



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



VYBRANÉ KAPITOLY ZE STROJÍRENSKÉ METROLOGIE

Učební text

Ing. Šárka Tichá, Ph.D.

doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2012



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie
<Autor/Autoři>: Ing. Šárka Tichá, Ph.D., doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica
Vydání: první, 2012
Počet stran: 143
Náklad: 60

Studijní materiály pro studijní obor Strojírenská technologie Fakulty strojní
Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Ing. Šárka Tichá, Ph.D., doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2709-4

POKYNY KE STUDIU

VYBRANÉ KAPITOLAY ZE STROJÍRENSKÉ METROLOGIE

Pro předmět 2. semestru – Řízení kvality a metrologie navazujícího studijního programu oboru strojírenská technologie jste obdrželi studijní balík obsahující:

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu,
- přístup do e-learningového portálu
- <harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části, >
- <rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorů.>

Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu buď Strojírenská metrologie, nebo Technická měření a metrologie.

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa bakalářského studia.

Cílem předmětu

Základním cílem je rozšíření poznatků posluchačů v oblasti strojírenské metrologie hlavně v oblasti určování nejistot při kalibraci měřidel a měření a praktické aplikaci měřících metod a měřidel při kontrole parametrů vybraných strojních součástí. Předkládané učební texty si kladou za cíl zvýšit teoretickou přípravu a zkvalitnit praktickou činnost na cvičení Tato učební pomůcka by měla umožnit posluchačům samostatnou a tvořivou práci na cvičeních.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studia oboru strojírenská technologie studijního programu strojírenský inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- + Popsat ...
- + Defínovat ...
- + Vyřešit ...

Ohledně cílů kapitoly jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeji autoři.

Ing. Šárka Tichá, Ph.D.
doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	STANOVENÍ NEJISTOT PŘI KALIBRACI MĚŘIDEL (MĚŘENÍ).....	9
	2.1 Kalibrace měřidel	9
	2.2 Příklady stanovení nejistot při kalibraci měřidel (měření)	24
3	KONTROLA VYBRANÝCH PARAMETRŮ KONCOVÝCH MĚREK	32
	3.1 Základní parametry koncových měrek	33
	3.2 Kontrola koncových měrek.....	34
	3.2.1 Interferenční měření	37
	3.2.2 Porovnávací měření.....	37
	3.3 Zadání úlohy č. 1.....	40
4	KALIBRACE STUPNICE PRACOVNÍHO MĚŘIDLA	42
	4.1 Třmenový mikrometr	42
	4.2 Číselníkový úchylkoměr	45
	4.3 Kontrola stupnice posuvného měřítka	46
	4.4 Zadání úlohy č. 2.....	48
	4.5 Zadání úlohy č. 3.....	49
5	KONTROLA ÚHELNÍKŮ	51
	5.1 Kontrola pomoci průměrných válců	51
	5.2 Kontrola pomoci speciálního přístroje	52
	5.3 Zadání úlohy č. 4.....	54
6	KONTROLA ROVINNÉHO ÚHLU.....	56
	6.1 Sklonoměr.....	56
	6.2 Sinusové pravítko.....	57
	6.3 Kontrola vodorovné polohy pomocí libely	57
	6.5 Zadání úlohy č. 5.....	59
7	KONTROLA ZÁVITOVÉHO KALIBRU	62
	7.1 Dílčí kontrola vybraných parametrů vnějšího závitu na měřicím mikroskopu ..	62
	7.1.1 Metoda stínového obrazu	63
	7.1.2 Metoda osového řezu	65
	7.2 Zadání úlohy č. 6.....	67

8	KONTROLA OZUBENÉHO KOLA.....	69
	8.1 Kontrola profilu a sklonu zubu ozubeného kola.....	733
	8.1.1 Kontrola profilu	733
	8.1.2 Kontrola sklonu zubu	82
	8.2 Kontrola roztečí	89
	8.2.1 Dílčí a součtové úchytky roztečí	89
	8.2.2 Měření roztečí	92
	8.3 Kontrola ozubených kol odvalem	99
	8.3.1 Kontrola jednobokým odvalem.....	99
	8.3.2 Kontrola ozubených kol dvoubokým odvalem	101
	8.4 Kontrola obvodového házení	106
	8.4.1 Princip měření	106
	8.4.2 Vyhodnocení výsledků měření	107
	8.4.3 Kvalita ozubení z pohledu obvodového házení	109
	8.4.4 Přístroje pro měření obvodového házení.....	110
	8.4.5 Aplikace kontroly obvodového házení	111
	8.5 Kontrola tloušťky zubů, průměru přes dvě kuličky a dotyku zubů	112
	8.5.1 Kontrola tloušťky zubu s_k v konstantní výšce k_k	112
	8.5.2 Kontrola rozměru přes zuby	116
	8.5.3 Kontrola základní rozteče	120
	8.5.4 Kontrola průměru přes dvě kuličky	122
	8.5.3 Kontrola dotyku zubů	123
	8.6 Výrobní tolerance ozubených kol.....	124
	8.6.1 ISO toleranční systém ozubení	124
	8.6.2 Toleranční skupiny (rodiny) a jejich využití	127
	8.6.3 Kontrola kvality a kontrolní skupiny	129
	8.6.4 Toleranční systém ozubení dle ČSN 01 4682	131
	8.7 Zadání úlohy č. 7	132
9	KONTROLA VAČEK.....	134
	9.1 Kontrola rotačních vaček.....	135
	9.2 Kontrola inverzních vaček.....	138
	9.3 Kontrola vačkových hřídelí	139
	9.4 Zadání úlohy č. 8.....	140

1 ÚVOD

Aby strojírenství mohlo plnit svoji funkci a uspokojovat potřeby společnosti, musí být úsilí orientováno na zvyšování úrovně strojírenské výroby, užité hodnoty, kvality, provozuschopnosti a spolehlivosti výrobků. Tomu musí odpovídat i výchova odborníků.

Na kvalitě výrobků – služby se podílí celý reprodukční proces, jehož součástí je i kontrola (měření). Metrologie má nezastupitelné místo při kvantifikaci vybraných parametrů kvality a to jak výroby, výrobků nebo služeb.

Jedním z rozhodujících faktorů rozvoje hospodářství je úroveň metrologie. Metrologie zasahuje do všech oblastí tvořivé lidské činnosti. Ve všech oblastech společenské činnosti je měření (kontrola) zdrojem objektivních informací, základem pro cílevědomé řízení, plánování zdrojů, materiálů, energie atd. Metrologie se významnou mírou podílí na zjištění kvality výrobků v jednotlivých etapách realizace. Zvyšující se nároky na přesnost výroby se promítají do zvýšených požadavků na přesnost a správnost měření a kontroly strojních součástí. S rostoucími požadavky na kvalitu výroby, rostou požadavky na kontrolu parametrů vyráběných součástí s cílem zajištění shody se specifikací, tj. rostou nároky na úroveň měřicí a kontrolní techniky a s tím související nároky na obsluhu; tj. rostou požadavky a nároky na metrologické schopnosti a znalosti studentů – absolventů VŠ.

Předkládané učební texty si kladou za cíl zvýšit teoretickou přípravu a zkvalitnit praktickou činnost na cvičení. Tato učební pomůcka by měla umožnit posluchačům samostatnou a tvořivou práci na cvičeních.

Svým obsahem odpovídají možnostem a přístrojovému vybavení metrologické laboratoře katedry obrábění a montáže.

2 STANOVENÍ NEJISTOT PŘI KALIBRACI MĚŘIDEL (MĚŘENÍ)

Tato kapitola se zabývá problematikou kalibrace pracovních měřidel a vyjadřováním nejistot při těchto kalibracích. Součástí této kapitoly jsou uvedeny příklady stanovení nejistot při kalibraci a měření. Kapitola je doplněna o ukázky kalibračních listů pracovního měřidla a etalonu. Součástí této části učebního textu jsou Příklady úředních značek – státní metrologická kontrola měřidel a kalibrace.



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce získáte:

- ✚ Znalosti, týkající se vyjadřování nejistot při kalibraci měřidel (při měření).
- ✚ Informace o metodice výpočtu nejistot na základě předložených příkladů.
- ✚ Informace o značení měřidel v rámci státní metrologické kontroly a kalibrace.



Výklad

2.1 Kalibrace měřidel

Kalibrace – soubor úkonů, kterými se stanoví za specifických podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony

Kalibrace etalonů a pracovních měřidel je základním prostředkem při zajišťování návaznosti výsledků měření. Porovnáním s etalony se zjišťují metrologické charakteristiky měřidla. Při kalibraci etalonu se jeho metrologické vlastnosti porovnávají zpravidla s etalonem vyššího řádu

Kalibrační měřidla se dosahuje toho, že jsou buď přiřčeny hodnoty měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo se stanoví korekce vůči indikovaným hodnotám. Výsledek kalibrace je zaznamenán v **kalibračním listu**.

Kalibrační list se sestává z titulního listu a dalších listů dle druhu kalibrovaného měřidla. Ukázka kalibračních listů etalonu a pracovního měřidla viz **obr. 2.1** a **obr. 2.2**.

Kalibrační list obsahuje tyto základní údaje:

- identifikační údaje o subjektu, který kalibrační list vydává,
- číslo kalibračního listu,
- identifikační údaje subjektu, který kalibraci požaduje,

- datum vydání a kalibrace,
- podpis odpovědného pracovníka subjektu, který kalibrační list vydal,
- úřední razítko,
- údaje o použitých etalonech,
- seznam předpisů – postupů, podle kterých kalibrace byla provedena,
- údaje o výsledcích kalibrace včetně nejistot
- podmínky měření (např. teplota, vlhkost atd.)

Kalibrační značka je značka, kterou umísťuje středisko kalibrační služby na jim kalibrované měřidlo. Tato značka je rovněž uvedena na vydávaném **kalibračním listu**.

Kalibrace musí být opakovaná ve vhodných intervalech. Délka intervalů závisí na řadě proměnných veličin:

- požadované nejistotě,
- frekvenci používání,
- způsobu používání,
- stabilitě zařízení,
- prostředí, ve kterém je měřidlo používáno atd.

Před uvedením pracovních měřidel nebo etalonů do oběhu má jejich výrobce a po provedení opravy těchto měřidel opravce povinnost zajistit jejich prvotní kalibraci. Prvotní kalibraci dovážených etalonů zajišťuje jejich uživatel, pokud již nebyla zajištěna dovozcem nebo zahraničním výrobcem. Lhůtu následující kalibrace hlavního etalonu stanoví uživatel tohoto hlavního etalonu podle metrologických a technických vlastností, způsobu a četnosti používání hlavního etalonu.

Jednotnost a správnost pracovních měřidel zajišťuje v potřebném rozsahu jejich uživatel kalibrací, není-li pro dané měřidlo vhodnější jiný způsob či metoda. K tomu zákon o metrologii specifikuje uživateli oprávnění si stanovit způsob návaznosti svých pracovních měřidel, což je pojem, do jehož obsahu lze zahrnout výběr subjektu, který uživateli metrologické navázání měřidla provede, lhůty, ve kterých je toto navazování prováděno, jakož i kritéria shody skutečných metrologických parametrů měřidla s potřebami uživatele. To znamená mimo jiné, že uživatelé pracovních měřidel si návaznost těchto měřidel mohou zajistit sami pomocí svých hlavních etalonů, prostřednictvím ČMI (Český metrologický institut) nebo SKS (Středisek kalibrační služby) nebo u jiných uživatelů měřidel, kteří mají příslušné hlavní etalony navázané na etalony ČMI, etalony SKS nebo na etalony zahraničních subjektů. U měřidel, pokud jsou používána za okolností, kdy nesprávným měřením mohou být významně poškozeny zájmy osob, je poškozená strana oprávněna vyžádat si jejich kalibraci a vydání osvědčení o výsledku.

Příklady úředních značek – státní metrologická kontrola měřidel a kalibrace, viz příloha č. 1.

	UNIMETRA, spol. s r.o. Odd. Kalibrační laboratoř Těšínská 367, 716 00 Ostrava - Radvanice telefon: 596 227 113; fax: 596 227 114 e-mail: unimetra@unimetra.cz, http://www.unimetra.cz Krajský obchodní soud v Ostravě, oddíl C, vložka 5072	 
---	---	---

Kalibrační laboratoř č. 2310, akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s..
 Kalibrační značka C 310.

Kalibrační list: 6198/2007

Zákazník: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
 Fakulta strojní
 17. listopadu 15
 708 33 Ostrava - Poruba

Vystaven dne: 17.05.2007

Zakázka: 207081890

Měřidlo: Třídutkový dutinoměr 20-25/0,005 mm (součást sady e.č. 18126)

Počet kusů: 1

Identifikace: 07492

Kalibrační postup : PP-11.09 Kalibrace mikrometrických měřidel pro vnitřní měření

Etalon : Použité etalony jsou metrologicky navázány na státní (mezinárodní) etalonáž.
 Kontrolní kroužek 20 mm ,e.č.001.0021,kal.list č.13039/2006
 Kontrolní kroužek 25,005 mm ,e.č.001.0022,kal.list č.6250/2006
 Kontrolní kroužek 22 mm,e.č.001.0027,kal.list č.8250/2004

Podmínky kalibrace : teplota vzduchu v laboratoři (20±1)°C

Výsledek kalibrace : Viz naměřené hodnoty.

Rozšířená nejistota: (3+10L) μm, L v metrech

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k=2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

Datum přijetí: 27.4.2007

Datum kalibrace: 16.5.2007

Kalibroval: Pavel Trojek

Schválil: Kamil Kotlář,
vedoucí kalibrační laboratoře



*Prohlášení: Výsledky zkoušek se týkají jen zkoušených předmětů v době kalibrace.
 Kalibrační list nesmí být bez schválení kalibrační laboratoře rozšiřován jinak než celý.*

Strana 1 ze 2

Obr. 2.1 Kalibrační list pracovního měřidla

Kalibrační list: 6198/2007

Naměřené hodnoty:

Jmenovitá hodnota kroužku [mm]	Naměřená hodnota [mm]
Ø 19,999	19,999
Ø 22,000	22,000
Ø 25,005	25,006

*Prohlášení: Výsledky zkoušek se týkají jen zkoušených předmětů v době kalibrace.
Kalibrační list nesmí být bez schválení kalibrační laboratoře rozšiřován jinak než celý.*

Strana 2 ze 2

Obr. 2.1 Kalibrační list pracovního měřidla (pokračování)

KONTROLNÍ METROLOGICKÉ STŘEDISKO II		
 VÍTKOVICE VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. TEL: 420-59 595 2419 TEL: 420-59 595 2409	Akreditovaná kalibrační laboratoř č. 2285 Osvědčení o akreditaci číslo 310 / 2006 VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. Ruská 2887/101, 706 02 OSTRAVA-VÍTKOVICE	  FAX: 420-59 595 7593

Strana: 1 ze 2

KALIBRAČNÍ LIST

č. : 237 / 2007

Datum vydání : 9. 5. 2007

Schválil : Ing. Kopecká Ivana
Manažer kvality KMS II

Podpis :



Objednatel kalibrace : UNIMETRA, spol. s r.o., Těšínská 773 / 396, 716 00 Ostrava - Radvanice
pro : VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Fakulta strojní, 17. listopadu 15,
708 33 Ostrava Poruba

Měřidlo : Normál drsnosti

Měřicí rozsah : Ra 2,97μm, Rmax 9,4μm

Evidenční číslo : --

Výrobní číslo : 630450

Počet kusů : 1

Datum přijetí měřidla : 30. 4. 2007

Předpis pro kalibraci : CI – 300.25 - 034 Vydání : 2 Revize : 1

Datum kalibrace : 9. 5. 2007

Kalibroval : Ing. Černý Milan

Podpis :

1.0 Měřidla / etalony použité ke kalibraci :

Měřidlo / Etalon	Evidenční číslo	Platnost kalibrace	Návaznost
Normál drsnosti povrchu	300.25 / 333	21. 3. 2009	AKL 2304 , KL 8013-KL-P027-06
Normál drsnosti povrchu	300.25 / 12	21. 3. 2009	AKL 2304 , KL 8013-KL-P026-06
Drsnoměr HOMMEL TESTER T 8000	300.25 / 325	19. 9. 2007	AKL 2285, KL 334 / 2006

2.0 Podmínky kalibrace :

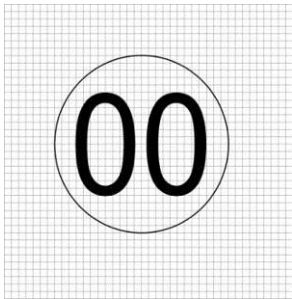
Kalibrace byla provedena při teplotě 20 ± 1 °C. Kalibrace normálu drsnosti byla provedena drsnoměrem HOMMEL TESTER T 8000 při – Cut off 0,8 mm a lc 4,8mm .

Výsledky kalibrace se týkají jen měřených kusů a vztahují se ke dni a místu ve kterém byla kalibrace provedena. Kalibrační list nesmí být bez písemného souhlasu kalibrační laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu stran. Vyhodnocení je ve vztahu k metrologickým specifikacím mimo rámec akreditace. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti 95 % . Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4 / 02.

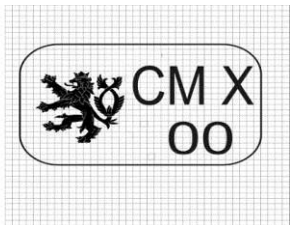
3.0 Tabulka naměřených hodnot :

Parametr	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota (*)	Minimální naměřená hodnota	Maximální naměřená hodnota	Nejistota U_{95}
	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
Ra	2,97	2,977	2,96	2,99	0,03
Rmax	9,40	9,559	9,49	9,66	0,31

Pozn. (*) – Průměrná hodnota z 15 měření

Některé úřední značky, značky shody a jiné značky používané pro označování výsledků metrologických činností		
značka schválení typu		
0	TCM XXX/YY - ZZZZ	značka schválení typu značka se danému typu měřidla přiřazuje v certifikátu schválení typu a je vyznačena na každém exempláři měřidla; značku na měřidlo umístí výrobce (je-li to technicky možné) - na některé druhy měřidel se značka schválení typu nevyznačuje (např. závaží, výčepní nádoby, odměrné sklo apod.) symbol XXX je v praxi nahrazen trojčíslím oboru měření, symbol YY posledním dvojčíslím roku vystavení certifikátu o schválení typu a symbol ZZZZ je nahrazen pořadovým číslem certifikátu
úřední značky pro Český metrologický institut (ČMI)		
1		úřední značka pro ČMI značkou je označeno stanovené měřidlo, které ČMI ověřil; má zpravidla podobu otisku na olověné nebo plastové plombě symbol X je v praxi nahrazen číslem vnitřní organizační jednotky ČMI, která provedla ověření a úřední značku na stanovené měřidlo umístila
2		značka posledního dvojčíslí roku ověření stanoveného měřidla jako součást úřední značky značkou je označeno stanovené měřidlo, které ověřil ČMI; má zpravidla podobu otisku na olověné plombě symbol 00 je v praxi nahrazen posledním dvojčíslím roku, ve kterém bylo provedeno ověření stanoveného měřidla (00 = 2000)

Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

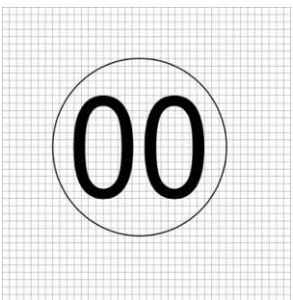
3		úřední značka pro ČMI značkou v provedení jako samolepicí štítek je označeno stanovené měřidlo, které ČMI ověřil symbol 6 označuje číslo vnitřní organizační jednotky ČMI (6 = OI ČMI Brno), která provedla ověření a úřední značku na stanovené měřidlo umístila symbol 01 označuje poslední dvojčíslí roku, ve kterém bylo provedeno ověření stanoveného měřidla (01 = 2001)
4		úřední značka pro ČMI jiné provedení obdobné úřední značky, jako je předchozí Pozn.: v reálu na červeném podtisku
5		úřední značka pro ČMI pro měřidlo, o jehož ověření se vystavuje ověřovací list značkou v provedení jako samolepicí štítek je označeno stanovené měřidlo, které ČMI ověřil symbol 6 označuje číslo vnitřní organizační jednotky ČMI (6 = OI ČMI Brno), která provedla ověření a úřední značku na stanovené měřidlo umístila do obdélníkového pole uvede ověřující orgán číslo ověřovacího listu, do prázdného kruhového pole se (případně) uvede poslední dvojčíslí roku, ve kterém bylo provedeno ověření stanoveného měřidla Pozn. Pro počítání platnosti ověření je však rozhodující datum vydání ověřovacího listu.

doplňkové značky k úředním značkám pro ČMI		
6		hlavní úřední značka ČMI pro měřidlo opatřené více než dvěma úředními značkami značkou v provedení jako samolepicí štítek se označuje hlavní úřední značka v případě stanovených měřidel s více než dvěma ověřovacími místy (úředními značkami); údaje na hlavní úřední značce jsou rozhodující pro určení roku ověření měřidla (podle dvojčíslí roku uvedeného na hlavní úřední značce se počítá lhůta platnosti ověření stanoveného měřidla jako celku)
7		orientační značka ČMI značkou v provedení jako samolepicí štítek je označeno stanovené měřidlo, které ČMI ověřil a řádně označil stanovenými úředními značkami tato orientační značka informuje veřejnost o vnitřní organizační jednotce ČMI, která provedla ověření a úřední značku na stanovené měřidlo umístila, uvádí kontaktní údaje dále obsahuje proštípnutím vyznačené dvojčíslí roku, ve kterém uplyne doba platnosti ověření (neskončí-li platnost ověření z jiného důvodu podle § 7 odst. 2 vyhlášky MPO č. 262/2000 Sb. v platném znění)
8		značka zakazující používání stanoveného měřidla, které není platně ověřeno značkou v provedení jako samolepicí štítek je označeno stanovené měřidlo, které nebylo předloženo k ověření a je užíváno bez platného ověření (zpravidla zjištěno při státním metrologickém dozoru) nebo při metrologických zkouškách v rámci ověřování nevyhovělo

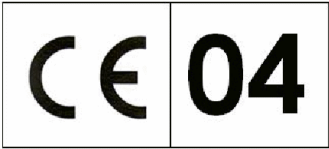
Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

9		doplňková značka k úřední značce ČMI tato značka v provedení jako samolepicí štítek se umísťuje na stanovené měřidlo, jehož ověření ČMI (po dohodě s uživatelem) neprováděl v úplném měřicím rozsahu měřidla
úřední značky pro autorizované subjekty		
10		úřední značka pro autorizované metrologické středisko touto značkou v provedení jako samolepicí štítek je označeno stanovené měřidlo, které autorizovaný subjekt ověřil symbol 001 je číslem přiděleným autorizovanému subjektu ÚNMZ symbol 01 označuje poslední dvojčíslí roku, ve kterém bylo provedeno ověření stanoveného měřidla (01 = 2001)
11		úřední značka pro autorizované metrologické středisko - tachografy touto značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen tachograf, který autorizovaný subjekt ověřil symbol X je číslem přiděleným autorizovanému subjektu ÚNMZ <i>Pozn.: v reálu na modrém podtisku</i>

Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

12		úřední značka pro autorizované metrologické středisko - tachografy značkou je označen tachograf (případně část vozidla), který autorizovaný subjekt ověřil; má zpravidla podobu otisku na olověné nebo plastové plombě symbol X je v praxi nahrazen číslem přiděleným autorizovanému subjektu ÚNMZ
13		značka posledního dvojčíslí roku ověření stanoveného měřidla jako součást úřední značky značkou je označen tachograf (případně část vozidla), které ověřilo AMS; má zpravidla podobu otisku na olověné plombě symbol 00 je v praxi nahrazen posledním dvojčíslím roku, ve kterém bylo provedeno ověření tachografu
14		hlavní úřední značka AMS pro měřidlo opatřené více než dvěma úředními značkami značkou v provedení jako samolepicí štítek se označuje hlavní úřední značka v případě stanovených měřidel s více než dvěma ověřovacími místy (úředními značkami); údaje na hlavní úřední značce jsou rozhodující pro určení roku ověření měřidla (podle dvojčíslí roku uvedeného na hlavní úřední značce se počítá lhůta platnosti ověření stanoveného měřidla jako celku)

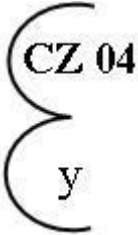
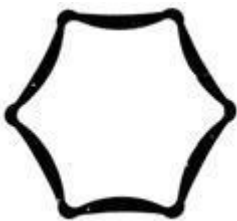
Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

značky shody		
15		značka shody s evropskou platností ES značkou shody je označen výrobek (měřidlo), který splňuje požadavky příslušné evropské směrnice a je uváděn na trh stanoveným postupem značka shody je doplněna dvojčíslem roku, ve kterém byla na výrobek umístěna (04 = 2004)
16		značka notifikované osoby (autorizované osoby) souvisí s předchozí ES značkou shody, k níž se připojuje a číslem identifikuje notifikovanou (autorizovanou) osobu, která provedla posouzení shody výrobku (měřidla) s požadavky příslušné evropské směrnice nebo posouzení systému jakosti výrobce (<i>ČMI má jako notifikovaná osoba číslo 1383</i>).
17		značka shody s požadavky na měřidla pro specifikované použití souvisí s předchozími ES značkami, k nimž se připojuje; značka identifikuje měřidlo, které splňuje požadavky evropských směrnic na měřidla používaná v tzv. regulované sféře, t.j. v závazkových a podobných vztazích

Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

18		symbol omezeného používání souvisí s předchozími ES značkami. Značka musí být připevněna na zařízení, které je připojeno k měřicímu přístroji (u něhož se prohlašuje shoda) nebo je součástí měřicího přístroje, ale nebylo předmětem posouzení shody.
komentář pro veřejnost k položkám č. 15, 16, 17 a 18	Se značkami uvedenými pod těmito položkami se můžete setkat již dnes, a to na vahách s neautomatickou činností (to jsou zjednodušeně řečeno váhy, na něž obsluha ručně vloží vážený produkt, odečte indikovanou naměřenou hmotnost a ručně zvážený produkt sejme). ČMI je autorizovanou osobou pro příslušné činnosti při uvádění vah s neautomatickou činností do oběhu a má přiděleno číslo 250, se kterým se tedy také budete setkávat. Po zavedení, resp. uvedení v účinnost evropských směrnic stanovujících metrologické a technické požadavky na další druhy měřidel (směrnice starého a nového přístupu) se s těmito symboly setkáte i u jiných druhů stanovených měřidel.	
19		značka shody s požadavky na hotově balené zboží tato značka se připojuje k údajům o jmenovitém množství (hmotnosti, objemu) hotově baleného výrobku (viz odpovědi k této oblasti) značku je oprávněn na obal uvést subjekt, který splnil požadavky zákona o metrologii a příslušných vyhlášek MPO a poskytuje stanovené záruky ve vztahu k průměrnému i jednotlivému množství výrobku v balení (příslušné vyhlášky MPO transponují do právního řádu ČR požadavky evropských směrnic pro tuto oblast)
komentář pro laickou veřejnost k položce č. 19	Se symbolem e se můžete setkat na obalech výrobků při nákupu zejména potravin, pracích, hygienických a kosmetických prostředků a dalších výrobků. Požadavky související s oprávněným používáním tohoto symbolu jsou významným nástrojem ochrany spotřebitele, neboť garantují s vysokou a jasně stanovenou pravděpodobností dodržení správného množství výrobku v balení, a to jak nepřekročení stanovených záporných odchylek jednotlivých balení, tak požadavků na průměrné množství výrobku v balení, rovné nebo vyšší než uvedená jmenovitá hodnota na obale. Výrobce nebo dovozce takto označeného výrobku podléhá metrologické kontrole, která se zaměřuje na posouzení systému jeho vlastní kontroly při balení produktu a stanovených kritérií shody, ale zahrnuje i provedení fyzické kontroly dávek výrobků vybraných neočekávaně a náhodně podle stanovených rámcových zásad.	

Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

20		značka EHS schválení typu (s evropskou platností) Značkou je označeno měřidlo, jehož typ byl schválen postupy podle tzv. směrnic starého přístupu (v ČR podle vyhlášky MPO č. 332/2000 Sb. a technických vyhlášek s ní souvisejících); CZ = symbol státu, ve kterém byl typ schválen (CZ = Česká republika), 04 = poslední dvojčíslí roku vydání certifikátu EHS schválení typu, symbol □y□ je v praxi nahrazen kódem schválení typu (EHS schválení typu provádí v ČR ČMI, který číslo přidělí)
21		značka prvotního EHS ověření - 1. část - (též značka tzv. dílčího EHS ověření) Značkou v provedení jako samolepicí štítek nebo plomba (označena jedna strana plomby) je označeno měřidlo, jehož prvotní EHS ověření (resp. část prvotního EHS ověření) provedl ČMI nebo AMS s příslušnou autorizací. Symbol CZ označuje stát (CZ = Česká republika), symbol "X" je v praxi nahrazen číslem, které ČMI (jeho vnitřní organizační jednotce) nebo AMS přidělil ÚNMZ.
22		značka prvotního EHS ověření - 2. část Značkou v provedení jako samolepicí štítek nebo plomba (označena zbývající - druhá strana plomby) je označeno měřidlo, jehož prvotní EHS ověření (resp. část prvotního EHS ověření) provedl ČMI nebo AMS s příslušnou autorizací. V praxi je uvnitř symbolu uvedeno poslední dvojčíslím roku, v němž bylo prvotní EHS ověření měřidla provedeno (resp. dokončeno).

Příloha č. 1 Příklady úředních značek - pokračování

komentář k položkám č. 20 a 21	Prvotní EHS ověření je dokončeno a platné pouze při označení oběma značkami. Z praktických důvodů se proto plomby označující dílčí EHS ověření, které jsou označeny pouze jednostranně, po dokončení všech zkoušek odstraní a nahradí oboustranně označenými plombami prvotního EHS ověření.
kalibrační značky	
23	kalibrační značka střediska kalibrační služby značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen etalon nebo pracovní měřidlo, který středisko kalibrační služby kalibrovalo písmeno C symbolizuje středisko kalibrační služby, číslo 60 označuje identifikační číslo střediska kalibrační služby, které kalibraci provedlo
24	kalibrační značka Českého metrologického institutu Značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen etalon nebo pracovní měřidlo, který kalibrovalo některé z pracovišť ČMI. Tuto značku začal ČMI používat k 1.1.2005 namísto kalibrační značky uvedené výše
25	kalibrační značka Českého metrologického institutu Značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen etalon nebo pracovní měřidlo, který kalibrovalo některé z pracovišť ČMI. Tuto značku začal ČMI používat k 1.1.2005 namísto kalibrační značky uvedené výše. V tomto provedení je doplněna posledním dvojčíslím roku, ve kterém byla kalibrace provedena
26	kalibrační značka ČMI značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen etalon nebo pracovní měřidlo, který ČMI kalibroval v horním obdélníkovém poli se uvede číslo kalibračního listu, v dolním poli datum kalibrace

Příloha č. 1 Příklady úředních značek- pokračování

27		doplňková značka ke kalibrační značce ČMI značkou v provedení jako samolepicí štítek je označen etalon nebo pracovní měřidlo, jehož kalibraci ČMI (po dohodě s uživatelem) neprováděl v úplném měřicím rozsahu kalibrovaného měřidla
----	---	--

2.2 Příklady stanovení nejistot při kalibraci měřidel (měření)

Příklad 1: **Kalibrace koncové měrky o jmenovitém rozměru 50 mm** [21]

- a) **Kalibrovaná koncová měrka** stupně přesnosti 0, JR = 50mm je pomocí komparátoru kalibrována porovnávací metodou.

Etalon: koncová měrka stupně přesnosti K (dle ISO 3650) o stejném jmenovitém rozměru,

Obě měrky jsou vyrobeny ze stejného materiálu.

Rozdíl v jejich středové délce je zjišťován ve vertikální poloze pomocí dvou délkových měrek dotýkajících se horní a dolní měřicí plochy. Skutečná délka l_x kalibrované koncové měrky je vzhledem ke skutečné délce referenčního etalonu dána vztahem:

$$l_x = l_s + \delta l$$

kde:

δl ... měřená délková difference

l_x, l_s ... délky měrek za daných podmínek a především teploty, která vzhledem k nejistotě měření teploty v laboratoři nemusí být shodná s referenční teplotou pro délková měření

- b) **Délka l_x měřené měrky za referenční teploty** je dána vztahem

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_C - L(\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) - \delta l_V$$

kde:

l_s ... délka referenční měrky při referenční teplotě $t_0=20^\circ\text{C}$ (uvedeno v kalibračním listě),

δl_D ... změna délky referenční měrky od poslední kalibrace vlivem kolísání (driftu),

δl ... zjištěný rozdíl v délce mezi měřenou a referenční měrkou,

δl_C ... korekce na nelinearitu a trvalou odchylku (offset) komparátoru,

L ... nominální (jmenovitá) délka uvažované měřky,

$\alpha = (\alpha_X + \alpha_S)/2$... průměrná hodnota součinitelů teplotní délkové roztažnosti měřené a referenční měřky,

$\delta t = (t_X - t_S)$... teplotní rozdíl mezi měřenou a referenční měrkou,

$\delta \alpha = (\alpha_X - \alpha_S)$... rozdíl mezi součiniteli teplotní roztažnosti měřené a referenční měřky,

$\Delta t = (t_X + t_S)/2 - t_0$... odchylka průměrné teploty měřené a referenční měřky od referenční teploty

δl_V ... korekce na nestředový kontakt měřicích ploch měřené měřky

c) **referenční etalon (l_S):**

Z kalibračního listu délka referenční měřky $l_S = 50,00002\text{mm} \pm 30\text{nm}$ (koeficient rozšíření $k=2$)

d) **drift (kolísání) etalonu (δl_D):**

Časový drift délky referenční měřky od předchozí kalibrace je odhadnut v nulové výši s limitem $\pm 30 \text{ nm}$. Obecná zkušenost s měrkami tohoto typu je taková, že nejpravděpodobnější je nulový drift a že se dá předpokládat rovnoměrné rozdělení.

e) **komparátor (δl_C)**

Komparátor byl ověřen, že splňuje požadavky EAL-G21. Z toho lze dovodit, že pro délkovou diferenci D do výše $\pm 10 \mu\text{m}$ je korekce na zjištěnou délkovou diferenci v rozmezí $\pm (30\text{nm} + 0,02D)$. Vzhledem k maximálním tolerancím kalibrované měřky stupně 0 a referenční měřky stupně K je maximální délková difference v rozmezí $\pm 1 \mu\text{m}$. Z toho vyplývá maximální limit $\pm 32 \text{ nm}$ pro nelinearitu a korekci na offset použitého komparátoru.

f) **teplotní korekce (α , δt , $\delta \alpha$, Δt):**

Před kalibrací jsou učiněny takové kroky, že teplotu měřky lze považovat za shodnou s teplotou místnosti. Zbytkový rozdíl v teplotě mezi kalibrovanou a referenční měrkou je odhadován v hodnotě $\pm 0,05^\circ\text{C}$.

Pro ocelové měřky jsou vzhledem k údajům na kalibračním listu referenční měřky a údajům výrobce o kalibrované měrce předpokládány lineární součinitelé teplotní roztažnosti v intervalu $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Kombinováním dvou rovnoměrných rozdělení má rozdíl v délkových teplotních součinitelích roztažnosti trojúhelníkové rozdělení s limity $\pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Odchylka průměrné teploty při měření od referenční teploty $t_0 = 20^\circ\text{C}$ je odhadnuta v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Rozdíly v koeficientech délkových roztažnosti a odchylky střední teploty od referenční teploty jsou dle nejlepšího odhadu nulové, z tohoto důvodu je třeba při vyhodnocování jejich příspěvku k nejistotě respektovat druhé členy vztahu, což vede na součin standardních nejistot vztahujících se k členům součinu $\delta \alpha \cdot \Delta t$, výsledná nejistota $u(\delta \alpha \cdot \Delta t) = 0,236 \cdot 10^{-6}$.

g) **rozdíly v délce (δl_v)**

Dle ISO 3650 musí být rozdíly v naměřené délce ve středu a v rozích měrky stupně 0 v rozmezí $\pm 0,12 \mu\text{m}$. Za předpokladu, že se tyto rozdíly v délce vztahují k měřicím stranám podél krátké hrany o délce 9 mm a že délka ve středu je měřena uvnitř kruhu o poloměru 0,5 mm, lze korekci na středové vychýlení kontaktních bodů odhadnout v rozmezí $\pm 6,7 \text{ nm}$.

h) **korelace**

Předpoklad: vstupní veličiny nejsou vzájemně významně korelované.

i) **měření**

Rozdíl mezi kalibrovanou koncovou měrkou a referenčním etalonem byl zjištěn porovnáváním, komparátor byl před každým porovnáním nulován pomocí referenčního etalonu.

č. měření	zjištěná hodnota δl [nm]
1	-100
2	-90
3	-80
4	-90
5	-100

výběrový průměr:

$$\Phi \delta l = -92 \text{ nm}$$

Souhrnný odhad výběrové směrodatné odchylky (souhrnný odhad směrodatné odchylky byl převzat z testů, které byly provedeny pro potvrzení souladu komparátoru s požadavky EAL-G21):

$$s_p(\delta l) = 12 \text{ nm}$$

standardní nejistota:

$$u(\delta l) = s(\overline{\delta l}) = \frac{12}{\sqrt{5}} = 5,37 [\text{nm}]$$

Tabulka nejistot

veličina	odhad	pravděpodobnostní rozdělení	standardní nejistota	citlivostní koeficient c_i	příspěvek k nejistotě $u(l_x)$
l_s	50,000020 mm	normální	$\frac{30}{2} = 15\text{nm}$	1,0	15,0 nm
δl_D	0 nm	rovnoměrné	$\frac{30}{\sqrt{3}} = 17,3\text{nm}$	1,0	17,3 nm
δl	-92 nm	normální	$5,37\text{nm}$ (výpoč)	1,0	5,37 nm
δl_C	0 nm	rovnoměrné	$\frac{32}{\sqrt{3}} = 18,5 \text{ nm}$	1,0	18,5 nm
δt	0°C	rovnoměrné	$\frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,0289 \text{ K}$	-575 nmK^{-1}	-16,6 nm
$\delta\alpha \cdot \Delta t$	0	---	$0,236 \times 10^{-6}$ (zadání)	$L_0=50,0$	-11,8 nm (odchylky záporné)
δl_V	0 nm	rovnoměrné	$\frac{6,7}{\sqrt{3}} = 3,87\text{nm}$	-1,0	-3,87 nm
l_x	49,999928 mm				36,4 nm

Výsledná standardní nejistota:

$$u(l_x) = \sqrt{15^2 + 17,3^2 + 5,37^2 + 18,5^2 + (-16,6)^2 + (-11,8)^2 + (-3,87)^2} = 36,4[\text{nm}]$$

Rozšířená nejistota: $U = k \cdot u(l_x) = 2 \cdot 36,4 \cong 73[\text{nm}]$

Konečný výsledek:

Naměřená hodnota měřky jmenovitého rozměru 50 mm je:

$$l_x = 49,999928 \text{ mm} \pm 73 \text{ nm}$$

(Uvedená rozšířená nejistota měření je stanovena jako standardní nejistota měření vynásobená koeficientem rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%).

Příklad 2: Stanovení nejistoty při kalibraci třmenového mikrometru na tyčku a následné měření blízkého rozměru

Máme za úkol zkalibrovat třmenový mikrometr na tyčku $l_s=400-0,022$ mm a změřit hřídel průměru $\varnothing 400^{+0,05}$ mm co možno nejpřesněji.

Tyčka, měřidlo i hřídele jsou přibližně ze stejného materiálu - pro dosažení stejné teploty ležely dostatečně dlouho na měřeném kusu.

Základní rovnice:

$$\delta l = l_s - l_i + l_{\max} \cdot \alpha \cdot \delta t$$

kde:

l_s ... nastavovací tyčka

δt ... zbytkový rozdíl teplot mezi koncovou měrkou a mikrometrem

l_i ... délka naměřená mikrometrem

α ... koeficient teplotní délkové roztažnosti, stejný pro měrky i mikrometr $\alpha=11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

$l_{\max}$... měřicí rozsah mikrometru (400mm)

Poznámka:

Kalibrační list pro nastavovací tyčku $l_s=400$ mm udává:

odchylka (korekce) = $-22 \text{ } \mu\text{m}$

nejistota $U = \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)

Tabulka nejistot:

	veličina	odhad	typ rozdělení	standardní nejistota	citlivostní koeficient c_i	příspěvek k nejistotě u
nastavovací tyčka z kal. listu	l_s	-22 μm	$k=1$	1 μm	1	1,0 μm
krajní teplotní rozdíl v průběhu kalibrace $\pm 1^\circ\text{C}$	δt	0	rovnoměrné $\sqrt{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,58 \text{ K}$	$4,6 \mu\text{mK}^{-1}$ ($\alpha \cdot l_{\text{max}}$)	$0,58 \cdot 4,6 =$ $= 2,7 \mu\text{m}$
při čtení na noniu se rozliší jeden dílek, což je $\pm 2,5 \mu\text{m}$	l_i	--	rovnoměrné $\sqrt{3}$	1,4 μm	1	1,4 μm
korekce na délce 400 mm	δl	-22 μm				3,2 μm

Význam výsledku:

Mikrometr vynulovaný na danou tyčku má na rozměru $l_s=400 \text{ mm}$ známou odchylku:

$\delta l = -22 \mu\text{m}$ stanovenou s nejistotou $u(\delta l) \pm 6,4 \mu\text{m}$ pro pravděpodobnost $p = \text{cca } 95\%$.

