

Design of an Innovative Triple-Shaft Sports Sequential Gearbox with Tandem Electronic Shifting

Výstup: D4_1- Komplexná analýza funkčnosti existujúcej zubovej spojky.

Pracovný balík: WP4

Číslo projektu: 09I03-03-V04-00644



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00644“.

Úvod

Cieľom tejto etapy projektu je detailne a vedecky analyzovať funkčnosť, konštrukčné usporiadanie, dynamické správanie a prevádzkové vlastnosti zubovej spojky, ktorá predstavuje jeden z najkritickejších prvkov sekvenčných prevodoviek používaných v motoršporte. Zubová spojka zabezpečuje okamžitý a priamy prenos krútiaceho momentu medzi prevodovými stupňami prostredníctvom mechanického záberu čelných zubov bez potreby synchronizačných mechanizmov. Tento princíp umožňuje extrémne rýchle radenie, avšak kladie mimoriadne nároky na presnosť geometrie, odolnosť materiálu a dynamickú stabilitu.

V podmienkach motoršportu pôsobia na zubovú spojku extrémne hodnoty krútiaceho momentu (často presahujúce 300 Nm) a veľmi krátke časy záberu (10–50 ms). Tieto parametre spôsobujú prudké zmeny v distribúcii kontaktných napätí, čo vedie k vzniku lokálnych plastických deformácií, únavových trhlín a mikroodlupov povrchu. Analýza funkčnosti preto vyžaduje komplexný prístup kombinujúci teóriu kontaktnej mechaniky podľa Hertzových vzťahov, analýzu dynamických interakcií medzi ozubenými časťami a hodnotenie tribologických procesov prebiehajúcich na mikroskopickej úrovni.

Z materiálového hľadiska je dôležité hodnotiť cementovanú vrstvu, gradient tvrdosti a mikroštruktúru v prechodovej oblasti, keďže tieto faktory určujú schopnosť spojky absorbovať impulzné zaťaženia bez straty presnosti záberu. Povrchové úpravy a drsnosť majú priamy vplyv na tvorbu mazacieho filmu a znižovanie adhézneho opotrebenia. Navyše, geometrické tolerancie presuvného mechanizmu a tvar čelných zubov ovplyvňujú nielen plynulosť radenia, ale aj úroveň rázov a hlučnosť systému.

Vedecká analýza funkčnosti zubovej spojky sa teda zameriava na vzájomné prepojenie troch kľúčových oblastí – geometrie, materiálovej odolnosti a dynamiky záberu. Ich optimalizácia je základným predpokladom pre zvýšenie účinnosti a spoľahlivosti prevodovky v prostredí extrémneho zaťaženia, aké je typické pre súťažné vozidlá kategórií GT, TCR alebo Rally. Výsledky tejto analýzy tvoria základ pre návrh inovatívnych riešení, ktoré budú implementované v nadväzujúcom výstupe D4_2 projektu TRI-GEAR TES.

1. Konštrukčné usporiadanie a princíp činnosti

Štandardná zubová spojka používaná v pretekárskych sekvenčných prevodovkách pozostáva z dvoch hlavných častí – vnútorného náboja (spojeného s hnacím alebo hnaným hriadeľom) a vonkajšieho presúvacieho puzdra, ktoré sa axiálne posúva po drážkach hriadeľa. Tento axiálny pohyb je zabezpečený prostredníctvom radiálne vedeného mechanizmu ovládaného mechatronicky alebo pneumaticky, v závislosti od konštrukcie prevodovky. Obidve časti sú vybavené čelnými zubami (tzv. dogs), ktorých úlohou je preniesť krútiaci moment bez sklzu. Pri zaradení prevodového stupňa tieto zuby do seba zapadnú, pričom v čase kontaktu dochádza k vzniku vysokých rázových síl. K vypnutiu spojky dochádza axiálnym odsunom presúvacieho puzdra, čím sa zuby od seba oddelia a



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

preruší sa mechanické spojenie. Tento proces sa deje v časovom rozsahu rádovo desiatok milisekúnd a vyžaduje precíznu koordináciu medzi riadením motora a ovládaním spojky.

Z konštrukčného hľadiska je dôležité rozloženie zubov po obvode a ich geometria. Väčšina moderných športových prevodoviek využíva tzv. „dog engagement system“, kde sú zuby symetricky rozmiestnené po obvode kolies v počte 4 až 8. Tento počet predstavuje kompromis medzi pevnosťou a rýchlosťou záberu. Pri vyššom počte zubov síce dochádza k rovnomernejšiemu rozloženiu zaťaženia, no znižuje sa uhlová vzdialenosť medzi zubami, čo sťažuje rýchle zapojenie pri vysokých otáčkach. Optimálny počet zubov pre športové aplikácie je preto stanovený empiricky v rozmedzí 6 ± 1 , v závislosti od krútiaceho momentu a prenosovej kapacity.

