ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

Diplomová práce

Možnosti bezkontaktních snímacích systémů při kontrole ozubení

Autor práce: **Bc. Jan Šafka**

Vedoucí práce: **Ing. Petr Mikeš, Ph.D.**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Praha 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šafka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **467290**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Výrobní inženýrství**

Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Možnosti bezkontaktních snímacích systémů při kontrole ozubení

Název diplomové práce anglicky:

Possibilities of non-contact probe systems for gear inspection

Pokyny pro vypracování:

1. Typy ozubených převodů a technologie jejich výroby.
2. Charakteristiky vyhodnocované na ozubení.
3. Možnosti kontroly ozubení.
4. Porovnání přesnosti vybraných technologií pro kontrolu ozubení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.10.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Petr Mikeš, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání _____ Podpis studenta _____

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

„Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.“

Praha …….. ……

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za jeho cenné rady, čas a pomoc, které mi věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Šimotovi za ochotu, rady a pomoc při měření a vyhodnocení.

Anotace

Tato diplomová práce se v první části zabývá problematikou ozubených kol, možnostmi jejich výroby, charakteristikami vyhodnocovaných na ozubení podle normy ČSN ISO 1328 a možnostmi kontroly ozubení. Ve druhé části se práce věnuje porovnání měření ozubených kol pomocí vybraných bezkontaktních snímacích systémů – pruhové projekce a výpočetní tomografie. Jako reference je použito měření pomocí univerzálního portálového souřadnicového měřícího stroje. Porovnání bylo provedeno na měřeních tří ozubených kol s přímým ozubením vyrobených z oceli, hliníkové slitiny a plastu se skleněnými vlákny. V závěru práce jsou shrnuty výsledky porovnání vybraných charakteristik ozubení.

Klíčová slova: kontrola ozubených kol, charakteristiky vyhodnocované na ozubení, souřadnicový měřící stroj, SMS, pruhová projekce, výpočetní tomografie, CT

Annotation

This diploma thesis in the first part deals with issue of gears, gear manufacturing, gear inspection characteristics according to ČSN ISO 1328 standard and gear inspection options. The second part is devoted to comparison of gear inspection with non-contact scanning methods – line scanner and computed tomography. As a reference is used inspection on universal bridge coordinate measuring machine. For comparison are used inspections of three gears which are made of different materials – steel, aluminum and plastic with glass fiber. The conclusion summarizes comparison of inspection results on selected characteristics.

Key words: gear inspection, gear inspection characteristics, coordinate measuring machines, CMM, line scanner, computed tomography, CT

Obsah

1 Úvod 9
2 Ozubení 10
2.1 Použití ozubení 10
2.2 Převodové mechanismy 10
2.3 Převody ozubenými koly 11
2.4 Rozdělení ozubených převodů 12
2.5 Křivky tvaru profilů 12
2.6 Základní rozměrové parametry ozubení 13
2.7 Typy ozubených převodů podle vzájemné polohy os 15
2.7.1 Soukolí s rovnoběžnými osami 15
2.7.2 Soukolí s různoběžnými osami 18
2.7.3 Soukolí s mimoběžnými osami 19
3 Technologie výroby ozubených kol 20
3.1 Obrábění ozubených kol 20
3.1.1 Frézování čelních kol a ozubených hřebenů 20
3.1.2 Obrážení čelních ozubených kol 22
3.2 Tváření ozubení 23
3.3 Výroba práškovou metalurgií 23
3.4 Dokončovací operace ozubených čelních kol 23
3.4.1 Ševingování 23
3.4.2 Broušení ozubení 24
3.4.3 Lapování a zaběhávání 25
4 Charakteristiky vyhodnocované na ozubení 26
4.1 Profil boku zubů 27
4.2 Sklon zubů 28
4.3 Modifikace geometrie zubu 30
4.4 Rozteč zubů 31
4.4.1 Radiální kinematické úchylky 32
4.4.2 Obvodové házení 32
4.5 Rozměrové charakteristiky 33
4.5.1 Rozměr přes zuby 33
4.5.2 Průměr kola přes válečky 33
4.5.3 Tloušťka zubu 34
4.6 ISO soustava přesnosti čelních ozubených kol 34

4.7 Pravidla a parametry pro měření ... 36
5 Možnosti kontroly ozubení ... 38
5.1 Jednoboký a dvouboký odval ... 38
5.1.1 Kontrola dvoubokým odvalem ... 39
5.1.2 Kontrola jednobokým odvalem ... 39
5.2 Univerzální souřadnicové měřící stroje ... 39
5.2.1 Snímací systémy CMM ... 40
5.2.2 Kontrola ozubení pomocí univerzálních CMM ... 41
5.3 Jednoúčelové souřadnicové měřící stroje ... 42
5.4 Laser scanner ... 44
5.5 Pruhová projekce ... 46
5.6 Výpočetní tomografie ... 47
6 Porovnání přesnosti vybraných technologií pro kontrolu ozubení ... 49
6.1 Skenování ozubených kol ... 50
6.1.1 Pruhová projekce ... 50
6.1.2 Výpočetní tomografie ... 54
6.2 Měření na CMM ... 56
6.3 Vyhodnocení měření bezkontaktních snímacích systémů ... 61
6.4 Porovnání výsledků měření ... 63
Porovnání hodnot naměřených úchylek ... 64
6.4.1 Porovnání diagramů měření profilu a sklonu zubu ... 68
6.4.2 Rozdíly diagramů v rámci jednoho měření ... 70
6.5 Shrnutí a diskuse skenování a výsledků porovnání bezkontaktních snímacích systémů ... 73
7 Závěr ... 76
8 Seznam použité literatury a zdrojů ... 78
9 Seznam obrázků a tabulek a příloh ... 83

1 Úvod

Ozubení má ve strojírenství široké využití. Nejčastěji se používá u ozubených převodů. Prvek ozubení má poměrně složitou geometrii. Ta musí zaručit maximální účinnost mechanického převodu a jeho hladký chod. Na tyto vlastnosti má vliv správné navržení soukolí, přesnost výroby a kontrola kvality.

Kontrola ozubení, stejně jako jeho výroba, je poměrně složitý proces. Způsob kontroly se odvíjí od jeho rozměrů, požadavků na přesnost nebo požadavků na rychlost kontroly.

Moderní způsoby měření zjišťují souřadnice bodů součásti. Z jejich polohy jsou pak vyhodnocovány charakteristiky, podle kterých se hodnotí přesnost rozměrů.

Pro kontroly ozubení se v dnešní době nejčastěji používají souřadnicové měřící stroje. Ty využívají dotykový snímací systém, který extrahuje body dotykem snímače na povrchu zubů. Měření probíhá po křivkách, na kterých je charakteristika vyhodnocována.

Bezkontaktní snímací systémy jako Laserscanner, pruhová projekce, fotogrametrie nebo výpočetní tomografie jsou schopné extrahovat řádově stovky tisíc bodů ve velmi krátkém časovém úseku. Výstupem je mrak bodů, který představuje tvar reálné součásti. Tato data mohou být dále zpracována do formátů běžně používaných u CAD technologií. Ve vyhodnocovacím softwaru jsou pak tato data načtena a charakteristiky vyhodnoceny.

Měření bezkontaktními systémy ovšem může zkreslovat výsledky v důsledku fyzikálních principů jejich funkce nebo vlivem softwarového zpracování mraku bodů.

Tato práce se věnuje problematice ozubení (popis, parametry, typy), technologiím výroby, možnostem kontroly, vyhodnocovaným charakteristikám a porovnání přesnosti vybraných technologií pro kontrolu ozubení. Podrobněji se zabývá porovnáním měření ozubení pomocí souřadnicového měřícího stroje s dotykovým systémem a měření pomocí bezkontaktních snímacích systémů – pruhové projekce a výpočetní tomografie.

Cílem je ověřit možnosti pruhové projekce a výpočetní tomografie pro účely kontroly ozubení podle normy ČSN ISO 1328. Porovnání je provedeno na strojích používaných v Měrovém středisku Fakulty strojní ČVUT.

2 Ozubení

2.1 Použití ozubení

Ozubení jako prvek je využíván u převodových mechanismů k přenosu točivého momentu mezi dvěma hřídeli, u drážkování k přenosu kroutícího momentu mezi nábojem a hřídelem nebo u zubových čerpadel pro čerpání kapaliny pomocí dvou ozubených kol.

Obrázek 1 Ozubený převod, drážkování, zubové čerpadlo [1] [2] [3]

2.2 Převodové mechanismy

Převodové mechanismy obecně slouží k přenosu mechanické energie. Současně je možné transformovat mechanický výkon. Převážně se jedná o převod rotační, mění se úhlová rychlost a kroutící moment.

Většina strojů a strojních zařízení je koncipována tak, že převodový mechanismus spojuje motor s pracovním strojem. Otáčky motoru bývají vyšší než požadované otáčky pro pracovní stroj. Převodové mechanismy pak slouží ke snížení (redukci) otáček a zvýšení kroutícího momentu – plní tak funkci reduktoru. Opakem je méně častý převodový mechanismus dorychla (akcelerace) - jedná se pak o akcelerátor.

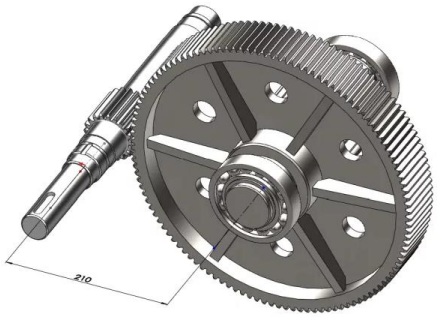
Obrázek 2 Dvoustupňová převodovka [4]

Některé stroje potřebují měnit otáčky v širokém rozpětí, které nejde pokrýt změnou otáček motoru. Např. vřeteno soustruhu, kde je nutné měnit otáčky pro dosažení vhodné řezné rychlosti pro různé obráběcí operace – hrubování, dokončování nebo různé průměry obrobku. V těchto případech se používají vícestupňové převodovky a variátory.

Převodové mechanismy se mohou uplatňovat také ke změně otáčivého pohybu na pohyb přímočarý nebo pro změnu smyslu otáčení (reverzaci). Změna otáčivého pohybu na přímočarý je například použita u pohybů suportů soustruhů nebo pro pohyb stolu u rovinných brusek. [5]

2.3 Převody ozubenými koly

Ozubené převody jsou nejvýznamnějším a nejrozšířenějším druhem převodových mechanismů. Dvojice ozubených kol se nazývá soukolí a je tvořeno hnacím a hnaným kolem. Menší kolo se nazývá pastorek, větší pouze kolo. Úkolem soukolí je vytvoření silové a kinematické vazby pro požadovanou transformaci úhlové rychlosti a kroutícího momentu, zároveň má zaručit co nejvyšší mechanickou účinnost.



Obrázek 3 Ozubené soukolí [4]

Transformace otáčivého pohybu je charakterizována převodovým poměrem i. Ten je definován jako poměr úhlové rychlosti pastorku a kola.

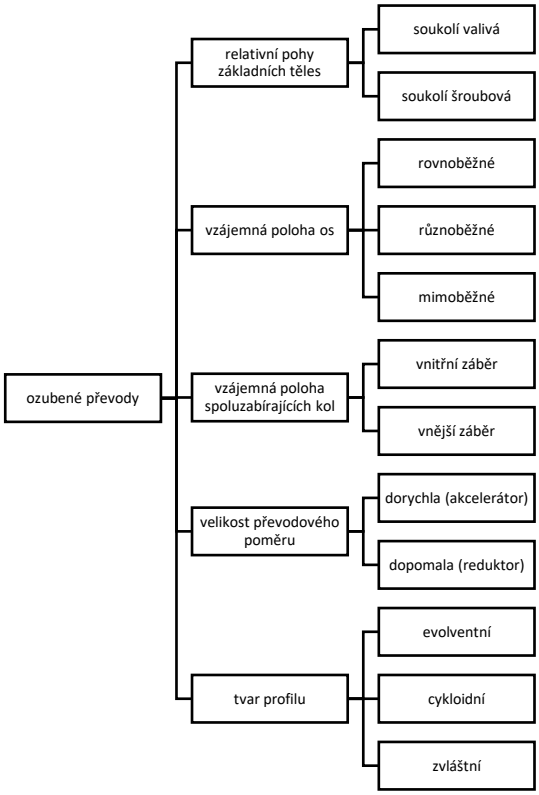
$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Výhodami ozubených převodů jsou: kompaktnost, dobrá spolehlivost a životnost, dobrá mechanická účinnost, přesnost dodržení převodového poměru, schopnost přenosu velkých výkonů, možnost dosažení vysokých převodových poměrů, poměrně malá náročnost na údržbu a možnost krátkodobé přetížitelnosti.

Nevýhodami ozubených převodů jsou složitější a dražší výroba a nemožnost dosažení libovolného převodového poměru. Pokud nejsou správně vyrobeny, dochází ke chvění a hlučnosti při provozu. [5]

2.4 Rozdělení ozubených převodů

Ozubené převody lze dělit podle několika hledisek: podle relativního pohybu základních těles, vzájemné polohy os, polohy spoluzabírajících kol, velikosti obvodové rychlosti, tvaru profilu a převodového poměru. [5]

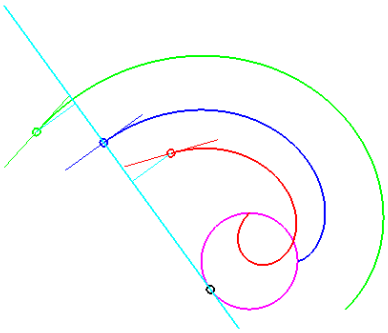


Obrázek 4 Rozdělení ozubených převodů

2.5 Křivky tvaru profilů

Profily boků zubů mají tvar křivek, které vznikají odvalováním. Nejčastější je použití evolventy, ve speciálních případech může být použita cykloida (např. hodinářské převody s velmi tenkými koly).

Evolventa je rovinná křivka, která vznikne odvalováním přímky po kružnici (evolutě). Tvořící bod je pevně spojený s odvalující se přímkou. [5] [6]



Obrázek 5 Evolventa [7]

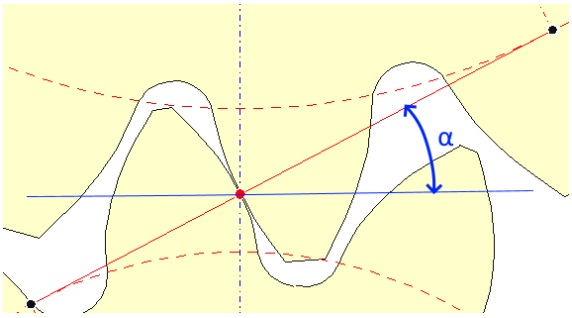
Cykloida je rovinná křivka, která vznikne odvalováním dvou kružnic (kotálení). Tvořící bod je pevně spojený s odvalující se kružnicí.

Speciálním případem cykloidy je kružnice odvalována po přímce (po kružnici s nekonečným poloměrem). [8]

2.6 Základní rozměrové parametry ozubení

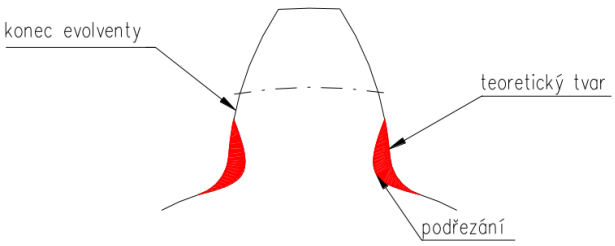
Základním charakteristickým parametrem je modul ozubení. Tento rozměr je udáván v milimetrech a odvíjejí se od něj ostatní rozměry ozubení. Volené hodnoty modulu jsou normalizovány podle ČSN 01 4608.

V místě dotyku spoluzabírajících kol mají boky zubů ve tvaru evolventy společný bod, tečnu a normálu. Úhel α, který svírá normála dotyku a tečna ozubeného kola, se nazývá úhel záběru. V průběhu otáčení kola zůstává tento úhel stále stejný. Pro ozubené převody se používá úhel záběru 20° pro evolventní drážkování 30°.



Obrázek 6 Úhel záběru [9]

Počet zubů ozubeného kola z je omezen mezní hodnotou. Pokud má ozubené kolo příliš málo zubů, může dojít při výrobě k uříznutí části evolventy paty sousedního zubu. Tento jev se nazývá podřezání zubu. Pokud nemá dojít k podřezání, nesmí být pro úhel záběru 20° počet zubů menší než 17. Podřezání zubu je nežádoucí, protože oslabuje zub v místě největšího ohybového zatížení. [10]



Obrázek 7 Podřezání zubu [10]

Rozteč udává vzdálenost dvou odpovídajících bodů na sousedních zubech. Rozteč je součet tloušťky zubu a šířky mezery. Tyto parametry jsou délky oblouků na roztečné kružnici vytyčené bočními profily zubů. [5]

Roztečná kružnice je určujícím rozměrem každého ozubení. Roztečné kružnice spoluzabírajících kol se dotýkají a určují tak osovou vzdálenost kol. Její průměr d je určen modulem m a počtem zubů z. [5] [11]

$$d = m \cdot z$$

Hlavová kružnice omezuje vnější profil ozubeného věnce. Průměr hlavové kružnice d_a je dán roztečnou kružnicí a výškou hlavy zubu h_a. Výška hlavy zubu je rovna modulu ozubení. [5] [11]

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = d + 2 \cdot m$$

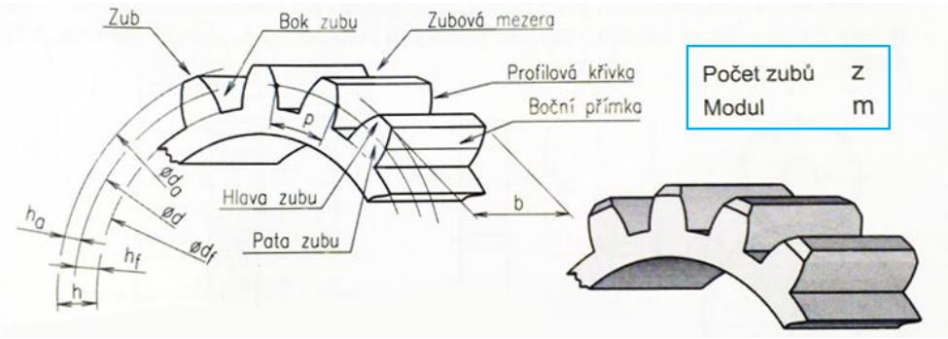
Patní kružnice omezuje vnitřní profil ozubeného věnce. Průměr patní kružnice d_f je dán výškou paty zubu. Výška paty zubu h_f je dána modulem ozubení. [5] [11]

$$h_f = 1{,}25 \cdot m$$

$$d_f = d - 2 \cdot h_f = d - 2{,}5 \cdot m$$

Výška zubu h je součet výšky paty a hlavy zubu. [11]

$$h = h_a + h_f = 2{,}25 \cdot m$$

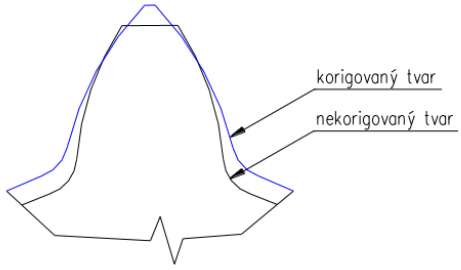


Obrázek 8 Parametry ozubení [12]

Korekce ozubení se provádí za účelem zamezení podřezání zubu. U korigovaného ozubení je úmyslně posunuta hlava a pata zubu, průměr roztečné kružnice ovšem zůstává zachován. Průměr hlavové a patní kružnice se změní. Korekce se současně provádí u obou spoluzabírajících kol. U jednoho kola se průměry patní a hlavové kružnice zvětší, u druhého se zmenší. Hodnota posunutí je vypočtena z modulu ozubení a jednotkového posunutí x.

$$korekce = m \cdot x$$

Korekcí je také možné změnit osovou vzdálenost spoluzabírajících kol. [10]



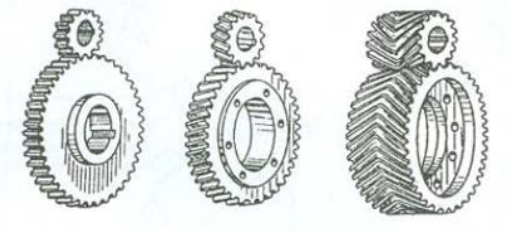
Obrázek 9 Korekce ozubení [10]

2.7 Typy ozubených převodů podle vzájemné polohy os

Vzájemná poloha os hřídelů je dána polohou vstupního a výstupního hřídele, konstrukcí převodové skříně nebo požadavkem na velký převodový poměr (např. u šnekových převodovek).

2.7.1 Soukolí s rovnoběžnými osami

Soukolí s rovnoběžnými osami se nazývá čelní ozubení. Pro čelní ozubení se používají přímé, šikmé nebo šípové zuby. Jedná se o nejčastější konfiguraci soukolí. Používá se např. u převodovek automobilů a výrobních strojů. [5]



Obrázek 10 Soukolí s rovnoběžnými osami [13]

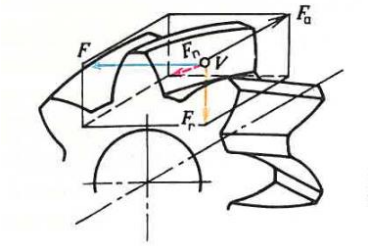
Mezi soukolí s rovnoběžnými osami se řadí také převod s ozubeným hřebenem a vnitřní ozubení. Převod s ozubeným hřebenem transformuje otáčivý pohyb na lineární a využívá se např. pro pohon suportů a stolů obráběcích strojů. Převody s vnitřním ozubením se používají u planetových převodovek.

Obrázek 11 Převod s vnitřním ozubením a ozubeným hřebenem [13]

Soukolí s přímými zuby jsou nejčastěji používaným typem a jsou výrobně nejjednodušší. Výhodou je, že v ozubení nevzniká axiální síla. Nevýhodou však je, že v průběhu otáčení kola jde zub do záběru celý a dochází k okamžitému zatížení. Tím se vytvářejí rázy, které mohou způsobit větší zatížení jednotlivých zubů a vyšší hlučnost soukolí. Běžný rozsah převodových poměrů je 1:1 až 6:1. [5] [14] [14]

Obrázek 12 Čelní ozubené soukolí s přímým ozubením [14]

Soukolí se šikmými zuby se přesněji nazývají kola se šroubovými zuby. Oproti kolům s přímým ozubením tvoří hlavní část boční plochy přímková šroubová evolventní plocha. Šikmé ozubení je specifikováno úhlem sklonu zubů β. V důsledku tohoto sklonění oproti přímému ozubení je navíc vyvolána axiální síla F_a, na kterou je nutné brát ohled při návrhu převodovkové skříně a volbě ložisek. Úhel sklonu zubů bývá v rozsahu 15° až 30°. [5] [14]



Obrázek 13 Prostorové rozložení sil na kole se šikmými zuby [15]

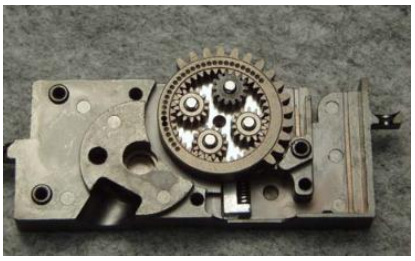
V důsledku sklonění zubů je chod ozubení plynulý, tišší a klidnější. Jednotlivé zuby jsou rovnoměrněji zatíženy, tím se snižují vnitřní dynamické síly a je umožněno dokonalejší využití materiálu kol. Pomocí šikmého ozubení lze přenášet větší výkony než u kol s přímým ozubením s porovnatelnými rozměry a materiálem. Běžný rozsah převodových poměrů je 3:2 až 10:1. [5] [14]

Obrázek 14 Čelní ozubené soukolí se šikmými zuby [16]

Soukolí se šípovými zuby využívají dvojité sklonění zubů. Obě ozubení jsou stejně velká, ale opačně skloněná. Díky tomu vznikají dvě opačné axiální síly, které se navzájem vyruší a nedochází tak k namáhání uložení v axiálním směru. [17] [15]

Kola se šípovým ozubením se používají buď jako dvě spojená kola se šikmým ozubením s opačným sklonem zubů nebo jako jedno monolitní kolo, které je ale náročné na výrobu. Používají se pouze v aplikacích pro velké výkony a malé otáčky. Směr šípu musí směřovat do smyslu otáčení kol. [17] [15]

Soukolí s vnitřním ozubením se skládá z ozubeného kola s vnitřním ozubením a pastorku s vnějším ozubením. V porovnání s vnějším ozubením má lepší skluzové poměry, menší tlaky v ozubení, menší ztráty třením a větší trvanlivost. Vnitřní ozubení se využívá u planetových převodovek, které umožňují lepší využití prostoru a ucelenější konstrukci. [5]



Obrázek 15 Planetová převodovka [18]

Soukolí s ozubeným hřebenem je speciálním případem ozubení, kdy je průměr kola nekonečný. Používá se k transformaci rotačního pohybu na lineární. Pokud jsou v systému použity dva rovnoběžné hřebeny na jeden pastorek (nahoře a dole) je možné otáčením pastorku transformovat rotační pohyb na dva opačně orientované lineární pohyby.

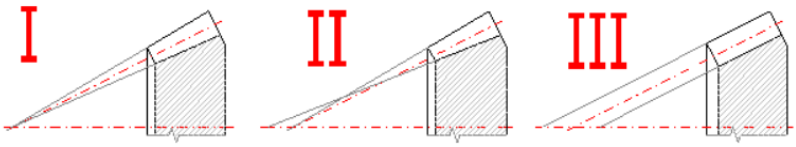
2.7.2 Soukolí s různoběžnými osami

Obrázek 16 Soukolí s různoběžnými osami [13]

Soukolí s různoběžnými osami se také nazývají kuželová. Nejčastěji svírají osy otáčení úhel 90°. Kuželové ozubení se podle tvaru zubů dělí na přímé, šikmé a zakřivené.

Oproti válcovým soukolím je nutné dodržet kromě délkových úchylek také úchylky úhlové. Kuželové ozubení je vhodné pro méně náročné převody s nižším zatížením a nižšími rychlostmi.

Základem geometrie jsou kuželové plochy. Geometrii soukolí tvoří tři kuželové plochy. Podle vzájemné polohy jejich vrcholů je možné rozlišit tři tvary ozubeného věnce. [5]



Obrázek 17 Tvary kuželových kol I, II, III [19]

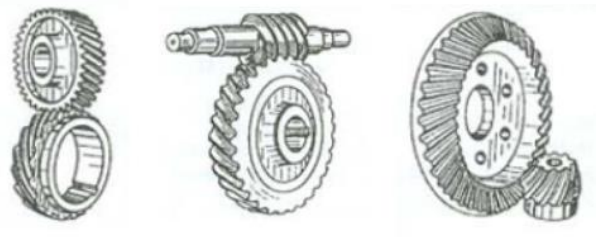
Pro tvar I mají kuželové plochy společný vrchol. U tvaru II je vrchol roztečného a hlavového válce společný. Vrchol patního kužele je posunut tak, aby šířka zubové mezery byla konstantní. Tvar III má posunuté vrcholy kuželů tak, aby površky byly rovnoběžné. Tím je dosažena konstantní výška zubu. [19]

Soukolí kuželová s přímým ozubením mají obvykle tvar I a jsou základním typem kuželových kol. Mají nižší účinnost, vyšší hlučnost a jsou nevhodná pro aplikace s vyššími obvodovými rychlostmi. [5] [20]

Obrázek 18 Kuželové soukolí s přímým ozubením [14]

Kuželová soukolí se zakřivenými (nepřímými) zuby mají vyšší účinnost. Používají se pro přenos velkých kroutících momentů a vyšších obvodových rychlostí. Podle tvaru zakřivení je možné rozdělit kola s nepřímým ozubením na kola se zuby kruhovými, paloidními, eloidními a spirálními. [5] [20]

2.7.3 Soukolí s mimoběžnými osami



Obrázek 19 Soukolí s mimoběžnými osami [13]

Soukolí s mimoběžnými osami otáčení se dělí na válcová šroubová, šneková a hypoidní. Oproti válcovým a kuželovým soukolím se boky zubů po sobě smýkají a v důsledku tření mají nižší účinnost. Je nutné dostatečné mazání, aby nedošlo k přehřátí. Šroubová soukolí jsou vhodná pro vysoké převodové poměry. Výhodou je velmi tichý chod a samosvornost převodu. Vzájemná poloha os je určena nejkratší příčkou. [5] [21]

Soukolí válcová šroubová vychází z válcových šroubových ozubení a jsou v podstatě dvě evolventní válcová kola se šikmými zuby s velkým úhlem sklonu. [5]

Soukolí šneková mají teoretický základ v hyperboloidním soukolí. Jedná se o specifický druh převodu, umožňující velký převodový poměr. Soukolí tvoří ozubené kolo a pastorek ve tvaru zvláštní šroubovice – tzv. šnek. Šroubovice šneku je nejčastěji jednochodá. Vzhledem k velkému převodovému poměru a tření šneku je nutné volit vhodnou kombinaci materiálu kola a šneku. Pro šnek se používá uhlíková nebo legovaná ocel. Materiál kola je bronz, méně častá je litina a mosaz. [21] [22]

Obrázek 20 Šnekové ozubení [23]

Soukolí lze rozdělit podle kombinace tvaru šneku a kola. Nejčastější kombinací je kombinace válcového šneku a globoidního kola. Používá se pro silové převody. Výhodou je kompaktnost a zjednodušení výroby šneku. Běžný rozsah převodových poměrů je 5:1 až 300:1. [14] [22]

Soukolí šroubová kuželová se nazývají hypoidní. Jsou případem kuželového ozubení s mimoběžnými osami.

3 Technologie výroby ozubených kol

Výroba ozubení je složitý technologický proces. Ozubení je možné vyrábět technologií obrábění a to i nekonvenční (elektroerozivně, dělení materiálu paprskem). Malá kola je možné lisovat z plechu (např.: hodinářská kola). Dále je možné kola vyrábět tvářením, technologií vstřikování plastů, nebo vyrábět pomocí práškové metalurgie, případně je možné použít aditivní technologie. [24] [25]

3.1 Obrábění ozubených kol

Podle druhu převodů lze rozdělit na obrábění čelních kol s přímými, šikmými a zakřivenými zuby. Přesnost a kvalita je ovlivněna strojem, nástrojem, upnutím obrobku, řeznými podmínkami a řeznou kapalinou.

3.1.1 Frézování čelních kol a ozubených hřebenů

Frézovat ozubení je možné dělícím způsobem tvarovým nástrojem nebo odvalovacím způsobem pomocí odvalovací frézy.

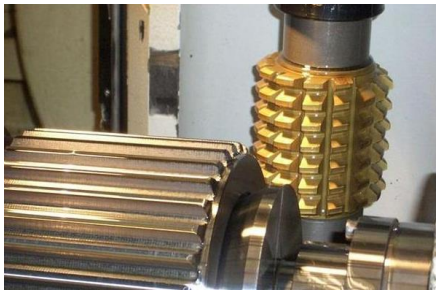
Obrázek 21 Frézování ozubení dělícím a odvalovacím způsobem [26]

Frézováním dělícím způsobem se ozubená kola obrábějí pomocí čepové nebo kotoučové modulové frézy. Profil nástroje odpovídá tvaru zubové mezery. Ta je ovšem pro každý modul a počet zubů jiná, proto se používá jeden nástroj pro určitý rozsah počtu zubů.

Obrázek 22 Výroba ozubení kotoučovou frézou dělícím způsobem [26]

Přesnost ozubení vyrobeného dělícím způsobem závisí na přesnosti nástroje a dělení zubových mezer. Dosahuje se stupňů přesnosti IT9 až IT10 a drsnosti povrchu Ra1,6 až Ra3,2. [24] [25] [26] [27]

Frézováním odvalovacím způsobem je možné vyrábět jednou frézou konkrétního modulu ozubená kola s různým počtem zubů. Pro přímé ozubení je nutné frézu naklonit o úhel stoupání šroubovice nástroje. Při výrobě šikmého ozubení je nutné nástroj navíc pootočit o úhel sklonu zubu. Fréza se nastavuje buď na plnou hloubku zubové mezery a vřezává se axiálním směrem, nebo se zařezává radiálně a potom se posunuje axiálním směrem (tento způsob obrábění je rychlejší).



Obrázek 23 Výroba ozubení odvalovací frézou [28]

Odvalovacím způsobem je možné vyrábět také šneková kola. Tvar frézy musí být shodný s tvarem šneku, který bude s vyráběným kolem spoluzabírat. [24] [25] [26] [29]

Odvalovacím způsobem je možné vyrábět ozubená kola s modulem 0,1 až 75 mm a průměrem kola 1,5 až 2000 mm. Je možné dosáhnout třídy přesnosti IT5 až IT7 a drsnosti obrobeného povrchu Ra0,8 až Ra1,6. [24]

Frézování na CNC obráběcích centrech nevyžaduje speciální nástroje pro každý jednotlivý typ ozubeného profilu. Požadovaný tvar je vytvořen simultánními pohyby několika os s využitím jednodušších víceúčelových nástrojů. Celou součást je možné vyrobit na jedno upnutí. Tím se zkrátí přípravné časy a celkový čas výroby.

Tohoto způsobu výroby využívá například technologie InvoMilling od firmy SANDVIK Coromant. Je jím možné vyrábět vnější i vnitřní ozubení a pokrývá hrubovací i dokončovací operace. Geometrie zubu je vytvářena odvalováním zub po zubu.

Power skiving je kontinuální obráběcí proces realizovaný na CNC obráběcích centrech. Osa nástroje je při něm skloněna od osy obrobku. Otáčky nástroje a obrobku jsou synchronizovány tak, aby do sebe zabíhaly jednotlivé břity a vytvářené zubové mezery. Geometrie zubu je vytvářena odvalem postupně u všech zubových mezer.

Technologie umožňuje výrobu na jedno upnutí a obrábění v blízkosti rohů. Vzhledem k dynamice celého procesu vyžaduje vyšší tuhost stroje a nástroje. [26] [30]

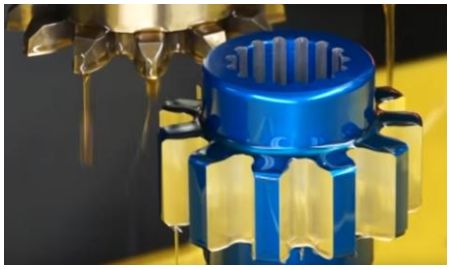
Obrázek 24 Power skiving [26]

3.1.2 Obrážení čelních ozubených kol

Čelní ozubená kola je možné obrážet kotoučovým nebo hřebenovým obrážecím nožem.

Obrážení kotoučovým nožem je založeno na odvalování evolventy nástroje. Kotoučovým nožem se vyrábí ozubená kola s přímými, šikmými a šípovými zuby. Touto metodou je možné také vyrábět vnitřní ozubení.

Obrážením kotoučovým nožem je možné vyrábět ozubení s modulem 2 až 10 mm a průměrem kol 200 až 500 mm. Dosahovaná přesnost je IT5 až IT6 a drsnost obrobených povrchů je Ra0,8. [24] [25]



Obrázek 25 Obrážení kotoučovým nožem [31]

Obrážení ozubeným hřebenem je založeno na odvalování přímkových ploch boků zubů hřebenu (nástroje) po boku zubu, který vytváříme na obrobku. Obrážecí hřeben má tvar základního profilu. Při obrábění dochází ke vzájemnému relativnímu pohybu obrobku, který se otáčí a současně posouvá proti nástroji. Pracovní cyklus hřebenového nože je přerušovaný, protože délka hřebene je omezená.

Dosahovaná přesnost je díky jednoduššímu tvaru nástroje vyšší než u obrážení kotoučovými noži. Produktivita je ovšem nižší. Dosahované přesnosti jsou IT4 až IT5, drsnost obrobeného povrchu je Ra0,8. [24]

Protahování ozubení se používá pro výrobu vnitřního ozubení. Používá se po hrubování polotovarů. Protahováním jsou dokončovány jednotlivé zuby nebo skupiny zubů.

Protahováním je dosahováno stupňů přesnosti IT4 až IT5 a drsnost obrobených ploch Ra0,8 až Ra0,4. [24]

3.2 Tváření ozubení

Ozubená kola a polotovary pro výrobu ozubených kol je možné vyrábět technologií tváření. Využívá se válcování, protlačování, kování a lisování.

Válcování se provádí pomocí kalených plochých (ozubený hřeben) nebo kruhových (ozubené kolo) čelistí. Ty do materiálu vtlačují profil zubových mezer. Hlavní výhodou tvářeného ozubení je zpevnění materiálu kola a díky tomu má ozubení vyšší životnost. [24]

3.3 Výroba práškovou metalurgií

Práškovou metalurgií je možné vyrábět tvarově složité součásti a tvary, které není možné dosáhnout obráběním. Technologie je založena na lisování a slinování kovových i nekovových prášků do požadovaného tvaru. Lisovací tlaky jsou 200 až 690 MPa. Při slinování se rozměry smršťí o 17 až 25%. Doba slinování je 2 až 3 h při teplotě 1050 až 1150°C pro kovové prášky. Slinovaná kola mohou být dále dokončována a povlakována. Struktura výrobků má póry a dutiny od nedokonalého vyplnění prostoru práškem - ty zlepšují ulpívání maziva a tím i celý lubrikační systém. [32]

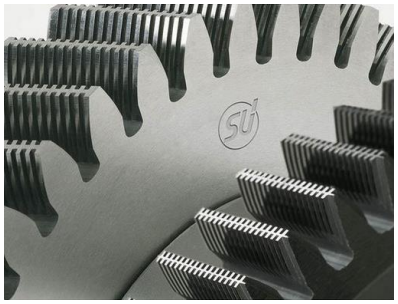
3.4 Dokončovací operace ozubených čelních kol

Dokončovací operace se provádějí po tepelném nebo chemicko-tepelném zpracování, frézování a obrážení ozubených kol pro dosažení vyšší přesnosti případně zlepšení drsnosti povrchu. Tím se snižuje hlučnost soukolí a zvyšuje účinnost přenosu výkonu ve vyšších otáčkách.

3.4.1 Ševingování

Ševingování je způsob dokončování, při kterém jsou z boku zubu odebírány drobné třísky. Nástrojem je tzv. ševingovací kolo, které je v průběhu procesu v záběru s obrobkem, který je brzděn. Dochází ke smyku mezi obrobkem a nástrojem. Podle sklonu osy obrobku od osy pohybu pracovního stolu rozlišujeme ševingování podélné a diagonální. Při podélném ševingování, kdy jsou osy rovnoběžné, je možné vytvářet podélnou modifikaci, která odlehčuje bok zubu na obou čelech a tím se snižuje hlučnost soukolí.

Ševingováním se dosahuje přesnosti IT5 až IT6 a drsnosti obrobeného povrchu Ra0,4 až Ra0,8. Tento způsob dokončování se používá v hromadné a sériové výrobě pro frézovaná kola bez tepelného zpracování. [24] [33]

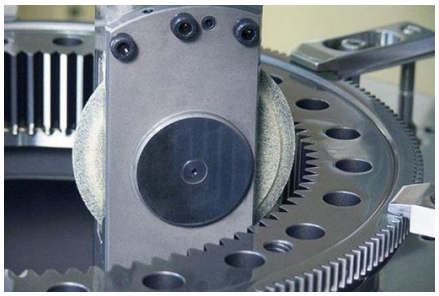


Obrázek 26 Ševingovací kolo [34]

3.4.2 Broušení ozubení

Broušení ozubení se provádí několika způsoby. V některých případech se broušení může používat nejen jako dokončovací operace, ale také jako hlavní technologie výroby.

Broušení dělícím způsobem se provádí kotoučem s profilem jednoho boku zubu, kterým se dokončí boky odpovídajících zubů. Následně je použit kotouč s profilem celé zubové mezery, kterým se naráz brousí oba sousední boky zubů najednou. Po dokončení jedné zubové mezery je kolo pootočeno o jednu rozteč. Dělícím způsobem je možné brousit kola průměru 50 až 450 mm. Přesnost je ovlivněna přesností dělení a přesností profilu kotouče. [24]



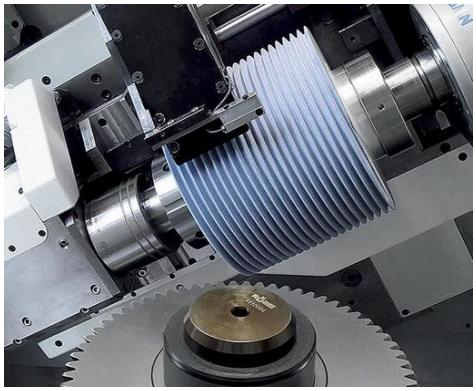
Obrázek 27 Broušení dělícím způsobem [34]

Broušením odvalovacím způsobem s dělením je bok zubu obráběn čelem kotouče. Používají se jeden nebo dva brousící kotouče, které pracují v podstatě jako ozubený hřeben. Ozubené kolo je po těchto kotoučích odvalováno a tím je postupně broušen celý bok zubu. Při použití dvou kotoučů najednou je broušena celá zubová mezera.

Dosahovaná třída přesnosti je IT2 až IT4. [24] [33]

Broušení odvalovacím způsobem kotoučem ve tvaru šneku je podobné technologii frézování odvalem. Metoda probíhá kontinuálně bez potřeby dělení. Tento způsob je vhodný pro sériovou výrobu.

Dosahována je třída přesnosti IT3 až IT5. Při progresivní výrobě je možné brousit profil celý přímo do plného materiálu polotovaru. Tento způsob je použitelný do hodnoty modulu 3 mm. [24]



Obrázek 28 Broušení ozubení odvalovacím způsobem [35]

3.4.3 Lapování a zaběhávání

Lapováním a zaběháváním se zlepšuje drsnost povrchu boků zubů.

Lapování se provádí přesným litinovým kolem, které je v záběru s vyráběným kolem. Litinové kolo koná kmitavý pohyb a do místa záběru je přiváděna lapovací pasta. Tímto způsobem je možné dosáhnout drsnosti Ra0,2 až Ra0,1.

Při zaběhávání je mezi spoluzabírající kola přiváděn olej s jemným brusivem. Tento způsob dokončování je možné uplatnit u tvarů – které se nedají brousit, např.: kuželová kola se zakřivenými zuby. [24] [33]

4 Charakteristiky vyhodnocované na ozubení

Při kontrolách ozubení jsou vyhodnocovány parametry týkající se profilu boku zubu, jejich sklonu, rozteče a rozměrů (průměry charakteristických kružnic, tloušťky zubů, apod.).

ČSN ISO 1328-1 a ČSN ISO 1328-2

O geometrických úchylkách pro účely výroby a kontroly ozubení pojednává norma ISO 1328. Stanovuje systém kvalifikace mezních úchylek a systém stupňů přesnosti evolventního ozubení.

Norma ISO 1328 definuje výchozí obecné rozměry pro kontrolu ozubení a způsob filtrace naměřených hodnot.

Průměr referenční kružnice d je používán k výpočtu hodnot mezních úchylek.

Průměr d_m měřící kružnice je průměr kružnice soustředné s výchozí osou, na níž se snímač dotýká zubu během měření sklonu zubu, rozteče a tloušťky zubu. Pokud průměr měření není stanoven, je nutné jej vypočítat podle vztahu, v závislosti na tom zda se jedná o vnitřní nebo vnější ozubení, z průměru hlavové kružnice a modulu ozubení. [36]

Pro vnější ozubení:

$$d_M = d_a - 2 \cdot m_n$$

Pro vnitřní ozubení:

$$d_M = d_a + 2 \cdot m_n$$

Cutoff filtr pro tvar profilu λ_α a tvar sklonu zubu λ_β - Jedná se o vlnovou délku kde je 50% dat profilu nebo sklonu zubu přenášeno jako výsledek Gaussova nízkopropustného filtru. Zahrnuje tak pouze úchylky delší vlnové délky. [36]

4.1 Profil boku zubů

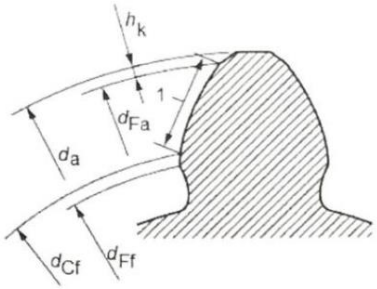
Při měření profilu boku zubu je oblast vyhodnocování omezena několika konstrukčními parametry ozubení tak, aby do něj nezasahovala zaoblení nebo sražení hlav zubů a případné zaoblení či změny tvaru, způsobené podřezání paty zubu.

Kontrolní průměr profilu d_{Cf} je průměr kružnice blíže k patě zubu, na kterém začíná vyhodnocení profilu. Profil zubu na tomto průměru má odpovídat specifikovanému konstrukčnímu profilu bez ovlivnění od zaoblení přechodu podřezání paty zubu.

Průměr určující tvar hlavy d_{Fa} je průměr kružnice blíže k hlavě zubu. Jedná se o maximální průměr, který není ovlivněn sražením nebo zaoblením na hlavě zubu. Pokud není stanoven jinak, je roven průměru hlavové kružnice mínus dvojnásobek poloměru zaoblení nebo sražení na hraně hlavy zubu.

Měřený profil je pak část boku zubu, který musí zahrnovat kontrolní průměr d_{Cf} a průměr určující tvar hlavy d_{Fa}. Během měření je na tomto úseku sonda v kontaktu s bokem zubu.

Rozsah vyhodnocení profilu je oblast, která začíná na kontrolním průměru profilu d_{Cf} a pokud není jinak specifikováno, končí na 95% průměru určujícího tvar hlavy d_{Fa}.



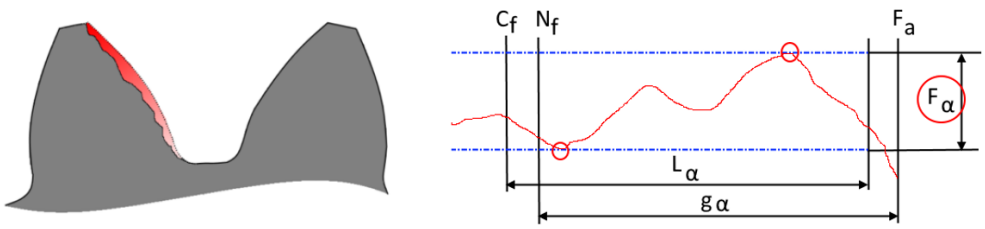
Obrázek 29 Parametry profilu [36]

Délka vyhodnocení profilu L_α je délka dráhy odvalu rozsahu vyhodnocení profilu.

Konstrukční profil je dán konstrukcí ozubení a počítá se s modifikovaným tvarem evolventy a odvalem tečny k základní kružnici.

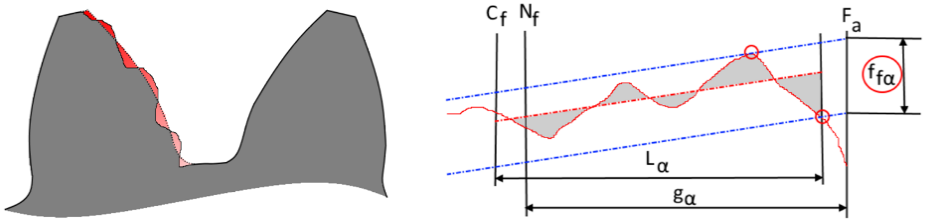
Přímka středního profilu představuje v rozsahu naměřené dráhy tvar konstrukčního profilu.

Celková úchylka profilu F_α je vzdálenost mezi dvěma stejnolehlými konstrukčními profily, které v rozsahu vyhodnocení vymezují měřený profil.



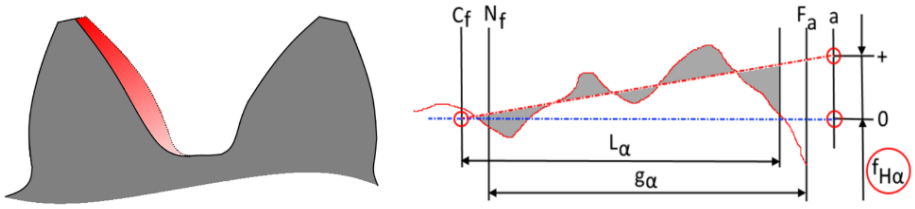
Obrázek 30 Celková úchylka profilu

Úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$ je vzdálenost dvou ekvidistant, které jsou rovnoběžné se středním profilem a vymezují skutečný profil v rámci vyhodnocovací délky L_α.



Obrázek 31 Úchylka tvaru profilu

Úchylka sklonu profilu $f_{H\alpha}$ je vzdálenost mezi dvěma stejnolehlými konstrukčními profily, které protíná extrapolovaná přímka středního profilu na kontrolním průměru profilu a hlavovém průměru.



Obrázek 32 Úchylka sklonu profilu

Tolerance úchylek profilu jsou dány výpočtem podle vzorce z průměru referenční kružnice, modulu ozubení a stupně přesnosti ozubení A.

Při měření profilu musí sonda skenovat celou délku profilu. Začátek pohybu sondy musí začít pod kontrolním průměrem profilu a pokračovat až do sražení hrany. Lineární gradient měření profilu je určen metodou nejmenších čtverců. [36]

4.2 Sklon zubů

Měřený sklon zubu je celý bok zubu omezený čely kola. Do této oblasti je započteno i případné zaoblení nebo sražení hran zubu.