Nyní měříme hřídel na několika místech. Z dostatečného počtu měření byla určena střední hodnota $\bar{l}_i = 400,040 \text{ mm}$ s nejistotou $u(l_i) = 5 \mu\text{m}$ pro $k=1$.

Tabulka nejistot:

	veličina	odhad	typ rozdělení	standardní nejistota	citlivostní koeficient c_i	příspěvek k nejistotě u
naměřená hodnota a její nejistota (odchylka od jm. hodnoty)	l_i	+40 μm	normální $k=1$	5,0 μm	1	5,0 μm
zjištěná korekce v daném bodě (z předchozí. kalibr.)	δl	dle tab. -22 μm	normální $k=1$	3,2 μm (z kalibrace mikrometru)	1	3,2 μm
krajní teplotní rozdíl v průběhu měření kusu $\pm 1^\circ\text{C}$ $l_{\text{max}}=0,4 \text{ m}$	δt	0	rovnoměr. $\sqrt{3}$	0,58 K	4,6 μmK^{-1} ($\alpha \cdot l_{\text{max}}$)	-2,7 μm
délka měřeného kusu	l_s	+18 μm				7,3 μm

Naměřená hodnota: **$D=(400,018 \pm 0,015) \text{ mm}$** , což vyhovuje předepsané toleranci.

Hodnocení výsledku:

Poměrně nízké nejistoty měření bylo dosaženo díky tomu, že mikrometr byl kalibrován za stejných teplotních podmínek, za jakých byl měřen výrobek. Zanedbali jsme vliv tvaru kontaktní plochy na výsledek měření.

**Shrnutí pojmů**

V této kapitole jste se seznámili se základy stanovování nejistot při kalibraci pracovních měřidel (měření). Měli jste možnost se seznámit s úředními značkami, kterými jsou označována měřidla v rámci státní metrologické kontroly měřidel (schvalování typu měřidla, ověřování pracovních měřidel stanovených) a kalibrace pracovních měřidel nestanovených.

Přiložené příklady vám pomohou se lépe orientovat v dané problematice.



Kontrolní otázky

1. Co rozumíte pod pojmem nejistota měření?
2. Specifikujte pojem „kalibrace“?
3. Která měřidla podléhají povinné kalibraci?
4. Které základní informace musí obsahovat kalibrační list měřidla?
5. Je třeba znát typ rozdělení, kterým se řídí příslušný zdroj nejistoty?



Úlohy k řešení

2.3 Příklad pro stanovení nejistoty

Stanovte nejistotu kalibrace třmenového mikrometru dle zadání.

Kalibrované měřidlo: **mikrometr s rozsahem 25 mm a jemnou stupnicí**

Etalon: **koncové měrky**

Materiál měřidla a etalonu: **ocel**

Před kalibrací mikrometr a koncové měrky byly ponechány dostatečně dlouho na vyrovnávacím bloku, aby došlo k maximálnímu vyrovnání teplot.

Cílem kalibrace je stanovit pro každý kalibrační bod korekci δl dle vztahu:

$$\delta l = l_s - l_i + l_{\max} \cdot \alpha \cdot \delta t$$

kde:

l_s ... jmenovitá délka měrky

δt ... zbytkový rozdíl teplot mezi základní měrkou a mikrometrem

l_i ... délka naměřená mikrometrem

α ... koeficient teplotní délkové roztažnosti (stejný pro měrky i mikrometr $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

$l_{\max}$... měřicí rozsah mikrometru (25 mm)

Kalibrační tabulka:

jmenovitá. délka měrky l_s [mm]	0,0	2,5	5,1	7,7	10,3	12,9	15,0	17,6	20,2	22,8	25,0
korekce δl [μm]	0,0	0,5	0,5	0,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,0	-1,0	-0,5

Uvažované zdroje nejistot:

krajní chyba referenčních měrek I. tř. : $\pm 0,3 \mu\text{m}$

krajní teplotní rozdíl v průběhu kalibrace: $\pm 1^\circ\text{C}$

při čtení na noniu se rozliší jeden dílek, což je: $\pm 0,5 \mu\text{m}$

3 KONTROLA VYBRANÝCH PARAMETRŮ KONCOVÝCH MĚREK



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Specifikovat základní parametry koncových měrek a požadavky kladené na tyto parametry
- ✚ Metodiku kontroly parametrů koncových měrek.



Výklad

Koncové měrky:

- jsou všeobecně uznávány jako základ délkového měření ve strojírenské výrobě,
- jsou to etalony délky reprezentující specifický díl délky (metru) mezinárodního systému jednotek SI,
- vyrábějí se nejčastěji ve tvaru hranolů o průřezu 9x30 mm do jmenovitého rozměru 10mm a 9x35mm nad 10 mm délky,
- měřicí plochy jsou opracovány s vysokou přesností rozměrovou, rovnoběžností funkčních ploch a drsností povrchu.

Koncové měrky se používají:

- pro nastavení měřidel, měřicích přístrojů a přípravků,
- k ověřování a kalibraci měřidel,
- jako etalon délky,
- pro přímou kontrolu délkových rozměrů výrobků.

Značení koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650 (ČSN 25 3308):

- koncové měrky musí být trvale značeny jmenovitou délkou v milimetrech,
- je-li na měrce uvedena třída přesnosti, musí být použito toto značení:
 - kalibrační třída K: K
 - třída 0: 0
 - třída 1: -
 - třída 2: =

Požadovaný rozměr měrky se skládá z jednotlivých měrek, které se spojují tzv. nasáváním. Správně nasáté měrky s nepoškozenými funkčními plochami drží spolu vlivem

molekulových přitažlivých sil. Při sestavování rozměrů z jednotlivých měrek je nutno pamatovat na chyby, které mohou ovlivnit celý rozměr

Chyby:

- vlastní chyby měrky,
- chyba způsobená nepřesnostmi ve styku dvou měrek (cca $0,1 \div 0,2 \mu\text{m}$),
- chyba ve styku měrky s plochou stolku komparátoru, měrky a funkční plochy snímače apod. (cca $0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$).

3.1 Základní parametry koncových měrek

Základními parametry koncových měrek jsou (obr. 3.1):

délka koncové měrky v libovolném bodě (l) - kolmá vzdálenost zvoleného bodu volné (nenasáté) plochy od rovinné plochy desky, na které je měrka nasátá,

středová délka koncové měrky (l_c) - délka kolmice středu volné měřicí plochy měrky na plochu, k níž měrka přilnula svou druhou plochou,

odchylka délky v libovolném bodě od jmenovité délky (t_e) – algebraický rozdíl $l-l_n$,

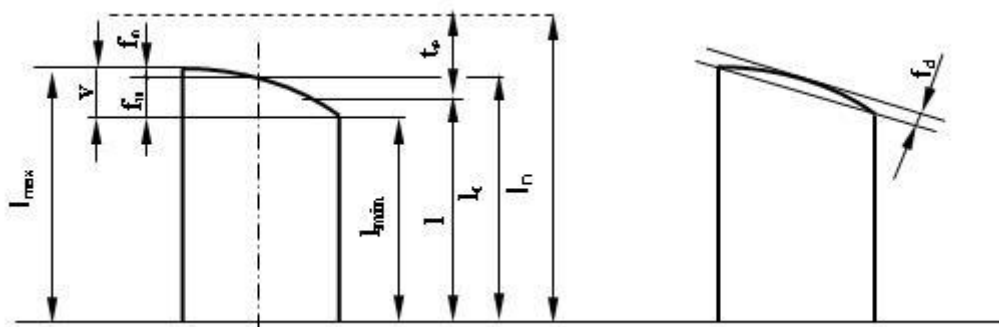
odchylka rovinnosti (f_d) – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží všechny body měřicí plochy,

rozpětí délky (v) – rozdíl mezi největší délkou koncové měrky $l_{\max}$ a nejmenší délkou $l_{\min}$ (rozpětí délky je rovno součtu odchylek f_o a f_u od střední délky l_c),

tvrdost měřicích ploch musí být min. 800 HV nebo 62 HRC,

přilnavost – schopnost měřicích ploch měrek přilnout působením molekulárních sil k jiným měřicím plochám nebo na plochy se stejnou úpravou povrchu,

koeficient délkové roztažnosti - pro ocel při teplotě $(10 \div 30)^\circ\text{C}$ musí být v rozmezí $(11,5 \pm 1)10^{-6}\text{K}^{-1}$, pro jiné materiály musí výrobce hodnotu tohoto koeficientu uvést v dokumentaci.



Obr. 3.1 Základní parametry koncové měrky

3.2 Kontrola koncových měrek

Kontrola koncových měrek je složitou operací, při které se kontrolují všechny jakostní parametry měrky vč. koroze, mechanického poškození, drsnosti atd.

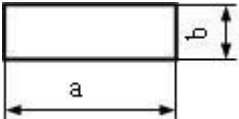
Každá koncová měrka musí splňovat požadavky své třídy (specifikace požadavků viz ČSN EN ISO 3650). Shoda se specifikacemi se prokazuje v souladu s ISO 14253-1.

Požadavky na dodržení parametrů koncových měrek (výběr z ČSN EN ISO 3650)

Rozměry

Jmenovité rozměry průřezu a jeho povolené úchytky viz **tab. 3.1**

Tab. 3.1 Průřez

Průřez	jmenovitá délka l_n	Parametr a		Parametr b	
		jmenovitá hodnota [mm]	mezí úchylka [mm]	jmenovitá hodnota [mm]	mezí úchylka [mm]
	$0,5 \leq l_n \leq 10$	30	0	9	-0,05
	$10 < l_n \leq 1000$	35	-0,3		-0,20

Rozměrová stabilita

Největší dovolené změny délky koncových měrek za rok viz **tab. 2.2**. Toto platí pro koncové měrky, které nebyly vystaveny extrémním teplotám, nárazům, magnetickým polím mechanickým silám.

Tab. 3.2 Rozměrová stabilita

Třída přesnosti	Největší dovolená změna délky/rok
K 0	$\pm(0,02\mu\text{m}+0,25 \cdot 10^{-6} \cdot l_n)$
1 2	$\pm(0,05\mu\text{m}+0,5 \cdot 10^{-6} \cdot l_n)$
Poznámka: l_n je vyjádřena v milimetrech	

Tolerance rovinnosti T_f měřicí plochy koncové měrky

Odchylka rovinnosti f_d každé měřicí plochy koncové měrky jmenovité větší než 2,5 mm nesmí překročit příslušné tolerance – viz **tab. 3.3**, jestliže je koncová měrka přilnuta k pomocné destičce nebo je sejmuta.

Odchylka rovinnosti f_d každé měřicí plochy koncové měrky jmenovité délky do 2,5 mm nesmí překročit příslušné tolerance – viz **tab. 3.3**, jestliže je koncová měrka přilnuta k pomocné destičce s tloušťkou nejméně 11 mm. Odchylka rovinnosti každé měřicí plochy koncové měrky, která není přilnuta k pomocné destičce, je do 4 μm .

Tab. 3.3 Tolerance rovinnosti T_f měřicí plochy koncové měrky

Jmenovitá délka l_n [mm]	Tolerance rovinnosti T_f [μm]			
	Třída přesnosti			
	K	0	1	2
$0,5 \leq l_n \leq 150$	0,05	0,1	0,15	0,25
$150 < l_n \leq 500$	0,1	0,15	0,18	0,25
$500 < l_n \leq 1000$	0,15	0,18	0,2	0,25

Měřicí plochy

Měřicí plochy všech měrek musí lehce přilnout nasunutím. jemné škrábance bez otřepů jsou přípustné, jestliže nesníží jejich přilnavost.

Hrany měřících ploch musí být zaobleny poloměrem nepřekračujícím 0,3 mm nebo sraženy do 0,3 mm. Přechod mezi sraženou hranou a měřicí plochou musí být takový, aby se nesnížila přilnavost měřících ploch.

Rovinnost bočních ploch

Tolerance rovinnosti (viz ISO 1101) bočních ploch je 40 μm pro jmenovité délky do 100 mm. Pro jmenovité délky přes 100 mm do 1000 mm je tolerance rovinnosti dána vztahem:

$$T_f = 40\mu\text{m} + 40 \cdot 10^{-6} \cdot l_n \quad \text{pozn.: } l_n \text{ v mm}$$

Rovnoběžnost

Odchylka rovnoběžnosti (viz ISO 1101) bočních plochy s protilehlou boční plochou jako základnou nesmí překročit 80 μm pro jmenovité délky do 100 mm. Pro jmenovité délky přes 100 mm do 1000 mm je tolerance rovnoběžnosti dána vztahem:

$$T = 80\mu\text{m} + 80 \cdot 10^{-6} \cdot l_n \quad \text{pozn.: } l_n \text{ v mm}$$

Kolmost

Tolerance kolmosti (viz ISO 1101) bočních plochy k měřicí ploše jako základně viz **tab. 3.4.**

Tab. 3.4 Tolerance kolmosti (dle ISO 1101) bočních ploch k měřicí ploše jako základně

Jmenovitá délka l_n [mm]	Tolerance kolmosti [μm]
$10 \leq l_n \leq 25$	50
$25 < l_n \leq 60$	70
$60 < l_n \leq 150$	100
$150 < l_n \leq 400$	140
$400 < l_n \leq 1000$	180

Hrany

Hrany mezi bočními plochami nesmí mít poloměr nebo sražení větší než 0,3 mm.

Kontrola koncových měrek

Kontrola koncových měrek je složitou operací, při které se kontrolují všechny jakostní parametry měřky vč. koroze, mechanického poškození, drsnosti atd.

Každá koncová měrka musí splňovat požadavky své třídy (specifikace požadavků viz ČSN EN ISO 3650). Shoda se specifikacemi se prokazuje v souladu s ISO 14253-1.

Kalibrace měrek

Měření koncových měrek je sledem jednotlivých přenosů délky vycházejících ze základní definice jednotky délky a pokračují interferenčním navázáním vyšší třídy (přednostně třídy K) koncových měrek. Dále smí následovat jeden nebo více přenosů porovnávacím měřením ostatních tříd koncových měrek. Kalibrační list musí obsahovat výsledky měření a přiřazené nejistoty měření.

Kontrola přilnavosti

Schopnost měřicích ploch koncových měrek přilnout se zkouší použitím optické destičky, která musí mít zajištěnou odchylku rovinnosti 0,1 μm . Přilnutá měřicí plocha musí být prohlédnuta přes optickou destičku a nesmí vykazovat žádné interferenční pruhy, barevné a lesklé skvrny. U měrek třídy přesnosti 1 a 2 jsou lesklé skvrny a stíny v malém rozsahu přípustné.

3.2.1 Interferenční měření

Měřená délka

Délka koncové měrky (třída přesnosti K) se měří ve středu měřicí plochy interferenční metodou. Měření odchylek f_o a f_u od středové délky se provádí v bodech největší délky $l_{\max}$ a nejmenší délky $l_{\min}$ koncové měrky. Pomocná destička, na kterou je měrka přilnuta po dobu měření, by měla být vyrobena ze stejného materiálu jako měřená měrka a mít stejnou úpravu povrchu příslušné plochy, jinak nutno zavést korekce - rozdílné vlastnosti materiálů. Pomocná destička musí mít tloušťku nejméně 11 mm, odchylku rovinnosti násuvné plochy menší než $0,025\mu\text{m}$ na průměru 40 mm.

Korekce k interferenčním měřením

Do výpočtů se berou korekce významných vlivů, např.: teploty, atmosférického tlaku, vlhkosti, odchylky teploty měrky od 20°C , působení přilnavosti na délku koncové měrky (v případě, že koncová měrka a pomocná destička jsou z rozdílných materiálů), nastavení interferometru, stlačení koncové měrky nad 100mm, je-li měrka ve svislé poloze atd.

Kalibrační list

Kalibrační list musí obsahovat:

- výsledky měření, hlavně středovou délku l_c nebo odchylku středové délky od jmenovité délky $l_c - l_n$,
- odhadnuté nejistoty měření a návaznost s odkazem na použití etalon,
- koeficient teplotní délkové roztažnosti (přepočet délky na teplotu 20°C).

Kalibrační list musí uvádět, kterou měřicí plochou byla koncová měrka při měření přilnuta a zda koncová měrka byla nasunuta na pomocnou destičku každou ze dvou měřicích ploch. Dále kalibrační list musí obsahovat koeficient teplotní délkové roztažnosti použitý k přepočtu výsledků na délky při 20°C .

3.2.2 Porovnávací měření

Stanovit délku koncové měrky porovnávací metodou znamená určit rozdíl mezi středovou délkou referenční koncové měrky a měrky měřené při algebraickém uplatnění referenční délky. Měřicí plochy každé z měrek jsou kontaktovány v opačných smyslech, délkový rozdíl je měřen indikátorem délky s vysokou rozlišovací schopností.

Středová délka

Při porovnávacím měření je přenášena středová délka referenční koncové měrky na zkoušenou koncovou měrku. Referenční koncová měrka smí být, buď měřena přímo

interferenčně, nebo navázána několika porovnávacími měřeními na referenční měрку měřenou interferenčně.

Poznámka:

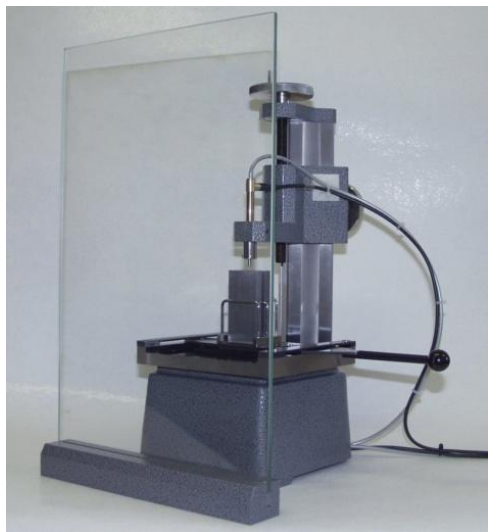
Vliv přilnutí, který je zahrnut do délky referenční koncové měřky měřené interferenčně, je přenášen porovnávacím měřením.

Metoda stanovení délky porovnávacím měřením

Poměrně malý rozdíl ve středové délce mezi známou středovou délkou referenční koncové měřky a neznámou středovou délkou jiné koncové měřky je měřen indikátorem (snímačem) s vysokou rozlišovací schopností.

Rozpětí délky

Měření se provádí tak, že se stanovuje rozdíl mezi středem a čtyřmi rohy měřicí plochy přibližně 1,5 mm od bočních ploch. Pokud pro stanovení rozpětí délky byly použity jiné body než v rozích měřicí plochy, musí být jejich umístění popsáno. Zařízení na kontrolu koncových měrek viz **obr. 3.3**



***Obr. 3.3** Komparační zařízení pro kontrolu koncových měrek*

Korekce k porovnávacímu měření

Korekce musí být provedeny na:

- chybu správnosti měřicího zařízení,
- vliv teploty rozdílné od 20°C a rozdílného koeficientu teplotní délkové roztažnosti porovnávaných měrek,
- vliv rozdílné deformace kontaktu snímače s měřicími plochami dvou koncových měrek vyrobených z různých materiálů.

Kalibrační list

Kalibrační list musí obsahovat:

- výsledky měření, hlavně středovou délku l_c nebo odchylku středové délky od jmenovité délky $l_c - l_n$,
- odhadnuté nejistoty měření a návaznost,
- koeficient teplotní délkové roztažnosti koncových měrek použitý pro provedení korekce.

Dovolené úchytky jmenovité délky t_e v libovolném bodě měřicí plochy a tolerance T_v pro rozpětí délky – viz **tab. 3.5**

Tab. 3.5 Dovolené úchytky jmenovité délky t_e v libovolném bodě měřicí plochy a tolerance T_v pro rozpětí délky

Jmenovitá délka l_n [mm]	Kalibrační třída K		Třída 0		Třída 1		Třída 2	
	Dovolená úchytky délky v libovolném bodě $\pm t_e$ [μm]	Tolerance rozpětí délky T_v [μm]	Dovolená úchytky délky v libovolném bodě $\pm t_e$ [μm]	Tolerance rozpětí délky T_v [μm]	Dovolená úchytky délky v libovolném bodě $\pm t_e$ [μm]	Tolerance rozpětí délky T_v [μm]	Dovolená úchytky délky v libovolném bodě $\pm t_e$ [μm]	Tolerance rozpětí délky T_v [μm]
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1,0	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,0	0,5
$100 < l_n \leq 150$	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,2	1,6	0,4
$150 < l_n \leq 200$	1,0	0,09	0,5	0,16	1,0	0,25	2,0	0,4
$200 < l_n \leq 250$	1,2	0,1	0,6	0,16	1,2	0,25	2,4	0,45
$250 < l_n \leq 300$	1,4	0,1	0,74	0,18	1,4	0,25	2,8	0,5
$300 < l_n \leq 400$	1,8	0,12	0,9	0,2	1,8	0,3	3,6	0,5
$400 < l_n \leq 500$	2,2	0,14	1,1	0,25	2,2	0,35	4,4	0,6
$500 < l_n \leq 600$	2,6	0,16	1,3	0,25	2,6	0,4	5,0	0,7
$600 < l_n \leq 700$	3,0	0,18	1,5	0,3	3,0	0,45	6,0	0,7
$700 < l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5	6,5	0,8
$800 < l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5	7,5	0,9
$900 < l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2,0	0,4	4,2	0,6	8,0	1,0



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s problematikou kontroly vybraných parametrů koncových měrek.



Kontrolní otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.

1. K čemu se používají koncové měrky?
2. V kolika stupních přesnosti se vyrábění koncové měrky – značení tříd přesnosti.
3. Jaké jsou základní parametry koncových měrek?
4. Jaké metody se používají při kalibraci koncových měrek?



Úlohy k řešení

3.3 Zadání úlohy č. 1

Proveďte kontrolu vybraných parametrů koncové měrky

1. Proveďte zařazení koncové měrky dle hodnocení jakost povrchu měřicích ploch.
2. Určete odchylku rovinnosti funkčních ploch koncové měrky s využitím interference světla.
3. Určete odchylku střední délky kontrolované koncové měrky s využitím koncové měrky o řád přesnější jako etalonu.

Postup práce:

1. Očistěte zadanou koncovou měrku i příslušný etalon
2. Pozorováním povrchu lupou (zvětšení 10x) zařadte měrku do příslušného stupně jakosti (**tab. 3.6**)
3. Měrku položte na stoleček přístroje a planparalelní destičkou stanovte potřebné parametry pro posouzení rovinnosti měřicích ploch kontrolované koncové měrky
4. Přístroj (ultraoptimetru 02 ZEISS) nastavte pomocí etalonu s uvedenou odchylkou. Etalon proměřte 10x. Vlastní měření zadané koncové měrky opakujte 10x.
5. Naměřené hodnoty sestavte do tabulky a proveďte patřičné výpočty a případně proveďte srovnání s tabulkovými hodnotami.
6. Při ručním přemísťování se měrky ohřejí, je tudíž třeba před měřením čekat 10 minut na vyrovnání teplot.

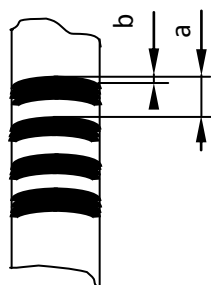
7. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři.
8. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) ultraoptimetr 02 ZEISS
- b) Brinellova lupa
- c) planparalelní destička
- d) koncové měrky
- e) čisticí prostředky
- f) rukavice pro metrologická měření
- g) literatura

Tab. 3.6 Klasifikace povrchu:

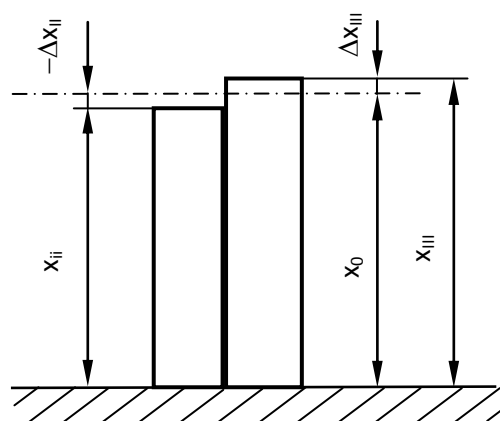
klasifikace	Charakteristika povrchu
0, 1	žádné viditelné poškození
2	jedna náhodná rýha bez vlivu na rovinnost a rozměr
3	šest rýh, jedna tečka od leptání nebo menší shluk rýh na okraji
4	dvojnásobek jako 3, vadné rýžky mohou být tmavé



$$k = \frac{b}{a} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

vlnová délka světla: $\lambda \cong 0,6\mu\text{m}$

Obr. 3.3 Schéma kontroly rovinnosti
funkční plochy koncové měrky



$$\Delta X_{III} = \overline{X_{III}} - \overline{X_{II}} + \Delta X_{II} \pm \sqrt{s_{III}^2 + s_{II}^2}$$

kde:

ΔX_{III} ... odchylka délky kontrolované koncové měrky

$\overline{X_{III}}$... výběrový průměr - kontrolovaná měrka

$\overline{X_{II}}$... výběrový průměr etalonová měrka

ΔX_{II} ... systematická chyba etalonové měrky

s_{III} ... směrodatná odchylka kontrolovaná měrka

s_{II} ... směrodatná odchylka - etalonová měrka

Obr. 3.4 Schéma kontroly délky koncové měrky

4 KALIBRACE STUPNICE PRACOVNÍHO MĚŘIDLA



Čas ke studiu: 6 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce se:

- ✚ Seznámíte s problematikou kalibrace vybraných metrologických parametrů třmenového mikrometru, číselníkového úchylkoměru a posuvného měřítka
- ✚ V rámci úkolů si ověříte jednotlivé metody prakticky na konkrétních měřidlech včetně vyhodnocení získaných dat.



Výklad

Přesnost měřidla je schopnost měřidla poskytovat výstupní signály blízké referenční (pravé) hodnotě (dle ČSN 01 0115).

Kalibrace – soubor úkonů, kterými se stanoví za specifických podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony (dle ČSN 01 0115).

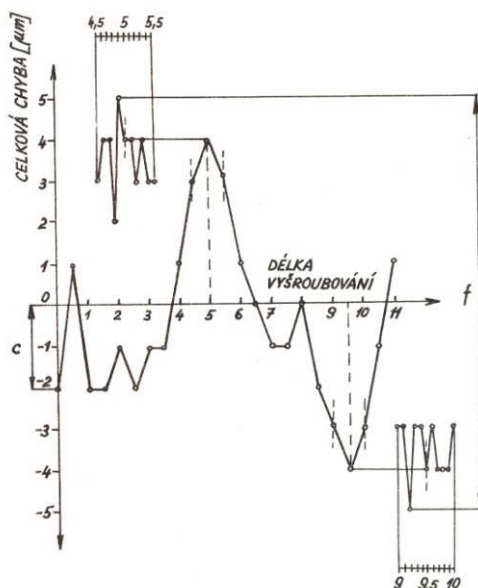
Kalibrace – činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace (dle ČSN 01 0115).

4.1 Třmenový mikrometr

Kalibrace stupnice

Před vlastní kalibrací stupnice je nutno stanovit rozsah, ve kterém kalibraci provádíme a vhodně zvolit krok kalibrace. Ke kalibraci se použijí koncové měrky odstupňované dle zvoleného kroku a rozsahu. Všechna měření je nutno provádět při stejném počtu otočení spojky nebo řehťáčky (5x), tím je zajištěn přibližně stejný měřicí tlak. Po prvním otočení spojky použitou měrku pootočíme. K snadnějšímu odečítání se použije lupa. Získané hodnoty odchylek se zaokrouhlí na μm . Potom se nakreslí kalibrační křivky (křivka odchylek) – **obr. 4.1**, která se následně vyhodnotí.

Pokud z křivky odchylek jsou jasně vidět maximum a minimum, provádí se měření v extrémních bodech s krokem jemnějším tak, aby bylo možno postihnout chování v těchto extrémech.



Obr. 4.1 Kalibrační křivka (křivka odchylek)

Určení nepřesnosti měřicích dotyků

Měřené plochy je nutno dobře očistit. Planparalelní destička se přiloží nejprve na pevný dotyk, potom na dotyk mikrometrického šroubu, až počet interferenčních proužků nebo kroužků tvoří minimum nebo až tvoří uzavřené křivky. Můžou nastat tyto případy - **obr. 4.2**.

Komentář k **obr. 4.2**.

Obě měřené plochy jsou rovné, ale ne kolmé na společnou osu. Výsledek – proužky vyjádřených úhlů mezi měřenými plochami se dostane součtem (rozdílem) získaných proužků na obou stranách (případy **a**, **b**).

Ztotožněním planparalelní destičky s jednou ze dvou měřicích ploch dostaneme případy (**c**, **d**).

U vypuklých (vlevo) nebo vydutých (vpravo) ploch se objeví kroužky (případy **e**, **f**).

Mohou nastat jiné tvary nerovnosti, např. sedlové plochy (vlevo) nebo naražené (vpravo) – případ **g**.

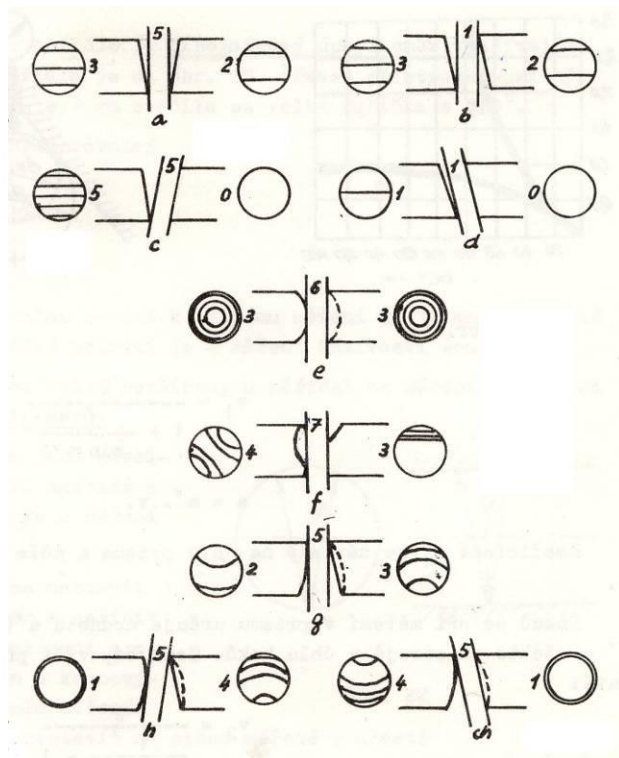
Mohou to být odchylky nerovnoběžnosti a nerovnosti. Rovněž i v těchto případech je vhodné vyrovnat planparalelní destičky podle jedné plochy (případy **h** a **ch**).

Každá z planparalelních destiček o tloušťkách např. 25.000; 25.120; 25,250; 25,370 mm normálním měřicím tlakem se vyrovná na jednu z měřicích ploch mikrometru a určí se počet interferenčních proužků (kroužků) pro oba měřené dotyky. Součet interferenčních proužků na obou měřicích plochách se vynásobí hodnotou $\frac{\lambda}{2}$.

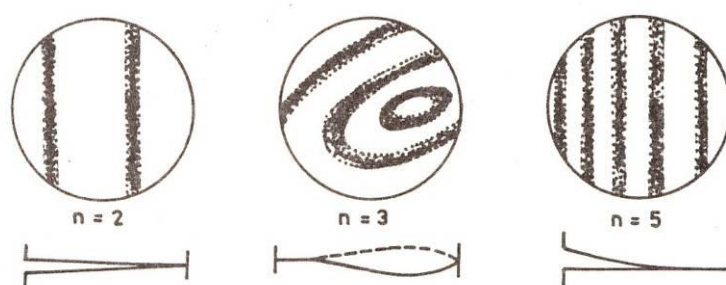
Princip odečítání interferenčních proužků viz **obr. 4.3**

Odchylka rovnoběžnosti doteků: $\Delta = (n_1 + n_2) \frac{\lambda}{2} \text{ } [\mu\text{m}]$

Odchylka rovnoběžnosti měřících doteků nesmí překročit hodnoty uvedené v normě.



Obr. 4.2 Nerovnosti měřících dotyků mikrometru



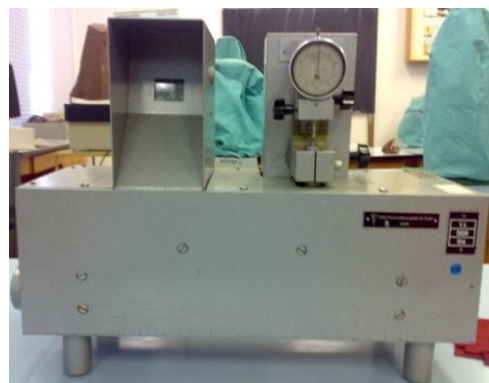
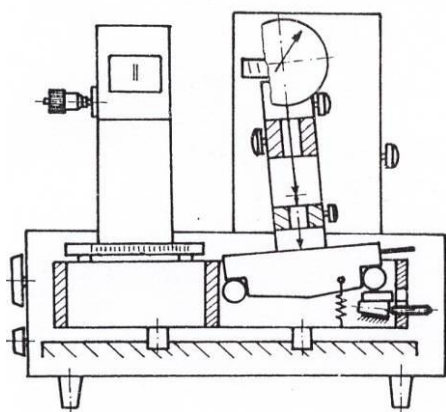
Obr. 4.3 Princip odečítání interferenčních proužků

4.2 Číselníkový úchylkoměr

Kalibrace stupnice

Číselníkový úchylkoměr využívá převod mechanický ozubenými koly. Velmi často potřebujeme určit odchylku ukazování číselníkového úchylkoměru. Určení odchylky může být provedeno koncovými měrkami nebo je možno odchylky zjistit srovnávacím přístrojem o vyšší přesnosti. Odchylka tohoto srovnávacího přístroje musí být 10x menší než odchylky ukazování kontrolovaného číselníkového úchylkoměru.

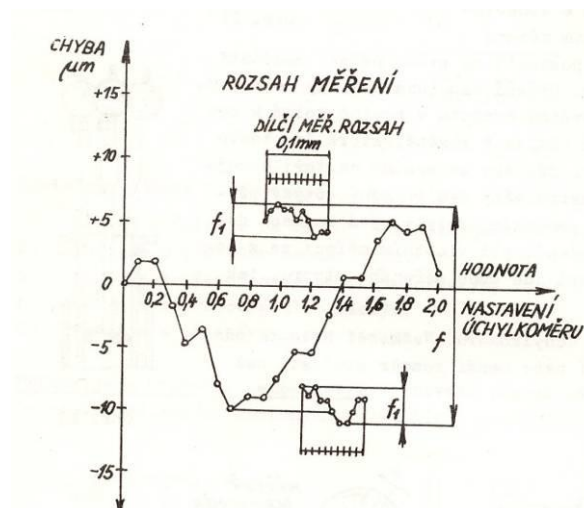
V měrových střediscích se používá přístroje pro kontrolu číselníkových úchylkoměrů VEB Feinmesszeugfabrik Suhl (jednoduché schéma **obr. 4.4**).



Obr. 4.4 Přístroj na kontrolu číselníkových úchylkoměrů

Přístroj má lože, na kterém se posouvají saně. Lože nese sinusové pravítko, jehož stoupání se nastaví vložením měrky. Stavěcím šroubem se posouváním kužele sinusové pravítko vynuluje. Rukojetí lze sinusové pravítko zvednout. Po vložení měrky stáhne pružina sinusové pravítko, měrku i kužel. Saně nesou za sinusovým pravítkem skleněné měřítko, na němž je vyryta stupnice s 1000 dílky s dělením po 0,1 mm. Na loži je podstavec s výkyvným držákem, v němž je upínací hlava. Hrubým posuvem se dá pohybovat saněmi se skleněným měřítkem a sinusovým pravítkem relativně k loži, popř. k dvojryse na matnici. Jemným posuv umožňuje přesná nastavení. Nastavovacím kolečkem se dá posunout dvojryska asi o 4 dílky, mikrometrickým šroubem asi o 10 dílků stupnice. Objektiv zobrazuje měřítko přes pevné zrcátko a stavitelné zrcátko na matnici.

Nastavení sklonu sinusového pravítka se provádí pomocí koncových měrek. Měření se provede ve zvoleném rozsahu se zvoleným krokem. Po grafickém zobrazení průběhu odchylek v případných extrémních bodech (minimum, maximum) se případně provede měření s krokem o řád nižším (**obr. 4.5**). Pro zjištění případné odchylky reverzibility se provádí měření i při odlehčování.

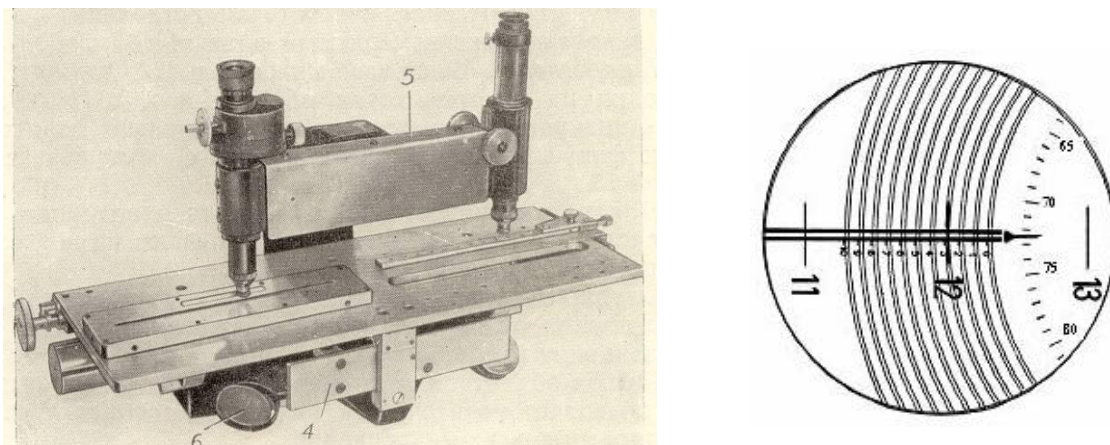


Obr. 4.5 Křivky odchylek číselníkového úchylkoměru

4.3 Kontrola stupnice posuvného měřítka

Posuvné měřítko z oceli se kalibruje pomocí koncových měrek, které jsou vyrobené z oceli a slouží jako pracovní etalon. Princip je obdobný jako při kalibraci třmenového mikrometru.

Kontrolu stupnice posuvného měřítka je možno rovněž provést pomocí horizontálního délkoměru IZA-2 (**obr. 4.6**). Tento délkoměr je určen k měření vzdálenosti dvou různých bodů bezdotykovou metodou a ke kontrole stupnic měřidel.



Obr. 4.6 Horizontální délkoměr IZA-2 a schéma spirálového nonia

Horizontální délkoměr IZA-2 sestává ze stojanu, pohyblivého stolu, nastavovacího a odečítacího mikroskopu. Na stojanu je v dolní části umístěn pohyblivý stůl s osvětlovací

značkou a v horní části na příčném držáku dva mikroskopy s rovnoběžnými optickými osami s konstantní vzdáleností.

Pohyblivý stůl slouží jako nosič základní milimetrové stupnice a současně slouží k upnutí měřeného vzorku. Nastavovací mikroskop slouží k nastavení záměrného obrazce na zvolenou rysku měřeného vzorku (rysku stupnice posuvného měřítka). Odečítací mikroskop se spirálovým okulárovým noniem slouží k odečítání naměřených hodnot.

Oprava výsledku na normální teplotu z teploty v laboratoři:

$$L_{20} = L_t [1 + (\alpha_2 - \alpha_1)(t - 20)]$$

kde:

L_{20} ... naměřená hodnota při $t=20^\circ\text{C}$

L_t ... naměřená hodnota při teplotě t

α_2 ... součinitel délkové roztažnosti materiálu stupnice

α_1 ... součinitel délkové roztažnosti materiálu měřené součásti

t ... teplota, při které se provádí měření

Kontrola stupnice se provede ve zvoleném rozsahu se zvoleným krokem a na základě zjištěných hodnot se provede grafické zobrazení a vyhodnocení. Je nutno provést korekci na teplotu a rozdílnost materiálu stupnice měřidla a materiálu posuvného měřidla.



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste získali nové informace, týkající se kontroly vybraných metrologických parametrů vybraných základních dílenských měřidel – třmenového mikrometru, posuvného měřítka a číselníkového úchylkoměru. Seznámili jste se s metodikami kontroly stupnice u těchto reprezentantů pracovních měřidel. V rámci praktické části jste měli možnost si tyto metodiky ověřit na konkrétních vzorcích a na základě získaných informací posoudit úroveň jejich metrologických vlastností.



