy ako *unobtainium*

1.2 Najčastejšie používané materiály ozubených kolies

S45C (uhlíková oceľ) - je jednou z najčastejšie používaných ocelí, obsahujúcou mierne množstvo uhlíka (0,45 %). *S45C* je ľahko dostupný a používa sa pri výrobe čelných ozubených kolies, špirálových ozubených kolies, ozubených hrebeňov, kužeľových ozubených kolies a závitokvových prevodov .

SCM440 (*Cr-Mo* legovaná oceľ) - legovaná oceľ obsahujúca mierne množstvo uhlíka (0,40 %). Obsahuje *chróm/molybdén*. *SCM440* má väčšiu pevnosť ako *S45C* a používa sa pri tepelnej rafinácii, alebo indukčnom kalení na výrobu ozubených kolies.

SCM415 (*Cr-Mo* oceľ) - je jednou z najčastejšie používaných *nízkouhlíkových* legovaných ocelí (*C* = 0,15 %). Má väčšiu pevnosť ako *S45C* alebo *SCM440*. Tvrdosť povrchu by mala byť pri medzi 55 a 60 HRC.

SUS303 (nehrdzavejúca oceľ *18Cr-8Ni*) - keďže sa nazýva „nehrdzavejúca oceľ“, je to oceľ odolná voči korózii. Táto *eutentická* nehrdzavejúca oceľ je v pod. Pre tieto typy aplikácií je lepšou voľbou *nylon* (obr. 5). *Nylon 6/6* je *polyamid*, ktorý sa skladá z dvoch monomérov so šiestimi atómami uhlíka. *Nylon* výborne absorbuje vibrácie, ale pri vystavení vlhkosti sa stáva rozmerovo nestabilným. *Nylon* je vynikajúcim materiálom pre všetky typy ozubených kolies vrátane závitokvových kolies, ozubených kolies, čelných ozubených kolies a kužeľových ozubených kolies s rovnými zubami.

Existuje jeden materiál pre ozubené kolesá, ktorý ešte nie je vyvinutý. Je to ideálny materiál pre všetky konštrukcie prevodov. Tento materiál je známy ako *unobtainium* [13] (obr. 6). Tento materiál je extrémne ľahký, má tvrdosť väčšiu ako prírodný *diamant*, má

koeficient trenia 0,001, je rozmerovo stabilný vo všetkých prostrediach, nekoroduje ani nehrdzavie, je ľahko opracovateľný a má náklady na surovinu 1 cent za libru.

SUS303 (nehrdzavejúca oceľ *18Cr-8Ni*) - keďže sa nazýva „nehrdzavejúca oceľ“, je to oceľ odolná voči korózii. Táto *autentická* nehrdzavejúca oceľ je v podstate *nemagnetická*. Najčastejšie sa používa pre ozubené kolesá v aplikáciách, kde je kontaminácia

hrdzou nežiaduca, napríklad v potravinárskych strojoch. Existuje podobná nehrdzavejúca oceľ s názvom *SUS304*, ktorá má väčšiu odolnosť proti korózii ako *SUS303*.

2 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Kompozity sú moderné, ale nie univerzálne materiály. Vždy sú navrhované pre veľmi konkrétne použitie s cieľom maximálneho využitia ich hmoty. Moderné kompozitné materiály majú množstvo výhod oproti iným materiálom, ako je oceľ. Azda najdôležitejšie je, že kompozity majú oveľa nižšiu hmotnosť. Odolávajú tiež korózii, sú flexibilné a odolné proti pretlačeniu. To znamená, že vyžadujú menšiu údržbu a majú dlhšiu životnosť ako tradičné materiály.

Kompozitný materiál sa považuje za materiál, ktorý je zložený najmenej z dvoch alebo viacerých zložiek odlišujúcich sa chemickým zložením - matrica a spevňujúca zložka, ktoré sú od seba oddelené výraznou hranicou, pričom výsledný materiál má úplne odlišné vlastnosti ako obe východiskové zložky.

