

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

MĚŘENÍ OZUBENÍ

Gear wheel measurement

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Jágr Jan

Studijní obor: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

Praha 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Jan Jágr

Rád bych poděkoval především svému vedoucímu práce Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. za vstřícnost, ochotu a odborné vedení.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením ozubení. Přináší přehledné informace o dělení ozubených kol a charakterizuje důležité parametry kol se zvláštním zaměřením na ty, které se v technické praxi proměřují. Dále se práce věnuje jednotlivým úchytkám ozubených kol, rozděluje je dle normy ČSN 01 4682. Uvedeny jsou rovněž základní typy poruch ozubených kol a příčiny jejich vzniku. Hlavní část práce se soustředí na jednotlivé metody měření základních parametrů kola, jako jsou hlavový průměr, tloušťka zubu, obvodové a čelní házení kola, rozteč, profil zubů, sklon zubů, drsnost povrchu kola a dotyk zubů, a na jejich zhodnocení. Zmíněny jsou zde i komplexní metody, jako jsou kontroly odvalem, a závěrečná kapitola práce je věnována moderním způsobům měření ozubení a nastiňuje směr vývoje v oblasti metrologie ozubených kol.

Klíčová slova

Měření, kontrola, ozubení, ozubená kola, metrologie

Abstract

This Bachelor's Thesis focuses on gear measurement. It provides comprehensive information on the classification of gear wheels according to various criteria and describes the wheels' important parameters with special focus on those measured in technical practice. The thesis further deals with individual gear wheel deviations, which it divides into multiple categories according to norm ČSN 01 4682.

Also listed are the basic types of gear wheel defects and their causes. The crucial part of this text is focused on various methods of measurement of gear parameters such as head diameter, tooth thickness, radial and axial runout, pitch, gear profile, slope of teeth wheel, roughness and tooth contact, and their evaluation. Some complex methods like roll test's are also included. The final chapter is dedicated to modern approaches to gear metrology and outlines the course of development in this field of study.

Keywords

measurement, control, gear, wheel gear, metrology

Seznam použitých zkratk

β - úhel sklonu ozubení	p_{bt} - základní rozteč v tečné rovině
d_a - průměr hlavové kružnice	F_α - úchylka profilu
d_f - průměr patní kružnice	$f_{f\alpha}$ - úchylka tvaru profilu
d - průměr roztečné kružnice	$f_{H\alpha}$ - úchylka úhlu profilu
d_b - průměr základní kružnice	L_α - hodnocený úseku při měření profilu zubu
d_w - průměr valivé kružnice	F_β - úchylka sklonu zubu
$p(t)$ - rozteč	$f_{f\beta}$ - úchylka tvaru sklonu zubu
p_t - čelní rozteč	$f_{H\beta}$ - úchylka úhlu sklonu zubu
p_n - normální rozteč	α - je úhel záběru kola
p_b - základní rozteč	α_t - úhel záběru kola v tečné rovině
z - počet zubů kola	α_n - úhel záběru kola v normální rovině
m - modul kola	s_k - tloušťka zubu v konstantní výšce
m_n - modul kola v normální rovině	h_k - konstantní výška od hlavové kružnice
h_a - výška hlavy zubu	x - součinitel posunutí profilu (korekce)
h_f - výška paty zubu	s'_k - tloušťka zubu v konstantní výšce korigovaného kola
h - výška zubu	h'_k - konstantní výška od hlavové kružnice korigovaného kola
b - šířka věnce ozubeného kola	z - počet zubů pro měření rozměru přes zuby
F_i'' - úchylka dvoubokého odvalu	M - jmenovitý rozměr přes zuby nekorigovaného kola
F_i' - úchylka jednobokého odvalu	\bar{M} - jmenovitý rozměr přes zuby korigovaného kola.
f_i'' - úchylka dvoubokého odvalu za jednu rozteč	d_v - průměr (válečku) kuličky při měření rozměru přes kuličky
f_i' - úchylka jednobokého odvalu za jednu rozteč	R_s - poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku (kuličky) při měření přes kuličky
F_p - mezní součtová úchylka roztečí	M_v - rozměr přes válečky vnějšího ozubení
F_r - mezní obvodové (radiální) házení	M_{vn} - rozměr přes válečky vnitřního ozubení.
f_{pt} - úchylka čelní rozteče	
f_{pn} - úchylka normální rozteče	
p_{bn} - základní normální rozteč	

βb - úhel vedení kulisy při kontrole sklonu zubů

Rz - výška profilu

Ra - průměrná aritmetická úchylka povrchu

Rp - největší výška výstupků profilu

Rv - největší hloubka profilu

Rm - materiálový podíl

Rk - hloubka jádra drsnosti

CNC - computer numerical control (numericky řízené stroje)

CAD - computer-aided design (počítačem podporované projektování)

CMM - coordinate measuring machine (souřadnicové měřicí stroje)

Obsah

Obsah	7
Seznam obrázků.....	10
Úvod	11
1 Dělení ozubených kol	11
1.1 Dělení podle vzájemné polohy os.....	11
1.2 Dělení dle polohy kol	12
1.3 Dělení dle sklonu zubů	12
1.4 Dělení dle tvaru boční křivky	12
2 Základní charakteristika ozubených kol	12
3 Lícování ozubených kol.....	14
3.1 Úchyly kinematické přesnosti	14
3.2 Úchyly plynulosti chodu	14
3.3 Úchyly dotyku zubů.....	14
3.4 Boční vůle	14
3.5 Zápis tolerancí ozubeného kola.....	15
4 Poruchy ozubených kol a jejich dělení	15
4.1 Otěr.....	16
4.1.1 Normální, přirozený otěr	16
4.1.2 Zvýšený otěr	16
4.2 Vylamování boků zubů	17
4.2.1 Pitting.....	17
4.2.2 Odlupování (spalling).....	17
4.2.3 Vtisky	17
4.3 Trhliny	17
4.3.1 Trhliny po broušení	17
4.3.2 Trhliny po kalení	17
4.3.3 Materiálové trhliny.....	18
4.4 Koroze a eroze boků zubů.....	18
4.4.1 Chemická koroze	18
4.4.2 Třecí koroze	18
4.4.3 Zokujení	18
4.4.4 Eroze	18
4.5 Plastická deformace boků zubů.....	18
4.5.1 Tečení za studena	18
4.5.2 Vyhřátí	18
4.5.3 Tečení za tepla	19
4.6 Lom zubu	19

4.6.1	Únavový lom	19
4.6.2	Silový lom	19
5	Kontrola ozubených kol	19
5.1	Kontrola hlavového průměru	19
5.2	Měření tloušťky zubu	20
5.2.1	Přímé měření tloušťky zubu (v konstantní tloušťce a výšce)	20
5.2.2	Měření míry přes zuby	21
5.2.3	Měření tloušťky zubů přes kuličky (válečky)	23
5.3	Kontrola obvodového a čelního házení	24
5.4	Kontrola odvalem	25
5.4.1	Kontrola jednobokým odvalem	25
5.4.2	Kontrola dvoubokým odvalem	26
5.5	Kontrola zubové rozteče	26
5.5.1	Měření čelní rozteče	26
5.5.2	Měření normální rozteče	27
5.5.3	Měření základní rozteče	28
5.5.4	Měření součtové úchylnosti roztečí kola na jednotlivých čelních sektorech	29
5.6	Kontrola profilu zubu	29
5.6.1	Optická metoda	29
5.6.2	Mechanické metody	30
5.7	Kontrola sklonu boků zubů	31
5.8	Kontrola dotyku zubů	33
5.8.1	Statická kontrola dotyku zubů	33
5.8.2	Dynamická kontrola dotyku zubů	33
5.8.3	Vyhodnocení měření dotyku zubů	33
5.9	Kontrola drsnosti povrchu	34
5.9.1	Měření drsnosti pomocí etalonu	34
5.9.2	Metoda světelného řezu	34
5.9.3	Měření pomocí interference světla	35
5.9.4	Měření povrchu pomocí dotykových profiloměrů (drsnoměrů)	35
6	Moderní metody měření ozubených kol	35
6.1	CMM	36
6.1.1	Postup měření	36
6.1.2	Konstrukce CMM strojů	36
6.1.3	Měřicí sondy	36
6.1.4	Měřicí doteky	37
6.2	Bezdotykové metody měření ozubeného kola	37
	Závěr	37

Seznam použité literatury	38
Seznam příloh.....	41

Seznam obrázků

Obrázek 1: Parametry ozubeného kola	13
Obrázek 2: Měření tloušťky zubu v konstantní výšce.....	20
Obrázek 3: Měření míry přes zuby	21
Obrázek 4: Měření rozměru přes zuby.	23
Obrázek 5: Měření obvodového házení.	25
Obrázek 6: Princip zkoušky dvoubokým odvalem	26
Obrázek 7: Princip měření čelní rozteče	27
Obrázek 8: Měření čelní rozteče úhlovou indexovou metodou	27
Obrázek 9: Přenosný komparátor pro měření normální rozteče	27
Obrázek 10: Měření základní rozteče	28
Obrázek 11: Měření roztečí v čelních sektorech	29
Obrázek 12: Evolventoměr s pevnou základní kružnicí	30
Obrázek 13: Evolventoměr se stavitelnou základní kružnicí.....	31
Obrázek 14: Schéma přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice	32
Obrázek 15: Schéma přístroje s nastavitelnou základní kružnicí	32
Obrázek 16: Kontrola úhlu šroubovice na tvořící přímce	32
Obrázek 17: Kontakt zubů ozubeného kola	33
Obrázek 18: Metoda světlého řezu	34
Obrázek 19: Interferenční mikroskop (vlevo), obraz v okuláru přístroje (vpravo).	35
Obrázek 20: CMM stroj na měření ozubených kol	36

Úvod

První ozubená kola se začala objevovat již ve starověku. Užívalo se jich především při konstrukci strojů využívajících vodní síly. V této době se ale zpravidla ještě nejednalo o valivé soukolí, jak je známe dnes, ale konstrukce těchto ozubených kol byla z tvrdého dřeva a zuby zpravidla nahrazeny dřevěnými čepy. Postupně se začínala používat čím dál sofistikovanější kola z bronzu a později i ze železa. Velký rozvoj ozubených kol a jejich výroby pak nastal ve středověku především v souvislosti s konstrukcí a výrobou hodinových strojů a věžních orlojů. Spolu s vývojem ozubených kol se vyvíjela i jejich kontrola.

Dnešní ozubená kola jsou jedním ze základních prvků převodových mechanismů, které slouží k přenosu rotační mechanické energie převážně z hnacího stroje (motoru) na hnaný stroj (mechanismus). Ozubené převody jsou přitom schopny zajistit nejen konstantní převodový poměr, ale i vysokou energetickou účinnost a dlouhou životnost převodového mechanismu. Vzhledem k vysokým silám a momentům v převodových skříních patří ozubená kola k extrémně namáhaným dílům, které jsou rovněž velmi náchylné na okolní vlivy (resp. na kvalitu mazání, okolní teplotu a plynulost chodu). Porucha ozubeného kola přitom může závažně poškodit celé soukolí. Pro jejich správnou funkci je tedy třeba provádět velmi důkladnou kontrolu během celého procesu výroby kola. Důležitá je také pravidelná kontrola a pečlivý servis kol, která jsou již v provozu. Kontrola ozubených je přitom velmi komplexní a metod měření je mnoho.

Následující práce si dává za cíl zmapovat a zhodnotit klasické i moderní metody měření ozubených kol, sumarizovat data z většího množství zdrojů, českých i zahraničních, a charakterizovat současné trendy v oblasti metrologie ozubených kol.

1 Dělení ozubených kol

Ozubená kola se rozdělují podle mnoha různých kritérií. Nejdůležitější je dělení podle vzájemné polohy os rotace jednotlivých kol v ozubeném soukolí. Níže uvedené dělení je převzato z [1].