Kontrolní otázky

1. Jakým způsobem se provádí kontrola stavu měřicích ploch u třmenových mikrometrů?
2. Jakou zvolíte metodiku kontroly stupnice třmenového mikrometru?

3. Jakou zvolíte metodiku kontroly stupnice posuvného měřítka?
4. Jakou zvolíte metodiku kontroly stupnice číselníkového úchylkoměru?



Úlohy k řešení

4.4 Zadání úlohy č. 2

Proveďte kalibraci stupnice pracovního měřidla:

1. třmenového mikrometru v zadaném rozsahu pomocí koncových měrek,
2. číselníkového úchylkoměru v rozsahu jedné otáčky pomocí přístroje pro kontrolu číselníkových úchylkoměrů.

Postup práce:

1. Proveďte přípravu přístrojů k měření.
2. Očistěte potřebné koncové měrky
3. Proveďte vlastní měření pro obě pracovní měřidla v zadaném rozsahu se zvoleným krokem (odchylky při kalibraci mikrometru odhadujte na 2 μm)
4. Naměřené hodnoty sestavte do tabulky naměřených hodnot.
5. Nakreslete grafy odchylek proměřovaných stupnic v daném rozsahu
6. Proveďte zhodnocení úlohy, popř. navrhněte opatření
7. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
8. Proveďte úklid pracoviště
9. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) koncové měrky
- b) třmenový mikrometr
- c) číselníkový úchylkoměr
- d) přístroj pro kontrolu číselníkových úchylkoměrů
- e) lupa (čočka)
- f) literatura
- g) čisticí prostředky

4.5 Zadání úlohy č. 3

Proveďte kontrolu stupnice posuvného měřítka (hloubkoměru) v zadaném rozsahu bezdotykovou metodou na horizontálním délkoměru IZA-2.

Postup práce:

1. Proveďte přípravu přístrojů k měření.
2. Proveďte vlastní měření v zadaném rozsahu se zvoleným krokem.
3. Naměřené hodnoty sestavte do tabulky naměřených hodnot
4. Proveďte korekci vypočtených hodnot na vliv teploty a rozdílnost součinitelů délkové roztažnosti (**tab. 3.1**).
5. Nakreslete graf odchylek proměřovaných stupnic v daném rozsahu
6. Proveďte zhodnocení úlohy, popř. navrhněte opatření
7. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
8. Proveďte úklid pracoviště
9. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcka a měřidla:

- a) posuvné měřítko (hloubkoměr)
- b) horizontální délkoměr IZA-2
- c) čisticí prostředky
- d) literatura

Tab. 4.1 Součinitelé teplotní délkové roztažnosti:

materiál	α [K ⁻¹]	materiál	α [K ⁻¹]
Ocel	$11,5 \cdot 10^{-6}$	Bronz	$17,5 \cdot 10^{-6}$
Hliník	$23,8 \cdot 10^{-6}$	Chromová ocel	$10,0 \cdot 10^{-6}$
Sklo	$8,1 \cdot 10^{-6}$	Niklová ocel	$12,0 \cdot 10^{-6}$
Křemen	$0,3 \cdot 10^{-6}$	SK	$5,3 \cdot 10^{-6}$
Mosaz	$18,5 \cdot 10^{-6}$		

Systematická chyba teplotní:

$$\Delta l = l_0 \cdot \Delta t (\alpha_1 - \alpha_2)$$

Doba vyrovnání teplot:

$$\tau = 31,3 \frac{m}{S} \log \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_0} - [\text{min}]$$

kde:

Δl ... systematická chyba teplotní [mm]

l_0 ... měřená délka [mm]

Δt ... rozdíl mezi teplotou měření a teplotou referenční [°C]

α_1, α_2 ... koeficienty teplotní délkové roztažnosti [K⁻¹]

m ... hmotnost objektu [g]

S ... povrch sledovaného objektu [cm²]

t_1 ... teplota po stabilizaci [°C]

t_2 ... teplota před stabilizací [°C]

t_0 ... teplota okolí [°C]

5 KONTROLA ÚHELNÍKŮ



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Kontrolovat úhelníky.
- ✚ Pracovat s přístrojem pro kontrolu úhelníků KEILPART
- ✚ Stanovit odchylku kolmosti ramen úhelníku.



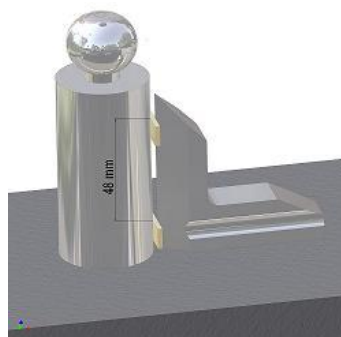
Výklad

Úhelníky jsou používány pro kontrolu kolmosti funkčních ploch součástí, které se vyrábějí v různých druzích, velikostech a stupních přesnosti.

Úhelníky je potřeba před jejich použitím překontrolovat na kolmost. Pro kontrolu odchylek kolmosti úhelníků se používá několik metod a to buď porovnávacím způsobem např. pomocí přesných průměrných válců, výkyvných pravítek nebo absolutním způsobem, kde se určí číselná hodnota odchylky kolmosti, např. průměrné válce + koncové měrky, speciálním přístrojem pro kontrolu kolmosti.

5.1 Kontrola pomocí průměrných válců

Průměrné válce ke kontrole kolmosti (obr. 5.1) jsou broušeny a lapovány, čelní plocha je přesně kolmo broušena. Měření se provádí na kontrolní desce. Přiložením úhelníku k válci se kontroluje kolmost průsvitem (popř. používáme koncové měrky, které se vkládají mezi kontrolní válec a úhelník, je možno určit případnou hodnotu odchylky).

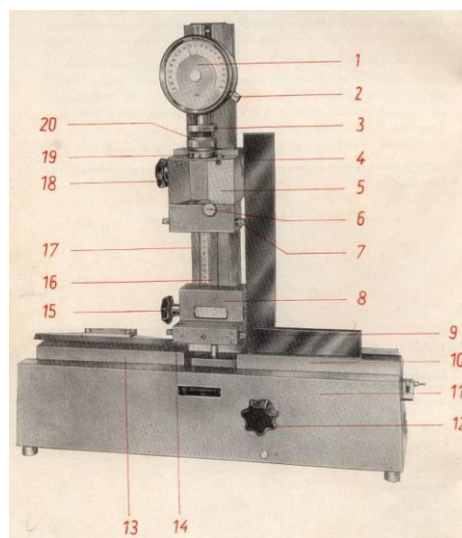


Obr. 5.1 Průměrné válce a schéma kontroly úhelníku pomocí průměrného válce

5.2 Kontrola pomoci speciálního přístroje

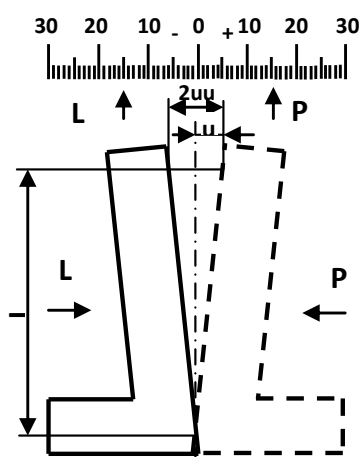
Základní charakteristiky:

- základní těleso přístroje (**obr. 5.2**) nese kolmý stojan (16) s vedením pro měřicí hlavici (5) a nosič dotazu (8),
- na stojanu jsou měřicí hlavice a pevný dorazový nosič do libovolné vzdálenosti vertikálně vzájemně posouvateľné,
- měřicí délky pro vzorky se nastavují posunutím měřicí hlavice, na niž se nacházejí pohyblivé válcově uložené měřicí doteky (7),
- přenos měřené veličiny z pohyblivého doteku se děje pomocí úhlové páky,
- funkce měřidla je charakterizována rovnoběžným uspořádáním a stejnou délkou pevných doteků a pohyblivých měřicích doteků,
- měření se provádí v levé a pravé poloze úhelníku (tím se eliminuje případná odchylka kolmosti vedení měřicí hlavice vzhledem k základním plochám - možnost použití principu obratu),
- při použití principu obratu se úhel α vyšetřuje jako doplňkový k 180° ,
- přístroj ukazuje odchylky nikoliv v úhlových jednotkách, ale v jednotkách délkových,
- schéma odečítání viz **obr. 5.3**
- vedle odečtu velikosti odchylky v jednotlivých směrech je třeba stanovit i znaménko



Obr. 5.2 Přístroj pro kontrolu úhelníků

Vztahy pro výpočet odchylky kontrolovaného úhelníku a odchylky kolmosti vedení přístroje při respektování znamének:



Obr. 5.3 Schéma odečítání hodnot na stupnici

odchylka úhelníku:

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} \quad [\mu\text{m}]$$

odchylka přístroje:

$$\Delta p\check{r} = \frac{L + P}{2} \quad [\mu\text{m}]$$

Z odečtených hodnot zleva **L**, zprava **P** a jejich polohy na stupnici indikátoru je možno provést předpověď hledaných úhlových chyb v hodnotě a znaménku.

Platí:

L>P $\Rightarrow \Delta u = +$ (větší než)

L<P $\Rightarrow \Delta u = -$ (menší než)

Pokud máme úhelník s úhlovou chybou $\Delta u = 0 \mu\text{m}$, pak se musí při metodě obratu platit **L=P**. Nastavíme-li přístroj tak, že odečty **L** a **P** leží v nulovém bodě stupnice indikátoru, pak bude ukazovaná poloha odpovídat 90° .

Výhoda přístroje je v tom, že k nastavení není zapotřebí žádný etalon. Indikovaná poloha **0** odpovídá úhlu 90° .

Příklady, které mohou nastat:

Př. 1:

L = +15 μm , P = -15 μm : $\Rightarrow \text{L>P} \Rightarrow \Delta u = \text{kladná}$

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{+15 - (-15)}{2} = \frac{30}{2} = 15\mu\text{m} \quad (=L)$$

Př. 2:

L = -20 μm , P = +20 μm : $\Rightarrow \text{L<P} \Rightarrow \Delta u = \text{záporná}$

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{-20 - 20}{2} = \frac{-40}{2} = -20\mu\text{m} \quad (=L)$$

Př. 3

L = 0 μm , P = +14 μm : $\Rightarrow \text{L<P} \Rightarrow \Delta u = \text{záporná}$

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{0 - 14}{2} = \frac{-14}{2} = -7\mu\text{m}$$

Př. 4

L = 0 μm , P = -11 μm : $\Rightarrow \text{L>P} \Rightarrow \Delta u = \text{kladná}$

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{0 - (-11)}{2} = \frac{11}{2} = 5,5\mu\text{m}$$

Př. 5

L = 10 μm , P = -5 μm : $\Rightarrow \text{L>P} \Rightarrow \Delta u = \text{kladná}$

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{10 - (-5)}{2} = \frac{15}{2} = 7,5\mu\text{m}$$

Př. 6

L = -8 μm, P = 5 μm: ⇒ L < P ⇒ Δu = záporná

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{-8 - 5}{2} = \frac{-13}{2} = -6,5 \mu\text{m}$$

Př. 7

L = -5 μm, P = -25 μm: ⇒ L > P ⇒ Δu = kladná

$$\Delta u = \frac{L - P}{2} = \frac{-5 - (-25)}{2} = \frac{20}{2} = 10 \mu\text{m}$$



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s vybranými metodami kontroly kolmosti ramen úhelníku. Na základě dat získaných měření na speciálním přístroji pro kontrolu KEILPART jste byli seznámeni se způsobem jejich zpracování s cílem zjištění výsledné odchylky kolmosti.



Kontrolní otázky

1. Jaké znáte metody kontroly kolmosti ramen úhelníků?
2. V případě kontroly kolmosti pomocí průměrných válců jde o metodu přesnou?
3. Proč je třeba při kontrole kolmosti úhelníku pomocí speciálního přístroje provádět měření z pravé i levé strany?



Úlohy k řešení

5.3 Zadání úlohy č. 4

Proveďte kontrolu úhelníku pomocí:

- a) speciálního měřicího přístroje KEILPART měřením zleva a zprava,
- b) kontrolního válce a koncových měrek

Postup práce:

1. Zkontrolujte přístroje na jednotlivých pracovištích, seznámte se s nimi, nakreslete jejich schémata
2. Proveďte vlastní měření na speciálním měřicím přístroji KEILPART (opakujte 10x), získané výsledky sestavte do tabulky naměřených hodnot (schéma přístroje a měření – viz **obr. 5.4**)
3. Proveďte statistické zpracování dat
4. Proveďte potřebné výpočty s cílem stanovení odchylek úhelníku a přístroje.
5. Proveďte výpočty přípustných odchylek pro jednotlivé typy úhelníků
6. Porovnáním výsledků dle bodů 4 a 5; proveďte zařazení kontrolovaného úhelníku
7. Proveďte řádné odmaštění kontrolního válce a potřebných koncových měrek
8. Proveďte vlastní realizaci metody, vč. výpočtu odchylky úhelníku a porovnání odchylky s odchylkou přípustnou pro daný typ úhelníku
9. Proveďte zhodnocení úlohy
10. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
11. Proveďte úklid pracoviště
12. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) úhelníky
- b) průměrný válec
- c) koncové měrky
- d) speciální měřicí přístroj KEILPART
- e) průměrná deska
- f) čisticí prostředky
- g) literatura

Vztahy pro výpočet přípustných odchylek kolmosti úhelníků dle normy ČSN:

- vlasový úhelník: $\Delta\varphi = \pm (2 + 0,01 L) [\mu\text{m}]$
- kontrolní úhelník: $\Delta\varphi = \pm (5 + 0,02 L) [\mu\text{m}]$
- dílenský úhelník I: $\Delta\varphi = \pm (10 + 0,05 L) [\mu\text{m}]$
- dílenský úhelník II: $\Delta\varphi = \pm (20 + 0,1 L) [\mu\text{m}]$

L ... délka delšího ramene úhelníku v mm

6 KONTROLA ROVINNÉHO ÚHLU



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Kontrolovat stupnici sklonoměru s využitím goniometrické funkce.
- ✚ Pracovat se strojnickou libelou
- ✚ Stanovit odchylku od vodorovné roviny kontrolované rovinné plochy.

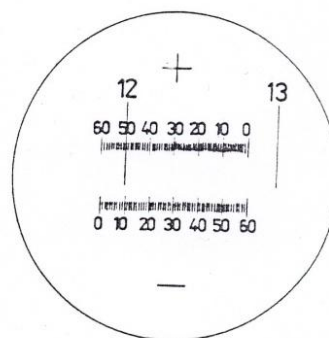


Výklad

Ve srovnání s měřením délkových parametrů je měření (kontrola) rovinných úhlů, kuželů apod. úloha obtížnější a velmi často se používá nepřímého měření, tj. změří se délkový rozměr a početně se převede na rozměr úhlový. Pro přímé měření úhlů se používá úhloměrů, sklonoměru, úhlových měrek a speciálních měřidel. Pro nepřímé měření je možno využít goniometrických funkcí, např. sinusové pravítka.

6.1 Sklonoměr

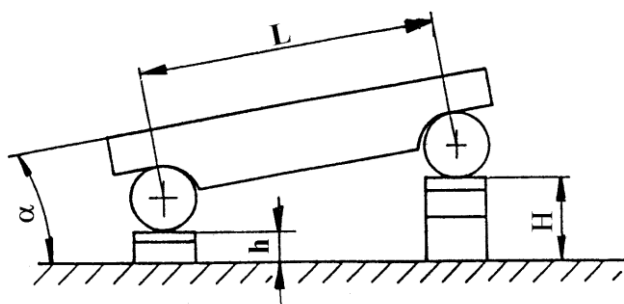
Sklonoměr se používá pro měření sklonu rovin nebo k jejich nastavení pod určitým úhlem. V podstatě je to rámová vodováha, jejíž střední část je otočná. Optický sklonoměr (inklinační vodováha, **obr. 6.1**) je úhloměrný měřicí přístroj určený na měření sklonu ploch součástí a zařízení vůči vodorovné rovině. Vodorovná poloha se zjišťuje pomocí citlivé libely připevněné na otočné desce, opatřené dvěma stupnicemi (pro sklon vlevo a vpravo). Sklon se odečítá přesně na stupnici odečítacího mikroskopu umístěného v tělese sklonoměru, který umožňuje určit úhel s přesností 1' s odhadem na 30". Otočné těleso je opatřeno pomocným dělením k rychlému nastavení, jemné nastavení se provádí šroubem. Měřicí rozsah bývá $\pm 120^\circ$, nepřesnost nejčastěji 1".



Obr. 6.1 Optický sklonoměr a zorné pole sklonoměru

6.2 Sinusové pravítko

Sinusové pravítko se využívá ke kontrole rovinných úhlů buď samostatně, nebo je základem měřících přístrojů. Na **obr. 6.2** je schematicky zobrazeno sinusové pravítko a způsob jeho nastavení na úhel α .



platí:
$$\sin \alpha = \frac{H - h}{L}$$

Chyba měření sinusovým pravítkem:

$$\Delta \alpha' = \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\Delta H}{H - h} - \frac{\Delta h}{H - h} + \frac{\Delta L}{L} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3600 ["]$$

Obr. 6.2 Schéma sinusového pravítka a způsob jeho nastavení

Velmi tuhé pravítko je uloženo na dvou čepech o stejných průměrech upevněných na vzdálenosti L (L bývá 100, 200, 300 a více).

Měřená součást se pokládá na vrchní plochu pravítka, která je různě konstrukčně provedena (prisma, prisma s přesnými hroty atd.).

Měření sinusovým pravítkem se provádí na rovinné příměrné desce, kde se jednotlivé čepy podkládají koncovými měrkami, jejichž velikost (H , h) závisí na nastavovaném úhlu a parametru L sinusového pravítka.

6.3 Kontrola vodorovné polohy pomocí libely

Libely (vodováhy) slouží k určování vodorovné, případně svislé polohy. Jsou konstruovány na základě vlastností bublin vytvořených v uzavřených nádobách naplněných kapalinou.

Citlivost libely C ["] se udává buď úhlem, o který se musí libela naklonit, aby se bublina posunula o jeden dílek stupnice (např. $C_1=5''$) nebo hodnotou náklonu na délce 1 m, aby se bublina posunula o jeden dílek stupnice (např. $C_2=0,07\text{mm.m}^{-1}$).

Citlivost vyjádřená úhlem:

$$C_1 = \frac{d \cdot 206}{R} \quad ["]$$

kde: Rpoloměr zakřivení trubice

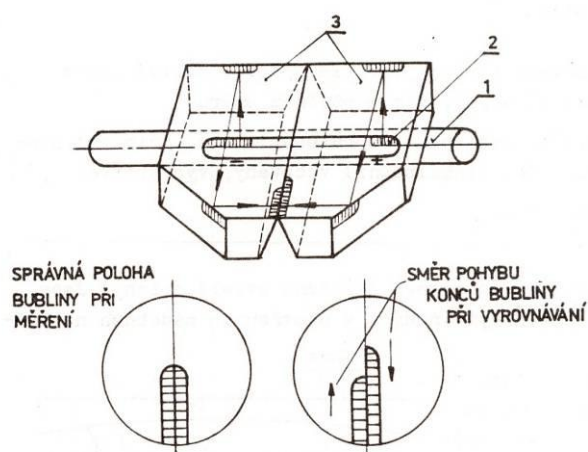
d ... délka dílku libely (normalizována – bývá 2mm)

Citlivost vyjádřená převýšením v mm.m^{-1} :

$$C_2 = 1000 \cdot \frac{d}{R}$$

Přesnosti libely P jako měřícího elementu rozumíme nejmenší úhel, který můžeme ještě libelou určit. Předpokládáme-li, že přesnost **P** je rovna $\frac{1}{5}$ citlivosti, tedy $P = \frac{C}{5}$. Přesnost je tedy závislá na pozorovateli. Použitím zařízení zvětšujícího intervaly stupnice, můžeme přesnost libely zvětšit. Stupňování přesnosti je omezeno pohyblivostí bubliny.

K přesnému a rychlému měření vodorovné polohy se používá tzv. **koincidenční libela** (obr. 6.3). Měří s citlivostí 2", tj. $0,01\text{mm.m}^{-1}$. Vlastní libela je shora zacloněna podél své osy tak, že je vidět jen jednu polovinu bubliny. Soustavou skleněných hranolů se zobrazí oba konce nezacloněné poloviny bubliny, které se při naklonění pohybují proti sobě. Pohne-li se bublina o jeden mm, pohnou se konce bubliny vůči sobě o 2 mm. Pozorujeme-li obraz lupou, která zvětšuje např. trojnásobně, je celková přesnost měření šestinásobná.



Obr. 6.3 Koincidenční libela

Ovládání (zvedání nebo spouštění) jednoho konce libely se provádí mikrometrickým šroubem. Hodnota naklonění se odečítá na milimetrové stupnici na boku libely a na stupnici mikrometrického šroubu v setinách milimetru.

Pro eliminaci případné vlastní chyby koincidenční libely je nutno provádět měření zprava a zleva



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s problematikou kontroly stupnice sklonoměru s využitím goniometrické funkce. Této části učebního textu jste se dále seznámili s kontrolou odchylek od vodorovné polohy s využitím libel. V praktické části této kapitoly máte možnost si osvojit práci s jednotlivými měřidly a ujasnit si metodiku kontroly.



Kontrolní otázky

1. Je rozdíl mezi úhloměrem a sklonoměrem z hlediska jejich použití při kontrole rovinného úhlu?
2. O jakou metodu měření jde při využití sinusového pravítka při kontrole rovinného úhlu?
3. Co je to citlivost libely a jakým způsobem může být vyjádřena?
4. Jaká je citlivost strojnické libely?
5. Jaký je vztah mezi citlivostí a přesností libely?



Úlohy k řešení

6.5 Zadání úlohy č. 5

1. Určete odchylku v ukazování sklonoměru měřením pomocí sinusového pravítka, koncových měrek a průměrné desky.
2. Určete odchylku lože od vodorovné polohy měřením náklonu pomocí koincidenční libely.

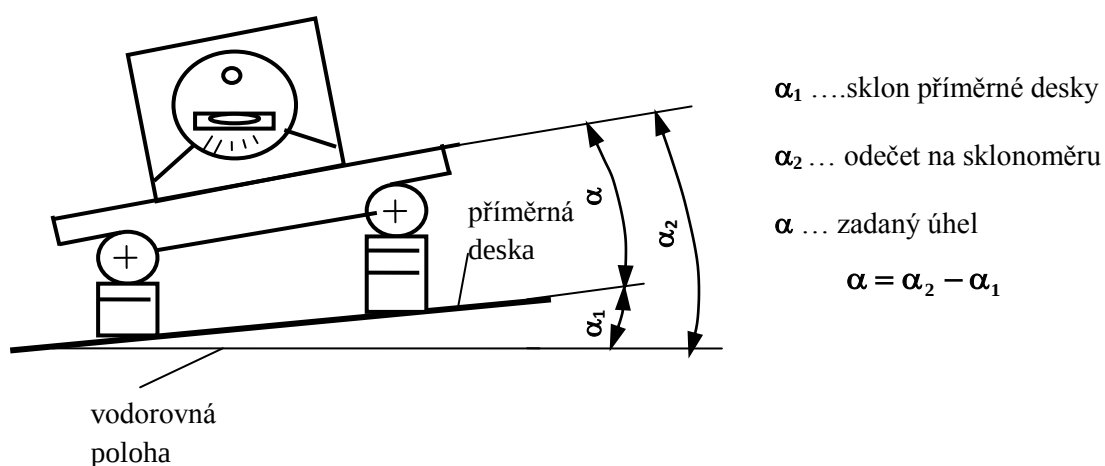
Postup práce:

1. Zkontrolujte přístroje na jednotlivých pracovištích, seznámte se s nimi, nakreslete jejich schémata.
2. Proved'te měření případného sklonu průměrné desky od vodorovné polohy pomocí sklonoměru.
3. Proved'te potřebné výpočty pro nastavení sinusového pravítka pro zadaný úhel α (sinusové pravítko $L=150$ mm).

4. Proved'te nastavení sinusového pravítka na zadaný úhel a vlastní měření sklonu horní plochy sinusového pravítka pomocí sklonoměru (opakujte 10x; schéma viz **obr. 6.4**), získané výsledky sestavte do tabulky naměřených hodnot.
5. Proved'te vyhodnocení získaných dat, výpočty příslušných odchylek, navrhněte způsob eliminace případné odchylky v ukazování sklonoměru
6. Proved'te měření sklonu lože pomocí koincidenční libely a vyhodno'te náklon lože a chybu libely (opakujte 5x z obou stran v různých místech lože).
7. Proved'te zhodnocení úlohy
8. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
9. Proved'te úklid pracoviště
10. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) sinusové pravítko
- b) koncové měrky
- c) sklonoměr
- d) průměrná deska
- e) koincidenční libela
- f) lože
- g) čisticí prostředky
- h) literatura



Obr. 6.4 Schéma měření pomocí sinusového pravítka

Vztahy pro výpočet odchylky lože od vodorovné polohy a chyby libely:

$$\Delta_{\text{lože}} = \frac{\text{čtení1} - \text{čtení2}}{2} \quad [\text{mm.m}^{-1}]$$

$$\Delta_{\text{libely}} = \frac{\text{čtení1} + \text{čtení2}}{2} - 10 \quad [\text{mm.m}^{-1}]$$

7 KONTROLA ZÁVITOVÉHO KALIBRU

Základní parametry závitů jsou (velká písmena platí pro závit vnitřní):

d, D – velký průměr

d_2, D_2 – střední průměr

d_1, D_1 – malý průměr

α - úhel profilu

P – rozteč

Pro kontrolu závitů vnějších i vnitřních byla vyvinuta řada metod měření a s tím související řada různých mechanických, optických, popř. kombinovaných měřicích přístrojů.

Nepřesnosti provedení závitů měříme buď komplexně (souhrnně) nebo jednotlivé parametry (dílčí kontrola). V sériové a hromadné výrobě kontrolujeme závity nejčastěji komplexně, kdy zjišťujeme, zda skutečné parametry závitu se nacházejí v tolerančním poli závitu. K této kontrole používáme závitové kalibry.



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ Kontrolovat střední průměr, rozteč a úhel profilu bezdotykovou metodou pomocí dílenského mikroskopu.



Výklad

7.1 Dílčí kontrola vybraných parametrů vnějšího závitu na měřicím mikroskopu

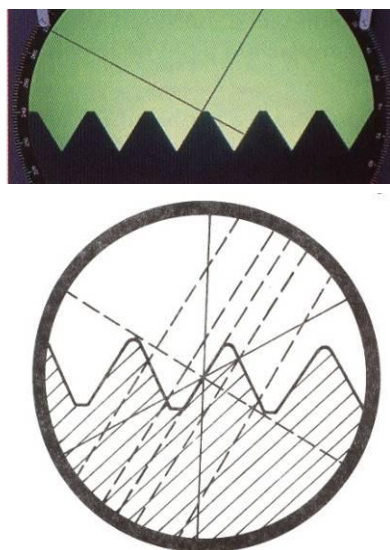
Měřicí mikroskopy jsou vhodné pro kontrolu závitů, protože umožňují přesné měření všech dílčích parametrů při jednom upnutí měřeného závitu (většinou do upínacích trnů). Okulár měřicího mikroskopu je pro měření přizpůsoben a k dispozici je speciální příslušenství, vč. závitových okulárů s profily různých závitů pro porovnávací měření.

Měření je možno provádět dvěma metodami:

- metodou stínového obrazu (metodou průmětovou),
- metodou osového řezu

7.1.1 Metoda stínového obrazu

Základní výchozí poloha nitkového kříže vzhledem k měřenému závitu je zobrazen na **obr. 7.1**.



Profil závitu se zaostří a střední čára nitkového kříže se ztotožní s jedním bokem závitu tak, aby střed jako výchozí bod měření byl asi uprostřed výšky profilu, tj. v místě středního průměru. Při zaostření nelze docílit stejné ostroty na obou bocích závitu vlivem stoupání šroubovice. Tato skutečnost způsobuje určitou nepřesnost, neboť měříme na obrysu, který není přesně v ose měřeného závitu. Tuto nepříjemnost lze eliminovat tím, že měření budeme realizovat při vyklonění stojanu mikroskopu o úhel stoupání šroubovice β [3].

Obr. 7.1 *Obraz závitu v okuláru mikroskopu*

$$\beta = 18.25 \cdot \frac{P}{d_2} \quad [^\circ]$$

kde:

P ... rozteč závitu,

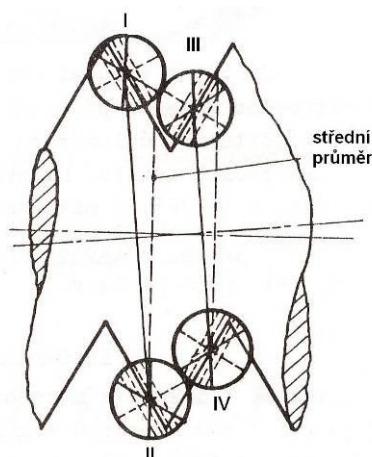
d_2 ... střední průměr měřeného závitu

Nepřesnost měření metodou stínového obrazu [3]:
$$U = \pm \left(5 + \frac{3}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{L}{4} \right) \quad [\mu\text{m}]$$

kde: L ... měřená délka [mm]

Měření (kontrola) středního průměru vnějšího závitu

Příčným posuvem přesuneme hlavicí objektivu s okulárem na proti sobě ležící boky závitu. Rozdíl posunutí v příčném směru je přímo střední průměr závitu. Abychom eliminovali případnou chybu kolmosti směru měření (příčného posuvu) k ose závitu, provádíme vždy měření i na opačných bocích závitu stejným způsobem. Schéma měření je na **obr. 7.2**, kde je možno vidět vznik chyby při měření [3].



Vztahy pro výpočet středního průměru:

$$d_2(\text{levé}) = II - I \quad (\text{levé boky})$$

$$d_2(\text{pravé}) = IV - III \quad (\text{pravé boky})$$

Výsledná naměřená hodnota středního průměru:

$$d_2 = \frac{d_2(\text{levé}) - d_2(\text{pravé})}{2}$$

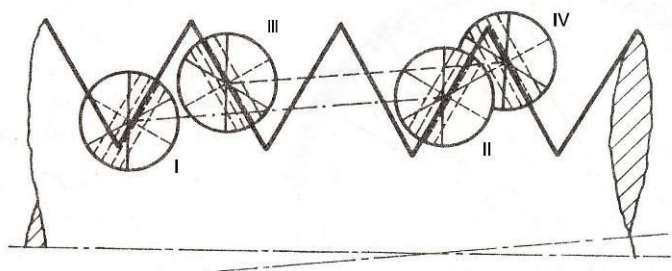
popř.

$$d_2 = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2}$$

Obr. 7.2 Schéma měření středního průměru závitu

Měření (kontrola) rozteče (stoupání)

V mikroskopu se nastaví stínový obraz závitu. Měření je možno provést na sousedních bocích (1 rozteč) nebo je možno měřit přes několik závitů a výslednou hodnotu dělit jejich počtem. Schéma měření viz **obr. 7.3**. Vychází se opět ze základní polohy nitkového kříže, ale měření se realizuje jen podélným posuvem mikroskopu postupně na levých a pravých bocích kontrolovaného závitu. Výsledná naměřená hodnota je opět průměrná hodnota ze všech měření.



Obr. 7.3 Schéma měření rozteče (stoupání) metodou stínového obrazu

Vztahy pro výpočet rozteče:

$$P(\text{levé}) = II - I \quad (\text{levé boky})$$

$$P(\text{pravé}) = IV - III \quad (\text{pravé boky})$$

Výsledná naměřená hodnota rozteče: (měření provedeno přes 2 závitů - rozteče –viz schéma)

$$P = \frac{P(\text{levé}) - P(\text{pravé})}{4}$$

$$2P = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2}$$

popř.:

Nejistota měření metodou stínového obrazu [3]:

dílenský mikroskop:
$$U \cong \pm \left(7 + \frac{3P}{100} \right) [\mu\text{m}]$$

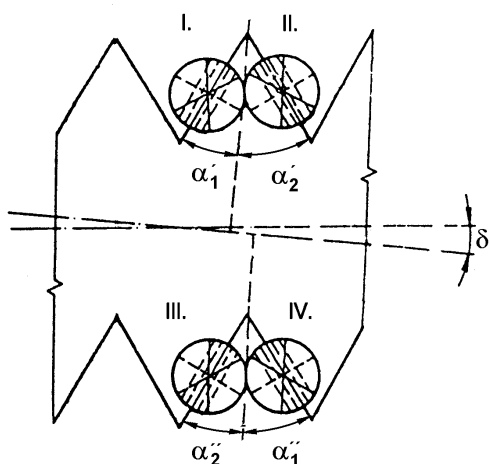
univerzální mikroskop:
$$U \cong \pm \left(4 + \frac{3P}{100} \right) [\mu\text{m}]$$

Měření (kontrola) vrcholového úhlu

Pro měření vrcholového úhlu se používá hlavice mikroskopu s pomocným (úhlovým) okulárem, tj. odečítáme úhlové stupně a minuty. Použijeme-li mikroskop s revolverovou hlavici, kde na skleněné destičce jsou vyryty přesné profily závitů metrického, Whitworthova, úhly 30° a 40° ke kontrole lichoběžníkového závitů, můžeme kontrolovat rovněž zaoblení (poloměr), sražení atd.[2]

Do zorného pole hlavního okuláru se nastaví stínový obraz závitů. Jedna z rysek v tomto obrazu se ztotožní s bokem závitů. Při přesném měření se používají závitové nožíky, které se nechají dolehnout na bok závitů (metoda osového řezu).

Při měření úhlů je nutné, aby osa středících důlků, za které je vzorek uchycen v hrotech měřicího přístroje, byla totožná s osou závitů. Musí se tedy vyjít vždy z nulové polohy úhlového okuláru (musí být nastaven na $0^\circ 0'$). Chyby chybného nastavení os se vyloučí měřením úhlů ještě na protější straně závitů – **obr. 7.4** [2]



Vztahy pro výpočet vrcholového úhlu:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1''}{2}$$

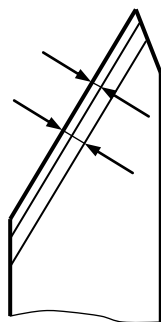
$$\alpha_2 = \frac{\alpha_2' + \alpha_2''}{2}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

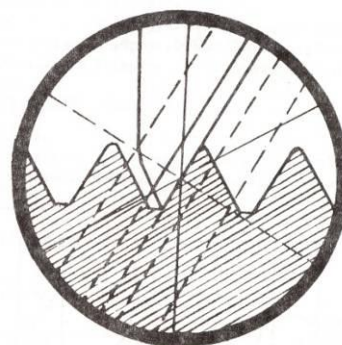
Obr. 7.4 Schéma měření (kontroly) vrcholového úhlu

7.1.2 Metoda osového řezu

Při měření závitů metodou osového řezu se používá speciálního příslušenství měřicího mikroskopu – měřicích nožíků, které se přikládají na boky měřeného závitů. Nožíky mají ostrou hranu a horní plochy je lapovaná do zrcadlového lesku. Na této ploše jsou vyryty tenké rysky ve vzdálenosti 0,3 a 0,9 mm od hrany (**obr. 7.5**). Výrobce zaručuje maximální odchylku $\pm 0,5 \mu\text{m}$.



Obr. 7.5 Měřicí nožík



Obr. 7.6 Základní poloha při měření nožíky

Měřicí nožíky se pokládají na lapovanou destičku (jsou příslušenstvím konkrétního mikroskopu $\Rightarrow$ nelze je zaměňovat s jinými) upevněnou na loži mikroskopu. Tloušťka destičky je upravena tak, že horní ploška nožíku s ryskou je v úrovni osy měřeného závitu, popř. v ose upínacích hrotů mikroskopu.

Základní výchozí poloha je patrná z **obr. 7.6**. Nožík pečlivě přiložíme na bok měřeného závitu tak, aby těsně přiléhal po celé styčné délce. Při ustavování vykloníme hlavici s objektivem o úhel stoupání šroubovice a při zjištění nepatrného průsvitu polohu upravíme. Poté hlavici opět vyrovnáme. zaostření se při tomto způsobu měření neprovádí na bok závitu, ale na čelní plochu nožíku při použití horního osvitu, aby rysky byly jasně viditelné.

Nožíky se dodávají levé, pravé a s čelním břitem pro přesná měření např. hladkých průměrů.

Vlastní měření parametrů závitů se provádí stejnými postupy jako u metody stínového obrazu. Při pečlivém ustavení je tato metoda měření závitů velmi přesná.

Nejistota měření [3]:

středního průměru:

$$u = \pm \left(0,5 \frac{2}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{L}{67} \right) [\mu\text{m}]$$

kde:

L ... měřená délka [mm]

rozteče:

$$u = \pm \left(0,5 \frac{0,375}{\cos \alpha_1(\alpha_2)} + \frac{3P}{100} \right) [\mu\text{m}]$$

kde:

P ... rozteč závitu

α_1 (α_2) ... úhel levých (pravých) boků závitu



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste si rozšířili znalosti z měření (kontroly) vybraných parametrů vnějšího závitu bezdotykovou metodou s využitím měřicího mikroskopu. Metodiku měření máte možnost si prakticky ověřit na příkladě, vzorkem je závitový kalibr.



Kontrolní otázky

1. Jaké metody je možno použít při kontrole parametrů závitu s použitím měřicího mikroskopu?
2. Proč při kontrole středního průměru provádíme měření na obou bocích závitu?
3. Jakým způsobem vyliminujete případnou odchylku souososti závitu a osy středících důlků při měření vrcholového úhlu závitu?



Úlohy k řešení

7.2 Zadání úlohy č. 6

Proveďte kontrolu středního průměru, rozteče a velikosti vrcholového úhlu dílenského závitového kalibru pro kontrolu matic. K měření použijte dílenský mikroskop ZEISS. Měření proveďte metodou stínového obrazu.

Postup práce:

1. Seznamte se s měřicím přístrojem
2. Proveďte kontrolu a seřízení před vlastním měřením
3. Proveďte měření potřebných hodnot pro stanovení středního průměru závitu (opakujte 5x)
4. Proveďte měření potřebných hodnot pro stanovení rozteče závitu (opakujte 5x)
5. Proveďte měření potřebných hodnot pro stanovení vrcholového úhlu závitu (opakujte 5x)
6. Proveďte zpracování naměřených hodnot a výpočet jednotlivých parametrů závitu
7. Porovnejte získané hodnoty jednotlivých parametrů s tabulkovými
8. Proveďte zhodnocení úlohy

9. Ve vypracování nakreslete schémata měření
10. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
11. Zpracujte protokol z měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) dílenský mikroskop ZEISS
- b) závitový kalibr
- c) čisticí prostředky
- d) literatura

8 KONTROLA OZUBENÉHO KOLA

Ozubená kola patří mezi důležité dílce strojírenské výroby. Protože se v praxi využívá stále více rychloběžných a vysoce výkonných strojů, jsou kladeny na ozubená kola stále vyšší požadavky z hlediska účinnosti a tichého chodu.



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ realizovat komplexní kontrolu ozubených kol
- ✚ kontrolovat vybrané parametry ozubeného kola v rámci dílčí kontroly



Výklad

Požadavky kladené na ozubená kola jsou závislé na účelu a podmínkách použití ozubeného kola. Z pohledu správného, tichého a klidného záběru s přenosu kroutícího momentu musí spoluzabírající ozubená kola splňovat podmínky:

- přesnosti a správnosti tvaru zubů a kvalita povrchu zubů,
- přesnosti a správnosti tloušťky zubů, které musí být u všech zubů stejná (rázy),
- házení jak radiální tak axiální (vrtání náboje kola a střed roztečné kružnice musí být totožné).

Kvalita funkce ozubených kol je dána dodržením požadované kinematických vlastností a potřebného dotyku funkčních ploch zubů k přenosu zatížení. Z kinematických vlastností je oddělena plynulost chodu daná změnami pohybu soukolí při malých pootočeních. Musí být také určitá boční vůle mezi nepracovními boky zubu.

Nepřesnosti ozubení vznikají v průběhu výroby ozubení jako nepřesnosti nástroje a jeho ustavení, nepřesnosti stroje a upnutí obrobku na stroji. Nepřesnosti také závisí na způsobu výroby ozubení a na řadě technologických faktorů. Dle těchto hledisek jsou odchylky přesnosti ozubených kol a soukolí rozděleny do skupin:

- kinematická přesnost,
- plynulost chodu,
- dotyk zubů.

Jsou stanoveny komplexy kontrol v návaznosti na stav současné měřicí techniky.

Norma ČSN 01 4682 rozlišuje 12 stupňů přesnosti ozubených kol a soukolí (v pořadí snižování přesnosti 1, 2 až 12).

Poznámka:

Stupně přesnosti 1, 2 nejsou stanoveny tolerance a mezní úchytky, tyto stupně jsou určeny k perspektivnímu použití).