Spevňujúca zložka + matrica = kompozit



Základná hmota, čiže matrica, má funkciu spojiva.

Funkciou matrice je:

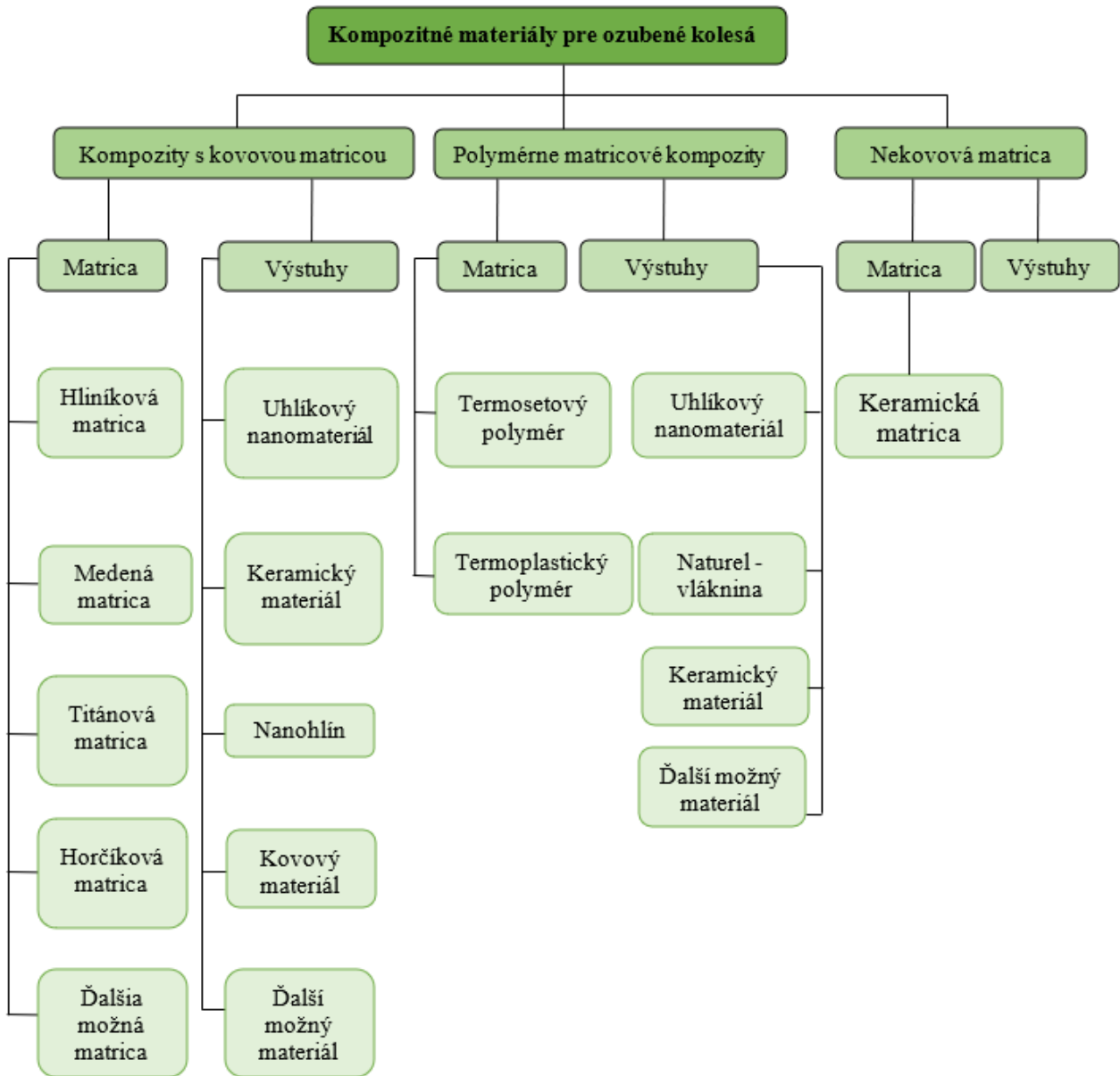
- prenos vonkajšieho zaťaženia na spevňujúcu zložku,
- má mať nižší bod tavenia ako je bod tavenia vlákien, ktoré ich spevňujú,
- má byť ťažnejšie ako vlákna, mať nižší modul pružnosti,

- ochrana vlákien.