1.1 Dělení podle vzájemné polohy os

Soukolí valivá

U valivého soukolí dochází k vzájemnému valení dvou válců nebo kuželů. Valivá soukolí se dále dělí podle polohy os na soukolí:

- 1) soukolí čelní, jehož osy jsou rovnoběžné
- 2) soukolí kuželové s různoběžnými osami

Soukolí šroubová

Šroubové soukolí je charakterizováno valivým pohybem dvou těles kol po sobě navzájem a současně posuvným pohybem ve směru jejich styčné plochy, neboli tzv. šroubovým pohybem. Patří sem soukolí:

- 1) hyperbolická
- 2) šroubová válcová
- 3) hypoidní
- 4) šneková

Nejčastějším typem soukolí je soukolí čelní.

1.2 Dělení dle polohy kol

Podle smyslu otáčení a polohy spoluzabírajících kol lze čelní soukolí dále rozlišit na soukolí vnější, vnitřní a hřebenové.

Vnější soukolí

U vnějšího soukolí mají obě ozubená kola ozubení na vnějším obvodu ozubeného věnce a smysl otáčení kol je vždy opačný.

Soukolí s vnitřním ozubením

U soukolí s vnitřním ozubením má jedno kolo ozubení na vnějším a druhé na vnitřním obvodu ozubeného věnce. Smysl otáčení kol je potom souhlasný.

Hřebenové soukolí

U hřebenového soukolí má větší kolo nekonečně veliký poloměr a přechází tak v souvislý hřeben.

1.3 Dělení dle sklonu zubů

Další dělení ozubených kol je dle sklonu zubů na ozubená kola s přímými zuby, se šikmými zuby s úhlem sklonu β (β bývá většinou 15 či 20°), kola s obloukově zakřivenými zuby a se zuby šípovými.

1.4 Dělení dle tvaru boční křivky

Ozubená kola lze také v neposlední řadě dělit dle tvaru boční křivky zubu. Jako boční křivky se běžně užívá tzv. cyklických křivek. Patří sem epicykloidy, hypocykloidy a evolventy.

Cykloida

Cykloida je křivka, která je tvořena jedním bodem hybné kružnice, která se valí po kružnici pevné. Z funkčního hlediska se jedná o nejvhodnější tvar boční křivky, ale je složitá na výrobu.

Evolventa

Evolventa je křivka tvořená libovolným bodem přímky, která se odvaluje po kružnici. Tato křivka není tak vhodná jako cykloida, ale její výroba je značně jednodušší.

2 Základní charakteristika ozubených kol

Ozubení je vytvořeno na vnějším nebo na vnitřním povrchu kola mezi hlavovým a patním válcem. Při řezu ozubení jeho čelní rovinou vidíme geometrický útvar, sestávající se z počtu z stejných profilů jednotlivých zubů [2].

Prostor věnce mezi zuby nazýváme zubní mezery a profil zubu při pohledu ve směru osy kola je označován jako čelní profil. Části zubů, které se dostávají do záběru, nazýváme boky zubů. Podle směru otáčení rozlišujeme boky pravé a levé [3].

Mimo průměru hlavové kružnice d_a a kružnice patní d_f je kolo charakterizováno ještě průměrem roztečné kružnice d , kružnice základní d_b a u korigovaných kol též kružnice valivé d_w .

Výška zuby ozubení je definována jako radiální vzdálenost patní a hlavové kružnice. Je dále rozdělena roztečnou kružnicí na výšku hlavy a výšku paty zuby [3].

Boční křivka (profil) zuby je definována jako průsečnice boku zuby s čelní rovinou a skládá se z části pracovní (evolventní) a přechodové [3].

Vzdálenost dvou stejnohlých bočních křivek na roztečné kružnici označujeme jako rozteč p . Ta se skládá z tloušťky zuby s a šířky zubové mezery e [2].

Další charakteristickou veličinou ozubení je jeho modul. Je definován jako podíl rozteče p a Ludolfova čísla π . Pro modul dále platí známý vzorec:

$$d = m \cdot z.$$

Kde:

d je průměr roztečné kružnice,

z je počet zubů kola,

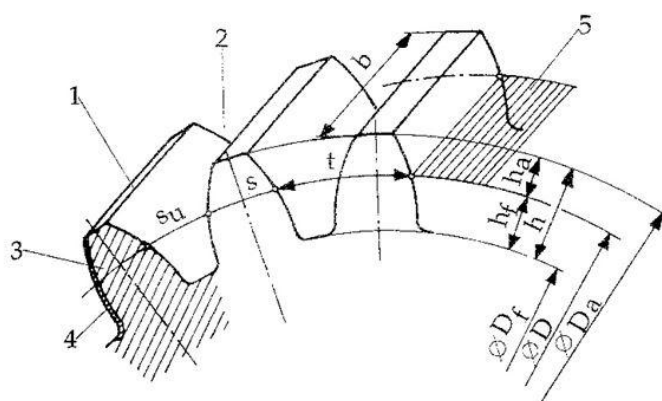
m je jeho modul.

Další veličiny, které mají z pohledu kontroly ozubení nepopiratelný význam, jsou úhel záběru ozubení α a v případě kol se šikmými zuby i úhel sklonu zuby β .

Nejdůležitějšími veličinami, které se na kole běžně proměřují, jsou potom:

- 1) rozteč p ,
- 2) průměr hlavové kružnice d_a ,
- 3) tloušťka zuby s ,
- 4) tvar profilu zuby,
- 5) obvodové a čelní házení kola,
- 6) dotyk boků zubů při záběru,
- 7) úhel sklonu zubů β (pro kola se šikmým ozubením),
- 8) drsnost boků zubů. [1, 4]

Důležité charakteristiky kola jsou znázorněny na následujícím obrázku. Viz obr. 1.



- D_a – průměr hlavové kružnice
- D – průměr roztečné kružnice
- D_f – průměr patní kružnice
- h_a – výška hlavy zuby
- h_f – výška paty zuby
- h – výška zuby
- t – zubová rozteč
- s – tloušťka zuby
- s_u – šířka zubní mezery
- b – šířka ozubeného věnce
- 1 – zub
- 2 – zubní mezera
- 3 – profil zuby
- 4 – křivka profilu

Obrázek 1: Parametry ozubeného kola [5]

3 Lícování ozubených kol

Dle normy ČSN 01 4682 jsou ozubená kola rozdělena do 12 tříd podle přesnosti. Obdobný systém nalezneme i v normách DIN a ISO. Norma ISO stanoví navíc stupeň přesnosti 0 [6]. Užití jednotlivých stupňů přesnosti je znázorněno v příloze 1.

Pro každý stupeň přesnosti s výjimkou prvního a druhého jsou stanoveny předpisy skupin úchylek kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotyku zubů ozubených kol v soukolí. Stupně přesnosti 1 a 2 jsou určeny k perspektivnímu použití. Norma umožňuje kombinovat různé stupně přesnosti pro jednotlivé funkční skupiny úchylek. Požadují-li tedy od ozubeného kola například maximální kinetickou přesnost, můžu pro tuto skupinu úchylek předepsat vyšší stupeň přesnosti než pro skupiny ostatní [6, 7].

3.1 Úchylky kinematické přesnosti

Kinematická přesnost zahrnuje chyby, které se periodicky projevují jednou za otáčku kola. Jsou dány rozdílem teoretické a skutečné polohy zubu kola. Způsobují zrychlení a zpomalení ozubeného kola během záběru [8].

Úchylky kinematické přesnosti měříme především u měřících mechanismů a obráběcích strojů, kde je nutná realizace velmi přesných pohybů. Řadíme mezi ně například úchylku dvoubokého odvalu F_i'' , úchylku jednobokého odvalu F_i' , mezní součtovou úchylku roztečí F_p nebo mezní obvodové (radiální) házení ozubení F_r [9].

3.2 Úchylky plynulosti chodu

Řadíme sem takové úchylky ozubení, které se opakují na každém zubu a ovlivňují rovnoměrnost otáčení kola [6]. Tyto úchylky popisují nepřesnosti evolventní plochy zubu. Mezi úchylky plynulosti chodu patří úchylka čelní rozteče f_{pt} , úchylka profilu F_α , úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$, úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$ či úchylka dvoubokého a jednobokého odvalu za rozteč f_i'' a f_i' [9].

3.3 Úchylky dotyku zubů

Tato skupina úchylek výrazně ovlivňuje přesnost ozubení z hlediska přenosu sil. Tyto úchylky se projevují nerovnoměrným nesením zubů [6]. Řadíme sem například mezní úchylku sklonu zubu F_β , úchylku tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ a úchylku úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$ [9].

3.4 Boční vůle

Vzájemné lícování ozubených kol je dále doplněno o 6 skupin bočních vůlí, označených velkými písmeny A až H. Skupina A označuje maximální vůli soukolí, skupina B zaručuje takovou vůli, kdy u soukolí z běžné konstrukční oceli nemůže nikdy dojít z důvodu výrobních úchylek a ztráty zubové vůle k zadření. Na druhém konci lícovací soustavy je skupina H. Skupina H má nulovou zaručenou vůli [8].

Tolerance boční vůle má dle normy 8 skupin označených malými písmeny x, y, z, a, b, c, d, h. Skupina h je nejpřesnější [7].

Správnost tolerance boční vůle se kontroluje měřením míry přes zuby, měřením tloušťky zubu v konstantní výšce nebo měřením tloušťky zubů přes kuličky (válečky) [10].

3.5 Zápis tolerancí ozubeného kola

Na výkresu ozubeného kola není potom nutné předepisovat žádné konkrétní úchytky, ale postačí zápis:

7 – 6 – 5 Bz ST SEV 641 - 77,

kde:

7 = skupina úchylek kinematické přesnosti (stupeň 7),

6 = skupina úchylek plynulosti chodu (stupeň 6),

5 = skupina úchylek dotyku zubu (stupeň 5),

B = skupina boční vůle,

z = tolerance boční vůle. [11]

Případně je možné za toleranci boční vůle připsat třídu úchytky vzdálenosti os (I – VI) [11].

Zápis lze dále zjednodušit, jsou-li stupně přesnosti všech úchylek stejné: 10 Bz ST SEV 641 - 77 (kde 10 je souhrnný stupeň přesnosti všech tří funkčních skupin úchylek). Tímto zápisem je přesnost ozubeného soukolí a všechny jeho úchytky jednoznačně definovány normou [6].

Obecně platí, že čím přesnější jsou požadavky na ozubení, tím přesnější musí být i jeho kontrola. Při kontrole jednotlivých funkčních skupin není třeba kontrolovat všechny úchytky, které do této skupiny náleží. Jednotlivé úchytky ve skupině spolu totiž souvisí. Jednotlivé kontroly úchylek náležících do jedné skupiny se tak do jisté míry substituují. Rovněž není nutno kontrolovat všechny funkční skupiny úchylek za předpokladu, že od ozubení požadují pouze přesnost jedné z nich [12].

4 Poruchy ozubených kol a jejich dělení

Přestože poruchy ozubených kol nenáležejí k měření ozubení, ale spíše k celkové kontrole kol, mají s měřením velmi úzkou souvislost. Případná porucha kola může mít totiž výrazný vliv na výsledky měření. Je tedy užitečné před měřením ověřit, že kolo není poruchové. V praxi kontrola chyb ozubení předchází každému měření. Při měření ozubeného kola je tedy nesmírně důležité mít alespoň základní znalosti o možných poruchách a příčině jejich vzniku.

Porucha kol obecně nevznikne, pokud bylo soukolí pro daný způsob provozu správně dimenzováno, bylo-li správně vyrobeno a v neposlední řadě také pečlivě smontováno. Příčin poruchy ozubených kol je poměrně mnoho a vznikne-li porucha, je často těžké určit její příčinu. Proto je velmi důležité nejen jejich nalezení, ale i identifikace poruch a určení možných příčin. Následující dělení poruch ozubených kol je převzato z [8].

4.1 Otěr

Při otěru dochází k odebrání rovnoměrné či nerovnoměrné povrchové vrstvy zubu. Příčinou je například vzájemný nežádoucí styk dvou kol, přítomnost nečistot v mazivu nebo nedostatečná viskozita oleje.