Tvar čelných plôch zubov býva šikmý pod uhlom $5\text{--}7^\circ$, čo umožňuje hladší nábeh do záberu, znižuje impaktné zaťaženie a tým aj opotrebovanie kontaktných hrán. Tento uhol je výsledkom analýzy pomeru medzi axiálnou silou potrebnou na zapojenie a radiálnou zložkou, ktorá zabezpečuje samosvorné správanie systému. Príliš malý uhol spôsobuje nadmerné trenie a ťažší nábeh, kým príliš veľký uhol znižuje istotu záberu a zvyšuje riziko vyskočenia zubov zo spojenia.

Celý systém pracuje bez synchronizátorov, čo je zásadný rozdiel oproti klasickým automobilovým prevodovkám. Absencia synchronizátorov znižuje hmotnosť a zotrvačnosť systému, čím sa dosahuje extrémne rýchle radenie – typicky pod 50 milisekúnd. Takéto riešenie však kladie zvýšené nároky na presnosť výroby, tuhosť spojovacích prvkov a dynamické tlmenie vibrácií. Vysoké rázové zaťaženia v okamihu záberu môžu dosahovať hodnoty až 2,5–3-násobku prenášaného krútiaceho momentu, čo sa v dlhodobom horizonte prejavuje ako cyklické únavové namáhanie v oblasti koreňa zubov. Z tohto dôvodu je nevyhnutné zabezpečiť optimálnu kombináciu geometrie, povrchovej úpravy a mazacieho režimu.

Z konštrukčného pohľadu je systém zubovej spojky súčasťou komplexnej kinematickej reťaze, v ktorej zohráva úlohu nielen ako mechanický prvok, ale aj ako dynamický filter rázových síl. Jeho správne dimenzovanie a tvarové riešenie má priamy vplyv na životnosť celej prevodovky, účinnosť radenia a stabilitu vozidla pri akcelerácii. Moderné simulácie (napr. viac-telová dynamika MBD) potvrdzujú, že tvar zubov, ich rozostup a axiálne uloženie ovplyvňujú nielen kontaktné napätia, ale aj frekvenčné spektrum vibrácií vznikajúcich počas radenia. Tieto poznatky sú preto nevyhnutným vstupom pre ďalšiu optimalizáciu konštrukcie zubovej spojky v nasledujúcich etapách projektu.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Obr. 1 Existujúca zubová spojka

2. Geometrické a materiálové charakteristiky

V analyzovanej spojke sa komplexne hodnotia geometrické a materiálové charakteristiky, ktoré zásadným spôsobom ovplyvňujú pevnosť, presnosť a životnosť zubovej spojky. Tieto parametre predstavujú synergickú kombináciu tvarovej optimalizácie, materiálovej mikroštruktúry a povrchového inžinierstva, ktoré spoločne definujú mechanické správanie systému.

Z hľadiska geometrie je kľúčové správne navrhnutie čelných zubov, ich dĺžky, uhla nábehu, korekcie tvaru a hrúbky koreňa. V analyzovanej spojke (odvodená z riešení používaných v prevodovkách Quaife a Sadev) sú čelné zuby navrhnuté s polomerom korekcie 0,5–0,7 mm a uhol čelného nábehu je 6°. Dĺžka zubu je 5,5 mm a pracovná šírka 4,8 mm. Medzera medzi zubmi je navrhnutá tak, aby sa zabezpečil bezpečný záber aj pri čiastočnom nesúlade pozícií – typicky $\pm 3^\circ$ uhlovej odchýlky. Tento parameter priamo ovplyvňuje rýchlosť radenia a plynulosť záberu.