Druhá zložka, vložená fáza (armatúra), plní funkciu výstuže, ktorá má najčastejšie spevňujúci účinok.

Pojem „armujúci“ (vystužujúci, plniaci) znamená zavedený do materiálu s cieľom zmeny jeho vlastností (nejde nutne o „spevňujúci“).

- *tlmiaci účinok* - pre mnohých je rozhodujúcim faktorom tichosť celého procesu. Kompozitné materiály môžu poskytnúť lepšie tlenie hluku a vibrácií, čo znižuje hluk prevodových mechanizmov. Komplexné profily zubov a integrované tlmiace prvky sa dajú vyrobiť



Obr. 7. Prehľad kompozitných materiálov pre ozubené kolesá

2.1 Kompozitné materiály pri výrobe ozubených kolies

Kompozitné materiály sú čoraz viac uznávané ako vynikajúca možnosť pre ozubené kolesá oproti kovu v rôznych aplikáciách, a to vďaka niekoľkým kľúčovým výhodám [7] ako - znížená hmotnosť, nižšie náklady, lepšia flexibilita dizajnu a zvýšená odolnosť proti korózii .

Charakteristika výhod kompozitných ozubených kolies:

jednoduchšie v porovnaní s kovovými ozubenými kolesami. Okrem toho hybridné kovovo-kompozitné konštrukcie môžu kombinovať pevnosť kovu s vlastnosťami kompozitov tmiť hluk, čím ponúkajú vyvážené riešenie, najmä v automobilovom priemysle, elektronike alebo presnom strojárstve,

- *odolnosť proti korózii* - na rozdiel od kovových ozubených kolies, ktoré môžu byť náchylné na hrdzavenie a koróziu, kompozitné ozubené kolesá ponúkajú inherentnú odolnosť proti

korózii [6]. Vďaka tomu sú obzvlášť vhodné pre prostredia vystavené chemikáliám alebo vlhkosti, ako sú námorné alebo priemyselné aplikácie,

- *zníženie hmotnosti* - kompozity môžu byť ľahšie ako tradičné kovové materiály, čo vedie k zníženiu celkovej hmotnosti ozubených kolies. Toto je obzvlášť dôležité v aplikáciách, ako sú automobilové ozubené kolesá alebo letecké systémy, kde je potrebné minimalizovať hmotnosť, aby sa zlepšil výkon a účinnosť,
- *cenová efektívnosť* - kompozitné ozubené kolesá môžu tiež poskytnúť ekonomickejšie riešenie. Ich výrobné procesy, ako je lisovanie alebo extrúzia, sú vo všeobecnosti rýchlejšie a menej energeticky náročné ako tie, ktoré sa používajú na kovové ozubené kolesá. Eliminujú tiež potrebu drahých zliatin alebo špecializovaných úprav, čo vedie k celkovo nižším výrobným nákladom.

Kompozitné ozubené kolesá sa delia do troch skupín na základe typu matrice:

- a) ozubené kolesá z polymérnej matrice (*PMC*),
- b) ozubené kolesá z kovovej matrice (*MMC*),
- c) ozubené kolesá z nekovovej matrice (*NMMC*).

Spomedzi nich sú *PMC* najpoužívanejšie a výrobný proces je relatívne vyspelý.