4.1.1 Normální, přirozený otěr

Jedná se o takový otěr, který i přesto, že poškozuje kolo, neohroží během předpokládané životnosti jeho správnou funkci.

4.1.2 Zvýšený otěr

Zvýšený otěr rozřazujeme do následujících skupin:

1) Poškrábání

Je charakterizováno krátkými hladkými čárovitými prohlubněmi na boku zubu o hloubce 1 – 2 mikrometry. Důvodem takového poškození je přítomnost větších částic v mazivu.

2) Brusný (abrazivní) otěr

Je způsoben přítomností malých brusných částic v mazivu. Toto opotřebení se projevuje rovnoměrným setřením původní povrchové vrstvy boku zubu, který pak vypadá, jako by byl lapován.

3) Otěr opotřebením

Větší tvrdé částice, které vnikly do prostoru zubu (např. zbytky odroleného či jinak poškozeného zubu) způsobují velmi výrazný otěr. Výsledná struktura boků zubu je pak velmi drsná.

4) Tvorba vlnek

V důsledku velikého zatížení boků zubů (např. v důsledku vysokých rychlostí) jsou vrcholky drsnosti jednoho ze spoluzabírajících kol vtlačovány do kola druhého. Vznikají výrazné rýhy o hloubce 3 – 5 mikrometrů, které dosahují až ke konci zubu.

5) Tvorba vroubků

Při tomto typu poruchy je bok zubu poškozen vroubkováním diagonálního charakteru, které je způsobeno přetížením či nesprávným mazáním. Tato porucha se projevuje u cementovaných a kalených kol hypoidních a šnekových.

6) Interferenční otěr

K interferenčnímu otěru dochází vlivem nesprávného navržení vzdáleností os kol. Nastává zde záběr v oblasti paty zubu a dochází tedy ke vzniku vysokých tlaků, které vedou až k podřezání paty zubu.

7) Zadírání (scuffing)

V důsledku zvýšených tlaků v místě záběru dochází k lokálním zvýšením teploty. Není-li kolo dostatečně promazáno, dojde k místnímu svaření a následnému vytržení části kola. Boky zubů takto poškozených kol jsou drsné a pórovité.

4.2 Vylamování boků zubů

4.2.1 Pitting

V důsledku únavy dochází k vylamování částech z boku zubu a vznikají důlky. Rozlišujeme pitting záběhový a progresivní.

Záběhový pitting vzniká při prvním uvedení kola do provozu. K pittingu dochází pouze, dokud nevznikne dostatečně hladká plocha záběru, která snese dané zatížení. Záběhový pitting nemusí být nebezpečný, pokud jeho výskyt s časem běhu kola klesá.

Pokud i po odstranění místních vrcholků nerovností stále dochází k tvorbě nových pittingů, nebo k prohlubování stávajících, nastal tzv. progresivní pitting. Důvodem jeho vzniku jsou tzv. Herzovy tlaky, které vznikají u nedostatečně mazaných kol. Tyto tlaky se dají ovlivnit vhodnou volbou materiálu kola, oleje a jeho viskozitou, drsností boků zubů a volbou obvodové rychlosti soukolí. Za nepříznivých podmínek může pitting vyústit až v rozdrčení zubu.

4.2.2 Odlupování (spalling)

K odlupování dochází u tvrzených kol. Ploché částičky (šupinky) kovu se odlupují z boku kola. Tento jev je způsoben přetížením kola, či jeho nesprávným tepelným zpracováním a vede k vylamování obvykle větších částí zubu.

4.2.3 Vtisky

Dostanou-li se do mezizubního prostoru větší částičky z vylomeného zubu, jsou následně během fáze záběru vtlačeny do boku kola a po skončení fáze opět vypadnou. Na boku zubu pak můžeme najít mělké důlky.

4.3 Trhliny

4.3.1 Trhliny po broušení

Vlivem nesprávného výběru technologie broušení či nesprávného tepelného zpracování se na povrchu zubu objevují jemné trhlinky, které je mnohdy těžké při kontrole objevit.

4.3.2 Trhliny po kalení

Toto poškození se projevuje dlouhými hlubokými trhlinami, které zasahují někdy až do hloubky kalené vrstvy. Tyto trhliny jsou způsobeny buď přítomností vměstků, nebo častěji neodborným postupem při kalení či následném ochlazování. Mohou vést až k roztržení součásti.

4.3.3 Materiálové trhliny

V důsledku přítomnosti vměstků a jiných kovových nečistot v základním materiálu dochází ke vzniku jedné velké trhliny, která zasahuje do značné hloubky.

4.4 Koroze a eroze boků zubů

4.4.1 Chemická koroze

Vyznačuje se poškozením ve tvaru skvrn na bocích zubu a je způsobena přítomností chemicky aktivních látek (kyselin i zásad) v nevhodně zvolených mazivech.

4.4.2 Třecí koroze

Vzniká, pokud jsou k sobě plochy zubů přitlačovány velikou silou a zároveň vykonávají mikropohyby. Mikropohyby jsou způsobeny např. otřesy. Na bocích zubů vznikají potom hnědé skvrny, rovnoměrný otěr a někdy také vruby.

4.4.3 Zokujení

Zokujení vzniká kvůli oxidaci povrchu během tepelného zpracování. Vyznačuje se skvrnitými vyvýšeninami na boku zubu.

4.4.4 Eroze

Eroze vzniká u soukolí, do něhož je olej vstříkovan vysokou rychlostí přímo do místa záběru. Toto poškození se projevuje místním vyhlodáním zubu. Tato porucha se vyskytuje jen zřídka a nemá závažné negativní následky.

4.5 Plastická deformace boků zubů

4.5.1 Tečení za studena

Při tečení dochází k omačkání boků zubů a to kvůli jejich nedostatečné tvrdosti, nebo v důsledku nadměrného zatížení.

4.5.2 Vyhřátí

U vyhřátých zubů dochází v důsledku zmenšení jejich tvrdosti ke vzniku rýhovitých prohlubní na hlavách a patách zubů.

4.5.3 Tečení za tepla

Vlivem přílišného ohřevu soukolí změknou části, nebo i celé zuby a pod zatížením se deformují. K tomuto jevu dochází, selže-li mazání ozubení.

4.6 Lom zubu

4.6.1 Únavový lom

Vzniká v důsledku přetížení soukolí, vad materiálu nebo kvůli špatnému tepelnému zpracování. Dochází při něm ke ztrátě výrazné části nebo i celých zubů. Výsledná lomová plocha se skládá z části únavového lomu a z plochy silového lomu. Šíření únavového lomu je velmi pomalé. Únavová plocha má tedy velmi jemnozrnnou strukturu a často vykazuje i stopy koroze. V době, kdy už zbytková plocha zubu zatížení nevydrží, dochází k silovému lomu. Plocha silového lomu se vyznačuje drsnou strukturou.

4.6.2 Silový lom

Silový lom vzniká v důsledku jednorázového přetížení soukolí. Dělíme ho na lom křehký, jehož lomová plocha je v celém průběhu drsná, a deformační lom, během kterého dochází i ke vzniku hladké, vypuklé či prohloubené lomové plochy.

Křehký lom vzniká, došlo-li k přetížení v důsledku tažných sil. Deformační lom potom vznikl v důsledku sil smykových.

Z popisu poškození ozubených kol je zřejmé, že některé z poruch automaticky iniciují jiné poruchy a že různé poruchy kol jsou leckdy způsobeny stejnými činiteli. To v praxi znamená, že se na zkoumaném kole vyskytuje více poruch najednou. Zjistit potom prvotní příčinu defektů může být značně složité. Zatímco některé poruchy vznikají již při výrobě, jiné se projevují až po delší zátěži kola vlivem únavy, nebo vnějších vlivů. Proto je nutné vždy znát historii kontrolovaného kola.

5 Kontrola ozubených kol

„I správně navržené soukolí nesplní svůj účel, pokud nebude pečlivě vyrobeno a namontováno. Zjištění příčin, které vedly k poruše kola je navíc značně obtížné. Z tohoto důvodu je nutná pečlivá kontrola“ [13].

5.1 Kontrola hlavového průměru

Hlavový průměr se ve většině případů neodměřuje na hotovém kole, ale už během výroby na příslušném válci, který byl soustružen na průměr potřebný pro výrobu kola. Tedy ještě před obráběním zubů kola. Tolerance hlavového průměru kola jsou vždy záporné. Jejich velikost je určena dle stupně přesnosti kola, modulu a průměru kola. Pro kontrolu hlavového průměru je možno použít například posuvné měřítko, mikrometr nebo i kalibry [14].

Pokud je nutno měřit průměr hlavové kružnice už na hotovém kole, musíme zohlednit, zda má měřené kolo sudý, nebo lichý počet zubů. Pro kola s lichým počtem zubů je spojnice dotyků měřítka vychýlena o úhel γ oproti ose kola. Proti hlavě zubu je totiž mezera a je tedy nutno měřit vzdálenost k nejbližšímu protilehlému zubu [15]. Naměřená hodnota se tedy přepočítává dle následujícího vzorce:

$$d_a = \frac{d_a}{\cos \gamma}$$

Kde:

d_a je průměr hlavové kružnice,

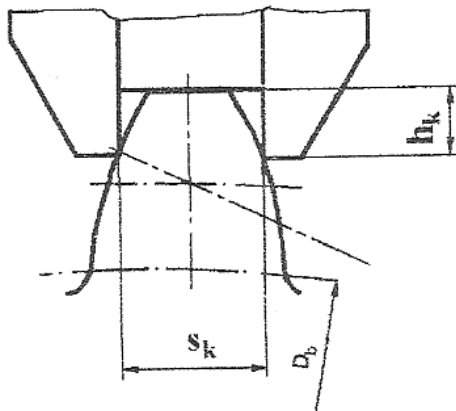
d_a je naměřená hodnota,

γ je úhel mezi spojnicí dotyku a osou kola.

5.2 Měření tloušťky zubu

Pomocí měření tloušťky zubu se zjišťuje, zda bude při záběru dodržena stanovená vůle při daných osových vzdálenostech [1].

5.2.1 Přímé měření tloušťky zubu (v konstantní tloušťce a výšce)



Obrázek 2: Měření tloušťky zubu v konstantní výšce [18].

Jedná se o nejjednodušší, ale rovněž nejméně přesný způsob měření tloušťky zubu. Toto měření je rovněž závislé na přesnosti průměru hlavové kružnice, a proto se používá jen zřídka [16].

Především potom, není-li možno měřit rozměr přes zuby. Měření není ovšem závislé na počtu zubů kola, pouze na jeho modulu, úhlu záběru a posunutí základní kružnice [17].

K měření používáme tzv. zuboměr. Jedná se v podstatě o posuvné měřítko sdružené s hloubkoměrem, který svírá s měřítkem úhel 90° . Postup měření je velmi jednoduchý. Hloubkoměr nastavíme na vzdálenost h_k od hlavové kružnice a přiložíme posuvné měřítko k zubu. Takto přímo změříme šířku zubu s_k [1]. Princip měření je znázorněn na obrázku 2.

Teoretickou tloušťku zubu s_k v konstantní výšce h_k určíme z následujícího vzorce:

$$s_k = \frac{\pi \cdot m \cdot \cos^2 \alpha}{2}$$

Jmenovitou konstantní výšku potom určíme ze vztahu:

$$h_k = m \left(1 - \frac{\pi \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{4} \right)$$

Pro korigované ozubení platí vztahy:

$$s'_k = s_k \pm x \cdot m \cdot \sin 2\alpha,$$

$$h'_k = h \pm x \cdot m \cdot \cos^2 \alpha.$$

Kde:

α je úhel záběru kola,

m je modul kola,

s_k je tloušťka zubu v konstantní výšce,

h_k je konstantní výška od hlavové kružnice,

x součinitel posunutí profilu (korekce),

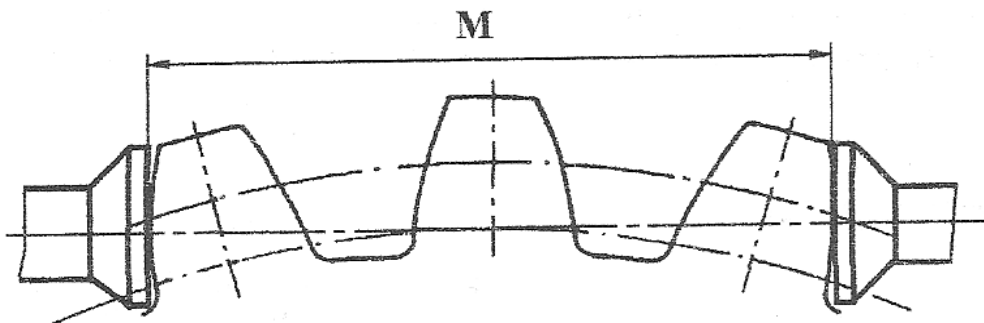
s'_k je tloušťka zubu v konstantní výšce korigovaného kola,

h'_k je konstantní výška od hlavové kružnice korigovaného kola.

Jak na hloubkoměru, tak na posuvném měřítku lze měřit s přesností okolo 0,02 mm. Při měření zubu, jehož tloušťka je větší než 45 mm, je ovšem nutno naměřenou hodnotu zkorigovat, neboť rozdíl mezi délkou kruhového oblouku a naměřené tětivy může mít velký vliv na přesnost měření [1].

5.2.2 Měření míry přes zuby

Měření míry přes zuby je nejčastější způsob měření ozubení. Během této kontroly měříme vždy polovinu tloušťky dvou zubů od sebe vzdálených o tabelizovaný počet zubů. Viz obr. 3. Jedná se o nepřímý způsob měření tloušťky zubu, který není závislý na ose kola a jde ho tedy použít i během obrábění [16, 19].



Obrázek 3: Měření míry přes zuby [18].

Podle naměřeného profilu lze navíc přímo určit hodnotu, o níž je třeba posunout nástroj k dokončení obrábění. Tento způsob měření lze použít i pro vnitřní ozubení a rovněž pro měření kol se šikmými zuby, ovšem jen tehdy, je-li šířka zubu dostatečně velká [1]. Pro měření rozměru přes zuby se běžně používají talířkové mikrometry, pro rychlé měření lze použít i posuvných měřítok [1].

Je důležité, aby se měřidlo dotýkalo ozubení v blízkosti roztečné kružnice, resp. v blízkosti valivé kružnice v případě korigovaného ozubení [20].

Před samotným měřením musíme nejdříve z příslušné normy nebo ze strojnických tabulek odečíst počet zubů, přes který je třeba měřit. Tato hodnota se dá i vypočítat pomocí vzorce:

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

Kde:

z' je počet zubů, přes které měříme,

z je počet zubů kola,

α je úhel záběru kola.

Následně v normách odečtu hodnotu tzv. jmenovitého rozměru přes zuby. I tento rozměr můžeme stanovit pomocí vzorce:

$$M = m \cdot [\pi \cdot \cos \alpha \cdot (z' - 0,5) + z \cdot \cos \alpha - ev \alpha].$$

Kde:

$$ev \alpha = tg \alpha - \hat{\alpha},$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\pi}{180} \cdot \alpha,$$

α je úhel záběru kola,

z' je počet zubů, přes které měříme,

z je počet zubů kola,

m je modul kola,

M je jmenovitý rozměr přes zuby.

Pomocí porovnání námi naměřené a ideální hodnoty rozměru přes zuby můžeme snadno určit odchylku rozměru přes zuby. Při měření korigovaných kol tímto způsobem musíme rozměr přes zuby přepočítat [21]. K tomu slouží níže uvedený vzorec:

$$\acute{M} = M \pm 2 \cdot x \cdot m \cdot \sin \alpha.$$

Kde:

α je úhel záběru kola,

m je modul kola,

x součinitel posunutí profilu (korekce),

M je jmenovitý rozměr přes zuby nekorigovaného kola,

\hat{M} je jmenovitý rozměr přes zuby korigovaného kola.

Při počítání rozměru přes zuby pro kola se šikmými zuby vycházíme z rovnice:

$$M = m_n \cdot [\pi \cdot \cos \alpha \cdot (z - 0,5) + z \cdot \cos \alpha - ev \alpha_t].$$

Kde:

α_t je úhel záběru kola v tečné rovině,

α je úhel záběru kola,

m_n je modul kola v normální rovině,

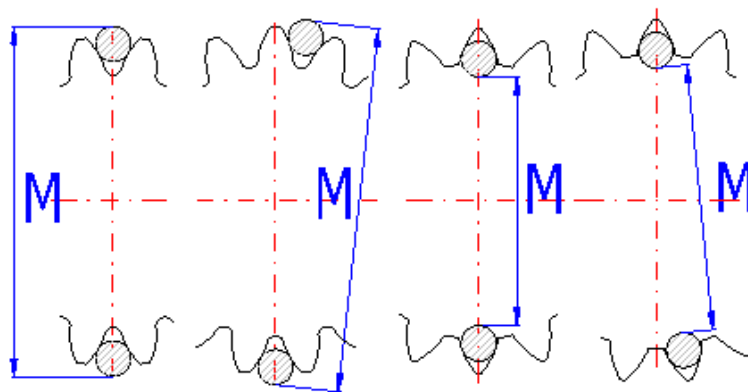
z je počet zubů, přes které měříme,

z je počet zubů kola,

M je jmenovitý rozměr přes zuby.

5.2.3 Měření tloušťky zubů přes kuličky (válečky)

Jedná se o univerzální způsob měření, který rovněž není závislý na ose kola. Tímto způsobem se měří tloušťka dvou zubních mezer a tedy vlastně čtyři boky zubů. Pro kola s přímými zuby se užívá válečků, ale pro kola se šikmými zuby musíme použít kuličky. Těto metody se užívá zejména pro měření kol s vnitřním průměrem [16]. Měření rozměru přes válečky pro vnitřní a vnější ozubení s lichými či sudými počty zubů je znázorněno na obr. 4.



Obrázek 4: Měření rozměru přes zuby [22].

Měřicí tělíska pro daný průměr měřeného kola vždy vybíráme tak, aby jejich střed ležel co nejbližší k roztečné kružnici měřeného kola. Rozměr kuličky (válečku) lze určit ze vzorce:

$$d_v = \frac{d \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot z}\right)}{\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2 \cdot z}\right)}$$

Kde:

d je průměr roztečné kružnice,

z je počet zubů kola,

α je úhel záběru kola,

d_v je průměr (válečku) kuličky.

Po zvolení vhodného průměru měřících tělísek je umístíme do mezizubových mezer. Pro kola se sudým počtem zubů umístíme měřící tělíska do protilehlých zubových mezer. Pro kola s lichým počtem zubů stojí pak naproti prvnímu tělísku zub a druhé měřící tělíska tedy musíme dát do mezery co nejbližší k tomuto zubu. Následně posuvným měřítkem odečteme vzdálenost mezi dvěma měřícími tělíska a porovnáme s tabelizovanými hodnotami [16].

Teoretické hodnoty rozměru přes válečky lze spočítat ze vzorce:

$$M_v = 2 \cdot R_s + d_v.$$

Pro vnější ozubení se sudým počtem zubů.

$$M_v = 2 \cdot R_s \cdot \cos\left(\frac{90}{z}\right) + d_v.$$

Pro vnější ozubení s lichým počtem zubů.

$$M_{vn} = 2 \cdot R_s - d_v.$$

Pro vnitřní ozubení se sudým počtem zubů.

$$M_{vn} = 2 \cdot R_s \cdot \cos\left(\frac{90}{z}\right) - d_v.$$

Pro vnitřní ozubení s lichým počtem zubů.

Kde:

R_s je poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku (kuličky),

d_v je průměr (válečku) kuličky,

z je počet zubů kola,

M_v je rozměr přes válečky vnějšího ozubení,

M_{vn} je rozměr přes válečky vnitřního ozubení.

5.3 Kontrola obvodového a čelního házení

Kontrola obvodového (radiálního) házení je základní zkouškou kinetické přesnosti. Přístroje na měření obvodového házení jsou velmi jednoduché. Skládají se z dotyku s měřícím tělískem a měřícího zařízení, popřípadě úhlooměru. Viz obr. 5. Obvodové (radiální) házení F_r je definováno jako největší radiální změna polohy měřícího elementu, který je postupně vkládán do všech mezizubových mezer po celém obvodu

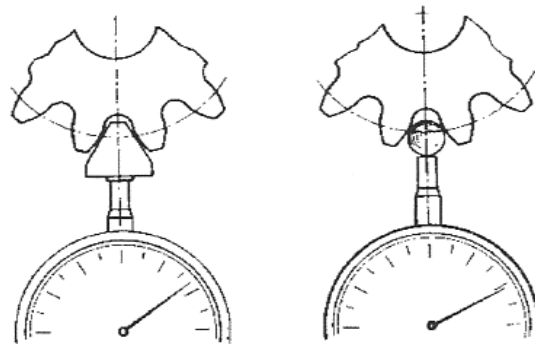
kola. Jako dotykový element slouží zpravidla kulička nebo klín, a je volen tak, aby jeho dotyk s ozubením ležel zhruba v polovině výšky zubu [23].

Volba vhodného průměru měřicí kuličky je závislá na mnoha veličinách a je tabelizovaná. Rozměry použitého měřicího elementu musí být vždy uvedeny v protokolu měření [18]. V příloze 2 je uveden protokol kontroly obvodového házení měřený pomocí souřadnicového měřicího stroje.

Kontrolu obvodového házení je nesmírně důležité provést především u ozubených kol převodovek, od kterých se očekává minimální boční vůle. Radiální házení totiž výrazně ovlivňuje hlučnost soukolí. Nejčastější příčinou úchyly obvodového házení bývá špatné upnutí nástroje při výrobě kola.

Obvodové házení nezahrnuje pouze excentricitu ozubení (resp. její dvojnásobek) oproti funkčnímu resp. centračnímu otvoru, ale i chyby roztečí, šířky boků zubu a evolventního profilu v daném místě ozubení [18, 24].

Kontrola čelního házení se pak provádí pomocí obdobných měřidel, které jsou užity při měření radiálního házení na čele kola [25].



Obrázek 5: Měření obvodového házení [18].

5.4 Kontrola odvalem

5.4.1 Kontrola jednobokým odvalem

Kontrola jednobokým odvalem je základní kontrolou kinetické přesnosti soukolí. Princip metody spočívá v spoluzabírání zkoušeného kola s párovým kolem, nebo s kontrolním elementem. Tím může být například kontrolní kolo, hřeben nebo šnek. Kontrolní element musí být alespoň o tři stupně přesnější než zkoušené kolo. Měření je při záběru vystředěno za funkční průměr. Záběr kola s kontrolním elementem je prováděn při konstantní osové vzdálenosti, při normální zubové vůli a při konstantním momentovém zatížení. Úchyly kontrolovaného kola se během záběru projeví jako odchylka skutečného otočení (polohy) kola proti teoretické hodnotě. Měřicí přístroje pro zkoušku jednobokým odvalem měří natočení obou zabírajících kol (popřípadě kola a elementu) a z jejich odchylek pak určují tzv. úchyly převodu ozubené dvojice F_i a f_i . F_i je kinetická úchylna při jednobokém odvalu. Jedná se o odchylku mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou při měření na celém obvodu kola. Úchylna f_i se nazývá místní kinetická úchylna kola a jedná se o rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou při měření jedné rozteče. V praxi bývá úhlové vyjádření přepočteno na maximální délkovou úchylnu na roztečné kružnici a takto je také zadána v příslušných normách [18].

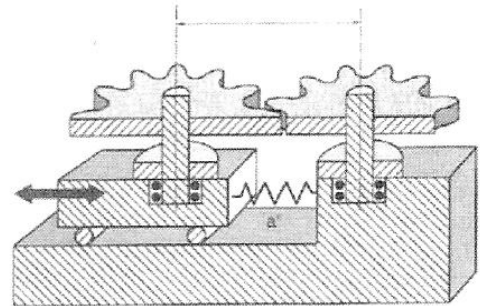
Ze všech metod kontroly ozubení je metoda jednobokého odvalu nejbližší reálnému provozu soukolí. Tato metoda má však i nevýhody. Je technicky náročná a proto zřídka používaná. Vzhledem k tomu, že na výsledek kontroly má vliv hned několik dílčích úchylek ozubení, je z výsledku měření prakticky nemožné

určit jejich druhy a podíl na výsledku kontroly. Jednotlivé úchytky se navíc mohou vzájemně zesilovat, ale i kompenzovat [18].

5.4.2 Kontrola dvoubokým odvalem

Kontrola dvoubokým odvalem se v mnohém podobá kontrole jednobokým odvalem. Tentokrát ovšem kola zabírají bez zubové vůle. Toho je dosaženo působením konstantní síly ve směru osové rozteče (např. od pružiny). Tato síla způsobí, že boky zubů zůstávají stále v záběru. Viz obr. 6. Úchytky dvoubokého odvalu F_i'' (pro měření na celém obvodu kola) resp. f_i'' (pro měření v oblasti jedné rozteče) je pak rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou vzdáleností os zabírajících kol.

Kontrola dvoubokým odvalem je vlastně obdobou měření obvodového házení. Měřicí kulička je zde nahrazena přesným protikolem. Z výsledků kontroly dvoubokým odvalem lze opět jen velmi těžko odvodit vazby na dílčí druhy úchytek. Kontrola je tak vhodná spíše pro hromadnou výrobu, a proto je dnes používanější než kontrola jednobokým odvalem [24, 26].



Obrázek 6: Princip zkoušky dvoubokým odvalem [24].

5.5 Kontrola zubové rozteče

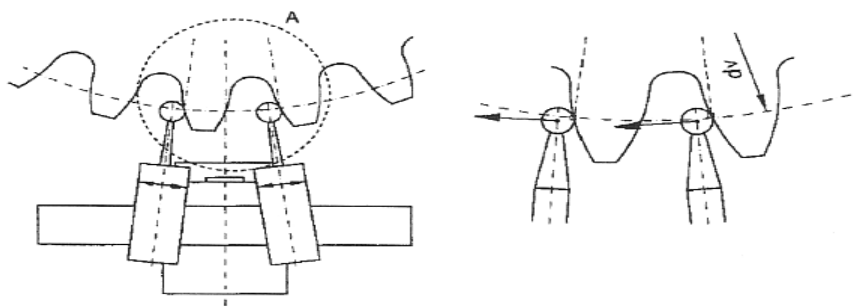
Při kontrole zubové rozteče se měří vzájemná poloha stejnohlých boků zubů po obvodu kola. V praxi rozlišujeme mezi měření rozteče základní, normální, čelní a součtové. Pouze měření základní rozteče není přitom závislé na poloze osy kola. Metody měření jsou voleny dle způsobu výroby kola a účelu jeho měření. Nejčastěji se měří úchytky čelní rozteče a mezní součtová úchytky roztečí (její sumace). Na výsledku měření roztečí mají vliv mimo excentricity a ovality i další komplexní úchytky boku zubů. Proto dobře charakterizuje celkovou kinematickou přesnost ozubeného kola [18].

5.5.1 Měření čelní rozteče

Čelní roztečí p_t je myšlena vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími pravými nebo levými boky zubu na roztečné kružnici kontrolovaného kola. Běžně se k měření čelní rozteče užívá těťivové nebo úhlové metody. Případně lze použít souřadnicový měřicí stroj [18]. V příloze 3 je zobrazen diagram průběhu úchytek čelních roztečí.

Měření roztečí těťivovou metodou

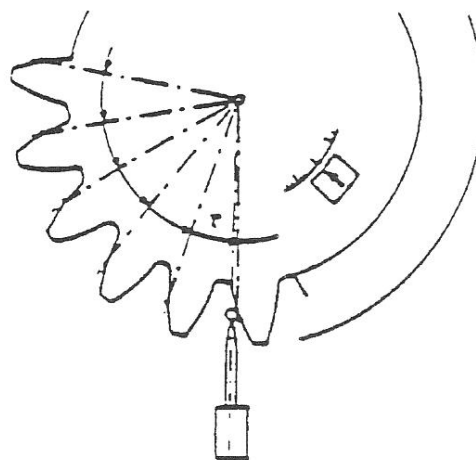
Měření těťivovou metodou probíhá pomocí dvou dotyků v čelní rovině kola. Viz obr. 7. Oba dotyky jsou ve stejné osové vzdálenosti od osy kola. Měří se délka těťivy mezi dotykovými body. Přesné nastavení radiální vzdálenosti dotyků je velice obtížné, proto musíme měření provést po celém obvodu kola. Teprve srovnáním naměřených hodnot jednotlivých roztečí s průměrnou hodnotou ze všech měření získáme přehled o úchytkách jednotlivých zubových roztečí. V zájmu zpřesnění měření jsou některé měřicí stroje vybaveny posuvnými saněmi, které umožňují zasunout dotyky do konstantní radiální vzdálenosti zhruba v jedné polovině výšky zubu [18].



Obrázek 7: Princip měření čelní rozteče [24].

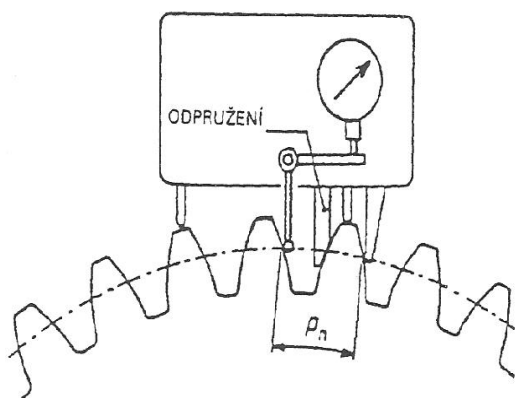
Měření čelních roztečí úhlovou indexovou metodou

Pro tuto metodu se používá pouze jeden dotyk, který se pomocí úhlového dělicího stroje pohybuje po obvodu kola od jedné mezizubové mezery ke druhé. Měřicí hlava zajišťuje radiální pohyb dotyku do místa měření a zase zpět. Na každém boku zubu je přitom změřen rozdíl mezi skutečnou a teoretickou polohou dotyku. Viz obr. 8. Každá naměřená hodnota představuje polohovou úchylku daného boku zubu. Ze všech měření po obvodu kola lze následně stanovit součtovou úchylku roztečí kola. Obdobný princip měření rozteče užívají také souřadnicové měřicí stroje. Měření čelní rozteče je tedy velmi rozšířené [24].



Obrázek 8: Měření čelní rozteče úhlovou indexovou metodou [27].

5.5.2 Měření normální rozteče



Obrázek 9: Přenosný komparátor pro měření normální rozteče [27].

Normální rozteč p_n je délka oblouku dvou sousedních levých či pravých boků zubů na roztečném válci [18].

Je měřena pomocí přenosného komparátoru. Viz obr. 9. Jedná se o přístroj se třemi dotyky. Dva dotyky obepnou jeden zub z obou stran a třetím dotykem následně odměříme vzdálenost k boku následujícího zubu. Před měřením se komparátor nastavuje na přesnou hodnotu rozteče pomocí základních nebo speciálních měrek [27, 18].

Protože hodnoty tolerancí, jež jsou uvedené v normách, se vztahují k čelní rozteči, je nutné naměřené hodnoty přepočítat do čelní roviny. K tomu slouží následující vztah:

$$f_{pt} = \frac{f_{pn}}{\cos\beta}$$

Kde:

f_{pn} je úchylka normální rozteče,

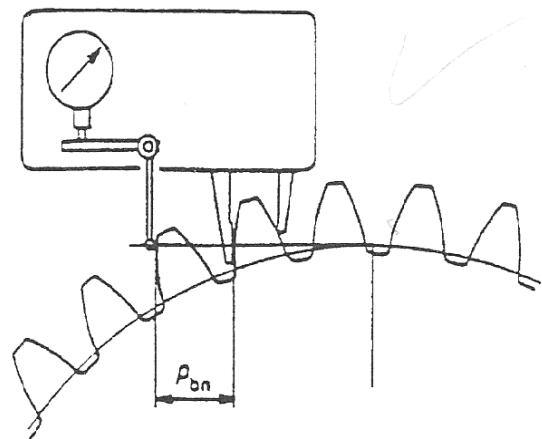
f_{pt} je úchylka rozteče v tečné rovině,

β je úhel sklonu zubů.

5.5.3 Měření základní rozteče

Jako základní rozteč ozubeného kola p_b se označuje nejkratší kolmá vzdálenost dvou stejnohlých boků zubu. Tato vzdálenost je vždy konstantní. Tato míra se zároveň rovná délce oblouku mezi začátky dvou stejnohlých evolvent na základní kružnici [28].

Pro měření základní rozteče se používá přenosný komparátor. Před měřením je třeba komparátor zkalibrovat na měření úchylek základní rozteče pomocí vhodného etalonu. Při měření musíme zajistit, aby se dotyky komparátoru nenalézaly v oblasti modifikovaného profilu nebo v oblasti boční křivky [18]. Princip měření je znázorněn na obrázku 10.



Obrázek 10: Měření základní rozteče [27].

Pomocí následující rovnice můžeme ze základní rozteče vypočítat základní normální rozteč:

$$p_{bn} = p_{bt} \cdot \cos\beta.$$

Kde:

p_{bn} je základní rozteč v normální rovině,

p_{bt} je základní rozteč v tečné rovině,

β je úhel sklonu zubů.

Pro teoretickou hodnotu normální základní rozteče potom platí vztah:

$$p_{bn} = m_n \cdot \pi \cdot \cos\alpha_n.$$

Kde:

p_{bn} je základní rozteč v normální rovině,

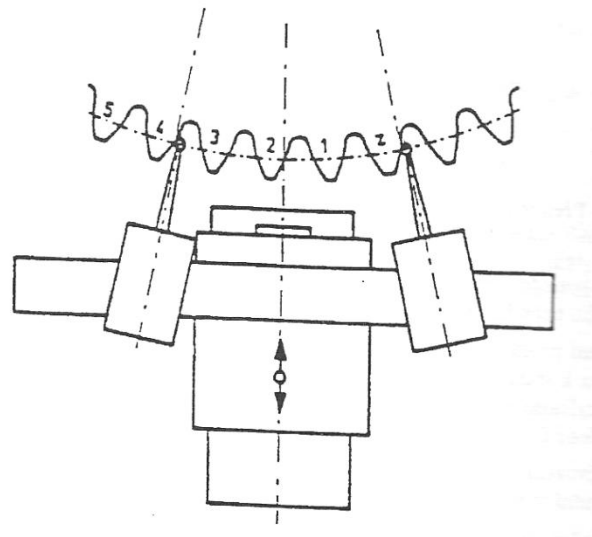
m_n je modul kola v normální rovině,

α_n je úhel záběru kola v normální rovině.

5.5.4 Měření součtové úchytky roztečí kola na jednotlivých čelních sektorech

Mezní součtová úchytky roztečí kola F_p je dle normy ČSN 01 4603 definována jako algebraický součet úchylek jednotlivých čelních roztečí po celém obvodu kola. Kolo je přitom upnuto za funkční průměr (otvor). Viz obr. 11. Mezní součtová úchytky roztečí tedy popisuje celkovou kinematickou odchylku všech stejnolehých boků zubů v tečném směru [9].

Přestože můžeme součtové úchytky určit i z pouhé sumace úchylek naměřených komparátorem, je tento způsob velmi nepřesný. Měřící dotyk komparátoru se totiž zpravidla nedotýká boku zubu ve stejném místě, ve kterém se při měření předchozí rozteče dotýkal pevný dotyk komparátoru. Tím vzniká odchylka, která se při sumaci po obvodu celého kola naakumuluje. Z tohoto důvodu se pro měření kol s vyšším počtem zubů než 60 doporučuje použít metodu měření sektoru [18, 24].



Obrázek 11: Měření roztečí v čelních sektorech [27].

Měření se provádí pomocí dvou dotyků, které měří nejkratší vzdálenost mezi stejnolehlými boky dvou zubů, vzdálenými o určitý počet roztečí.

Počet roztečí, přes které se měří, se volí dle možnosti použitého komparátoru tak, aby počet měření byl dostatečný pro vyhodnocení součtové úchytky sektorů kola. Poměr počtu zubů kola a počtu sektorů by přitom mělo být celé číslo. Není-li tomu tak, volíme vždy vyšší celé číslo. Poslední sektor pak obsahuje některé z roztečí sektoru prvního [18].

5.6 Kontrola profilu zubu

Skutečný tvar profilu zubu je ovlivněn nepřesností obráběcího nástroje, seřízením obráběcího stroje a v neposlední řadě také parametry jeho nastavení. Proto profil zubu není nikdy ideální evolventa či cykloida [29]. Odchylky profilu zubu můžeme kontrolovat buď opticky, nebo mechanicky [30].

5.6.1 Optická metoda

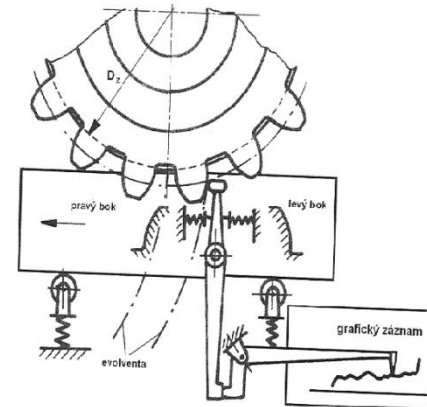
Optická metoda se provádí pomocí profilprojektoru. Obrys ozubeného kola je promítnut na průsvitný papír, na který se ve měřítku shodném se zvětšením profilprojektoru sestrojí ideální tvar profilové křivky boku zubu, se kterým se posléze obrys kontrolovaného kola porovnává. Tento způsob kontroly není příliš přesný, a proto se v reálném provozu používá jen pro kola s modulem menším než 1 [18, 30].

5.6.2 Mechanické metody

Mnohem častěji se využívá kontrola mechanická. Ta se provádí pomocí evolventoměru. Evolventoměr je přístroj, který vytváří ideální evolventu tím, že odvaluje měřící pravítko po kotouči, který má stejný průměr jako základní kružnice kontrolovaného kola. Přístroj je zároveň opatřen dotykem, který se odvaluje po bodu kola a porovnává tak reálný profil zubu s ideálním tvarem evolventy. Výsledek kontroly se zobrazuje na číselníku evolventoměru, nebo se odchylky kontrolovaného profilu automaticky zaznamenávají na milimetrový papír. Existují dva druhy evolventoměrů [29, 18].

Evolventoměr s pevnou základní kružnicí

Tento způsob měření je určený pro hromadnou výrobu. Kontrolované kolo a kotouč o průměru základní kružnice kontrolovaného kola se upevňují na trn přístroje. Na kruhový kotouč přiléhá pravítko, které je spojené se suportem stroje. Na suportu je uchycena dvouramenná páka. Jeden její konec se dotýká kontrolovaného kola a druhý zabírá se zapisovací pákou. Při posuvu suportu dochází k odvalování kruhového kotouče po pravítku. Dotek pak přenáší všechny odchylky boku zubu kontrolovaného kola od ideální evolventy, kterou válec při odvalování po pravítku vytváří [29]. Schéma přístroje je znázorněno na obr. 12.



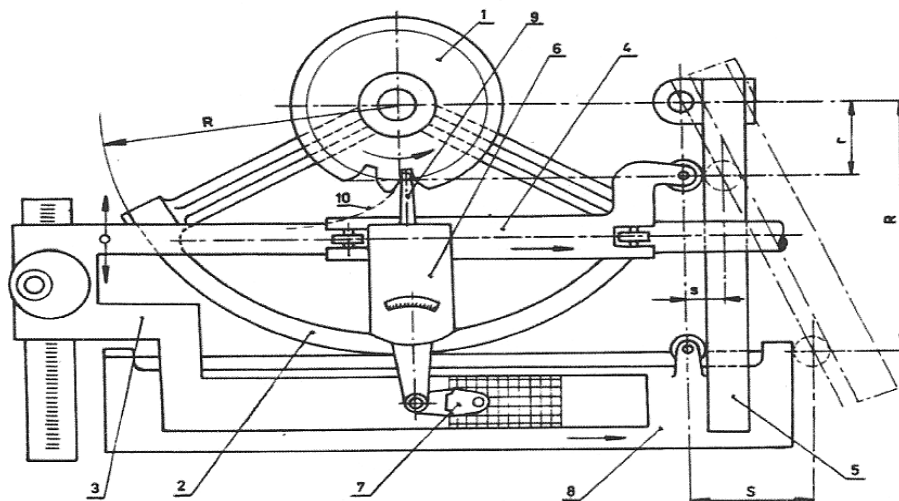
Obrázek 12: Evolventoměr s pevnou základní kružnicí [29].

Veškeré úchytky profilové křivky boku zubu se graficky projeví jako vlnitosti na jinak rovné čáře, nakreslené pisátkem umístěným na konci zapisovací páky [29].

Evolventoměr se stavitelnou základní kružnicí

Na obrázku 13 je uvedeno schéma evolventoměru se stavitelnou kružnicí. Kontrolní ozubení je upevněno v ose kruhového segmentu o poloměru $r = 150$ mm. Základní kružnice se nastavuje pomocí spirálového mikroskopu. Řídící mechanismus převádí rotační pohyb tangenciálního suportu. Měřící dotyk je upevněn na suportu a pohybuje se po evolventní dráze a současně po boku zubu otáčejícího se měřeného kola. Odchylna profilu boku zubu od ideální evolventy se zaznamenává na číselníkovém úhlooměru a je rovněž zapisována elektronickým zapisovacím zařízením [18].

Během měření musí být nastaven správný poměr mezi otáčivým pohybem měřeného kola a podélným posuvem dotyku. Ten se nastavuje pomocí pákového, nebo lineárně řízeného systému dle průměru základní kružnice kola. Výhodou tohoto stroje je nastavitelný poloměr základní kružnice zkoušeného kola. Měření na něm je ovšem náročnější než na evolventoměru s pevnou základní kružnicí. Hodí se proto pro kontrolu kol různých velikostí v menších sériích [18].



Obrázek 13: Evolventoměr se stavitelnou základní kružnicí [29].

Výše zmíněné evolventoměry velmi dobře ukazují princip měření profilu zubu, ale jsou dnes už zastaralé. V dnešní době se z důvodů rychlosti a univerzálnosti prakticky výhradně používají souřadnicové měřicí stroje s příslušným softwarem. I zde se v protokolu měření zobrazuje evolventní profil jako přímka. Jednotlivé úchytky se vztahují k této přímce a definují v hodnoceném úseku L_α celkovou úchytku profilu F_α , dílčí úhlové úchytky profilu $f_{H\alpha}$ a tvarové úchytky profilu $f_{f\alpha}$ [31].

Ke stanovení $f_{H\alpha}$ a $f_{f\alpha}$ je ale nutno nejdříve metodou nejmenších čtverců početně definovat střední profil [24]. Výsledný protokol je uveden v příloze 4.

Ne všechny naměřené odchylky od ideálního profilu jsou ale výrobní chybou. Někdy se může jednat o velmi sofistikované a modifikované korekce, které mají za cíl optimalizovat životnost ozubeného soukolí v reálném provozu. Tak je tomu například i u ozubených kol převodovek osobních automobilů. Motor automobilu vykazuje točivý moment zhruba 200 Nm v jednom směru, ale ve směru druhém (brždění motorem) jsou boky zubů namáhány jen zlomkem této hodnoty. Díky tomu dochází v závislosti na směru rotace k rozdílným průhybům hřidelí a různému namáhání ozubených kol, což vede k potřebě odlišné modifikace pravých a levých boků zubů kola. V automobilech pak běžně mají ozubená kola převodovek odlišné modifikace i úchytky pravých a levých boků zubů.

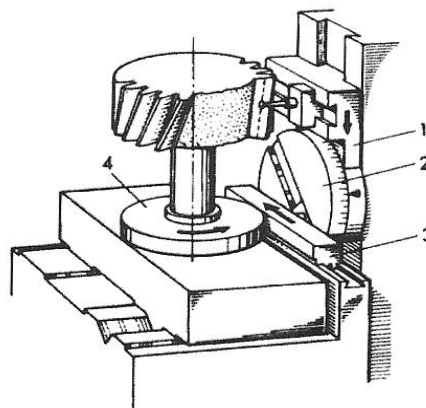
5.7 Kontrola sklonu boků zubů

Při kontrole sklonu zubů používáme přístroje, které plynule či přerušovaně snímají sklon zubů měřícím dotykem. Většinou se používají kontrolní stroje, které zároveň se sklonem zubů kontrolují i jeho profil. Kontrola se provádí alespoň na 3 místech rovnoměrně rozložených po obvodu kola a to z obou stran zubu (pravý i levý bok) [18].

5.7.1 Přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice

Princip měření spočívá v paralelním posuvu měřících saní vůči ose kontrolovaného kola. Viz obr. 14. Na saních je umístěn měřící dotyk a kotouč kulisy. Ten je nastaven dle úhlu sklonu zubů na základní kružnici. Vedení kulisy převádí posuvný pohyb dotyku na posuv pravítka, které uděluje měřenému kolu rotaci přes valivý kotouč. Tyto přístroje se díky jednoduchému principu a robustním rozměrům používají spíše ve velkosériové výrobě [18, 26].

- 1) měřicí saně pro kontrolu sklonu zubu
- 2) vedení kulisy pod úhlem βb
- 3) valivé pravítko
- 4) vyměnitelný kotouč valivé kružnice

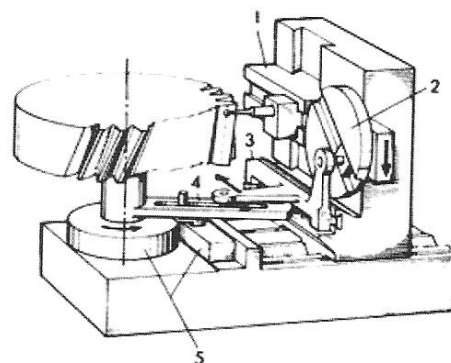


Obrázek 14: Schéma přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice [18].

5.7.2 Přístroje s nastavitelnou základní kružnicí

Tento typ přístroje se liší od přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice nahrazením vyměnitelných kotoučů pevně zabudovaným válcem. Viz obr. 15. Jeho posouvání je provedeno prostřednictvím nastavitelného pákového systému. Poměr mezi podélným a otáčivým pohybem je prováděn polohováním přísuvných saní na poměr základní kružnice, stejně jako správná poloha měřícího dotyku. Tento typ přístroje se hodí především pro měření kol, při kterém často střídáme kola s různým průměrem základní kružnice [18].

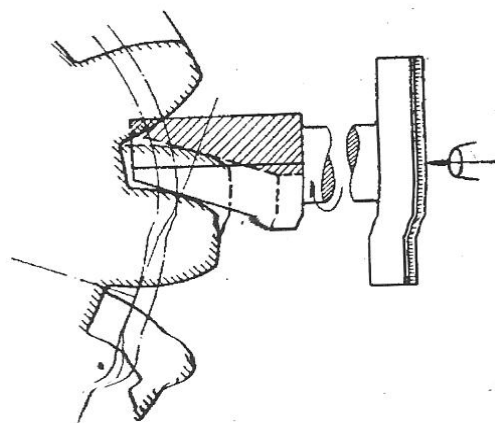
- 1) měřicí saně pro kontrolu sklonu zubu
- 2) vedení kulisy pod úhlem βb
- 3) saně převodu
- 4) řídící pravítko
- 5) valivý válec s pravítkem



Obrázek 15: Schéma přístroje s nastavitelnou základní kružnicí [18].

5.7.3 Měření na tvořící přímce tečné k základnímu válci

Měření se provádí pomocí měřící plochy (klínu). Ta se otáčí kolem osy kolmé k ose kola. Tato plocha je vzhledem k ose své rotace skloněna o úhel záběru měřeného kola, nebo je se svou osou rovnoběžná. Kolem osy rotace měřící plochy se volně otáčí kotouč se stupnicí, který slouží k odečítání úhlu sklonu zubů. Tento kotouč se při dotyku s bokem zubu kontrolovaného kola sám nastaví na úhel šroubovice kola. Je-li úhel měřící plochy (klínu) shodný s úhlem záběru kola α , pak úhel odečtený na stupnici odpovídá skutečnému úhlu šroubovice měřeného kola na roztečném válci [18]. Na obrázku 16 je nastíněn princip měření.



Obrázek 16: Kontrola úhlu šroubovice na tvořící přímce [18].

Stejně jako tomu bylo u měření profilu zubu, i při měření sklonu zubů se dnes používají převážně souřadnicové měřicí stroje. Kontrola sklonu zubů a profilu probíhá zpravidla na stejných strojích a dokonce i na jedno upnutí (měření).

Z naměřených údajů stanovují celkovou odchylku od ideální šroubovice F_{β} . Ta se dále pomocí matematických metod rozděluje na úhlovou $f_{H\beta}$ a tvarovou $f_{f\beta}$ složku [7].

5.8 Kontrola dotyku zubů

Rozlišujeme dva druhy kontrol dotyku zubů – a to kontrolu statickou a dynamickou.

5.8.1 Statická kontrola dotyku zubů

Před samotnou kontrolou je třeba ozubené kolo důkladně očistit od všech nečistot a olejových reziduí. Následně na tři nebo více zubů pastorku nanese tenkou vrstvu značkovací směsi. Výsledný film by měl být hladký a tenký, o tloušťce zhruba 3 – 15 mikrometrů. Mají-li výsledky mít vypovídací hodnotu, musíme zajistit rovnoměrné rozložení tloušťky a také hustoty filmu. Pastorek následně necháme zabírat s protikolem, popřípadě etalonovým kolem. Přitom je nutné provést záběr v obou směrech, aby se směs nanese na pravé i levé boky zubů. Kola musí zabírat s odpovídajícím krouticím momentem, aby se zajistil dostatečný přítlak. Kontrola je prováděna buď po celém obvodu kola, nebo (u větších kol) přinejmenším na třech stejně velkých úsecích rovnoměrně rozložených po obvodu kola. Takto se odhalí případná periodická chyba [24].

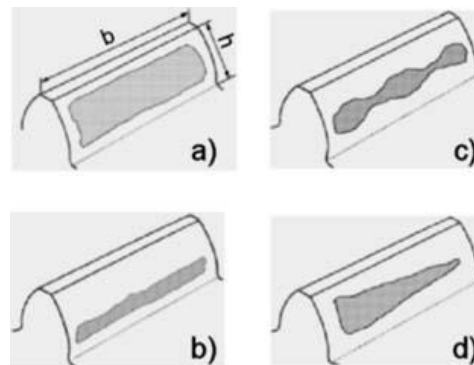
Výsledné kontaktní vzory jsou zaznamenávány buď fotografií, nákresem, anebo jsou sejmuty pomocí pásky a přeneseny na papír [24].

5.8.2 Dynamická kontrola dotyku zubů

Princip dynamické kontroly je téměř totožný. Po důkladném očištění kola je opět na tři či více zubů, tentokrát obou kol, nanese tenká a hladká vrstva barviva. Kola spolu následně zabírají při narůstajících otáčkách. Postup je opakován alespoň pro tři různé rozsahy otáček. Po každém měření je nutné zaznamenat dotykové vzory. Mezi jednotlivými měřeními je nutné kola řádně očistit [24].

5.8.3 Vyhodnocení měření dotyku zubů

Vyhodnocení vzorů kontaktů zubů, ať už pro statickou nebo dynamickou kontrolu, je velice komplikované. Roli zde hraje například velikost kola, účel jeho použití, způsob výroby kola, požadovaná životnost a očekávané provozní zatížení. Obdobný kontaktní vzor může vést pro různá kola s rozdílným použitím při hodnocení k odlišným závěrům. Totéž platí i pro různé druhy kol. Výrazný rozdíl v hodnocení je především při porovnání kol čelních s kuželovými. V důsledku tedy neexistuje žádný obecný standard pro vyhodnocování dotykových vzorů. Pro jejich vyhodnocení je třeba především zkušenost, znalost kontrolovaného kola, způsobu jeho výroby a charakteristiky jeho



Obrázek 17: Kontakt zubů ozubeného kola [24].

budoucího provozu [24]. Kontakty ozubení jsou znázorněny na obrázku 17 (jediný kontakt a) je správný).

5.9 Kontrola drsnosti povrchu

Ať už je při výrobě ozubeného kola použito jakékoli technologie, nikdy není jeho povrch ideálně hladký. Drsnost povrchu může mít velký vliv na funkci převodového mechanismu a i na jeho životnost.

Profil povrchu rozdělujeme na tři složky:

- 1) Základní profil
- 2) Vlnitost
- 3) Drsnost

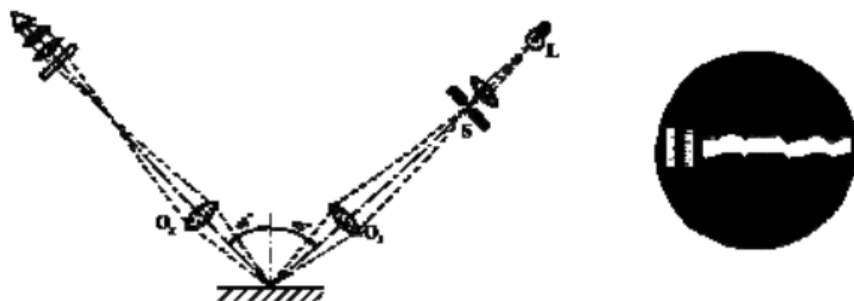
Profil povrchu je charakterizován množstvím parametrů. Mezi nejčastěji užívané patří největší výška profilu R_z a průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a . Dalšími charakteristikami povrchu jsou například největší výška výstupků R_p , největší hloubka profilu R_v , ale řadí se sem i méně časté charakteristiky jako je materiálový podíl R_m či hloubka jádra drsnosti R_k [32, 14].

5.9.1 Měření drsnosti pomocí etalonu

Metoda je založena na prostém porovnávání povrchu kola s etalonem pomocí mikroskopu. Platí, že etalon by měl být vyroben ze stejného materiálu a měl by mít stejnou barvu a tvar povrchu. Rovněž musí být dodržena stejná trajektorie obrábění povrchu etalonu a měřené součásti. Během měření musí být následně zajištěny správné světelné podmínky. Vyhodnocení metody je závislé na zkušenostech metrologa, proto tato metoda není příliš spolehlivá [14].

5.9.2 Metoda světelného řezu

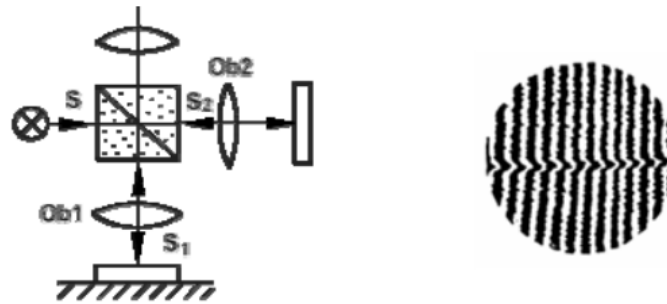
Při této metodě na zkoumaný povrch dopadá paprsek světla pod úhlem 45° . Ten se odráží od nerovností profilu. Odraz následně analyzujeme pomocí mikroskopu [14]. Princip je znázorněn na obrázku 18.



Obrázek 18: Metoda světelného řezu [14].

5.9.3 Měření pomocí interference světla

Tento způsob měření funguje na jednoduchém principu interference světla. Viz obr. 19. Paprsek světla dopadá na povrch měřené součásti. V cestě mu přitom stojí polopropustné zrcátko, které ho rozdělí na dvě složky. Jednu složku propustí a druhou odrazí zpět do okuláru interferenčního mikroskopu. Složka, která byla propuštěna přes zrcátko, dopadá na povrch a odráží se od něj. Vlivem drsnosti povrchu mění tato složka paprsku při odrazu svou frekvenci. V okuláru potom složením obou složek vzniká interferenční obraz, na kterém jsou prostřednictvím změny jasu patrné prohlubně a výstupky povrchu [14].



Obrázek 19: Interferenční mikroskop (vlevo), obraz v okuláru přístroje (vpravo) [14].

5.9.4 Měření povrchu pomocí dotykových profiloměrů (drsnoměrů)

Měřený povrch je přímo snímán pomocí dotyku umístěného na snímací hlavici. V dnešní době jsou přístroje k měření drsnosti k dostání v mnoha velikostech a s různým vybavením.

Přenosné přístroje se vejdou do ruky. Údaje, které zaznamenávají, se zobrazují přímo na digitálním displeji, popřípadě mohou být zobrazeny i graficky. Při měření je ovšem nutno naskenovat povrch součásti ručně, což vede k nepřesnostem.

Větší přístroje jsou potom schopné rozlišovat mimo drsnosti a vlnitosti povrchu i jiné geometrické charakteristiky. Obvykle je lze propojit s tiskárnou pro zobrazení výsledků. Některé mohou měřit drsnost i ve více osách. Měření je pak mnohem přesnější.

V sériovém průmyslu používáme stacionární CNC stroje, které jsou plně automatizované. Dokážou měřit v šesti osách, jsou propojené s počítačem a obsahují výkonný software. Mimo charakteristik povrchu většinou určují i geometrické tolerance a zaznamenávají povrch zkoumané součásti pro určení úchylek profilu [33, 34].

6 Moderní metody měření ozubených kol

Mnohé, v předešlé kapitole jmenované „klasické“ způsoby měření ozubení, se i dnes hojně využívají. Některé, jako například kontrola dvoubokým odvalem i při velkosériové výrobě. Přesto se dnes stále častěji setkáváme s kontrolou pomocí souřadnicových měřících strojů a bezdotykových metod. Tyto nové metody kontroly jsou podporované počítačem a jsou tedy mnohem přesnější. Navíc jsou i rychlejší díky schopnosti měřit několik charakteristik kola zároveň.

6.1 CMM

Nejběžnějším současným prostředkem pro měření ozubení jsou tzv. Coordinate measuring machine (CMM). Jedná se o přesné zařízení pro měření geometrických vlastností součástí. Stroj může být řízen ručně (operátorem), nebo i pomocí počítače. Základním principem CMM stroje je zjišťování souřadnic X, Y a Z jednotlivých bodů objektu a následné porovnání naměřených údajů s CAD modelem [35]. Stroje jsou schopny měřit s přesností okolo 5 mikrometrů [36].

6.1.1 Postup měření

Postup měření probíhá podle následujících bodů:

- 1) Nejdříve je nutno vybrat vhodné měřicí prostředky (sondu a dotyk) a stanovit body (oblast), které mají být měřeny. Dále je třeba stanovit trajektorii měřicí sondy.
- 2) Poté upneme součást na měřicím stole zařízení a provedeme samotné měření.
- 3) V posledním kroku zpracujeme naměřené údaje, porovnáme je s CAD modelem a vyhodnotíme výsledky měření [35,37].

6.1.2 Konstrukce CMM strojů

Konstrukce strojů musí umožňovat pohyb sondy ve třech základních směrech. Stroj má vlastní měřicí pravítka, která jsou vyrobena z materiálů s co nejmenší teplotní roztažností (keramické nebo skleněné). Jednotlivé dílky stupnice (po 0,1 mikrometrech) jsou vypalovány laserem [35].

Mimo klasických konstrukcí CMM strojů (mostové, portálové, konzolové atd.) se k měření ozubení používají převážně specializované CMM stroje na měření ozubení, které lépe odpovídají požadavkům na kontrolu měřených kol. Viz obr. 20. U těchto strojů se měřené kolo upíná na trn. Dotyk je pak umístěn na sloupku stojícím vedle trnu a je nasměrován kolmo k ose kola. Trn se otáčí kolem své osy a dotyk se pohybuje vertikálně a zároveň se vysouvá. Tato konfigurace je nejvhodnější pro měření boků zubů a zajišťuje rychlejší měření než klasické konstrukce CMM strojů. Známým výrobcem těchto strojů na kontrolu ozubení je například firma Klingelberg [39].



Obrázek 20: CMM stroj na měření ozubených kol [38].

V současné době jsou též v oblibě přenosné CMM přístroje a měřicí ramena. Ty se dají oproti stacionárním CMM přemísťovat do různých lokací dle potřeby měření [36].

6.1.3 Měřicí sondy

Hlavní rozdíly sond jsou v iniciaci záznamů (interakci doteku a součástí). Rozlišujeme spínací dotykové sondy a skenovací sondy.

Spínací dotykové sondy měří nespojitě body a nejsou proto příliš vhodné pro měření boku ozubených kol. Tyto doteky fungují na principu elektromagnetické indukce, odporu nebo na optickém principu. Používají se též sondy tenzometrické [35, 37].

Skenovací sondy na rozdíl od dotykových snímají každou sekundu stovky či tisíce bodů v závislosti na složitosti tvaru měřené součásti. Sonda je během měření v neustálém kontaktu s měřeným dílcem. Skenovací sondy takto v krátkém čase nasbírají veliké množství dat, která dávají dobrý obraz o tvaru a rozměrech součásti. Jsou proto ideální pro kontrolu tvaru boků zubů kola [35, 37].

6.1.4 Měřicí doteky

Existuje množství druhů doteků, lišících se od sebe konstrukcí a předpokládaným užitím. Nejvšestrannější jsou doteky přímé. Jsou rovněž vhodné pro měření ozubených kol. Na jejich konci je kulička vyrobená z rubínu, nitridu křemíku nebo z keramiky.

Obecně platí, že přesnějších výsledků dosáhneme s co nejkratším dotekem. Kulička na jeho konci by naopak měla být co největší, aby se omezila četnost chybných sepnutí, způsobených kolizí stopky s dílcem [35].

V příloze 5 je zobrazena topografie boku zubu vytvořená z bodů (5x9 bodů) nasnímaných CMM strojem.

6.2 Bezdotykové metody měření ozubeného kola

Bezdotykové optické měřicí stroje fungují na principu laserového skeneru. Jsou velmi rychlé a vhodné ke kontrole složitých zakřivených ploch, jako je bok ozubeného kola. Umožňují kontrolu ozubených kol přímo během výroby. Kontrolují především radiální a axiální házení a ovalitu kola, popřípadě i jiné geometrické parametry, a dokážou ve spolupráci s vhodným softwarem generovat digitální 3D obraz ozubení. Z něj je posléze možno na základě matematických modelů vyhodnotit požadované geometrické úchyly [40].

Závěr

Práce jednoznačně ukázala, že měření ozubených kol je velice složitý a komplexní úkon, a že jednotlivé metody měření jsou velice rozmanité. Text práce shrnul problematiku lícování ozubených kol, principy jednotlivých metod měření a zároveň je porovnal s případnými substitučními metodami. Práce rovněž nastínila současný trend vývoje v oblasti metrologie ozubených kol. Tím jsou bezesporu bezdotykové metody na principu laseru a souřadnicové měřicí stroje (CMM), které díky své rychlosti a všestrannosti již zcela nahradily některé z klasických metod měření. Vzhledem k samotnému konstrukčnímu provedení CMM strojů je ovšem nemožné nahradit zcela všechny původní metody měření. Spolu s vysokou cenou souřadnicových strojů pak tento fakt zaručuje, že i klasické způsoby budou mít i nadále své místo při měření ozubených kol.

Omezený rozsah práce neumožnil podrobnější rozbor některých komplexnějších metod měření. Zároveň je možné, že výčet metod měření není konečný. Metrologie ozubených kol je totiž dynamicky se vyvíjející obor, který se v dnešní době rychle mění s rozvojem výpočetní techniky.

Rešerši je možno do budoucna aktualizovat a doplnit o detailnější rozbor nejmodernějších technologií a trendů v oblasti metrologie ozubených kol. V současné podobě je práce ryze teoretická, nejvíce by jí tedy bezesporu prospělo rozšíření o praktickou část, ve které by bylo možno odzkoušet jednotlivé metody měření, klasické i moderní, a porovnat jejich přesnosti.

Seznam použité literatury

- [1] RŮŽIČKA, Václav. 1957. *Kontrola ozubených kol*. Praha: SNTL, 408 s.
- [2] PEŠÍK, Lubomír. 2002. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, Strojní fakulta, 2 sv. (158, 156 s.). ISBN 80-708-3608-3.
- [3] BARTOŠ, Josef. 1951. *Ozubená Soukolí: valivá a šroubová*. 1. vyd. Praha: ROH-PRÁCE.
- [4] *Antonín Pártl - výroba ozubených kol* [online]. 2002 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.ozubeni.cz>
- [5] Učíme v prostoru: vzdělávací 3D encyklopedie [online]. 2014. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=3092
- [6] *Lícování čelných ozubených kol, kontrola a měření: Seminář* Praha 1989, Dům techniky ČSVTS : Sborník. 1989. Praha: Dům techniky ČSVTS, 40 s. ISBN 80-029-9513-9.
- [7] ČSN 01 4682. *Ozubené převody čelní lícování*. 1980. Praha: Vydavatelský Úřad pro normalizaci a měření.
- [8] *Lícování, Kontrola a Měření čelních ozubených kol*. 1982. Liberec: Dům techniky ČSVTS
- [9] ČSN 01 4603. *Názvosloví pro lícování ozubených převodů všeobecné pojmy*. 1982. Praha: Vydavatelský úřad pro normalizaci a měření.
- [10] VUT BRNO - ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Čelní ozubená kola- Soustava přesnosti: výtah*. Brno, 2013.
- [11] *Přesnost ozubených kol a lícování*. 2012. Katedra konstruování strojů - Západočeská Univerzita v Plzni [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://old-kks.zcu.cz/pro-studenty-KKS/Studijni_podklady/PRIRUCKA/CADIS/MDOC/F/F12/F12_2/f12_2.htm
- [12] DIN 3961. *Tolerance čelních ozubených kol: Základy*. 1978. Berlín: Deutsches Institut für Normung. Dostupné také z: <http://mach.jlu.edu.cn/jxcx/standars/DIN/DIN3961-1978.pdf>
- [13] KLEPAL, Václav a kol. 1959. *Výroba ozubených kol*. 1. vyd. Praha: SNTL, 404 s.
- [14] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. 2012. *Metrologie a řízení kvality* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Fakulta strojní VŠB-TUO, 1 CD-ROM [cit. 2015-05-07]. ISBN 978-80-248-2771-1.
- [15] MILOŠ, Němček. 2010. *Identifikace neznámých ozubených kol* [online]. Ostrava [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.347.vsb.cz/staff/folta/Konstrukcni_cviceni_II/Identifikace.pdf. Příručka. Technická univerzita Ostrava.
- [16] MORAVEC, Vladimír. 2001. *Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola, teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola*. Ostrava: Montanex, 291 s. ISBN 80-722-5051-5.
- [17] ČSN 01 4678. *Měření zubů v konstantní tloušťce a výšce*. 1954. Praha: Vydavatelský Úřad pro normalizaci a měření.
- [18] TICHÁ, Šárka a Ivan MRKVICA. 2012. *Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie: učební text* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1 DVD-ROM [cit. 2015-05-07]. ISBN 978-80-248-2709-4.

- [19] ČSN 01 4675. *Měření ozubených kol čelních s přímými zuby: Rozměr přes zuby*. 1954. Praha: vydavatelství Úřad pro normalizaci a měření.
- [20] BOHÁČEK, František a kol. 1982. *Části mechanismů a strojů III: Převody*. 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 267 s.
- [21] ČSN 01 4676. *Měření ozubených kol čelních se šikmými: Rozměr přes zuby*. 1954. Praha: vydavatelství Úřad pro normalizaci a měření.
- [22] Mitcalc.com [online]. 2007. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/gear1/help/cz/gear1txt.htm>
- [23] BUMBÁLEK, Leoš. 2009. *Kontrola a měření pro SPŠ strojní*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [24] GOCH, G. 2003. Gear Metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. **52**(2): 659-695. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60209-1. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607602091>
- [25] FARAGO, Francis T a Mark A CURTIS. 2007. *Handbook of dimensional measurement*. 4. vyd. New York: Industrial Press, 583 s. ISBN 978-083-1132-620.
- [26] BRAUN, G. 1977. *Verzahnwerkzeuge: Ein Handbuch für Konstruktion und Betrieb*. 3. vyd. Karlsruhe: LORENZ GmbH &Co Ettlingen.
- [27] ČSN ISO 4671-1. Čelní ozubená kola - Praktické předpisy pro přejímky - Část 1: Přejímka podle stejnohých boků zubů. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [28] KALIVODA, Pravoslav. 1963. *Tabulky pro výrobu a kontrolu čelních ozubených kol*. 1. vyd. Praha: SNTL, 112 s.
- [29] TICHÁ, Šárka. 2006. *Strojírenská metrologie: část 1*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 112 s. ISBN 80-248-0671-1.
- [30] OCHMANOVÁ, Marie. 2006. *STROJNÍ A TECHNOLOGICKÁ MĚŘENÍ: Návod k řešení úloh pro SPŠ* [online]. Karviná [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.spskarvina.cz/projekty/lct2005/manual/data/odborne/mereni/Strojni_a_tecnologicka_mereni.pdf. Příručka. Střední průmyslová škola Karviná.
- [31] ČSN ISO 1328-1. Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 1: Definice a mezní úchytky vztahené na stejnohých boky zubů ozubeného kola. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [32] TICHÁ, Šárka. 2006. *Strojírenská metrologie: část 2*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 88 s. ISBN 80-248-1209-6.
- [33] Katalog produktů: Přístroje na měření tvaru. 2014. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/CZ/index.html?page=505>
- [34] *EMS Přístroje pro přesná měření: katalog*. 2004. Praha: PrintActive s. r. o.
- [35] DOLÁK, David. 2010. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs*. Brno. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30059. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [36] HÄRTIG, Frank, Hu LIN, KNIEL a Zhaoyao. 2012. *Measurement Science and Technology*. **23**(10). DOI: 10.1088/0957-0233/23/10/105011. ISSN 0957-0233.

[37] WEIMIN, Pan, Lei Yi a Li JISHUN. 2006. Control of Analogue Scan Probe in CMM Inspect of Spiral Bevel Gear. *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, : 79-83. DOI: 10.1109/ICMA.2006.257456. ISBN 1-4244-0465-7.

[38] *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* [online]. 2014 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt5/fb-53/messeinrichtungen-53.html>

[39] Měřicí technika v Sinsheimu. 2007. *MM průmyslové spektrum*. (7): 32. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-v-sinsheimu.html>

[40] Checking the ovality of complex toothing. 2010. *Measurement Blog: Micro-Epsilon* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://blog.micro-epsilon.com/2010/05/checking-the-ovality-of-complex-toothing/>

[41] SENTHILVELAN, S. a R. GNANAMOORTHY. 2008. Influence of reinforcement on composite gear metrology. *Mechanism and Machine Theory*. 43(9): 1198-1209. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.09.002. ISSN 0094114x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094114X07001371>

Seznam příloh

Příloha 1 : Orientační přehled užití ozubených kol jednotlivých stupňů přesnosti

Příloha 2: Protokoly kontroly čelního házení

Příloha 3: Diagram průběhu úchylek čelních roztečí

Příloha 4 : Protokol měření profilu zubu

Příloha 5: Topografie ozubeného kola