Pro každý stupeň přesnosti ozubených kol a soukolí jsou stanoveny předpisy kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotyku zubů ozubených kol v soukolí. Stupeň (třída) přesnosti je dán použitím soukolí a jeho obvodovou rychlostí. Dovolené úchytky se týkají rozměrů, geometrického tvaru zubů a vzájemné polohy prvků soukolí. Toleranci těchto prvků dosahujeme předepsanou vůli mezi zuby. Lícovací soustava je založena na jednotné vzdálenosti os soukolí V každém stupni přesnosti je stanoveno 6 skupin bočních vůlí ozubených kol v soukolí (A, B, C, D, E, H) a osm tolerancí T boční vůle (x, y, z, a, b, c, d, h). Boční vůle je určována dle tepelných poměrů soukolí za provozu. Přehled přesnosti a použití pro ozubená kola viz **tab. 8.1**.

Tab. 8.1 Přehled přesnosti a použití pro ozubená kola

stupeň přesn.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
použití	Kola kontrolní										
		Kola na obrábění kol									
		Kola pro převody leteckých motorů a turbín									
		Přesné přístroje a dělicí mechanismy									
			Obráběcí stroje								
			Osobní automobily								
				Nákladní automobily a kolejová vozidla							
					Traktory a zdvihačy						
							Hospodářské stroje				
								Převody podřadného druhu			

Výroba a kontrola ozubených kol je vzhledem k složitosti geometrického tvaru náročná z pohledu výrobního a kontrolního vybavení. Složitost kontroly vyplývá z nutnosti kontroly rozměrů, tvaru a vzájemného rozložení povrchů současně. Na hlavní ukazatele byly vypracovány komplexy kontrol, které se realizují podle stupně přesnosti. Způsob kontroly a volba metody je dán technologií výroby, požadavky na přesnost atd.

Kontrola ozubených kol se realizuje buď jako kontrola komplexní (souhrnná) při protáčení s kontrolním (etalonovým) kolem nebo jako kontrola dílčí, tj. zjišťování dílčích

odchylek jednotlivých parametrů ozubení. Pro ozubená kola používáme měřicí přístroje pro měření:

- profilu sklonu zubů,
- roztečí,
- jednobokým odvalem a dvoubokým odvalem,
- házení,
- tloušťky zubů,
- rozměry přes zuby,
- pásma doteku.

Kromě základních ukazatelů je přesnost ozubeného kola dána ještě pomocnými ukazateli – drsnost povrchu, hlukem, chvěním, a dynamickými jevy.

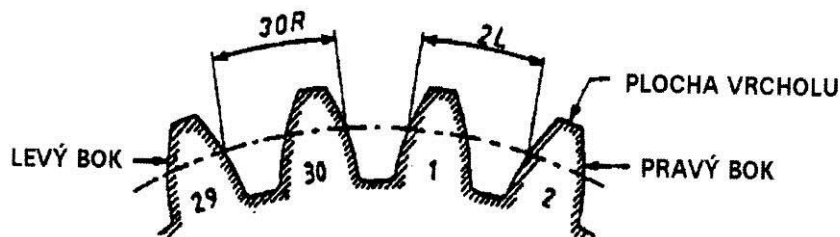
Úchylky ozubení jsou rozděleny na úchylky dílčích měření příslušné hodnoty, které jsou složeny z malého písmene „f“ s příslušným indexem a celkové „součtové“ nebo „úplné“ úchylky, které vznikají jako důsledek většího množství dílčích úchylek a jsou složeny z velkého písmene „F“ doplněného příslušným indexem. Pro úplnost je užitečné doplnit některé úchylky číslicí se znaménkem. Za kladnou úchylku pak považujeme takovou, jejíž rozměr je větší než jmenovitý, za zápornou pak takovou, jejíž skutečný rozměr je menší než jmenovitý.

Při kontrole ozubených kol není nutné a ani ekonomické měřit všechny parametry kola, tedy jednotlivé rozteče, součtové rozteče, profil, sklon zubu, kinematickou a radiální úchylku odvalu, radiální házení a další, protože řadou z těchto měřená jsou zjišťovány stejné vlastnosti ozubení. Je možné nahradit například měření kinematické úchylky měřením roztečí nebo měření dvoubokého odvalu měřením radiálního házení. Pro stanovení možného výběru měření jsou v ISO/TR 10064, část 3 uvedeny doporučené soubory zkoušek a soubory ukazatelů přesnosti.

Doporučuje se zvolit si na čelním kole jednu plochu jako referenční a označit ji číslem „I“. Druhá referenční plocha může být označena „II“. Při pohledu pozorovatele na referenční plochu, přičemž hlava zubu směřuje nahoru, je pravý bok na pravé a levý bok na levé straně zubu. Pravé a levé boky zubu čelního kola jsou označovány písmeny „R“ a „L“ – viz **obr. 8.1 a 8.2**.

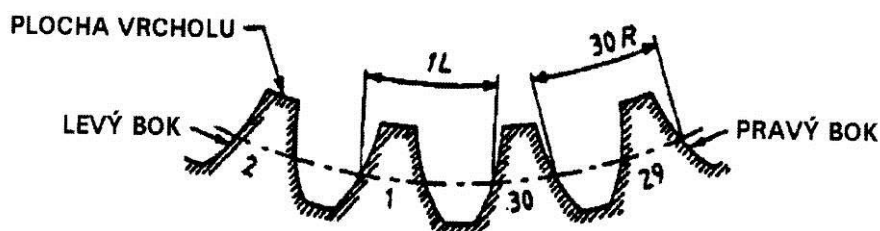
Bočním křivkám zubů čelních kol se šikmými zuby s vnějším nebo vnitřním ozubením je přiřazeno pravé nebo levé stoupání. Přiřazené stoupání je označováno „r“ a „l“. Stoupání je pravé (levé), pokud pozorovatel při pohledu na čelo kola může sledovat, s rostoucí vzdáleností od sebe, postupný průběh čelních profilů ve směru pohybu hodinových ručiček (proti směru pohybu hodinových ručiček).

Při pohledu na referenční plochu čelního kola jsou zuby postupně číslovány ve směru pohybu hodinových ručiček. Za číslem zubu následuje písmeno R nebo L, které označuje, zda jde o levý nebo pravý bok zubu. Příklad: „Bok 29 L“.



30R je rozteč číslo 30, pravý bok; 2L je rozteč číslo 2, levý bok

Obr. 8.1 Značení a číslování čelního kola s vnějším ozubením



1L je rozteč číslo 1, levý bok; 30R je rozteč číslo 30, pravý bok

Obr. 8.2 Značení a číslování čelního kola s vnitřním ozubením

Číslování jednotlivých roztečí je obdobné číslování zubů: rozteč označená „N“ leží mezi stejnohlými boky zubů s označením „N-1“ a „N“; písmenem „R“ nebo „L“ je určeno, zda rozteč leží mezi pravými nebo levými boky. Například: „Rozteč 2 L“ - viz **obr. 8.1**.

Znak „k“ v označení úchytky vyjadřuje, že úchytky je stanovena pro „k“ po sobě následujících roztečích. Například označení F_{p3} vyjadřuje, že součtová úchytky je stanovena pro tři rozteče; W_5 , když se měří míra přes 5 zubů.

Měření jsou běžně prováděna přibližně ve střední části výšky zubu a ve středu šířky ozubení. Pokud je šířka ozubení větší než 250 mm, doporučují se dvě doplňková měření profilu, každé přibližně ve vzdálenosti 15% od jedné a druhé referenční plochy ozubeného kola. Úchytky profilu a sklonu zubu se měří na třech nebo větším počtu rovnoměrně po obvodu rozložených stejnohlých bocích zubů.

8.1 Kontrola profilu a sklonu zubu ozubeného kola

Úchylky boků zubů ozubených kol jsou úchylky, které vznikají v čelním řezu uvnitř kontrolované oblasti mezi skutečnou a jmenovitou šroubovou evolventní plochou k základnímu válci při respektování zvolené korekce profilu, případně sklonu zubu.

V záznamech měření většiny přístrojů se objevují jmenovitá evolventa i sklon zubu jako přímky. Jednotlivé úchylky ($f_{H\alpha}$, f_{β} , atd.) se vztahují ke „střednímu profilu“, případně „střednímu sklonu zubu“. Tyto střední přímky nebo oblouky jsou určeny pomocí metody nejmenších čtverců, kdy obě plochy, obklopující tuto střední čáru, musí mít stejné velikosti.

8.1.1 Kontrola profilu

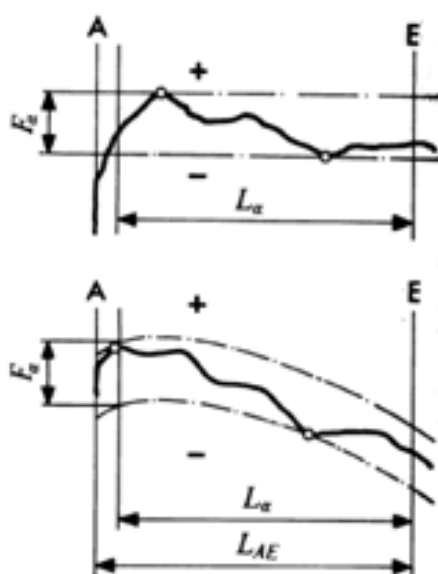
Na přesnosti tvaru profilové křivky zubu (evolventy) jsou závislé do určité míry výsledky kontroly ostatních parametrů ozubeného kola. Odchytky evolventy by se měly pohybovat v přípustných mezích, jinak nemá smysl kontrolovat např. základní rozteč.

Úchylky profilu ozubeného kola jsou úchylky, měřené uvnitř vyhodnocované oblasti L_{α} (rozsah hodnoceného profilu) kolmo k evolventě, tedy v rovině tečné k základnímu válci. Jsou vztaženy k čelnímu řezu. Jako minimální oblast měření je stanovena záběrová dráha kola s protikolem nebo s ozubeným hřebenem s výškou hlavy rovnou velikosti modulu (1.m).

Není-li uvedeno jinak, platí oblast vyhodnocování podle ISO 1328. Úsek vyhodnocení profilu L_{α} je roven aktivní délce profilu L_{AE} zkrácené o 8% a to u vrcholu zubu, nebo v bodu sražení hlavy zubu proto, aby z vyhodnocení bylo vyloučeno neúmyslné poškození v oblasti hlavy zubu, které vzniká v důsledku procesu výroby ozubení kola a které nezhoršuje jeho provozní vlastnosti. Při stanovení úchylky profilu (F_{α}) a úchylky tvaru profilu ($f_{f\alpha}$) musí být brán zřetel na přebytek materiálu, který zvětšuje velikost úchylky v úseku uvedených 8%. Pro úchylky vzniklé chybějícím materiálem v oblasti hlavy zubu jsou jejich stanovené mezní hodnoty zpravidla zvýšeny.

Úchylka profilu F_{α}

Celková úchylka profilu F_{α} (obr. 8.3) je kolmá vzdálenost mezi dvěma profily zubu, ohraničující aktivní část skutečného profilu zubu uvnitř vyhodnocovaného úseku L_{α} . U odchylek evolventy se jedná o souhrnnou odchylku profilu zubu.



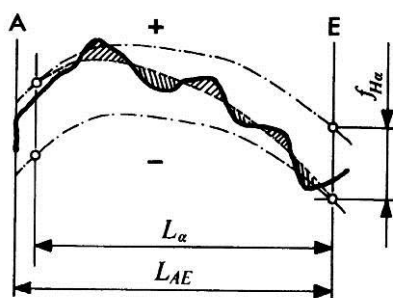
Obr. 8.3 Úchylka profilu F_{α}

Úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$

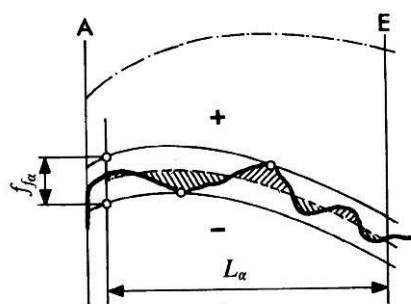
Dílčí **úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$** (obr. 8.4) je vzdálenost mezi dvěma profily, které protínají na začátku a na konci vyhodnocovaného úseku „stopu středního profilu“.

Úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$

Dílčí **úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$** (obr. 8.5) je vzdálenost mezi dvěma profily, zakreslenými pod stejným úhlem sklonu jako je střední profil, které se dotýkají skutečného profilu uvnitř vyhodnocované oblasti L_α .



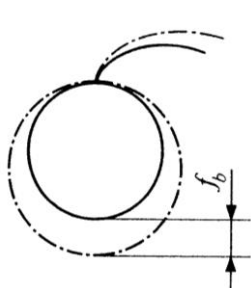
Obr. 8.4 Úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$



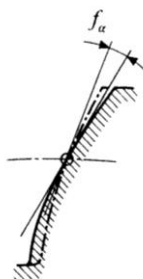
Obr. 8.5 Úchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$

Mezi další úchylky, které lze nalézt v souvislosti s profilem zubu ozubeného kola patří:

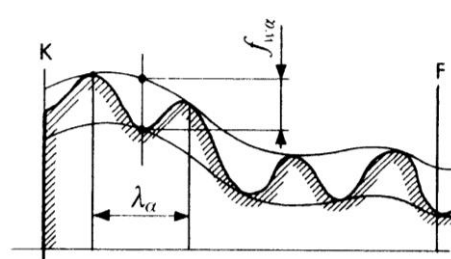
- **úchylka základního průměru f_b** – algebraický rozdíl mezi skutečným průměrem základní kružnice, který přísluší skutečnému profilu a jmenovitým průměrem základní kružnice d_b , který určuje požadovaný profil (obr. 8.6),
- **úhlová úchylka úhlu profilu f_α** – algebraický rozdíl mezi skutečným úhlem záběru odvozeným od skutečného profilu a jmenovitým úhlem záběru, jež je dán požadovaným profilem (obr. 8.7),
- **vlnitost profilu $f_{w\alpha}$** – je úchylka profilu, která se periodicky mění a opakuje s úhlem odvalu nebo s délkou odvalu (obr. 8.8). Je označována přes více vln svou výškou vlny $f_{w\alpha}$ na konstantní délce vlny λ_α . Diagram může obsahovat také více navzájem se překrývajících vlnitostí.



Obr. 8.6 Úchylka základního průměru f_b



Obr. 8.7 Úhlová úchylka úhlu profilu f_α

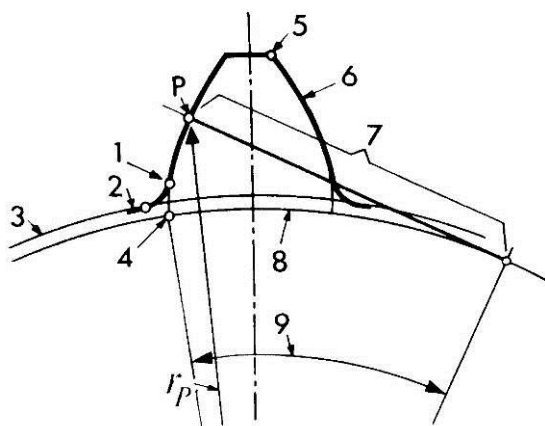


Obr. 8.8 Vlnitost profilu $f_{w\alpha}$

Diagram profilu zubu

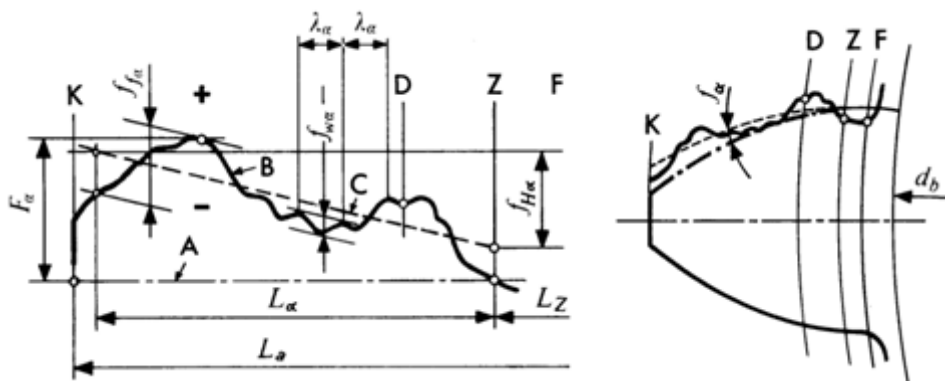
Jako profil zubu je označována čára profilu mezi body na hlavě a patě zubu v čelní rovině ozubeného kola. Libovolný bod profilu P je dán poloměrem r_p , délkou odvalu L_p a úhlem odvalu ζ_p – **obr. 8.9**.

- 1 bod na patě zubu
- 2 pata zubu
- 3 patní kružnice
- 4 výchozí bod evolventy
- 5 bod na hlavě zubu
- 6 profil zubu
- 7 délka odvalené přímky
- 8 základní kružnice
- 9 úhel odvalu ζ



Obr. 8.9 Profil zubu

Ve vyhodnocovacích záznamech většiny přístrojů se jmenovitá evolventa uvádí jako přímka a úchylky profilu jsou pak znázorňovány jako úchylky od této přímky. **Obr. 8.10** ukazuje jako příklad diagram profilu boku zubu, pro který je předepsán nekorigovaný profil evolventy A. Úchylky zobrazené v tomto diagramu představují normované úchylky profilu.



- | | |
|-----|--|
| K | hlava zubu |
| F | patní bod |
| A | jmenovitý profil |
| B | skutečný profil |
| C | střední čára profilu |
| D,Z | koncové body záběru
profilu s protikolem
nebo hřebenem |

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| L_α | vyhodnocovaný úsek profilu |
| F_α | celková úchylka profilu |
| $f_{H\alpha}$ | úchylka úhlu profilu |
| $f_{f\alpha}$ | úchylka tvaru profilu |
| f_α | úhlová úchylka úhlu profilu |
| $f_{w\alpha}$ | vlnitost profilu |
| λ_α | délka vlny profilu |

Obr. 8.10 Diagram profilu zubu čelního ozubeného kola

Jako oblast měření se volí zpravidla délka záběru při záběru kola s hřebenem s normovaným základním profilem (koncový bod Z). Tím je zajištěna možnost spárování kola s protikolem s libovolným počtem zubů pro zkoušku odvalem. Oblast měření profilu se nejčastěji popisuje délkou odvalu L_Z pro bod Z a délkou L_a pro hlavu zubu nebo odpovídajícími úhly odvalu ζ_Z , případně ζ_a .

Vyhodnocení diagramů profilu zubu

Grafické a početní stanovení jednotlivých úchylek vychází z jejich definovaného popisu v normě a jsou uvedeny v **obr. 8.10**. Metoda jejich stanovení zůstává stejná i pro korigované profily zubů, jmenovitý profil je u těchto případů zakřivenou, nebo lomenou čarou.

Pro stanovení úchylky úhlu profilu $f_{H\alpha}$ a úchylky tvaru profilu f_{α} je třeba vyjádřit „střední“ profil. Ten představuje u nekorigovaných profilů přímku (jmenovitý profil=čistá evolventa), u korigovaných profilů odpovídá „střednímu“ oblouku. Umístění středního oblouku se získává tak, že součet kvadrátů chyb z obou stran „výstřednice“ zůstává stejný a zároveň minimální. Moderní počítačem řízené přístroje dovolují zjistit polohu a stoupání střední čáry metodou nejmenších čtverců.

Algebraická znaménka $f_{H\alpha}$ a f_{α}

Jako jediné v **obr. 8.10** uvedené úchylky profilu mají $f_{H\alpha}$ a f_{α} (rozdílná) znaménka. O kladné úchylce úhlu profilu $f_{H\alpha} > 0$, resp. záporné úchylce tvaru profilu $f_{\alpha} < 0$, hovoříme tehdy, když střední čára profilu stoupá směrem k hlavě zubu, jak je naznačeno na **obr. 8.10**. Mohou nastat i opačné hodnoty těchto úchylek, především vlivem excentricity, vyvolané jinou polohou osy obráběcího stroje a obrobku.

Jsou-li kolo s protokolem v takovém stavu, že jejich úchylky úhlu profilu $f_{H\alpha}$ na stejné vyhodnocované délce zůstávají co do znaménka stejné, pak se tyto úchylky kompenzují navzájem a obě kola pak vykazují stejný úhel záběru a je možné přes existenci těchto úchylek realizovat bezchybný záběr. Toto platí jak pro vnější, tak pro vnitřní převody. Pro vyměnitelná kola je pochopitelně třeba usilovat o dodržení jmenovitých hodnot.

Úchylka základního průměru f_b

Tato úchylka přímo nevyplývá z diagramu profilu, ale je závislá na úchylce úhlu profilu $f_{H\alpha}$ a určí se z matematického vztahu:

$$f_b = f_{H\alpha} \cdot \frac{d_b}{L_{\alpha}}$$

U měřicích přístrojů s nastavitelnou základní kružnicí je možno zajistit skutečnou základní kružnici tak, že se nastavení r_b mění tak dlouho, až se směr oblouku diagramu (např. střední přímka) stotožní s jmenovitým směrem.

Úhlová úchylka úhlu profilu f_α

Tato úchylka není rovněž přímo měřitelná, ale dá se vypočítat rovněž z úchylky úhlu profilu $f_{H\alpha}$:

$$f_\alpha \approx -\frac{f_{H\alpha}}{L_\alpha \cdot \tan \alpha_t} \quad \text{v mrad}$$

$$f_\alpha (") = -\frac{206,26 \cdot f_{H\alpha}}{L_\alpha \cdot \tan \alpha_t} \quad \text{v úhlových sekundách,}$$

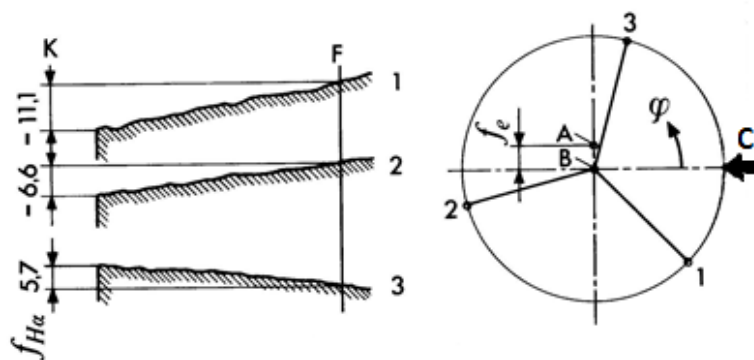
kde L_α je v mm a $f_{H\alpha}$ v μm .

Uvedené vztahy platí jako pro vnější, tak pro vnitřní ozubení: jestliže $f_{H\alpha} > 0$, pak $f_b > 0$ a $f_\alpha < 0$. Diagram profilu, který narůstá směrem k hlavě zubu, tak odpovídá příliš velkému průměru základní kružnice a příliš malému úhlu záběru.

Střední úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha m}$

Úchylky úhlů jednotlivých profilů, způsobené excentricitou v důsledku nepřesností výroby nebo měřicího zařízení, se na obvodu čelního ozubeného kola mění. Tato proměnnost se ve střední hodnotě úchylky úhlu profilu, vztažené na stejnohlé profily boků zubů, ruší.

Vliv excentricity na úhel profilu a stanovení střední úchylky úhlu profilu znázorňuje **obr. 8.11**.



$$f_{H\alpha m} = \frac{1}{3}(-11,1 - 6,6 + 5,7) = -4\mu\text{m}$$

- A osa otáčení obráběcího stroje vzhledem k ose ozubeného kola,
- B osa otáčení měřicího přístroje a ozubeného kola,
- C poloha nástroje nebo měřicího doteku na měření profilu boku zubu,
- 1,2,3 polohy profilů boků zubů, na kterých byly zjištěny jejich průběhy (při 45° , 165° , 285°) a těmto průběhům odpovídající diagramy

Obr. 8.11 Střední úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha m}$

Kvalita ozubení s ohledem na profil

Soustava tolerancí podle ISO, DIN i ČSN obsahuje 12 skupin. Třídy přesnosti s nižšími čísly jsou pro kontrolní kola a pro zvláštní účely. Jednotlivé třídy přesnosti jsou odstupňovány tak, že tolerance každé skupiny je φ -násobkem tolerance předchozí (pro úchytky profilu zubu je φ závislé na stupni přesnosti daného kola).

Mezní úchytky tvaru profilu je

$$f_{f\alpha} = 1,5 + 0,25(m_n + 9 \cdot \sqrt{m_n})$$

přičemž do stupně přesnosti 9 je $\varphi = 1,4$, od stupně přesnosti 9 pak $\varphi = 1,6$.

Mezní úchytky úhlu profilu se určí ze vztahu

$$f_{H\alpha} = 2,5 + 0,25(m_n + \sqrt{m_n})$$

a mezní úchytky profilu se stanoví z

$$F_{\alpha} = \sqrt{f_{H\alpha}^2 + f_{f\alpha}^2} \quad .$$

V obou případech platí totéž, $\varphi = 1,4$ do stupně přesnosti 9 a $\varphi = 1,6$ od stupně přesnosti 9.

Tab. 8.2 Mezní úchytky profilu – F_{α} v μm pro 4. - 8. stupeň přesnosti dle ČSN 01 4682 - Předpisy plynulosti chodu

SP	Normální modul m_n [mm]	Roztečný průměr d [mm]						
		do 125	přes 125 do 400	přes 400 do 800	přes 800 do 1600	přes 1600 do 2500	přes 2500 do 4000	přes 4000 do 6300
4	od 1 do 3,5	4,8	5,3	6,5	8,0	11	-	-
	od 3,5 do 6,3	5,3	6,0	7,0	9,0	11,5	15	-
	od 6,3 do 10	6,0	6,5	7,5	9,5	12	16	22
5	od 1 do 3,5	6	7	9	11	16	-	-
	od 3,5 do 6,3	7	8	10	13	17	22	-
	od 6,3 do 10	8	9	11	14	18	24	34
	od 10 do 16	-	11	13	15	20	25	36
6	od 1 do 3,5	8	9	12	17	24	-	-
	od 3,5 do 6,3	10	11	14	18	25	34	-
	od 6,3 do 10	12	13	16	20	28	36	53
	od 10 do 16	-	16	18	22	30	38	56
7	od 1 do 3,5	11	13	17	24	36	-	-
	od 3,5 do 6,3	14	16	20	28	38	53	-
	od 6,3 do 10	17	19	24	30	40	56	80
	od 10 do 16	-	22	26	34	45	60	85
	od 16 do 25	-	30	36	42	53	67	95
8	od 1 do 3,5	14	18	25	36	50	-	-
	od 3,5 do 6,3	20	22	28	40	56	80	-
	od 6,3 do 10	22	28	36	45	63	90	125
	od 10 do 16	-	32	40	50	71	90	130
	od 16 do 25	-	45	56	63	80	100	150

Tab. 8.3 Úchylky profilu – $f_{f\alpha}$, $f_{H\alpha}$ a F_α , v μm pro 1. - 12. stupeň přesnosti dle DIN 3962, část 1

SP	$f_{f\alpha}$ $f_{H\alpha}$ F_α	Modul [mm]							
		přes 1 do 2	přes 2 do 3,55	přes 3,55 do 6	přes 6 do 10	přes 10 do 16	přes 16 do 25	přes 25 do 40	přes 40 do 70
1		1	1,5	2	2,5	3	4	5	-
		1	1	1,5	2	2	3	4	-
		1,5	2	2,5	3	4	5	7	-
2		1,5	2	3	3,5	4,5	6	8	-
		1,5	1,5	2	2,5	3	4	5,5	-
		2	3	3,5	4	5,5	7	10	-
3		2	3	4	5	6	8	11	-
		2	2	3	3,5	4	5,5	8	-
		3	4	5	6	8	10	14	-
4		3	4	5	7	9	12	16	-
		3	3	4	5	6	8	10	-
		4	5	7	8	11	14	20	-
5		4,5	6	7	10	12	16	22	32
		4	4,5	5,5	7	8	11	14	22
		6	7	9	12	16	20	25	36
6		6	8	10	14	16	22	32	45
		5	6	7	9	12	16	20	28
		8	10	12	16	22	28	36	50
7		9	11	14	20	25	32	45	63
		7	9	10	12	16	22	28	40
		12	14	18	22	28	40	56	71
8		12	16	20	28	36	45	63	90
		10	12	14	18	22	28	40	56
		16	20	25	32	40	56	71	100
9		16	22	28	40	50	63	80	125
		14	18	20	25	32	40	56	80
		22	28	36	45	56	80	100	140
10		28	36	45	63	80	110	140	200
		22	28	32	40	50	71	50	125
		36	45	56	71	90	125	160	220
11		45	56	71	100	125	160	220	320
		36	45	50	63	80	110	140	200
		56	71	90	110	140	200	250	360
12		71	90	125	160	200	250	360	500
		56	71	80	100	125	180	220	320
		90	110	140	180	250	320	400	560

Přístroje pro kontrolu úchylek profilu zubu

Odchylku evolventy můžeme kontrolovat buď opticky nebo mechanicky, výjimečně u velkých kol na průsvit pomoci šablon.

Opticky se kontroluje tvar evolventy na profilprojektorech. Metoda se používá pro kontrolu evolventy u ozubení s modulem $m \leq 1$ mm, kde nelze použít dotykovou metodu z důvodu malého prostoru mezi zuby. Vlastní kontrola se provádí tak, že se sestrojí zvětšený obraz profilové křivky boku zubu na průsvitný papír, který slouží jako normál, s nímž srovnáváme zvětšený obraz boku zubu kontrolovaného kola. Rozdíl mezi normálem a promítnutým tvarem se odměřuje skleněným přesně rytým pravítkem, takže lze stanovit číselnou hodnotu odchylky a zároveň vizuálně sledovat průběh tvaru profilové křivky.

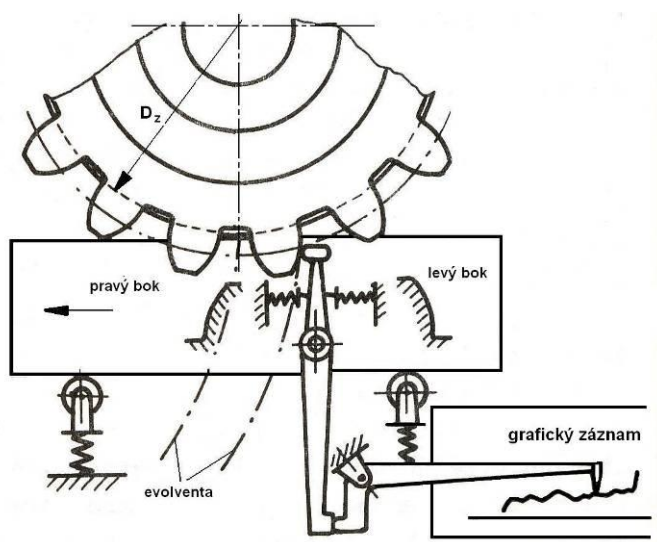
Tvar zubů ozubeného kola s větším modulem se kontroluje pomocí evolventoměru, který vytváří přesnou evolventu tím, že odvaluje pravítko po kotouči stejného průměru jako má základní kružnice kontrolovaného kola. Přístroj zapisuje odchylky kontrolovaného profilu ve zvětšení na milimetrový papír nebo lze odchylky odečítat na stupnici číselníkového úchylkoměru. Kontrola se provádí na různých místech kontrolovaného kola, u širokých kol i na různých místech zubu.

Dle konstrukce se vyrábějí dva základní typy evolventoměrů:

- s pevnou základní kružnicí,
- se stavitelnou základní kružnicí.

Evolventoměr s pevnou základní kružnicí

Tento evolventoměr (**obr. 8.12**) se s výhodou používá v sériové výrobě.

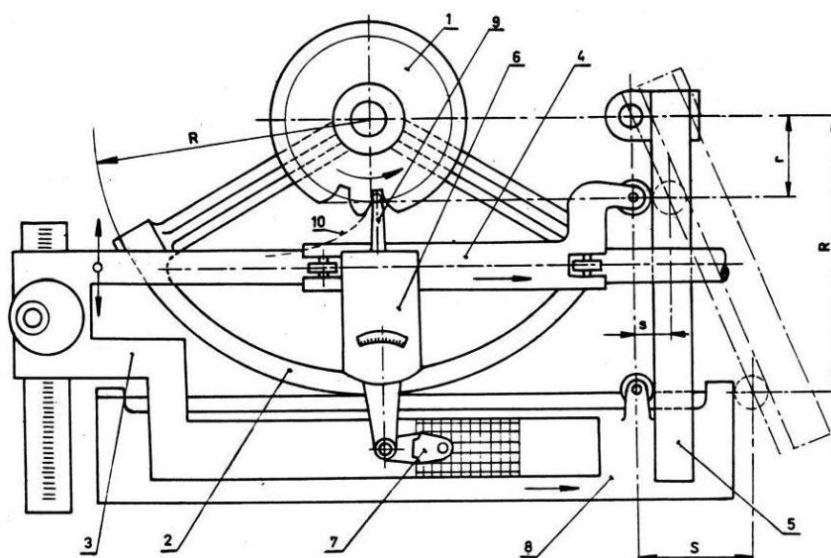


Obr. 8.12 Schéma evolventoměru s pevnou základní kružnicí

Přístroj má trn, na který se nasazuje kruhový kotouč o průměru základní kružnice kontrolovaného kola. Kruhový kotouč přiléhá k pravítku, které je spojeno se suportem pohybujícím se ve směru šipky. Na suportu je uchycena dvouramenná páka, jejíž jeden konec tvoří dotek a druhý konec je v záběru se zapisovacím mechanismem. Při posuvu suportu se kruhový kotouč odvaluje po pravítku a dotek páky přenáší z boku ozubeného kola všechny nerovnoměrnosti snímané evolventy ve zvětšení na pisátko. Je-li evolventa zubu správně provedena, je čára pisátka rovnoběžná se směrem pohybu suportu. Neodpovídá-li skutečná evolventa evolventě teoretické, grafický záznam má vlnitý charakter.

Evolventoměr se stavitelnou základní kružnicí

Základní kružnice je realizována kruhovým segmentem o poloměru $R=150\text{ mm}$, spojeným s kontrolovaným ozubeným kolem v jedné ose. Základní kružnice se nastavuje s použitím spirálového mikroskopu. Řídící mechanismus převádí otáčivý pohyb tangenciálního suportu. Tento suport nese měřicí dotyk, který se pohybuje po evolventní dráze a současně objíždí bok zubu na otáčejícím se ozubeném kole. Princip měření je podobný principu měření na evolventoměru s pevnou základní kružnicí. Odchylka evolventy je měřena tisícinovým číselníkovým úchylkoměrem a zaznamenává se na elektrickém zapisovacím zařízení. Schéma měřicího přístroje je na **obr. 8.13**.

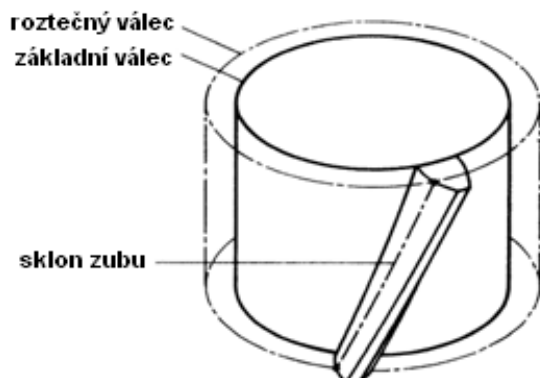


Obr. 8.13 Schéma evolventoměru ZEISS VG 450 se stavitelnou základní kružnicí

Správný, pro každý průměr základní kružnice požadovaný, poměr mezi podélným pohybem dotyku a otáčením měřeného kola je zabezpečován plynule nastavitelným pákovým nebo lineárně řízeným systémem

Princip plynule nastavitelné základní kružnice se hodí především ke zkoušení ozubených kol v malých dávkách, kdy se průměr základní kružnice často mění, tedy u provozů, kde se kontroluje velký počet různých ozubených kol.

8.1.2 Kontrola sklonu zubu

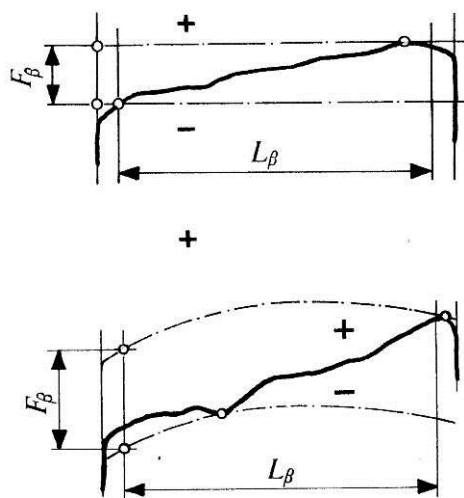


Sklon zubu je řez boku zubu sousým válcem, zpravidla roztečným válcem ozubeného kola – **obr. 8.14**. Podle definice jsou úchytky sklonu zubu měřeny ve směru tečen k základní kružnici v čelní rovině kola jako rozdíly mezi teoretickou a skutečnou boční křivkou zubu. Pokud jsou tyto úchytky měřeny na normále k ploše boku zubu, je nutné je dělit $\cos\beta_b$ z důvodu jejich převedení do čelní roviny, která je určující

Obr. 8.14 Sklon zubu ozubeného kola

Úchylka sklonu zubu F_β

Celková úchylka sklonu zubu F_β (**obr. 8.15**) je vzdálenost mezi dvěma jmenovitými sklony zubu, kterých se dotýká skutečný bok zubu uvnitř měřené oblasti L_β .



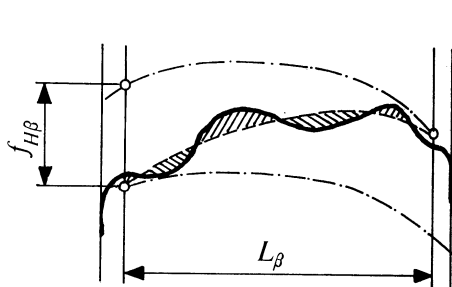
Obr. 8.15 Celková úchylka sklonu zubu F_β

Úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$

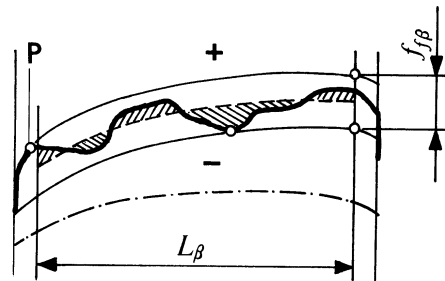
Úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$ (**obr. 8.16**) je vzdálenost mezi oběma jmenovitými sklony zubu, které na koncích vyhodnocované oblasti protíná „střední“ šroubovice se skutečným stoupáním.

Úchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$

Úchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ (obr. 8.17) je vzdálenost mezi dvěma sklony zubů, které jsou pod stejným úhlem jako „střední“ sklon zubu a které se na měřené délce L_β dotýkají skutečného boku zubu.



Obr. 8.16 Úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$



Obr. 8.17 Úchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$

Diagram sklonu zubu

Diagram sklonu zubu je záznamem skutečné boční křivky zubu. Rozdíly mezi touto boční křivkou zubu a vhodně umístěnou přímkou jsou úchylkami skutečného a nemodifikovaného sklonu boku zubu. Měření se provádí uvnitř vyhodnocovací oblasti L_β . Pokud není domluveno jinak, platí vyhodnocovací oblast podle ISO 1328. Je nutné mít na zřeteli, že někdy je délka boční křivky zubu, zobrazená v diagramu, zvětšeným zobrazením malé šířky ozubení, nebo zmenšeným zobrazením jeho šířky velké. Při zkrácené oblasti vyhodnocování, např. o $2 \times 0,05b$, je třeba dbát na to, aby byly respektovány i úchylky ležící mimo tuto oblast, pokud se jedná o úchylky ve směru strany bez materiálu. To platí jak pro stanovení odchylky F_β (obr. 8.15), tak pro $f_{f\beta}$ (obr. 8.17).

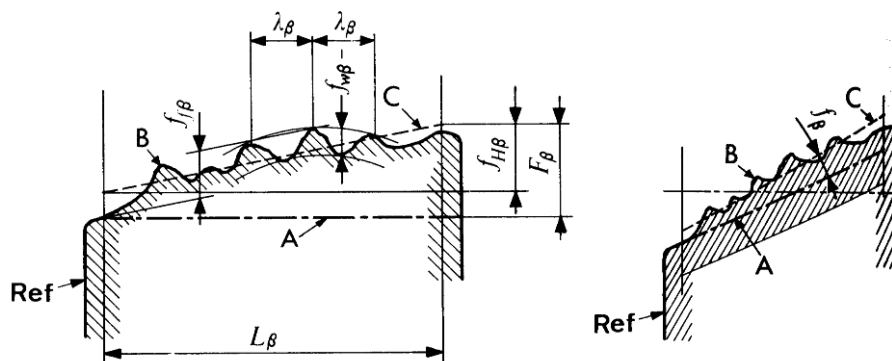
Měřená délka zubu L_β se rovná délce boční křivky zubu, zmenšené na každém konci o 5% délky boční křivky zubu, ne však více než o jeden modul (1.m). Toto zmenšení je z důvodu zabezpečení, pro případ neúmyslného odlehčení okraje zubu, způsobeného procesem obrábění, které by nemělo být zahrnuto do mezní hodnoty úchylky sklonu zubu. Pro určení úchylky sklonu zubu F_β a úchylky tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ musí být vzato do úvahy, že přebytek materiálu na koncích zubů v rozsahu 5% zvětšuje velikost příslušné úchylky. Pro úchylky způsobené úbytkem materiálu v těchto koncových úsecích je mezní hodnota úchylek zvětšena.

Kontrolní přístroje pro měření sklonu zubu jsou většinou koncipovány tak, že zobrazují nekorigovaný sklon zubu v diagramech jako přímkou. Zvolené korekce nebo úchylky sklonu zubu jsou zobrazeny jako úchylky od této přímky.

V obr. 8.18 je na typickém příkladu diagramu sklonu zubu znázorněna úchylka sklonu zubu, který není modifikován. Pokud je požadovaná boční křivka zubu vypuklá, sražená nebo jinak modifikovaná, bok zubu by měl být v souladu s touto modifikací. Pravidlo,

fungující pro jednotlivé úchytky zůstává stejné jako u požadovaného sklonu zubu nekorigovaného.

Zub s pravým nebo levým stoupáním (sklonem boční křivky) je označován písmeny „r“ nebo „l“, a to někdy jako symbol, jindy jako index.



Ref	referenční čelo	$f_{H\beta}$	úchylka úhlu sklonu zubu
A	návrhový sklon zubu	$f_{f\beta}$	úchylka tvaru sklonu zubu
B	skutečný sklon zubu	f_{β}	úhlová úchylka úhlu sklonu zubu
C	střední sklon zubu	$f_{w\beta}$	vlnitosti boku zubu
L_{β}	rozsah hodnoceného sklonu zubu	λ_{β}	délka vlny vlnitosti ve směru sklonu zubu
F_{β}	úchylka sklonu zubu		

Obr. 8.18 Diagram sklonu zubu

Vyhodnocení diagramů sklonu zubu

Pro stanovení stupně přesnosti čelního ozubeného kola je nezbytné měřit úchylku sklonu zubu kola F_{β} - viz ISO 1328, část 1, DIN 3962, část 2. Naproti tomu je v některých případech užitečné stanovit úchylku úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$ a úchylku tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$. Z toho důvodu je nutné zavést do diagramu průběhu sklonu zubu „střední tvar sklonu zubu“ dle **obr. 8.18**. Doporučené tabulkové hodnoty $f_{H\beta}$ a $f_{f\beta}$ jsou uvedeny dále (**tab. 8.4**).

Pokud jsou úchytky sklonů zubů měřeny na normálách k bokům zubů a měřidlem nebyly převedeny do čelní roviny, je možné hodnoty úchylek v čelní rovině získat dělením naměřených hodnot $\cos \beta_b$. Získané hodnoty mohou být porovnány se stanovenými hodnotami mezních úchylek, které se vztahují na úchytky naměřené na normále v čelním řezu.

Algebraická znaménka $f_{H\beta}$ a f_{β}

Úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$ a úhlová úchylka úhlu sklonu zubu f_{β} musí mít znaménko. Úchytky jsou považovány za kladné ($f_{H\beta} > 0$ a $f_{\beta} > 0$), pokud jsou úhly sklonů zubů větší a za záporné, pokud jsou úhly sklonu zubů menší než jmenovitý úhel sklonu zubu.

Úchytky sklonů zubů čelních kol s přímými zuby, které nejsou nulové, se označují indexy „r“ nebo „l“ místo algebraických značek. Označují úchytky podle toho, zda jde o sklon zubu přiřazený pravému, nebo levému boku zubu. Pokud jsou úchytky sklonu zubu $f_{H\beta}$ a f_{β} na

spoluzabírajících bocích zubů shodné jak svojí hodnotou, tak i znaménkem, vzájemně se kompenzují.

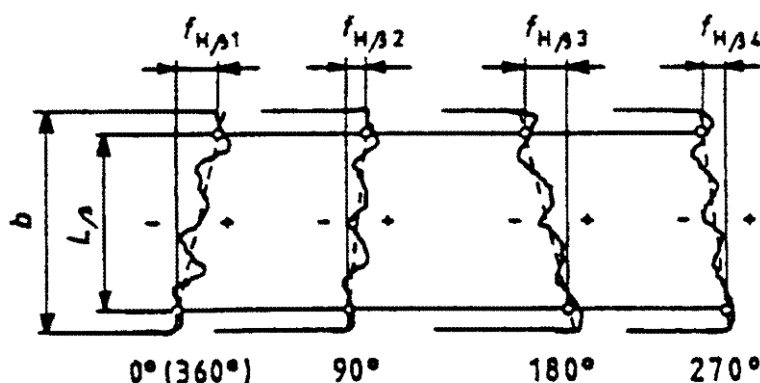
Střední úchylky úhlu sklonu zubu $f_{H\beta m}$ a střední úhlová úchylka úhlu sklonu zubu $f_{\beta m}$

Pokud došlo v průběhu výroby ozubení kola k nesouososti osy ozubeného kola a osy stroje, případně k jejich křížení, budou mít úchylky sklonu boku zubu proměnný charakter – viz **obr. 8.19**. I když se tyto úchylky nalézají v požadovaném rozsahu mezní hodnoty, je nutné jejich charakteru věnovat zvýšenou pozornost, nejen proto, že mohou být zdrojem vibrací čelního ozubeného kola v provozních podmínkách, ale i proto, že je možné tomuto charakteru úchylky zabránit.

Pro účely provedení korekce obráběcího stroje nebo přizpůsobení spoluzabírajícího čelního kola, je nezbytné stanovit průměrnou úchylku úhlu sklonu zubu výpočtem na základě výsledků měření provedených na třech nebo více zubech rovnoměrně rozložených po obvodu ozubeného kola.

$$f_{H\beta m} = \frac{1}{n} (f_{H\beta 1} + f_{H\beta 2} + \dots + f_{H\beta n})$$

Průměrnou hodnotu je možné získat ze záznamu sklonu dvou stejnohlých diametrálně proti sobě ležících boků zubů. Pokud jsou všechny úchylky sklonu zubu po obvodu proměnné, je vždy vhodné hodnotit záznamy nejméně ze tří rovnoměrně po obvodu rozložených zubů.



Obr. 8.19 *Průběh úhlu sklonu zubu na čtyřech rovnoměrně rozložených bocích zubů po obvodu ozubeného kola, jejichž charakter je způsoben excentricitou případně vrávoráním nástroje.*

Kvalita ozubení s ohledem na sklon zubu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1.3, soustava tolerancí podle ISO, DIN i ČSN obsahuje 12 skupin, přičemž nižší čísla představují kola kvalitnější. Jednotlivé třídy přesnosti jsou odstupňovány tak, že tolerance každé skupiny je φ -násobkem tolerance předchozí (pro úchylky sklonu zubu je φ závislé na stupni přesnosti daného kola). Jsou rovněž definovány hranice oblastí roztečných průměrů a modulů. Tolerance jsou vypočteny podle

vzorců, které v sobě zahrnují různé vlivy charakteristických parametrů ozubení, v tomto případě především vliv tloušťky zubu.

Celková úchylka sklonu zubu F_β je

$$F_\beta = 0,8 \cdot \sqrt{b} + 4 \quad ,$$

přičemž $\varphi = 1,25$ do třídy přesnost 6, $\varphi = 1,4$ pro třídy přesnost 6-8 a $\varphi = 1,6$ pro třídu přesnosti 8-12.

Úhlová úchylka sklonu zubu $f_{H\beta}$ bude

$$f_{H\beta} = 4,16 \cdot b^{0,14} \quad .$$

I zde je hodnota φ rozdílná. $\varphi = 1,32$ do stupně přesnost 6, $\varphi = 1,4$ pro stupně přesnosti 6-8 a konečně $\varphi = 1,55$ pro přesnost 8-12.

Tvarová úchylka sklonu zubu $f_{f\beta}$ se vypočítá z předchozích hodnot

$$f_{f\beta} = \sqrt{F_\beta^2 - f_{H\beta}^2} \quad .$$

Tab. 8.4 Úchylky sklonu zubu – F_β , $f_{H\beta}$ a $f_{f\beta}$ v μm dle DIN 3962, část 2

SP	F_β $f_{H\beta}$ $f_{f\beta}$	Šířka ozubení b [mm]				
		do 20	přes 20 do 400	přes 40 do 100	přes 100 do 160	nad 160
3		4,5	5	6	8	8
		3	3,5	4	4,5	4,5
		3	4	5	7	7
4		5,5	6	8	10	10
		4	4,5	5	6	6
		3,5	5	6	8	8
5		7	8	10	12	12
		6	6,5	7	8	8
		4,5	6	7	9	9
6		9	10	12	16	16
		8	9	10	11	11
		5,5	7	9	12	12
7		13	15	18	22	22
		11	13	14	16	16
		7	9	12	16	16
8		18	20	25	32	32
		16	18	20	22	22
		9	12	18	25	25
9		28	32	40	50	50
		25	28	28	32	32
		14	18	28	40	40
10		45	50	63	80	80
		36	40	45	50	50
		25	28	45	63	63
11		71	80	100	125	125
		56	63	71	80	80
		40	45	63	100	100
12		110	125	160	200	200
		90	100	110	125	125
		63	71	110	160	160

Tab. 8.5 Úchylka sklonu zubu F_β v μm pro 3. - 12. stupeň přesnosti dle ČSN 01 4682 - Předpisy dotyku zubů

SP	Normální modul m_n [mm]	Šířka ozubení b [mm]							
		do 40	přes 40 do 100	přes 100 do 160	přes 160 do 250	přes 250 do 400	přes 400 do 630	přes 630 do 1000	přes 1000 do 1250
3	od 1 do 10	4,5	6	8	10	11	14	16	20
4	od 1 do 10	5,5	8	10	12	14	18	22	25
5	od 1 do 16	7	10	12	16	18	22	25	30
6	od 1 do 16	9	12	16	20	25	28	32	40
7	od 1 do 25	11	16	20	25	28	32	40	50
8	od 1 do 40	18	25	32	40	45	56	-	-
9	od 1 do 55	28	40	50	63	71	90	-	-
10	od 1 do 55	45	63	80	100	112	140	-	-
11	od 1 do 55	71	100	125	160	180	224	-	-
12	od 1 do 55	112	160	200	250	280	355	-	-

Přístroje pro kontrolu úchylek sklonu zubu

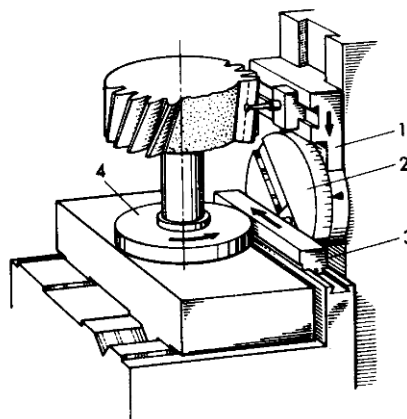
Pro kontrolu sklonu zubu se používají přístroje, u nichž je sklon zubu plynule nebo přerušovaně snímán měřicím dotykem. Většinou se používají kombinované kontrolní přístroje, které umožňují měřit při jednom upnutí vedle sklonu zubu také profil zubu.

Přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice

Princip přístroje je uveden na **obr. 8.20**. Spočívá v paralelním přesunu měřicích saní vůči ose kola. Na saních je umístěn měřicí dotyk a kotouč kulisy nastavený podle úhlu sklonu zubu na základní kružnici. Vedení kulisy přesouvá pohyb na posuv valivého pravítka. Toto pravítko uděluje měřenému kolu potřebný rotační pohyb přes valivý kotouč.

Popsaná varianta přístroje používá jednoho valivého kotouče pro určitou oblast průměrů základní kružnice a úhel vedení kulisy se nastaví tak, aby vznikl správný poměr mezi podélným a rotačním pohybem měřeného ozubeného kola.

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



Obr. 8.20 Princip přístroje na měření sklonu zubu s vodicí kulisou a vyměnitelným kotoučem základní kružnice

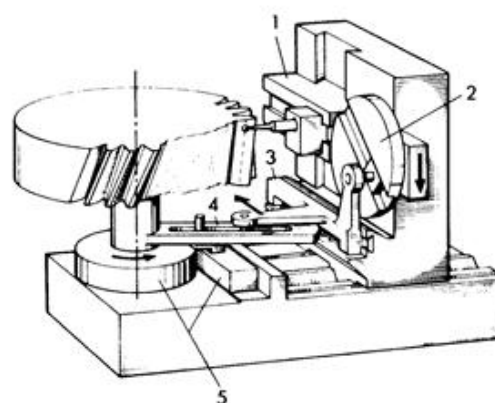
Přístroje s vyměnitelným základním kotoučem se používají především ve velkosériové výrobě. Jejich jednoduchý princip a robustní konstrukce je upřednostňují pro provozní nasazení.

Přístroje s nastavitelnou základní kružnicí

Tento typ přístrojů se od výše popsaného liší tím, že pevně zabudovaný valivý válec nahrazuje vyměnitelné kotouče a jejich posouvání, které je závislé na základní kružnici, je prováděno nastavitelným pákovým systémem. Polohováním příslušných saní na poloměr základní kružnice je nastaven poměr mezi podélným a otáčivým pohybem, stejně jako správná poloha měřicího dotyku.

Přístroje, pracující na tomto principu, se hodí především pro měření s často se měnící základní kružnicí.

- 1 měřící saně pro kontrolu sklonu zubu
- 2 vedení kulisy pod úhlem β_b
- 3 saně převodu
- 4 řídicí pravítka
- 5 valivý válec s pravítkem

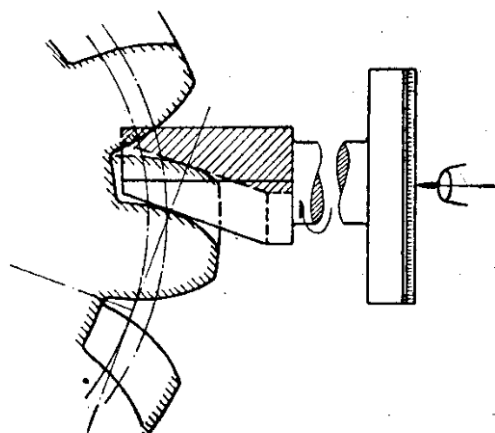


Obr. 8.21 Princip přístroje na měření sklonu zubu s vodící kulisou a nastavitelnou hodnotou základní kružnice

Měření na tvořící přímce tečné k základnímu válci

Měření se provádí s rovinnou měřicí plochou. Tato měřicí plocha se otáčí kolem osy kolmé k ose měřeného kola a je buď skloněna vzhledem k této ose o hodnotu úhlu záběru, nebo je s touto osou rovnoběžná. Kotouč se stupnicí s optickým odečítáním úhlů se volně otáčí kolem osy otáčení a nastaví se při dotyku s bokem zubu kontrolovaného kola na úhel šroubovice kola.

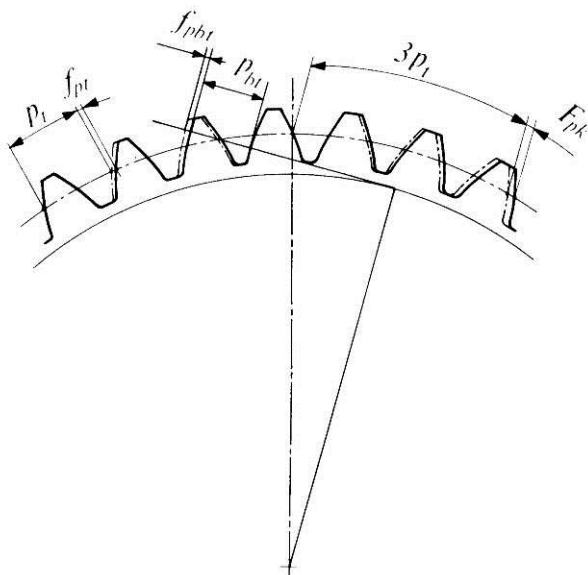
Souhlasí-li sklon měřicí plochy (klínu) s úhlem záběru α kontrolovaného kola, souhlasí úhel šroubovice, odečtený na přístroji, s úhlem skutečné šroubovice na roztečném válci kola.



Obr. 8.22 Kontrola úhlu šroubovice na tvořící přímce

8.2 Kontrola roztečí

Zjišťování úchylek roztečí zahrnuje určení skutečných (úhlových) hodnot úchylek nebo srovnatelných hodnot úchylek mezi stejnolehými boky zubů po obvodu čelního ozubeného kola. V protikladu k měření normálních, čelních a součtových úchylek roztečí jsou úchylky základních roztečí měřeny v tečných rovinách k základnímu válci, a proto jsou nezávislé na poloze osy čelního ozubeného kola.



f_{pt} = úchylka čelní rozteče

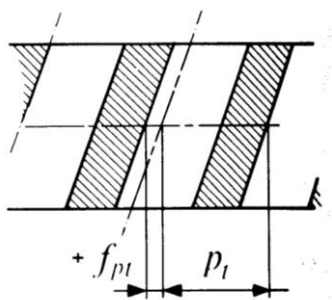
F_{pk} = součtová úchylka (k) roztečí kol

f_{pbt} = úchylka základní rozteče v čelním řezu

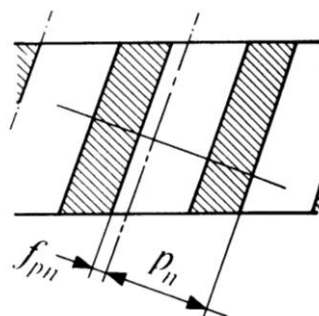
Obr. 8.23 Úchylky roztečí v čelní rovině ozubeného kola

8.2.1 Dílčí a součtové úchylky roztečí

Úchylka čelní rozteče f_{pt} (obr. 8.24) je rozdíl mezi skutečnou hodnotou jednotlivé čelní rozteče a požadovanou hodnotou p_t . Při použití měření pomocí tětiny se určuje úchylka čelní rozteče jako rozdíl mezi jednotlivou naměřenou hodnotou a aritmetickým průměrem všech naměřených hodnot.



Obr. 8.24 Úchylka čelní rozteče f_{pt}



Obr. 8.25 Úchylka normální rozteče f_{pn}

Úchylka normální rozteče f_{pn} (obr. 8.25) je rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou rozteče p_n v normální rovině. Určuje se rozdílem aritmetického průměru všech

naměřených hodnot od konkrétní dílčí naměřené hodnoty. Tato úchylka se často měří místo úchylky čelní rozteče f_{pt} , např. při použití ručních měřicích přístrojů.

Úchylka základní rozteče f_{pb} je algebraický rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou základní rozteče p_b . Základní rozteč zubů čelního kola je dána délkou úsečky na společné normále dvou stejnolehých čelních profilů boků zubů, která je omezena průsečíky těchto profilů a jejich společné normály. Zároveň je rovna délce oblouku na základní kružnici vymezenému začátky dvou stejnolehých sousedních evolvent – viz **obr. 8.23**. Doplněním odpovídajícího indexu se dále zdůrazní, zda se jedná o úchylku základní rozteče v normálním (f_{pbm}), nebo v čelním (f_{pbt}) řezu. Výsledek měření základní rozteče není ovlivněn případnou excentricitou ozubení.

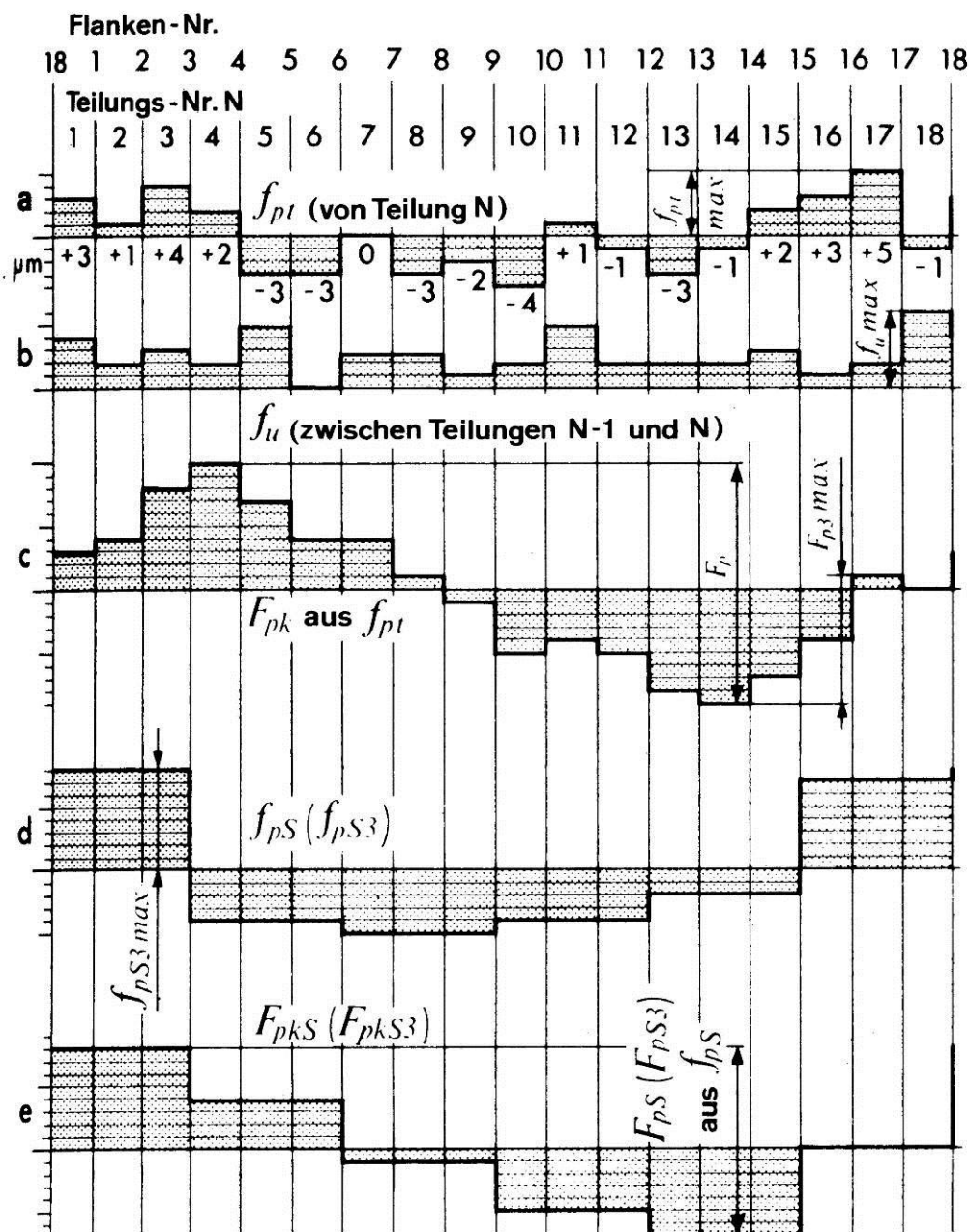
Střední úchylka základní rozteče f_{pbm} je algebraický rozdíl mezi střední hodnotou základní rozteče změřenou na pravém nebo levém boku a požadovanou hodnotou základní rozteče p_b . Slouží často také ke stanovení úhlové úchylky úhlu profilu a úchylky základního průměru, především tehdy, když se neprování měření profilu.

Chyba dvou sousedních roztečí f_u je absolutní hodnota rozdílu skutečných hodnot dvou za sebou následujících čelních roztečí na pravém nebo levém boku zubovém. Tato skoková chyba je rovněž rovna rozdílu úchylek čelních roztečí dvou následujících roztečí.

Součtová úchylka (k) roztečí kol F_{pk} je rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou součtu určitého počtu (k) po sobě následujících čelních roztečí. Je tedy rovna algebraickému součtu příslušných dílčích úchylek čelních roztečí f_{pt} . Pokud jsou součtové úchylky roztečí kola, měřené přes relativně malý počet čelních roztečí příliš velké, bude v podmínkách provozu ozubené soukolí generovat velké zrychlující síly. Platí to zejména pro vysokorychlostní převodovky se značným dynamickým zatížením. Proto je vhodné stanovit mezní součtovou úchylku roztečí kola pro malý počet čelních roztečí.

Součtová úchylka roztečí kola F_p je součtová úchylka roztečí stejnolehých boků zubů čelního ozubeného kola v jakémkoliv sektoru. Její velikost je rovna vzdálenosti mezi nejvyšším a nejnižším bodem na křivce součtové úchylky roztečí měřené ve vhodné poloze.

Úchylka čelního sektoru ozubení f_{ps} , součtová úchylka (k) sektorů kola F_{pks} , součtová úchylka sektorů kola F_{ps} – na velkých kolech se ke stanovení součtové úchylky z důvodu racionalizace a při použití tětiové metody také z hlediska přesnosti volí často měřicí krok přes rozpětí o několika roztečích. V **obr. 8.26 d** je zobrazen výsledek takového rozpěrového měření ve formě diagramu, **obr. 8.26 e** znázorňuje součtovou úchylku (k) sektorů F_{pks} součtovou úchylku sektorů kola F_{ps} . Protože jsou možné malé rozdíly mezi přesnými hodnotami F_{pk} a F_p , jsou označovány zkratky všech hodnot, zjištěných rozpěrovým měřením, dodatečným indexem (S).



- a** úchylka čelní rozteče f_{pt} , $f_{pt\max} = +5 \mu\text{m}$ na rozteči 17,
- b** chyba sousedních roztečí f_u , $f_{u\max} = 6 \mu\text{m}$ mezi roztečemi 17 a 18,
- c** součtová úchylka k rozteči kola F_{pk} , na obrázku fererenci bok zuby 18, $F_{pk\max}$ = součtová úchylka roztečí kola $F_p = 19 \mu\text{m}$ mezi bokem 4 a 14, $F_{p3\max} = 10 \mu\text{m}$ mezi boky 14 a 17,
- d** úchylka čelního sektoru f_{pS} měřena jednotlivě pře sektor $S = 3$ rozteče, $f_{pS3\max} = 8 \mu\text{m}$ mezi boky 3 a 15,
- e** součtová úchylka k sektorů F_{pkS} , v obrázku zjištěná do rozteče 18, odvozená z měření sektoru (d), součtová úchylka sektoru $F_{pS} = F_{pS3} = 15 \mu\text{m}$ mezi boky 3 a 15.

Obr. 8.26 Stanovení úchylek roztečí ve formě diagramu na příkladu kola s 18 zuby

8.2.2 Měření roztečí

Při měření roztečí se měří relativní poloha stejnolehých boků zubů po obvodu ozubeného kola. K rozdělení pravých a levých boků zubových se užívá indexů „R“, příp. „L“, vztažených k základní (referenční) čelní ploše. Rozlišujeme mezi měřením základní rozteče, které je nezávislé na poloze osy a na měření čelní, normální a součtové rozteče, která jsou vztažena k ose kola.

O použití určité metody rozhoduje účel měření a použitá výrobní metoda. V případě potřeby stanovení součtových úchylek nepřichází měření normální ani základní rozteče v úvahu. Nejčastěji je proto měřena úchylka čelní rozteče a z výsledků pak dle potřeby také úchylka sousedních roztečí a součtové úchylky rozteče. V **tab. 8.6** jsou na příkladu ozubeného kola s 18 zuby naměřené hodnoty v tabulkové formě a odpovídají obvyklému zobrazení ve tvaru diagramu na **obr. 8.26**.

Tab. 8.6 Úchylky roztečí v tabulkové formě pro diagram na obr. 3.4 v μm

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	25	23	26	24	19	19	22	19	20	18	23	21	19	21	24	25	27	21
B	22																	
C	+3	+1	+4	+2	-3	-3	0	-3	-2	-4	+1	-1	-3	-1	+2	+3	+5	-1
D	4	2	3	2	5	0	3	3	1	2	5	2	2	3	1	2	6	
E	+3	+4	+8	+10	+7	+4	+4	+1	-1	-5	-4	-5	-8	-9	-7	-4	+1	0

- N je číslo rozteče vztažené na pravé boky zubu,
- A komparátorem naměřená hodnota čelní rozteče (dvěma dotyky) bez definování její absolutní hodnoty,
- B aritmetický průměr všech hodnot A,
- C úchylky čelních roztečí f_{pt} stanovené jako rozdíl mezi jednotlivými naměřenými hodnotami a průměrnou hodnotou A,
- D chyba sousední rozteče f_u jako absolutní rozdíl mezi hodnotami A dvou po sobě následujících roztečí,
- E součtové úchylky roztečí kola jsou získány postupným připočítáváním hodnot f_{pt} (C), na obr. 3.4 se vztahuje na bok mezi roztečemi 18 a 1.

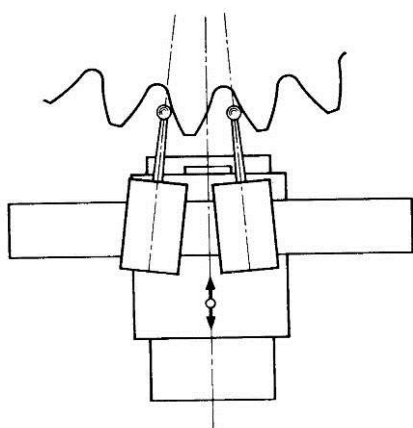
Měření čelní rozteče p_t

Čelní rozteč je délka na roztečné kružnici mezi dvěma po sobě jdoucími pravými nebo boky zubu. Úchylky čelní rozteče jsou určovány převážně tětíkovou (komparační) metodou se dvěma dotyky, nebo úhlovou (indexovou) metodou jedním dotykem. Obě metody budou dále popsány. Další možností je použít k měření souřadnicový měřicí stroj.

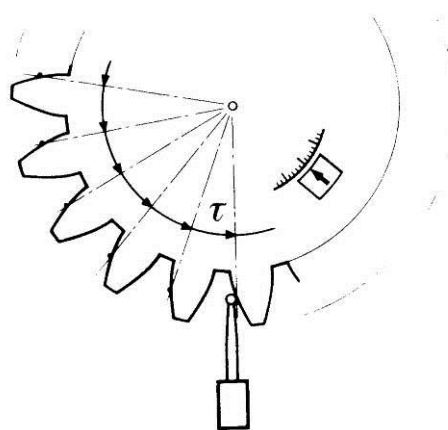
Tětivové měření roztečí komparátorem (dva dotyky)

Dva dotyky jsou umístěny v čelní rovině a ve stejné radiální vzdálenosti od osy ozubeného kola. Při postupném přestavování musí být spojnice jejich bodů dotyku tečnou měřicí kružnice. Při tomto měření se tedy neměří délka oblouku, ale délka tětivy mezi testovanými body. Protože je přesné nastavení hodnoty radiální vzdálenosti obtížné, nemá získaná hodnota délky tětivy samostatně žádný význam. Teprve srovnáním s ostatními naměřenými hodnotami získáme obraz o existující přesnosti rozteče. Rozdíl mezi naměřenou hodnotou příslušné rozteče a střední hodnotou ze všech měření na obvodu kola odpovídá dílčí úchylce čelní rozteče.

Některé komparátory určené k měření rozteče jsou vybaveny saněmi, pomocí kterých jsou zasouvány dotyky do konstantní radiální hloubky zubové mezery, přibližně do poloviny výšky zubu. Ozubené kolo se během měření pomalu přerušovaně otáčí kolem své osy a dotyky na saních se zasouvají do nebo vysouvají u měřicího místa – viz obr. 8.27.



Obr. 8.27 Měření čelní rozteče komparátorem



Obr. 8.28 Měření rozteče úhlovou indexovou metodou

Měření čelní rozteče úhlovou indexovou metodou (jedním dotykem)

Toto měření předpokládá použití úhlového dělicího přístroje, který musí zajistit požadovanou přesnost měření ozubeného kola.

Měřicí hlava s měřicím dotykem se pohybuje radiálně do a z příslušného měřicího místa, ve kterém je na každém boku zubu změřen rozdíl mezi skutečnou a teoretickou polohou dotyku. Každá naměřená hodnota tedy představuje polohovou úchylku odpovídajícího boku zubu. Ze záznamu naměřených hodnot lze stanovit součtovou úchylku roztečí kola.

Jednotlivé úchylky čelní rozteče f_{pt} jsou tedy stanoveny jako rozdíl mezi úchylkou boku zubu $N-1$ a úchylkou boku zubu N . Úchylky mohou nabývat i záporných hodnot. Měření rozteče úhlovou metodou přichází v úvahu jako alternativa k tětivovému měření hlavně u malých a středních ozubených kol.

Měření normální rozteče p_n

Normální rozteč je délka oblouku mezi po sobě následujícími pravými nebo levými boky zubů na roztečném válci v normálním řezu. Praktické měření využívá tětivu ležící mezi oběma dotkovými body.

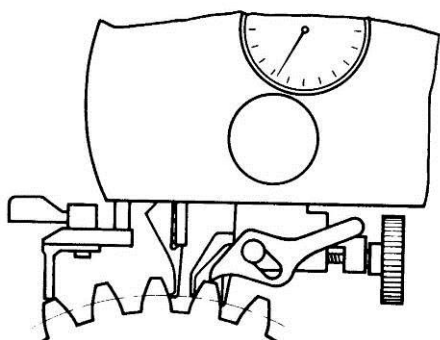
Měření úchylky normální rozteče je prováděno jako náhradní měření čelní rozteče za předpokladu, že není dostupné jiné měřidlo než přenosný komparátor vhodný na měření úchylky normální rozteče. Při použití měřidla podle **obr. 8.29** je k jeho polohování využit hlavový válec, který musí být dostatečně souosý s osou čelního kola.

Přístrojem pro měření normální rozteče mohou být měřeny pouze tyto normální rozteče, tedy nikoliv čelní rozteče. Na přímozubých kolech je čelní rozteč totožná s normálou.

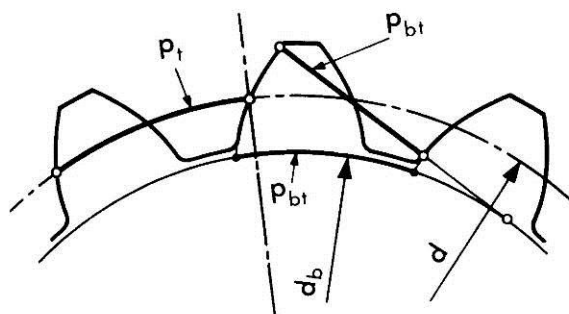
Protože se toleranční hodnoty, uváděné v normách (ISO 1328, část 1) vztahují k čelní rozteči, je třeba výsledky měření normální rozteče přepočítat do čelní roviny. K tomu slouží následující vztah:

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

Změřené hodnoty normální rozteče nesmí být použity pro stanovení součtové úchylky roztečí čelního ozubeného kola.



Obr. 8.29 Přenosný komparátor pro měření úchylky normální rozteče čelního kola



Obr. 8.30 Čelní rozteč p_t a základní rozteč v čelní rovině p_{bt}

Měření základní rozteče p_b

Základní rozteč zubů čelního kola je dána délkou úsečky na společné normále dvou stejnohlých čelních profilů boků zubů, která je omezená průsečíky těchto profilů a jejich společné normály – viz **obr. 8.30**. Zároveň je rovna délce oblouku na základní kružnici vymezenému začátky dvou stejnohlých sousedních evolvent.

Vztah mezi základní roztečí a normálou základní roztečí je dán následující rovnicí

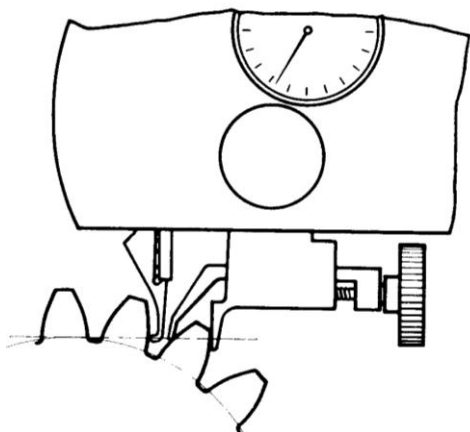
$$p_{bn} = p_{bt} \cos \beta_b.$$

Efektivní rozdělení zatížení na zuby spoluzabírajících čelních kol vyžaduje přiměřené měření jejich základních roztečí zejména pokud se jedná o výměnná čelní ozubená hodnoty základní rozteče jeho jednotlivých členů.

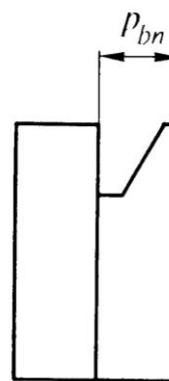
Teoretická hodnota normálné základní rozteče je funkcí normálního modulu a normálního úhlu záběru

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

Pro měření úchylek normálné základní rozteče se obvykle používá přenosný komparátor. Princip tohoto přístroje je znázorněn na **obr. 8.31**. Pomocí vhodného etalonu (**obr. 8.32**) může být komparátor kalibrován na měření základní rozteče na přímé měření úchylek od teoretické základní rozteče.



Obr. 8.31 Přenosný přístroj pro měření základní rozteče zubů čelního kola s přímými zuby



Obr. 8.32 Etalon pro měření základní rozteče

Pokud není na měření profilu k dispozici vhodné měřidlo, mohou být naměřené úchytky základní rozteče použity jako základna ke stanovení úhlové úchytky úhlu profilu f_α . Protože jsou naměřené úchytky základní rozteče ovlivněny úchytkami rozteče a úchytkami tvaru profilu, uvedený postup bude vhodný pouze pro případ, že jsou obě výše uvedené úchytky malé. Ve výpočtech pro odvození přibližné střední úhlové úchytky profilu $f_{\alpha m}$ případně střední úchytky základního průměru f_{dbm} nebo efektivního průměru základní kružnice $d_{b \text{ eff}}$ se používá střední úchytky základní rozteče f_{pbm} .

Při měření základní rozteče musí být zajištěno, aby se dotyky měřicího komparátoru nenalézaly v oblasti modifikovaného profilu nebo boční křivky zubu. Měření základní rozteče nemá být prováděno zásadně jako náhrada za měření čelní nebo normálné rozteče, pokud je ozubení vyráběno vícezubým nebo jednoduchým nástrojem. Tyto nástroje obrábí i boky zubů, které leží na záběrové přímce, což se projeví při hodnocení základní rozteče. Nezískáme správný obraz o skutečné přesnosti rozteče a naměřené hodnoty se většinou zobrazí jako normálné rozteče nástroje.

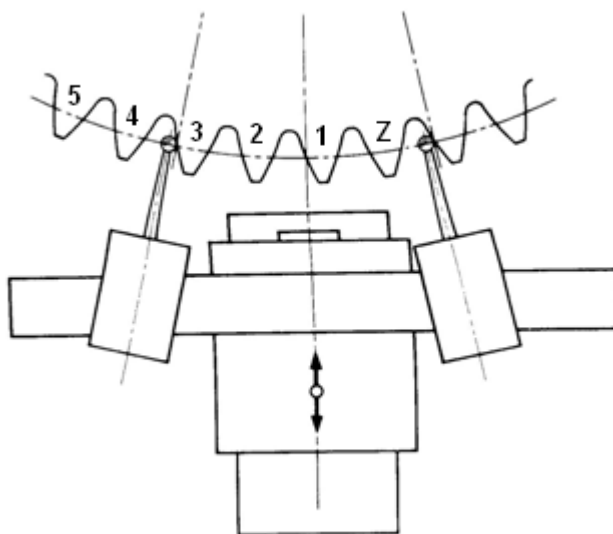
Měření základní rozteče je nezávislé na ose kola. Případní excentricita neovlivní rozečné nebo úchylek profilu zubu. Z výsledků měření základní rozteče nelze stanovit součtové úchylky roztečí.

Měření součtové úchylky roztečí kola na jednotlivých čelních sektorech

Pokud je na čelním ozubeném kole s větším počtem zubů uplatněna metoda měření rozteče pomocí komparátoru, kumulace naměřených nepřesností může mít za následek podstatnou nepřesnost hodnot získaných při sumarizaci. Jedním ze zdrojů nepřesnosti je skutečnost, že se měřicí dotyk zpravidla nedotýká boku zubu v bodu, ve kterém se dotýkal zubu pevný dotyk při měření předchozí rozteče.

Při měření sektorů je doporučováno, aby s ohledem na možné nebezpečí kumulace nepřesností bylo toto měření použito u čelních ozubených kol s počtem zubů větším než 60.

Obr. 8.33 znázorňuje princip měření úchylky čelního sektoru se 4 roztečemi označenými 1 až 4. Následující měřený čelní sektor bude obsahovat rozteč 5 až 8 za předpokladu, že měřicí dotyk, který je zobrazen vpravo, přijde do styku s bodem na boku zubu, který je označen 4 a který byl před tím v kontaktu s pevným dotykem, což je viditelné na levé straně v obrázku.