Zároveň, v porovnaní s inými kovmi, viskoelastické vlastnosti polymérov môžu potlačiť vibrácie, znížiť údržbu a znížiť celkové náklady [1]. Medzi bežne používané kompozitné výstuže patrí *karbid kremíka (SiC)*, *karbid volfrámu (WC)*, *uhlíkové vlákno (CF)*, sklenené vlákno (*GF*), *nanoil*, *grafén* a *uhlíkové nanotrúbice (CNT)*. Keďže polymérne kompozity vystužené uhlíkovými vláknami majú lepšiu odolnosť proti nárazu a pomer pevnosti k hmotnosti, očakáva sa, že nahradia tradičné kovové materiály v mnohých aplikačných oblastiach, ako sú automobily a lietadlá. Kompozity vystužené *uhlíkovými* nanomateriálmi, ako je grafén, preukázali veľký potenciál v mnohých priemyselných aplikáciách vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, tepelným vlastnostiam a odolnosti voči korózii [10]. Okrem toho sa na kompozitné ozubené kolesá neustále používajú aj ekologické materiály, ako sú prírodné vlákna [14]. Matricové materiály a výstuže bežne používaných kompozitných ozubených kolies sú znázornené na obr. 7.

3 HYBRIDNÉ PREVODY

S požiadavkou na zlepšenie odolnosti prevodovky a zníženie spotreby energie pri vysokom zaťažení sa vyvíjajú hybridné kovovo-kompozitné prevody kombináciou výhod kovových a kompozitných prevodov. Koncept hybridnej prevodovky prvýkrát

predstavil v roku 2012 tím z výskumného centra *NASA Glenn Research Center* a *Army Research Laboratory* (obr. 8a). Vyvinutá hybridná prevodovka dokáže prenášať rovnakú veľkosť krútiaceho momentu ako celokovová tradičná prevodovka. Typický hybridný kovovo-kompozitný prevod (obr. 8b) pozostáva z kovových zubov, kovového ráfiku, kovového náboja a kompozitného pásu. Aby sa zabezpečila dostatočná pevnosť a tuhosť hybridného ozubeného kolesa ako celku, kompozitná stojina je upevnená s kovovým ráfikom a nábojom v obvodovom smere pomocou drážkovaných upevňovacích konštrukcií.

Hybridné oceľovo-kompozitné ozubené kolesá, ktoré kombinujú oceľové zuby s kompozitným jadrom, sú rýchlo sa rozvíjajúcou technológiou na zníženie hmotnosti.

Najbežnejší prístup k odľahčeniu ozubených kolies je založený na odstraňovaní materiálu, napríklad vytvorením otvorov v tele ozubeného kolesa.

Handschuh a kol. [2] navrhli zníženie hmotnosti navrhnutím hybridnej kovovo-kompozitnej konštrukcie, v ktorej je teleso vyrobené z triaxiálneho opleteného kompozitu, zatiaľ čo zuby sú vyrobené z ocele. Autori preukázali zníženie hmotnosti približne o % v porovnaní s kovovým ozubeným kolesom s rovnakou makrogeometriou.

Táto štúdia bola vykonaná s cieľom preskúmať súčasný stav materiálov ozubených kolies s cieľom zlepšiť ich životnosť.

V budúcnosti bude cieľom práce ukázať, ako použitie kompozitného telesa ovplyvňuje správanie hybridných kovovo-kompozitných ozubených kolies počas záberu.

ZÁVER

Ozubené kolesá sú dôležitými mechanickými komponentmi mnohých strojov a zariadení. Ako kľúčové prvky v technológii a priemysle zabezpečujú prenos pohybov a síl z jedného hriadeľa na druhý. Ozubené kolesá sa delia na rôzne typy podľa ich konštrukcie a funkcie, a materiály sa vyberajú podľa konkrétnych aplikácií. Materiál ozubeného kolesa má veľký vplyv na výkon ozubeného kolesa. Preto je potrebné vhodné zvolenie jeho materiálu. Výber konkrétnych materiálov ozubených kolies je určený najmä veľkosťou zaťaženia počas prevádzky ozubeného kolesa, úrovňou rýchlosti a požiadavkami na presnosť ozubeného kolesa. Mnohé problémy s ozubenými kolesami sa vyriešia kompozitnými materiálmi. Kompozity sú kompozitné materiály vytvorené fyzikálnym spojením rôznych jednoduchých materiálov. Sú moderné, ale nie univerzálne materiály. Jednou z hlavných výhod

kompozitných ozubených kolies je ich výrazne nižšia hmotnosť v porovnaní s kovovými ozubenými kolesami. Na rozdiel od kovových ozubených kolies, ktoré môžu byť náchylné na hrdzavenie a koróziu, kompozitné ozubené kolesá ponúkajú inherentnú odolnosť voči korózii. Tento typ ozubených kolies ponúka presvedčivú alternatívu ku kovovým ozubeným kolesám, najmä ak je kritické zníženie hluku, úspora hmotnosti a flexibilita dizajnu. Zatiaľ čo ich počiatočné náklady môžu byť vyššie, dlhodobé výhody z hľadiska zníženej údržby, účinnosti a výkonu často prevažujú nad týmito počiatočnými investíciami. S neustálym pokrokom v materiáloch sa kompozity stávajú čoraz atraktívnejšou možnosťou pre konštrukciu prevodov, poskytovaním tichého chodu a výkonu, ktoré mnohé priemyselné odvetvia hľadajú.

PodĎakovanie

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] DENG, X., LI, D. - YOU, Y. (2013): *Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites*. In: Mater. and Design., Vol. 46, No. 12, pp. 809-815, ISSN 0261-3069.
- [2] HANDSCHU, R. F. et al. (2014): *Hybrid gear*. In: Tech Briefs, NASA Glenn Research Center, November 2014, Refer to LEW-18516-1.
- [3] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2022): *Possibilities of use and characteristics of high-precision transmissions in machinery*. In: MM Science Journal. - Praha (CZ): MM Publishing, roč. 2022-November, pp. 6014-6019 [print, online], ISSN 1803-1269.
- [4] JARRETT, W. et al. (2023): *The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: a review*, Composite Structures, Vol. 320, 117203, ISSN 0382-5238.
- [5] BORYSOVSKA, K. - VERBYLO, D. - PODREZOV, Y. - SZAFRAN, M. (1995): *The structural optimization of ceramic-organic*

composites. In: Archives of Metallurgy and Materials, 54, 4, pp. 875-879.

[6] 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 32, pp. 557-565.

[7] KUMA, V. S. et al. (2021): *Design and Analysis of Composite Spur Gear*. In: Journal of Physics : Conference Series, pp 2-14, Conf. Ser. 1964 062100.

[8] 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.

[9] MALÁKOVÁ, S. et al. (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. Basel (Ch): Multidisciplinary Digital Publishing Institute Yer. 9, no. 10, pp. 1-22, [online], ISSN 2077-1312.

[10] MOHAN, V. B. - LUA, K. - HUI, D. - BHATTACHARY, D. (2018): *Graphene-based materials and their composites*. In: A review on production, applications and product limitations, Vol. 142, 1, pp. 200-220, ISSN 0152-2636.

[11] MANTIČ, M. - KUEKA, J. (2022): *Engineering Failure Analysis*. Amsterdam (NL), Elsevier, roč. 141, pp. 1-12, [print, online], ISSN 1350-6307.

[13] MONKOVA, K. et al. (2019): *Effect of the Weight reduction of a Gear Wheel on Model Characteristics*. In: MATEC Web Conf., 2, Vol. 299, pp. 1-6.

[14] PAIRGEARS (2024): *Perfect Gear Pairing*. In: Choosing the Right Material for Gears: And Overview, https://www.pairgears.com/blog/Choosing-the-Right-Material-for-Gears-An-Overview_b961.

[15] SHEN, X. - JIA, J. - CHEN, C. - LI, Y. - KIM, J. (2014): *Enhancement of mechanical properties of natural fiber composites via carbon nanotube addition*. In: Journal of Mater. Sci., 49, No. 8, pp. 3225-3233.

[16] ZHANG, J. et al. (2016): *A comparison of the effects of traditional shot peening and micro-shot peening on the scuffing resistance of cerburized and quenched gear steel*, Vol. 368-369, pp. 253-257, ISSN 0255-3898.