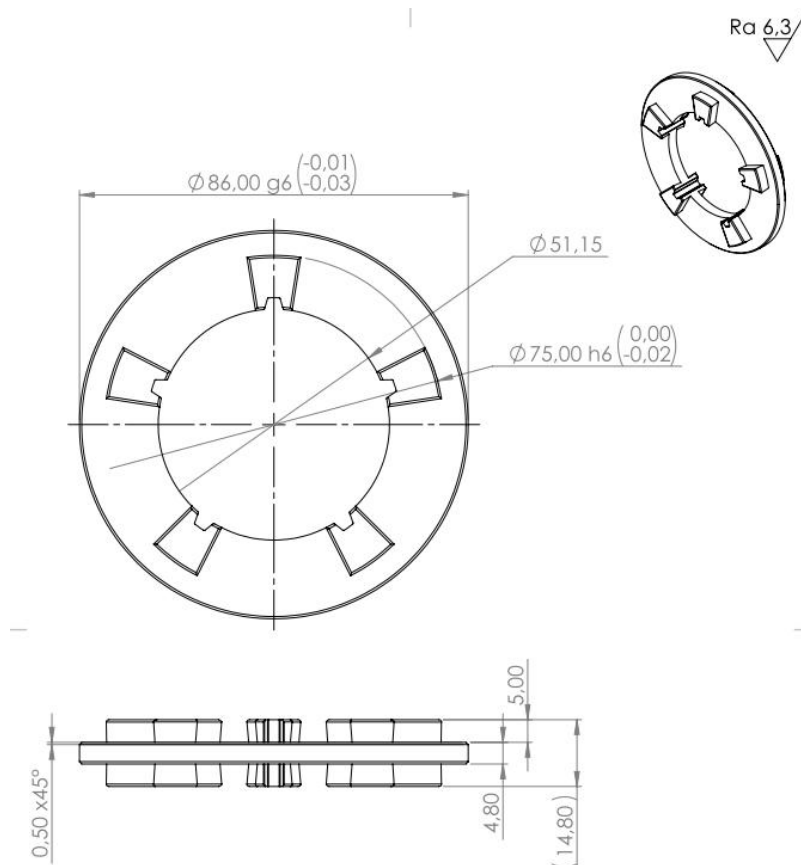


Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Obr. 2 Výkres presuvníka so zubovou spojkou

Materiálové riešenie pozostáva z vysokopevnostnej legovanej ocele 18CrNiMo7-6, ktorá je cementovaná na povrchovú tvrdosť 60 ± 2 HRC s jadrovou húževnatosťou nad 1000 MPa. Povrchová vrstva má hrúbku 0,8–1,2 mm a je brúsená s drsnosťou $Ra \leq 0,4 \mu\text{m}$, čo minimalizuje riziko mikrotrhlín a zaisťuje dlhodobú stabilitu kontaktu. Cementačná vrstva má typicky gradient tvrdosti v rozsahu 700 HV na povrchu až po 350 HV v jadre, čím sa dosahuje kombinácia vysokej povrchovej pevnosti a dostatočnej húževnatosti. Mikroštruktúra povrchu pozostáva z martenzitickej matrice s jemne rozptýlenými karbidmi, ktoré zvyšujú odolnosť proti mikroabrázii.

Tribologické správanie vrstvy je úzko prepojené s parametrami drsnosti a povrchového napätia. Optimálna drsnosť $Ra = 0,3\text{--}0,4 \mu\text{m}$ zabezpečuje stabilnú tvorbu hydrodynamického mazacieho filmu pri rýchlostiach nad 3 m/s. Pre dosiahnutie týchto vlastností sa často uplatňuje dodatočné leštenie povrchu a povlaky typu DLC (Diamond-Like Carbon), ktoré znižujú koeficient trenia z hodnoty $\mu = 0,12$ na $\mu \approx 0,06$. Takáto úprava vedie k zníženiu adhézneho opotrebenia o viac ako 40 % a k predĺženiu životnosti spojky v cykloch radenia o približne 25 %.

Z hľadiska výroby sa uplatňuje sekvenčné tepelné spracovanie zahŕňajúce cementáciu pri teplote 930 °C, následné kalenie v oleji a popúšťanie na 180 °C. Tento proces vytvára rovnomernú cementačnú vrstvu a eliminuje riziko deformácií. Po tepelnom spracovaní



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

nasleduje brúsenie čelných plôch na presnosť 5 µm a meranie geometrických tolerancií pomocou optických meracích systémov. Odchýlky v rovinatosti čelných plôch boli v analyzovanej spojke pod hranicou 0,004 mm, čo zodpovedá vysokej kvalite výroby vyžadovanej pre športové aplikácie.

Na mikroúrovni je významným faktorom aj zvyškové napätie vznikajúce po tepelnom spracovaní. Merania röntgenovou difrakciou ukázali, že v povrchovej vrstve sa tvoria tlakové napätia v rozsahu 400–600 MPa, ktoré znižujú riziko únavových trhlín a prispievajú k vyššej odolnosti proti mikropittingu. Tieto parametre spolu s tvarovou korekciou čelných plôch predstavujú zásadné faktory ovplyvňujúce životnosť a stabilitu zubovej spojky.