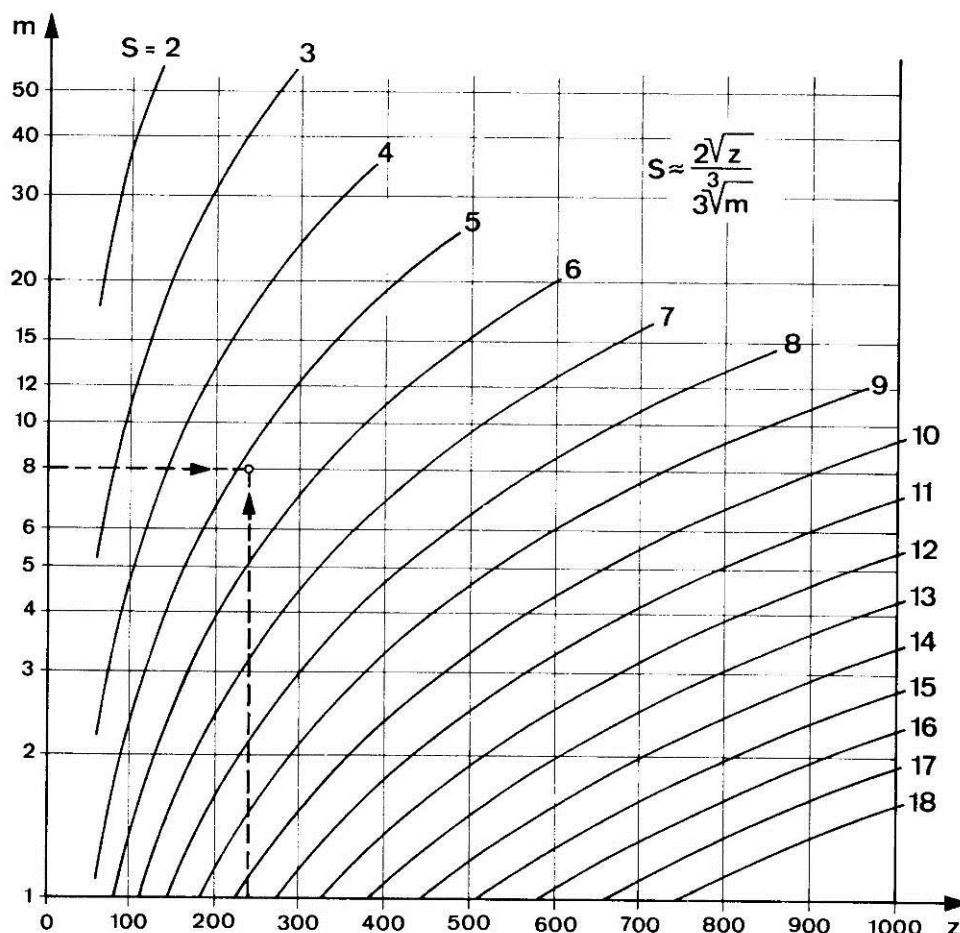


Obr. 8.33 Princip měření roztečí v čelních sektorech

Počet roztečí v čelních sektorech je třeba volit tak, aby délka tětiny čelního sektoru byla v souladu s možnostmi použitého komparátoru a počet získaných měření byl dostatečný na vyhodnocení křivky součtové úchylky sektorů kola. Pomůckou pro volbu vhodného počtu sektorů jsou vzorec a křivky na **obr. 8.33**.

Pokud je to možné, poměr z/S má být celé číslo. Jestliže tomu tak není, počet naměřených úchylek čelních sektorů má být nejbližší celému číslu vyššímu, než je z/S , přičemž poslední sektor bude obsahovat některé z roztečí, které se nalézají v sektoru prvním.

Je důležité mít na zřeteli, že křivka určující součtovou úchytku roztečí kola není zpravidla shodná s křivkou získanou algebraickou sumarizací úchylek v čelních sektorech. Je to způsobeno tím, že případná extrémní úchytky čelní rozteče, která leží v některém sektoru a která by jinak ovlivňovala součtovou úchytku roztečí kola, je kompenzována v některém z vnitřních sektorů.



Obr. 8.33 Pomůcka pro volbu počtu roztečí v sektoru (S) pro měření roztečí v sektorech

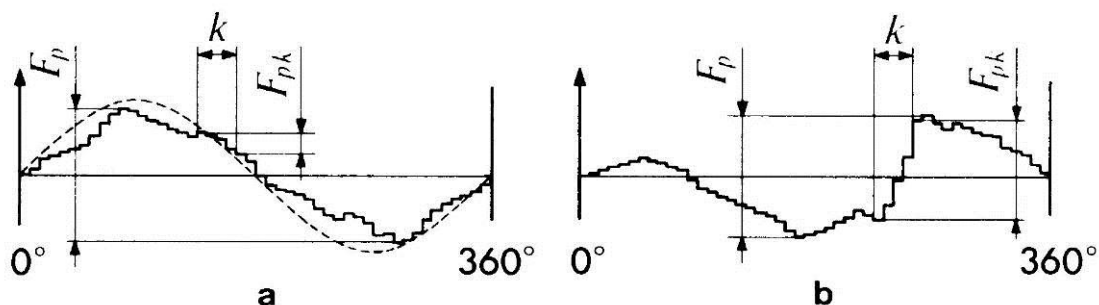
Indexy u F_{pS} a F_{pkS} , které jsou použity pro označení součtové úchytky roztečí na sektorech, je vhodné doplnit příslušným číselným označením. Tímto způsobem je možné stanovit příslušnou délku oblouku a nebo počet roztečí v příslušném sektoru. Například F_{p24S4} vyjadřuje součtovou úchytku roztečí kola na oblouku s 24 mi roztečemi při jeho rozdělení na sektory se 4mi roztečemi.

Význam součtové úchytky roztečí F_{pk}

Pokud jsou součtové úchytky roztečí kola, měřené přes relativně malý počet čelních roztečí, příliš velké, bude v podmínkách provozu ozubené soukolí generovat velké zrychlující síly. Platí to zejména pro vysokorychlostní převodovky, se značným dynamickým zatížením.

Proto je vhodné stanovit mezní součtovou úchylku roztečí kola pro malý počet čelních roztečí.

Obr. 8.34 znázorňuje diagram součtové úchylky roztečí pro dvě čelní ozubená kola. Diagramy součtových úchylek roztečí kol jsou si podobné, ovšem součtové úchylky roztečí přes sektory jsou značně rozdílné, což je zřejmé v sektoru „k“ v diagramech „a“ a „b“. S ohledem na mezní úchylku je úchylka F_{pk} na křivce „a“ v mezích, zatímco na křivce „b“ je nepřijatelná.



Obr. 8.34 Diagramy součtové úchylky roztečí kola

Součtová úchylka k roztečí kola F_{pk} může být odvozena z diagramu F_{pk} odečtením z jednotlivých boků při otočení ozubeného kola v délce oblouku ($k.p_i$). Ve skutečnosti největší hodnota může být nalezena na základě sledování malého počtu sektorů.

Pokud jsou vzaty v úvahu velikosti uvedené v obr. 3.4 jako příklad pro $k=3$, součtová úchylka 3 roztečí kola se rovná $10\text{ }\mu\text{m}$ a je prezentována součtem úchylek čelních roztečí s čísly 15, 16 a 17.

Vhodný postup při stanovení polohy jakékoliv hodnoty F_{pk} je pomocí závorkami označeného pořadí čísel roztečí. Výše uvedený příklad bude uveden následujícím způsobem: $F_{p3}(15.....17) = 10\text{ }\mu\text{m}$.

Poznámky k měření a vyhodnocení úchylek roztečí

Pro jednotlivá měření i srovnávací měření roztečí jsou zpravidla používány kulové dotyky. Při každém měření musí osa každého z nich ležet na radiální přímce, která směřuje do osy ozubeného kola.

Při všech měření úchylek roztečí, s výjimkou měření úchylky základní rozteče komparátorem, musí být úchylky radiálního a axiálního házení tělesa čelního ozubeného kola zanedbatelné ve srovnání s měřenými úchylkami. Pokud není osa měřeného ozubeného kola totožná s osou otáčení měřicího přístroje, je nutné mít na zřeteli, že průběh úchylek roztečí je zkreslen o hodnotu sinusové složky, jejíž dvojnásobek amplitudy se rovná dvojnásobku vzájemného posunutí výše uvedených os.

8.3 Kontrola ozubených kol odvalem

8.3.1 Kontrola jednobokým odvalem

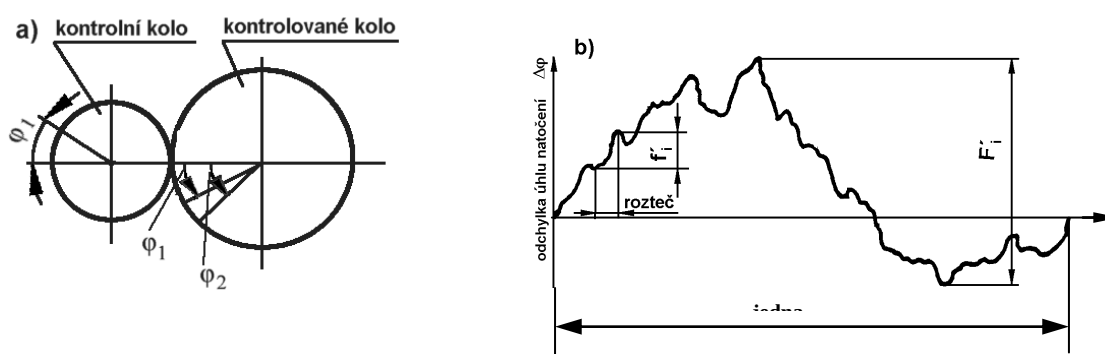
Metoda jednobokým odvalem je základní metodou kontroly kinematické přesnosti ozubení. Zkouší se kolo v záběru s párovým kolem nebo se používá jako měřicí element kontrolní kolo, hřeben nebo šnek.

Metoda je založena na určování rozdílu skutečných a jmenovitých úhlových poloh kontrolovaného ozubeného kola, které zabírá s měřicím elementem a je jím vedeno. Kinematická nepřesnost při komplexní kontrole jednobokým odvalem se určuje srovnáním otáček hnaných částí dvou systémů; jeden tvoří ozubený převod a druhý mechanismus přístroje, který musí zabezpečovat přesný převod se zadaným převodovým poměrem. Obě kola jsou v záběru při konstantní neměnné osové vzdálenosti a mají boční vůli. Podle směru otáčení se dotýkají buď jen pravé, nebo levé boky zubů. Podmínky při jednobokém odvalu se mají co nejvíce přibližovat provozním podmínkám. Získané výsledky dávají okamžitě zhodnocení kinematické přesnosti – určují nepřetržité změny chyb úhlových poloh kontrolovaného kola podle úhlu jeho pootočení.

Definice jednotlivých úchylek při jednobokém odvalu

Kinematická úchylka kola při jednobokém odvalu F_i' se při odvalu s kontrolním kolem udává jako rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší úchylkou zkoušeného tělesa, tedy rozdíl mezi efektivním, tedy skutečným a teoretickým posunutím profilu po obvodu (na roztečné kružnici) při jedné plné otáčce měřeného kola. Je rovna úplné amplitudě v zobrazeném diagramu v **obr. 8.35**.

Místní kinematická úchylka kola (s měřicím ozubeným kolem při jednobokém odvalu f_i' je rovna největší amplitudě vzniklé při odvalu s měřicím kolem během záběru uvnitř jedné rozteče, je tedy hodnotou kinematické úchylky při pootočení čelního ozubeného kola o jednu rozteč.



a – princip jednobokého odvalu, b – graf odchylky; φ_1 - úhel pootočení kontrolního kola, φ_2 - zaznamenaný úhel pootočení kontrolovaného kola, f_i' - odchylka při pootočení o 1 rozteč, F_i' - kinematická odchylka jednookého odvalu za 1 otáčku

Obr. 8.35 Jednoboký odval

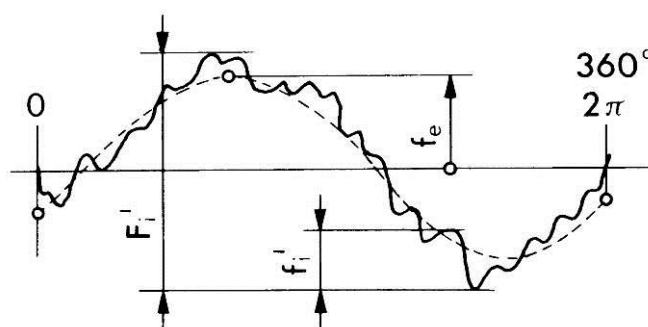
Měření jednobokého odvalu

Při jednobokém odvalu se po sobě odvalují dvě ozubená kola, zpravidla vyrobené a měřicí kolo, v předepsané osové vzdálenosti, tedy s určitou boční vůlí. Účinkem otáčivého momentu zůstávají ve stálém záběru pravé, nebo levé boky zubů. Odvalováním vyvolávají existující úchytky ozubení nepravidelný pohyb. Od počáteční polohy jsou měřeny úchytky polohy obrobku od jeho požadované hodnoty, dané momentální polohou měřicího kola a poměrem počtu zubů. Jednoboký odval není zpravidla udáván jako úhel, ale jako délka na roztečné kružnici, neboť takto jsou znázorňovány i tabulky tolerancí.

Přístroje pro jednoboký odval obsahují přípravek, který měří současné otáčení obou valících se kol a zjišťuje úchylku odvalu ze srovnání mezi skutečným přenášeným otočením a teoretickým otočením v závislosti na poměru počtu zubů obou spoluzabírajících kol. Pro stanovení relativního požadovaného otočení se používají plynule nastavitelné mechanické referenční převody, seismické systémy a systémy s opto-elektrickými čidly.

Použité měřicí kolo má být alespoň o tři stupně přesnější než kolo kontrolované. Při kontrole dvojice měřených kol (soukolí) jsou zjištěné úchytky (F' a f'), které zahrnují dvě měřená kola, a které jsou nazývány „úchytkami převodu ozubené dvojice“. Kompletní zjištění úplného spektra úchylek předpokládá, že počet otáček čelního ozubeného kola s větším počtem zubů je roven nejmenšímu společnému děliteli součinu počtu zubů (z_1 a z_2). Počet otáček stanovený tímto postupem odpovídá úplné záběrové periodě ozubené dvojice.

Obr. 8.35 ukazuje typický diagram jednobokého odvalu. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem diagramu odpovídá kinematické úchylce kola F_i' , pokud bereme jako oblast měření celý obvod kola, nebo místní kinematické úchylce kola f_i' , pokud za oblast měření bereme dráhu jedné rozteče nebo záběru jednoho zubu.



Obr. 8.35 Diagram z měření jednobokého odvalu

Jestliže průběh diagramu vykazuje přibližně tvar sinusoidy, pak lze na příslušném boku zubovém určit excentricitu f_e .

Kontrola ozubení jednobokým odvalem nahrazuje kontrolu součtových a dílčích úchylek roztečí. Úchylka F_i' odpovídá součtové úchylce roztečí kola F_p . U dalších úchylek je analýza diagramu jednobokého odvalu ke stanovení jednotlivých úchylek možná jen v omezené míře. Krátkovlnné, zub od zubu rovnoměrně vznikající úchytky, ukazují na pravidelné úhlové úchytky úhlu profilu a úchytky profilu a sklonu zubu.

Ze všech metod měření ozubených kol je metoda jednobokého odvalu nejbližší konkrétní provozní situaci. Přesto se tato metoda využívá jen zřídka. Je to především proto, že měření je nákladné a nedává žádné závěry o druhu a velikosti jednotlivých dílčích úchylek a z toho plynoucí možnost korekce na obráběcím stroji. Ale v určité oblasti převodů, kde je kladen důraz na nejvyšší rovnoměrnost přenosu pohybu, je metoda jednobokého odvalu velmi vhodnou kontrolní metodou.

8.3.2 Kontrola ozubených kol dvoubokým odvalem

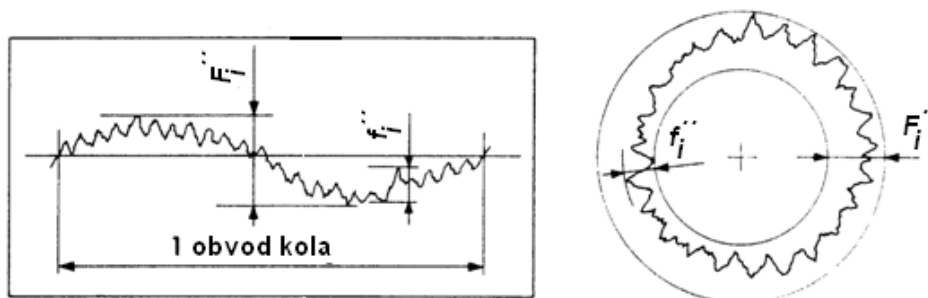
Metoda kontroly dvoubokým odvalem představuje jednoduchou a hospodárnou metodu kontroly ozubených kol. Při dvoubokém odvalu se po sobě navzájem odvalují dvě ozubená kola bez vůle. Aby bylo možno kola po sobě odvalit, musí mít stejný modul, úhel záběru a u šikmého ozubení i úhel sklonu zubu. Pro kontrolu mohou být použita buď obě vyráběná kola, nebo zpravidla vyráběné kolo a kolo kontrolní.

Během odvalu dochází při otáčení kola následkem různých úchylek ozubení k změnám osové vzdálenosti. Tyto změny jsou zaznamenány a podobně jako u jednobokého odvalu znázorňovány v kartézských nebo polárních souřadnicích – **obr. 8.36**.

Definice jednotlivých úchylek při dvoubokém odvalu

Kinematická úchylka kola F_i'' při dvoubokém odvalu (úchylka dvoubokého odvalu za otáčku) je vyjádřena největším rozdílem vzdáleností os kontrolního a měřeného kola během jedné otáčky. Vyjadřuje tedy rozdíl mezi největší a nejmenší osovou vzdáleností, které vznikají během odvalu bez vůle s kontrolním kolem, popřípadě se spoluzabírajícím kolem. Je tedy rovna celkové amplitudě, která se vyskytuje v diagramu uvnitř zkušební otáčky

Místní kinematická úchylka kola f_i'' při dvoubokém odvalu (úchylka dvoubokého odvalu za jednu rozteč) je vyjádřena změnou polohy pohyblivé osy. Je uvažována vždy jako největší rozdíl vzdáleností os připadajících na odval libovolného zubu téhož ozubeného kola. Je to tedy největší vznikající úchylka osové vzdálenosti při odvalu s kontrolním, popřípadě spoluzabírajícím kolem přes jednu zubovou rozteč nebo během trvání jednoho záběru zubu.

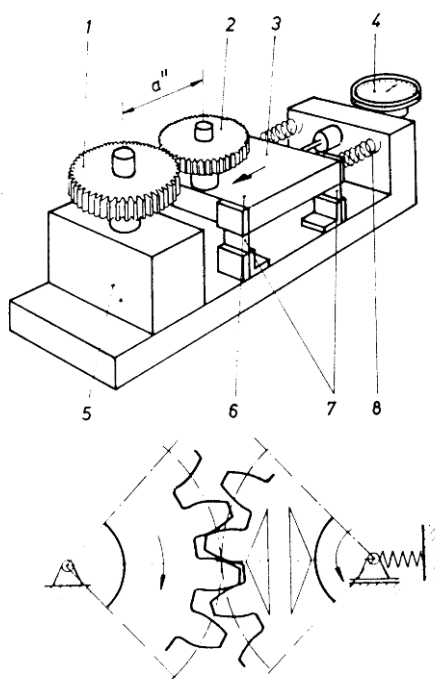


Obr. 8.36 Diagram kontroly dvoubokým odvalem

Kontrola úchylek při dvoubokém odvalu

Při kontrole ozubených kol dvoubokým odvalem jsou vždy nutná dvě spoluzabírající ozubená kola, která můžeme po sobě odvalit bez vůle – **obr. 8.37**. Jestliže se hlava zubu jednoho kola dotýká paty zubu kola druhého, je nutno použít kontrolního kola se zesílenými zuby.

Síla ve směru osové rozteče zajišťuje, aby levé a pravé boky zůstávaly stále současně v záběru. Kolísání osové vzdálenosti, ke kterému dochází během odvalování, představuje úchylku dvoubokého odvalu. Ke kontrole použité kontrolní kolo má být minimálně o tři třídy přesnosti lepší než kolo kontrolované.



- 1 kontrolované kolo
- 2 (měřicí) kontrolní kolo
- 3 měřicí saně
- 4 snímač měřených hodnot
- 5 pevný upínač
- 6 směr měření
- 7 pružné uložení
- 8 nastavení síly pro měření

Obr. 8.37 Princip kontroly ozubených kol dvoubokým odvalem

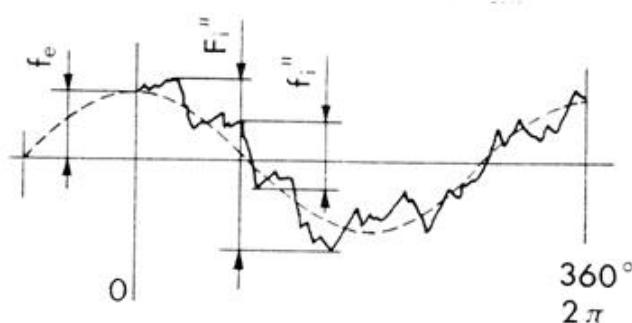
Informace získané z diagramu dvoubokého odvalu

V diagramu dvoubokého odvalu určuje rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem křivky úchylky dvoubokého odvalu F_i'' , pokud za oblast měření bereme celý obvod kola, případně úchylka odvalu zubu f_i'' , je-li za oblast měření považována dráha záběru zubu. Má-li křivka charakter sinusovky (s amplitudou f_e), můžeme určit existující excentricitu. Průběh křivky podle **obr. 8.38** můžeme znázornit jako o -90° posunutou sinusovku.

Kontrola ozubení dvoubokým odvalem je velmi jednoduchou a hospodárnou metodou a proto značně rozšířenou. Měřením úchylek dvoubokého odvalu je možné rychle odhalit, zda došlo při výrobě ozubení k nepřesnostem, například následkem silně opotřebeného nástroje, nepřesného upnutí obrobku, nepravidelnosti chodu nástroje.

Ostré úchyly odvalu zubu odkazují na úchyly záběrové rozteče (úchyly tvaru boku zubu). Z velkých dílčích úchylek odvalu zubu lze usuzovat na větší úchyly rozteče,

sinusový průběh křivky na excentricitu ozubení. Stejným uspořádáním měření lze kontrolovat vzdálenost os, potřebnou pro záběr bez vůle příslušného protikola, která je nepřímou metodou měření tloušťky zubu.



Obr. 8.38 Diagram dvoubokého odvalu

Velmi vhodná je kontrola dvoubokým odvalem u kol, která musí zabírat s minimální vůlí mezi boky zubů, neboť kontrola kolísání osové vzdálenosti je prakticky totožná s kontrolou kolísání boční vůle.

Jinak je ale vypovídací schopnost kontroly kol dvoubokým odvalem velmi omezená. Výsledek kontroly měření závisí mimo jiné i na vyložení kontrolního ozubeného kola. Velký vliv mají především trvání záběru a provozní úhel záběru spoluzabírajících členů soukolí. Protože se měřené hodnoty na pravém a levém boku zubu stále ovlivňují, mohou se dílčí úchytky na pravých a levých bocích zubů při kontrole měření dvoubokého odvalu navzájem zesilovat nebo zeslabovat, či dokonce kompenzovat, a to jak co do znaménka, tak co do polohy.

Většina metod pro obrábění ozubených kol vyrábí tvar boku zubu odvalem, tedy současným obráběním jak pravého, tak levého boku zubu uvnitř záběrového pole. Diagram dvoubokého odvalu tak zobrazuje především kolísání osové vzdálenosti, ke které dochází během obrábění. Chyby odvalovacího pohybu (kinematické chyby), které zapříčiňují jak úchytky profilu, tak rozteče a sklonu zubu, nejsou kontrolou zachyceny. Není z nich tedy možné odvodit žádné vazby na úchytky boku zubů, rozteče a součtové úchytky rozteče.

Výsledek kontroly měření s využitím dvoubokého odvalu by tedy obecně neměl být rozhodující pro stanovení celkového stupně přesnosti ozubeného kola, neboť bez dalšího není možné říci, že kola s malými úchytkami dvoubokého odvalu, navíc vztaženými jen na jeden bok zubu, tedy s ohledem na jejich funkci v převodu, byla dostatečně kvalitní. Viděno z tohoto pohledu není rozumné spojovat toleranční hodnoty úchytek dvoubokého odvalu s ostatními úchytkami ozubení.

Na druhé straně, pokud můžeme předpokládat dostatečnou přesnost valivého pohybu výrobního stroje a nástroje, je kontrola ozubení s využitím dvoubokého odvalu velmi výhodná, především pro kontrolu sériově vyráběných kol malých rozměrů.

Kvalita ozubení v případě dvoubokého odvalu

Jednotlivé třídy přesnosti jsou, podobně jako u mezních úchylek v předchozích kapitolách, odstupňovány tak, že tolerance každé skupiny je φ -násobkem tolerance předchozí (pro úchylky dvoubokého odvalu je $\varphi= 1,4$). Jsou rovněž definovány hranice oblastí roztečných průměrů a modulů. Tolerance jsou vypočteny podle vzorců, které v sobě zahrnují různé vlivy charakteristických parametrů ozubení (průměr roztečné kružnice, modul). Číselné hodnoty následujícího vztahu pro výpočet odchylky obvodového házení platí pro 5. stupeň přesnosti. Při výpočtu tolerancí z tohoto vztahu je třeba za m_n a d dosadit střední geometrické hodnoty oblastí, které jsou udávány v tabulkách.

Kinematická úchylka kola F_i'' při dvoubokém odvalu (úchylka dvoubokého odvalu za otáčku) bude:

$$F_i'' = 2 + 2,57 \cdot \sqrt{m_n} + (3,12 + 0,432 \log m_n) \cdot d^{1/4} ,$$

Místní kinematická úchylka kola f_i'' při dvoubokém odvalu (úchylka dvoubokého odvalu za rozteč) pak:

$$f_i'' = 1,8 \cdot \sqrt{m_n} + 1,6 \cdot d^{1/4} - 1 .$$

Úchylky dvoubokého odvalu patří do funkční skupiny, která má za úkol splňovat podmínky pro kinematickou přesnost (F_i''), případně plynulosti chodu (f_i''), tedy dle DIN rovnoměrnosti přenosu pohybu, tichého chodu a dynamické únosnosti. Vedle úchylek dvoubokého odvalu sem patří např. součtová úchylka roztečí kola, úchylka obvodového házení, úchylka profilu, úchylka čelní a základní rozteče. V praxi není nutné kontrolovat všechny veličiny patřící do jedné funkční skupiny, ale lze využít skutečnosti, že tyto veličiny spolu úzce souvisejí – viz dále.

Tab. 8.7 Předpisy kinematické přesnosti – F_i'' a plynulosti chodu f_i'' v μm pro 5. stupeň přesnosti dle ČSN 01 4682

F_i'' f_i''	Normální modul m_n [mm]	Roztečný průměr d [mm]						
		do 125	přes 125 do 400	přes 400 do 800	přes 800 do 1600	přes 1600 do 2500	přes 2500 do 4000	přes 4000 do 6300
F_i'' f_i''	od 1 do 3,5	22 10	32 11	40 13	45 14	- -	- -	- -
F_i'' f_i''	přes 3,5 do 6,3	25 13	36 14	45 14	50 16	- -	- -	- -
F_i'' f_i''	přes 6,3 do 10	28 14	40 16	50 16	56 18	- -	- -	- -
F_i'' f_i''	přes 10 do 16	- -	45 18	56 20	63 20	- -	- -	- -

Tab. 8.8 Tolerance pro jednotlivé odchylky F_i'' v μm pro 5. stupeň přesnosti dle DIN 3963 (výběr)

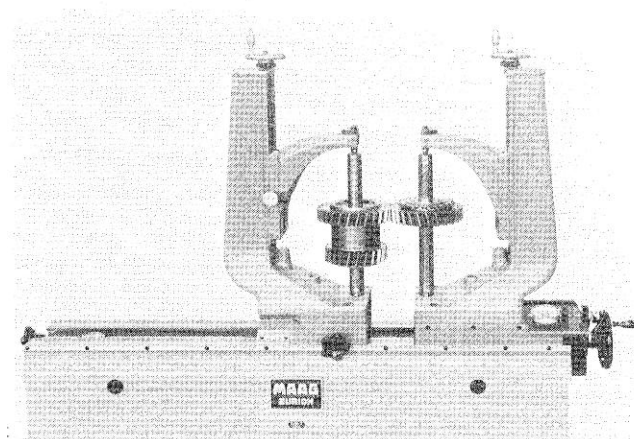
Normální modul m_n [mm]	Roztečný průměr d [mm]							
	přes 50 do 125	přes 125 do 280	přes 280 do 560	přes 560 do 1000	přes 1000 do 1600	přes 1600 do 2500	přes 2500 do 4000	přes 4000 do 6300
od 1 do 2	14	16	20	22	25	28	28	32
přes 2 do 3,5	16	18	20	22	25	28	32	36
přes 3,5 do 6	18	20	22	25	28	32	32	36
přes 6 do 10	20	22	25	28	32	32	36	40
přes 10 do 16	22	25	28	28	32	36	40	40
přes 16 do 25	25	28	28	32	36	40	40	45
přes 25 do 40	-	32	32	36	40	40	45	50
přes 40 do 70	-	36	36	40	45	45	50	56

Tab. 8.9 Tolerance pro jednotlivé odchylky f_i'' v μm pro 5. stupeň přesnosti dle DIN 3963 (výběr)

Normální modul m_n [mm]	Roztečný průměr d [mm]							
	přes 50 do 125	přes 125 do 280	přes 280 do 560	přes 560 do 1000	přes 1000 do 1600	přes 1600 do 2500	přes 2500 do 4000	přes 4000 do 6300
od 1 do 2	6	7	8	10	11	12	14	14
přes 2 do 3,5	7	8	9	10	11	12	14	16
přes 3,5 do 6	8	9	10	11	12	14	16	16
přes 6 do 10	9	10	11	12	14	14	16	18
přes 10 do 16	10	11	12	14	14	16	18	18
přes 16 do 25	12	12	14	16	16	18	20	20
přes 25 do 40	-	16	16	18	18	20	22	22
přes 40 do 70	-	18	20	20	22	22	25	25

Přístroje pro kontrolu úchylek při dvoubokém odvalu

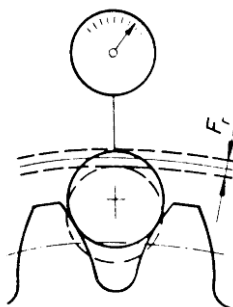
Při kontrole dvoubokým odvalem spolu zabírají bez vůle dvě ozubená kola, která jsou k sobě lehce přitlačována. Jedna osa kola je pohyblivě uložena, takže je možné pokaždé volně nastavit osovou vzdálenost. Diagram kontroly ukazuje změnu osové vzdálenosti během otočení kola. Jsou-li kola nastavena na provozní osovou vzdálenost, je možné měřit spárovou měrkou i boční vůli. Ukázka přístroje pro kontrolu na měření dvoubokým odvalem je na **obr. 8.39**.



Obr. 8.39 Typ přístroje na měření dvoubokého odvalu

8.4 Kontrola obvodového házení

Obvodové házení ozubení F_r (Mezní obvodové házení ozubení dle ČSN 01 4603) je největší naměřená radiální odchylka polohy měřicího doteku (kulička, váleček, klín), který je vkládán postupně do každé zubové mezery po obvodu kola. Příčinou obvodového házení je excentricita ozubení, házení osy ozubeného kola a rozdílné šířky zubových mezer v důsledku odchylek rozteče na pravých a levých bocích zubů. Někdy je obvodové házení nesprávně chápáno jako dvojnásobek excentricity f_e . To by bylo ale možné pouze tehdy, pokud by ozubení vedle excentricity nevykazovalo žádné další odchylky.



Obr. 8.40 Obvodové házení F_r

8.4.1 Princip měření

Obvodové házení ozubení F_r je největší naměřená radiální změna polohy měřicího elementu v libovolném čelním řezu. Tento element je postupně vkládán do všech zubových mezer měřeného kola, které se otáčí kolem své osy. Naměřená hodnota se tak rovná hloubce ponoru v rovině kolmé na osu kola.

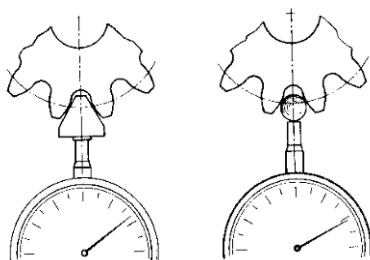
Jako dotkový element slouží zpravidla kulička, ve výjimečných případech váleček nebo měřicí klín. Jejich velikost se volí tak, aby dotkové body mezi ozubením a měřicím elementem ležely přibližně uprostřed výšky zubu. Průměr nejčastěji používaného kuličkového

dotyku je závislý na mnoha veličinách (z , m , α , β , x) a má pro vnější ozubení hodnoty okolo $2,2 \cdot m$ pro $z < 20$ a okolo $1,8 \cdot m$ pro $z > 20$. Pro vnitřní ozubení je třeba volit průměr kuličky asi o $0,5 \cdot m$ menší. Použitý průměr kuličky má být uveden v protokolu o měření.

Jednoduchost metody otevírá široké možnosti pro volbu měřicích přístrojů a stupně jejich automatizace. U nejjednoduššího měření, používaného pro malá kola, se vzorek otáčí ručně vždy o jednu rozteč. Měřicí element, který se vkládá radiálně do ozubení, fixuje polohu vzorku a snímač dráhy měří zároveň jeho hloubku ponoru.

Jestliže se pro otáčení a polohování použije dělicí přípravek, je třeba použít tangenciálních dotyků, které lze obecně použít i pro měření odchylek roztečí a boků zubů. Tento princip měření obvodového házení lze aplikovat také na víceosém měřicím stroji, který je vybaven otočným stolem.

Měření obvodového házení lze provést i na stále se otáčejícím vzorku. Měřicí element přiléhá k oběma bokům zubů a spolu s otáčejícím se ozubením vytváří určitou obloukovou dráhu. Naměřené hodnoty jsou zjišťovány v nejvyšším bodě oblouku, nebo v určité, stále stejné poloze na vzorku. Nejlépe se hodí tato metoda pro kontrolu velkých kol. Lze ji provést jak na měřicím stroji, tak na obráběcím stroji.

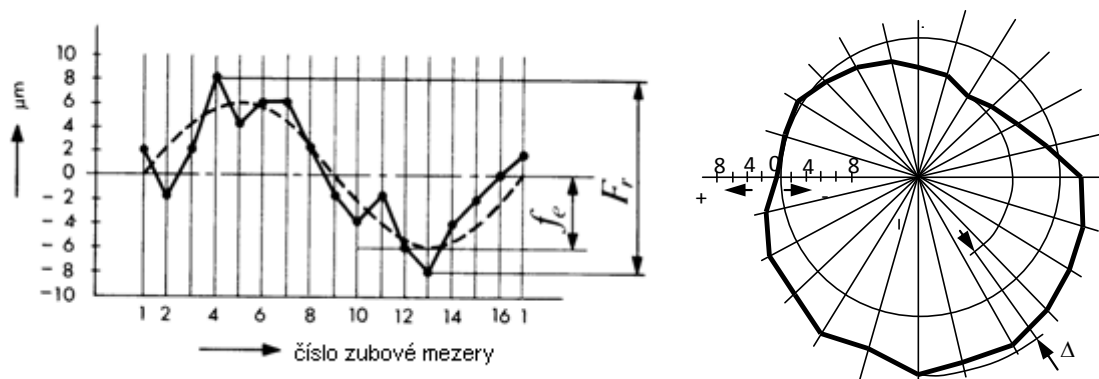


Obr. 8.41 *Princip kontroly obvodového házení ozubení*

8.4.2 Vyhodnocení výsledků měření

Obvodové házení ozubení F_r odpovídá rozdílu mezi nejvyšším a nejnižším bodem měření. Skládá se z dvojnásobné hodnoty excentricity f_e ozubení a z účinků odchylek rozteče a boků zubů.

Hodnoty lze vynést rovněž do paprskového diagramu a v něm vyznačit velikost obvodového házení ozubení F_r . Z průběhu křivky diagramu obvodového házení, která je znázorněna pro střed šířky zubu, může být vedle hodnoty F_r získána i další informace. Pokud se křivka diagramu podobá přibližně sinusovce, pak existuje mezi ozubením a osou kola v dané rovině excentricita f_e o velikosti amplitudy dané sinusovky.



Obr. 8.42 Diagramy obvodového házení pro ozubení se 16, resp. 24 zuby

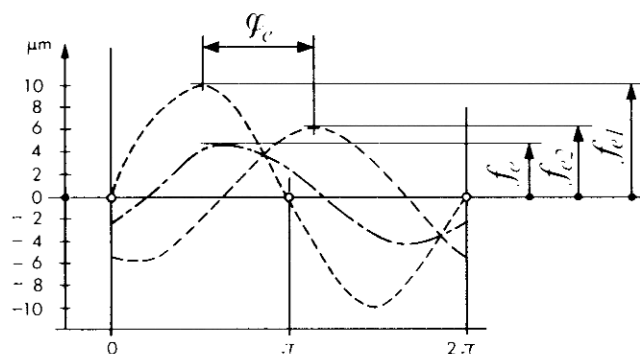
Jestliže se excentricity mění podél šířky zubu co do velikosti nebo fázového posunutí, pak ozubení vykazuje házení. Házení F_σ je úhlem zkřížení mezi osami ozubení a kola a dá se vypočítat z excentricity f_{e1} a f_{e2} ve dvou definovaných čelních rovinách:

$$\operatorname{tg} F_\sigma = \frac{1}{L} \sqrt{f_{e1}^2 + f_{e2}^2 - 2 f_{e1} \cdot f_{e2} \cdot \cos \varphi_e} \quad ,$$

kde L je vzdálenost mezi měřenými rovinami a φ_e je úhel mezi sinusovkami f_{e1} a f_{e2} .

Aritmetický průměr obou sinusovek f_{e1} a f_{e2} odpovídá sinusovce excentricity f_e ve střední čelní rovině

$$f_e = \frac{1}{2} \sqrt{f_{e1}^2 + f_{e2}^2 + 2 f_{e1} \cdot f_{e2} \cdot \cos \varphi_e} \quad .$$



Obr. 8.43 Excentricita na ozubení, které vykazuje házení

V praxi se házení F_σ na základě obvodového házení nebo z měření dvojitého odvalu určuje zřídka. Je to především proto, že měření sklonu zubu dává lepší přehled o tom, zda jsou na obvodu úchyly sklonu zubu (jako účinky házení) přítomny, nebo ne.

8.4.3 Kvalita ozubení z pohledu obvodového házení

Číselné hodnoty následujícího vztahu pro výpočet odchylky obvodového házení platí pro 5. stupeň přesnosti. Při výpočtu tolerancí z tohoto vztahu je třeba za m_n a d dosadit střední geometrické hodnoty oblastí, které jsou udávána v tabulkách.

$$F_r = 1,68 + 2,18 \cdot \sqrt{m_n} + (2,3 + 1,2 \log m_n) d^{\frac{1}{4}}.$$

Príslušné třídy přesnosti jsou odstupňovány tak, že tolerance každé skupiny je φ -násobkem tolerance předchozí (pro obvodové házení je $\varphi = 1,4$). Jsou rovněž definovány hranice oblastí roztečných průměrů a modulů.

Obvodové házení ozubení a jeho velikost F_r patří do funkční skupiny, která má za úkol splňovat podmínky stálosti přenosu pohybu. Někdy je tato skupina označována jako ukazatelé kinematické přesnosti. Vedle obvodového házení sem patří např. odchylky jedno- a dvoubokého odvalu a součtová odchylka rozteče. V praxi není nutné kontrolovat všechny veličiny patřící do jedné funkční skupiny, ale lze využít skutečnosti, že tyto veličiny spolu úzce souvisejí. Je tak možné nahradit např. kontrolu obvodového házení kontrolou dvoubokým odvalem.

Pro porovnání uvádím výběr z tolerančních tabulek pro stupeň přesnosti 5 a škálu modulů od 1 do 16 mm, resp. 70 mm a roztečných průměrů do 6300 mm dle ČSN 01 4682 a DIN 3962.

Tab. 8.10 Tolerance pro jednotlivé odchylky obvodového házení F_r v μm pro 5. stupeň přesnosti dle DIN 3962 (výběr)

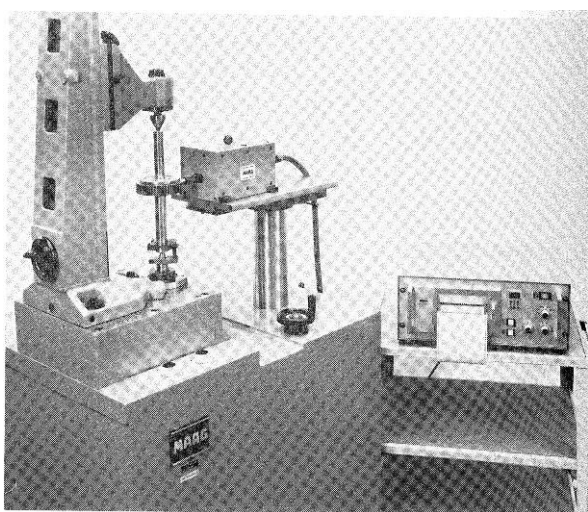
Normální modul m_n [mm]	Roztečný průměr d [mm]							
	přes 50 do 125	přes 125 do 280	přes 280 do 560	přes 560 do 1000	přes 1000 do 1600	přes 1600 do 2500	přes 2500 do 4000	přes 4000 do 6300
od 1 do 2	12	14	16	18	18	20	22	25
přes 2 do 3,5	14	16	18	20	22	25	25	28
přes 3,5 do 6	16	18	20	22	25	28	28	32
přes 6 do 10	18	20	22	25	28	32	32	36
přes 10 do 16	20	22	25	28	32	32	36	40
přes 16 do 25	-	25	28	32	36	36	40	45
přes 25 do 40	-	28	32	36	40	40	45	50
přes 40 do 70	-	32	36	40	45	45	50	56

Tab. 8.11 Předpisy kinematické přesnosti – F_r v μm pro 5. stupeň přesnosti dle ČSN 01 4682

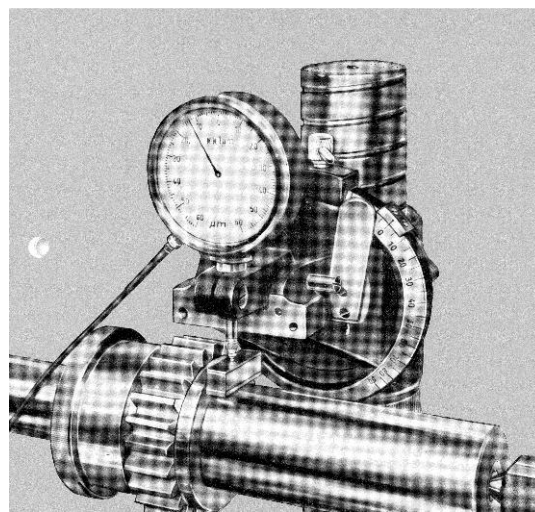
Normální modul	Roztečný průměr d [mm]						
		přes 125	přes 400	přes 800	přes 1600	přes 2500	přes 4000
	do 125	do 400	do 800	do 1600	do 2500	do 4000	do 6300
od 1 do 3,5	25	36	45	50	56	-	-
přes 3,5 do 6,3	28	40	50	56	63	73	-
přes 6,3 do 10	32	45	56	63	71	80	90
přes 10 do 16	-	50	63	71	80	90	100

8.4.4 Přístroje pro měření obvodového házení

Do této skupiny přístrojů mohou být zahrnuty všechny, které umožní realizovat zasunutí kuličky nebo jiného měřicího tělíska do každé zubové mezery kola. Jako příklad lze uvést přístroj ES-406, který se skládá ze snímací jednotky, která zasouvá dotyk do každé zubové mezery a měří hloubku zasunutí a ze zapisovacího zařízení, které zakresluje naměřené výsledky. Přístroj lze nastavit na každé kolem své osy otočné ozubené kolo a lze ho tak použít jak na obráběcím ozubárenském stroji, tak na stroji pro měření ozubení. **Obr. 8.44** ukazuje umístění přístroje na měřicím stole MT-41, který je opatřen říditelným pohonem pro otáčení.



Obr. 8.44 Přístroj na kontrolu obvodového házení ES-406 a měřicí stůl MT-41



Obr. 8.45 Přístroj na kontrolu obvodového házení s pohyblivou pinolou

Protože radiální házení ovlivňuje významně hlučnost soukolí, je měření obvodového házení velmi důležité. Měřené kolo se přitom upevňuje na vhodný otočný trn. Měřicí zařízení, případně úchylkoměr s našroubovaným dotykem opatřeným měřicím tělískem se umístí tak, aby kulička zapadala do zubové mezery měřeného vzorku. Pro první měření se ukazatel vynuluje a nastaví se tak jeho výchozí poloha. Poté se měří v jednotlivých mezerách po obvodu kola a stanoví se odchylka obvodového házení F_r .

U přístroje znázorněného na **obr. 8.45** je do měřicí hlavy umístěna pinola. Nese kuličkové měřicí tělísko, jehož průměr odpovídá modulu měřeného kola. Při otáčení kola do následného místa měření se měřicí dotyk vysouvá z ozubení zpětným vytažením pinoly měřicího dotyku a po otočení kola se opět zasouvá do další zubové mezery. Odečítání naměřených hodnot se provádí na úchylkoměru. Na tomto principu pracuje i přístroj firmy Carl Zeiss Jena v majetku katedry – viz **obr. 8.46**.

Na podobném principu pracuje i další přístroj na kontrolu obvodového házení na katedře pod označením AMY 0003 – viz **obr. 8.47**. Konkrétně se jedná o přístroj k měření obvodové házivosti ozubených kol s ozubením vnějším, vnitřními kuželovým, dále pak ke kontrole úhlu sklonu zubů šikmozubých kol a rovnoběžnosti boků zubů s osou čelních ozubených kol. Dále pak může přístroj sloužit k měření tloušťky zubů a s vhodným přídatným zařízeními hodnoty dvoubokého odvalu.



Obr. 8.46 Přístroj Carl Zeiss Jena pro měření radiálního házení



Obr. 8.47 Přístroj k měření ozubených kol AMY 0003

8.4.5 Aplikace kontroly obvodového házení

Kontrola obvodového házení nachází vhodné uplatnění především u ozubených kol převodovek, které musí pracovat s minimální boční vůlí. Do této skupiny patří kontrolní kola používaná pro měření dvojokého odvalu. Mimo to slouží při výrobě ozubení, především v sériové výrobě malých kol ke kontrole, zda je obrobek na stroji vystředěn a upnut bez házení. Aby bylo možné případné házení poznat, je třeba ho měřit ve dvou různých čelních rovinách vzdálených o hodnotu $0,1 \cdot b$ od konců zubů.

Vypovídací schopnost měření obvodového házení silně závisí na použité metodě obrábění a na znalostech charakteristiky stroje: dvě ozubená kola mohou mít z hlediska přenosu pohybu podstatné odchylky ozubení a mít tedy rozdílnou kvalitu, přestože obvodové házení vykazuje stejné hodnoty. Příčina spočívá v tom, že se záběr kola s protokolem uskutečňuje buď na levých nebo na pravých bocích zubů, naměřené hodnoty obvodového házení jsou ale ovlivněny vždy jedním levým a jedním pravým bokem zubu, které mohou spolu vykazovat vzájemně se kompenzující odchylky z hlediska házení. Obvodové házení je proto považováno za metodu pro posuzování kvality ozubení jen s omezenou použitelností.

8.5 Kontrola tloušťky zubů, průměru přes dvě kuličky a dotyku zubů

Kontrolou tloušťky zubu se zjišťujeme, zda bude při záběru zubu dodržena stanovená vůle na dané osové vzdálenosti. Nepoužívá se pro přesná měření, neboť je závislá na přesnosti hlavové kružnice.

Tloušťku zubu je možno kontrolovat:

- na oblouku roztečné kružnice (nedoporučuje se, neboť tato zjišťuje jen teoretickou chybu v tloušťce zubu, nikoliv polohu základního profilu, která je však rozhodující nejen pro výrobu, ale i z hlediska provozního.),
- tloušťku zubu s_k v konstantní výšce h_k .

V dalším bude popsána metoda tloušťky zubu s_k v konstantní výšce (hloubce) h_k dle ČSN 01 4678.

8.5.1 Kontrola tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k

Tloušťka zubu s_k se měří na konstantní výšce h_k od hlavové kružnice a odpovídá teoretické poloze základního profilu (schéma měření viz **obr. 6.1**). Konstantní výška a tloušťka zubů je závislá na základní rozteči, tj. je odvozena od základní kružnice a není tedy závislá na počtu zubů, ale jen na modulu, úhlu záběru a případném posunutí základního profilu. Nevýhodou měření je závislost měření na přesnosti průměru hlavové kružnice, tj. pokud není dodržen hlavový průměr, je nutno hodnotu h_k , na niž nastavujeme měřidlo, poopravit o polovinu rozdílu skutečné a jmenovité hodnoty hlavového průměru.

Jmenovitá hodnota tloušťky s_k (ozubení bez vůle) se učí dle vztahu:

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

Jmenovitá konstantní výška (pro jmenovitý průměr hlavové kružnice) se určí dle vztahu:

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

Pro korigovaná ozubení platí.

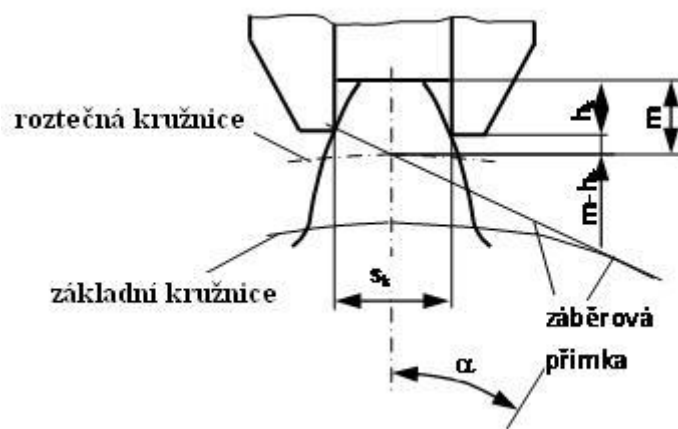
$$s_k(kor) = s_k \pm x \cdot m \cdot \sin 2\alpha,$$

$$h_k(kor) = h_k \pm x \cdot m \cdot \cos^2 \alpha,$$

kde: α ... úhel záběru (20° popř. 15°),

$x \cdot m$... hodnota posunutí základního profilu (znaménko + platí pro posunutí základního profilu od středu kola: +V kola; znaménko - platí pro posunutí základního profilu od středu kola: - V kola)

Velikost boční vůle se vyjadřuje dovolenými úchylkami ve směru normály k boku zubu. Dovolené odchylky tloušťky zubu se měří ve směru sečny a neurčují tedy přímo boční vůli. Pro vnější ozubení obě odchylky jsou záporné; pro vnitřní ozubení jsou obě odchylky kladné.



Obr. 8.48 Měření tloušťky zubu s_k konstantní výšce h_k

Jmenovité hodnoty konstantní tloušťky s_k platí pro ozubení bez vůle – výpis jmenovitých hodnot s_k a h_k viz **tab. 8.12**.

Tab. 8.12 Hodnoty tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k [mm] (ČSN 01 4678 –výpis)

modul	h_k	s_k	modul	h_k	s_k	modul	h_k	s_k
1,0	0,7476	1,38	3,5	2,6165	4,8347	7,0	5,2230	9,7093
1,25	0,9344	1,7338	3,75	2,8034	5,2017	7,5	5,6068	10,4029
1,5	1,1214	2,0806	4,0	2,9903	5,5482	8,0	5,9806	11,0964
1,75	1,3082	2,4273	4,25	3,1772	5,8950	9,0	6,7282	12,4834
2,0	1,4951	2,7741	4,5	3,3641	6,2417	10,0	7,4757	13,8705
2,25	1,6820	3,1209	4,75	3,5510	6,5885	11,0	8,2233	15,2575
2,5	1,8689	3,4677	5,0	3,7379	6,9353	12,0	8,9709	16,6446
2,75	2,0558	3,8144	5,5	4,1117	7,6283	13,0	9,7185	18,0316
3,0	2,2427	4,1612	6,0	4,4834	8,3223	14,0	10,4661	19,4187
3,25	2,4296	4,5079	6,5	4,8592	9,0158	15,0	11,2137	20,8057

K měření se používají zuboměry:

- mechanické,
- optické

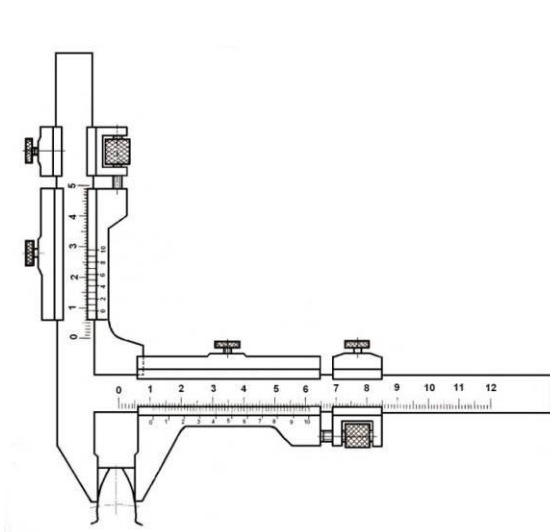
Mechanický zuboměr

- je to v podstatě dvojité posuvné měřítko (**obr. 8.49**),

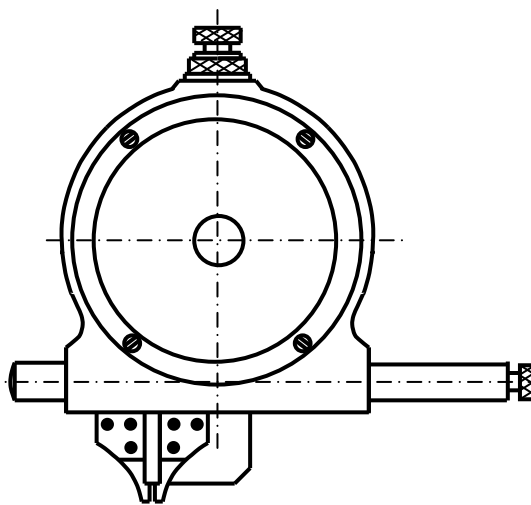
- na výškovém (svislém) měřítku se nastavuje konstantní výška h_k ,
- na vodorovném měřítku se odečítá hodnota tloušťky zubu s_k .

Optický zuboměr

- princip je stejný jako u mechanického zuboměru (**obr. 8.50**),
- nastaví se hodnota h_k , tj. výška a tloušťka s_k se odečítá lupou umístěnou v tělese měřidla,
- v zorném poli lupy je možno pomocí nitkového kříže a přestavitelných stupnic zjišťovat hodnoty s přesností 0,02 mm



Obr. 8.49 Mechanický zuboměr



Obr. 8.50 Optický zuboměr ZEISS

Měření tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k je možno realizovat na:

- ozubených kolech čelních s přímými, šikmými i šípovými zuby (u kol se šikmými zuby se měří v normálním řezu kolmém na sklon zubů na roztečném válci),
- kuželových kolech s přímými zuby s evolventním ozubením.

Výhody měření jsou:

- jednoduché měřidlo,
- lze měřit přímo na stroji při výrobě ozubení,
- konstantní tloušťka zubu s_k je nezávislá na počtu zubů kontrolovaného kola,
- posunutí základního profilu lze přímo odečíst tangenciálním zuboměrem.

Nevýhoda měření:

- závislost měření na přesnosti průměru hlavové kružnice (je výchozí základnou pro měření).

Postup při kontrole tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k pro nekorigovaná kola

1. Dle výrobního výkresu se určí: modul m , počet zubů z , úhel záběru α , stupeň přesnosti, skupina vůlí.

2. Vypočte se jmenovitý průměr hlavové kružnice D_{aj} :

pro přímé ozubení
$$D_{aj} = m(z + 2) \text{ [mm]}$$

pro šikmé ozubení:
$$D_{aj} = m \left(\frac{z}{\cos \beta} + 2 \right) \text{ [mm]}$$

3. Změří se skutečný průměr hlavové kružnice D_{as} a stanoví se odchylka ΔD_a :

$$\Delta D_a = D_{aj} - D_{as} \text{ [mm]}$$

4. Z tabulky v ČSN 01 4678 (výpis **tab. 8.12**) se zjistí jmenovité hodnoty s_k a h_k pro zadaný modul a úhel záběru α .

5. Dle ČSN 01 4682 se stanoví horní úchylka tloušťky zubu Δs_{kH} a tolerance konstantní tloušťky δs_k v závislosti na modulu m , průměru roztečné kružnice D , stupně přesnosti a skupině vůlí.

6. Vypočte se dolní úchylka tloušťky zubu:

$$\Delta s_{kD} = \Delta s_{kH} - \delta s_k \text{ [}\mu\text{m]}$$

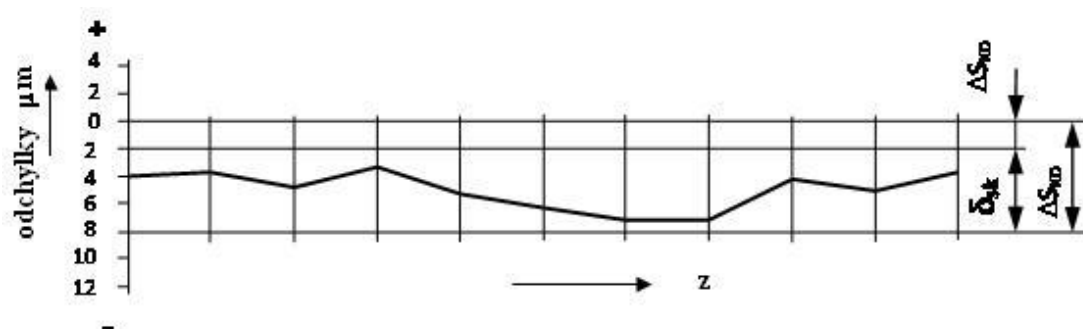
7. Určí se : $\Delta s_{kD}, : \Delta s_{kH}$ (z výrobního výkresu – doplňkové razítko)

8. Při měření se nastaví na svislém měřítku zuboměru skutečnou hodnotu konstantní výšky:

$$h_k' = h_k - \frac{\Delta D_a}{2} \text{ [mm]}$$

9. Změří se skutečné hodnoty tloušťky zubu s_k , určí se odchylky od vypočtené (výkresové) hodnoty s_k a vynesou se do grafu, kde jsou vyneseny dovolené úchylky a tolerance (**obr. 8.51**).

10. Na základě vyhodnocení grafu se určí, zda kontrolované ozubení vyhovuje předepsané toleranci.



Obr. 8.51 Graf úchylek s_k v konstantní výšce h_k

Postup při kontrole tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k pro korigovaná kola

1. Dle výrobního výkresu se určí: modul m , počet zubů z , úhel záběru α , stupeň přesnosti, skupina vůlí, hodnota posunutí základního profilu $x \cdot m$.
2. Vypočte se jmenovitý průměr hlavové kružnice D_{aj} :

$$D_{aj} = m(z + 2) \pm 2x \cdot m \quad [\text{mm}]$$

3. Změří se skutečný průměr hlavové kružnice D_{as} a stanoví se odchylka ΔD_a :

$$\Delta D_a = D_{aj} - D_{as} \quad [\text{mm}]$$

4. Z tabulky 1 v ČSN 01 4678 (výpis **tab. 8.12**) se zjistí jmenovité hodnoty s_k a h_k pro zadaný modul a úhel záběru α .

Z tabulky 2 ČSN 01 4678 se zjistí korekční členy: $x \cdot m \cdot \sin 2\alpha$; $x \cdot m \cdot \cos^2 \alpha$ pro zadané posunutí základního profilu $x \cdot m$ a úhel záběru α .

Vypočte se:

$$s_{k(kor)} = s_k \pm x \cdot m \cdot \sin 2\alpha \quad [\text{mm}]$$

$$h_{k(kor)} = h_k \pm x \cdot m \cdot \cos^2 \alpha \quad [\text{mm}]$$

5. Dle ČSN 01 4682 se stanoví horní úchylka tloušťky zubu Δs_{kH} a tolerance konstantní tloušťky δs_k v závislosti na modulu m , průměru roztečné kružnice D , stupně přesnosti a skupině vůlí.
6. Vypočte se dolní úchylka tloušťky zubu:

$$\Delta s_{kD} = \Delta s_{kH} - \delta s_k \quad [\mu\text{m}]$$

7. Určí se : Δs_{kD} , Δs_{kH} (z výrobního výkresu – doplňkové razítko)
8. Při měření se nastaví na svislém měřítku zuboměru skutečnou hodnotu konstantní výšky:

$$h_k' = h_k - \frac{\Delta D_a}{2} \quad [\text{mm}] \quad)$$

9. Změří se skutečné hodnoty tloušťky zubu $s_{k(kor)}$, určí se odchylky od vypočtené (výkresové) hodnoty $s_{k(kor)}$ a vynesou se do grafu, kde jsou vyneseny dovolené úchylky a tolerance jako pro kolo nekorigované (**obr. 8.51**).
10. Na základě vyhodnocení grafu se určí, zda kontrolované ozubení vyhovuje předepsané toleranci.

8.5.2 Kontrola rozměru přes zuby

Kontrola rozměru přes zuby je nejrozšířenější metodou k přímému stanovení boční vůle u ozubení. Rozměr přes zuby není ovlivněn odchylkou průměru hlavové kružnice ani

radiálním házením ozubení, ovlivňují jej však odchylky chyby dělení $\Rightarrow$ je nutno kontrolovat více hodnot na obvodu kola (nejméně 4x) a poté určit průměrnou hodnotu.

Měření se provádí nejčastěji talířovým mikrometrem (mikropassametrem), tolerančním kalibrem (pro každý modul pro každý počet zubů a každou předepsanou vůli v ozubení musí být samostatný kalibr) nebo speciálními měřidly (např. stavitelný porovnávací zuboměr ZEISS).

Jmenovitý rozměr přes zuby M je délka společné kolmice při jmenovité poloze základního profilu a vzdálenosti os. Měří se na tečně k základní kružnici v blízkosti roztečné kružnice kontrolovaného kola (**obr. 8.52**).

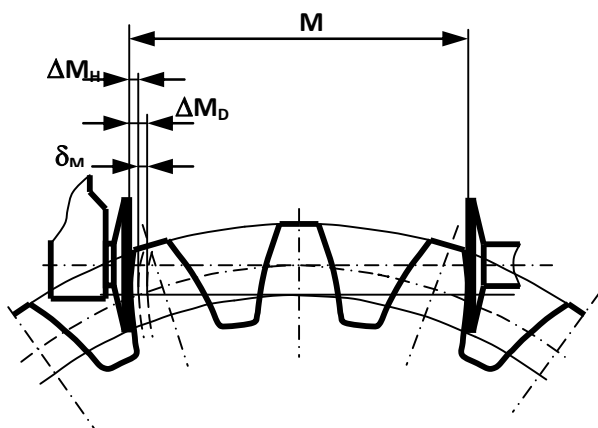
Horní mezní úchylka ΔM_H je dána rozdílem jmenovitého rozměru M a horního mezního rozměru (**obr. 8.52**).

Dolní mezní úchylka ΔM_D je dána rozdílem jmenovitého rozměru M a dolního mezního rozměru (**obr. 8.52**).

Horní i dolní mezní úchylka je vždy záporná (z důvodu nutnosti vzniku vůle).

Tolerance rozměru přes zuby:

$$\delta_M = \Delta M_H - \Delta M_D \quad [\mu\text{m}]$$



Obr. 8.52 Kontrola rozměru přes zuby

Pro kontrolu rozměru přes zuby ozubených kol čelních s přímými zuby platí norma ČSN 01 4675.

Teoretickou hodnotu rozměru přes zuby M lze vypočítat dle vztahů:

nekorigovaná kola:
$$M = m \left[\pi \cos \alpha (z' - 0,5) + z \cos \alpha (tg \alpha - arc \alpha) \right]$$

korigovaná kola:
$$M_{kor} = M \pm 2x \cdot \sin \alpha$$

kde: m ... modul ozubení,

α ... úhel záběru

z ... počet zubů,

z' ... počet zubů, přes které se měří,

$x.m$... posunutí základního profilu (znaménko + platí pro posunutí základního profilu směrem od středu kola (+V kola); znaménko – platí pro posunutí základního profilu směrem ke středu (-V kola)

Počet zubů, přes které se měří, se určí dle vztahu:

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

Hodnota z' nevyjde jako celé číslo $\Rightarrow$ je nutno vypočtenou hodnotu zaokrouhlit, do 0,2 dolů, přes 0,2 nahoru.

Počet zubů, přes které se měří z' , jmenovitá hodnota rozměru přes zuby M pro modul 1 až 20, korekční člen $2x.m \sin \alpha$ v závislosti na úhlu záběru α jsou tabelizovány v normě ČSN 01 4675. Výpis z této normy - **tab. 8.13**.

Tab. 8.13 Jmenovité hodnoty rozměru přes zuby $M_{m=1}$ pro jednotkový modul ($m=1$, $\alpha=20^\circ$)
– výpis

počet zubů z	z'	$M_{m=1}$ [mm]	počet zubů z	z'	$M_{m=1}$ [mm]	počet zubů z	z'	$M_{m=1}$ [mm]
10	2	4,5682	36	5	13,7887	62	8	23,0092
11	2	4,5822	37	5	13,8027	63	8	23,0232
12	2	4,5962	38	5	13,8167	64	8	23,0372
13	2	4,6102	39	5	13,8307	65	8	23,0512
14	2	4,6242	40	5	13,8447	66	8	23,0652
15	2	4,6383	41	5	13,8587	67	8	23,0792
16	3	7,6044	42	5	13,8727	68	8	23,0932
17	3	7,6184	43	6	16,8389	69	8	23,1072
18	3	7,6324	44	6	16,8529	70	9	26,0734
19	3	7,6464	45	6	16,8669	71	9	26,0874
20	3	7,6604	46	6	16,8809	72	9	26,1014
21	3	7,6744	47	6	16,8949	73	9	26,1154
22	3	7,6884	48	6	16,9089	74	9	26,1294
23	3	7,7024	49	6	16,9229	75	9	26,1434
24	3	7,7164	50	6	16,9369	76	9	26,1574
25	4	10,6825	51	6	16,9610	77	9	26,1714
26	4	10,6965	52	7	19,9171	78	9	26,1854
27	4	10,7105	53	7	19,9311	79	10	29,1515

Pro kontrolu rozměru přes zuby čelních ozubených kol se šikmými zuby platí norma ČSN 01 4676.

Teoretická hodnota rozměru přes zuby v normální rovině M : platí vztahy :

nekorigovaná kola: $M = m[\pi \cos \alpha(z' - 0,5) + z \cos \alpha(\operatorname{tg} \alpha_t - \operatorname{arc} \alpha_t)]$

korigovaná kola: $M_{kor} = M \pm 2x \cdot \sin \alpha$

kde: α ... úhel záběru v normální rovině,

α_t ... čelní úhel záběru nástroje (v čelní rovině) $\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}$,

β ... úhel sklonu zubů (na roztečném válci)

Rovnici pro výpočet hodnoty rozměru přes zuby M je možno zjednodušeně zapsat:

$$M = m[A + z \cdot B]$$

kde: $A = \pi \cos \alpha(z' - 0,5)$ a $B = \cos \alpha(\operatorname{tg} \alpha_t - \operatorname{arc} \alpha_t)$.

Hodnoty A a B se určí z normy ČSN 01 4676: $A=f(\alpha, z')$, $B=f(\alpha, \beta)$. Korekční člen $2x \cdot m \sin \alpha$ se určí z normy ČSN 01 4675.

Počet zubů, přes které se měří z' se určí dle vztahu:

$$z' = \frac{z \cdot \alpha}{180^\circ \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \beta_b} + 0,5$$

kde: β_b ... úhel sklonu na základním válci, nebo z ČSN 01 4676 (pro z do 270, pro β do 50° , $\alpha=15^\circ$ a 20°).

Postup při kontrole rozměru přes zuby M pro korigovaná kola – ozubení přímé

1. Dle výrobního výkresu se určí modul m , počet zubů z , úhel záběru α , stupeň přesnosti, skupina vůlí, hodnota posunutí základního profilu $\pm x \cdot m$.
2. Z normy ČSN 01 4675 se určí pro úhel záběru α a počet zubů kontrolovaného kola z , počet zubů, přes které se měří z' .
3. Z normy ČSN 01 4675 se určí pro daný modul m , úhel záběru α , a počet zubů, přes které se měří z' jmenovitá hodnota rozměru přes zuby M [mm].
4. Z normy ČSN 01 4675 se určí hodnota korekčního členu $2x \cdot m \sin \alpha$
5. Vypočte se hodnota rozměru přes zuby M_{kor} : $M_{kor} = M \pm 2x \cdot \sin \alpha$ [mm]
6. Z normy ČSN 01 4682 se stanoví horní mezní úchylka rozměru přes zuby ΔM_H [μm] a hodnotu tolerance rozměru přes zuby δ_M [μm].
7. Vypočte se dolní mezní úchylka rozměru přes zuby ΔM_D :
$$\Delta M_D = \Delta M_H - \delta_M \text{ [}\mu m\text{]}$$
8. Proveďte se nejméně 4÷6 měření rozměru přes zuby M na obvodě ozubeného kola, z naměřených hodnot se určí střední hodnota (měření u ozubených kol čelních se šikmými zuby lze provést jen tehdy, je-li šířka ozubení: $b > M \cdot \sin \beta$).
9. Proveďte se vyhodnocení měření – střední hodnota rozměru přes zuby M musí být v rozsahu přípustných úchylek ΔM_H , ΔM_D .

Postup při kontrole rozměru přes zuby M pro korigovaná kola – ozubení šikmé

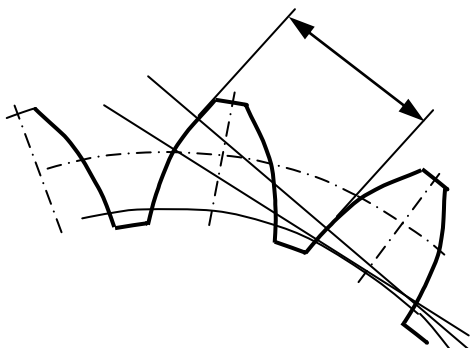
1. Dle výrobního výkresu se určí modul m , počet zubů z , úhel záběru α , úhel sklonu zubů na roztečném válci β , šířka ozubení b , stupeň přesnosti, skupina vůlí, hodnota posunutí základního profilu $\pm x$. m .
2. Z normy ČSN 01 4676 se určí pro úhel záběru α , počet zubů kontrolovaného kola z a úhel sklonu zubů β , počet zubů, přes které se měří z' .
3. Z normy ČSN 01 4676 se určí pro daný modul m , úhel záběru α , úhel sklonu zubů β a počet zubů, přes které se měří z' a jmenovitá hodnota rozměru přes zuby M [mm] (pomocí hodnot A a B).
4. Z normy ČSN 01 4675 se určí hodnota korekčního členu $2x \cdot m \sin \alpha$
5. Vypočte se hodnota rozměru přes zuby M_{kor} : $M_{kor} = M \pm 2x \cdot m \sin \alpha$ [mm]
6. Z normy ČSN 01 4682 se stanoví horní mezní úchylka rozměru přes zuby ΔM_H [μm] a hodnotu tolerance rozměru přes zuby δ_M [μm].
7. Vypočte se dolní mezní úchylka rozměru přes zuby ΔM_D :

$$\Delta M_D = \Delta M_H - \delta_M \text{ } [\mu m]$$

8. Proveďte se nejméně 4÷6 měření rozměru přes zuby M na obvodě ozubeného kola, z naměřených hodnot se určí střední hodnota (měření u ozubených kol čelních se šikmými zuby lze provést jen tehdy, je-li šířka ozubení: $b > M \cdot \sin \beta$).
9. Proveďte se vyhodnocení měření – střední hodnota rozměru přes zuby M musí být v rozsahu přípustných úchylek ΔM_H , ΔM_D .

8.5.3 Kontrola základní rozteče

Kontrola základní rozteče p_b evolventního ozubení je založena na skutečnosti, že vzdálenost průsečíků dvou boků zubů a tangenty k základní kružnici je pro každou tangentu stejná $\Rightarrow$ základní rozteč je nejkratší vzdálenost mezi dvěma souhlasnými body evolventy sousedních zubů (**obr. 8.53**).



Základní rozteč je dána vztahem:

$$p_b = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha$$

kde:

m ... modul ozubeného kola

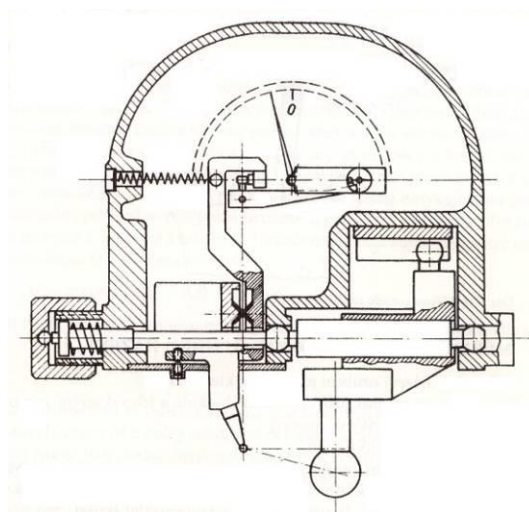
α ... úhel záběru

Obr. 8.53 Základní rozteč

Kontrola se provádí speciálními měřidly pro základní rozteč. Příkladem ručního měřidla pro základní rozteč je měřidlo VEB ZEISS (**obr. 8.54**). Základní rozteč přístroje se

provádí pomocí měrek na základě jeho jmenovité hodnoty. Jmenovité hodnoty základní rozteče pro příslušné moduly – **tab. 8.14**.

Pro vypočtenou základní rozteč p_b se sestaví příslušná hodnota měrek v seřizovacím přípravku a měřidlo se vynuluje. Úkolem kulového doteku je zajistit, aby se měřidlo po posazení na kolo dotýkal vždy stejných míst boků zubů. Posadíme-li měřidlo na boky jednotlivých zubů, ručička na stupnici měřidla ukáže odchylku skutečné základní rozteče příslušných boků zubu kola od teoretické hodnoty s přesností $\pm 2 \mu\text{m}$. Výsledky měření se graficky zpracují a vyhodnotí se vzhledem k přípustné toleranci rozteče dle ČSN 01 4682 pro daný stupeň přesnosti a skupiny vůlí kontrolovaného ozubeného kola.



Obr. 8.54 Měřidlo pro kontrolu základní rozteče

Tab. 8.14 Hodnoty základní rozteče ozubených kol pro $\alpha=20^\circ$ - výpis [mm]

modul m	základní rozteč p_b	modul m	základní rozteč p_b	modul m	základní rozteč p_b
1	2,9521298	3,0	8,8563866	6,0	17,7127733
1,25	3,6901611	3,25	9,5944188	6,5	19,1888377
1,5	4,4281933	3,5	10,3324511	7	20,6649021
1,75	5,1662255	3,75	11,0704833	8	23,6170310
2,0	5,9042578	4,0	11,8085155	9	26,5691599
2,25	6,6422900	4,5	13,2845799	10	29,5212888
2,5	7,3803222	5,0	14,7606444		
2,75	8,1183544	5,5	16,2367088		

8.5.4 Kontrola průměru přes dvě kuličky

Na šikmozubých kolech je kontrola přes zuby často nemožná z důvodu příliš malé šířky zubu. V takovém případě se měří velikost mezery přednostně přes dvě kuličky vložené do protilehlých mezer. Průměr vhodných měřicích kuliček je závislý na různých parametrech (z , m , α , β , x) a u vnějšího ozubení leží asi v rozmezí 2,2.m pro $z < 20$ a 1,8.m pro $z > 20$. Pro kontrolu vnitřního ozubení se volí průměr měřicích kuliček asi o 0,5.m menší.

Rozměr přes kuličky se vypočítá následujícím způsobem:

Pro vnější ozubení

se sudým počtem zubů $M_d = \frac{d_b}{\cos \alpha_{kt}} + D_M$,

s lichým počtem zubů $M_d = \frac{d_b}{\cos \alpha_{kt}} \cdot \cos \frac{90^\circ}{z} + D_M$,

kde: d_b = průměr základní kružnice
 α_{kt} = úhel záběru v čelní rovině na kružnici procházející středy kuliček

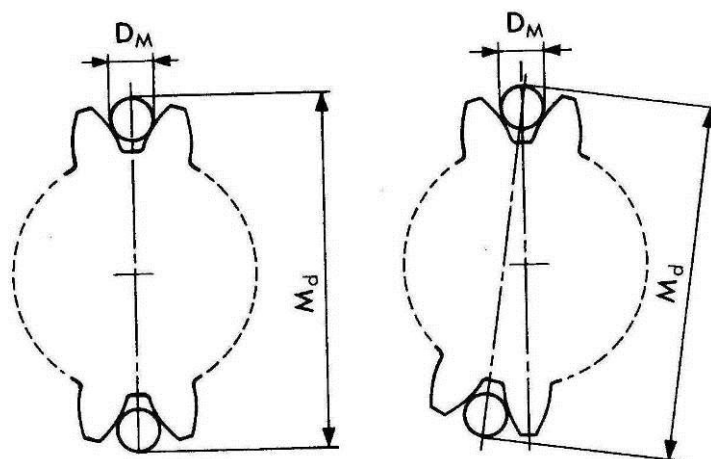
$$\text{inv} \alpha_{kt} = \frac{W_k - (k \cdot p_{bn}) + D_M}{z \cdot m \cdot \cos \alpha}$$

W_k = výchozí míra přes zuby

k = počet zubů, přes které se měří

p_{bn} = základní rozteč v normálové rovině

D_M = průměr kuličky



Obr. 8.55 Rozměr přes kuličky úkol se sudým a lichým počtem zubů

Pro vnitřní ozubení

se sudým počtem zubů $M_d = \frac{d_b}{\cos \alpha_{kt}} - D_M$,

s lichým počtem zubů
$$M_d = \frac{d_b}{\cos \alpha_{kt}} \cdot \cos \frac{90^\circ}{z} - D_M ,$$

přičemž
$$inva_{kt} = \frac{w_k - (k-1) \cdot p_{bn} - D_M}{z \cdot m \cdot \cos \alpha} .$$

Ke kontrole se zpravidla používají takzvané kuličkové mikrometry. U šikmozubých kol se sudým počtem zubů a u přímozubých kol se rozměr přes kuličky udává jako jednoznačná minimální hodnota odečítaná na obvodu bez zvláštních opatření. U šikmozubých kol s lichým počtem zubů musí být obě měřicí kuličky umístěny pomocí přípravku na stejné axiální výšce ve stejné čelní rovině.

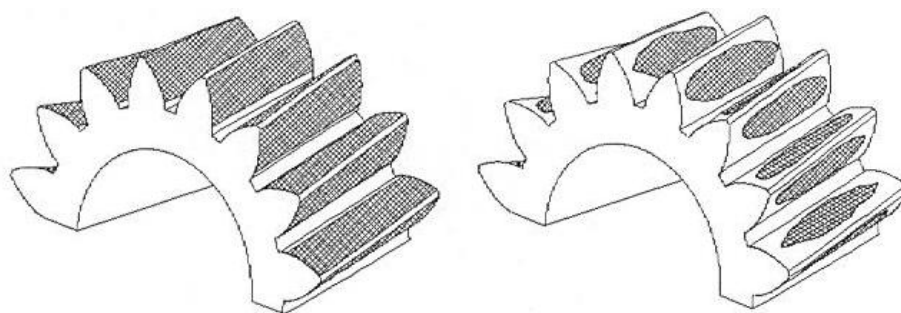
8.5.5 Kontrola dotyku zubů

Dotyk zubů určuje velikost a rozložení oblasti styku povrchu boků zubů spoluzabírajících kol v převodu. Aby se zubní boky dotýkaly, je nutno dbát toho, aby se přesně dodržel směr zubů (u kol s přímými zuby a čelní rozteč u kol se zuby šikmými).

Pásmo záběru pro čelní ozubená kola je možno definovat jako část aktivního povrchu boku zubu kola, na kterém dochází při otáčení smontovaného soukolí za mírného brzdění hnacího členu, zaručujícího nepřerušovaný dotyk zubů obou ozubených kol, k jejímu styku se zuby spoluzabírajícího kola. Podobně je možno definovat pásmo dotyku i pro soukolí se šikmými, šípovými zuby a pro soukolí kuželová.

Při hodnocení pásma dotyku se určují relativní rozměry pásma dotyku v procentech na:

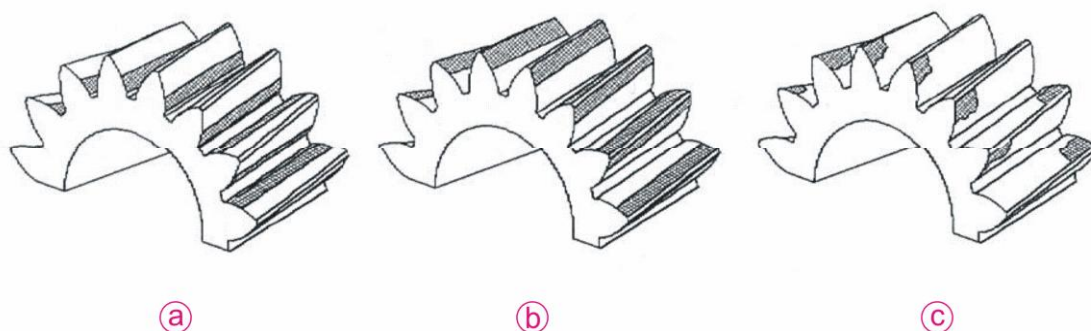
- délce zubu (poměr vzdálenosti krajních bodů pásma dotyku k celé délce zubu),
- výšce zubu) poměr střední výšky pásma dotyku ke střední výšce zubu aktivní plochy boku).



Obr. 8.56 Pásmo dotyku zubů - normální záběr

Hodnocení pásma záběru se nejčastěji provádí na speciálních zkušebních strojích. Do pracovních vřeten stroje se upínají obě kola tvořící soukolí v teoretické montážní osové vzdálenosti. Hnací kola bývá většinou pastorek, jehož ozubení se natře tuširovací barvou. Stroj se uvede do chodu přibrzdováním jeho chodu při menším zatížení. Barva se při otáčení

v místech dotyku působením tlaku vytlačí. Tím na boku vznikne světlejší místo, které ohraničuje polohy záběru zubu. Na **obr. 8.56** jsou příklady pásem záběru v případech vyhovujících soukolí, na **obr. 8.57** jsou pásma, která nevyhovují. Tato metoda sice neposkytuje výsledky v číselné formě, ale je velmi názorná.



- a) pásmo dotyku při patě zubů, b) pásmo dotyku při hlavě zubu,
c) pásmo dotyku při odchylce rovnoběžnosti os spoluzabírajících kol

Obr. 8.57 Pásmo dotyku zubů při chybném záběru

8.6 Výrobní tolerance ozubených kol

Aby bylo možné zajistit vedle vyměnitelnosti kol ozubeného převodu, podmíněné připojovacími rozměry, také funkční požadavky, jako například tichý chod, stálý převodový poměr, mazací schopnost, zatížitelnost, musí být dodrženy odchylky určitých určujících veličin ozubení v určitém rozmezí.

Přestože kvalita ozubeného kola nezávisí pouze na geometrické přesnosti výroby – důležité jsou také vhodné ustavení, tuhé těleso, materiál, bezvadné tepelné zpracování, dobré mazání – přesná výroba je hlavní podmínkou pro dobré provozní chování ozubení. Protože však výrobní náklady s rostoucími požadavky na přesnost prudce stoupají, nemá být přesnost výroby vyšší, než jakou vyžaduje účel použití ozubeného kola.

Pro splnění tohoto požadavku a zjednodušení stanovení kvality ozubeného kola byl vytvořen toleranční systém s různými třídami kvality (stupni přesnosti) odstupňovanými podle geometrické řady. Každý stupeň přesnosti stanovuje určité mezní toleranční hodnoty vhodné pro příslušné skupiny úchylek. Kvalitu ozubeného kola je tedy obecně možno popsat pouze jedním údajem – stupněm přesnosti.

8.6.1 ISO toleranční systém ozubení

Podobně jako u ISO lícovacího systému válcových součástí, který zahrnuje dva lícovací systémy – jednotné díry a jednotného hřídele, existují dva lícovací systémy pro převody – jednotná osová vzdálenost a jednotná tloušťka zubu. U první se využívá pouze

jednoho tolerančního pole osové vzdálenosti a velikost vůle se uskutečňuje různým tolerančním polem tloušťky zubu, u systému jednotné tloušťky zubu je to naopak. Velikost tolerancí ozubení jsou vytvořeny podle stejných pravidel jako tolerance válcových součástí.

Soustava tolerancí podle ISO (DIN) obsahuje 12 stupňů přesnosti. Lepší skupiny jsou pro měřicí kola a pro zvláštní požadavky. Jsou odstupňovány tak, že tolerance každého stupně je ϕ -násobkem tolerance předchozího. Stupňování ϕ je uvedeno v následujícím textu. Jsou zde dále reprodukovány důležité rovnice, které dávají základ pro toleranční tabulky (ISO, DIN, ČSN). Protože se dají pro všechny měřitelné úchyly ozubení tyto toleranční rozměry spočítat, v závislosti na datech kola a stupni přesnosti, bylo upuštěno od reprodukce těchto rozsáhlých tolerančních tabulek.

Hranice oblastí roztečných průměrů a modulů jsou určeny řadou normovaných čísel R20. Při výpočtu tolerancí z níže uvedených vztahů je pro modul m_n a průměr d třeba dosadit geometrické střední hodnoty oblastí udávaných v číselných tabulkách. Tyto vypočtené hodnoty je třeba zaokrouhlit podle normovaných čísel. Kromě toho mohou být při znalosti normovaných čísel vypočteny od známé hodnoty následující vyšší nebo nižší.

Číselné hodnoty následujících vztahů platí pro 5. stupeň přesnosti. Údaje m_n , d , b a L jsou v mm, tolerance v μm .

Dílčí mezní úchyly ozubení

Mezní úchylka tvaru profilu

$$f_{f\alpha} = 1,5 + 0,25(m_n + 9 \cdot \sqrt{m_n}),$$

$\phi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\phi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní úchylka úhlu profilu

$$f_{H\alpha} = 2,5 + 0,25(m_n + 3 \cdot \sqrt{m_n})$$

$\phi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\phi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní úchylka profilu

$$F_{\alpha} = \sqrt{f_{H\alpha}^2 + f_{f\alpha}^2}$$

$\phi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\phi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní úchyly čelní a základní rozteče

$$f_{pt} = f_{pb} = 4 + 0,315(m_n + 0,25 \cdot \sqrt{d})$$

$\varphi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\varphi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní rozdíl sousedních roztečí

$$f_u = 5 + 0,4(m_n + 0,25 \cdot \sqrt{d})$$

$\varphi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\varphi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní součtová úchylka roztečí kola

$$F_p = 7,25 \cdot \frac{d^{1/3}}{z^{1/7}}$$

$\varphi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\varphi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní součtová úchylka (k) roztečí kol

$$F_{pk} = 6,25 \cdot m_n^{1/7} \cdot \frac{L^{1/3}}{d^{1/7}}$$

$\varphi = 1,4$ do stupně přesnosti 9

$\varphi = 1,6$ od stupně přesnosti 9

Mezní obvodové házení

$$F_r = 1,68 + 2,18 \cdot \sqrt{m_n} + (2,3 + 1,2 \log m_n) \cdot d^{1/4}$$

$\varphi = 1,4$

Mezní úchylka sklonu zubu

$$F_\beta = 0,8 \cdot \sqrt{b} + 4$$

$\varphi = 1,25$ do stupně přesnosti 6

$\varphi = 1,4$ pro stupně přesnosti 6 až 9

$\varphi = 1,6$ pro stupně přesnosti 9 až 12

Mezní úchylka úhlu sklonu zubu

$$f_{H\beta} = 4,16 \cdot b^{0,14}$$

$\varphi = 1,32$ do stupně přesnosti 6

$\varphi = 1,4$ pro stupně přesnosti 6 až 9

$\varphi = 1,55$ pro stupně přesnosti 9 až 12

Mezní úchylka tvaru sklonu zubu

$$f_{f\beta} = \sqrt{F_{\beta}^2 - f_{H\beta}^2}$$

Mezní úchylky ozubení odvalem

Mezní úchylka dvoubokého odvalu za otáčku

$$F_i'' = 2 + 2,57 \cdot \sqrt{m_n} + (3,12 + 0,432 \log m_n) \cdot d^{1/4}$$

$$\varphi = 1,4$$

Mezní úchylka dvoubokého odvalu za rozteč

$$f_i'' = 1,8 \cdot \sqrt{m_n} + 1,6 \cdot d^{1/4} - 1$$

$$\varphi = 1,4$$

Mezní kinematická úchylka kola (při jednobokém odvalu)

$$F_i' = 0,8 \cdot (F_p + F_{\alpha})$$

$$\varphi = 1,4 \text{ do stupně přesnosti 9}$$

$$\varphi = 1,6 \text{ od stupně přesnosti 9}$$

Mezní místní kinematická úchylka kola (při jednobokém odvalu)

$$f_i' = 0,7 \cdot (f_p + F_{\alpha})$$

$$\varphi = 1,4 \text{ do stupně přesnosti 9}$$

$$\varphi = 1,6 \text{ od stupně přesnosti 9.}$$

8.6.2 Toleranční skupiny (rodiny) a jejich využití

Tolerance ozubení musí být voleny s ohledem na jejich funkci a výrobu. Čím vyšší jsou funkční požadavky na ozubené kolo, tím vyšší musí být kvalita zhotoveného ozubení a tím diferencovaněji musíme přistupovat k jeho tolerování, abychom snížili nezbytné náklady na jeho výrobu. Pro jednotlivé určující veličiny ozubení mohou být stanoveny v podstatě rozdílné stupně přesnosti. Takové spojení se nazývá toleranční skupiny, případně rodiny.

Není ale rozumné vytvářet toleranční rodiny, ve kterých by se určovaly pro každou měřitelnou veličinu rozdílné stupně přesnosti. Provozní vlastnosti, které jsou vyžadovány od ozubeného kola, lze uspořádat do následujících funkčních skupin:

- G: rovnoměrnost přenášeného pohybu,
- L: tichý chod a dynamická zatížitelnost,
- T: statická únosnost,

- N: žádné požadavky na funkci.

Tab. 8.15 Funkční skupiny úchylek

Funkční skupina		Důležité úchyly
G	rovnoměrnost přenášeného pohybu	$F_i, f_i, F_p, F_i, F_r, f_i$
L	tichý chod a dynamická zatížitelnost	$f_i, f_p, f_{pb}, f_i, F_a, F_p (F_r), f_{H\beta}$
T	statická únosnost	$f_{pb}, f_{H\beta}, TRA$
N	žádné požadavky na funkci	$F_i, f_{H\beta}, F_a, f_i$

Jsou-li tvořeny toleranční rodiny s rozdílnou kvalitou ozubení, je vhodné volit tolerance jedné funkční skupiny se stejným stupněm přesnosti ozubení. Takto mohou vzniknout toleranční rodiny s maximálně 3 různými stupni přesnosti. Vyskytují-li se určující veličiny ve více funkčních skupinách, pak je pro ně určující skupina s vyšší kvalitou, tedy s nižším stupněm přesnosti.

Často se vyskytují případy, že požadujeme od ozubených kol všeobecné provozní vlastnosti bez speciálních funkčních požadavků (funkční skupina N). V tom případě se předepisuje jen jeden stupeň přesnosti, např. stupeň přesnosti 8. V jiných případech se vyžaduje, aby byly splněny požadavky určité funkční skupiny. Pak je třeba dodat písmeno funkční skupiny s požadovaným stupněm přesnosti – viz **tab. 8.16**.

Tab. 8.16 Příklady tolerančních skupin (rodin)

Příklad	Význam
G 8, L 7	Určující veličiny pro rovnoměrnost přenášeného pohybu (G) ve stupni přesnosti 8, veličiny pro tichý chod (L) ve stupni přesnosti 7. Žádný předpis pro veličiny charakterizující statickou únosnost (T).
L 4	Určující veličiny pro tichý chod a dynamická zatížitelnost (L) ve stupni přesnosti 4. Zbývající skupiny bez předpisu.
G 6, L 6, T 7	Určující veličiny pro rovnoměrnost přenášeného pohybu (G) a tichý chod (L) ve stupni přesnosti 6, statická únosnost ve stupni přesnosti 7.

Zásadně se mají domlouvat tolerance jen pro takové funkční skupiny, na jejichž úchylnkách příslušný způsob použití skutečně závisí. Zpravidla se nemají domlouvat více než dvě funkční skupiny. Smyslem tohoto volného propojení je maximální hospodárnost výroby a zabránění výskytu zmetků u kol, které vykazují větší úchyly pouze u vedlejších určujících

veličin. Pokud existují stejné požadavky na určité druhy ozubených kol (např. výměnná kola obráběcích strojů, vačkové hřídele motorů), mohou být určité toleranční rodiny a směrnice pro jejich použití stanoveny normou.

8.6.3 Kontrola kvality a kontrolní skupiny

Podobně jako tolerování musí také kontrola odpovídat požadavkům na skutečné použití. Čím přísnější jsou požadavky na přesnost, tím větší jsou pak náklady na kontrolu pro zajištění správnosti měřených hodnot. Na druhé straně se nemusí měřit to, co není předepsáno. Při tolerování podle funkčních skupin je třeba kontrolovat pouze měřitelné veličiny určující konkrétní případ.

Také není třeba kontrolovat všechny veličiny patřící k funkční skupině. Můžeme využít toho, že tyto veličiny spolu úzce souvisí. Je tak možné např. nahradit kontrolu profilu a sklonu zubu kontrolou pásma dotyku a naopak. Podobné platí pro kontrolu radiálního házení na jedné a kontrolu úchylek dvoubokého odvalu na druhé straně.

Určitou funkční skupinu je tedy možno kontrolovat na základě různých kombinací měřených rozměrů. Takovou kombinaci nazveme kontrolní skupinou. V **tab. 8.17** je každá funkční skupina rozdělena na tři (A, B a C) kontrolní skupiny. Kontrolní skupiny v prvních sloupcích jsou funkčně nejvhodnější, vyžadují ale měřicí přístroje, které nejsou vždy k dispozici. Ve druhém sloupci jsou kontrolní skupiny doporučované pro normální případy, při kterých jsou kontrolovány veličiny o něco méně přesně, ale ty mohou být kontrolovány měřicími přístroji většinou běžně dostupnými. Třetí kontrolní skupina je při realizaci ještě o něco zdlouhavější než druhá, neboť některá kritéria je třeba ještě dále rozšířit nebo kontrolovat nepřímou, přičemž stoupá počet požadovaných měření.

Zavedením těchto kontrolních skupin je možné přizpůsobit příslušné zkoušky s rozdílnými měřicími metodami a přístroji daným provozním podmínkám. Pokud není uvedeno jinak, přísluší volba kontrolní skupiny podle **tab. 8.17** výrobci. Pokud jsou v tomto případě výrobcem dodrženy zvolené určující veličiny kontrolní skupiny, pak platí stupeň přesnosti jako splněný, i když určující veličiny jiných kontrolních skupin (stejně funkční skupiny) překračují tolerance požadovaného stupně přesnosti.

Jako příklad může být uvedeno: Je požadováno ozubené kolo funkční skupiny G (rovnoměrnost přenášeného pohybu) v 6. stupni přesnosti a toto má být dokázáno výhradně kontrolou daného kusu podle kontrolní skupiny B. Zadání zní: Stupeň přesnosti G 6 B. Není-li uvedeno žádné písmeno pro kontrolní skupinu (A, B nebo C), pak přísluší volba výrobcem.

Tab. 8.17 Kontrolní skupiny pro jednotlivé funkční skupiny a stupně přesnosti

Funkční skupina	G rovnoměrnost přenášeného pohybu			L tichý chod a dynamická zatížitelnost			T statická únosnost			N žádné požadavky na funkci		
Kontrolní skupina	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Stup. př.												
2	$F_i R_s$			$F_i F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$		$F_i F_\beta$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} TRA$	$F_i R_s$	$F_p R_s F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s F_\alpha F_\beta$
3	$F_i R_s$			$F_i F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$		$F_i F_\beta$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} TRA$	$F_i R_s$	$F_p R_s F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s F_\alpha F_\beta$
4	$F_i R_s$	$F_p F_\alpha F_\beta$		$F_i F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} F_\alpha TRA$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$F_i R_s$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s TRA$
5	$F_i R_s$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$F_i F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s TRA$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$F_i R_s$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s TRA$
6	$F_i R_s$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s TRA$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$F_i R_s$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s TRA$
7	$F_p F_\beta F_\alpha$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$f_{pt} TRA$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$F_i TRA$	$f_{pb} R_s$
8	$F_p F_\beta F_\alpha$	$f_{pb} F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} F_\beta$	$F_p F_\alpha F_\beta$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$f_{pt} TRA$	$F_i F_\alpha F_\beta$	$F_i TRA$	$f_{pb} R_s$
9					$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s$	$f_{pb} TRA$	$F_i TRA$	$f_{pt} TRA$	$F_i TRA$	F_i	f_{pb}
10					$F_i F_\alpha F_\beta$	$f_{pb} R_s$	f_{pb}	f_i	f_{pt}	$F_i TRA$	F_i	f_{pb}
11							f_{pb}	f_i	f_{pt}	F_i	f_{pb}	R_s
12										F_i	f_{pb}	R_s

8.6.4 Toleranční systém ozubení dle ČSN 01 4682

Dle normy ČSN 01 4682 se stanoví dvanáct stupňů přesnosti ozubených kol a soukolí, označovaných v pořadí snižování přesnosti čísly 1-12. Pro každý stupeň přesnosti ozubených kol a soukolí jsou stanoveny předpisy kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotyku zubů ozubených kol v soukolí. Je přitom povolena kombinace předpisů kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotyku zubů ozubených kol a soukolí z různých stupňů přesnosti.

Při kombinaci předpisů z různých stupňů přesnosti může být plynulost chodu ozubených kol a soukolí nejvýše o dva stupně přesnější nebo o jeden stupeň horší než je kinematická přesnost. Dotyk zubů se může předepsat libovolnými stupni, přesnějšími než plynulost chodu ozubených kol a soukolí a rovněž o jeden stupeň hrubší než plynulost chodu.

Stanoví se šest skupin boční vůle ozubených kol v soukolí A, B, C, D, E, H a osm tolerancí T boční vůle x, y, z, a, b, c, d, h. Označení jsou uvedena v pořadí zmenšování boční vůle a tolerance boční vůle. Ke skupinám boční vůle H a E přísluší tolerance boční vůle h, ke skupinám boční vůle D, C, B, A v pořadí tolerance boční vůle d, c, b, a. Je přípustné ke skupině boční vůle ozubených kol v soukolí přiřadit jinou toleranci boční vůle, přitom lze také použít tolerance x, y, z.

Norma dále stanoví šest tříd úchylek vzdálenosti os, označených v pořadí snižování přesnosti římskými číslicemi od I do VI. Zaručená boční vůle je zajištěna, jestliže ke každé skupině boční vůle přísluší odpovídající třída úchylek vzdálenosti os (pro skupiny boční vůle H a E - II. třída, pro skupiny boční vůle D, C, B, A v pořadí třídy III., IV., V. a VI.).

Přesnost zhotovení ozubených kol a soukolí je dána stupněm přesnosti a požadavky na boční vůli jsou dány skupinou boční vůle, např. 7 – C. Při kombinaci různých stupňů přesnosti a volbě jiné tolerance boční vůle k vybrané skupině boční vůle, ale při zachování příslušné třídy úchylek vzdálenosti os, se označuje přesnost ozubených kol a soukolí postupným napsáním tří číslic a dvou písmen.

Prvá číslice označuje stupeň podle kinematické přesnosti, druhá stupeň podle plynulosti chodu, třetí stupeň podle dotyku zubů. První písmeno označuje skupinu boční vůle a druhé toleranci boční vůle, např. 8-7-6-Ba.

Mezi nejznámější představitele ukazatelů kinematické přesnosti patří: mezní kinematická úchylka kola F_i'' , mezní součtová úchylka roztečí kola F_p , mezní úchylka dvoubokého odvalu za otáčku F_i'' a mezní obvodové házení ozubení F_r .

K ukazatelům plynulosti chodu patří mimo jiné mezní místní kinematická úchylka kola f_i' , úchylka základní rozteče f_{pb} , úchylka čelní rozteče f_{pt} a mezní úchylka dvoubokého odvalu za rozteč f_i'' .

Konečně mezi ukazatele dotyku zubů patří úchylka sklonu zubu F_β souhrnná úchylka tvaru a polohy čáry dotyku F_{kr} nebo úchylka základní rozteče f_{pb} .

Zhledem k tomu, že závislost mezních úchylek a tolerancí podle předpisů kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotyku zubů na geometrických parametrech

ozubených kol se určí z odlišných rovnic, než u norem ISO, tabulkové hodnoty těchto tolerancí, uvedené v jednotlivých přílohách, budou odlišné.



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s principy komplexní kontroly evolventního ozubení a s problematikou kontroly vybraných parametrů ozubení v rámci dílčí kontroly. Poznatky získané v této kapitole můžete uplatnit v praktické části výuky.



Kontrolní otázky

1. Jaké znáte metody kontroly ozubení?
2. Který parametr se sleduje při kontrole profilu a sklonu zubu ozubení?
3. Který parametr se sleduje při kontrole roztečí ozubení?
4. Který parametr se sleduje při kontrole jednookým a dvoubokým odvalem
5. Který parametr ozubeného kola musíme zohlednit při kontrole tloušťky zubů s_k v konstantní výšce h_k ?
6. Na základě kterého parametru ozubeného kola budete volit počet zubů z' při kontrole rozměru přes zuby?
7. Jakou metodu byste zvolili pro kontrolu základní rozteče ozubení?



Úlohy k řešení

8.7 Zadání úlohy č. 7

Proveďte kontrolu následujících parametrů ozubeného kola:

1. tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k pomocí optického zuboměru,
2. rozměru přes zuby M talířkovým mikrometrem (popř. mikropasametrem, speciálním měřidlem ZEISS),
3. základní rozteče p_b speciálním měřidlem ZEISS,
4. obvodového házení ozubení ve speciálním přípravku.

Postup práce:

1. Seznamte se s měřidly a proveďte jejich kontrolu před vlastním měřením.

2. Proved'te měření hlavového průměru (10x), určete počtu zubů kola, vypočtete modul a dle tabulek stanovte příslušné hodnoty potřebné pro kontrolu jednotlivých zadaných parametrů kola.
3. Proved'te vlastní měření parametrů s_k , M a p_b (opakujte 10x) a naměřené hodnoty sestavte do tabulky naměřených hodnot
4. Naměřené hodnoty statisticky zpracujte.
5. Proved'te porovnání výsledků měření s tabulkovými hodnotami a určete příslušné úchytky.
6. Proved'te kontrolu úchylek obvodového házení pro celé kolo, úchytky zpracujte graficky a vyhodno'te.
7. Proved'te zhodnocení úlohy.
8. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři
9. Proved'te úklid pracoviště.
10. Zpracujte protokol o měření včetně schémat měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) ozubené kolo
- b) třmenový mikrometr
- c) posuvné měřítko
- d) optický zuboměr
- e) talířkový mikrometr (mikropassametr, speciální měřidlo ZEISS)
- f) měřidlo pro kontrolu základní rozteče ZEISS
- g) číselníkový úchylkoměr
- h) přípravek pro kontrolu obvodového házení
- i) literatura

9 KONTROLA VAČEK

Vačka je součást strojů, která zajišťuje převod otáčivého pohybu na posuvný, a to v přesně vymezeném okamžiku.

Vačka má obvykle vejčitý tvar. Je o ni opřeno zdvihátko, které je k ní přitlačeno pružinou. Při otáčení vačky se zdvihátko pohybuje podle tvaru vačky. Tvarem vačky lze mechanicky „naprogramovat“ dobu a výšku zdvihu v závislosti na jejím natočení.



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

✚ kontrolovat parametry vačky a vačkových hřídelí



Výklad

Vačka (obr. 9.1) je součást ve tvaru neokrouhlého kotouče (vejčitý tvar), která převádí točivý pohyb vačkového hřídele na přerušovaný přímočarý posuvný pohyb (např. zvedáku ventilu) nebo kývavý pohyb jednoramenné páky. Vačky se používají u ventilových rozvodů, spínačů, vstřikovacích ústrojí atd. Činnou část vačky tvoří dva boky, vrcholová část a přechodové oblasti (náběh a seběh). Zdvih vačky je určen odlehlostí nejvzdálenějšího bodu vrcholové části od základní kružnice.



Obr. 9.1 Vačka se zdvihadlem

Pokud je ve stroji hřídel, určená speciálně pro umístění vaček, nazývá se **vačková hřídel** (obr. 9.2).



Obr. 9.2 Vačková hřídel

Využití vaček:

- ovládání pohybu ventilů ve spalovacím motoru,
- součást pístového čerpadla,
- součást regulátorů, vypínačů,
- součást mechanicky naprogramovaných automatů např. obráběcích strojů pro hromadnou výrobu.

Mechanismy s vačkou:

- posuvnou (rovinné tvary),
- rotační (neokrouhlý kotouč s válcovou činnou plochou).

Rotační vačky:

- kontrola vaček patří k poměrně pracným kontrolním operacím – vačka je definovaná velkou řadou bodů, které je třeba proměřit,
- dle konstrukce a velikosti vačky volíme i kontrolní metodu.
- do této skupiny patří:
 - **vačky s uzavřenou křivkou** (mají dráhu v rozsahu 360°),
 - **vačky s neuzavřenou křivkou** (dráha tvoří jen určitou část z plného úhlu 360°, zbytek dráhy tvoří část průměru nebo jiného geometrického tvaru)
- vačková dráha může být na obvodu kotouče nebo na jeho čele jako drážka,
- pracují v radiálním směru,
- do této skupiny je možno zařadit vačkové hřídele a excentry.

9.1 Kontrola rotačních vaček

Kontrola kontrolními šablonami

- vhodná pro ploché vačky,
- na vačku je nasunuta šablona zavedená do technologického otvoru, který určuje její polohu,
- tvar vačky je porovnáván průsvitem na pravítku nebo číselníkovým úchylkoměrem,
- metoda vhodná pro sériovou výrobu,
- pro méně přesné dílce.

Kontrola pomoci měřicího mikroskopu

- metoda vhodná pro plochou vačku,
- tvar vačky je zadán polárními souřadnicemi,
- obrys tvaru musí být dobře viditelný,
- k měření se používá otočný dělicí stůl, na kterém musí být vačka přesně vystředěna,
- úhlové natočení se provede na otočném stole (dělení po 1'), poloměr zakřivení je odečítán v délkových jednotkách v osovém systému **x** a **y**, popř. se postupně nastavují předepsané souřadnice a kontroluje se odchylka od skutečného profilu,
- přesnost se pohybuje nad 0,005 mm.

Kontrola pomoci profilprojektoru

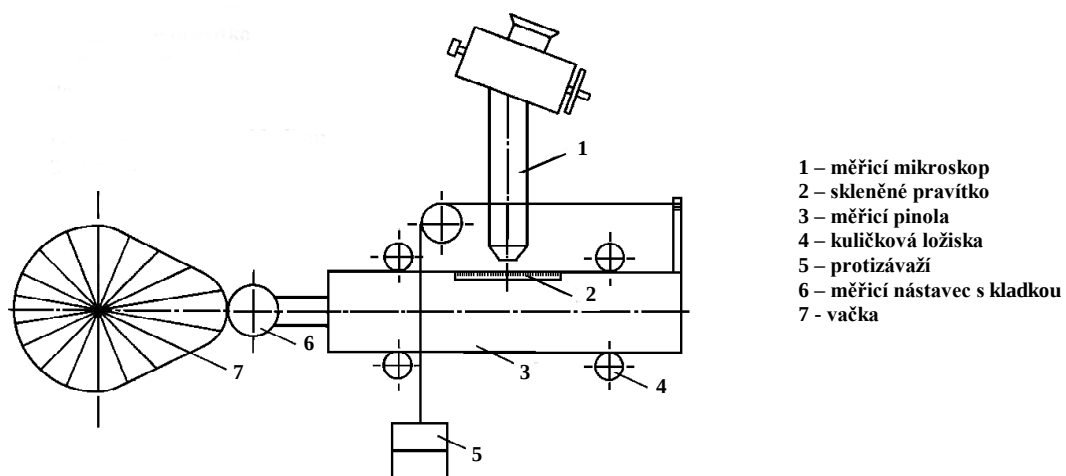
- provádí se zobrazením obrysu vačky na matnici profilprojektoru,
- promítnutý profil se porovnává s profilem zhotoveným na průsvitném papíru,
- odchylky tvaru se zjistí odměřením pomocí mikrometrických nebo digitálních měřitek (možnost snímat konturu tvaru v ose **x** popř. **y** pomocí fotobuňky).

Kontrola na souřadnicovém měřicím stroji

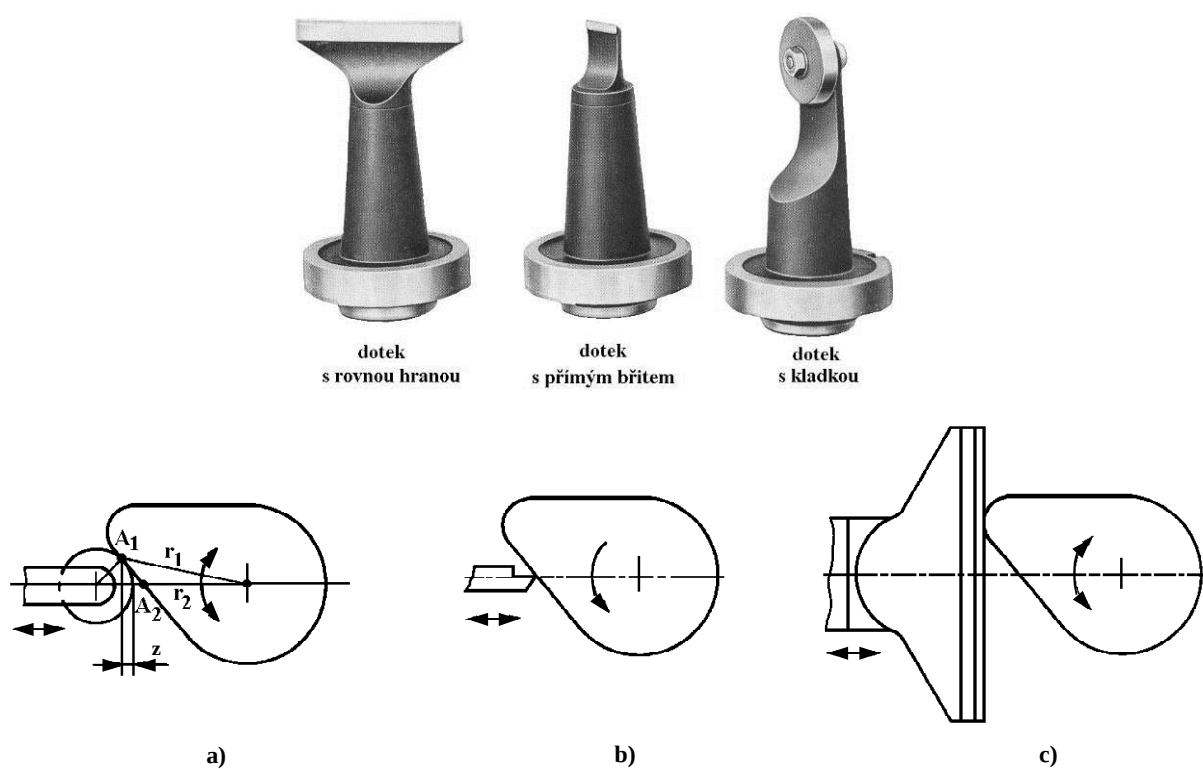
- nejvhodnější je stroj s plynulým pohybem snímací hlavy,
- součást je ustavena v předepsaném souřadném systému,
- vhodným dotykem je snímán v souřadném systému profil (v CNC režimu),
- snímač objede obvod vačky a vyhodnotí požadované souřadnice,
- grafický záznam skutečného profilu je možno porovnat s požadovaným profilem, popř. s tolerančním polem.

Kontrola vaček pomoci vačkového přístroje

- ke kontrole je používán vačkový přístroj (schéma **obr. 9.3**), který pracuje v sestavě s optickou dělicí hlavou umístěnou na společném loži,
- přístroj je opatřen doteky, které jsou zakončeny rovnou hranou, přímým břitem nebo kladkou
- použití doteků závisí na konstrukci vačky (příklady **obr. 9.4**),
- dotek má mít tvar prvku, který je vačkou ovládán (použitý prvek kladka – její průměr má být roven tvořicímu průměru vačky).



Obr. 9.3 Vačkový přístroj



Obr. 9.4 Dotečky a jejich použití dle konstrukce vačky

a – dotek s kladkou, b – dotek s přímým břitem, c – dotek s rovnou hranou

Postup měření:

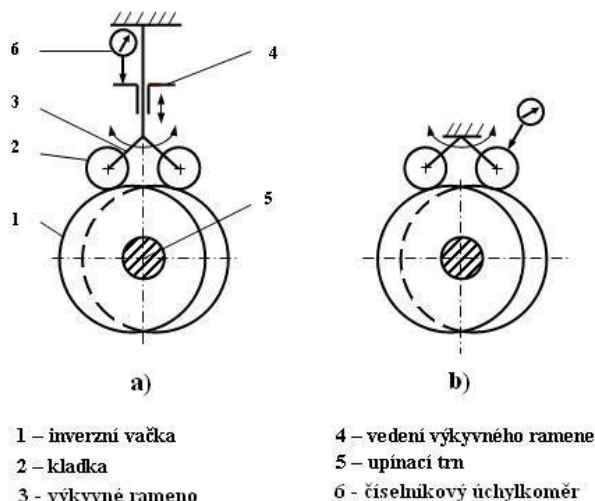
- měřená vačka se upne na otočný stůl nebo do dělicí hlavy a vystředí se (osa optické měřicí hlavy musí být totožná s osou koníku),
- vlastní měření se provádí pomocným zařízením (vačkovým přístrojem opatřeným kuličkovým dotekem, popř. jiným dotekem, číselníkovým úchylkoměrem s držákem, který má možnost pohybu jen v potřebných směrech – **obr. 9.5**)
- měřicí metoda závisí na konstrukci vačky,
- dotek je nutno volit dle specifikace kladky na výkrese,
- vačkový přístroj je ustaven kolmo na osu dělicí hlavy a koníku,
- kontrolují se hodnoty úhlových pořadnic pro příslušná úhlová pootočení (nejlépe po celých stupních).



Obr. 9.5. Kontrola vačky s pomoci optické dělicí hlavy a číselníkového úchylkoměru

9.2 Kontrola inverzních vaček

Inverzní vačky jsou dvojvačky, u kterých jedna dráha zvedá a druhá spouští zvedák. Zvedáky jsou pod úhlem, který je závislý na jejich rozteči. Princip inverze spočívá v tom, že obě vačky by měly zvedat a spouštět zvedáky o stejnou hodnotu v průběhu celého zdvihu. Vzhledem k výrobním tolerancím dochází k nepřesnostem, které způsobují odchylky ve zdvihu – odchylka inverze. Kontrola se provádí na speciálních přístrojích (princip viz **obr. 9.6**)



Obr. 9.6 Princip kontroly inverzních vaček

a – pro měřidlo vyhodnocující polovinu inverze vačky
b – pro měřidlo vyhodnocující celou inverzi vačky

Princip měřidla (**obr. 9.6**):

- spočívá v odvalování dvou kladek shodných s kladkami zvedáků po obvodu dvojvačky,
- kladky jsou otočně uchyceny na výkyvném dvojrameni,
- na **obr. 9.6a** je schéma měřidla, které vyhodnocuje polovinu odchylky inverze,
- na **obr. 9.6b** je schéma měřidla, které vyhodnocuje celou odchylku inverze,
- měřidlo se nastavuje etalonem ve tvaru dvou soustředných kruhů,
- hodnota přípustné odchylky inverze je dána technickou dokumentací,
- při měření velmi záleží na čistotě upínacích a měřících ploch a na správném ustavení vačky na trn, který je u měřidla případ a) rozpěrný a u měřidla případ b) pevný,
- chyba inverze je ovlivněna buď posunutím tvaru vačky, nebo překročením tolerance tvaru,
- vlastní tvar vačky je nutno před započítáním výroby zkontrolovat vhodnou metodou (např. na vačkovém přístroji nebo souřadnicovém měřicím stroji).

9.3 Kontrola vačkových hřídelí

Vačkové hřídele:

- je možno kontrolovat na přístroji pro kontrolu vaček, popř. speciálními elektronickými přístroji, které provedou najednou vyhodnocení celého vačkového hřídele (vhodné pro sériovou výrobu),
- je možno kontrolovat na souřadnicovém měřicím stroji vybaveném křivkovými speciálními vačkovými programy včetně grafického záznamu (vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu).



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s problematikou kontroly vačkových systémů. Poznatky získané v této kapitole můžete uplatnit v praktické části výuky.



Kontrolní otázky

1. Co je to vačka.
2. K čemu slouží vačkové systémy.
3. Jaké znáte typy vaček.

4. Jaké jsou možnosti kontroly vačkových systémů.
5. Jaké doteky se používají dle jejich konstrukce.
6. Je nutné před měřením zvážit konstrukční řešení použitého doteku.



Úlohy k řešení

9.4 Zadání úlohy č. 8

1. Proved'te proměření potřebných parametrů u zadané vačky pomocí optické dělicí hlavy a vačkového přístroje za účelem posouzení její rozměrové a tvarové přesnosti.
2. Dle naměřených parametrů změřenou vačku narýsujte ve vhodném měřítku a určete hodnotu maximálního a minimálního zdvihu.

Postup práce:

1. Proved'te kontrolu měřidel a měřicích přístrojů.
2. Proved'te vyrovnaní měřicího systému za účelem zajištění souososti osy optické dělicí hlavy s osou koníku.
3. Proved'te ustavení vačkového přístroje s kladkou kolmo na osu dělicí hlavy a koníku.
4. Proved'te upnutí měřené vačky na kontrolním trnu popř. na lící desce dělicí hlavy, podepřete hrotem koníku a proved'te co nejpřesnější vystředění (vliv na přesnost měření).
5. Proved'te nastavení počáteční polohy vačky.
6. Proved'te proměření pořadnic poloměrů vačky při natočení $\alpha 10^\circ$.
7. Zjištěné hodnoty pořadnic pro jednotlivá pootočení sestavte do tabulky naměřených hodnot.
8. Proved'te vyhodnocení získaných dat.
9. Na základě zjištěných hodnot pořadnic poloměrů vačku narýsujte ve vhodném měřítku.
10. Proved'te zhodnocení úlohy.
11. Zkontrolujte teplotu a vlhkost v laboratoři.
12. Proved'te úklid pracoviště.
13. Zpracujte protokol z měření.

Pomůcky a měřidla:

- a) optická dělicí hlava
- b) koník
- c) vačkový přístroj
- d) vačkový hřídel – kontrolovaná vačka
- e) literatura
- f) čisticí prostředky
- g) lože
- h) literatura



Další zdroje (Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu)

- [1] MLČOCH, Lubomír; MAREK, Mirko; DVOŘÁK, Rudolf. *Řízení jakosti a metrologie – Návod ke cvičení*. Praha: ČVUT Praha, 1986, 120 s.
- [2] MLČOCH, Lubomír; SLIMÁK, Ivan. *Řízení kvality a strojírenská metrologie*. Praha: SNTL/ALFA Praha, 1987. 330 s.
- [3] DVOŘÁK, Rudolf; CHMELÍK, Václav; MAREK, Mirko. *Strojírenská metrologie – Návod ke cvičení*. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha, 1992. 122 s. ISBN 80-01-00876-2
- [4] VAČKÁŘ, Josef; PERNÍKÁŘ, Jiří; BUMBÁLEK, Leoš. *Jakost a strojírenská metrologie – Návod do cvičení*. Brno: VUT Brno, 1993. 95 s. ISBN 80-214-0524-4
- [5] PERNÍKÁŘ, Jiří; Tykal, Miroslav; VAČKÁŘ, Josef. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM 2001, 151 s., ISBN 80-80-214-1997-0
- [6] ČSN EN ISO 3650 (25 3308) Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Etalony délek – Koncové měrky. Praha: Český normalizační institut Praha, 2000. 22 s.
- [7] TICHÁ, Šárka; ADAMEC, Jaromír. *Návod do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2008, 92 s. ISBN 978-80-248-1916-7
- [8] TICHÁ Šárka. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112s. ISBN 80-248-0672-X
- [9] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část 2, Základy řízení jakosti*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2006, 88 s. ISBN 80-248-1209-6
- [10] PETŘKOVSKÁ, Lenka; ČEPOVÁ, Lenka. *Strojírenská metrologie*. Studijní opora „Strojírenská metrologie“. Ostrava. VŠB-TU Ostrava, 2011
- [11] <http://www.cmi.cz>
- [12] ADAMCZAK, Stanisław. *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa. Wydawnictwa Naukowo-techniczne, 2008. 299s. ISBN 978-83-204-3526-9
- [13] ADAMCZAK, Stanisław; MAKIEŁA, Włodzimierz. *Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników – ćwiczenia praktyczne*. Warszawa. Wydawnictwa Naukowo-techniczne, 2010. 182s. ISBN 978-83-204-3672-3
- [14] RŮŽIČKA, Václav. *Kontrola ozubených kol*, Praha: SNTL Praha, 1957, 406 s.
- [15] BAUSCH, Thomas. *Innovative Zahnradfertigung*, Renningen, expert verlag, 2006, 780 S. ISBN 978-3-8169-1871-4.
- [16] MAAG Taschenbuch. *Berechnung und Herstellung von Verzahnungen in Theorie und Praxis*, Zürich: MAAG-Zahnräder Aktiengesellschaft, 1985, 727 S.
- [17] LINKE, Heinz. *Stirnradsverzahnung - Berechnung, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995, 763 S. ISBN 3-446-18785-5.

- [18] ČSN 01 4671-1. *Čelní ozubená kola – Praktické předpisy pro přejímky – Část 1: Přejímka podle stejnolehých boků zubů*. Praha: Český normalizační institut Praha, 1997, 40 s.
- [19] ČSN 01 4682. *Ozubené převody čelné, lícování*, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření Praha, 1980, 72 s.
- [20] DIN 3961. *Toleranzen für Stirnradverzähnen- Grundlagen*. Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1978, 12 S.
- [21] DIN 3962-Teil 1. *Toleranzen für Stirnradverzähnen- Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen*. Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1978, 17 S.
- [22] DIN 3962-Teil 2. *Toleranzen für Stirnradverzähnen- Toleranzen für Flankenlinienabweichungen*. Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1978, 2 S.
- [23] DIN 3963. *Toleranzen für Stirnradverzähnen-Toleranzen für Wälzabweichungen*. Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung