

České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta strojní

Czech Technical University in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering

Doc. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph. D.

Tvůrčí a standardizovaný vývoj převodových mechanismů

Investigative and Standard Development of Gearboxes

Summary

This paper deals with creative methods for designing cylindrical gearwheels. Two ways to higher resistance of gear against damages are described: optimization of a shape of the gear and improvement of surface qualities of their material. The study is based on nonstandard geometry, namely on design modifications and on an application of unconventional methods for trimming of the surface of the gear.

Proposed method is based on FEM and calculation is done with respect of real geometry of all parts of gearbox and their deformations caused by a load. Optimization of the tooth shape is gained by an iterative calculation. Important modifications are proposed and realized throughout this process. The final optimal shape is achieved by longitudinal, transversal and angular modifications. By that the better gear mesh and consequent more equal load are gained.

Gearwheels designed according both methods DIN and FEM are tested using testing stand developed for the given purpose. This stand is build for a shortened lifetime testing is allocated in Wikov works-Hronov. The testing circle is mechanically closed and gives a possibility of a fluent change of the torque by an axial movement of a gearwheel in an additional gearbox. The axial force of this gearwheel causes a tangential force on a pinion, which represents a torque. Maximum power is 785 kW – 5000 Nm and 1500 rpm. The experimental method for evaluation of lifetime is based on monitoring of the surface damages caused during shortened testing.

Original method based on a digital photography of flank teeth was developed for an evaluation of pitting. The flank of teeth is illuminate and photographed trough an opening in the gearbox. Pictures are stored under appropriate directory and than they are used for evaluation of damaged areas of each gear in proportion to undamaged ones by a special SW. This program takes pixels with a great contrast as a sign of damage. The sum of damaged portions of single teeth is counted and sent into a database. After evaluation of all gears the amount of the whole wheel is summarized.

Application of the IBAD method (Ion Beam Assisted Deposition) is another original way to increase the lifetime o gear. The TiN and CrN layers are applied on a surface of the carbonized and hardened gear tooth flank. Results of these applications are tested similarly as described above using a stand build at FME CTU. This experimental stand allows a load of gear with 62 kW – 400 Nm and 1500 rpm.

Souhrn

Práce se zabývá tvůrčími metodami navrhování válcových ozubených kol. Jsou popsány dva způsoby zvýšení odolnosti boků zubů proti poškození: optimalizace tvaru zubu a zlepšení povrchových vlastností materiálu. Práce je opřena o využití nestandardní geometrie, zejména modifikací tvaru a aplikaci nekonvenčních metod pro úpravu povrchu ozubených kol.

Metoda návrhu je založena na využití MKP a výpočtu na základě reálných tvarů všech součástí převodové skříně a jejich deformací od zatížení. Optimalizace tvaru zubu je provedena iteračním výpočtem, při kterém jsou navrhovány a optimalizovány příslušné modifikace. Výsledný optimální tvar je získán provedením podélných, příčných a úhlových modifikací. Tím je dosahováno zlepšení záběru ozubení, které vede k rovnoměrnějšímu zatížení.

Metody návrhu podle DIN i MKP jsou experimentálně ověřovány na zkušebním stanovišti, které bylo k tomuto účelu navrženo. Zařízení je určeno pro zkrácené životnostní zkoušky a je instalováno ve firmě Wikov. Zkušební okruh je mechanicky uzavřený s možností plynulého nastavení zatěžujícího momentu. To je umožněno axiálním posouváním ozubeného kola v doplňkové převodovce. Šikmé ozubení tohoto kola vlivem své axiální síly generuje na spoluzabírajícími pastorku tečnou sílu, která představuje zátěžný krouticí moment. Maximální výkon v okruhu je 785 kW při 5kNm a 1500min⁻¹. Experimentální metoda pro hodnocení životnosti je založena na sledování poškození povrchu, kterého je dosahováno při zkrácených zkouškách životnosti.

Pro hodnocení pittingu byla vyvinuta zcela nová metoda, která je založena na zpracování digitální fotografie boku zubu. Otvorem v převodové skříně je provedeno nasvícení boku zubu a jeho vyfotografování. Snímky jsou archivovány v příslušných adresářích. Odtud jsou pomocí speciálního SW využity k vyhodnocení poměru poškozených a nepoškozených ploch jednotlivých zubů. Tento program určuje pixely s velkým kontrastem jako poškozené, stanovuje sumu poškozených a nepoškozených ploch a přenáší ji do databáze. Jsou-li programem vyhodnoceny všechny zuby ozubeného kola, je v databázi možno určit stav poškození.

Novým prvkem při zvyšování odolnosti boků zubů je dále využití metody IBAD (Ion Beam Assisted Deposition), při níž se na povrch cementovaných a kalených ozubených kol nanáší TiN a CrN vrstvy. Výsledky aplikace IBAD metody se experimentálně vyhodnocují výše popsaným způsobem na FS ČVUT na zkušebním stanovišti, které umožňuje zatěžování ozubených kol výkonem 63 kW, při 400 Nm a 1500 min⁻¹.

Klíčová slova:

Ozubení, podélná modifikace, příčná modifikace, úhlová modifikace, MKP, kontaktní tlak, záběr ozubení, pitting, hodnocení pittingu, digitální fotografie, fotografická metoda, vytvrzování pomocí IBAD.

Keywords:

Gear, longitudinal and transverse modifications, angular modification, FEM, contact pressure, gear mesh, pitting, pitting evaluation, digital photography, photo method and hardening by IBAD.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Tvůrčí a standardizovaný vývoj převodových mechanismů

Autor: Doc. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph. D.

Počet stran: 31

Náklad: 150 výtisků

© Vojtěch Dynybyl
ISBN

Obsah

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Obsah	5
1. Úvod	6
2. Metody vývoje převodových mechanismů	7
2.1 Standardizovaný vývoj	7
2.2 Tvůrčí vývoj	7
3. Metody tvůrčího vývoje převodových mechanismů	9
3.1 Experimentální stanoviště pro ověřování životnosti ozubených kol ..	9
3.2 Fotografická metoda pro hodnocení poškození zubů pittingem	12
3.3 Komplexní výpočetní metoda pro optimalizaci geometrie ozubení ..	14
3.4 Nekonvenční zvyšování odolnosti boků zubů	17
4. Verifikace metod tvůrčího vývoje	18
4.1 Výsledky experimentálních měření	18
4.2 Aplikace fotografické metody vyhodnocení pittingu	19
4.3 Výsledky výpočtů	21
4.4 Hodnocení nekonvenčních metod zvyšování odolnosti boků zubů	24
5. Přínosy a perspektiva výzkumu	25
Literatura:	28
Doc. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D.	31

Akademická část týmu má výhodu širšího přehledu v interdisciplinárních problémech, v širší teoretické a metodické připravenosti, v nezatíženosti historickými vazbami výrobní firmy. Druhá část týmu je obvykle tvořena firemními specialisty, kteří zastupují odbornou špičku v daném oboru a do týmu přinášejí konkrétní znalosti z výrobní a ekonomické sféry.

Vlastní vývoj nového produktu probíhá vždy v několika etapách, jehož vrcholem by mělo být ověření celého návrhu na prototypu. Správnost postupu ve všech etapách vývoje, tj. v návrhové fázi, výpočtových postupech, počítačovém modelování, konstrukčním řešení a dále v návrhu technologií, by měla být ověřena závěrečnými experimentálními zkouškami zvoleného řešení. Ty by měly předcházet uvedení do provozu u zákazníka v praktické aplikaci.

2. Metody vývoje převodových mechanismů

V současném konkurenčním prostředí průmyslové výroby nelze obstat s vývojovými metodami založenými na všeobecně uznávaných standardních postupech. Výrobci proto hledají postupy nové, ve kterých se odráží firemní know-how, a které umožňují dosahovat nejvýhodnějších parametrů výrobků.

2.1 Standardizovaný vývoj

Standardizovaný vývoj v oblasti převodových mechanismů s ozubenými koly se opírá o propracované výpočetní postupy, které jsou obsaženy v různých normách, např. ISO, DIN, AGMA, ČSN. Tyto postupy jsou dlouhou praxí ověřeny a vedou na jistá řešení. Současně jsou tyto postupy uspořádány do nejrozličnějších SW prostředků na nejrozličnější úrovni. Nevýhodou těchto, v SW obsažených, postupů je, že jsou pevně svázány s příslušnou normou a že je má k dispozici i konkurence.

Jejich aplikace je spojena s užitím celé řady koeficientů, jejichž optimální volba představuje firemní know-how. Dospět k takovému know-how umožňují i dále popsané metody tvůrčího vývoje.

2.2 Tvůrčí vývoj

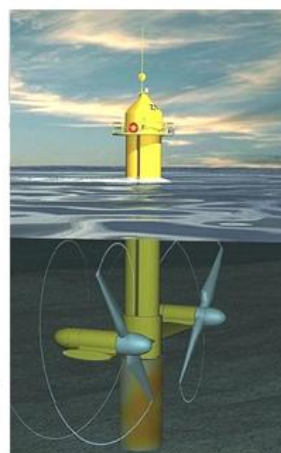
Motivací pro změny v přístupu k vývoji produktů přináší současné vysoce konkurenční globální tržní prostředí. Firmy, které chtějí získat pozici na světovém trhu, musí v nabídkových řízeních předložit argumenty, které přivedou zákazníka k realizaci kontraktu. Jedná se především o cenu výrobku. Ta se odvíjí od technických parametrů a nákladnosti výroby. V případě převodovek se prosazují produkty s nejlepší funkcí, nízkou hmotností při maximálním přenášeném výkonu. Vedle toho se hodnotí úroveň negativních jevů jako jsou vibrace, nutnost servisu apod.

Další motivací pro výrobce převodovek jsou jednak zcela nová odvětví, ve kterých se převody uplatňují např. větrné a podmořské elektrárny viz obr. 2.1 a jednak intenzivní rozvoj tradičních odvětví jako jsou komerční převodovky pro všeobecné použití, převodovky pro lodní a kolejovou dopravu apod.

Vodní energie



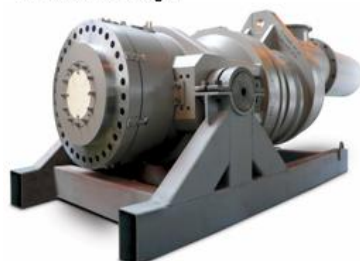
Studie přílivové elektrárny



Větrná energie



Přílivová energie



Obr. 2.1 Energetické aplikace převodovek [35][32]

Vyspělé firmy jsou si dobře vědomy potenciálu univerzitních pracovišť, a proto vytvářejí vhodné podmínky pro spolupráci. Firma Wikov MGI a.s. spolupracuje s FS ČVUT v Praze na základě rámcové smlouvy o spolupráci od roku 2004.

Také pro universitu je taková spolupráce velkou motivací, protože se vytvářejí výhodné podmínky pro vědecko-výzkumnou činnost, pro transfer poznatků do pedagogiky a pro zlepšení ekonomického a technického zázemí fakulty, resp. Ústavu. Taková spolupráce je bezesporu perspektivní pro fungování vysokých škol, které jsou zaměřeny na výchovu budoucích zaměstnanců průmyslu a na vědeckovýzkumnou činnost podporující úspěšnost českého průmyslu.

3. Metody tvůrčího vývoje převodových mechanismů

Má-li být dosaženo konkurenceschopnosti výrobku tohoto typu, je třeba se zaměřit na koncepční i detailní řešení. Přitom detailní řešení často rozhoduje, protože koncepce je dobře známa, optimalizována a používána i konkurenčními výrobci.

Pro převodové mechanismy s ozubenými koly je rozhodujícím prvkem ozubení, kde je nejčastěji kritickým a limitujícím faktorem únavové poškození boků zubů kontaktním tlakem. Únosnost boku zubu během provozu je dána zásadně dvěma faktory: materiálem a geometrií.

Současná ozubená kola pro výše uvedené aplikace se nejčastěji vyrábí z vysoce legovaných materiálů, obvykle cementovaných a kalených. Kvalita jejich chemicko-tepelného zpracování je závislá na úrovni technologie, jejíž bezchybnost je bezvýhradnou podmínkou kvality.

Geometrie ozubení rozhoduje o velikosti lokálních špiček kontaktních tlaků. Konečná poloha spoluzabírajících kol není jen výsledkem kvalitně vyrobeného ozubení, ale je výsledkem geometrie všech zúčastněných dílů, která je dosažena výrobou. Dále je konečná poloha spoluzabírajících kol ovlivněna přenosem sil a tedy deformacemi zúčastněných prvků při přenosu výkonu.

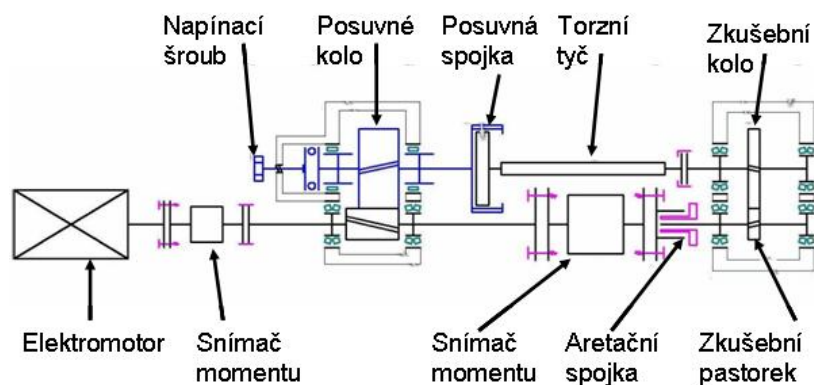
V následujících odstavcích budou popsány metody podporující tvůrčí vývoj. Tyto metody byly vyvinuty společným úsilím spolupracujících stran a v současnosti jsou využívány ve firemním vývoji i vědecko-výzkumné činnosti Ústavu konstruování a částí strojů.

3.1 Experimentální stanoviště pro ověřování životnosti ozubených kol

V této části je pojednáno o stanovištích pro životnostní zkoušky ozubených kol, které byly navrženy pracovníky Ústavu konstruování a částí strojů. Jeden byl uveden do provozu ve firmě WIKOV MGI, a.s a druhý na FS ČVUT. Odlišují se účelem použití a konstrukcí. První je určeno především pro výzkum geometrie ozubených kol, druhé pro výzkum materiálů ozubených kol a jejich povrchových úprav [3], [16], [17], [18], [20], [25].

Firma WIKOV MGI v současné době disponuje silným výzkumným, vývojovým a inovačním potenciálem, jehož součástí je dále

popsané zkušební stanoviště. Na obr. 3.1 je schéma mechanické části tohoto zkušebního stanoviště.



Obr. 3.1 Schéma uzavřeného okruhu WIKOV [3], [33], [22], [18], [20]

Zařízení je navrženo podle vzoru Niemannova zkušební okruhu a je tvořeno dvěma rovnoběžnými osami. Osa pro vyvození předpětí je vybavena dvěma snímači momentu. Snímač umístěný na hřídeli elektromotoru je určen pro sledování aktuálního ztrátového výkonu v uzavřeném okruhu. Měření tohoto momentu na vstupu do okruhu má informativní charakter a je užitečné zvláště jako zajištění proti havárii stanoviště. Neočekávané poruchy v okruhu, které jsou doprovázeny nárůstem pasivních odporů, se projeví změnou měřeného momentu a nastavením maximálních dovolených hodnot lze okruh zastavit.

Druhý snímač momentu je umístěn uvnitř okruhu a je rozhodující pro sledování stavu zatížení v okruhu. V místě jeho přírubové spojky a hřídele měřeného pastorku je umístěna aretační spojka, která je u tohoto okruhu určena pouze pro vymezení vůlí v okruhu.

Originální v tomto okruhu je nastavování předpětí do okruhu. Je prováděno pomocí napínacího šroubu, kterým je posuvné kolo přesouváno zleva doprava pro zvýšení předpětí a opačně pro jeho snížení. Jeho šikmé zuby při záběru s pastorkem nakrucují torzní tyč umístěnou na druhé ose. Posuvná spojka je nutná pro spojení hřídele posuvného kola, který se pohybuje směrem k torzní tyči. Předpětí lze měnit i během provozu stanoviště.

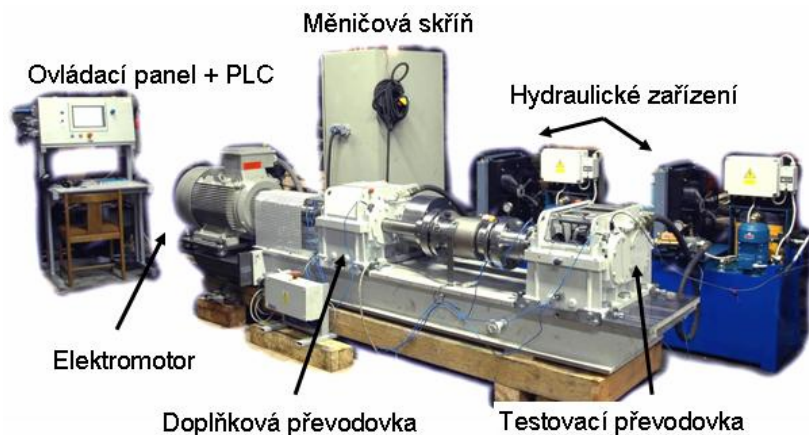
Zkušební soukolí je umístěno v tzv. testovací (zkušební) převodovce a posuvné kolo a spoluzabírající pastorek jsou v převodovce doplňkové (technologické).

Na obr. 3.2 je realizace zkušebního stanoviště. Vedle výše vysvětlené mechanické části je stanoviště vybaveno měničovou skříní pro řízení experimentů, ovládacím panelem s řídicím PLC a hydraulickým

zařazením. Dva shodné hydraulické agregáty jsou určeny pro řízení cirkulace mazacího média v testovací a doplňkové převodovce. Ozubení obou převodovek je mazáno pomocí trysek, které jsou zavedeny k místu záběru ozubených kol. Protože je ozubení značně přetěžováno, je nutné vzniklou tepelnou energii odvádět a mařit v chladiči.

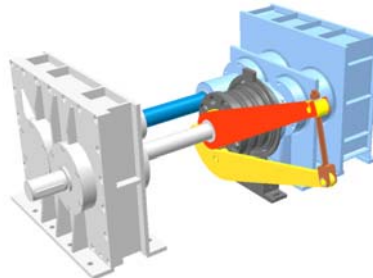
Energetické ztráty tohoto okruhu jsou při maximálním realizovaném výkonu v okruhu (785 kW, při 5000 Nm a 1500 min⁻¹) přibližně 6%. To je z hlediska provozu velmi výhodné.

V současné době je stanoviště používáno pro jednohladinové zkoušky. Stanoviště bude možno v budoucnosti doplnit vhodnou pomaluběžnou převodovkou pro ovládání napínacího šroubu. To umožní provádět na stanovišti i vícehadinové zkoušky v automatických cyklech.



Obr. 3.2 Realizace zkušebního stanoviště WIKOV [3], [33].

Na obr. 3.3 je model řešení stanoviště pro životnostní zkoušky, který je na FS ČVUT. Stanoviště je sestaveno obdobným způsobem jako stanoviště WIKOV. Liší se však způsobem nastavení předpětí a jeho aretací.



Obr. 3.3 Pákové torzní předepínání [29], [26]

Napínání je provedeno pomocí dvojice pák, které jsou k sobě přitahovány šroubem a maticí – viz. obr. 3.3. Jedna páka je pomocí kolíků zasunuta do tělesa spojky snímače krouticího momentu a druhá páka je nasunuta na evolventní drážkování, které je vyrobeno na hřídeli zkoušeného pastorku. K aretaci je použita spojka s hydraulicky vyvinutým tlakem pro spojení náboje snímače a hřídele zkušebního pastorku. Změna předpětí v okruhu je možná pouze při zastavení pohybu. Na obr. 3.4 je realizace uzavřeného okruhu ČVUT.



Obr. 3.4 Realizace zkušebního stanoviště FS ČVUT [3]

Stanoviště je vybaveno čerpadlem pro nucený oběh oleje, olejovou nádrží a chladičem oleje. Je patrné robustní potrubí pro odvod oleje z převodových skříní, které je nutné z důvodu odtoku oleje při nižších teplotách oleje. Dále je stanoviště vybaveno výškově stavitelným rámem elektromotoru, který byl navržen jako universální rám pro několik rozměrových řad elektromotorů.

Vzhledem k jednoduchosti uspořádání tohoto stanoviště jsou energetické ztráty při maximálním výkonu (63 kW, 400 Nm a 1500 min⁻¹) přibližně 4%. Stanoviště je určeno především pro jednohadinové zkoušky.

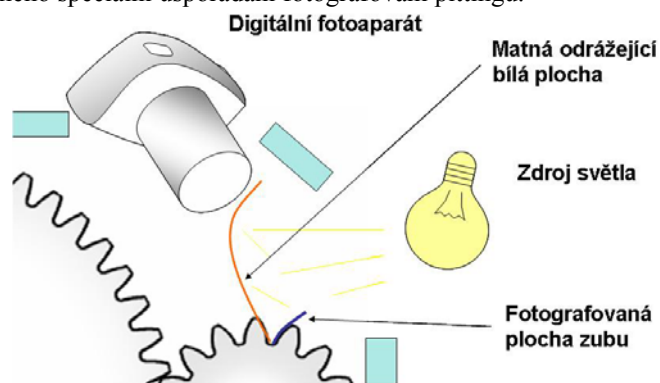
3.2 Fotografická metoda pro hodnocení poškození zubů pittingem

V průběhu zkoušek životnosti je nutné pravidelně stanovovat rozsah poškozené plochy ozubení. Dále popsaná metoda byla poprvé (pravděpodobně ve světovém měřítku) publikována v [2], [31].

Metoda je založena na SW zpracování digitálních fotografií boků zubů ozubených kol a postupuje v těchto krocích:

1. Fotodokumentace každého zubu na analyzovaném kole.
2. Uložení souborů pořízené fotodokumentace do adresářů, které obsahují číslo vzorku a čas uplynulý od začátku testování vzorku.
3. Spuštění programu pro identifikaci pittingu s odkazem na adresáře popsané výše.
4. Vlastní vyhodnocení grafů a statistických hodnot.
5. Fotodokumentace pittingu.

Obecně je fotografování oblých kovových ploch a zvláště fotografování plochy šikmého zubu velice obtížné. Na obr. 3.5 je znázorněno speciální uspořádání fotografování pittingu.



Obr. 3.5 Uspořádání fotografování pittingu [31], [2] a [33]

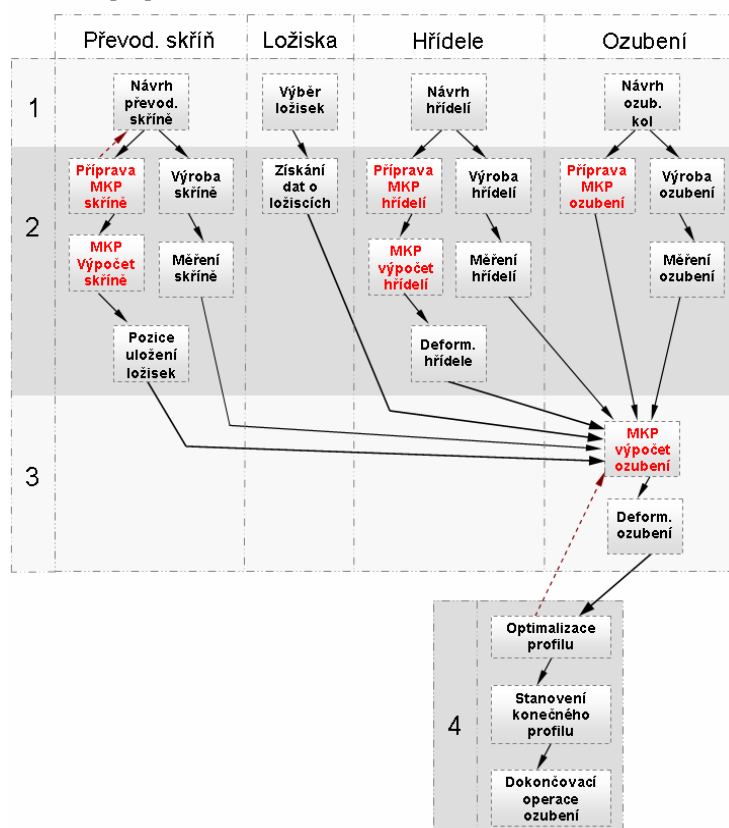
Pro automatické vyhodnocení velikosti porušené plochy byl vyvinut matematicko-grafický program v prostředí Matlab, který vyhledává okolí pittingu s vysokým kontrastem a vyhodnotí ji jako hranici poničeného povrchu. Následuje sumarizace pixelů poničených ploch a zapsání do databáze. Je-li celé kolo vyfotografováno a zpracováno programem, je databáze připravena pro vyhodnocení pittingu. Hlavními sledovanými výstupy jsou celková velikost plochy poškození pittingem na jednom zubu a na celém ozubení. Tyto hodnoty jsou požadovány pro určení konce životnosti soukolí. V normách pro ozubení (např. DIN) je určena hodnota 4% poškozené plochy z plochy kteréhokoliv zubu nebo 1% celkové plochy všech zubů.

Celková realizace metody je v porovnání s ostatními metodami, jako např. analýza olejů nebo vibrodiagnostika, velmi přesná a finančně nenáročná (není nutná nákladná aparatura, postačuje digitální fotoaparát). Další výhodou je rychlost získání výsledků a snadná opakovatelnost. Fotografování všech boků zubů se provádí postupně, kolo je natáčeno tak, že zuby jsou postupně natočeny do přesné, vždy stejné, polohy. Takto

vzniklé fotosérie, které jsou složeny ze snímků jednotlivých zubů, jsou fotografovány v předem určených intervalech. Metoda je vhodná pro specifické stanovení životnosti ozubení na únavovou poruchu na dotyk. Toto fotografické vyhodnocení pittingu je možné využít pro čelní soukolí s přímými i šikmými zuby.

3.3 Komplexní výpočetní metoda pro optimalizaci geometrie ozubení

Snížení lokálních špiček kontaktních tlaků na bocích ozubených kol se provádí pomocí modifikací geometrie ozubení. Tato problematika je vysvětlena v [27].



Obr. 3.6 Blokové schéma postupu výpočtu a realizace modifikací [33]

Komplexní metoda pro optimalizaci geometrie ozubení pomocí MKP, která je dále popsána, umožňuje ve virtuálním prostředí navrhnout modifikace, které reagují jednak na předem známé faktory, jako je např.

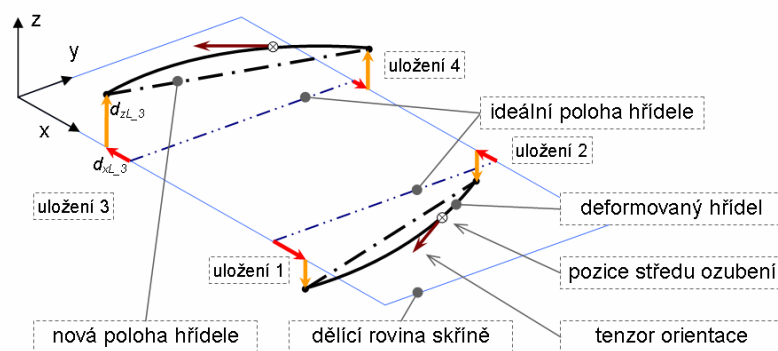
zatížení, ale i na faktory, které nejsou předem známe, jako např. kvalita výroby, přesnost subdodávaných dílů, tepelné a deformační stavy dané interakcí převodovky s okolím v provozu apod. Výpočet umožňuje navrhnout složitou modifikaci, která je pak aplikována na reálné soukolí pomocí precizních dokončovacích technologií.

Metoda je rozdělena do čtyř fází viz. blokové schéma na obr. 3.6. První je konstrukční, kdy jsou jednotlivé součásti (skříň, ložiska, hřídele a ozubená kola) tvarovány na základě funkčních požadavků a návrhových a kontrolních výpočtů.

V druhé fázi jsou provedeny deformační výpočty zúčastněných dílů a jsou tak shromážděna data potřebná ke stanovení změn polohy ozubených kol v prostoru.

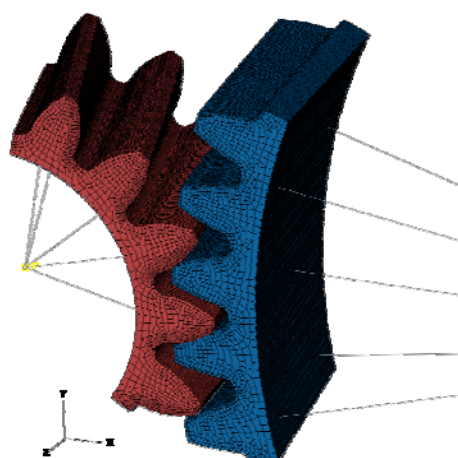
Dále jsou ve druhé fázi změřeny potřebné geometrické údaje o rozměrech, které byly dosaženy ve výrobě a ze kterých jsou odvozena data potřebná ke stanovení změn polohy ozubených kol v prostoru.

Superpozicí těchto údajů získáme prostorovou situaci uložení, poloh středů kol a natočení kol viz. obr. 3.7. Ta bude zahrnuta do výpočtu ve třetí fázi.



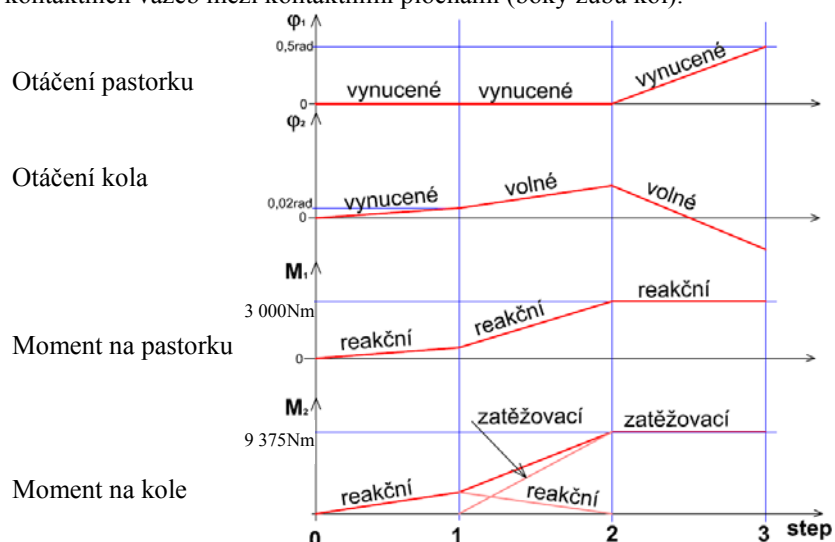
Obr. 3.7 Situace po zatížení a přičtení výrobních odchylek [33], [5][15]

Ve třetí fázi je proveden výpočet ozubení pomocí MKP. Na obr. 3.8 je zobrazen globální MKP model ozubeného soukolí, který je vytvořen jako segment s pěti spoluzabírajícími zuby. Tvorba modelu probíhá takto: po načtení dat evolventního profilu z programu KissSoft jsou vytvořeny elementy ozubených kol vysunutím profilu po úhlu sklonu zubu. Poté jsou do modelu přiděleny kontaktní vazby mezi jednotlivé boky zubu. Po vysítování modelu jsou kola propojena se středy otáčení pomocí vazeb Coupling. Následné uložení kol a zavádění všech momentů je aplikováno prostřednictvím těchto bodů. Přitom poloha těchto středů odpovídá výsledkům výpočtů, které jsou prováděny ve druhé fázi.



Obr. 3.8 Segment spoluzabírajících kol [33]

Simulace záběru je prováděna kvazistaticky ve třech krocích podle diagramu na obr. 3.9. Během prvního kroku dochází k vytvoření předpětí. Pastorek má zablokované všechny rotace i posuvy a na kole je zavedena malá rotace kolem osy rotace o úhel cca $0,12^\circ$ ($0,002 \text{ rad}$) proti pastorku. Posuvy na kole i rotace kolem zbylých dvou os jsou také zablokovány. Díky tomuto jemnému pootočení směrem do záběru dojde k aktivaci (navázání) kontaktních vazeb mezi kontaktními plochami (boky zubů kol).



Obr. 3.9 Diagram simulace záběru [33]

Při druhém kroku začíná pozvolné zatěžování rotačním momentem kolem osy rotace kola. Zatěžování probíhá opět proti pastorku. Na pastorku jsou stále zablokovány všechny rotace i posuvy. Na konci tohoto kroku působí na kole rotační moment v plné síle.

Během třetího kroku již dochází k plnému zatížení na kole pomocí momentu, který působí konstantní hodnotou $M_2 = 9\,375\text{ Nm}$. Proti kolu je vynucena rotace na pastorku, čímž je simulováno odvalování. Posuvy na obou kolech jsou zablokovány a jsou povoleny jen rotace kolem os rotace daných kol (osy z). V průběhu třetího kroku dochází k pozvolnému otáčení pastorku o cca 2,2 zubů. To je rozděleno na 25 poloh záběru, ve kterých jsou provedeny výpočty.

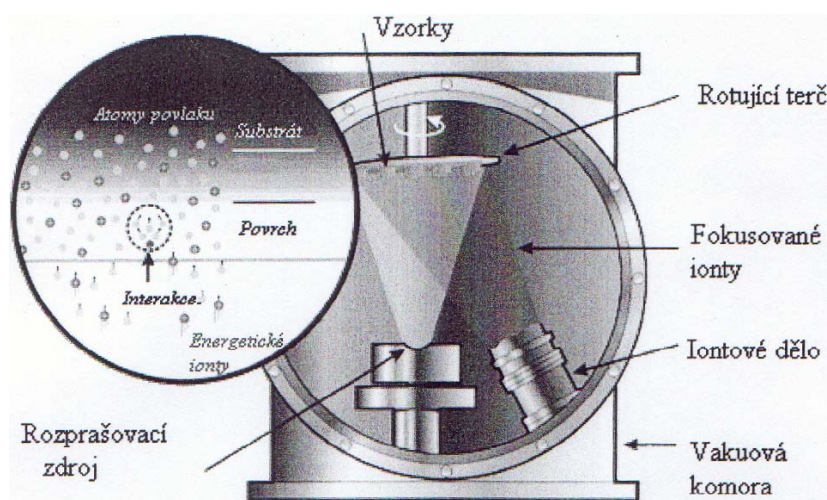
Ve čtvrté fázi je iteračním způsobem navržena modifikace tvaru a prováděn kontrolní výpočet s cílem dosáhnout minimálních a rovnoměrně rozložených kontaktních tlaků. Toho je dosaženo tak, že je upravován parametricky zadaný tvar zubů.

Tato metoda je zvláště výhodná tam, kde v kusové výrobě nelze technologii výroby zcela optimalizovat a dochází k výrobním chybám. Dále je metoda výhodná tam, kde je nutno přísně sledovat celkovou hmotnost zařízení (např. větrné elektrárny). To má za následek využití nejkvalitnějších materiálů, snížení tuhosti dílů a nutnost optimalizace geometrie ozubení z důvodů deformací dílů. Nepřímo tato metoda umožňuje snížení nákladů na výrobu tím, že by mohly být sníženy nároky na přesnost opracování dílů. Výjimku však tvoří dokončovací operace broušení ozubení, která musí být provedena precizně.

3.4 Nekonenční zvyšování odolnosti boků zubů

Na pracovišti autora je v současné době věnována pozornost nekonvenčním metodám zvyšování odolnosti boků zubů. Cílem těchto metod je zlepšit odolnost povrchové vrstvy v současnosti používaných špičkových ocelových materiálu.

Jednou z možných metod zvyšování odolnosti boku zubu, která v současné době při testování přináší pozitivní výsledky je iontová implantace (Ion Beam Assisted Deposition). Na obr. 3.10 je schéma funkce zařízení pro aplikaci IBAD. Z rozprašovacího zdroje jsou emitovány částice v podobě atomů či molekul o definované hustotě. Částice dopadají na vzorky uchycené na rotujícím terči. Vzorky jsou deponovány napařovanými částicemi (atomy) a jsou současně bombardovány fokusovanými ionty do vznikajícího povlaku. Dochází tak k atomovému promísení a k mechanickému "prošívání" systému substrát - povrch - povlak. Materiálem, který je v tomto případě základem, je legovaná, cementovaná a kalená ocel (16S26, 18CrNiMo7-6). Cílem je navýšit parametry špičkového materiálu.



Obr. 3.10 Schéma iontové implantace [30]

Metodou IBAD se zhotovují vrstvy z karbidů a nitridů přechodových kovů, nejčastěji TiN, CrN, ZrN, TiC a jejich kombinace. Výsledný povlak má vynikající adhezi a malá tloušťka vrstvy (několik nm) neovlivňuje rozměrovou přesnost již zhotoveného dílu. Hlavní využití je v současnosti v technologických nástrojích (tažníky, razníky, bříty) a dále v částech strojů namáhaných na kombinované namáhání (čepy hřídelů, pouzdra). Současný výzkum se věnuje i aplikacím na bioimplantáty a v neposlední řadě zkoumá také možnosti ovlivnění polymerů.

4. Verifikace metod tvůrčího vývoje

Úspěšnost navržených metod byla ověřována jak experimentálně tak výpočtově. V dalších odstavcích jsou uvedeny konkrétní aplikace.

4.1 Výsledky experimentálních měření

V následujícím odstavci jsou výsledky měření na soukolích s aplikací různých modifikací. Na základě aplikační teorie modifikací [27] byly pomocí rutinního SW KissSoft navrženy tři varianty modifikací.

V tabulce 1 jsou shrnuta ověřovací měření tohoto návrhu modifikací. Za účelem porovnání variant modifikací byla sledována soukolí bez modifikace, soukolí s příčnou modifikací, soukolí s podélnou úhlovou modifikací a soukolí s příčnou a podélnou modifikací. Tyto experimenty byly provedeny na soukolích vložených do zkušební převodovky. Parametry zkušebních soukolí byly navrženy tak, aby výsledky byly transponovatelné na soukolí běžných převodů, která se běžně vyskytují v převodkách firmou vyráběných.

V prvním sloupci tabulky 1 jsou jednotlivé varianty soukolí, ve druhém sloupci jsou dosažené životnosti v hodinách při zkrácených zkouškách. Je patrné, že jak příčná tak i podélná modifikace zvýšily tuto životnost přibližně třikrát. Ještě úspěšnější je kombinovaná modifikace.

Pro dokreslení výhodnosti je v tabulce 1 ukázáno, jak aplikované modifikace ovlivňují reálnou životnost ozubení. Při zkrácených zkouškách jsou ozubená kola podrobena přetížení, což umožňuje zkrácení doby zkoušek. Tento zkušební výkon byl 470 kW. Kdyby v reálných podmínkách ozubení pracovalo např. při 222 kW, by byla životnost nemodifikovaného soukolí cca 5000 hod. V druhém sloupci tabulky je patrný nárůst životnosti v hodinách při aplikaci jednotlivých modifikací. Ve třetím a čtvrtém sloupci je využitelný nárůst výkonu v absolutních a procentuálních hodnotách při shodné době životnosti 5000 hod.

	<i>Životnost při experi- mentu[hod]</i>	<i>Přepočtená životnost při 222 kW [hod]</i>	<i>Přepočtený výkon na 5 000 hodin [kW]</i>	<i>Navýšení - výkonu [%]</i>
bez modifikace	37	5 000	222	100
s úhlovou modifikací	94	32 000	256	115,3
s příčnou modifikací	104	39 000	261	117,6
s úhlovou a příčnou mod.	193	139 000	287	129,3

Tab. 1

Je patrné, že tato cesta může vést ke snížení rozměrů převodové skříně při zachování velikosti přenášeného výkonu nebo ke zvýšení přenášeného výkonu při zachování rozměrů. Na základě těchto výsledků byly modifikace zavedeny do katalogových soukolí, soukolí byla pevnostně přepočítána a výkony, které je možno převody přenášet, byly zvýšeny. Následným porovnáváním s produkty konkurenčních firem bylo zjištěno, že vlastní výrobky jsou po těchto úpravách konkurenceschopné.

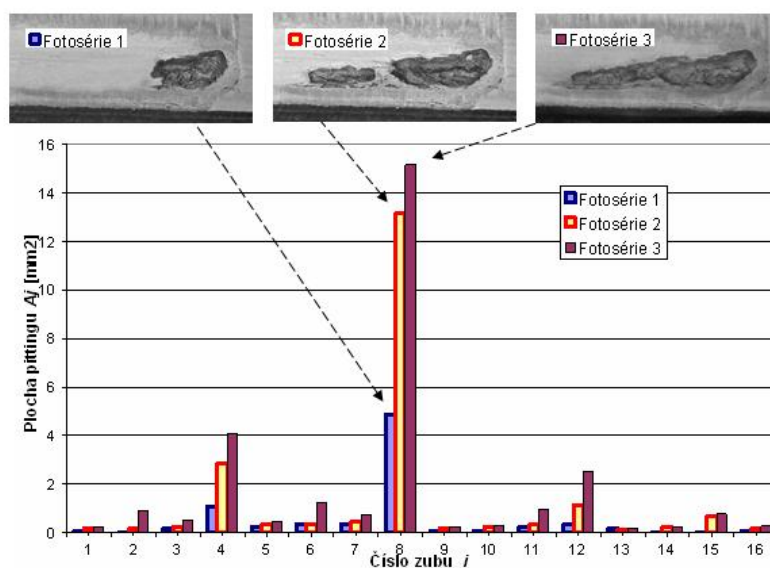
4.2 Aplikace fotografické metody vyhodnocení pittingu

Na obr. 4.1 je ukázka postupu vyhodnocení poškození boku zubu. V horní části obrázku je fotografie celého zubu a tečkovaně je ohraničena oblast záběru. Čárkovaně je ohraničen ukázkový výřez, který je pak ve zvětšení v jednotlivých krocích transformován na konečný tvar zobrazení poškozených oblastí. Ten je viditelný na dolní části obrázku, kde jsou poškozené plochy ohraničeny světlou čarou.



Obr. 4.1 Operace pro zdůraznění pittingu [2], [31], [33]

Tento postup je automaticky proveden pro všechny zuby kola a je vyhodnocena poškozená plocha jednotlivých zubů i celku. Na obr. 4.2 je zobrazen rozvoj poškození boků zubů hodnocený na základě tří fotosérií, které byly zhotoveny po sobě. V horní části obrázku je detail rozvíjejícího se poškození povrchu zubu č. 8 v jednotlivých fotosériích. Pod nimi jsou ve sloupcovém diagramu vyjádřeny velikosti poškozených ploch jednotlivých zubů.



Obr. 4.2 Diagram rozvoje poškození boků zubů [6]

Je patrné, že zub 8 je rozhodující pro hodnocení životnosti celého kola. Jednotlivé fotosérie jsou prováděny v předem daném časovém sledu, který je vázaný na průběh zkoušky. Proto je možné tento sloupcový diagram převést na diagram rozvoje pittingu na jednotlivých zubech v závislosti na čase. Tím je umožněno stanovit konec zkoušky při dosažení 4% poškození plochy kteréhokoliv zubu.

4.3 Výsledky výpočtů

Ověření výpočtové metodiky navržené pro aplikace modifikací bylo provedeno na reálné převodovce, která je součástí zkušebního stanoviště. Výhodou této volby byla okamžitá dostupnost převodovky, tj. bylo možno měřením stanovit reálnou geometrii jednotlivých dílů. Hlavní výhodou je možnost porovnávat výsledky výpočtů pomocí MKP s výsledky výpočtů prováděnými podle normy DIN, protože převodovka byla pomocí této normy navržena.

Nevýhodou bylo, že zkušební převodovka byla vyrobena pro účely experimentů ve velmi přísném technologickém režimu, takže výrobní úchytky neodpovídaly běžně dosahovaným hodnotám. Navíc jejich orientace, jak se v průběhu aplikace metody ukázalo, kompenzovala částečně změny polohy kol od deformací hřídelí. Dále bylo pro výpočet nevýhodné, že skříň byla navrhována pro zkoušky jako „dokonale“ tuhá, takže její vypočtené deformace návrh modifikací téměř neovlivnily – viz. tab. 2.

Přes to byl do vlastního výpočtu zahrnut vliv skříně, respektive její deformace a posuvy způsobené výrobní nepřesností. Dále byl zahrnut vliv vůle a deformace ložisek, a deformace hřídele. V tabulce 3 jsou jednotlivé vlivy sumarizovány. Je patrné, že vliv deformace skříně je nejmenší, přičemž negativní vliv ložisek a hřídelí je částečně kompenzován jejich výrobními úchytkami.

<i>typ úchylky</i>	<i>$f_{H\beta}$ [μm]</i>	<i>posun pastorku ve směru x [mm]</i>	<i>posun pastorku ve směru y [mm]</i>	<i>podíl jednotlivých odchylek [%]</i>
úchylka od deformace skříně	0,298	-0,0230	0,0590	-5
výrobní odchylka skříně	2,090	-0,0417	0,0504	-33
úchylka od posuvu v ložiskách	-1,303	-0,1054	0,2497	21
úchylka od deformace hřídele	-7,309	-0,0174	0,0488	117
suma všech výše uvedených úchylek	6,223	-0,1352	0,2614	100

Tab. 2

Pro ověření metody porovnáním s výpočty podle DIN byly provedeny 4 varianty výpočtů s aplikací podélné úhlové modifikace:

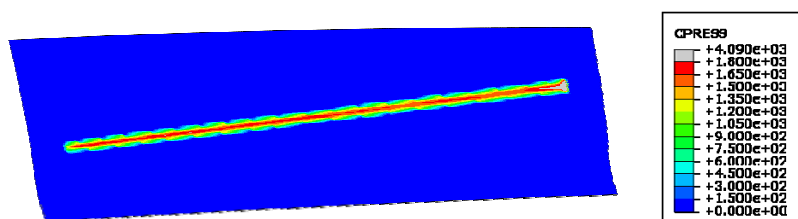
1. (označení *Ideal*), soukolí s ideálním tvarem zubů bez posunutí a natočení, tj. v ideální poloze (nemodifikované ozubení bez deformací a úchylek, jedná se o nereálný stav),
2. (označení *Def*), soukolí s ideálním tvarem s posunutím a natočením podle reálných hodnot deformací a výrobních úchylek,
3. (označení *Podel6,2*), soukolí s podélnou úhlovou modifikací na pastorku $m_b = 6,223 \mu\text{m}$ navrženou podle teorie pomocí KissSoft s posunutím a natočením podle reálných hodnot deformací a výrobních úchylek,
4. (označení *Podel15*), soukolí s podélnou úhlovou modifikací na pastorku $m_b = 15 \mu\text{m}$, která je navržena podle výpočtu MKP s posunutím a natočením podle reálných hodnot deformací a výrobních úchylek.

Jak je vidět v tab. 3 (sloupec 2, 3 a 4) výsledné hodnoty kontaktních tlaků vypočtené pomocí MKP se od hodnot vypočítaných podle normy DIN výrazně neliší.

<i>Označení výpočtu</i>	<i>Kontaktní tlak vypočtený pomocí MKP [MPa]</i>	<i>Kontaktní tlak vypočtený pomocí DIN [MPa]</i>	<i>Poměr mezi výpočty MKP a DIN [%]</i>
ideal	1780	1756	101
def	1830	1880	97
podel6,2	1760	1799	98
podel15	1725	1756	98

Tab. 3

Na obr. 4.3 je ukázka jedné výsledné mapy kontaktního tlaku na boku zubu. Tyto mapy jsou k dispozici z každého kroku výpočtu a jejich vyhodnocením jsou stanovena příslušná maxima tlaků.



Obr. 4.3 Vypočtené kontaktní tlaky na boku zubu

Ověření metody porovnáním s výpočtem podle normy DIN lze považovat za úspěšné. Další ověření metody je nutno provést na konkrétních převodovkách, které budou mít více převodových stupňů, běžnou konstrukci skříně a budou vyrobeny běžným technologickým postupem.

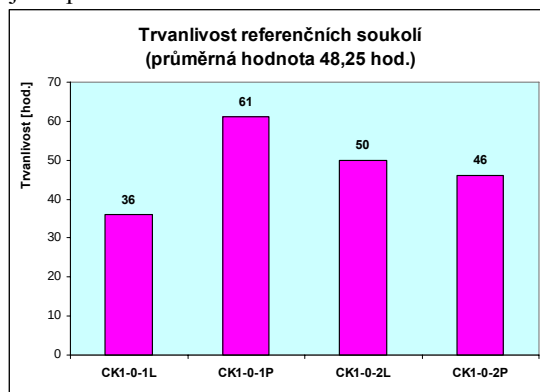
Prezentovaná metoda pro navrhování modifikací pomocí MKP, v porovnání s výpočty pomocí norem DIN, ČSN, nebo ISO nabízí širší možnosti pro dosažení vyšší únosnosti boku zubu. Tato výhoda se projeví obzvláště např. u hmotnostně optimalizovaných a tedy i poddajnějších sestav převodové skříně, nebo při méně kvalitní výrobě převodové skříně a dále u ozubení se šikmými zuby s vysokým poměrem šířky ozubení k modulu. Nutným předpokladem úspěšnosti je vysoká přesnost geometrie ozubení, která je dosažena precizní dokončovací operací výroby ozubení - broušením.

4.4 Hodnocení nekonvenčních metod zvyšování odolnosti boků zubů

V odstavci 3.4 je uvedena nekonvenční metoda zvyšování odolnosti boku zubu IBAD. Je popsána proto, že se ukazuje jako úspěšná, a proto je dále zkoumána.

Vedle této metody byla zkoušena ještě metoda HVOF, která spočívá v provedení vysokorychlostního nástřiku WC a jeho následném přebroušení diamantovým brusným kotoučem. Tuto metodu se technologicky podařilo zvládnout pouze v prvním kroku - v provedení nástřiku. Po přebroušení však došlo k zeslabení vrstvy, která se při zatížení prolamovala a byla zničena. Zkoušky s nepřebroušenými boky zubů vedly vzhledem k drsnosti nástřiku ke zničení zubů spoluzabírajícího kola.

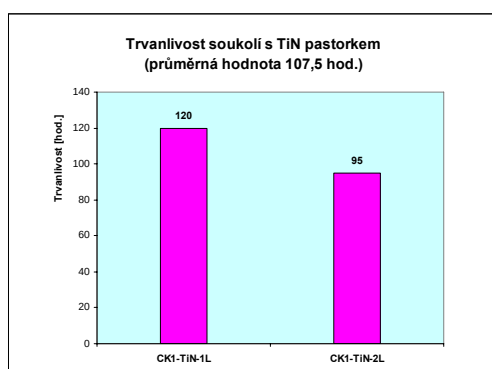
Na obr. 4.4 jsou výsledky měření prvních čtyř vzorků. Tyto vzorky z legované, cementované a kalené oceli byly navrženy pro zkrácené zkoušky na životnost 30 hod. Je zřejmé, že vzorky toto zatížení snesly a průměrná životnost je 48 hod. Měření dalších konvenčně zpracovaných vzorků bude ještě probíhat.



Obr. 4.4 Trvanlivost referenčních soukolí

Před zhodnocením výsledků získaných k datu zpracování této publikace je nutno uvést, že zvládnutí laboratorní technologie aplikace této nekonvenční vrstvy bylo nesnadným úkolem. Bylo nutno navrhnout a vyrobit vhodný přípravek pro polohování pastorků v implantátoru, optimalizovat parametry implantace. Vlivem nevhodných parametrů totiž docházelo k tepelnému poškození vzorků, což se projevilo snížením životnosti pod 30 hod. běhu ve zkrácených zkouškách.

V současné době jsou k dispozici výsledky měření dvou vzorků, u kterých je doba životnosti po nekonvenční úpravě (TiN) prokazatelně zvýšena viz. obr. 4.5. K experimentálnímu posouzení jsou již připraveny další vzorky s aplikovanou vrstvou.



Obr. 4.5 Trvanlivost soukolí s aplikací IBAD

5. Přínosy a perspektiva výzkumu

Nestandardní geometrie ozubení, které jsou umožněny novými technologiemi, jsou vhodným prostředkem pro zlepšení provozních podmínek v ozubení. Cílem konstruování ozubení s nestandardními profily (modifikacemi) je celková optimalizace provozu ozubení, která zahrnuje snížení negativních účinků (např. vibrací a hluku), ale především umožňuje zvýšení životnosti ozubení. To umožňuje přenosy daného výkonu s nasazením nižšího materiálově-technologického potenciálu. Vedle hledání „jistoty“ o správnosti provedených výpočtů přináší tento výzkum také možnosti navrhovat konstrukce s ozubenými koly na konkrétní, požadovanou dobu životnosti.

Navržené experimentální a výpočtové metody vznikaly soustavným rozvíjením v průběhu řešení vědecko-výzkumných projektů během několika let. Výsledky byly průběžně publikovány v tuzemských a zahraničních médiích. Z těchto základních publikací lze uvést práce [2], [4], [5], [7], [9], [22], [25] a [31].

Za hlavní dosažené vědecké přínosy prezentované v profesorské přednášce lze považovat:

1. Navržené experimentální a výpočtové metody umožňují systematický rozvoj know-how při návrhu ozubení.
2. Výpočtová metoda, která je prováděna ve virtuálním prostředí, je výhodná svou komplexností a variabilitou.
3. Metoda umožňuje výpočet některých úloh jak pomocí MKP tak i pomocí jiných metod, jejichž výpočtové výsledky mohou být následně snadno implementovány do prostředí MKP. To je výhodné z důvodu nákladnosti HW i SW kapacit potřebných pro MKP.
4. Experimentální metody, které se opírají o navržená zkušební stanoviště, jsou dostatečným prostředkem pro ověřování výpočtových i technologických postupů.

5. Vyvinutá fotografická metoda je rychlá, velmi přesná a opakovaně aplikovatelná.
6. Uvedené metody navíc nejsou ve svém využití omezeny pouze na problematiku ozubených kol, ale jejich využití je obecné. Sofistikovanou vzájemnou provázanost metod - virtuální realita - nekonvenční materiál - experimentální simulace - hodnocení poškození - lze využít ve všech úlohách, kde dochází k přenosu výkonu pomocí styku dvojice ploch, které se při něm vzájemně pohybují. Příkladem mohou být aplikace valivých dvojic jako jsou ložiska, přímočará valivá vedení nebo kuličkové šrouby, nebo aplikace třecích dvojic, jako jsou kluzná ložiska, přímočará kluzná vedení či pohybové šrouby.
7. Důležitým zjištěním je, že dosud provedená aplikace metody IBAD byla v laboratorních podmínkách zvládnuta a že první vzorky dokládají zvýšení životnosti zubů. K plnému vyhodnocení této metody je ovšem třeba dalších měření.

Vyvinuté metody jsou v současné době aplikovány do průmyslové praxe při vývoji převodovek pro kolejové dopravní prostředky, který aktuálně probíhá ve spolupráci firmy Wikov MGI a.s. a FS ČVUT. Vývoj je podporován projektem Ministerstva průmyslu a obchodu v programu TIP.

Nezanedbatelným přínosem i perspektivou výzkumu je důsledná, autorem vyhledávaná, realizace výzkumu v součinnosti se studenty. Do výzkumu byli zapojeni studenti magisterského [26], [29] a doktorského studia [33]. Jejich setkání s firemní praxí obohatilo jejich studium na FS o zkušenosti, které v akademickém prostředí nelze získat.

V dalším plánovaném výzkumu jsou připraveny podmínky pro zaujetí studentů v oboru strojního inženýrství tím, že budou při studiu řešeny problémy z průmyslové praxe, což je pro řadu studentů velmi atraktivní. Spolupracující firma je v této oblasti aktivní a je připravena zadávat ročníkové projekty, bakalářské i diplomové práce.

Dalším nezanedbatelným přínosem tohoto výzkumu je obousměrný transfer poznatků, tedy přenos nových metod a výsledků VaV z univerzitního prostředí do firemního a přenos praktických poznatků do pedagogiky fakulty.

Z průběhu výzkumu je možné získat i cenné poznatky pro současnou transformaci studia a hledání jeho forem a obsahů. Ve světle uvedeného výzkumu se osa studia v posloupnosti bakalář-magistr-doktor rýsuje takto: bakalář musí pochopit východiska, principy standardizovaných postupů, musí je rutinně využívat a musí umět kriticky vyhodnotit dosažené výsledky. Magistr musí být schopen na tomto základu aktivně rozvíjet postupy, plně a podrobně chápat souvislosti, v nich nacházet nové možné cesty a odvozovat paralelní možná řešení. Doktor musí ve své činnosti vyhledávat a analyzovat nejnovější poznatky vědy, rozvíjet je a vytvářet zcela nová, nekonvenční, řešení.

V současné době je zatím nehodnoceným přínosem tohoto výzkumu navázaná dlouhodobá spolupráce fakulty s poměrně silným průmyslovým subjektem. Ten má především zájem o podporu svého vývoje, což je pro fakultu bezprostředně výhodné odborně i ekonomicky. Druhotně je potenciálním zákazníkem fakulty jako zaměstnavatel absolventů a to může v budoucnosti hrát pro existenci technického vysokého školství roli klíčovou.

Literatura:

- [1] Dynybyl, V.: Universitní experimentální základna pro výzkum pohonů a její aplikace na rotační převodové mechanismy, habilitační práce, ČVUT v Praze 2004.
- [2] Dynybyl, V., Žák, P.: Innovative Analysis and Documentation of Gear Test Results, Geartechnology, 2008, vol.4, pp. 64-70
- [3] Dynybyl, V., Češpíro, Z., Kanaval, J., Mossóczy, P.: Výkonová metrologie - experimentální podpora vývoje a inovací mechanismů ve strojírenství. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2009.
- [4] Dynybyl, V. - Dočekal, A. - Žák, P.: Experimental Research of Gearwheels Behaviour. Acta Mechanica Slovaca. 2006, vol. 10, no. 4-B/2006, s. 119-124. ISSN 1335-2393.
- [5] Dynybyl, V. - Petr, K. - Žák, P.: Optimizing of Geometrical Shape of the Gears with Help of FEM using the Longitudinal and Transversal Modifications. Acta Mechanica Slovaca. 2008, vol. 7, no. 3-C/2008, p. 133-138. ISSN 1335-2393.
- [6] Dynybyl, V.: Evaluation of Machine Drives Using Simulation and Experiment. In: 19th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics-Abstracts. Warsaw : Warsaw University of Technology, 2002, p. 30-31.
- [7] Dynybyl, V.: Experimental Analysis of force and Rotation Effects Used for Prediction of Gearbox's Wear. In: Abstracts of 20 th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. Gyor : Széchenyi István University of Applied Sciences, 2003, p. 152-153. ISBN 963-9058-20-3.
- [8] Dynybyl, V. - Češpíro, Z. - Mossóczy, P.: Energy Analyses of Bevel Gearbox. In 23rd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. Žilina: University of Žilina, 2006, p. 95-96. ISBN 80-8070-589-5.
- [9] Dynybyl, V. - Mossóczy, P. - Žák, P.: Automatic Simulating System of Gearbox Service Load. In XVII-th International Conference on Electrical Machines [CD-ROM]. Athens: National Technical University, 2006, p. 481-484.
- [10] Dynybyl, V. - Mossóczy, P.: Energetická analýza převodových mechanismů s podporou virtuální instrumentace. In: Sborník referátů. Praha : ČVUT, Fakulta strojní, 2003, s. 50-53. ISBN 80-01-02788-0.
- [11] Dynybyl, V.: Stavebnicové měřicí stanoviště pro hodnocení transformačních členů pohonů. In: 43. Medzinárodná vedecká konferencia katedier častí a mechanizmov strojov. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2002, s. 110-112. ISBN 80-228-1174-2.
- [12] Dynybyl, V. - Chyský, J.: Simulace zatěžování prvků rotačních pohonů řízením asynchronních elektromotorů. In: 43. Medzinárodná vedecká

- konferencia kateder částí a mechanismů strojů. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2002, s. 113-115. ISBN 80-228-1174-2.
- [13] Dynybyl, V. - Jančík, L. - Mossóczy, P.: Experimentální hodnocení kuželové převodovky. In 47. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů, sborník prací. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2006, s. 130-133. ISBN 80-213-1523-7.
- [14] Dynybyl, V. - Mossóczy, P.: Simulace proměnlivých zatěžovacích cyklů rotačních mechanismů pomocí hydraulických obvodů. In Sborník XLVI. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů. Liberec: Technická univerzita, 2005, s. 52-55. ISBN 80-7083-951-1.
- [15] Dynybyl, V. - Petr, K. - Žák, P.: Optimalizace tvaru geometrie ozubených kol za pomoci MKP použitím podélných a příčných modifikací. In 49. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů-sborník. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, díl 1, s. 55-58. ISBN 978-80-7043-718-6.
- [16] Dynybyl, V. - Jirman, P. - Kanaval, J. - Žák, P., Kontrolní výpočty konečné verze zkušebního zařízení, [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 2006. 09/2006/FT-TA2/017. 16 s.
- [17] Dynybyl, V. - Žák, P. - Jirman, P. - Jansa, T., Zkušebního stanoviště pro zkrácené životnostní zkoušky ozubených kol, [Prototyp, poloprovoz, ověřená technologie]. Vlastník: Wikov MGI, 2006.
- [18] Dynybyl, V. - Jansa, T. - Jirman, P. - Žák, P., Návrh mechanicky uzavřeného okruhu pro zkoušky ozubených kol, [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT FS, Ústav výrobních strojů a mechanismů, 2005. 01/2005/FT-TA2/017. 17 s.
- [19] Dynybyl, V. - Španiel, M. - Žák, P., Využití moderních výpočtových SW v technické přípravě výroby ozubených kol s modifikacemi a různým tvarem přechodové křivky, [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT FS, Ústav výrobních strojů a mechanismů, 2005. 05/2005/FT-TA2/017. 14 s.
- [20] Dynybyl, V. - Jirman, P. - Kanaval, J. - Žák, P.: Kontrolní výpočty konečné verze zkušebního zařízení. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 2006. 09/2006/FT-TA2/017. 16 s
- [21] Dynybyl, V. - Kanaval, J.: Zkoušky ozubených kol se zvýšenou odolností boku zubu. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2009. 20/2009/FT - TA2/017. 38 s.
- [22] Dočekal, A. - Dynybyl, V. - Kreidl, M. - Šmíd, R. - Žák, P.: Localization of the Best Measuring Point for Gearwheel Behaviour Testing Using Group of Adaptive Model's Evolution. Measurement Science Review [online]. 2008, vol. 8, no. 2, p. 42-45. Internet: <http://www.measurement.sk/2008/S1/p.html>. ISSN 1335-8871.

- [23] Jirman, P. – Žák, P., Konstrukce zkušební a doplňkové převodovky, [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT FS, Ústav výrobních strojů a mechanismů, 2005. 02/2005/FT-TA2/017. 34 s.
- [24] Kanaval, J. - Uhlíř, R.: Nekonenční metody zvyšování odolnosti boku zubu proti únavovému zatížení. In 49. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů-sborník. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, díl 1, s. 125-128. ISBN 978-80-7043-718-6.
- [25] Kanaval, J. - Mossóczy, P. - Uhlíř, R. - Petr, K.: Time Shortening Testing Methodology Applied on Gears with Non-Standard Tooth Flank Surface. In 26th Symposium on Advances in Experimental Mechanics. Leoben: Montanuniversitat Leoben, 2009, vol. 1, p. 97-98. ISBN 978-3-902544-02-5.
- [26] Leden, T.: Projekt zkušebního stanoviště pro zkoušky životnosti ozubených kol. Nedokončená diplomová práce, Praha 2006.
- [27] Moravec, V.: Konstrukce strojů a zařízení II. Ozubená kola. Montanex a.s, 2001.
- [28] Petr, K. - Žák, P. - Dynybyl, V. - Kanaval, J.: FEM Optimization of Gear Flank's Shape Modifications. In Proceedings of the 3rd International conference Power Transmissions '09. Thessaloniki: Sofia Publications, 2009, vol. 1, p. 93-100. ISBN 978-960-243-662-2.
- [29] Šefl, M.: Experimentální podpora výzkumu pittingu ozubených kol. Diplomová práce, vedoucí Ing. Pavel Mossóczy, FS ČVUT v Praze, Praha 2007.
- [30] Tischler, D.: Optimalizace povlaku CrN vysokoenergetickou modifikací technologie IBAD. Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav fyziky, 2005.
- [31] Žák, P. - Dynybyl, V.: Design and Testing of Gears with Non-Standard Profile. In 2007 Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition [CD-ROM]. New York: American Society Of Mechanical Engineers - ASME, 2007, vol. 1, ISBN 0-7918-3812-9.
- [32] Žák, P. – Starý, F. – Dynybyl, V., Software pro vyhodnocení pittingu, [Softwarový produkt].
- [33] Žák, P.: Příspěvek k navrhování modifikací geometrie ozubených válcových kol. Disertační práce. Praha 2009.
- [34] Žák, P. - Dynybyl, V.: Spur Gear Tests – Surface Fatigue. Materials Engineering. 2007, vol. XIV, no. 3/2007, s. 81-86. ISSN 1335-0803.
- [35] Firemní dokumentace WIKOV MGI a.s.

**Tento výzkum byl podpořen těmito projekty: MPO FT-TA 2/017,
GAČR 101/06/1427a firmou WIKOV MGI a.s. .**

Doc. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D.

Vojtěch Dynybyl (*1963 v Praze) studoval na Fakultě strojní, ČVUT Praha, mezioborové studium „Automatizace a robotizace technologických procesů“. Studium ukončil v roce 1987.

V letech 1987 – 91 působil jako samostatný konstruktér ve vývojové základně Elektromontážních závodů Praha, kde byl samostatným řešitelem dvou větších konstrukčních projektů: automatizované pracoviště se svařovacím robotem ESAB a malý dílenský lis 25t.

V roce 1991 získal místo odborného asistenta Katedry částí a mechanismů strojů, Fakulty strojní, ČVUT Praha. Doktorské studium ukončil 15. 12. 2000 obhajobou disertační práci na téma: „Posouzení napjatosti pružného kola harmonického ozubeného převodu komparační metodou“. V roce 2004 obhájil habilitační práci nazvanou „Universitní experimentální základna pro výzkum pohonů a její aplikace na rotační převodové mechanismy“ a byl 1. 2. 2005 jmenován docentem pro obor „Konstrukční a procesní inženýrství“.

Na FS působil a působí v těchto vedoucích funkcích: vedoucí Odboru částí a mechanismů strojů, zástupce vedoucího Ústavu výrobních strojů a mechanismů, vedoucí Ústavu konstruování a částí strojů.

V letech 1991-1999 byl řešitelem nebo spoluřešitelem pěti interních grantů ČVUT, od roku 1999 se podílel na řešení Výzkumného záměru MSM 212200008 – „Rozvoj metod a prostředků integrovaného strojního inženýrství“, kde byl od roku 2001 vedoucím jednoho dílčího projektu. V letech 2001 až 2003 se podílel na řešení pedagogického projektu EU s názvem „E-dilema“, Minerva Project no. 90683-CP-1-200 v rámci programu Sokrates. Projekt se zabýval problematikou e-learningu. Dále byl v letech 2005-2007 řešitelem grantu GAČR 101/2173/05 „Optimalizace parametrů strojních mechanismů aktivním využitím negativních tepelných účinků“. Jeho zaměření na výzkum a vývoj pro průmysl se odráží v řešení 4 projektů MPO, kde byl nebo v současnosti je za FS ČVUT hlavním řešitelem: FT-TA 2/017 „Experimentální ověření parametrů ozubených kol s moderními tvary zubů z vysoce únosných materiálů a různé výrobní přesnosti včetně monitorování průběhu zkoušek“, FT-TA 3/085 „Stavebnicový pásový dopravník“, FR TI1/119 „Samonakládací nízkoplošinový návěs“, FR TI1/488 „Vývoj hnacích nápravových převodovek pro tramvaje a příměstské vlaky“. Vedle toho byl řešitelem nebo spoluřešitelem celé řady průmyslových zakázek.

Publikoval více než 150 příspěvků v časopisech a na konferencích a výzkumných zpráv. Je vedoucím autorem monografie. V oblasti pedagogické byl řešitelem dvou projektů FRVŠ a je autorem projektu „Moderní konstruování na Fakultě strojní ČVUT“, které je v současné době zaváděno do výuky na této fakultě.