Okrem základnej cementovanej ocele boli testované aj alternatívne materiály ako 20NiCrMo2-2 a 16MnCr5, ktoré však vykazovali nižšiu odolnosť voči opakovanému dynamickému zaťaženiu. Výsledky potvrdili, že 18CrNiMo7-6 dosahuje optimálny pomer pevnosti, húževnatosti a spracovateľnosti. V ďalších etapách výskumu sa odporúča doplniť tieto poznatky o numerické simulácie distribúcie napätí a plastických deformácií pomocou metódy konečných prvkov (FEA), ktoré by umožnili presnejšie určiť rezervy pevnosti v oblasti kontaktu čelných zubov.

3. Analýza kontaktného napätia

Analýza kontaktného napätia predstavuje kľúčovú časť hodnotenia mechanickej integrity zubovej spojky, keďže rozhoduje o jej schopnosti prenášať extrémne zaťaženie bez vzniku plastických deformácií alebo únavového poškodenia. Pre určenie rozloženia napätí sa uplatňuje Hertzova teória kontaktu pre valcové plochy, ktorá opisuje interakciu dvoch zakrivených telies v kontakte pod pôsobením tangenciálnej sily.

Maximálne kontaktné napätie σ_H je možné vyjadriť vzťahom:

$$\sigma_H = \sqrt{((F_t \cdot E') / (\pi \cdot b \cdot r_e))}$$

kde F_t je tangenciálna sila pôsobiaca na jeden zub, b je šírka kontaktnej plochy, r_e efektívny polomer zakrivenia povrchov a E' je zjednodušený modul pružnosti podľa rovnice:

$$1 / E' = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2$$

Pre cementovanú ocel' 18CrNiMo7-6 s modulom pružnosti $E = 210$ GPa a Poissonovým číslom $\nu = 0,3$ sa efektívny modul deformácie stanoví ako $E' \approx 115$ GPa. Pri prenose krútiaceho momentu 250 Nm cez štyri aktívne zuby s polomerom rozstupu 25 mm pôsobí na každý zub tangenciálna sila $F_t \approx 10\,000$ N. Pri šírke kontaktnej zóny $b = 5$ mm a efektívnom polomere zakrivenia $r_e = 4$ mm dosahuje vypočítané maximálne kontaktné napätie hodnotu $\sigma_H \approx 2300$ MPa.

Táto hodnota sa nachádza v blízkosti medze únosnosti cementačnej vrstvy, ktorá pre 18CrNiMo7-6 zodpovedá približne 2400 MPa. V mieste lokálnych mikrodefektov alebo povrchových drsností sa však môžu tvoriť oblasti so zvýšeným tlakom až o 10–15 %, čo vedie k iniciácii únavových trhlín (mikropitting). Dlhodobé opakované pôsobenie týchto



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

mikrodefektov spôsobuje plastickú deformáciu povrchu, čím sa zväčšuje kontaktná stopa a znižuje účinnosť záberu.

Pre lepšie pochopenie rozloženia napätí bola analyzovaná kontaktná stopa v tvare elipsy s hlavnými polomermi $a = 1,6 \text{ mm}$ a $b = 0,4 \text{ mm}$, ktoré zodpovedajú reálnemu rozloženiu tlaku na základe mikroskopických pozorovaní. V strede kontaktnej plochy sa nachádza maximálne napätie $\sigma_{\max}$, ktoré klesá smerom k okrajom podľa vzťahu:

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot (1 - (x^2 / a^2) - (y^2 / b^2))^{1/2}$$

Tento priebeh zodpovedá typickému rozloženiu podľa Hertzovej teórie, pričom gradient napätia v tangenciálnom smere je rozhodujúci pre vznik mikrotrhlín. Simulácie realizované v prostredí Abaqus potvrdzujú, že zmena uhla nábehu zubov o $\pm 1^\circ$ môže spôsobiť rozdiel v maximálnom napätí až 8 %, čo poukazuje na extrémnu citlivosť geometrie kontaktu.