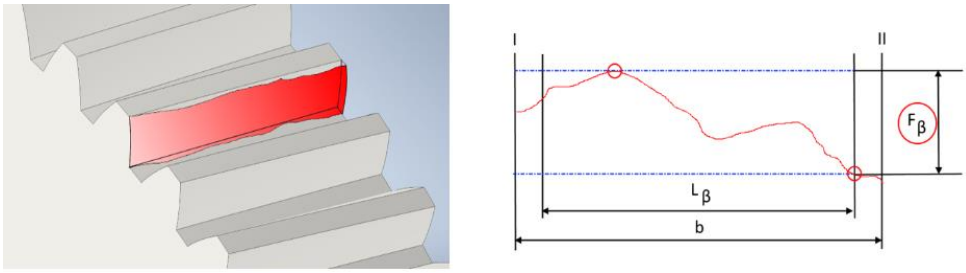
Rozsah vyhodnocení sklonu zubu je plocha boku zubu mezi protilehlými čely kola. Zahrnuje i případné zaoblení nebo sražení hrany zubu. Pokud není specifikováno jinak, je rozsah zkrácen v axiálním směru o méně než 5 % šířky zubu nebo je roven hodnotě modulu ozubení.

Vyhodnocená délka sklonu zubu L_β je osová délka rozsahu vyhodnocení sklonu zubu.

Konstrukční sklon zubu je dán konstrukcí kola. V jeho diagramu je na jedné ose vynesen modifikovaný tvar sklonu zubu a na druhé ose je šířka ozubení.

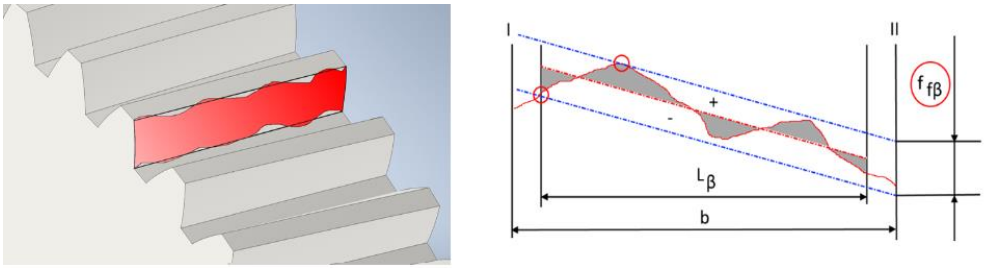
Střední přímka sklonu zubu znázorňuje v rozsahu měřeného úseku tvar konstrukčního sklonu zubu.

Celková úchylka sklonu zubu F_β je vzdáleností dvou ekvidistantních konstrukčních sklonů zubu, které v rozsahu vyhodnocení sklonu zubu vymezují měřený profil.



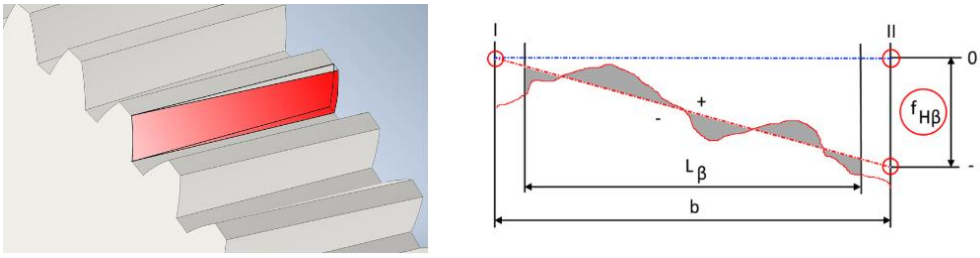
Obrázek 33 Celková úchylka sklonu zubu

Úchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ je vzdálenost dvou ekvidistantních středních přímek sklonu zubu, které vymezují v rozsahu vyhodnocení měřený sklon zubu.



Obrázek 34 Úchylka tvaru sklonu zubu

Úchylka sklonu zubu $f_{H\beta}$ je vzdáleností mezi průsečíky konstrukčního sklonu zubu a extrapolované střední přímky sklonu s hranicí šířky zubu.



Obrázek 35 Úchylka sklonu zubu

Tolerance úchylek sklonu zubů jsou dány výpočtem podle vzorce z průměru referenční kružnice a stupně přesnosti ozubení A.

Při měření sklonu zubu musí sonda snímat po celé šířce kola od jednoho čela ke druhému. Lineární gradient je určen metodou nejmenších čtverců. [36]

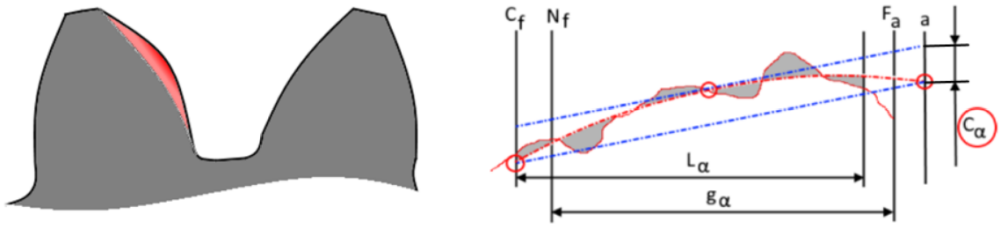
4.3 Modifikace geometrie zubu

Při záběru zubů může různými způsoby docházet ke vzniku zvuků a to nejen v rámci soukolí, ale celé sestavy převodového mechanismu. Tento jev je nežádoucí a proto se hledají různé způsoby jeho odstranění.

Hlavními důvody mohou být elastické deformace hřídelů při zátěži nebo deformace profilů při záběru mezi dvěma boky zubů. Pro řešení je možné využít optimalizaci geometrie zubu.

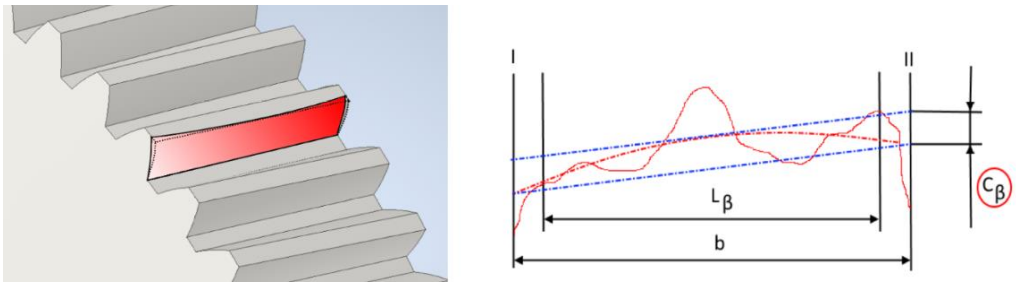
Optimalizace se provádí v rámci profilu boku zubu (modifikace profilu) a sklonu zubu (modifikace sklonu zubu).

Modifikace profilu boku zubu C_α (profile crowning) je upravení profilu boku ozubeného kola tak, aby přidaným materiálem byly kompenzovány elastické deformace profilu boku zubu. [37]



Obrázek 36 Modifikace profilu boku zubu

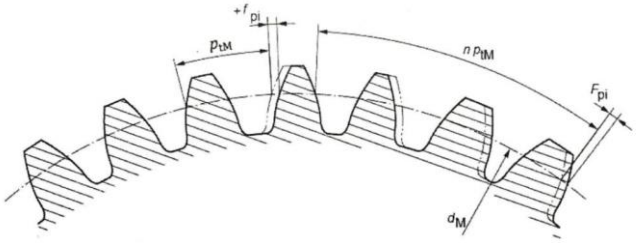
Modifikace sklonu zubu C_β (helix crowning) je upravení tvaru sklonu zubu tak, aby byly kompenzovány elastické deformace zubu a případné elastické deformace hřídelů. [37]



Obrázek 37 Modifikace sklonu zubu

4.4 Rozteč zubů

Úchylky roztečí se vztahují ke vzájemné poloze jednotlivých profilů zubů. Rovina vyhodnocení je rovnoběžná s čelní rovinou ozubeného kola.

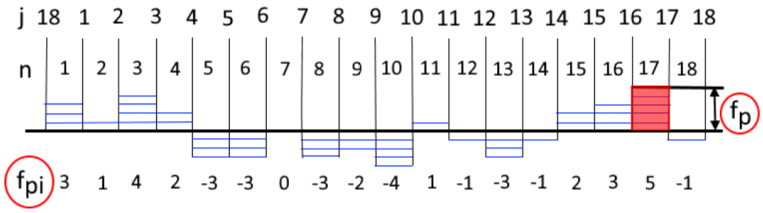


Obrázek 38 Úchylky zubové rozteče [36]

Dílčí úchylka jednotlivé čelní rozteče f_{pi} je rozdílem mezi teoretickou a skutečnou hodnotou zubové rozteče v čelní rovině na měřící kružnici.

Úchylka jednotlivé rozteče f_p je největší hodnota z naměřených dílčích úchylek jednotlivé čelní rozteče.

$$f_p = max|f_{pi}|$$

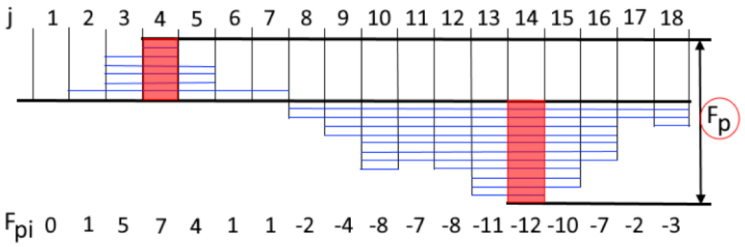


Obrázek 39 Hodnoty f_{pi} s vyznačenou f_p

Dílčí úchylka součtové rozteče F_{pi} je rozdílem mezi teoretickou a skutečnou hodnotou n sousedních zubových roztečí. Úchylka může být vyhodnocována pro n od jedné až do celkového počtu zubů kola.

Celková úchylka součtové rozteče F_p je rozsah všech dílčích úchylek součtových roztečí.

$$F_p = max\ F_{pi} - min\ F_{pi}$$



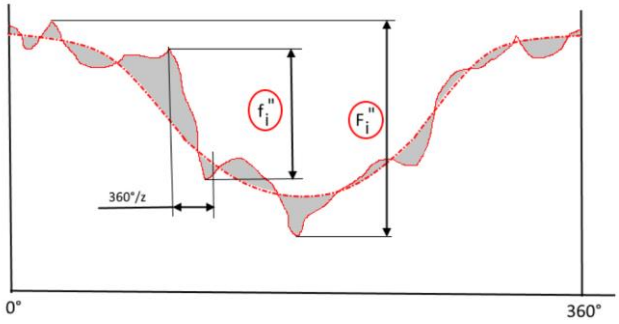
Obrázek 40 Celková úchylka součtové rozteče F_p

Tolerance úchylek roztečí jsou určeny výpočtem z průměru referenční kružnice, modulu ozubení a stupně přesnosti A. [36]

4.4.1 Radiální kinematické úchylky

Místní radiální kinematická úchylka f_i" je hodnota rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou vzdálenosti od středu v rozsahu jedné zubové rozteče.

Celková radiální kinematická úchylka F_i" je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou vzdálenosti od středu v rozsahu celého obvodu kola.



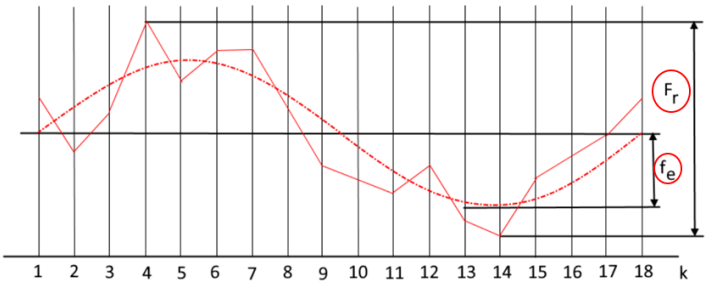
Obrázek 41 Radiální kinematické úchylky

Norma ČSN ISO 1328-2 obsahuje tabulku hodnot tolerancí pro celkovou radiální kinematickou úchylku, která definuje 9 stupňů přesnosti (4 – nejpřesnější, až 12). Hodnota je určena z referenčního průměru kola, modulu ozubení a stupně přesnosti. [38]

4.4.2 Obvodové házení

Obvodové házení F_r je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou vzdálenosti všech zubových mezer od osy otáčení kola. Jedná se přibližně o dvojnásobnou hodnotu excentricity f_e.

Excentricita f_e je maximální výchylka osové vzdálenosti spoluzabírajících kol při otáčení soukolí. [38]



Obrázek 42 Obvodové házení

4.5 Rozměrové charakteristiky

4.5.1 Rozměr přes zuby

Rozměr se zjišťuje pomocí talířkového mikrometru nebo kalibru přes několik zubů. Jmenovitá hodnota, tolerance rozměru a počet zubů, přes který je parametr vyhodnocen, se určí výpočtem ze vzorce podle modulu, počtu zubů kola a úhlu záběru. [39]

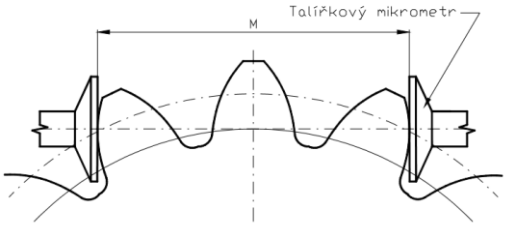
Počet zubů, přes které se měří:

$$z' = \frac{\alpha}{180} \cdot z + 0{,}5$$

Rozměr přes zuby:

$$M = m_n \cdot (\pi \cdot cos\alpha \cdot (z' - 0{,}5) + z \cdot cos\alpha \cdot ev\alpha$$

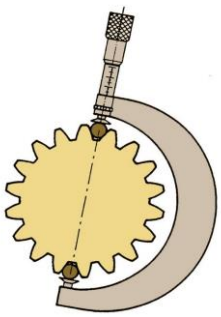
$$ev\alpha = tg\alpha - \frac{\alpha}{180} \cdot \pi$$



Obrázek 43 Rozměr přes zuby [39]

4.5.2 Průměr kola přes válečky

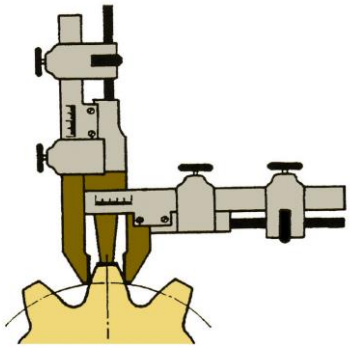
Průměr kola, měřený přes válečky nebo kuličky, je jednou z nejjednodušších metod měření ozubených kol. Jedná se o vnější vzdálenost mezi dvěma válečky umístěnými v protilehlých zubových mezerách, měřenou pomocí mikrometru. Touto metodou je možné měřit vnitřní i vnější ozubení. [40]



Obrázek 44 Měření průměru kola přes válečky [40]

4.5.3 Tloušťka zubu

Tloušťka zubu se měří na roztečné kružnici kola. Protože se nejedná o vzdálenost rovnoběžných ploch, je nutné použít zubovou měrku (tzv. zuboměr). Díky měrce je možné nastavit doraz na hlavu zubu a následně měřit pomocí čelistí tloušťku zubu. [40]



Obrázek 45 Měření tloušťky zubu pomocí zubové měrky [40]

4.6 ISO soustava přesnosti čelních ozubených kol

Čelní kola jsou podle normy ČSN ISO 1328-1 rozdělena do 11 stupňů přesnosti – stupeň 1 je nejvyšší, stupeň 11 je nejnižším stupněm přesnosti. Podle požadavku na stupeň přesnosti jsou na ozubeném kole vyhodnoceny různé parametry. S úrovní stupně roste počet kontrolovaných parametrů. [36]

Tabulka 1 Měřené parametry ozubení podle stupně přesnosti [36]

Průměr kola	**Skupina přesnosti**	**Stupeň přesnosti**	**Minimální přípustné parametry**	
			Výchozí parametry	**Alternativní parametry**
d≤4000 mm	Nízká	10 až 11	F_p, f_p, s, F_α, F_β	s, c_p^b, $F_i''^a$, $f_i''^a$
	střední	7 až 9	F_p, f_p, s, F_α, F_β	s, c_p^b, F_{is}, f_{is}
	vysoká	1 až 6	F_p,f_p,s,F_α,$f_{f\alpha}$,$f_{H\alpha}$,F_β,$f_{f\beta}$,$f_{H\beta}$	s, c_p^b, F_{is}, f_{is}
d>4000 mm		7 až 11	F_p, f_p, s, F_α, F_β	F_p, f_p, s, ($f_{f\beta}$ nebo c_p^b)

Pro každý vyhodnocovaný parametr je normou určena typická měřící metoda a minimální počet měřených elementů (požadavků).

Tabulka 2 Minimální počet měřených zubů [36]

	Metoda označení	Typická měřící metoda	Minimální počet požadavků
základní	$\mathbf{F_p}$ celková součtová rozteč	dvě sondy, jedna sonda	všechny zuby
	$\mathbf{f_p}$ jednotlivá rozteč	dvě sondy, jedna sonda	všechny zuby
profil	$\mathbf{F_\alpha}$ celkový profil	profil	tři zuby
	$\mathbf{f_{f\alpha}}$ tvar profilu		
	$\mathbf{f_{H\alpha}}$ sklon profilu		
sklon	$\mathbf{F_\beta}$ celkový sklon boku	sklon zubu	tři zuby
	$\mathbf{f_{f\beta}}$ tvar sklonu zubu		
	$\mathbf{f_{H\beta}}$ sklon zubu		
součtové	$\mathbf{F_{is}}$ celková součtová jednobokého odvalu	–	všechny zuby
	$\mathbf{f_{is}}$ součtová jednobokého odvalu za rozteč	–	všechny zuby
	$\mathbf{c_p}$ spojení se vzorem	–	všechny zuby
rozměr	**s** tloušťka zubu	tětivové měření, měření přes nebo mezi válečky, měření rozpětí, složený test činnosti	tři zuby, dvě plochy, dvě místa, všechny zuby

4.7 Pravidla a parametry pro měření

Pro měření je nutné mít pravidelně ověřovaná zařízení a stanovit nejistotu postupu měření. Dále musí být známé provozní parametry, jako jsou výchozí osa, směr měření, směr mezní úchylky, měřící průměr, filtrování dat, hustota dat a požadované měřící praktiky. [36]

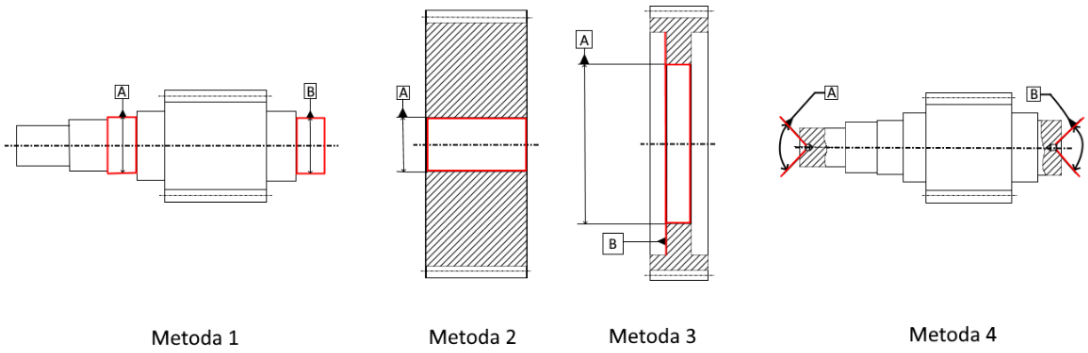
Výchozí osa určuje geometrii zubů a jednotlivých součástí, je stanovena normou ISO/TR 10064-3. Osa musí být jednoznačně definována s odpovídající přesností. V případě ozubených kol je výchozí osa totožná s osou otáčení kola. Osu je možné definovat pomocí základen čtyřmi metodami.

Metoda 1 určuje výchozí osu pomocí středů dvou určených kružnic na krátkých válcových nebo kuželových površích. Používá se u kol s hřídelem z jednoho kusu materiálů, uložených na dvou ložiskách.

Metoda 2 určuje výchozí osu pomocí dlouhého válcového nebo kuželového povrchu. Používá se u delších kol nebo kol s prodlouženým otvorem pro připevnění k hřídeli.

Metoda 3 určuje výchozí osu válcovým povrchem a jedním čelem, kde je směr osy dán jako normála k rovině čela a poloha je určena středem kružnice získané z válcového povrchu. Metoda se používá u krátkých kol s větším průměrem díry.

Metoda 4 určuje výchozí osu pomocí středů děr případně středících důlků. [41]



Obrázek 46 Určení výchozí osy

Směr měření tvaru a polohy může probíhat kolmo k měřené ploše, nakloněné v určitém úhlu, nebo podle kružnice. Směr měření je dán konstrukcí měřícího stroje.

Směr mezní úchylky je dán měřeným elementem. Směr pro úchylky zubové rozteče je v čelní rovině podél měřícího průměru. Směr úchylky profilu a sklonu zubu je v čelní rovině na tečně k základní kružnici. [36]

Filtrování měřených dat je specifikováno pro měření širokého spektra úchylek. Filtrování slouží k odstranění nežádoucích hodnot, které by jinak zkreslovaly výsledek měření. Filtr nepropouští hodnoty o menší vlnové délce než je stanovená mezní hodnota.

Mezní hodnota vlnové délky filtru pro měření úchylky profilu zubu se vypočítá:

$$\lambda_\alpha = \frac{L_\alpha}{30}$$

Mezní hodnota vlnové délky filtru pro měření úchylky sklonu zubu se vypočítá:

$$\lambda_\beta = \frac{b}{30}$$

Typ filtru a průměr sondy musí být uveden v záznamu o přejímce.

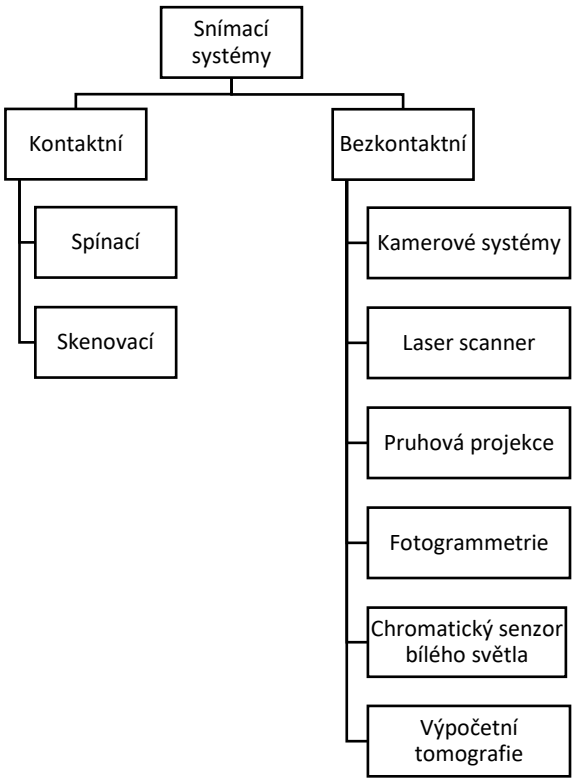
Hustota dat měření je omezena profilem drsnosti povrchu, na kterém probíhá měření. Pro eliminaci tohoto vlivu jsou data filtrována. Měření dat evolventního profilu musí obsahovat minimálně 150 rovnoměrně rozmístěných bodů. Pro měření sklonu zubu je minimální počet bodů definován podle filtru a délky kola b.

$$minimální\ počet\ bodů = \frac{5 \cdot b}{\lambda_\beta}$$

Při kontrole vlnitosti musí měření obsahovat minimálně 300 bodů nebo hustota měřených bodů musí být 5 bodů na milimetr. [36]

5 Možnosti kontroly ozubení

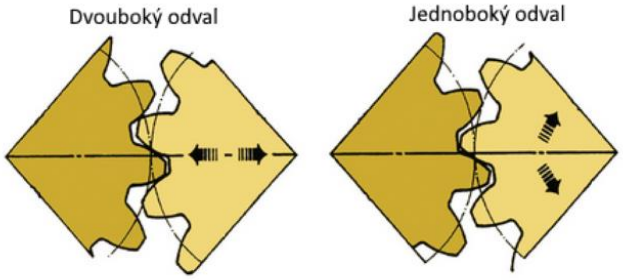
Pro kontrolu ozubení je možné použít jednoduchá ruční měřidla (rozměr přes zuby, rozměr přes válečky), zařízení pro kontrolu jednobokým a dvoubokým odvalem nebo měřící stroje s různými snímacími systémy. Kontaktní snímací systémy používají k získání měřených dat fyzický dotyk měřící sondy s kontrolovanou součástí. Nejčastěji se používají souřadnicové měřící stroje. Bezkontaktní snímací systémy používají pro získání dat různé fyzikální principy. [42]



Obrázek 47 Typy snímacích systémů

5.1 Jednoboký a dvouboký odval

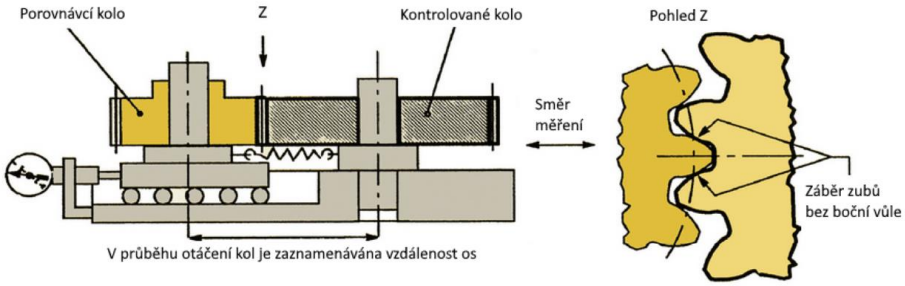
Kontrola záběru ozubených kol se provádí záběrem kontrolovaného kola s přesným porovnávacím kolem. Používá se kontrola dvoubokým a jednobokým odvalem. Dvoubokým odvalem je kontrolována excentricita kola a jednobokým odvalem je kontrolována přesnost dělení jednotlivých roztečí zubů.



Obrázek 48 Dvouboký a jednoboký odval [40]

5.1.1 Kontrola dvoubokým odvalem

Při dvoubokém odvalu jsou k sobě kontrolované a porovnávací kolo přitlačovány tak, aby byla eliminována boční vůle mezi zuby. Tím se ozubená kola navzájem dotýkají ve dvou bodech – levým i pravým bokem. Při otáčení se vlivem nepřesností mění osová vzdálenost kol, která se zaznamenává. [40] [43]



Obrázek 49 Kontrola dvoubokým odvalem [40]

5.1.2 Kontrola jednobokým odvalem

Při jednobokém odvalu je osová vzdálenost kontrolovaného a porovnávacího kola pevná. Při záběru kol se profily dotýkají pouze v jednom společném bodě spoluzabírajících profilů. V průběhu otáčení se zaznamenává změna vzájemného pootočení kol. [40] [43]

5.2 Univerzální souřadnicové měřící stroje

Souřadnicové měřící stroje jsou označovány zkratkou CMM – Coordinate measuring machine. Principem souřadnicového měření je stanovení základního bodu v prostoru a polohy dalších bodů na kontrolované součásti. Ty jsou pak měřeny pomocí souřadnic v jednotlivých osách stroje. CMM se dělí podle uspořádání os na kartézské a nekartézské.

Kartézsky uspořádané souřadnicové měřící stroje se dělí podle typu konstrukce na konzolové, portálové, mostové a sloupové. Konstrukce vychází z požadavku na rozsah a přesnost měření. [42] [44]

Portálové CMM jsou nejběžnějším typem souřadnicových měřících strojů. Základem stroje je přesná granitová deska. Běžné půdorysné rozměry jsou v řádech jednotek metrů (např. 2x4 m). Stroje jsou určeny pro použití v laboratorním prostředí s úzkým rozsahem okolní teploty a nízkou prašností. Portálové CMM používají snímací systém, který se pohybuje po třech navzájem kolmých osách. Každá z nich má vlastní odměřovací systém, který zaznamenává polohu v jednotkách mikrometrů. Při pohybu po kontrolované součásti jsou zaznamenávány souřadnice snímaných bodů. Tyto body vytváří tzv. mrak bodů, který reprezentuje skutečný tvar kontrolovaného elementu součásti. [42]

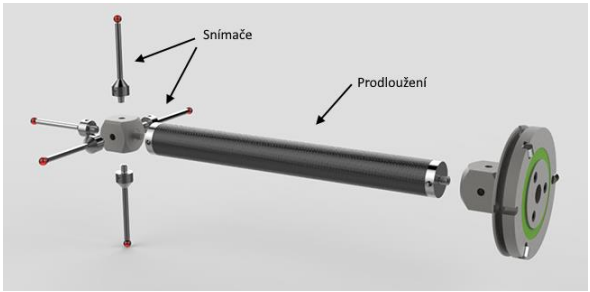
Obrázek 50 Portálový CMM ZEISS PRISMO [45]

Otočné stoly pro CMM (Rotation table – RT) jsou použity pro rozšíření možností kartézsky uspořádaných měřících strojů. RT je připevněn přímo na granitovou desku stroje. Může snižovat přesnost měření vlivem polohování, tepelné roztažnosti nebo nižší tuhosti. Poloha otočného stolu musí být kalibrována zvlášť pomocí etalonu ve tvaru válce upnutého do sklíčidla RT.

5.2.1 Snímací systémy CMM

Snímací systémy CMM jsou dotykové nebo optické. Dotykové systémy mají mnohem větší přesnost a opakovatelnost a jsou vhodné pro měření dílů s komplexnějšími a složitějšími tvary. Optické snímače jsou vhodné spíše pro měření součástí s malými nebo dvourozměrnými prvky. Dále jsou vhodné pro měření částí z měkkých a pružných materiálů, kde by dotykové snímání bylo zkreslené deformací při dotyku.

Dotykové snímací systémy CMM používají snímací systém připevněný k měřící hlavě. Snímací systém je sestaven z prodlužovacích těles a samotných snímačů. Pro různé kontrolované součásti je nutné nakonfigurovat snímací systém tak, aby bylo možné pomocí snímačů změřit všechny požadované elementy.



Obrázek 51 Snímací systém [46]

Snímače se pro danou aplikaci volí podle tvaru a rozměru součásti, materiálu, ze kterého je vyrobena a drsnosti jejího povrchu. Nejčastěji jsou používány snímače s dotykem tvaru koule. Pro různé aplikace pak mohou být využívány například snímače diskové, půlkulové nebo válcové. Pro většinu aplikací jsou vhodné snímače s dotekem ze syntetického rubínu, který je v podstatě čistý oxid hliníku. Pouze ve výjimečných případech se používají jiné materiály dotyku. Jedním z nich je kontinuální skenování

hliníkových součástí, kdy by se rubínový dotyk adhezivně opotřebovával. Místo něj je dotyk vyroben z nitridu křemíku. Pro dříky snímačů se používá ocel, karbid wolframu, keramika nebo uhlíková vlákna. [47]

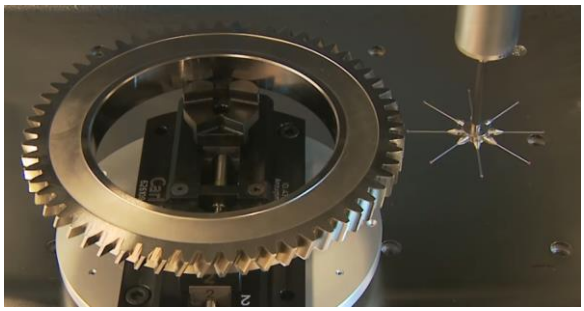
Měřící hlavy se dělí podle způsobu extrakce bodů na skenovací a spínací. Skenovací hlavy kontinuálně sledují výchylku snímače. Pracují v záběru s kontrolovaným dílem a kontinuálně extrahují body. Nejvyšší přesnosti je možné dosáhnout pevnými systémy, které jsou souosé s osou pinoly stroje. Pro speciální aplikace je možné použít otočné hlavy, které ovšem mají nižší tuhost. Hlavními výrobci měřících hlav jsou firmy ZEISS, Renishaw a Hexagon. [48]

5.2.2 Kontrola ozubení pomocí univerzálních CMM

CMM mohou být použity pro kontrolu kvality v rámci výroby nebo pro přejímací kontrolu zakoupených ozubených součástí. Výhodou jsou nižší pořizovací a provozní náklady oproti sofistikovaným jednoúčelovým zařízením, určených pouze pro kontrolu ozubení, kde jsou navíc nutné speciální artefakty pro kalibraci.

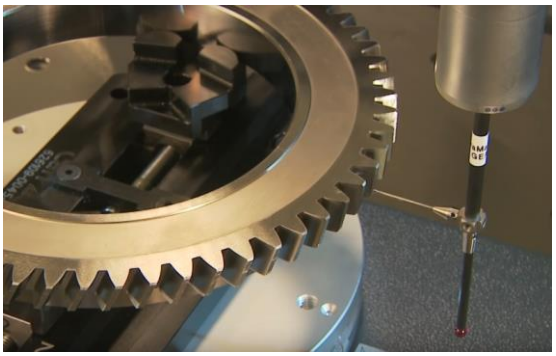
Volba konkrétního CMM pro danou součást se primárně odvíjí od jejích rozměrů a hmotnosti. Pro kola velkých rozměrů (průměru 1 m a více) a hmotností jsou vhodné sloupové CMM s horizontálním ramenem a otočným stolem.

Pro kontroly malých nebo středně velkých součástí jsou vhodné portálové CMM. První možností je měření bez použití otočného stolu, kdy musí být použit snímací systém, složen z osmi snímačů uspořádaný do hvězdy, aby bylo možné kontrolovat zuby po celém obvodu v rámci jednoho upnutí. Ozubené kolo je pevně upnuto k základní desce stolu a všechny pohyby při měření vykonává snímací systém.



Obrázek 52 Měření ozubení na CMM bez RT [49]

Druhou možností je měření s použitím otočného stolu, kdy je pohyb při měření realizován simultánním pohybem otočného stolu a snímacího systému. Snímací systém se skládá ze dvou snímačů – jedem ve směru osy Z pro zaměření osy kola, druhý ve směru osy X nebo Y pro měření jednotlivých zubů.



Obrázek 53 Měření ozubení na CMM s použitím RT [49]

Při kontrole kola s přímými zuby je možné použít jeden snímač ve směru osy Z, protože celá zubová mezera je dostupná ve svislém směru.

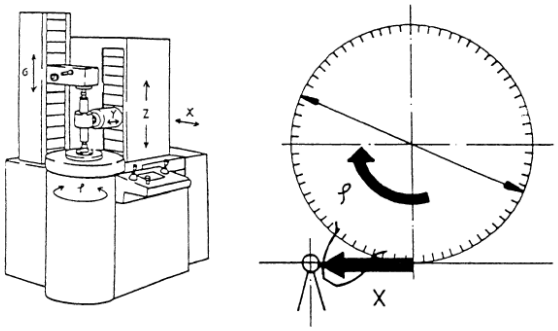
Kontrola pomocí univerzálních CMM nahrazuje použití ručních měřidel pro kontrolu ozubení. Tím zlepšují opakovatelnost měření, která tak není tolik ovlivněna lidským faktorem. V průběhu měření navíc CMM pracuje automaticky a obsluha se může věnovat jiným úkonům, např. přípravě dalšího dílce, editaci protokolu měření apod. To zvyšuje efektivitu a zkracuje čas potřebný ke kontrole. [50] [51]

5.3 Jednoúčelové souřadnicové měřící stroje

Jednoúčelové CMM pro kontrolu ozubení se dělí podle typu konstrukce na 3-osé nebo 4-osé systémy. Pro kontrolu se používá otočný stůl, do kterého se upíná kontrolované kolo. Osa rotace je umístěna svisle. Snímací systém se skládá ze dvou snímačů – jeden ve směru osy Z, druhý ve směru osy X nebo Y.

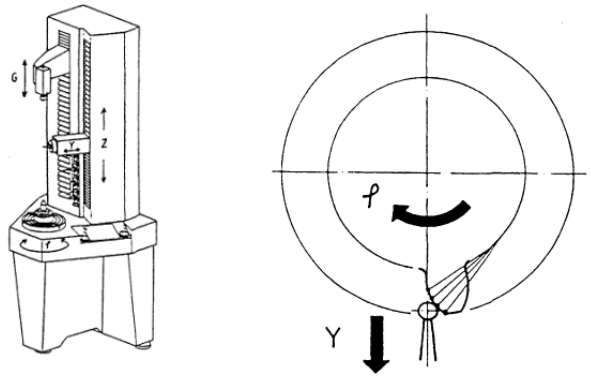
Pomocí kombinace otáčení stolu a pohybu snímače ve směru osy Z je možné měřit parametry sklonu ozubení. Při měření charakteristik profilu a zubové rozteče musí kombinace pohybů os stroje pohybovat snímacím systémem po evolventní trajektorii. Způsob vytvoření této trajektorie odvalování přímky po kružnici je rozdílný u 3-osých a 4-osých koncepcí měřícího stroje.

Jednoúčelové 4-osé CMM používají osu otáčení stolu a pohyb snímacím systémem ve 3 navzájem kolmých směrech X, Y a Z. Evolventní trajektorie je vytvořena kombinací otáčení stolu, pohybu ve směru tečny a případně pohybu ve směru normály.



Obrázek 54 Jednoúčelové 4-osé CMM pro kontrolu ozubených kol a způsob vytvoření evolventní trajektorie [52]

Jednoúčelové 3-osé CMM mají jednodušší konstrukci. Využívají osu otáčení stolu, osu Z pro vertikální pohyb a osu Y pro pohyb směrem do osy otáčení kola. Evolventní trajektorie je vytvořena kombinací otáčení stolu a pohybem snímacího systému v radiálním směru. Odvalování evolventy je tak realizováno v polárním souřadnicovém systému. [52]



Obrázek 55 Jednoúčelové 4-osé CMM pro kontrolu ozubených kol a způsob vytvoření evolventní trajektorie [52]

Výrobou jednoúčelových CMM pro kontrolu ozubení se zabývají například firmy Gleason a Klingelnberg.

Gleason 300GMSP je jednoúčelový CMM stroj pro kontrolu ozubených kol. Snímací systém pro kontrolu geometrických a rozměrových parametrů ozubení je možné vyměnit za hlavu pro měření drsnosti boku zubů. Zařízení tak umožňuje kompletní kontrolu ozubených kol a také kontrolu nástrojů pro jejich výrobu. Je možné na něm měřit ševingovací kola a odvalovací frézy. Je proto vhodnou volbou pro podniky specializující se na výrobu malých a středně velkých ozubených kol. [53]

Obrázek 56 Gleason 300GMSP [53]

5.4 Laser scanner

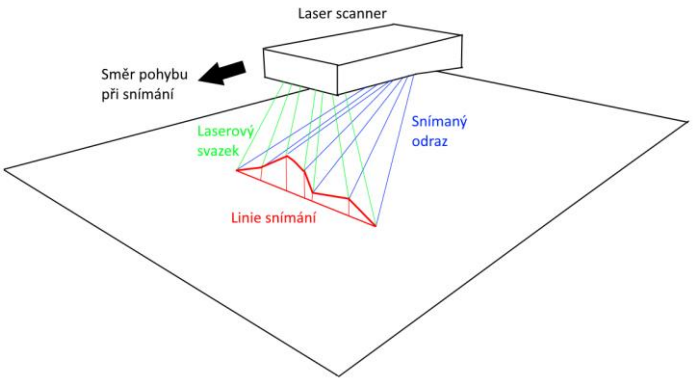
Laser scanner je bezkontaktní systém snímání, který funguje na principu triangulace.

Triangulace je způsob určení vzdálenosti objektu, který funguje obdobně jako způsob prostorového vidění lidského zraku. Objekt je pozorován ze dvou bodů – jejich vzdálenost je známa a nazývá se základna. Vzdálenost pozorovaného objektu kolmá na základnu je vypočtena pomocí úhlů směru pozorování ze dvou bodů. [54]

Obrázek 57 Princip triangulace

Snímání pomocí triangulace u laser scanneru probíhá na linii. Snímá se profil povrchu v jedné rovině. Scanner se pohybuje a zaznamenává postupně velké množství profilů. Z profilů a údajů o poloze scanneru v okamžiku zaznamenání je následně složen tvar skenované plochy. Linie je vytvořena rozkmitáním laseru do stran.

Pro skenování objektu je zjišťována doba, která je nutná pro cestu paprsku k objektu, odrazu a návratu do skeneru. [55]



Obrázek 58 Snímání pomocí laser scanneru

Pro zaznamenání polohy laser scanneru je možné použít rameno a popisovat polohu v nekartézských souřadnicových systémech. Laser scanner může být použit v kombinaci s CMM, kde je upnut místo snímací hlavy. Další možností je zjišťování polohy laser scanneru bezkontaktně pomocí koutových odražečů umístěných na scanneru a trackerů, které jej v průběhu měření sledují. [56]

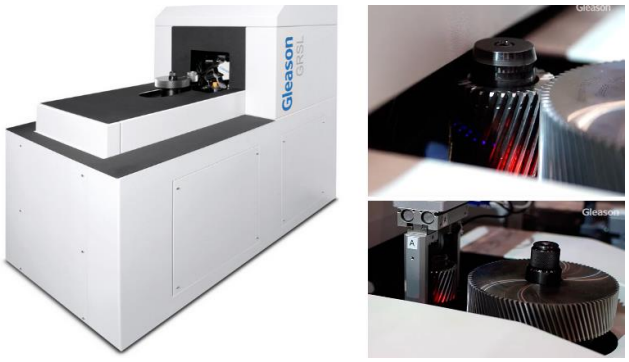
Obrázek 59 Laser scanner s ramenem a v kombinaci s CMM [57] [58]

Pro kontrolu ozubených kol je možné tedy využít univerzální CMM v kombinaci s Laser scannerem, nebo u jednoúčelových strojů pro kontrolu ozubených kol je scanner umístěn v pevné pozici a směřuje na kontrolované kolo, kterým se před ním otáčí a při tom jsou extrahovány body.

Gleason 300GMSL je jednoúčelový stroj určený pro kontrolu ozubených kol pomocí laser scanneru. Je možné kontrolovat kola do průměru 300 mm. Výstupní data lze použít pro klasickou kontrolu ozubených kol nebo i pro reverzní inženýrství, protože výstupem je mrak bodů, který reprezentuje tvar celé měřené součásti. [59]

Obrázek 60 Gleason 300GMSL [59]

Gleason GRSL je stroj pro kontrolu ozubených kol. Díky rychlosti skenování lze provádět tzv. in-line měření každého vyrobeného kusu přímo ve výrobě. Pro otáčení kontrolovaného kola je možné použít přesné porovnávací kolo a současně při skenování provádět kontrolu dvoubokým odvalem. [60]

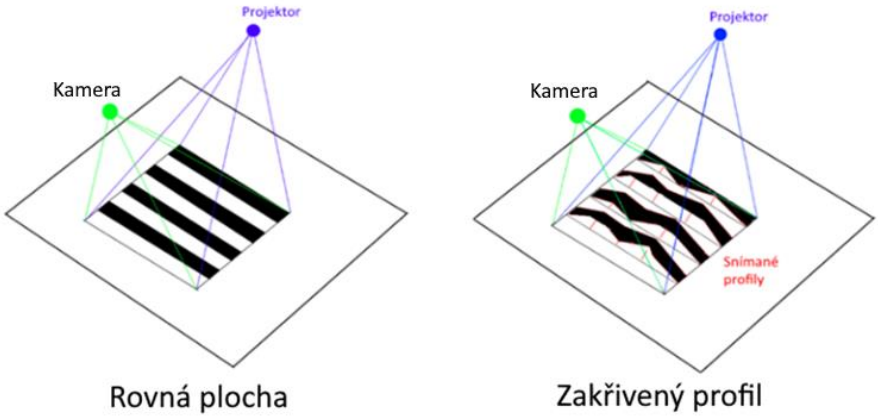


Obrázek 61 Gleason GRSL [60]

5.5 Pruhová projekce

Pruhová projekce je bezkontaktní optický snímací systém, založený na principu triangulace. Oproti Laser scanneru neprobíhá vyhodnocení pouze na jedné linii, ale v zorném poli zařízení.

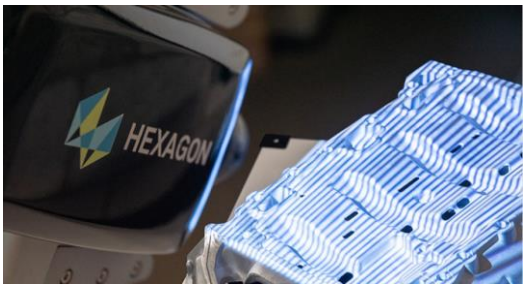
Při snímání pomocí pruhové projekce je pomocí projektoru promítnuto na objekt velké množství rovnoběžných pruhů světla. Po nasvícení se pořídí snímek, kde ze zakřivení proužků, které by při projekci na rovnou plochu byly přímé, se pomocí triangulace převede 2D snímek do 3D zobrazení.



Obrázek 62 Snímání pomocí pruhové projekce

Toto snímání se provádí z několika úhlů. Postupným skládáním 3D zobrazení vznikne mrak bodů, který představuje skenovanou součást. Pokud se jedná o jednodušší objekt, probíhá skládání snímků pomocí orientace na významné oblasti geometrie – hrany, díry, výstupky.

Pro zpřesnění a zamezení špatného složení je možné na objekt nalepit orientační body. Zpravidla se jedná o kruhové terčíky s velkým kontrastem barev. K polohování součásti se používají otočné stoly nebo polohovatelné stativy. [55] [61]



Obrázek 63 Pruhová projekce [62]

Pro správnou funkci systému je nutná jeho kalibrace. Ta se provádí pomocí desky s pravidelným 2D vzorem, který se kamerou nasnímá z několika vzdáleností a úhlů natočení. Následně je vyhodnocení obrazu upraveno pomocí algoritmu. [61]

Hlavním omezením této metody je charakter povrchu skenovaného objektu. Pokud je povrch lesklý, může vytvářet odrazy, které znemožňují měření. Tento problém je možné řešit pomocí zmatňujícího křídového nástřiku součásti nebo jiným způsobem zmatnění – pískování apod. Tloušťka křídového nástřiku ale může zkreslovat rozměry součásti. V závislosti na odstínu objektu je nutné volit optimální dobu expozice, aby byly promítnuté pruhy v dostatečném kontrastu pro vyhodnocení snímku.

5.6 Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie (CT – computed tomography) je bezkontaktní způsob snímání. Využívá se k analýze geometrie, vnitřní struktury a nežádoucích vnitřních defektů materiálu kontrolovaného předmětu. Metoda je založena na interpretaci stínovaného obrazu, který vzniká odstiňováním rentgenového záření.

Objekt je pozicován a jsou získány snímky z různých úhlů – z nich je vytvořen trojrozměrný model. Podobně, jako je 2D obraz složen z pixelů, je u CT detektorů vytvořen 3D obraz z prostorových segmentů, které se nazývají voxely.

Velikost voxelu musí být při kontrole geometrie součásti minimálně dvakrát menší než velikost tolerančního pole kontrolovaného rozměru. V závislosti na velikosti voxelu je volena vzdálenost součásti od detektoru.

Při snímání je pracovní prostor s kontrolovaným objektem prozařován rentgenovým zářením. Paprsky dopadají na detektor, kde je vytvořen 2D stínovaný obraz. Pro pozicování je objekt umístěn na otočném stole a snímky jsou postupně pořízeny z různých úhlů natočení. Následně je ze snímků vytvořen trojrozměrný model. Pro odstranění nízkoenergetických složek je použit filtr, který je umístěn před detektorem. Energie potřebná k prozáření objektu se odvíjí od hustoty materiálu, ze kterého je vyroben. [63] [55]

6 Porovnání přesnosti vybraných technologií pro kontrolu ozubení

Pro porovnání byly vybrány technologie pruhové projekce a výpočetní tomografie. Tyto metody se při kontrolách ozubení běžně nevyužívají.

Cílem práce je zjistit odchylky naměřených hodnot charakteristik, vyhodnocovaných na ozubených kolech pomocí přístrojů pro pruhovou projekci a výpočetní tomografii. Porovnání bylo provedeno na strojích, které se používají v Měrovém středisku FS ČVUT.

Jako referenci pro porovnání bezkontaktních metod je použito dotykové měření pomocí souřadnicového měřícího stroje, protože tato metoda se ke kontrole ozubení běžně používá a je považována za jeden z nejpřesnějších způsobů měření ozubení.

Pro porovnání měření byla vybrána tři ozubená kola s přímým ozubením. Kola mají různé počty zubů a hodnoty modulu a jsou vyrobena ze tří různých materiálů. První kolo je vyrobeno z oceli, druhé ze slitiny hliníku a třetí z polyamidu se skleněnými vlákny. Kola byla volena tak, aby bylo možné zjistit vliv velikosti zubů a vliv materiálu kola na měření.

Různé hodnoty modulů kontrolovaných kol byly zvoleny proto, aby byly ověřeny možnosti snímání kol běžně používaných rozměrů a velikostí zubů např. pro automobilový průmysl nebo průmysl, zabývající se výrobou obráběcích strojů a také ozubených kol s velmi malými rozměry a zuby (modul <1) pro účely jemné mechaniky či např. ručního nářadí (aku šroubováky apod.).

Běžně používaná kola jsou ve většině případů vyrobena z oceli nebo plastu. Pro porovnání jednotlivých technologií byla proto vybrána kola z těchto materiálů. Ocelové kolo kvůli hustotě materiálu a prozařované tloušťce není možné měřit na použitém stroji pro CT. Proto bylo navíc vybráno kolo vyrobené z hliníkové slitiny, protože bude možné jej změřit pomocí všech tří metod a tím získat data vhodná pro porovnání.

Vyhodnocení úchylek profilu a sklonu bylo provedeno vždy na 4 zubech zvolených rovnoměrně po celém obvodu kola (norma ČSN ISO 1328-1 vyžaduje měření minimálně na 3 zubech). Pro ověření opakovatelnosti bylo každé měření provedeno šestkrát.

Porovnávány pak byly přímo zjištěné hodnoty úchylek a jejich opakovatelnost.

Ocelové kolo je vyrobeno technologií odvalovacího frézování. Boky zubů jsou cementovány a broušeny. Díra pro hřídel má rovnoboké drážkování.

Hliníkové kolo je vyrobeno odvalovacím frézováním bez dokončovacích operací. Díra pro hřídel je vyrobena pouze soustružením.

Plastové kolo je vyrobeno technologií vstřikování plastů. Díra pro hřídel má ve střední části zvětšený průměr. Kolo má dvě ozubení. Pro porovnání bylo měřeno ozubení se 46 zuby.

Tabulka 3 Přehled ozubených kol pro porovnání technologií

	Ocelové kolo	Hliníkové kolo	Plastové kolo
Počet zubů	19	47	46
Modul	6	2	0,88
Jednotková korekce	0,25	0	0,678
Úhel záběru	20°	20°	18°
Materiál	16 220.3	EN AW 7075 T6	PA4.6-GF50

6.1 Skenování ozubených kol

6.1.1 Pruhová projekce

Pro měření byl použit 3D skener Zeiss Comet L3D2 s otočným stolem pro polohování. Výrobce uvádí maximální dovolenou chybu indikace $MPE_E = 9 + L/50$ µm. Pro ovládání a zpracování výstupního souboru byl použit software Colin 3D. Skener používá pro projekci proužků modré světlo. Při kontrolách dílů různých velikostí je možné vyměňovat objektivy kamery a projektoru s rozdílným zorným polem a hustotou promítaných proužků.

Pro skenování ozubených kol pruhovou projekcí bylo nejprve nutné experimentálně odladit polohu a orientaci skeneru a následně určit optimální počet skenovacích poloh tak, aby byly zcela naskenovány všechny zuby. Po naskenování je vytvořena síť a provedena optimalizace překrytí snímků.

Kvalifikace

Před měřením je nutné nechat skener zahřát na provozní teplotu (cca do 20 minut) a pak provést kvalifikaci. Ta se provádí pomocí desky s polem bodů. V závislosti na použitém objektivu se používají dvě velikosti kalibračních desek. Na středu desky jsou tři větší řídící body uspořádané tak, aby ze snímků byla jasně dána orientace otočení desky. Pro kvalifikaci jsou pořízeny snímky desky v devíti polohách v různé vzdálenosti, úhlu a otočení desky podle šablony. Skener je při kvalifikaci umístěn ve vodorovné poloze ve výšce středu desky. Vzdálenost je nastavena pomocí dvou laserových ukazovátek, která v optimální poloze zobrazí dva body svisle pod sebou. Po kvalifikaci je možné provést verifikaci pomocí dvou snímků s různým natočením desky.

Světelné podmínky při kvalifikaci by měli být podobné jako pro samotné měření. Je nutné vzít v úvahu světlo z oken a umělého osvětlení.

Kalibrace objektivu 45 mm Kalibrace objektivu 250 mm

Obrázek 64 Kalibrace pruhové projekce

Následně je skener nastaven do pracovní polohy. Obvykle je směr snímání skloněn dolů pod úhlem 45° a v závislosti na umístění kontrolované součásti je nastavena výška a vzdálenost od otočného stolu.

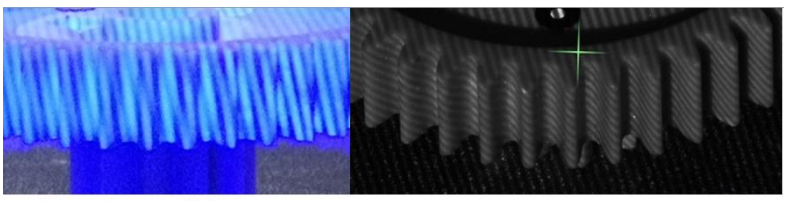
Příprava skenovaného kola

Pro zmatňující nástřik byl použit sprej Helling Developer D70. Měření proběhla s jedním nástřikem křídovým sprejem před prvním měřením a byl ponechán pro všechna opakování. Opakovaná měření by tak neměla být tolik ovlivněna různou kvalitou nástřiku a dodržením jeho tloušťky.

Protože je kolo snímáno v několika polohách a nemá významně odlišné geometrické oblasti pro určení natočení, bylo nutné nalepit na čelo orientační body. Orientační body jsou černé kruhové terčíky s bílým středem. Byly použity tři nepravidelně umístěné orientační body.

Nastavení polohy skeneru

Pro první pokusy o skenování byl skener skloněn o 45° směrem dolů a kolo bylo umístěno na středu otočného stolu ve vodorovné poloze. Proužky se ovšem v této poloze promítly rovnoběžně se zuby a díky tomu připadal na jednu zubovou mezeru nedostatečný počet proužků. Vzhledem k malému počtu vyhodnocovaných profilů tak skener nebyl schopen sestavit tvar. Pro další skenování tak bylo nutné skener naklonit, aby se proužky promítaly různoběžně se zuby. V případě že by proužky byly promítnuty vodorovně, jejich délka promítnutá na boku zubu by byla kratší.



Skener v horizontální poloze Skener nakloněný o 30°

Obrázek 65 Promítnutí proužku v horizontální a nakloněné poloze

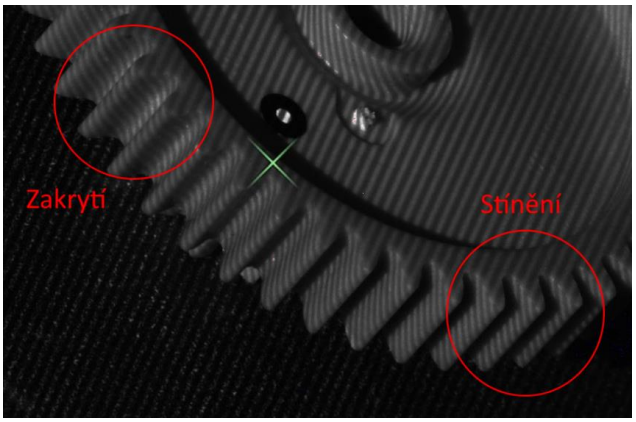
Náklon bylo vhodné orientovat na levou stranu ve směru snímání, aby byla kamera výš než projektor a byla schopná zároveň snímat proužky promítnuté na díru pro hřídel kola do větší hloubky. Pokud by byl skener skloněn na druhou stranu, proužky by sice byly promítnuté do díry, ale kamera by je měla zakryté okrajem díry.

Obrázek 66 Poloha pro skenování ozubených kol

Skener byl pro celé měření ponechán v jedné poloze, aby polohování součásti bylo prováděno pouze otočným stolem a nemohlo tak dojít ke zkreslení.

Počet snímaných poloh

Počet poloh pro skenování je vzhledem k možnému vzniku nepřesností při skládání jednotlivých snímků vhodné volit co nejmenší. Při skenování zubových mezer ovšem nastává problém, že mezery mohou být v zákrytu se sousedními zuby nebo v jejich stínu (tj. bok zubu je viditelný ale nejsou na něj promítnuty proužky).



Obrázek 67 Zakrytí a stínění zubových mezer

Bylo provedeno několik skenů s různým počtem snímků. Při nižším počtu poloh vlivem stínění a zakrytí nebylo možné skenovat v oblasti paty zubu. Dostatečného naskenování bylo dosaženo při počtu poloh 1 až 2 násobku počtu zubů kola.

Počet nutných poloh se ovšem neodvíjí pouze od počtu zubů kola. Záleží také na modulu ozubení, použitých objektivech a případném podřezání zubů. Při větším modulu může být počet pozic menší, protože zuby jsou větší a každá zubová mezera je viditelná z většího rozsahu úhlu polohování.

Zpracování skenů

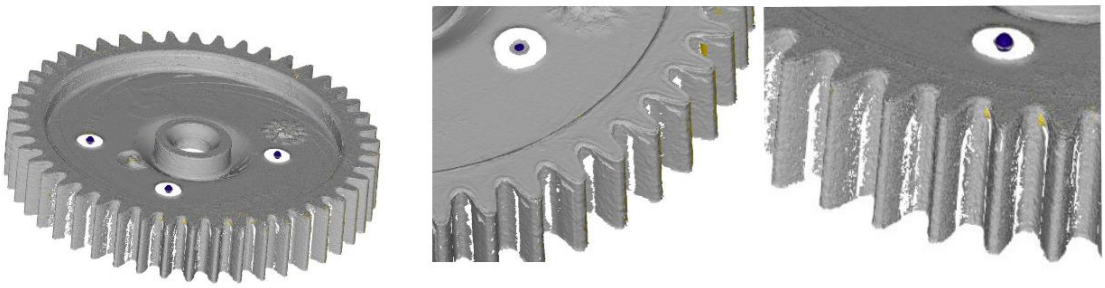
Po naskenování jsou jednotlivé snímky složeny pomocí orientačních bodů, nalepených na kolech. Dále jsou odstraněny nasnímané body pozadí a otočného stolu. Poté byla provedena optimalizace překrytí snímků a vytvořena síť. Pro vytvoření a optimalizaci sítě nabízí software Colin3D několik možností podle účelu skenování. Pro účely kontroly ozubení bylo vybráno předdefinované nastavení pro kontrolu kvality. Nakonec byl sken exportován ve formátu s příponou .stl (stereolitography).

Skenování plastového kola

Pro kontrolu plastového kola byl zvolen objektiv s nejmenším polem 45 mm.

Protože na testovacích snímcích povrch kola nedělal odlesky, nebylo nutné jeho povrch zmatňovat.

Vzhledem k malým rozměrům, velkému počtu zubů a malému modulu byl charakter zubových mezer úzký a hluboký, což vedlo k velmi omezenému úhlu, ve kterém bylo možné pozorovat celou zubovou mezeru. Zejména v oblasti paty zubu nebyl skener schopen extrahovat body a na výsledném skenu chyběly plochy. Tyto plochy jsou nutné pro vyhodnocení profilu a sklonu zubu. I přes zvyšování počtu snímaných poloh nebylo možné kolo dostatečně naskenovat pro účely kontroly geometrie a rozměrů ozubení.



Obrázek 68 Sken plastového kola pruhovou projekcí

V těchto případech je možné softwarově aproximovat plochu. Toto řešení by bylo možné použít například pro účely reverzního inženýrství, není ovšem vhodné pro kontrolu rozměrů a geometrie.

Dalším problémem bylo skenování oblasti díry pro osu kola. Tato plocha by byla nutná pro nastavení výchozí osy pro vyhodnocení charakteristik ozubení. Díky sražení hrany a malému průměru nemohla být naskenována do dostatečné hloubky a zkreslovala by výsledky vyhodnocení. Tento problém by bylo možné řešit umístěním přesné hřídele do díry při skenování tak, aby vyčníval v dostatečné délce. Naskenovaná vnější válcová plocha by pak mohla být použita pro vyrovnání při vyhodnocení. Dalším možným řešením tohoto problému by bylo určení výchozí osy jinou metodou – pomocí normály k rovině čela a středu díry.

Plastové kolo se pomocí pruhové projekce nepovedlo naskenovat v dostatečném rozsahu a kvalitě pro další vyhodnocení.

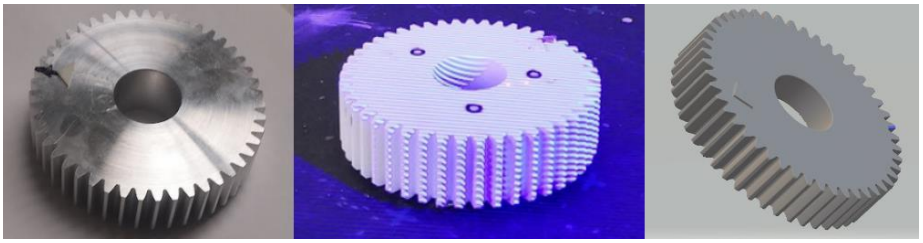
Skenování hliníkového kola

U hliníkového kola bylo nutné nejprve nanést křídový sprej pro zmatnění, protože povrch zubů dělal odlesky. Nástřik byl proveden z několika úhlů po obvodu, aby byly pokryty všechny zubové mezery.

Pro skenování byly použity objektivy 250 mm.

Skenování bylo provedeno ze 70 pozic.

Aby byla porovnávána měření pomocí různých metod vždy na stejných zubech, bylo nutné označit jeden zub, aby byla definována orientace natočení. U hliníkového kola byla pro toto označení použita pěnová páska. Na kolo byly umístěny tři orientační body pro skenování.



Obrázek 69 Skenování hliníkového kola pruhovou projekcí

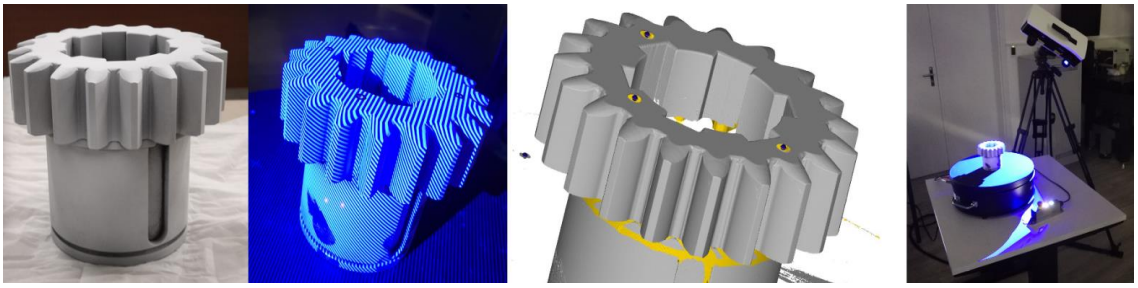
Skenování ocelového kola

Na ocelové kolo byl nanesen křídový sprej pro zmatnění a nalepeny tři orientační body pro skenování.

Pro skenování byly použity objektivy 250 mm.

Skenování bylo provedeno z 25 poloh.

Orientace natočení kola je určena jedním zubem, který má částečně frézovaný bok. Díky velkému modulu a malému počtu zubů probíhalo skenování ocelového kola bez komplikací a nutnosti provádět opakovaná měření, pokud sken nevyšel.



Obrázek 70 Skenování ocelového kola pruhovou projekcí

6.1.2 Výpočetní tomografie

K měření byl použit stroj Zeiss Metrotom 1500. Výrobce uvádí maximální dovolenou chybu indikace $MPE_E = 9 + L/50$ µm.

Umístění součásti

Před měřením je nutné nastavit pozici tak, aby bylo ozubené kolo umístěno ve výšce detektoru. Kolo bylo podloženo s náklonem o 45° na polystyrenových kvádrech. Polystyren je pro uložení součásti vhodný proto, že je pro rentgenové záření díky nízké hustotě transparentní. Kolo musí být umístěno na ose otáčení stolu, aby v průběhu polohování zabíral co nejméně prostoru.

Naklonění součásti je nutné kvůli kónickému tvaru prozařované oblasti. Tento tvar v kombinaci s otáčením stolu v průběhu měření může vést k rozmazání obrazu součásti v oblastech vzdálenějších ve směru osy otáčení stolu (nahoře a dole). Při naklonění jsou hranice objektu přesněji definovány a omezí se zkreslení rozměrů a tvaru. Tento jev se nazývá Fieldkamp efekt.

Pro eliminaci nízkoenergetických částic byl použit měděný filtr.

Pro měření se nastavují hodnoty napětí a proudu pro zdroj záření v závislosti na materiálu a maximální tloušťce, která se má prozářit. Následně byla z mraku bodů vytvořena síť a exportován soubor .stl.

Pro export dat byl použit software VGSTUDIO MAX. Pro redukci bodů bylo použito předefinované nastavení Precise.

Ocelové kolo

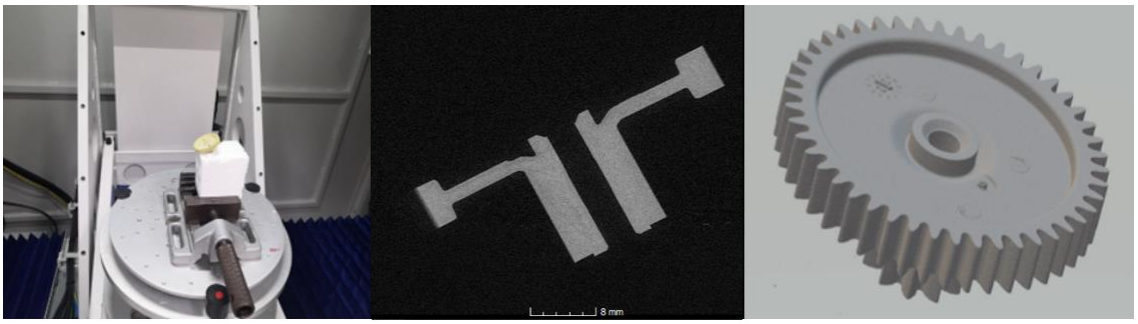
Ocelové kolo nebylo možné měřit pomocí CT, protože na jeho prozáření by byl nutný silnější zdroj záření. Maximální prozařovaná tloušťka pro ocelové součásti je u použitého stroje 50 mm.

Plastové kolo

Pro plastové kolo bylo nastaveno napětí 180 kV a proud 330 µA.

Snímání proběhlo z 1700 poloh. Byl použit měděný filtr tloušťky 0,5 mm.

Pro orientaci natočení byla použita značka data výroby na kole.



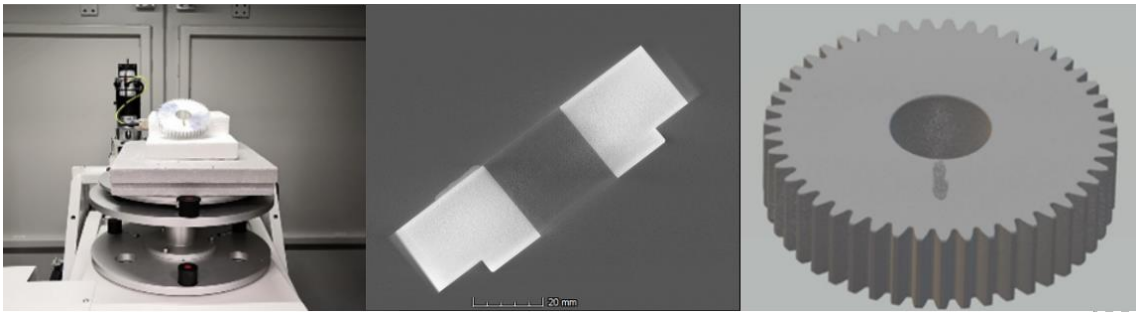
Obrázek 71 Snímání plastového kola na CT

Hliníkové kolo

Pro hliníkové kolo bylo nastaveno napětí 200 kV a proud 680 µA.

Snímání proběhlo ze 1700 poloh. Byl použit měděný filtr tloušťky 1 mm.

Pro orientaci natočení byla použita plastická hmota. Tvar pěnové pásky, která byla použita pro označení orientace při pruhové projekci, by mohl být odfiltrován.



Obrázek 72 Snímání hliníkového kola na CT

6.2 Měření na CMM

Měření proběhlo na stroji Zeiss Prismo VAST 7. Výrobce uvádí maximální chybu indikace $MPE_E = 2,7 + L/300$.

K ovládání stroje a vyhodnocení byl použit software Calypso 2020 a při kontrole ozubení je dále doplněn programem GearPro involute 2020, který pracuje jako makro pro vyhodnocení speciálního elementu pro Calypso. Tento software byl použit i pro vyhodnocení dat, získaných z pruhové projekce a CT.

Na CMM byla vyhodnocena všechna kola a toto měření bylo dále využito jako reference pro porovnání technologií.

Postup měření na CMM

Před samotným měřením je nutné zvolit vhodné upnutí součásti a sestavit snímací systém pro změření všech elementů.

Kvalifikace snímačů se provádí pomocí kalibrační koule. Její poloha je nejprve zaměřena referenčním snímačem. Následně jsou kvalifikovány jednotlivé snímače měřením koule a určením korekcí. Výsledkem je posouzení chyby průměru kuličky snímače a její tvarové úchylky. Zároveň je možné zjistit případnou nedostatečnou tuhost snímače.

Vyrovnání součásti je určení polohy a orientace kontrolované součásti v pracovním prostoru stroje.

Při kontrole ozubených kol je definována výchozí osa – u všech kontrolovaných kol byla určena pomocí díry pro hřídel a čelní roviny. Díra pro hřídel určuje směr osy Z a tím i nulovou hodnotu osy X a Y. Čelní rovina určuje nulovou hodnotu osy Z.

Aby byly porovnávány naměřené hodnoty pro stejné zuby, bylo u měření pomocí CMM nutné vizuálně zkontrolovat, zda snímač měří jako první označený zub. Pokud se tak

nestane, kolo stačí fyzicky pootočit, provést znovu vyrovnání součásti a opakovat měření.

Volba měřených elementů se provádí v programu Calypso.

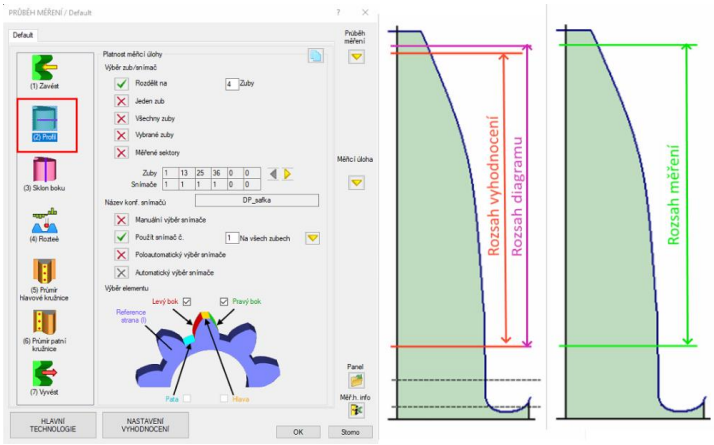
Měřené byly elementy pro vyrovnání a následně ozubení. Pro definici měření ozubení je nejprve nutné přepnout z Calypso do programu GearPro, kde jsou definovány rozměry ozubeného kola jako počet zubů, modul, korekce, úhel záběru a úhel sklonu zubů. Souřadný systém kola je přejat z vyrovnání v programu Calypso. U každého elementu jsou definovány strategie snímání, rychlost pohybu snímače a rozsahy měření.

Nastavení průběhu měření ozubeného kola

V programu GearPro je měření rozděleno do několika fází – zavedení snímače, měření profilu, sklonu zubu, rozteče, průměru hlavové a patní kružnice a vyvedení snímače.

Zavedení snímače se provádí do zubové mezery ve směru osy +X. Jsou zaměřeny body z levého i pravého boku a snímač se zastředí. Tím je určena orientace natočení reálné součásti.

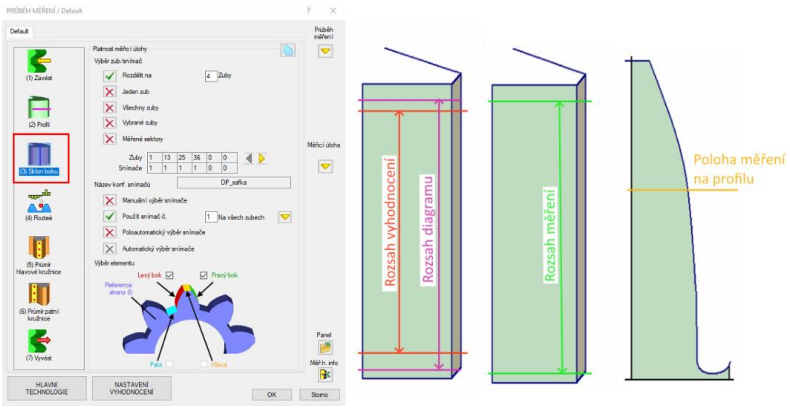
Profil je u přímého ozubení měřen v rovině rovnoběžné s čelní rovinou kola. Je definován začátek a konec měření, rozsah diagramu a rozsah vyhodnocení.



Obrázek 73 Nastavení měřené profilu

Sklon zubu má definován začátek a konec měření, rozsah diagramu a vyhodnocení.

Při jejich nastavování je nutné brát v úvahu sražení hran a zaoblení na koncích zubů. Rozsahy diagramu a vyhodnocení je nutné nastavit stejně pro měření CMM a vyhodnocení skenů bezkontaktních systémů, aby výsledky byly porovnatelné.



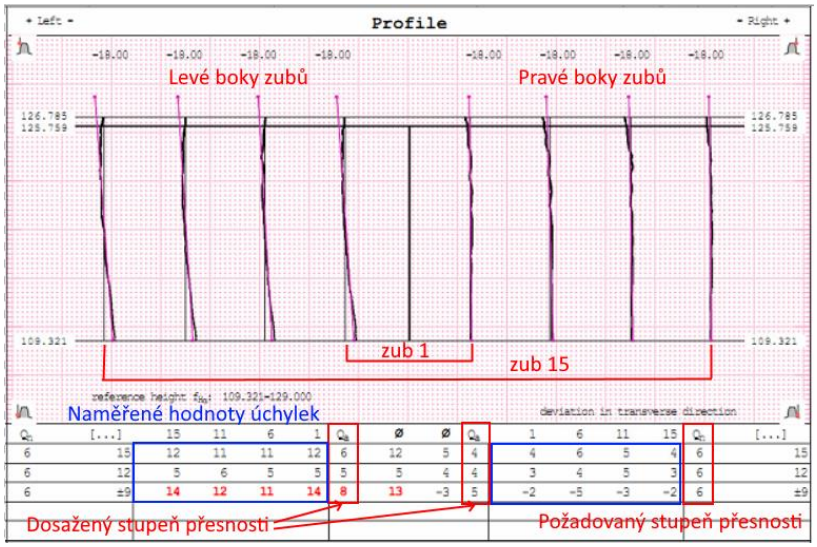
Obrázek 74 Nastavení měření sklonu zubu

Nastavení tolerancí charakteristik je možné nastavit každou hodnotu tolerance ručně, nebo použít předdefinované hodnoty podle normy ČSN ISO 1328. Hodnoty tolerancí jsou pak načteny podle požadovaného stupně přesnosti ozubení.

Pro účely této práce nastavení stupně přesnosti nehrálo roli, protože jsou porovnávány přímo hodnoty jednotlivých úchylek.

Protokol o měření je na konci vygenerován ve formátu PDF, na němž jsou uvedeny naměřené hodnoty předem zvolených úchylek na jednotlivých vyhodnocovaných zubech.

Uspořádání diagramů a hodnot je souměrné pro levé a pravé boky zubů. Na protokolu je uvedena požadovaná třída přesnosti a třída přesnosti, které odpovídají naměřené úchylky.



Obrázek 75 Vyhodnocení měření profilu

Měřítko pro diagramy vyhodnocení bylo nastaveno stejné pro měření jednoho kola všemi metodami. Diagramy se pak dají lépe porovnat a určit, jak se odlišují měření bezkontaktními systémy oproti referenci.

Měření plastového kola

Díky tomu, že toto kolo již v minulosti bylo kontrolováno v Měrovém středisku FS ČVUT, byl použit již hotový plán měření. Z plánu měření byla vynechána kontrola druhého ozubení s menším počtem zubů.

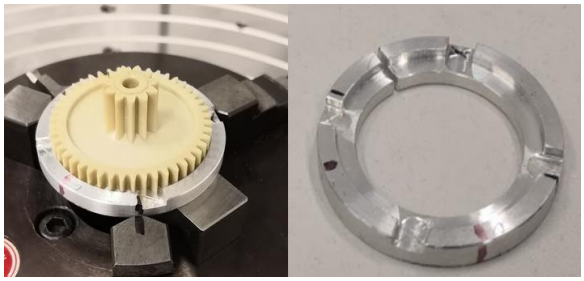
Měření bylo provedeno pomocí otočného stolu. Při jeho použití je nutné dodržet laboratorní teplotu a v případě její změny stůl překalibrovat, aby nedošlo k ovlivnění měření.

Osu RT je nutné zaměřit. Nejprve je do sklíčidla upnut přesný broušený válec a manuálně se provede vyrovnání. Poté je pro úsporu času použit CNC program, který změří dva řezy válce co nejvíce vzdálené od sebe. Následně se stůl otočí o 180° a stroj zaměří válec znovu. Z os těchto dvou válců se vytvoří symetrie – osa otočného stolu.

Je nutné zajistit, aby při zaměření osy RT byl stroj v ustáleném provozním stavu. Z tohoto důvodu byl stroj před měřením ponechán zapnutý s již připevněným RT 4 hodiny před měřením. Zároveň bylo v místnosti rozsvíceno, aby klimatizační systém reguloval teplotu včetně tepelného výkonu svítidel.

Obrázek 76 Zaměření osy RT

Kolo kvůli malým rozměrům muselo být upnuto do kleštiny, aby nedošlo k poškození zubů. Kleština ovšem zabraňovala přístupu snímače do zhruba ¼ výšky. Proto u čtyř měřených zubů po obvodu byla kleština vyfrézována, aby nepřekážela snímači při měření sklonu zubu v celé délce.



Obrázek 77 Upnutí plastového kola při měření na CMM

Pro měření byl použit snímací systém se dvěma snímači. První snímač ve směru osy -Z s průměrem rubínové kuličky 1 mm - pro zaměření díry pro hřídel. Druhý snímač na zahnutém prodloužení s průměrem kuličky 0,5 mm - pro měření zubů. Snímač se zahnutým prodloužením byl použit proto, aby umožňoval případné měření i u druhého ozubení tohoto kola.

Měření díry pro hřídel bylo provedeno na 4 řezech, protože střední část díry má rozšířený průměr. V každém řezu bylo snímáno 500 bodů. Kružnice byly vyhodnoceny jako vepsaný element. Pro určení nulového bodu osy Z byl naměřen jeden bod na čele kola. Tato reference byla dodržena i u vyhodnocení CT skenu tohoto kola.

Měření ozubení pomocí RT pak probíhá tak, že snímací systém měří vždy v oblasti ve směru osy +X souřadného systému stroje. Zub, který má být měřen, je otočným stolem napolohován směrem k snímači a ten provede jeho měření.

Na kleštině a čelisti sklíčidla je na obrázku vidět značka nakreslená fixem. Ta slouží k usnadnění opětovného upnutí. Při prvním měření bylo kolo upnuto tak, aby označený zub byl ve směru osy +X. Pozorováním prvního měření bylo potvrzeno, že se snímač správně zastředil a měření probíhalo na požadovaných zubech. V průběhu opakovaných měření byla sledována teplota, která byla po celou dobu v rozsahu 0,15°C. Pokud by se teplota výrazněji změnila (0,5°C a více) bylo by nutné součást vyjmout, upnout broušený válec a opětovně zaměřit osu RT.

Vzhledem k malému rozměru snímače a zakřivení zubů byla rychlost snímače při měření ozubení snížena na 0,5 mm/s, aby nedošlo ke zkreslení výsledků měření. Odstup jednotlivých bodů měření profilu byl 10 µm u sklonu zubu 50 µm.

Měření samotných profilů a sklonů zubů je poměrně rychlé, probíhalo na 4 zubech. Nejvíce strojního času zabralo měření bodů pro vyhodnocení rozteče a průměrů hlavové a patní kružnice.

Měření hliníkového kola

Kolo bylo upnuto do univerzálního tříčelisťového sklíčidla za vnější průměr válcové části. Pro změření všech elementů stačil jeden snímač ve směru osy -Z s průměrem rubínové kuličky 1,5 mm, kterým bylo možné zaměřit všechny elementy pro vyrovnání a všechny zuby.

Kvůli modulu, počtu zubů a délce kola bylo nutné použít tento snímač, který má poměrně malý průměr a dlouhý dřík. Snímač má pak vlivem štíhlé geometrie nižší tuhost. Aby měření nebylo zkresleno, byla snížena síla doteku z běžně používaných 200mN na 100mN. Pokud by mělo kolo větší počet zubů nebo menší modul, bylo by nutné měření provést buď s využitím RT nebo pomocí snímacího systému uspořádanému do hvězdy.

Díra pro hřídel byla zaměřena na 2 řezy po 500 bodech. Měření díry bylo vyhodnoceno, jako vepsaný element. Pro určení počátku osy Z byl na čele kola zaměřen jeden bod.

Měření oproti použití RT probíhá tak, že kolo zůstává po celou dobu měření na jednom místě a všechny pohyby jsou vykonávány snímacím systémem.

Rychlost pohybu snímače pro zaměření elementů pro vyrovnání byla 3 mm/s a pro měření ozubení 2 mm/s. Odstup jednotlivých bodů měření profilu byl 10 µm u sklonu zubu 50 µm.

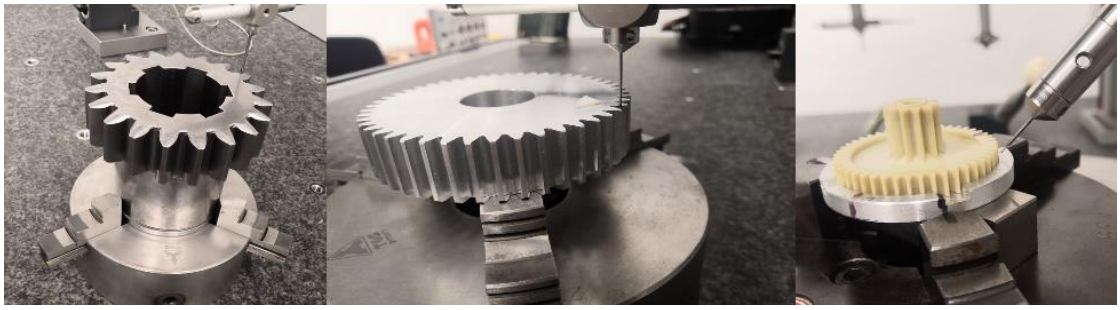
Měření ocelového kola

Kolo bylo upnuto do univerzálního tříčelisťového sklíčidla. Byl použit snímač s rubínovou kuličkou průměru 3 mm.

Protože díra pro hřídel má rovnoboké drážkování, bylo její zaměření provedeno na vnitřním průměru ve třech řezech po 6 bodech. Body byly umístěny na vnitřním průměru drážkování.

Rychlost pohybu snímače při měření elementů pro vyrovnání byla 5 mm/s, pro měření ozubení 2 mm/s. Odstup jednotlivých bodů měření profilu byl 10 µm u sklonu zubu 50 µm.

Při přípravě plánu měření bylo nutné zkrátit délku měření sklonu zubu kvůli výraznému sražení na čele kola.



Obrázek 78 Měření kol na CMM

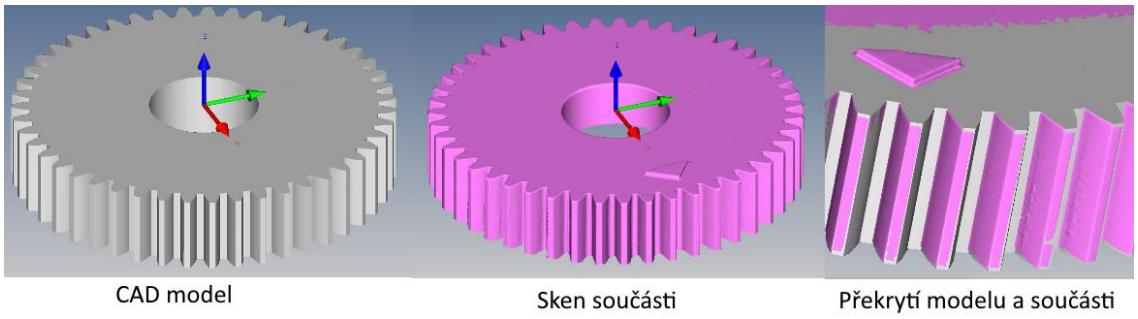
6.3 Vyhodnocení měření bezkontaktních snímacích systémů

Výstupem ze skenování kol bezkontaktními systémy byly plošné sítě ve formátu stl. Tyto soubory bylo nutné vyhodnotit, aby výstupem byl protokol o měření ve stejné formě jako při měření na CMM.

Pro tento účel byl využit software Calypso v režimu simulace STL. V tomto režimu je vytvořeno spojení s virtuálním strojem a použije se podobný plán měření jako pro CMM.

Vzhledem ke kvalitě a rozsahu skenů bylo nutné upravit parametry měření a vyhodnocení.

Při měření je použit virtuální snímač s nulovým poloměrem měřící kuličky. Při přepnutí do programu GearPro je režim simulace STL automaticky převzat. Načtený soubor reprezentuje reálnou součást. Programování je možné provést přímo na něm nebo na CAD modelu.



Obrázek 79 Nahrání STL pro vyhodnocení

Aby byly porovnávány vždy stejné zuby, bylo nutné orientovat směr osy +X vždy do stejné zubové mezery. K tomu byly využity značky umístěné na kolo při skenování.

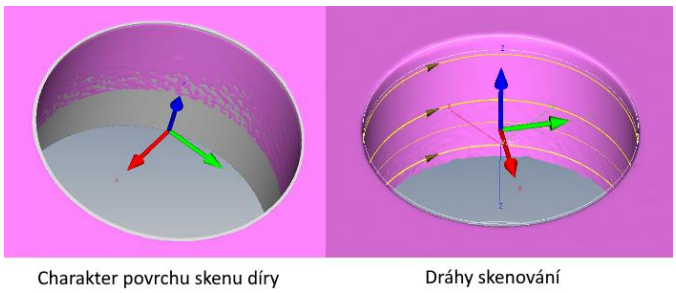
Určení orientace natočení

Při měření na CMM jsou jednotlivé elementy manuálně zaměřeny pomocí jednotlivých bodů. U skenu jsou tyto body vybrány kurzorem.

Směr osy +X pro orientaci natočení při vyrovnání byl určen pomocí kružnice, definované třemi body v zubové mezeře – dva body na bocích zubů a třetí na dně zubové mezery.

Úpravy vyhodnocení oproti CMM v závislosti na kvalitě skenu

Způsob snímání elementu oproti běžnému postupu na CMM bylo nutné upravit podle kvality a rozsahu skenů. Rozdíl práce se skeny z pruhové projekce a CT spočíval v tom, že pruhovou projekcí jsou získány sítě ploch, které jsou ze spodní strany otevřené, protože sken proběhl pouze z horní strany, zatímco u CT síť ohraničovala celý objem kola. Sken z pruhové projekce tak nemá díru pro hřídel naskenovánu v celé délce a délka vyhodnocení proto musí být zkrácena. Charakter povrchu díry se stával hrubší a vlnitější s rostoucí vzdáleností od roviny čela.

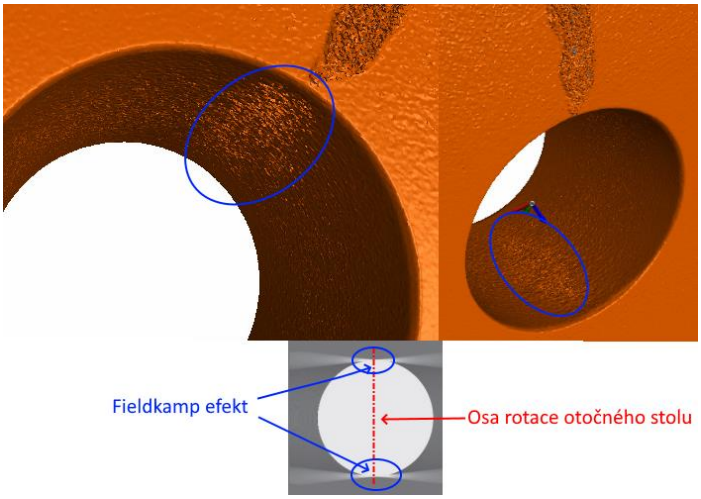


Obrázek 80 Sken díry pro hřídel pomocí pruhové projekce

Aby nedocházelo k nepřesnostem při vyrovnání, byl válec skenován ve více řezech. Při skenování vyhodnocení děr na CMM je válec vyhodnocován jako vepsaný element. To znamená, že pro stanovení výchozí osy je pak použita největší vepsaná kružnice do naměřeného profilu.

V případě pruhové projekce byl tento válec, pro účely určení výchozí osy, vyhodnocen podle kružnice, která je z naměřeného profilu určena metodou nejmenších čtverců (element-Gauss). Tím by mělo být minimalizován vliv vlnitosti povrchu skenu díry na výchozí osu. Pokud by ovšem měl být vyhodnocován i průměr díry, nebylo by možné tento způsob vyhodnocení použít.

U skenu díry hliníkového kola na CT byly v závislosti na orientaci zdeformovány plochy ve dvou protilehlých oblastech. Jedná se o Fieldkamp efekt, který vzniká při skenování oblých tvarů v oblastech elementu nejvíce vzdálených ve směru osy otáčení stolu.



Obrázek 81 Vnitřní plocha díry CT skenu u hliníkového kola

Aby byl snížen vliv této vady na výchozí osu měření, bylo nutné válec vyhodnotit jako vepsaný element, protože deformace směřovala směrem do plného materiálu. V tomto případě se efekt více projevil na horní straně. Osa by tím pádem byla při použití metody nejmenších čtverců posunuta tímto směrem.

Měření roviny čela kola by mohlo být ovlivněno vlnitostí skenu. Tento problém je možné řešit použitím skenování většího množství bodů roviny na kruhové dráze. Tento problém ovšem není v tomto případě zásadní, protože rovina slouží pouze k určení polohy nulového bodu osy Z, která není tak zásadní pro tento případ měření ozubení.

6.4 Porovnání výsledků měření

Ocelové kolo bylo měřeno pomocí pruhové projekce a CMM, hliníkové kolo bylo měřeno pomocí všech tří metod a plastové kolo pomocí CMM a CT.

Vyhodnocení probíhalo vždy na stejných zubech. Pro tento účel bylo vždy nutné zachovávat orientaci natočení a pořadí měření zubů.

Porovnány byly naměřené charakteristiky celkové úchylky profilu, celkové úchylky sklonu zubu, obvodového házení a úchylka jednotlivé rozteče.

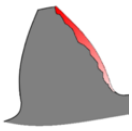
Jako reference bylo použito měření na CMM.

Dále byly porovnány průběhy diagramů měření profilu a sklonu zubu.

Porovnání hodnot naměřených úchylek

Celková úchylka profilu

Tabulka 4 Porovnání celkových úchylek profilu

		Celková úchylka profilu F_α								
			levý bok				pravý bok			
Kolo hliník		číslo zubu	36	25	13	1	1	13	25	36
	CMM	F_α max [µm]	24	28	38	22	20	34	22	53
		F_α min [µm]	24	27	38	22	20	34	22	52
		F_α max-min [µm]	0	1	0	0	0	0	0	1
	Pruhová projekce	F_α max [µm]	97	97	88	165	21	47	28	69
		F_α min [µm]	92	89	84	152	19	43	23	56
		F_α max-min [µm]	5	8	4	13	2	4	5	13
	CT	F_α max [µm]	82	32	72	28	30	100	26	122
		F_α min [µm]	52	23	45	14	17	44	19	93
		F_α max-min [µm]	30	9	27	14	13	56	7	29
Kolo ocel		číslo zubu	15	11	6	1	1	6	11	15
	CMM	F_α max [µm]	13	12	11	12	4	7	5	4
		F_α min [µm]	12	11	11	12	4	6	5	4
		F_α max-min [µm]	1	1	0	0	0	1	0	0
	Pruhová projekce	F_α max [µm]	16	11	14	16	7	13	7	11
		F_α min [µm]	9	7	10	12	7	9	5	8
		F_α max-min [µm]	7	4	4	4	0	4	2	3
Kolo plast		číslo zubu	36	24	12	1	1	12	24	36
	CMM	F_α max [µm]	3	6	5	9	4	4	4	9
		F_α min [µm]	3	6	5	9	4	4	4	8
		F_α max-min [µm]	0	0	0	0	0	0	0	1
	CT	F_α max [µm]	28	26	20	19	22	17	30	28
		F_α min [µm]	15	13	11	10	8	12	13	18
		F_α max-min [µm]	13	13	9	9	14	5	17	10

Měření úchylek profilu má nejlepší opakovatelnost referenčního měření pomocí CMM. V rámci opakovaných měření se úchylka lišila maximálně o jeden mikrometr. Naměřené úchylky pomocí bezkontaktních systémů jsou vyšší oproti referenci.

Hliníkové kolo

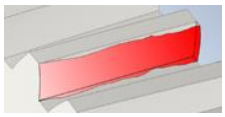
Měření pomocí pruhové projekce mělo největší hodnotu úchylky oproti referenci o 143 µm větší, na levém boku zubu 1. Největší rozpětí naměřených hodnot bylo 13 µm. U CT byl největší rozdíl oproti referenci o 70 µm větší, na pravém boku zubu 36. Největší rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 56 µm. Měření pomocí pruhové projekce mělo vyšší hodnoty úchylek vždy na levém boku zubu. Úchylky CT jsou vyšší na obou bocích zubů 13 a 36.

Ocelové kolo mělo největší rozdíl od reference 7 µm, na pravém boku zubu 15. Opakovatelnost byla nejhorší na levém boku zubu 15 s rozpětím hodnot 7 µm. Levé boky zubů měly větší hodnoty úchylek než pravé.

Plastové kolo měřené pomocí CT mělo vyšší hodnoty úchylek oproti referenci. Největší rozdíl oproti referenčnímu měření byl 26 µm, na pravém boku zubu 24. Největší rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 17 µm.

Celková úchylka sklonu zubu

Tabulka 5 Porovnání celkových úchylek sklonu

		Celková úchylka sklonu zubu F_β	levý bok				pravý bok			
Kolo hliník		**číslo zubu**	**36**	**25**	**13**	**1**	**1**	**13**	**25**	**36**
	CMM	**F_β max [µm]**	16	19	25	5	6	10	13	22
		F_β min [µm]	16	18	24	5	6	10	12	22
		F_β max-min [µm]	0	1	1	0	0	0	1	0
	Pruhová projekce	**F_β max [µm]**	23	25	38	9	15	19	25	19
		F_β min [µm]	18	24	35	8	13	17	22	18
		F_β max-min [µm]	5	1	3	1	2	2	3	1
	CT	**F_β max [µm]**	109	32	69	30	32	110	27	117
		F_β min [µm]	80	20	50	16	23	90	17	90
		F_β max-min [µm]	29	12	19	14	9	20	10	27
Kolo ocel		**číslo zubu**	**15**	**11**	**6**	**1**	**1**	**6**	**11**	**15**
	CMM	**F_β max [µm]**	5	4	3	3	2	4	2	2
		F_β min [µm]	4	3	3	2	2	4	2	1
		F_β max-min [µm]	1	1	0	1	0	0	0	1
	Pruhová projekce	**F_β max [µm]**	18	13	12	16	13	15	21	12
		F_β min [µm]	11	9	7	10	5	10	14	9
		F_β max-min [µm]	7	4	5	6	8	5	7	3
Kolo plast		**číslo zubu**	**36**	**24**	**12**	**1**	**1**	**12**	**24**	**36**
	CMM	**F_β max [µm]**	14	8	16	9	11	13	2	18
		F_β min [µm]	14	8	15	9	10	12	2	18
		F_β max-min [µm]	0	0	1	0	1	1	0	0
	CT	**F_β max [µm]**	41	38	45	26	33	59	33	48
		F_β min [µm]	33	22	30	18	19	39	21	35
		F_β max-min [µm]	8	16	15	8	14	20	12	13

Referenční měření úchylky sklonu zubu pomocí CMM mělo nejlepší opakovatelnost. Stejně jako u měření profilu zubu byl rozdíl v opakovaných měřeních do 1 µm.

Hliníkové kolo

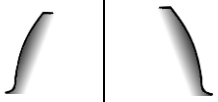
Největší rozdíl naměřené úchylky pruhovou projekcí oproti referenci byl 14 µm, na levém boku zubu 13. maximální rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 5 µm. U CT byl maximální rozdíl oproti referenci 100 µm, na pravém boku zubu 13. Maximální rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 29 µm. U CT byly výrazně větší úchylky na zubech 13 a 36.

Ocelové kolo mělo největší rozdíl od referenčního měření 19 µm, na pravém boku zubu 11. Maximální rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 8 µm.

Plastové kolo mělo největší rozdíl od referenčního měření 47 µm, na pravém boku zubu 12. Maximální rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 20 µm. Vyšší hodnoty úchylek byly na zubech 12 a 36.

Úchylka jednotlivé rozteče

Tabulka 6 Porovnání úchylek jednotlivé rozteče

Úchylka jednotlivé rozteče f_p				
			levý bok	**pravý bok**
Kolo hliník	**CMM**	**f_p max [µm]**	28	37
		f_p min [µm]	27	36
		f_p max-min [µm]	1	1
	Pruhová projekce	**f_p max [µm]**	29	32
		f_p min [µm]	24	30
		f_p max-min [µm]	5	2
	CT	**f_p max [µm]**	84	74
		f_p min [µm]	35	49
		f_p max-min [µm]	49	25
Kolo ocel	**CMM**	**f_p max [µm]**	5	5
		f_p min [µm]	4	5
		f_p max-min [µm]	1	0
	Pruhová projekce	**f_p max [µm]**	13	13
		f_p min [µm]	9	6
		f_p max-min [µm]	4	7
Kolo plast	**CMM**	**f_p max [µm]**	18	20
		f_p min [µm]	18	20
		f_p max-min [µm]	0	0
	CT	**f_p max [µm]**	28	35
		f_p min [µm]	21	21
		f_p max-min [µm]	7	14

Úchylka jednotlivé rozteče f_p je měřena na jeden bod dotyku z levé a pravé strany zubu.

Referenční měření úchylky sklonu zubu pomocí CMM mělo nejlepší opakovatelnost. Rozdíl v opakovaných měřeních byl do 1 µm.

Hliníkové kolo

Úchylky měřené pruhovou projekcí byly oproti referenci nižší, na levých bocích se lišily maximálně o 4 µm, na pravých o 7 µm. Hodny opakovaných měření měly větší rozpětí na levých bocích v rámci 5 µm. U CT byly úchylky výrazně vyšší. Na levých bocích o 57 µm, na pravých o 38 µm. Rozpětí hodnot opakovaných měření bylo větší na levých bocích a to 49 µm.

Ocelové kolo mělo hodnoty úchylek oproti referenci vyšší. Na levých i pravých bocích o 9 µm. Rozpětí hodnot opakovaných měření byl horší na pravých bocích, v rámci 7 µm.

Plastové kolo

Naměřené hodnoty úchylek byly vyšší. Na pravých bocích až o 15 µm. Rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 14 µm.

Obvodové házení

Tabulka 7 Porovnání obvodových házení

Obvodové házení F_r			
Kolo hliník	CMM	F_r max [µm]	205
		F_r min [µm]	204
		F_r max-min [µm]	1
	Pruhová projekce	F_r max [µm]	227
		F_r min [µm]	220
		F_r max-min [µm]	7
	CT	F_r max [µm]	209
		F_r min [µm]	179
		F_r max-min [µm]	30
Kolo ocel	CMM	F_r max [µm]	10
		F_r min [µm]	9
		F_r max-min [µm]	1
	Pruhová projekce	F_r max [µm]	32
		F_r min [µm]	19
		F_r max-min [µm]	13
Kolo plast	CMM	F_r max [µm]	73
		F_r min [µm]	72
		F_r max-min [µm]	1
	CT	F_r max [µm]	69
		F_r min [µm]	50
		F_r max-min [µm]	19

Referenční měření měla dobrou opakovatelnost. Hodnoty opakovaných měření byly v rozpětí 1 µm.

Hliníkové kolo

Obvodové házení měřené pruhovou projekcí bylo až o 23 µm. Rozpětí hodnot opakovaných měření bylo 7 µm. U CT byly naměřený hodnoty nižší až o 26 µm. Hodnoty byly v rozpětí 30 µm.

Ocelové kolo

Hodnoty obvodového házení byly vyšší oproti referenci až o 23 µm. Hodnoty byly v rozpětí 13 µm.

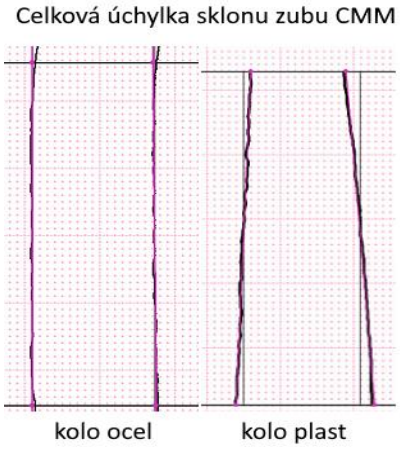
Plastové kolo mělo obvodové házení měřené na CT nižší až o 23 µm. Hodnoty byly v rozpětí 13 µm.

6.4.1 Porovnání diagramů měření profilu a sklonu zubu

Z výsledků referenčního měření má největší hodnoty celkových úchylek profilu a sklonu zubu hliníkové kolo. Kolo bylo vyrobeno frézováním odvalem a nebyly na něm provedeny dokončovací operace a díky tomu má kolo výrazně horší přesnost.

Oproti tomu ocelové kolo, které bylo broušeno, dosahuje daleko menších hodnot úchylek.

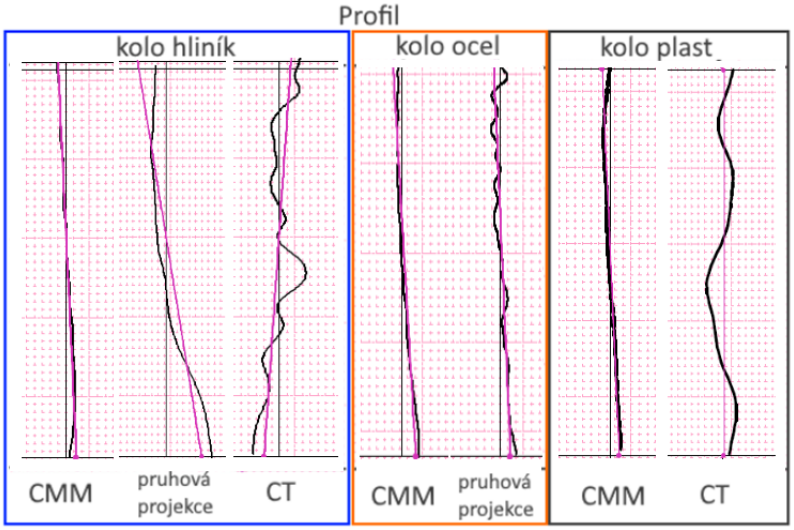
Celková úchylka sklonu zubu plastového kola je horší než u ocelového kola. Porovnáním diagramů z měření ocelového a plastového kola je u plastového kola celková úchylka sklonu zubu ovlivněna nejvíce úchylkou sklonu zubu. Tvar sklonu zubu není vlnitý.



Obrázek 82 Porovnání celkové úchylky sklonu zubu ocelového a plastového kola (měřítko 250:1)

Profil

Při porovnání diagramů měření profilů vykazují bezkontaktní snímací systémy oproti referenci větší zvlnění a rozdílný sklon. Porovnávané diagramy mají odpovídající měřítko zvlášť pro každé kolo – u hliníkového kola 100:1, u ocelového a u plastového kola 250:1.



Obrázek 83 Porovnání diagramů měření profilu

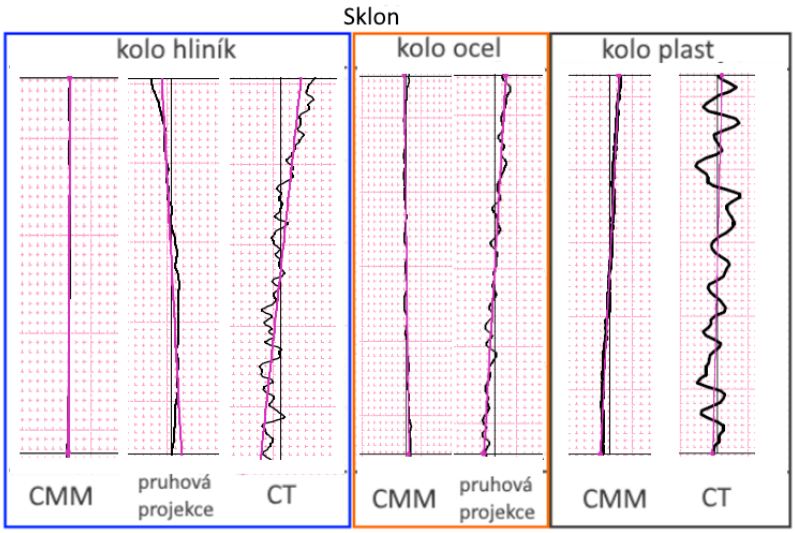
Skeny pomocí CT jsou více zvlněné, neovlivňují tolik sklon profilu. U skenů pruhovou projekcí je zkreslen celý tvar profilu a sklon je výrazně ovlivněn. Tyto odchylky jsou způsobeny charakterem ploch skenů. Kvalita ploch skenů dále může ovlivňovat přesnost vyrovnání.

Při porovnání všech diagramů v rámci jednoho měření byly patrné větší odchylky diagramů. U CT byly více zkresleny diagramy dvou protilehlých zubů. U pruhové projekce byly oproti sobě více zkresleny diagramy levých a pravých boků zubů.

U měření hliníkového kola pomocí pruhové projekce se diagramy profilu více odchylovaly u paty zubu.

Sklon zubu

Při porovnání diagramů měření sklonu zubu mají bezkontaktní snímací systémy oproti referenci větší zvlnění a rozdílný sklon zubu. Porovnávané diagramy mají odpovídající měřítko zvlášť pro každé kolo - u hliníkového kola 100:1, u ocelového a plastového kola 250:1.



Obrázek 84 Porovnání diagramů měření sklonu zubu

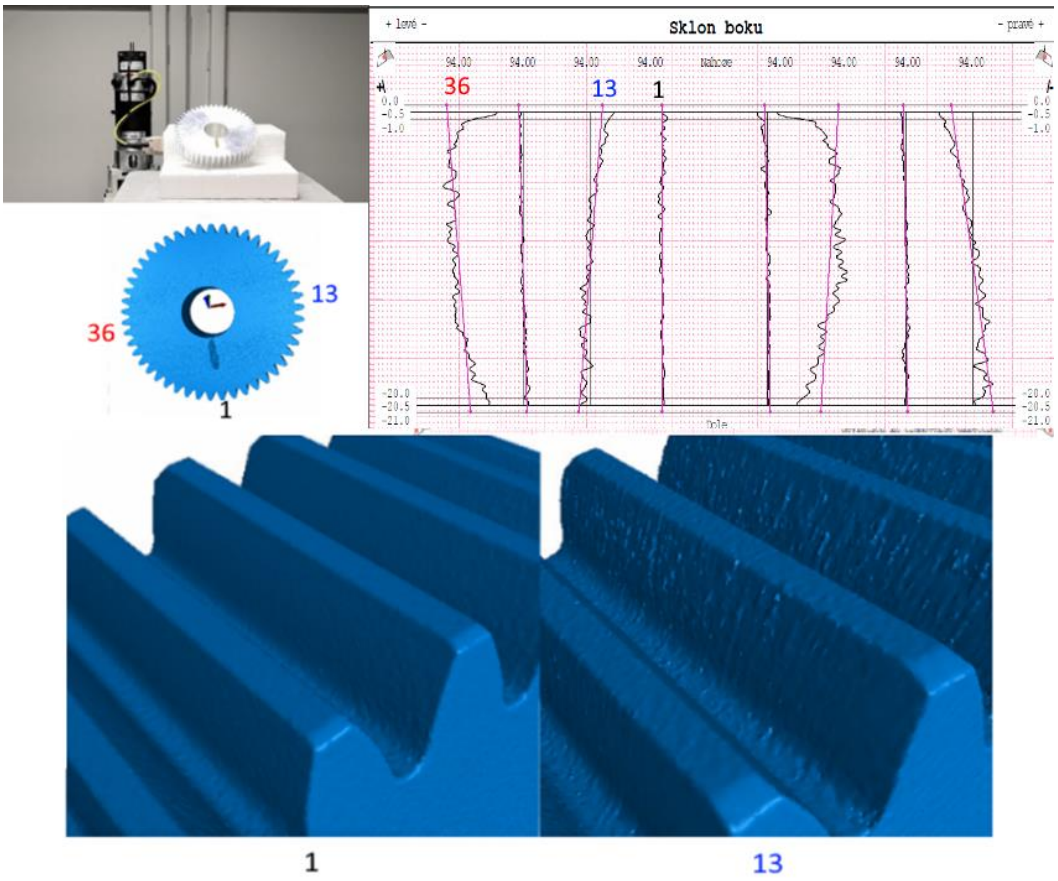
Diagramy měření sklonu zubu z CT jsou výrazně vlnitější než u reference a pruhové projekce. Skeny bezkontaktními snímacími systémy zkreslují zvlnění i sklon diagramu.

Při porovnání všech diagramů sklonu zubu v rámci jednoho měření se lišily průběhy na dvou protilehlých zubech. U pruhové projekce se (oproti měření profilu) od sebe neodchylovaly diagramy pravých a levých zubů.

6.4.2 Rozdíly diagramů v rámci jednoho měření

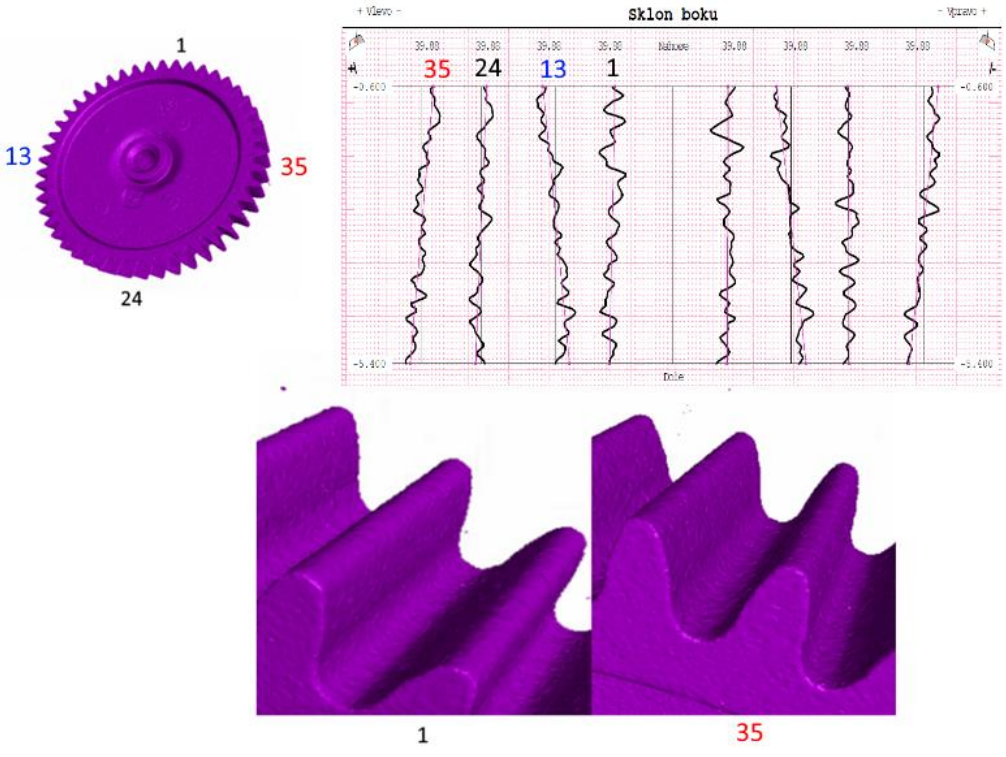
Zkreslení u dvou protilehlých zubů na CT

Diagramy měření sklonu zubu pomocí CT u hliníkového kola vykazují výrazné rozdíly na dvou protilehlých zubech nejvíce vzdálených od osy rotace stolu při měření. Tento jev se dá pozorovat už při přiblížení vizualizace CT skenu na bocích zubů, které jsou od sebe vzdáleny o jednu čtvrtinu otáčky. Umístění kola při měření bylo označeným zubem číslo 1 směrem dolů.



Obrázek 85 Rozdílné charaktery povrchu boku zubů v závislosti na orientaci u CT

U plastového kola se pak tento jev neprojevil tak výrazně. Umístění při měření bylo označeným zubem číslo 1 nahoru. Zkreslení se tak projevilo na zubech 13 a 35.



Obrázek 86 Měření sklonu boku zubu plastového kola

Podle orientace kola při měření se zkreslení projevuje na zubech nejvíce vzdálených kolmo od osy rotace stolu. Možným vysvětlením je, že při polohování kola je právě v těchto místech prozařována největší tloušťka materiálu.

Dalším faktorem může být odrazivost materiálu. Ta by se mohla více projevit právě na zubech, které směřují při polohování do detektoru a záření jimi prochází pod ostrým úhlem.

U plastového kola se tento jev neprojevil tak výrazně díky jeho malým rozměrům, menší hustotě materiálu a větší efektivitě prozáření oproti kovovému materiálu.

Při vyhodnocení měření na CT skenu se tak budou lišit výsledky podle orientace natočení součásti. Tento jev by nebyl tak dobře pozorovatelný, pokud by vyhodnocení bylo pootočeno o 45°.

Zkreslení levého a pravého boku zubu při měření pruhovou projekcí

Z diagramů a naměřených hodnot úchylek profilu a sklonu zubu byl patrný rozdíl mezi levým a pravým bokem zubu u pruhové projekce. Diagramy měření sklonu zubu vykazovali u pravého boku větší zvlnění. Profily pak byly výrazně ovlivněny v oblasti paty zubu. U vizualizace skenu bylo patrné, že blízko u dna zubové mezery byl povrch boku zubu vlnitý.

Tento jev by mohl být způsoben stíněním a zakrytím mezer sousedním zubem. Pata zubu je tak pro skener viditelná v menším úhlu napolohování než ostatní oblasti zubové mezery.

U hliníkového kola vlivem menšího modulu a většího počtu zubů se tento jev projevuje poměrně intenzivně. Oproti tomu o ocelového kola, které má větší modul a menší počet zubů, je zubová mezera pro skener viditelná z mnohem většího úhlu napolohování. Díky tomu je zubová mezera ocelového kola naskenována ve vyšší kvalitě.

Na diagramy profilu tak měl tento jev vliv v části blíže k patě zubu. U měření sklonu zubu bylo ovlivněno měření hliníkového kola, protože zvlnění dosahovalo až na úsek měření. U ocelového kola, pokud se zvlnění vytvořilo, tak nedosahovalo k oblasti vyhodnocení a měření tím nebylo ovlivněno.

6.5 Shrnutí a diskuse skenování a výsledků porovnání bezkontaktních snímacích systémů

Měření CMM

Toto měření bylo zvoleno jako referenční vzhledem k tomu, že se jedná o jeden z nejčastěji používaných a nejpřesnějších způsobů měření.

Podle údajů, které uvádí výrobce, má oproti porovnávaným technologiím menší maximální dovolenou chybu indikace. Výsledky měření pak nejsou zkresleny vlivem lesklého a odrazivého povrchu materiálu nebo jeho hustotou.

Případným omezením může být měření součástí z měkkých a pružných materiálů, protože se jedná o kontaktní systém snímání. Zdrojem nepřesnosti pak může být použití otočného stolu vlivem jeho tepelné roztažnosti, chyby polohování nebo nepřesnosti zaměření jeho osy.

Nevýhodou může být cena stroje a složitější obsluha.

Při vytváření plánu měření je nutné nastavovat větší množství parametrů, řešit případné kolize, bezpečnostní skupiny, objezdy apod.

U všech vyhodnocovaných charakteristik mělo velmi dobrou opakovatelnost. Hodnoty měly rozpětí v rámci 1 µm.

Pruhová projekce

Tato metoda se v praxi využívá spíše pro kontrolu tvarově složitějších součástí nebo obecných tvarových ploch. Pruhová projekce má dále velké uplatnění při reverzním inženýrství.

Její výhodou je poměrně jednoduché použití a ovládání. Další výhodou je jeho přenosnost. Celé zařízení včetně otočného stolu je možné uložit do dvou přepravních kufrů. Tyto kufry je možné společně s kalibračními deskami a stativem převážet v osobním automobilu (velikosti Škody Octavia combi).

Nevýhodou je citlivost na odlesky povrchu materiálu. Tento problém je řešen nanesením křídového nástřiku. Ten ovšem může být nevhodný u součástí, které mají pórovití povrch nebo prvky s úzkými dutinami, které mohou být zaneseny a jejich odstranění pak může být náročné. Odstranění křídového spreje je možné provést pod tekoucí vodou s pomocí kartáčku nebo použitím ultrazvukové myčky. Výsledky měření mohou být ovlivněny kvalitou nástřiku. Při ručním nanášení je poměrně složité zajistit konstantní tloušťku vrstvy. U ozubených kol je nutné nanášet z několika úhlů, aby byly pokryty všechny zubové mezery. Na některé oblasti může být nástřik nechtěně nanesen v několika vrstvách.

Pro skenování ozubených kol byla zvolena poloha skeneru v nakloněné poloze. Jednotlivé proužky jsou pak promítnuty ve větší délce a každý zub je vyhodnocen na větším množství proužků. Skenování s vodorovnými proužky by bylo nevhodné vzhledem k poloze projektoru a kamery. Zejména u menších kol a menší vzdálenosti

scanneru od součásti by mohlo docházet k situacím, kdy jsou proužky promítnuty na levý bok zubu, ale kamera snímá z větší části pravý. Dalším vhodným pokusem by bylo skenování kola se šikmými zuby, kde by se navíc mohlo projevit stínění a zakrytí vlivem sklonu zubu.

Plastové kolo se nepodařilo naskenovat v dostatečné kvalitě pro vyhodnocení. Problém nastával u paty zubu, kde scanner nebyl schopen snímat jejich plochy. Bylo to způsobeno velkým počtem zubů, malým modulem a menším úhlem záběru kola. Zubové mezery byly z těchto důvodů velmi úzké a hluboké. Paty zubů proto byly pro kameru viditelné pouze ve velmi úzkém úhlu polohování. Pro nasnímání kola by bylo vhodné vyzkoušet objektivy s menším polem.

U hliníkového kola se podařilo sken vytvořit. Hodnoty úchylek profilu se lišily od reference. Více se lišily hodnoty na levých bocích zubů. Tomu odpovídaly i diagramy měření profilu. Největší odchýlení se projevilo u paty zubu. Při přiblížení vizualizace skenu bylo patrné zvlnění plochy blízko dna zubové mezery. Příčinou tohoto zkreslení je poloha scanneru a otáčení stolu. Pro kameru byly lépe viditelné plochy pravých boků. Kolo má větší počet zubů a hodnotu modulu 2. Zubové mezery kvůli tomu byly, stejně jako v případě plastového kola, příliš úzké a oblasti paty zubů na levých bocích byly pro kameru viditelné v menším rozsahu úhlu polohování. Pokud by bylo možné zajistit stejnou kvalitu skenu jako byla dosažena u pravých boků, výsledky měření by se více blížily k výsledkům referenčního měření. Při porovnání diagramů pravých boků zubů bylo patrné zvlnění boku zubu 13 v oblasti paty. Tato odchylka ovšem byla zjištěna i u referenčního měření, jedná se s největší pravděpodobností o vadu kola.

Skenování ocelového kola a následné vyhodnocení se hodnotami nejvíce blížilo k výsledkům referenčního měření. Je to dáno větším modulem a menším počtem zubů. Zubové mezery jsou pak více rozevřené. Díky tomu byl také nižší počet potřebných snímků skenu a tím se zkrátila doba skenování.

Z výsledků porovnání pro hliníkové kolo byly pruhovou projekcí zjištěny výrazně odlišné hodnoty úchylek. Zejména na celkové úchylce profilu se lišila hodnota od reference až o 143 µm. U ocelového kola se nejvíce lišila hodnota obvodového házení - oproti referenci až o 23 µm.

Výpočetní tomografie

Metoda se nejčastěji využívá pro kontroly vnitřních vad materiálu a kontroly rozměrů součástí se špatně přístupnými vnitřními prvky (dutiny, kanálky, apod.), které nelze kontrolovat jinou nedestruktivní metodou.

Oproti pruhové projekci není metoda ovlivněna lesklým povrchem kontrolované součásti, je ovšem citlivá na prozařovanou tloušťku a hustotu materiálu. U některých geometrických prvků se mohou uplatňovat jevy, které zkreslují výsledky měření. Měření dále může být ovlivněno odrazivostí materiálu vůči záření. To se projevuje zejména u ploch, kterými prochází záření pod velmi ostrým úhlem.

Ocelové kolo nebylo možné skenovat, kvůli větší tloušťce stěny. Maximální tloušťka stěny pro ocel je u použitého stroje 50 mm.

Pro skenování bylo ozubené kolo skloněno o 45°. U skenu hliníkového kola se po vyhodnocení lišily hodnoty úchylek profilu a sklonu zubu. Výrazně odlišné byly hodnoty pro 13 a 36 zub. Jejich poloha byla nejvíce vzdálena od osy otáčení RT a při jejich skenování byla prozařována největší tloušťka materiálu. To vedlo ke vzniku šumu a povrch skenu v těchto oblastech byl výrazně zvlněný a zkresloval výsledky měření. U zubu 1 a 25 byl povrch hladší a výsledky se méně lišily od reference. Výsledky vyhodnocení tak jsou výrazně ovlivněny orientací natočení kola.

U naskenované díry pro hřídel se projevil Fieldkamp efekt. V nejvyšší a nejnižší oblasti plochy válce byl sken zkreslený. Pro definování výchozí osy tak bylo použito vyhodnocení pomocí největšího vepsaného elementu. Případné vyhodnocení průměru díry a jejího tvaru by tímto jevem bylo ovlivněno.

U plastového kola se rozdíly na zubech 13 a 36 neprojevily tak výrazně. Diagramy měření sklonu zubu a profilu ovšem byly výrazně vlnitější. Tím byly ovlivněny výsledky měření.

Z výsledků porovnání bylo patrné, že hodnoty úchylek pro hliníkové a plastové kolo se lišily od výsledků referenčního měření. Největší rozdíl oproti referenčnímu měření hliníkového i plastového kola byl u měření celkové úchylky sklonu zubu. Pro hliníkové kolo byl rozdíl 100 µm a pro plastové 47 µm.

Vyhodnocení skenů bezkontaktními snímacími systémy

Mraky bodů byly zpracovány do plošných sítí. Pro zpracování byly použité přednastavené parametry. U pruhové projekce bylo použito nastavení pro kontrolu kvality, pro CT bylo použito přednastavení nejvyšší kvality a pro redukci bodů přednastavení precise. Vlastnosti těchto sítí pak mají vliv na následné vyhodnocení. Bylo by tedy vhodné dále porovnat ostatní přednastavení nebo vliv různých parametrů na výsledky vyhodnocení.

7 Závěr

V úvodu práce byla vypracována rešerše v oblasti problematiky ozubení, možností výroby ozubení a možností kontroly. Dále byla zpracována norma ČSN ISO 1328, která pojednává o charakteristikách vyhodnocovaných na ozubení, způsobu jejich měření a vyhodnocení.

Následně byla porovnána měření ozubených kol pomocí bezkontaktních snímacích systémů – pruhové projekce a výpočetní tomografie. Pro porovnání byla vybrána tři kola s přímým ozubením. Kola byla vyrobena z různých materiálů – oceli, hliníkové slitiny a plastu. Kola měla různé hodnoty modulů – 6 u ocelového, 2 u hliníkového a 0,88 u plastového kola. Rozdílné materiály kol byly použity pro porovnání vlivu na měření pomocí CT. Různé počty zubů a hodnoty modulů byly zvoleny pro porovnání vlivu velikosti zubů.

Měření byla provedena na strojích používaných v měrovém středisku halových laboratoří fakulty strojní ČVUT. Jako reference bylo použito měření na souřadnicovém měřícím stroji Zeiss Prismo Vast 7, pro měření pruhovou projekcí byl použit stroj Zeiss Comet L3D2 a pro měření pomocí výpočetní tomografie byl použit stroj Zeiss Metrotom 1500.

Referenční měření pomocí CMM bylo u plastového kola provedeno pomocí otočného stolu. U hliníkového a ocelového bylo kolo upnuto ke stolu a měření provedeno pomocí jednoho snímače ve směru osy -Z. Pro měření byl použit program Calypso 2020, pro měření ozubení byl použit program GearPro involute 2020.

Sken plastového kola pruhovou projekcí se nepodařilo vytvořit v dostatečné kvalitě pro další vyhodnocení. Kvůli velmi úzkým a hlubokým zubovým mezerám nebylo možné naskenovat plochy v oblasti kolem paty zubu. Sken ocelového kola pomocí CT rovněž nebylo možné vytvořit, kvůli větší tloušťce stěny, kterou nebylo možné s použitým strojem skenovat.

Pro vyhodnocení skenů byl použit program Calypso a GearPro v režimu simulace STL. Do programu byl nahrán sken a následně provedeno měření pomocí virtuálního snímače. Při vyhodnocování byla dodržena orientace natočení kola stejná, jako u referenčního měření, aby byly porovnávány stejné zuby. Porovnání proběhlo na 4 zubech zvolených rovnoměrně po obvodu kola.

Porovnávány byly celkové úchylky profilu a sklonu zubů, úchylky jednotlivé rozteče a obvodové házení.

Z výsledků porovnání pro hliníkové kolo byly pruhovou projekcí zjištěny výrazně odlišné hodnoty úchylek. Zejména na celkové úchylce profilu se lišila hodnota od reference až o 143 µm. U ocelového kola se nejvíce lišila hodnota obvodového házení – oproti referenci až o 23 µm.

Hodnoty úchylek pro hliníkové a plastové kolo měřené pomocí CT se lišily od výsledků referenčního měření. Největší rozdíl oproti referenčnímu měření hliníkového i plastového kola byl u měření celkové úchylky sklonu zubu. Pro hliníkové kolo byl rozdíl 100 µm a pro plastové 47 µm.

U měření pruhovou projekcí byly hodnoty úchylek levých boků zubů horší než pravé. Plochy skenů v oblasti u pat zubů byly zvlněné. Tento jev se výrazně projevil u skenu hliníkového kola vlivem užších zubových mezer.

U měření pomocí CT byly výrazně horší úchylky na dvou protilehlých zubech nejvíce vzdálených ve směru kolmo na osu otáčení RT. Plochy skenů těchto zubů jsou výrazně zvlněné. Důvodem je, že v těchto místech je prozařována největší tloušťka materiálu. Oblasti plochy skenu díry pro hřídel u hliníkového kola byly zkresleny vlivem Fielkamp efektu, který vzniká při skenování oblých tvarů na CT.

Skenování pomocí pruhové projekce a CT není zcela vhodné pro kontroly ozubených kol, naměřené hodnoty úchylek se liší od úchylek naměřených pomocí CMM.

U pruhové projekce se k referenčnímu měření blížily zjištěné úchylky u ocelového kola. Případné možné uplatnění pruhové projekce při kontrole ozubení je u kol s větším modulem a menším počtem zubů, s nízkým stupněm přesnosti.

U CT se k výsledkům referenčního měření více blížily hodnoty zjištěné na plastovém kole. Vlivem zkreslení skenu se zjištěné hodnoty budou lišit v závislosti na orientaci natočení kola při skenování. Pokud by bylo možné dosáhnout stejné kvality skenu po celém obvodu kola, jako u nezkreslených zubů (v nejnižší a nejvyšší poloze ve směru osy otáčení RT), bylo by případně možné využívat CT u kontrol plastových kol menších rozměrů s nízkým požadovaným stupněm přesnosti.

Kontrola ozubení je poměrně složitá vzhledem k tomu, že je kontrolována evolventní plocha a jsou kladeny velké požadavky na přesnost. Pruhová projekce i výpočetní tomografie nemají dostatečnou přesnost pro kontroly ozubení se středními a vysokými stupni přesnosti. Z tohoto důvodu nejsou pro účely kontroly ozubení běžně používány.

Větší možnost uplatnění je u pruhové projekce pro účely reverzního inženýrství a kontrol méně přesných obecných tvarových ploch. U CT je hlavní výhodou možnost kontroly rozměrů součástí se špatně přístupnými vnitřními prvky, které nelze kontrolovat jinou nedestruktivní metodou.

8 Seznam použité literatury a zdrojů

1. *ZWCAD.* [Online] [Citace: 20. 11 2022.] http://www.zwcad.cz/cz/zwcad/download/26-cad/mitcalc.

2. *WTO tools.* [Online] [Citace: 20. 11 2022.] https://www.wto-tools.com/cs-cz/produkty/soustruznicka-centra/obrazeci-jednotka-na-drazky.

3. Musil, Václav. *Návrh zubového čerpadla pomocí CAD programů.* [Online] [Citace: 20. 11 2022.] https://slideplayer.cz/slide/3960615/.

4. Pagáč, Marek. Můjsolidworks.cz. *Animace dvoustupňové převodovky a využití vazby Převod.* [Online] 27. 6 2013. [Citace: 20. 11 2022.] https://www.mujsolidworks.cz/animace-dvoustupnove-prevodovky-a-vyuziti-vazby-prevod-vazby-2/.

5. Doc. Ing. Vladimír Švec, CSC. *Části a mechanismi strojů - Mechanické převody.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003.

6. Ing., Palát Hynek. Ozubené převody. [Online] 2012. [Citace: 3. 11 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-05.pdf.

7. Ivana Linkeová, Karolína Kundrátová. *Cylindrické křivky.* [Online] 2008. [Citace: 20. 11 2022.] http://www.linkeova.cz/vyuka/kg/puma/Cyclic/cyclic1.html.

8. Pirklová, Petra. *KŘIVKY - pomocný učební text.* [Online] leden 2014. [Citace: 27. 10 2022.] https://kmd.fp.tul.cz/images/stories/vyuka/pirklova-prednasky/Krivky_sroubovice.pdf.

9. *Gear meshing.* [Online] [Citace: 8. 12 2022.] http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks_dvd_only/DAN/gears/meshing/meshing.html.

10. Ing., Palát Hynek. Podřezání zubu a korekce ozubení. [Online] 2011. [Citace: 7. 12 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-07.pdf.

11.*Čelní soukolí s přímými zuby.* [Online] 2012. [Citace: 7. 11 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-06.pdf.

12. Studentcar.cz. *Ozubená kola, kreslení, kótování, vyplňování razítka a zobrazování.* [Online] [Citace: 21. 11 2022.] http://www.studentcar.cz/files/vyuka/TTD/lesson10.pdf.

13. Pospíchal, Jaroslav. *Technické kreslení.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005.

14. *Přehled používaných ozubených převodů.* [Online] 2015. [Citace: 29. 10 2022.] https://e-konstrukter.cz/novinka/prehled-pouzivanych-ozubenych-prevodu.

15. Ing., Rudolf Kříž a kol. *Stavba a provoz strojů II Převody.* Praha : SNTL - Nakaldatelství technické literatury, 1978.

16. Besta gear. *Helical gear.* [Online] [Citace: 21. 11 2022.] http://www.bestagear.com/helical_gear/helical_gear_set.html.

17. Ing., Palát Hynek. Čelní soukolí se šikmým ozubením. [Online] 2012. [Citace: 6. 11 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-08.pdf.

18. SYSTEMA. *Assembly manual.* [Online] [Citace: 21. 11 2022.] http://www.systema-jp.com/document/pdf_documents/PCK-M4A1AssemblyManual.pdf.

19. Kuželové ozubení s přímými, šikmými a zakřivenými zuby. *MITcalc.* [Online] [Citace: 9. 11 2022.] https://www.mitcalc.com/doc/gear2/help/cz/gear2.htm.

20. Ing., Palát Hynek. Kuželová soukolí. [Online] 2012. [Citace: 9. 11 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-10.pdf.

21.Šroubová soukolí. [Online] 2012. https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-11.pdf.

22. Šneková soukolí. *MITcalc.* [Online] 9. 11 2022. https://www.mitcalc.com/doc/gear4/help/cz/gear4txt.htm.

23. Norelem. *Sady šnekových kol, pravochodých.* [Online] [Citace: 22. 11 2022.] https://www.norelem.com/cz/cs/Produkty/P%C5%99ehled-v%C3%BDrobk%C5%AF/Syst%C3%A9my-a-komponenty-pro-v%C3%BDrobu-stroj%C5%AF-a-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD/22000-Technika-hnac%C3%ADch-%C3%BAstroj%C3%AD/%C5%A0neky-a-%C5%A1nekov%C3%A1-kola/22500-Sady-%C5%A1nekov%.

24. Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., a další. *Technologie obrábění, 3.díl.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2007.

25. oneindustry. *Výroba ozubených kol.* [Online] 17. 6 2019. [Citace: 10. 11 2022.] https://www.oneindustry.cz/lexikon/vyroba-ozubenych-kol/.

26. Sandvik coromant. *Výroba ozubení.* [Online] [Citace: 10. 11 2022.] https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/gear-manufacturing.aspx.

27. tumlikovo. *Princip výroby ozubených kol dělícím způsobem.* [Online] 18. 12 2010. [Citace: 15. 10 2022.] http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/ozubeni/frezovanim/kotoucovou/.

28. tumlikovo. *Výroba ozubení.* [Online] 5. 9 2010. [Citace: 22. 11 2022.] http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-2/.

29. tumlikovo. *Výroba ozubení odvalováním.* [Online] 19. 11 2010. [Citace: 15. 10 2022.] http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/.

30. WTO tools. *Power Skiving.* [Online] [Citace: 22. 11 2022.] https://www.wto-tools.com/cs-cz/produkty/soustruznicka-centra/power-skiving-loupaci-jednotka-na-drazky-a-ozubeni.

31. youtube.com. *Gear shaping and spline shaping.* [Online] Doppler gear company. [Citace: 23. 11 2022.] https://www.youtube.com/watch?v=fU01NlP-dNI&ab_channel=DopplerGearCompany.

32. Prášková metalurgie a její využití. *mmspektrum.* [Online] 13. 11 2002. [Citace: 23. 11 2022.] https://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti.

33. *Výroba ozubených kol.* [Online] [Citace: 10. 11 2022.] https://vyuka.hradebni.cz/file.php/222/Vyroba_ozubenych_kol.pdf.

34. Šindelář, Bc. Martin. *Výroba ozubených kol.* [Online] [Citace: 23. 11 2022.] https://slideplayer.cz/slide/17437541/.

35. mmspektrum. *Přesné odvalovací frézování ozubených kol.* [Online] 1. 6 2022. [Citace: 23. 11 2022.] https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-odvalovaci-frezovani-ozubenych-kol.

36. *ČSN ISO 1328-1 Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 1: Definice a mezní úchylky vztažené na stejnolehlé boky zubů ozubeného kola.* Červenec 2015.

37. Troge, Jan, a další. Acoustical Optimization of a Train Gearbox Based on Overall System Simulation. [Online] 2016. [Citace: 21. 12 2022.] https://www.researchgate.net/publication/307173971_Acoustical_Optimization_of_a_Train_Gearbox_Based_on_Overall_System_Simulation/citations.

38. *ČSN ISO 1328-2 Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 2: Definice a hodnoty dovolených úchylek relevantní k radiálním kinematickým úchylkáma informativně k obvodovému házení.* Srpen 2014.

39. Procházka, Ing Karel. *Měření ozubených kol - rozměr přes zuby.* [Online] 2011. [Citace: 11. 12 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_IV/VY_52_INOVACE_J-06-09.pdf.

40. Gimpert, Dennis. An Elementary guide to gear inspection. [Online] 1. 6 2005. [Citace: 11. 12 2022.] https://gearsolutions.com/features/an-elementary-guide-to-gear-inspection/.

41. *TNI ISO/TR 10064-3 Praktické předpisy pro přejímku - Část 3 Doporučení vztahující se k tělesům ozubených kol, osové vzdálenosti hřídelů a rovnoběžnosti os.* 2014.

42. *CMM.* [Online] CREAFORM. [Citace: 8. 12 2022.] https://www.creaform3d.com/blog/what-is-cmm-and-their-types/.

43. Procházka, Ing. Karel. Měření ozubených kol - kontrola záběru. [Online] 2011. [Citace: 12. 12 2022.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_IV/VY_52_INOVACE_J-06-08.pdf.

44. *Souřadnicové měřící stroje.* [Online] [Citace: 2. 12 2022.] http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522.

45. *PRISMO.* [Online] ZEISS. [Citace: 1. 12 2022.] https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/prismo.html.

46. *Doteky pro sondy Zeiss.* [Online] Renishaw. [Citace: 5. 12 2022.] https://www.renishaw.cz/cs/doteky-pro-sondy-zeiss--6636.

47. *CMM stylus.* [Online] Hexagon. [Citace: 8. 12 2022.] https://hexagon.com/resources/resource-library/what-is-a-cmm-stylus.

48. *CMM probes.* [Online] Engineering 360. [Citace: 8. 12 2022.] https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/cmm_probes.

49. *Gear metrology.* [Online] ZEISS. [Citace: 8. 12 2022.] https://www.zeiss.com/metrology/products/software/calypso-overview/gear-pro.html.

50. Fox, John. CMM for gear inspection. [Online] 6 2020. [Citace: 8. 12 2022.] https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0620x/cmm.pdf.

51. Consider CMM for gear inspection. [Online] Mitutoyo. [Citace: 8. 12 2022.] https://www.mitutoyo.com/article/consider-a-cmm-for-gear-inspection/.

52. Mikoleizig, Guenter. CNC gear inspection technology and new software solutions adapted to individual industry needs. [Online] 1999. [Citace: 12. 12 2022.] https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/LAMDAMAP99/LAMDAMAP99022FU.pdf.

53. *Automatic inspection machine GMSP series.* [Online] [Citace: 12. 12 2022.] https://www.directindustry.com/prod/gleason/product-11966-1707108.html.

54. Golubeva, Svetlana. What is laser 3D scanning. [Online] 22. 1 2022. [Citace: 12. 12 2022.] https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning.

55. Čepová, Lenka a Petřkovská, Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii.* [Online] 2011. [Citace: 21. 12 2022.] https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf#%5B%7B%22num%22%3A169%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%7D%2C68%2C771%2C0%5D.

56. *Laser scanning.* [Online] [Citace: 12. 20 2022.] https://www.laser-scanning.co.uk/.

57. Alba, Michael. *How the Tables Have Turned: FARO Adds an 8th Axis to 3D Scanning.* [Online] 24. 1 2019. [Citace: 20. 12 2022.] https://www.engineering.com/story/how-the-tables-have-turned-faro-adds-an-8th-axis-to-3d-scanning.

58. *Compact Laser Line Scanner Offers Fast and Accurate CMM Inspection .* [Online] 21. 12 2020. [Citace: 20. 12 2022.] https://metrology.news/compact-laser-line-scanner-offers-fast-and-accurate-cmm-inspection/.

59. *Laser Scanning Revolutionizes Gear Inspection .* [Online] Gleason, 7. 2 2018. [Citace: 20. 12 2022.] https://www.gleason.com/en/facts-and-news/news-room/laser-scanning-revolutionizes-gear-inspection-see-it-at-control-in-stuttgart-1.

60. *GRSL - Dual Flank Rolling Inspection Combined with Advanced Laser Technology.* [Online] Gleason. [Citace: 20. 12 2022.] https://www.gleason.com/tr/products/metrology/metrology-systems/gear-rolling-systems/grsl-dual-flank-rolling-inspection-combined-with-advanced-laser-technology.

61. Geng, Jason. *Structured-light 3D surface imaging : a tutorial.* [Online] 2011. [Citace: 22. 12 2022.] https://opg.optica.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561.

62. *Structured light scanners.* [Online] [Citace: 22. 12 2022.] https://www.arc-bg.com/en/253-structured-light-scanners.

63. Herzan, Petr. *Výpočetní tomografie ve strojírenství.* [Online] 19. 7 2016. [Citace: 24. 12 2022.] https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/7679-vypocetni-tomografie-ve-strojirenstvi.html.

9 Seznam obrázků a tabulek a příloh

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Ozubený převod, drážkování, zubové čerpadlo [1] [2] [3] 10
Obrázek 2 Dvoustupňová převodovka [4] 10
Obrázek 3 Ozubené soukolí [4] 11
Obrázek 4 Rozdělení ozubených převodů 12
Obrázek 5 Evolventa [7] 12
Obrázek 6 Úhel záběru [9] 13
Obrázek 7 Podřezání zubu [10] 13
Obrázek 8 Parametry ozubení [12] 14
Obrázek 9 Korekce ozubení [10] 15
Obrázek 10 Soukolí s rovnoběžnými osami [13] 15
Obrázek 12 Převod s vnitřním ozubením a ozubeným hřebenem [13] 16
Obrázek 13 Čelní ozubené soukolí s přímým ozubením [14] 16
Obrázek 14 Prostorové rozložení sil na kole se šikmými zuby [15] 16
Obrázek 15 Čelní ozubené soukolí se šikmými zuby [16] 17
Obrázek 16 Planetová převodovka [18] 17
Obrázek 17 Soukolí s různoběžnými osami [13] 18
Obrázek 18 Tvary kuželových kol I, II, III [19] 18
Obrázek 19 Kuželové soukolí s přímým ozubením [14] 18
Obrázek 21 Soukolí s mimoběžnými osami [13] 19
Obrázek 22 Šnekové ozubení [23] 19
Obrázek 23 Frézování ozubení dělícím a odvalovacím způsobem [26] 20
Obrázek 24 Výroba ozubení kotoučovou frézou dělícím způsobem [26] 20
Obrázek 25 Výroba ozubení odvalovací frézou [28] 21
Obrázek 27 Power skiving [26] 22
Obrázek 28 Obrážení kotoučovým nožem [31] 22
Obrázek 29 Ševingovací kolo [34] 24
Obrázek 30 Broušení dělícím způsobem [34] 24
Obrázek 31 Broušení ozubení odvalovacím způsobem [35] 25
Obrázek 35 Parametry profilu [36] 27
Obrázek 36 Celková úchylka profilu 28
Obrázek 37 Úchylka tvaru profilu 28
Obrázek 38 Úchylka sklonu profilu 28
Obrázek 39 Celková úchylka sklonu zubu 29
Obrázek 40 Úchylka tvaru sklonu zubu 29
Obrázek 41 Úchylka sklonu zubu 29
Obrázek 42 Modifikace profilu boku zubu 30
Obrázek 43 Modifikace sklonu zubu 30
Obrázek 44 Úchylky zubové rozteče [36] 31
Obrázek 45 Hodnoty f_{pi} s vyznačenou f_p 31
Obrázek 46 Celková úchylka součtové rozteče F_p 31
Obrázek 47 Radiální kinematické úchylky 32
Obrázek 48 Obvodové házení 32
Obrázek 49 Rozměr přes zuby [39] 33
Obrázek 50 Měření průměru kola přes válečky [40] 33

Obrázek 51 Měření tloušťky zubu pomocí zubové měrky [40] 34
Obrázek 52 Určení výchozí osy 36
Obrázek 53 Typy snímacích systémů 38
Obrázek 54 Dvouboký a jednoboký odval [40] 38
Obrázek 55 Kontrola dvoubokým odvalem [40] 39
Obrázek 56 Portálový CMM ZEISS PRISMO [45] 40
Obrázek 57 Snímací systém [46] 40
Obrázek 60 Měření ozubení na CMM bez RT [49] 41
Obrázek 61 Měření ozubení na CMM s použitím RT [49] 42
Obrázek 62 Jednoúčelové 4-osé CMM pro kontrolu ozubených kol a způsob vytvoření evolventní trajektorie [52] 43
Obrázek 63 Jednoúčelové 4-osé CMM pro kontrolu ozubených kol a způsob vytvoření evolventní trajektorie [52] 43
Obrázek 64 Gleason 300GMSP [53] 44
Obrázek 65 Princip triangulace 44
Obrázek 66 Snímání pomocí laser scanneru 45
Obrázek 67 Laser scanner s ramenem a v kombinaci s CMM [57] [58] 45
Obrázek 68 Gleason 300GMSL [59] 46
Obrázek 69 Gleason GRSL [60] 46
Obrázek 70 Snímání pomocí pruhové projekce 47
Obrázek 71 Pruhová projekce [62] 47
Obrázek 72 Kalibrace pruhové projekce 51
Obrázek 73 Promítnutí proužku v horizontální a nakloněné poloze 51
Obrázek 74 Poloha pro skenování ozubených kol 52
Obrázek 75 Zakrytí a stínění zubových mezer 52
Obrázek 76 Sken plastového kola pruhovou projekcí 53
Obrázek 77 Skenování hliníkového kola pruhovou projekcí 54
Obrázek 78 Skenování ocelového kola pruhovou projekcí 54
Obrázek 79 Snímání plastového kola na CT 55
Obrázek 80 Snímání hliníkového kola na CT 56
Obrázek 82 Nastavení měřené profilu 57
Obrázek 83 Nastavení měření sklonu zubu 58
Obrázek 84 Vyhodnocení měření profilu 58
Obrázek 85 Zaměření osy RT 59
Obrázek 86 Upnutí plastového kola při měření na CMM 59
Obrázek 87 Měření kol na CMM 61
Obrázek 88 Nahrání STL pro vyhodnocení 62
Obrázek 90 Sken díry pro hřídel pomocí pruhové projekce 62
Obrázek 91 Vnitřní plocha díry CT skenu u hliníkového kola 63
Obrázek 92 Porovnání celkové úchylky sklonu zubu ocelového a plastového kola (měřítko 250:1) 68
Obrázek 93 Porovnání diagramů měření profilu 69
Obrázek 94 Porovnání diagramů měření sklonu zubu 70
Obrázek 95 Rozdílné charaktery povrchu boku zubů v závislosti na orientaci u CT 71
Obrázek 96 Měření sklonu boku zubu plastového kola 71

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Měřené parametry ozubení podle stupně přesnosti [36] 34
Tabulka 2 Minimální počet měřených zubů [36] 35
Tabulka 3 Přehled ozubených kol pro porovnání technologií 50
Tabulka 4 Porovnání celkových úchylek profilu 64
Tabulka 5 Porovnání celkových úchylek sklonu 65
Tabulka 6 Porovnání úchylek jednotlivé rozteče 66
Tabulka 7 Porovnání obvodových házení 67

Seznam příloh:

Příloha 1 Ukázka protokolů měření plastového kola pomocí CT a CMM