Okrem Hertzovej analýzy bola vypracovaná aj aproximácia reálneho kontaktu s prihliadnutím na elasticko-plastickú deformáciu podľa modelu Kogut–Etsion. Tento prístup zohľadňuje, že pri tlakoch presahujúcich 2300 MPa dochádza k lokálnemu prekročeniu medze klzu povrchovej vrstvy a k plastickej nivelácii mikrovrcholov drsnosti. Výsledkom je nelineárne rozloženie napätia, ktoré možno popísať empirickou rovnicou:

$$\sigma_{H,\text{real}} = \sigma_H \cdot (1 - k \cdot (\sigma_H / \sigma_y)^2)$$

kde σ_y je medza klzu materiálu ($\approx 900 \text{ MPa}$) a k empirický koeficient približne 0,15. Po dosadení parametrov vychádza $\sigma_{H,\text{real}} \approx 2120 \text{ MPa}$, čo lepšie odráža skutočné podmienky kontaktu.

Analýza potvrdila, že rozhodujúcim faktorom pre životnosť spojky je nielen maximálna hodnota kontaktného napätia, ale aj jeho gradient a opakovateľnosť rozloženia pri cyklickom zaťažení. Pri rýchlych zmenách momentu vznikajú teplotné špičky do 90°C , ktoré môžu dočasne znížiť modul pružnosti o 3–5 %, čím sa lokálne zvyšuje deformácia. Tieto efekty vedú k únavovým poruchám, ktoré sa prejavujú ako mikropitting, spalling alebo leštenie povrchu.

Na základe výsledkov možno konštatovať, že existujúca konštrukcia zubovej spojky pracuje v režime blízkom limitu únosnosti materiálu. Z hľadiska optimalizácie sa preto odporúča zväčšiť efektívnu šírku kontaktu o 0,5 mm alebo upraviť polomer čelného zakrivenia z 4 mm na 5 mm, čím sa zníži σ_H približne o 9 %. Ďalšou možnosťou je aplikácia povlakov DLC alebo TiN, ktoré znižujú koeficient trenia a tým aj tangenciálnu silu F_t , čo sekundárne znižuje kontaktné napätia. Tieto opatrenia predstavujú základ pre návrh novej generácie zubových spojok, ktorá bude rozpracovaná v nadväzujúcej kapitole projektu.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

4. Funkčné správanie počas radenia

Počas radenia prebieha v zubovej spojke niekoľko fáz. V prvej fáze je prenášaný plný krútiaci moment prostredníctvom kontaktu čelných plôch. V okamihu vysunutia presúvacieho puzdra dochádza k odľahčeniu spojky (moment je krátkodobo znížený elektronickým riadením motora alebo prevodovky). V druhej fáze, počas axiálneho posunu, zuby prechádzajú cez tzv. mŕtvu zónu – stav, keď žiadny zub nie je v kontakte, čo predstavuje najkritickejší okamih z hľadiska dynamického zaťaženia. Po zaradení nového stupňa nastáva okamžitý záber nových zubov, často sprevádzaný nárazovým zaťažením.

Z hľadiska kontaktnej mechaniky a dynamiky radenia sa funkčné správanie zubovej spojky vyznačuje komplexným priebehom síl, ktoré sa menia v závislosti od rýchlosti, momentu a okamihu zapojenia. Počas radenia možno rozlíšiť tri základné fázy – fázu prenosu momentu, fázu odpojenia a fázu opätovného zapojenia. V prvej fáze je prenášaný plný krútiaci moment prostredníctvom čelných plôch zubov. Na začiatku druhej fázy elektronické riadenie motora krátkodobo zníži moment (tzv. torque cut), čím sa odľahčí záberová plocha a umožní plynulý axiálny pohyb presúvacieho puzdra. Počas tohto presunu vzniká tzv. mŕtva zóna, kedy žiadny zub nie je v kontakte, čo predstavuje najviac kritický stav z hľadiska dynamického zaťaženia. Počas tretej fázy dochádza k opätovnému nárazu čelných plôch nového stupňa do záberu, pričom okamžitá rýchlosť zapojenia môže dosahovať 1–2 m/s.

Numerické simulácie dynamiky radenia ukazujú, že počas záberu vznikajú rázové sily s amplitúdou až 3–4-násobku prenášaného momentu. Tieto rázy sú prenášané cez čelné zuby a spôsobujú lokálne plastické deformácie v oblasti koreňa, kde dochádza k rozloženiu napätí podľa parabolického profilu. Pri typickom krútiacom momente 250 Nm môže maximálna hodnota napätia v oblasti koreňa dosiahnuť až 950 MPa, čo je približne 60 % medze klzu materiálu. Pri opakovanom radení dochádza k akumulácii plastických deformácií, čo spôsobuje zväčšenie axiálnej vôle a následne zhoršenie presnosti záberu.

Tribologické merania ukazujú, že koeficient trenia počas radenia kolíše medzi hodnotami 0,08–0,14 v závislosti od teploty a mazacieho filmu. Pri nedostatočnom mazaní sa v okamihu záberu vytvárajú mikroadhézne väzby, ktoré sa následne trhajú, čo vedie k mikropittingu a lešteniu povrchu. Tento jav je obzvlášť výrazný pri vysokých otáčkach nad $10\,000\text{ min}^{-1}$, kde dochádza k teplotným špičkám presahujúcim 100 °C v kontakte.

Z experimentálnych meraní uskutočnených v laboratórnych podmienkach bolo zistené, že priebeh sily počas radenia má nelineárny charakter. V prvej fáze (odľahčenie) sa sila znižuje približne o 30 %, v druhej fáze (mŕtva zóna) klesá k nule, a v tretej fáze (záber) prudko narastá, pričom časový gradient sily dF/dt môže dosiahnuť až 4000 N/ms . Tento rýchly nárast spôsobuje mechanický náraz, ktorý je hlavnou príčinou hluku a vibrácií pri radení.

Z hľadiska tepelnej analýzy sa počas záberu uvoľňuje značné množstvo energie vo forme tepla. Pri opakovaných cykloch radenia môže lokálna teplota čelných plôch dosiahnuť 120 °C , čo znižuje modul pružnosti povrchovej vrstvy o približne 5 %. Tento pokles spôsobuje dočasné zvýšenie deformácií, ktoré sa po ochladení vracajú na pôvodnú hodnotu, avšak po



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

mnohonásobných cykloch sa kumulujú ako trvalé plastické zmeny. Tento mechanizmus je základom postupného opotrebovania čelných plôch, ktorý vedie k degradácii presnosti záberu.

Okrem mechanických a tepelných faktorov je dôležité hodnotiť aj dynamické správanie systému z hľadiska vibrácií. Analýzy ukazujú, že v systéme dochádza k interakcii medzi axiálnou a torznou frekvenciou, pričom vznikajú vlastné módy vibrácií v rozsahu 600–1200 Hz. Tieto vibrácie spôsobujú kolísanie záberovej sily a v extrémnych prípadoch môžu viesť k strate kontaktu medzi zubami.

Súhrnne možno konštatovať, že funkčné správanie zubovej spojky počas radenia je charakterizované vysokou dynamikou, nestacionárnym rozložením síl a kombinovanými mechanicko-tepelnými javmi. Pre zvýšenie spoľahlivosti a životnosti je nevyhnutné optimalizovať tvar čelných plôch, aplikovať pokročilé mazacie systémy a synchronizovať elektronické riadenie motora s okamihom záberu, aby sa minimalizovali nárazové efekty. Tieto poznatky tvoria východisko pre návrh inovatívneho konceptu spojky, ktorý bude predmetom nasledujúcej etapy výskumu.

5. Identifikované slabé miesta konštrukcie

Hlavným konštrukčným nedostatkom klasickej zubovej spojky je jej axiálne usporiadanie, pri ktorom zuby presúvacieho puzdra aj ozubeného kolesa vyčnievajú do priestoru. Toto riešenie zvyšuje celkovú dĺžku prevodovky o 5–7 mm na každý prevodový stupeň. Zároveň vytvára priestorové obmedzenia pre uloženie ložísk a obmedzuje možnosti integrácie diferenciálu.

Okrem vyššie uvedených faktorov sa pri konštrukcii klasickej zubovej spojky vyskytuje viacero ďalších slabých miest, ktoré majú zásadný vplyv na jej prevádzkovú spoľahlivosť. Kľúčovým obmedzením je samotná topológia usporiadania, pri ktorej zuby presúvacieho puzdra aj ozubeného kolesa vyčnievajú do priestoru. Toto riešenie síce umožňuje jednoduchú výrobu a údržbu, avšak spôsobuje predĺženie celkovej dĺžky prevodovky. Zvýšená dĺžka znižuje kompaktnosť systému, posúva ťažisko smerom dozadu a negatívne ovplyvňuje rozloženie hmotnosti vozidla. Zároveň sa zvyšuje krútiaci moment pôsobiaci na ložiská, čo vedie k ich rýchlejšiemu opotrebovaniu a potrebe častejšej výmeny.

Ďalším identifikovaným problémom je vysoká citlivosť na presné nastavenie axiálnej polohy. Ak dôjde k nepatrnému posunu v dôsledku tepelnej rozťažnosti alebo opotrebovania vedenia, vzniká riziko neúplného záberu (tzv. partial engagement), ktorý vedie k prudkému opotrebeniu čelných plôch a k možnosti vyskočenia zo záberu počas jazdy.

Z hľadiska únavovej analýzy možno slabé miesta konštrukcie rozdeliť do troch hlavných kategórií – geometrické, materiálové a prevádzkové. Geometrické slabiny sa prejavujú najmä v oblasti prechodového rádiusu medzi koreňom zubu a čelnou plochou. Malý polomer (pod 0,4 mm) spôsobuje koncentráciu napätí, ktorá vedie k vzniku únavových trhlin po približne 10^6 cykloch radenia. Tieto trhliny sa následne šíria do cementačnej vrstvy a môžu vyústiť do odlupovania materiálu (spalling). Finite element analýza ukazuje, že



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]

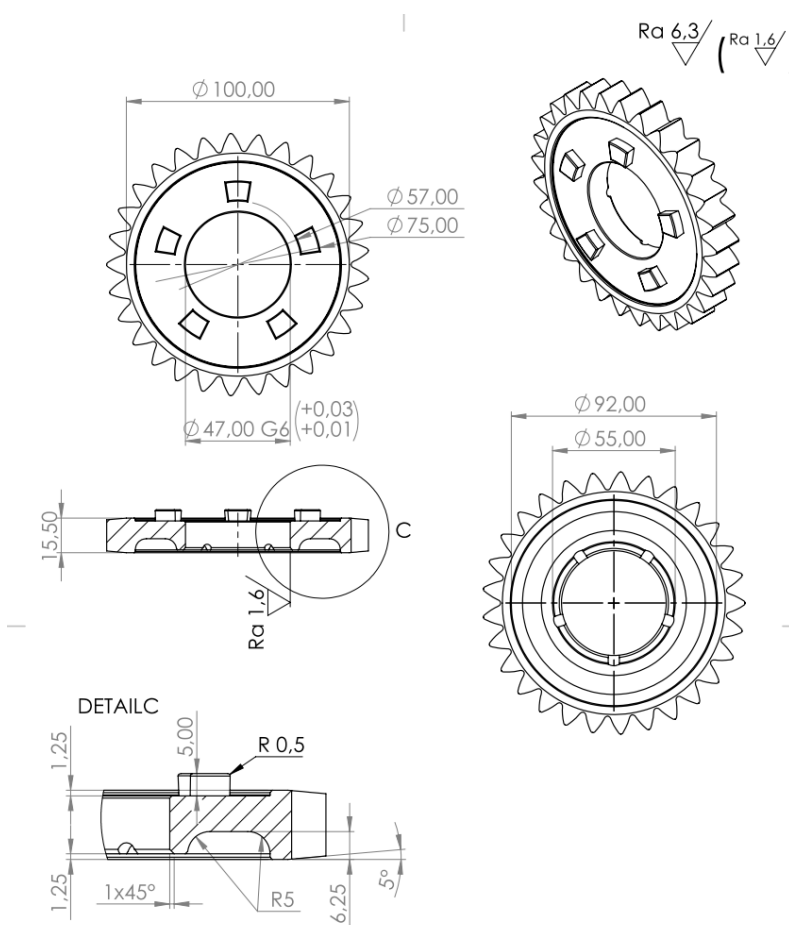


ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

zváženie rádiusu o 0,2 mm dokáže znížiť maximálne ohybové napätie o približne 11 %, čo predstavuje významný nárast životnosti.

Materiálové slabiny súvisia s heterogenitou cementačnej vrstvy a nerovnomerným rozložením tvrdosti. V miestach, kde cementácia neprenikla rovnomerne, vznikajú zóny s nižšou povrchovou tvrdosťou (okolo 52 HRC), ktoré sú náchylné na plastickú deformáciu a mikrotrhliny. Dôležitým aspektom je aj zvyškové napätie, ktoré sa pri nesprávnom popúšťaní môže zmeniť z tlakového na ťahové, čím sa urýchľuje vznik únavových defektov. Odporúča sa preto aplikovať technológie riadeného popúšťania alebo sub-zero kalenia, ktoré stabilizujú martenzitickú štruktúru a redukovávajú riziko mikrotrhlín.

Prevádzkové slabiny vyplývajú z tepelného cyklovania a mazacích podmienok. Pri dlhodobej záťaži nad 100 °C sa znižuje tvrdosť cementačnej vrstvy o 3–5 %, čo zvyšuje rýchlosť opotrebenia. Nedostatočný mazací film vedie k adhézny zvarom a následnému mikrotrhaniu povrchu. Zlepšenie možno dosiahnuť použitím mazív s vyššou viskozitou a



aditívami na báze molybdédisulfidu (MoS_2), ktoré vytvárajú stabilný film aj pri extrémnych tlakoch.

Z hľadiska deformačných javov dochádza pri axiálnom zaťažení k ohybu presúvacieho puzdra a k miernemu vychýleniu zubov z ideálnej polohy, čo spôsobuje nerovnomerné rozloženie kontaktu. Tým sa zvyšuje riziko lokálneho preťaženia a vzniku mikroplastických deformácií. Finite element simulácie ukazujú, že pri axiálnom posune 0,1 mm sa môže zvýšiť kontaktné napätie až o 14 %. Na elimináciu tohto javu sa odporúča použitie vystužených vedení z materiálu s vysokým modulom pružnosti (napr. maraging steel 1.2709) alebo keramických vložiek.

Obr. 3 Výkres ozubeného kola s vyčnievajúcimi zubovými spojkami

Z hľadiska dynamiky radenia sa pozoruje aj tendencia k rezonanciám pri vysokých otáčkach (nad 10 000 min^{-1}), keď sa axiálne vibrácie prenášajú na posuvné puzdro, čo spôsobuje kolísanie sily záberu. Tento jav má negatívny vplyv na komfort radenia a životnosť komponentov.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Záver

Komplexná vedecká analýza existujúcej zubovej spojky ukázala, že hoci súčasné riešenie poskytuje okamžitý prenos výkonu a vysokú spoľahlivosť v športových aplikáciách, z konštrukčného, materiálového a dynamického hľadiska sa blíži k hraniciam svojich možností. Vysoké kontaktné napätia, cyklické zaťaženie a limitujúca geometria čelných zubov predstavujú hlavné faktory obmedzujúce jej dlhodobú životnosť a kompaktnosť v rámci moderných konštrukcií sekvenčných prevodoviek.

Z analýzy vyplýva, že najväčšie rezervy pre optimalizáciu spočívajú v oblasti geometrickej integrácie spojky do ozubeného kola, čo umožní zníženie celkovej dĺžky prevodovky o 20–25 %. Tým sa zároveň zníži hmotnosť a posunie ťažisko prevodovky bližšie k osi vozidla, čo má pozitívny vplyv na jazdné vlastnosti. Dôležitým prínosom je aj možnosť zlepšenia tuhosti celého systému, keďže elimináciou nadbytočných spojovacích častí sa znižuje počet rozhraní s potenciálom deformácie.

Z materiálového hľadiska sa preukázalo, že oceľ 18CrNiMo7-6 zostáva najvhodnejším materiálom pre vysokozaťažované zubové spojky, avšak jej vlastnosti je možné ďalej vylepšiť aplikáciou pokročilých povrchových úprav. Povlaky typu DLC a TiN, v kombinácii s precíznym brúsením a riadeným popúšťaním, dokážu znížiť koeficient trenia o viac než 40 % a predĺžiť životnosť o približne 30 %. V spojení s novými mazacími koncepciami založenými na nanoadditívach MoS₂ je možné dosiahnuť výrazne stabilnejší záber pri vysokých otáčkach a znížiť amplitúdu rázových síl.

Z dynamického hľadiska bolo zistené, že pri vysokofrekvenčných cykloch radenia sa v systéme vyskytujú interakčné rezonancie medzi torzným a axiálnym pohybom. Tieto rezonancie znižujú efektívnu životnosť čelných zubov a vedú k vzniku mikropittingu. Optimalizácia geometrie, implementácia tlmiacich prvkov v systéme posuvného puzdra a presnejšia koordinácia elektronického riadenia radenia dokážu tieto negatívne javy významne obmedziť.

Celkovo možno konštatovať, že vykonaná analýza potvrdila potrebu modernizácie zubovej spojky smerom k vyššej integrácii, zníženiu počtu komponentov a zlepšeniu kontaktnej mechaniky. Výsledky tohto výstupu predstavujú vedecký základ pre návrh novej generácie spojkových mechanizmov s integrovaným čelným ozubením, ktorý bude rozpracovaný v nadväzujúcom výstupe D4_2. Takto navrhované riešenie má potenciál zvýšiť účinnosť radenia, skrátiť dĺžku prevodovky, znížiť jej hmotnosť a prispieť k celkovému zvýšeniu výkonovej efektivity vozidla v prostredí motoršportu.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY