

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnosti kontroly ozubení ve výrobním prostředí**

**Means of in-line gear inspection**

Autor: Bc. Daniel Hemer

Studijní obor: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hemer** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **424825**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Možnosti kontroly ozubení ve výrobním prostředí**

Název diplomové práce anglicky:

**Means of in-line gear inspection**

Pokyny pro vypracování:

Způsoby a metody kontroly ozubených kol  
Opotřebení a poškození ozubených kol  
Dostupné technické prostředky pro kontrolu ozubení  
Postup měření ozubení s využitím CMM  
Analýza defektů ve výrobě ozubení na vybraných dílech

Seznam doporučené literatury:

ČSN ISO 10825 Ozubená kola - Opotřebení a poškození zubů - Terminologie  
ČSN ISO 1328-1 Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola  
ČSN ISO 1328-2 Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO - Část 2: Definice a hodnoty dovolených úchylek relevantní k radiálním kinematickým úchytkám a informativně k obvodovému házení

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za kvalitní a odborné vedení, čas věnovaný při konzultacích, trpělivost, vstřícnost a cenné rady při zpracování této práce.

A také Ing. Lubomíru Štajnochrovi, bych chtěl poděkovat za nepostradatelnou pomoc s praktickou částí této práce, za jeho čas, odborné a praktické rady a za celkovou podporu.

Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za pomoc s měřením praktické části této práce.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů,  
které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou **kontroly ozubení ve výrobním prostředí**.

Úvodní část pojednává o charakteristice ozubení, způsobech a možnostech výroby ozubených kol. Zmiňuji možné druhy poškození u valivých soukolí. Současně jsou zde uvedeny způsoby a možnosti měření ozubení.

V rámci realizace experimentu je popsána problematika defektů zadaných součástí a následně vývoj přístupu k jejich vyhodnocení. Nejprve proběhla vizualizace pomocí digitálního mikroskopu, měření na CMM (souřadnicovém měřicím stroji) a následně studie aplikace 2D scanneru pro vyhodnocení.

### **Klíčová slova:**

Ozubené kolo, soukolí, ozubení, kolo, čelní ozubení, šikmé ozubení, evolventa, obrábění, frézování, odvalování, obrážení, měření, zub, profil, defekt, laser, scanner

## **Abstract of Thesis**

This diploma thesis looks into problematics of **gear inspection in production factory environment**.

Introductory part deals with gearing characteristics, production methods and options of gears. I mention possible types of damage on rolling gear pair. Also there are introduced methods and options of measurement of gears.

Problematics with defect of specified components and subsequently development of approach to defect evaluation are described within implementation of experiment. Vizualization using digital microscope was carried out on first phase. Measurement in next phase was carried out by coordination measurement machine which delivered result via CMM. Study of application of 2D scanner for evaluation was delivered on last phase.

### **Key words:**

Toothed gear, gears pair, toothing, wheel, spur gear, helical gear, involute, machining, milling, hobbing, shaping, measurement, gear tooth, profile, defect, laser, scanner

## Obsah

Úvod .....	7
1 Úvod do problematiky ozubených kol .....	8
1.1 Charakteristika ozubení .....	8
2 Výroba ozubení .....	15
2.1 Frézování .....	16
2.2 Obrážení a hoblování .....	20
2.3 Protahování .....	23
2.4 InvoMilling .....	25
2.5 Power skiving .....	26
2.6 Dokončovací operace .....	28
3 Druhy poškození zubů u valivých soukolí .....	33
3.1 Poškození povrchu zubů .....	34
4 Měření ozubených kol .....	37
4.1 Měření pomocí dílenských měřidel .....	38
4.2 Měření s využitím strojů .....	40
5 Realizace experimentu .....	57
5.1 Zadané součásti .....	58
5.2 Lokalizace defektů a jejich vizualizace .....	61
5.3 Měření defektů ozubených kol na CMM Zeiss Prismo 7 .....	66
5.4 Analýza zvolené bezdotykové metody snímání 2D scannerem .....	72
6 Závěr .....	93
7 Seznam použité literatury: .....	97
8 Seznam obrázků .....	101
9 Seznam tabulek .....	105

## Úvod

V zásadě se dá říci, že ozubené kolo je určitým symbolem strojírenství. Je součástí pohybových ústrojí většiny strojů, dopravních prostředků a zařízení. Ozubené převody představují nejvýznamnější a nejrozšířenější druh převodových mechanismů. Pracují na principu mechanického záběru, kde probíhá bezprostřední dotek spolu zabírajících členů, a síly se tak přenáší tlakem. Základem tzv. soukolí je minimálně dvojice ozubených kol, ve které jedno plní funkci hnací a ostatní kola jsou jím hnána. Menší kola v takovéto sestavě jsou označována jako pastorek a větší jako kola. Základním úkolem soukolí je pomocí vytvořené kinematické a silové vazby přenést vzájemně točivý moment, nejčastěji mezi hřídeli a vykázat tak co nejvyšší mechanickou účinnost. Dále se od nich vyžaduje vysoká přesnost, trvanlivost a bezhlučnost, na kterou se v dnešní době klade obzvlášť vysoký důraz. [1]



*Obrázek 1 – Příklad vnějších ozubených kol s čelními přímými zuby [2]*

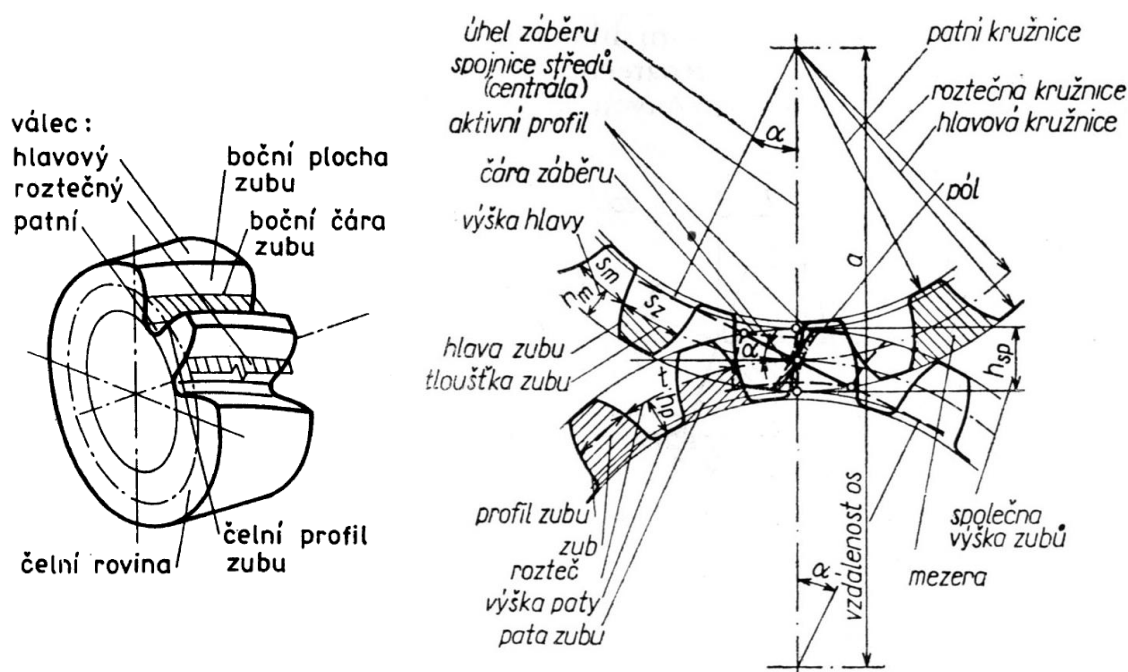
Hlavním předmětem teoretické části této práce je studium problematiky ozubených kol, v rámci kterého se čtenář seznámí se základními informacemi tohoto tématu. Vytváří tak přehled o charakteristice ozubení, jeho výrobních metodách, opotřebení a poškození ozubených kol, a způsobech a možnostech jejich kontroly.

Hlavním cílem realizovaného experimentu byla analýza dodaných ozubených kol s defekty od průmyslového partnera, pomocí vybavení laboratoří Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. V rámci této analýzy proběhla vizualizace na digitálním mikroskopu Keyence řada VHX-6000 a proměření defektů na CMM Zeiss Prismo 7 (souřadnicový měřicí stroj). Následně se věnuji studii návrhu a realizaci zvolené metodiky testování s využitím 2D skeneru, která obsahuje návrh prototypu pracoviště a studii snímání povrchu boků zubů s defektem s využitím frézky FC 22 CNC. Studie obsahuje problematiku faktorů, které limitují snímání a samotné zjištění, zda lze tyto defekty touto zvolenou metodou vyhodnotit.

# 1 Úvod do problematiky ozubených kol

## 1.1 Charakteristika ozubení

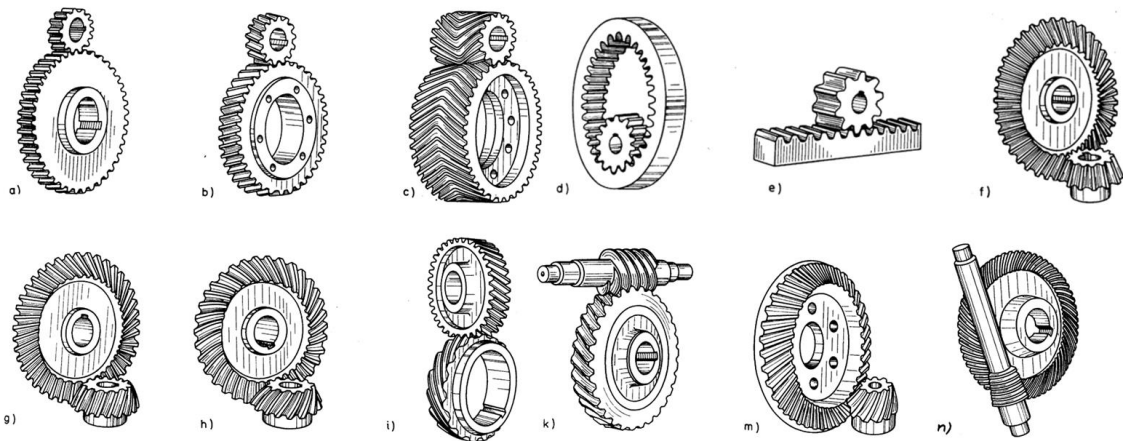
Základem ozubeného kola je tělo a dále ozubený věnec, který je radiálně vymezen hlavovou a patní kružnicí, případně plochou. Věnec je tvořen zuby rovnoměrně rozloženými po celém obvodu kola a geometricky určenými především bočními plochami (viz. Obrázek 2 vlevo). Roztečná plocha rozděluje zub na hlavovou a patní část. Hlavová a patní plocha jsou navzájem souosé a jsou stejného typu jako plocha roztečná. V axiálním směru vymezují ozubený věnec dvě čelní plochy, jejichž vzdálenost určuje šířku ozubeného věnce. [1]



Obrázek 2 – Vlevo - Popis ozubeného kola; vpravo – Geometrie evolventního ozubení [1,3]

Základní dělení ozubených kol lze jednoduše provést pomocí vzájemné polohy hlavové a patní kružnice (plochy) na kola s vnějším a vnitřním ozubením. Dle tvaru čelní profilové křivky dělíme nejčastěji na kola s ozubením evolventním nebo cykloidním. Podle relativního pohybu základních těles se ozubené převody (soukolí) dělí na soukolí valivá a šroubová. Dále se mohou dělit například podle tvaru zubů, vzájemné polohy os, velikosti obvodové rychlosti a tak dále. (viz. Obrázek 3) [1]





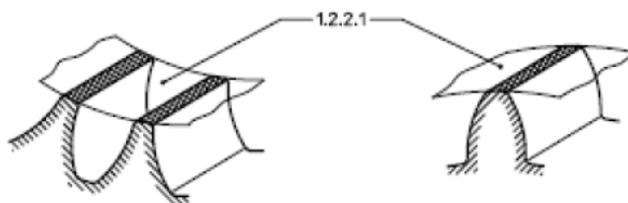
Obrázek 3 - Druhy ozubení: Čelní s přímými zuby - a) vnější, d) vnitřní, e) ozubené kolo a hřeben; Čelní s šikmými zuby b); Čelní s šípovými zuby c); Kuželové – f) s přímými zuby, g) s šikmými zuby, h) se zakřivenými zuby; Šroubové – i) válcové, m) kuželové; Šnekové k); Spiroidní n) [1]

U ozubení se můžeme setkat s pojmem *ozubený hřeben*. Jedná se o součást, která je tvořena rovným tělem a zuby rovnoměrně rozloženými po celé funkční délce. Je obdobně jako u ozubených kol radiálně vymezen hlavovou a patní plochou a v axiálním směru vymezený dvěma čelními plochami, jejichž vzdálenost určuje šířku ozubeného hřebenu. Jeho hlavním rozdílem oproti ozubenému kolu je schopnost převést ve spojení s pastorkem otáčivý pohyb v pohyb posuvný. Podobu tohoto spojení lze vidět na Obrázek 3 e). [1]

Obecně známé výhody ozubených mechanismů jsou spolehlivost, životnost, mechanická účinnost, přesnost dodržení převodového poměru, a v neposlední řadě dosažitelnost vysokých převodových poměrů. Na druhou stranu mezi nevýhody spadají například složitější výroba, vyšší náklady na výrobu, hluk, chvění, tuhá vazba členů neumožňující tlumení rázů nebo omezení v počtu zubů.

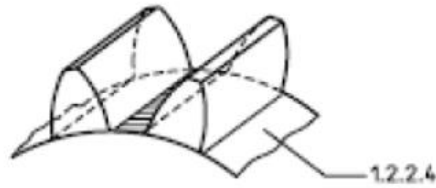
#### Terminologie vztahující se ke geometrii zubu:

- **Hlavová plocha** je souosá rotační plocha ohraničující vnější okraje vnějších zubů nebo vnitřní okraje vnitřních zubů (označena na Obrázek 4 popiskem 1.2.2.1) [4]



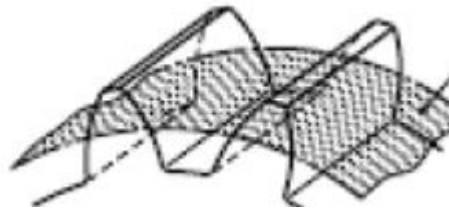
Obrázek 4 - Hlavová plocha [4]

- **Patní plocha** je souosá rotační plocha ohraničující vnitřní okraje mezer zubů (označena na Obrázek 5 popiskem 1.2.2.4). [4]



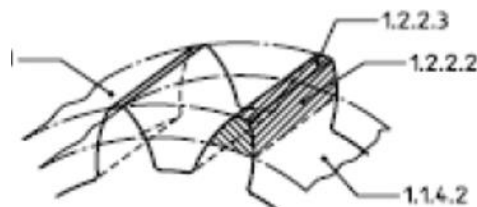
Obrázek 5 -- Patní plocha [4]

- **Referenční plocha** je imaginární relativní konvenčně dohodnutá plocha, k níž jsou stanoveny rozměry zubů kola. [4]



Obrázek 6 - Referenční plocha [4]

- **Hlava zubu** je částí zubu mezi referenční plochou a hlavovou plochou (označena na Obrázek 7 popiskem 1.2.2.2). [4]
- **Vrchol zubu** je částí hlavové plochy omezený protilehlými boky zubu (označena na Obrázek 7 popiskem 1.2.2.3). [4]



Obrázek 7 – Hlava zubu, Vrchol zubu [4]

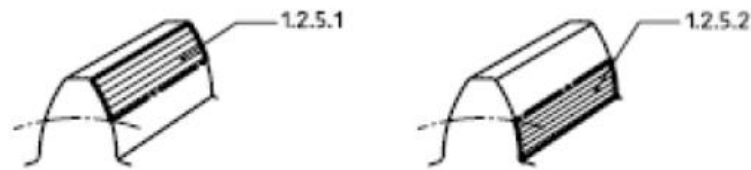
- **Pata zubu** je částí zubu mezi referenční a patní plochou (označena na Obrázek 8 popiskem 1.2.2.5). [4]



Obrázek 8 – Pata zubu [4]

- **Boční čára zubu** je průřeznicí boku zubu a referenční plochy. [4]

- **Bok zubu** je část plochy zubu, která leží mezi hlavovou a patní plochou. Obsahuje hlavovou (označena na Obrázek 9 popiskem 1.2.5.1) a patní část (označena na Obrázek 9 popiskem 1.2.5.2). Společně tedy tvoří celý bok zubu. [4]



Obrázek 9 - Bok zubu [4]

- **Profil zubu** je tvořen průsečnicí zubu s libovolně stanovenou plochou, která také protíná roztečnou plochu. [4]



Obrázek 10 - Profil zubu [4]

- **Čelní profil** je průsečnicí boku zubu s plochou, která je kolmá k tvořícím přímkám roztečné plochy. [4]
- **Normální profil** je průsečnicí boku zubu s plochou kolmou k boční čáře zubu. [4]

### Evolventní a cykloidní ozubení

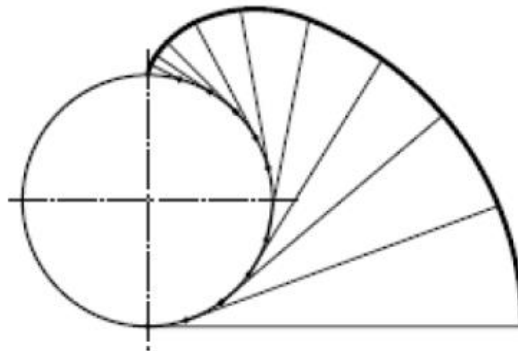
Z hlediska využití je evolventní ozubení zdaleka nejpoužívanějším typem. V porovnání s cykloidním jsou výhody například následující:

- Evolventní ozubení má jen jedno zakřivení, což umožňuje snadnou výrobu oproti cykloidnímu, které má zakřivení dvojité.
- U evolventního ozubení je trajektorie dráhy záběru přímková, a z toho důvodu zůstává roztečný úhel konstantní. U cykloidního ozubení se roztečný úhel stále mění, z čehož plyne neustále se měnící zátěžová síla a kratší životnost ozubení.
- Malý počet výrobních nástrojů pro vyrobení kompletní sady zaměnitelných převodů pro různé body styku ozubených kol – snadnější a levnější výroba. [5]

Výhody cykloidního ozubení:

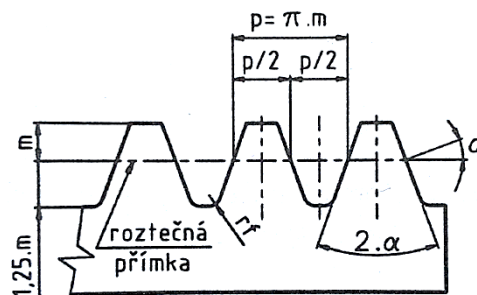
- Cykloida má rozvinutější strany zubů, což znamená více materiálu u paty zubu pro zatížení. Právě vyšší objem materiálu zaručí větší sílu zubu při působení sil.
- Z důvodu absence interference se mohou konstruovat kola s malým počtem zubů. To je důvodem využití tohoto tvaru zubů v hodinářství a obdobných zaměřeních, kde je potřeba malý počet zubů s adekvátní pevností. S malým počtem zubů u evolventního ozubení nastává problém s čtenými korekcemi, které mohou vést ke špičatosti nebo ke značnému podřezání. [5]

Evolventní ozubení má čelní profil zubu o tvaru **evolventy**, tj. rovinná křivka tvořená bodem na přímce (dráhy záběru), odvalující se bez skluzu vně nehybné základní kružnici.



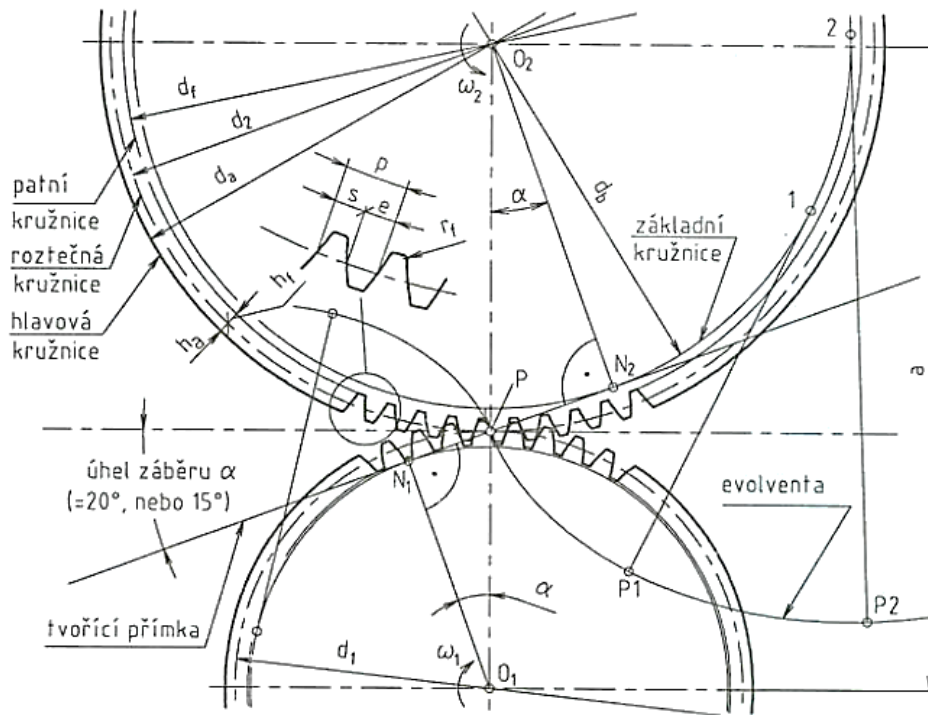
Obrázek 11 – Evolventa [4]

Tento bod styku dvou zubů (na Obrázek 13 - značen P), je nositelem přenášené síly. Zvětšením základní kružnice do nekonečna se evolventa boku zubu stane přímkou a vznikne základní profil (Obrázek 12), který je základním tvarem nástroje pro výrobu ozubených kol (odvalování, obrázení apod.) [6]



Obrázek 12 - Základní profil [6]

**Základní pojmy evolventního ozubení s přímými zuby: [4,6]**



Obrázek 13 – Evolventní ozubení s přímými zuby [6]

Z pohledu specifikace je tzv. základní mírou ozubených kol jeho **modul  $m$** , kterému jsou všechny rozměry úměrné. Ten je odstupňován normalizovanou řadou (viz. Tabulka 1) a charakterizován vztahem:

$$(1) \quad m = \frac{d}{z}, \text{ kde:}$$

$m$ ... modul ozubení

$d$ ... průměr roztečné kružnice [mm]

$z$ ... počet zubů

Tabulka 1 – Normalizované moduly – výběr hodnot [mm] [6]

1. řada (přednostní)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,25	1,5
2. řada	0,14	0,18	0,22	0,28	0,35	0,45	0,55	0,7	0,9	1,125	1,375	1,75

1. řada (přednostní)	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50
2. řada	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5	7	9	11	14	18	22	28	36	45	55

Rozdílnost otáčivého pohybu mezi dvěma hřídeli charakterizuje **převodový poměr  $i$** , který je kinematicky definován například podílem roztečných průměrů  $d$ , počtu zubů  $z$  nebo úhlových

rychlostí  $\omega$  spolu zabírajících členů. Převodový poměr  $i$  je u přímého ozubení s přímými zuby stejný, jako kdyby se po sobě odvalovaly dva válce o průměru  $d_2$  a  $d_1$ :

$$(2) \quad i = \frac{\pi \cdot d_2}{\pi \cdot d_1} = \frac{p \cdot z_2}{p \cdot z_1} = \frac{\pi \cdot m \cdot z_2}{\pi \cdot m \cdot z_1}, \text{ kde:}$$

Zubová rozteč  $p$  je délka kruhového oblouku mezi dvěma sousedními zuby měřená na roztečné kružnici. Boky zubů jsou části evolvent ohraničené shora hlavovou kružnicí  $d_a = d + 2 \cdot h_a = d + 2 \cdot m$  a zdola patní kružnicí  $d_f = d - 2 \cdot h_f = d - 2,5 \cdot m$ . Tloušťka zubu a šířka zubové mezery na roztečné kružnici je  $s = e = p/2$ . Evolventy vytváří bod P tvořící přímky odvalující se po základních kružnicích. [6]

$$(3) \quad i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}, \text{ kde:}$$

$d$ ... průměr roztečné kružnice [mm]       $m$ ... modul ozubení      1... parametr hnacího kola  
 $p$ ... zubová rozteč [mm]       $\omega$ ... úhlová rychlost [rad/s]      2... parametr hnaného kola  
 $z$ ... počet zubů       $n$ ... otáčky kola [1/s]

Základní profil pro evolventní ozubení se šikmými zuby platí: [6]

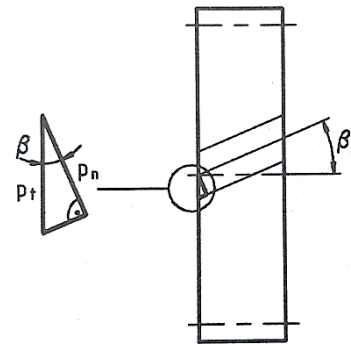
$$(4) \quad i = \frac{\pi \cdot d_2}{\pi \cdot d_1} = \frac{p_t \cdot z_2}{p_t \cdot z_1} = \frac{\pi \cdot m_t \cdot z_2}{\pi \cdot m_t \cdot z_1} \Rightarrow d = m_t \cdot z, \quad p_t = \pi \cdot m_t$$

$$(5) \quad \bullet \quad m_n = m_t \cdot \cos \beta$$

$$(6) \quad \bullet \quad d_a = d + 2h_a = d + 2m_n$$

$$(7) \quad \bullet \quad d_f = d - 2h_f = d - 2,5m_n$$

$$(8) \quad \bullet \quad d_b = d \cdot \cos \beta$$



Obrázek 14 – Ozubené kolo se šikmými zuby [6]

$p_t$ ... čelní rozteč – je zubová rozteč měřená v čelní rovině oz. kola

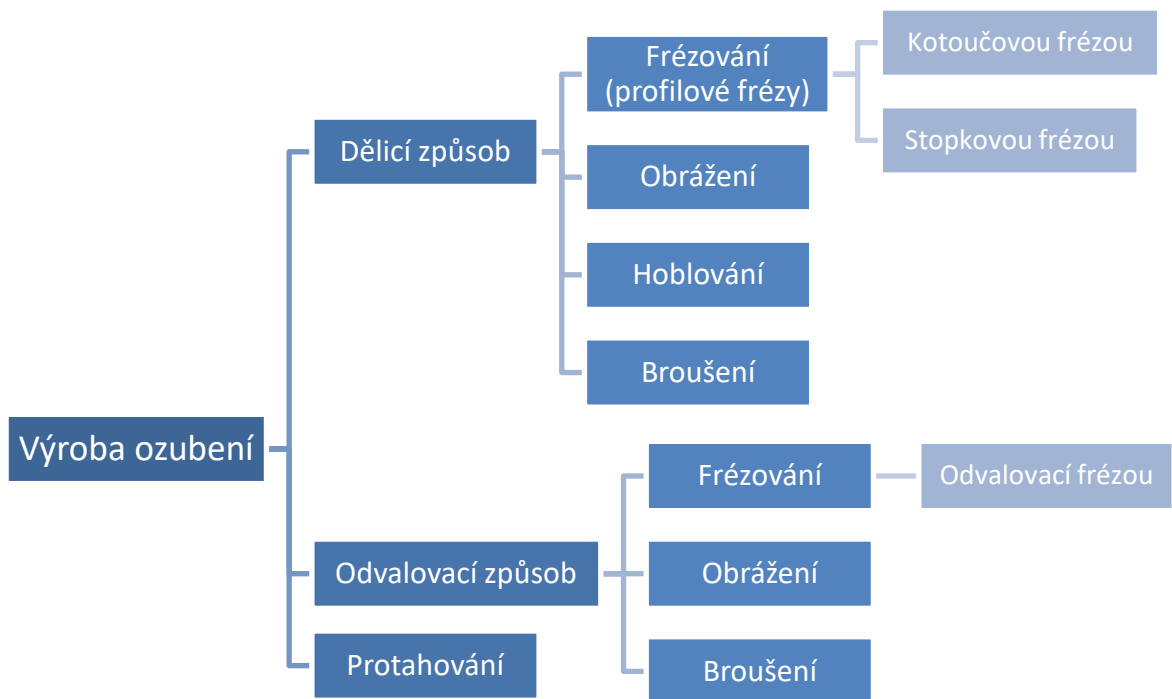
$p_n$ ... normální rozteč – je zubová rozteč měřená v normální rovině ozubeného kola (kolmo na boky zubů)

$m_t$ ... čelní modul

$m_n$ ... normální modul – je normalizovaný - viz. Tabulka 1

## 2 Výroba ozubení

Výroba ozubení spadá z pohledu technologie do velmi náročných operací a patří k nejnáročnějším odvětvím strojírenské výroby. Vyžaduje kvalitní stroje, výkonné a přesné nástroje a také vysokou kvalifikaci techniků. Tvar ozubeného kola je velmi složitý a závislý převážně na jeho funkci. Z pohledu výroby existuje mnoho metod a postupů. Vše podléhá a záleží na těchto požadavcích: sériovost, výrobní náklady, přesnost, produktivita a další. Bez pochyb nejrozšířenější výrobní metodou ozubení je obrábění, které je dále rozděleno na obrábění **dělicím** a **odvalovacím** způsobem a protahováním. U obrábění je potom nejčastěji zvolena metoda frézování. [7]



Graf 1 – Způsoby výroby ozubení

**Dělicím způsobem** se profily zubových mezer ozubeného kola vytvářejí tvarovou frézou, postupně vzniká jedna zubová mezera za druhou za použití dělicího přístroje.

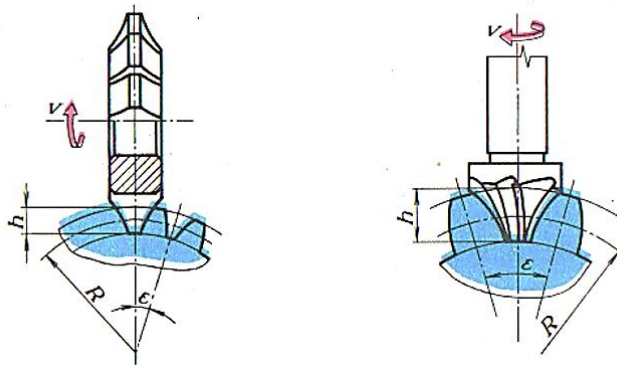
**Odvalovacím způsobem** se profily zubových mezer vytvářejí plynulým odvalováním tvořícího profilu po valivé kružnici ozubeného kola.

## 2.1 Frézování

Frézováním se obrábějí rovinné i tvarové plochy otáčejícím se vícebřitým nástrojem, tj. frézou. Nástroj, jehož břity jsou rozloženy na povrchu válcové, kuželové nebo jiné rotační plochy, jejíž osa se shoduje s osou otáčení nástroje. Jednotlivé břity nástroje nejsou trvale v záběru, ale jen po určitou dobu otáčky. Břity, které právě neodebírají třísku z materiálu, se ochlazují. [7]

### 2.1.1 Dělicím způsobem

Frézování ozubení dělicím způsobem se provádí tvarovými frézami, jejichž profil přesně odpovídá tvaru zubové mezery. Jako nástroje se používají buď frézy kotoučové (Obrázek 15 – vlevo) nebo stopkové (Obrázek 15 – vpravo). Po vyfrézování zubové mezery se obrobek pootočí kolem své osy o jednu rozteč a následuje frézování další zubové mezery. Tento proces se opakuje, až se vyfrézují všechny zuby. [7]



Obrázek 15 – Vlevo – Kotoučová fréza na evolventní ozubení, vpravo – Stopkové fréza na evolventní ozubení [7]

Výhodou tohoto způsobu je možnost využití běžných univerzálních frézek s dělicími přístroji. Z toho důvodu je využití převážně v menších závodech pro kusovou výrobu a s nižšími nároky na přesnost. Metoda je často využívána pro výrobu kol velkých průměrů a modulů, pro něž se nevyrobějí odvalovací frézy. Dále se s použitím čepových fréz aplikuje pro výrobu šípových ozubení. Nevýhodou dělicího způsobu byla vždy nízká přesnost a obtížnost přesného nastavení vzájemné polohy nástroje s obrobkem. Samozřejmě záleží jakými prostředky a vybaveností výrobce disponuje. Například na Obrázek 16 je moderní pojetí kotoučové frézy CoroMill® 172 s možností výměny břitových destiček od firmy SandvikCoromat, která je jedním z předních výrobců obráběcích nástrojů. [7]

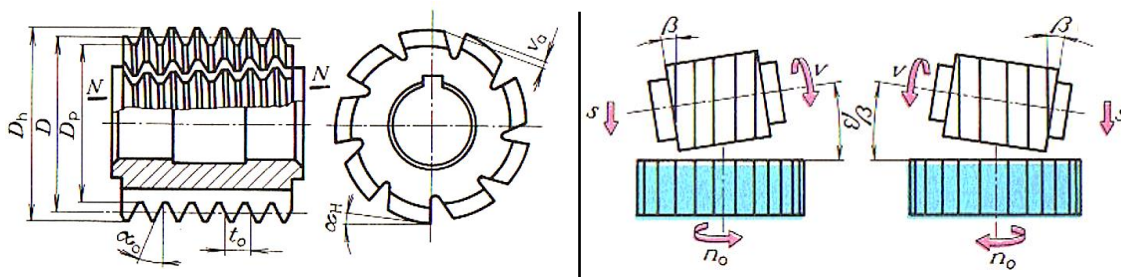




Obrázek 16 - Kotoučová fréza CoroMill® 172 [8]

### 2.1.2 Odvalovacím způsobem

Frézování odvalovacím způsobem je nejrozšířenějším způsobem výroby ozubení především pro vysokou produktivitu práce a dobrou přesnost výsledného ozubení. Nejčastěji jsou pro tento způsob využívány jednoúčelové stroje. Jako nástroj se používá odvalovací fréza (Obrázek 17 - vlevo), která s obrobkem představuje záběr šroubového soukolí. Tato fréza má tvar evolventního šneku, jejíž profil v normální rovině je tvořen hřebenem základního profilu (Obrázek 12).

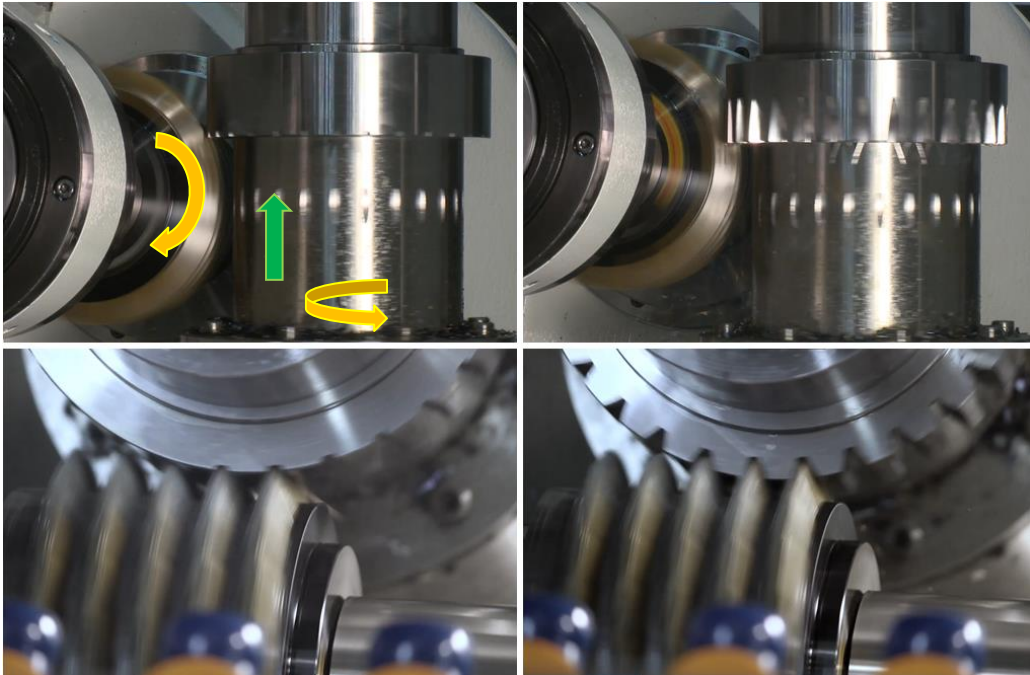


Obrázek 17 – Vlevo - Odvalovací fréza, vpravo – frézování přímého ozubení [7]

Postup odvalovací metody je následující:

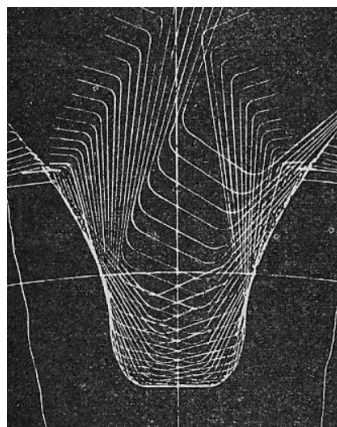
Fréza nejprve začíná mimo ozubené kolo ve vzdálenosti nástroje na hloubku zubové mezery  $h$ , a plynule za stálých otáček kolem své osy přejíždí konstantním posuvem po celé jeho šířce. Tím postupně odebírá materiál a vznikají zubové mezery. Ozubení tedy nevzniká po jednotlivých zubech, ale vzniká jich vždy několik současně. Nejprve proběhne na jedno přejetí po celé šířce kola hrubování, a poté se celý proces zopakuje v rámci dokončovací operace s frézou určenou pro dokončování. Na následujícím Obrázek 18 lze vidět postup odvalovacího frézování firmou SandvikCoromat. Parametry, jako je řezná rychlost ( $V_c=180$  m/min) a otáčky, se pro tyto dvě operace nijak výrazně neliší. Liší se pouze rychlost posuvu, která je u

dokončovací operace poloviční než u hrubování. Odpadají zde časové prodlevy, které jsou potřeba například u dělicího způsobu pro polohování vždy o jednu rozteč. [7,9]



Obrázek 18 - Odvalovací frézování ozubeného kola (žluté šipky značí směr otáček, zelená šipka značí směr pohybu nástroje vůči obrobku) [9]

Pokud má fréza v normální rovině tvar základního profilu, není možné vytvořit evolventu pouhou rotací nástroje. Evolventa vzniká rotací obrobku vůči nástroji a vytváří se tak postupně požadovaná zubová mezera (Obrázek 19). Velmi důležitým faktorem je naklonění osy frézky k ose obrobku o daný úhel, který odpovídá úhlu stoupání šroubovice na roztečném válci. Při frézování šikmých zubů se nástroj nakloní o úhel stoupání šroubovice a přičte se k tomu požadovaný úhel šikmých zubů. U menších modulů je zvykem frézovat na plnou hloubku, u větších modulů na několik řezů. V případě sousledného způsobu frézování je možné zvýšit řeznou rychlost o 20 - 40 % a posuv o 80 % oproti nesouslednému. [7]



Obrázek 19 - Vytváření zubové mezery [10]

Metoda je velmi přesná a produktivní. Na druhou stranu jsou pořizovací náklady na jednoúčelový stroj a nástroj vysoké, a to z důvodu složitosti stroje s provázanými pohyby jednotlivých os. Modernizace této metody se ubírá směrem k využití pětiosých a víceosých obráběcích center, která jsou pomocí počítače schopna napodobit a realizovat kinematiku frézování odvalovacím způsobem. Tato aplikace velice usnadňuje a urychluje výrobu ozubených kol především díky její hlavní výhodě, kterou je možnost výroby ozubeného kola na jedno upnutí do stroje. Tím se eliminují nepřesnosti vzniklé upínáním obrobku na jiný stroj. Lze kombinovat a postupně střídat různé obráběcí operace na jedno upnutí (například frézování a soustružení). Vše se samozřejmě projeví na výsledné pořizovací ceně stroje. Na druhou stranu není potřeba mít několik strojů (odvalovací frézka, frézku, soustruh atd.), ale stačí jedno obráběcí centrum řízené počítačem. I pro tento způsob frézování ozubených kol vyrábí firma SandvikCoromant - moderní odvalovací frézu CoroMill® 176 s vyměnitelnými břitovými destičkami s povlakem PVD AlTiCrN. [9]



*Obrázek 20 - Odvalovací frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami [11]*

Moderní frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami představují hospodárnější alternativu k přestřitelným HSS nástrojům (z rychlořezné oceli). Moduly těchto nástrojů se pohybují v rozmezí 3 až 10. Oproti nástrojům HSS jsou řezné rychlosti vyšší. Předpoklady pro využití vyšších řezných rychlostí, v kombinaci s uživatelsky komfortním prováděním výměn jednotlivých břitových destiček, dovolují zkrácení časů výrobního cyklu, což z ní činí vysoce produktivní volbu pro frézování ozubení. Často má nástroj několik modulárních alternativ pro volbu břitových destiček. [9]

## 2.2 Obrázení a hoblování

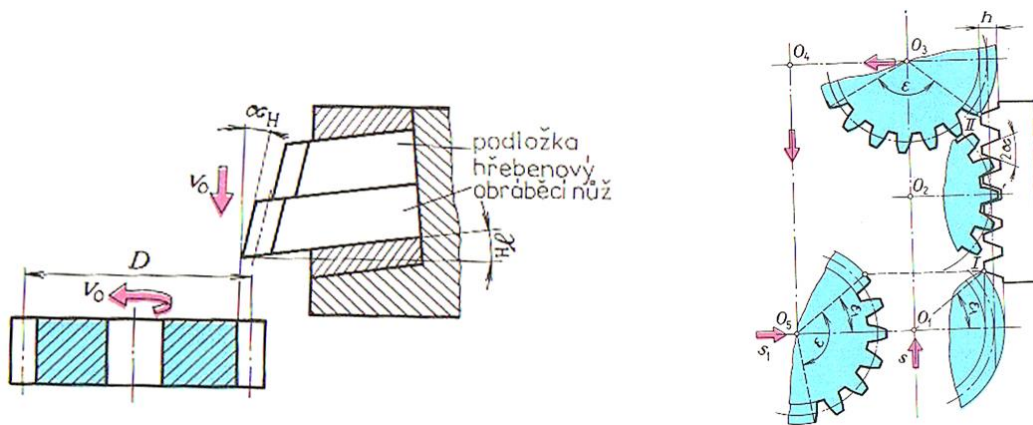
**Obrázení** je druh obrábění, při kterém hlavní pohyb vykonává vůči obrobku nástroj upevněný ve smykadle stroje. Posuv koná obrobek na konci vratného zdvihu smýkadla. Může být přímočarý nebo i kruhový. [7]

**Hoblování** je obrábění jednobřítým nástrojem, kde hlavní pohyb je přímočarý vratný a koná jej obvykle obrobek. Vedlejší pohyb, tj. posuv, je přerušovaný a kolmý na směr hlavního pohybu. Tento druh obrábění je pro výrobu ozubení oproti obrázení využíván zřídka. Využití nachází převážně při obrábění úzkých dlouhých ploch, jako jsou vedení, drážky, prizmata a podobně. V takovém případě je hospodárnější než frézování, zvláště při hoblování více noži současně. [7]

Při obrázení i hoblování je produktivita obrábění snížena zpětným zdvihem (zdvihem naprázdno). Z toho důvodu je zpětná rychlost tohoto zdvihu 1,5 až 4krát vyšší než rychlost pracovní. Uplatnění nachází převážně v kusové a malosériové výrobě. Výroba ozubených kol obrázením se aplikuje nejčastěji **odvalovacím způsobem**. Obrázení dělicím způsobem je nepřesné s nízkou produktivitou a využívá se pro ozubená kola velkých průměrů. Jako stroje se využívají jednoúčelové obrážky. [7]

### Obrázení hřebenovým nožem

Jedním z nej přesnějších způsobů obrábění zubů čelních kol s příkými, šikkými a šípovými zuby je obrázení hřebenovým nožem na obrážecích strojích vybavených odvalovacím systémem. Odvalovací vzájemný pohyb nástroje s obrobkem je založen na principu záběru nástroje s kolem. Existují dva způsoby, při kterých záleží, zda přímočarý pohyb koná obrobek nebo nástroj. Více používaným způsobem je ten, kde obrobek koná sdružený odvalovací pohyb otáčivý i přímočarý podél nástroje a samotný nástroj koná pouze řezný vratný pohyb ve směru kolmém k čelní rovině obrobku. Druhým způsobem je případ, kdy obrobek se otáčí kolem pevného středu a nástroj vykonává sdružený odvalovací pohyb přímočarý a řezný vratný pohyb. Nástroj má tvar ozubeného hřebene základního profilu (Obrázek 12). Má však trochu poupravené rozměry, aby odpovídal zubové mezeře. První, častější způsob je zobrazen na následujícím Obrázek 21. [7]

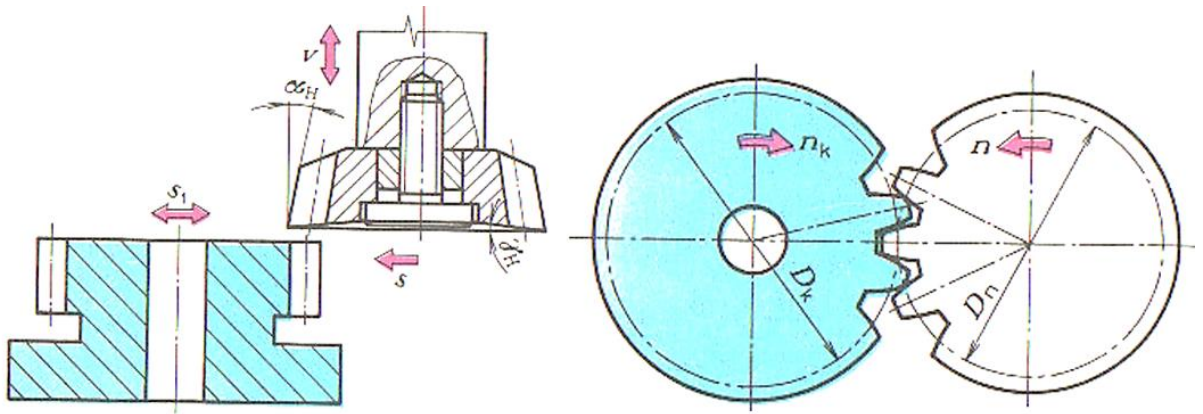


Obrázek 21 – Obrážení hřebenovým nožem [7]

Tento způsob má jedno velké omezení, čímž je pracovní délka hřebene, která se ve většině případů pohybuje v rozmezí 3 až 8 zubů. Z toho důvodu se provádí tzv. obrábění po částech vizualizované na Obrázek 21 - vpravo. Obrobek je upnutý na otočném stole a příčným posuvem se přiblíží k nástroji na hloubku zubové mezery  $h$ . Obrábění začne v bodě  $I$ , střed obrobku se nachází v  $O_1$ . Před každým pracovním pohybem nástroje se obráběné kolo pootočí kolem své osy o daný úhel a posune se podél hřebene o určitou, pevně definovanou vzdálenost, v opačném smyslu. Hodnotu posuvu a pootočení nám udává zvolená tloušťka třísky. Jakmile dorazí obrobek mimo záběr do polohy  $II$ , zastaví se pohyb nástroje v horní úvrati a zastaví se také odvalovací pohyb. Obrobek odjede z polohy  $O_3$  do polohy  $O_4$  a přesune se stůl s obrobkem do polohy  $O_5$ , pootočí se o potřebný počet roztečí a napolohuje znovu na hloubku  $h$ . Takto pokračuje, než se dokončí celé kolo s ozubením. [7]

### Obrážení kotoučovým nožem

Pro výrobu vnějších a také vnitřních ozubení čelních kol s přímými i šikmými zuby se používá obrážení kotoučovým nožem. Značná výhoda je v potřebě pouze malého výběhu, tudíž lze obrážet i ozubení s několika věnci za sebou. Kinematika, podobně jako u předchozího, je založena na vzájemném odvalování, tedy otáčení dvou ozubených kol (nástroj a obrobek) v opačných směrech po valivých kružnicích, což je vedlejší pohyb. Hlavní řezný pohyb nástroje, který je v podstatě ozubeným kolem s řeznými úhly, se vykonává přímočaře ve směru podélné osy ozubení. U kol s šikmými zuby je tento pohyb natáčivý. K odřezávání třísek dochází při chodu nástroje směrem dolů k obrobku, zpětným pohybem je chod naprázdno. K pootočení nastane při poloze nástroje v horní úvrati a jeho velikost je závislá na tloušťce odebírané třísky. Kinematika obrážení je zobrazena na následujícím Obrázek 22. [7]



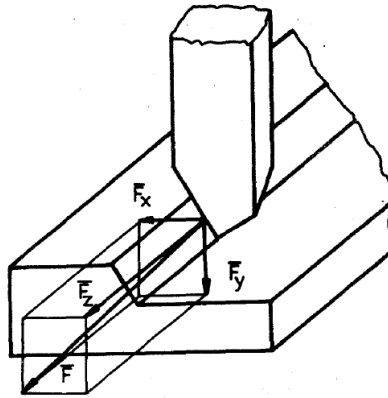
Obrázek 22 - Obrázení kotoučovým nožem [7]

Obrázeční kotoučové nože (viz. Obrázek 23) jsou podobného tvaru jako čelní ozubené kolo, jehož boky jsou evolventní šroubové plochy skloněné tak, aby mezi nástrojem a obrobkem vznikly na obou bocích zubů úhly hřbetu. Čelo nože je vybroušeno kuželovitě. Nástrojem určitého modulu lze vyrobit kola s libovolným počtem zubů. Odvalovací obrázečky na výrobu ozubení kotoučovým nožem jsou jednoúčelové stroje vyráběné převážně se svislým obrázečím vřetenem a se svislým upínáním obrobku. [7]



Obrázek 23 – Proces obrázení kotoučovým nožem [12]

Z hlediska silového si metodu obrázení můžeme představit jako soustružení s nekonečně velkým poloměrem obrobku – viz. Obrázek 24. Pro výpočet složek řezné síly lze použít vztahů platných pro soustružení. [13]



Obrázek 24 – Kinematika sil při obrázení [13]

### 2.3 Protahování

Protahování (angl. broaching) je výrobní proces strojního třískového obrábění využívající protahovací trn. Tento vícebřítý řezný nástroj vykonává vůči obrobku lineární pohyb, kterým postupně odebírá materiál. Stroj působí na nástroj tahem, nejčastěji hydraulickým pohonem a je tedy „tažen“ skrz obrobek. [14,15]

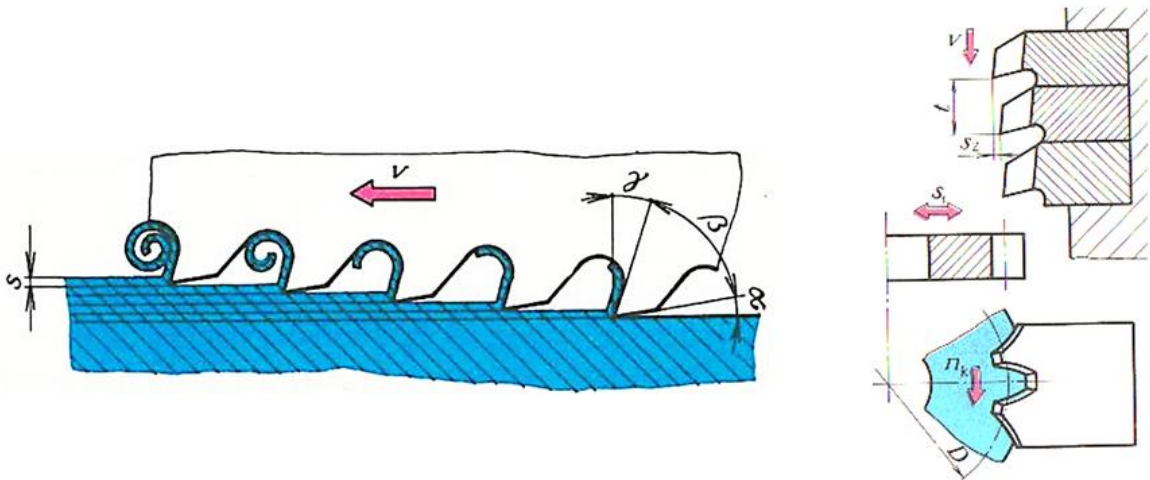


Obrázek 25 – Technologie protahování [14]

Princip technologie spočívá v hlavním, přímočarém pohybu nástroje vůči pevně upnutému obrobku. Na stejném principu funguje i velmi podobná metoda protlačování, kde stroj na trn působí pomocí beranu tlakem a nástroj je na rozdíl od protahování, protlačován skrz obrobek. Velmi vysoká efektivita technologie výroby spočívá ve vytvoření požadovaného tvaru na jeden pohyb nástroje. Existují i stroje s možností upnutí více nástrojů, čímž se zvýší produktivita stroje. [14]

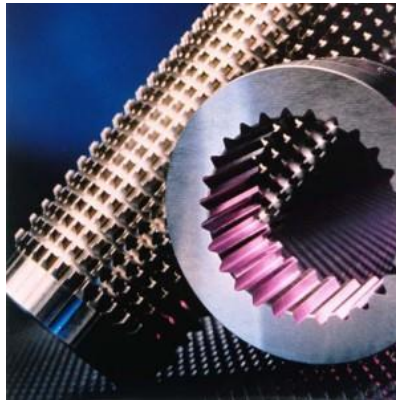
Nástroj je podlouhlý trn o relativně malém příčném průřezu, který má po své délce rovnoměrně rozmístěné řezné zuby. Protahovací trn se skládá postupně z několika částí: upínací část, krček, přední vedení, řezná část, kalibrovací část, hladící část a zadní vedení. Výškově odstupňované řezné zuby mohou být rozmístěné po celém obvodu nástroje, nebo mohou tvořit například pouze jednu drážku. V tomto ohledu jsou možnosti tvaru nástroje

velmi rozmanité a jeho volba závislá na požadovaném tvaru výsledného obrobku. Geometrie a kinematika odebrání materiálu jsou zobrazeny na Obrázek 26. [14,15]



Obrázek 26 – Princip protlačování ozubených kol [7]

Touto technologií je možné vyrábět jak vnitřní, tak i vnější plochy a profily. Pro své typické rozměry nástroje je využívána především na výrobu těch vnitřních, konkrétně k výrobě otvorů a výřezů různých tvarů, drážek a právě vnitřních ozubení. Poslední zmíněný typ můžeme vidět na Obrázek 27 i společně s nástrojem.

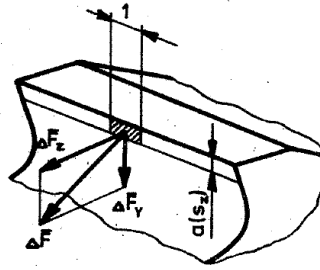


Obrázek 27 – Protahovací nástroj a výsledné vnitřní ozubení [16]

Samotná technologie je charakteristická vysokou přesností a jakostí obrobenej plochy, což je vykoupeno velmi vysokou pořizovací cenou nástroje. Využití této technologie je tedy především v sériové a hromadné výrobě, kde se tyto náklady vyrovnají s počtem vyrobených kusů.

Z hlediska působících sil při protahování a protlačování má největší význam tangenciální složka řezné síly  $F_z$ . Radiální složka je u symetrických profilů rovna nule. U nesymetrických profilů je nutné vycházet z konkrétního tvaru nástroje. [7]





Obrázek 28 Působící síly – protahování [7]

## 2.4 InvoMilling

InvoMilling je název obráběcí metody vyrobené firmou Sandvik Coromant (Obrázek 29). Jedná se o velmi efektivní patentovanou metodu určenou pro obrábění (hrubování až dokončování) vnějších ozubených a drážkovaných profilů, ozubených kol s přímými i šikmými zuby, kol se šípovým ozubením a kuželových kol s přímými zuby. Firmou uváděný rozsah modulů je 0,8-100. Stejně nástroje lze využívat při této metodě pro výrobu různých ozubených profilů. Efektivní metoda převážně pro malosériovou výrobu ozubení, u které mají velký význam krátké výrobní lhůty je ideální alternativou ve výrobě ozubení v režimu tzv. „Just-in-time“. Toto řešení využívá schopnosti víceúčelových obráběcích strojů a pětiosých obráběcích center a umožňuje výrobu mnoha různých ozubených profilů s pomocí stejné sady nástrojů. [17]

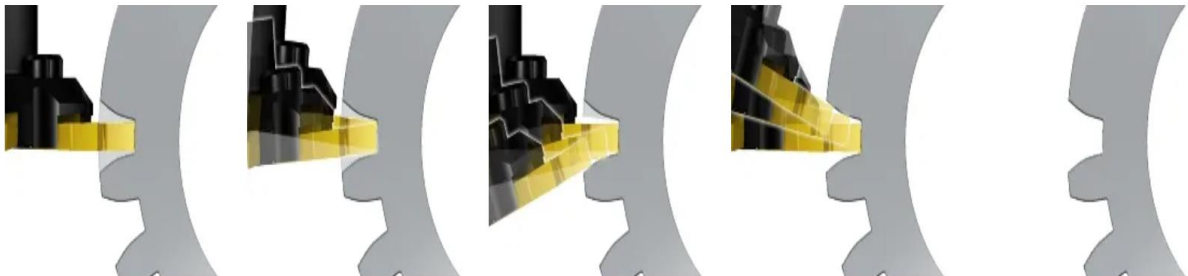


Obrázek 29 - Znárodnění metody InvoMilling společnosti Sandvik Coromant [17]

Mezi hlavní výhody této metody tedy spadá především flexibilita nástrojů a fakt, že firma nemusí čekat na zdlouhavou výrobu speciálních, na zakázku vyráběných nástrojů pro frézování ozubení. Dále výroba a dokončení součásti na jednom stroji na jediné upnutí, nabídka CAD/CAM softwaru pro vytvoření CNC programu dle údajů o ozubeném převodu dle výkresové

dokumentace a v neposlední řadě možnost výroby libovolného tvaru zubu pomocí vzájemného pohybu nástroje a obrobku. Technologie tedy není omezena tvarem nástroje, jako tomu je například u metody výroby dělicím způsobem kotoučovou nebo stopkovou frézou. [17]

InvoMilling je ve své podstatě kombinace frézování drážek a rotačního frézování, která využívá schopnosti a předpoklady víceosých obráběcích strojů. Nejčastěji používané nástroje jsou kotoučové frézy využívající břitové destičky. Výroba znázorněna na Obrázek 30 začíná podobně jako u většiny obráběcích procesů hrubováním, konkrétně tedy hrubováním zubové mezery a odstraněním co nejvíce materiálu. Následuje frézování paty zubu a v posledním kroku následuje tvarování částí profilu zubu pomocí boku kotoučové frézy, které zajišťuje CNC program. [18]



*Obrázek 30 - Metoda InvoMilling (Zleva: hrubování zubové mezery, Frézování paty zubu, Frézování dolní a horní části profilu zubu, Dokončená zubová mezera) [18]*

## 2.5 Power skiving

Metoda Power skiving je vysoce perspektivní metoda obrábění. Jedná se o spojitý obráběcí proces, který umožňuje provést veškeré obráběcí úlohy na jediné upnutí. Ve své podstatě se jedná o kombinaci odvalovacího frézování a obrážení (Obrázek 31). Rozhodující vliv na produktivitu mají otáčky a úhel, který svírá osa nástroje s osou ozubeného kola. Metoda nachází využití pro hromadnou výrobu ozubených kol a drážkovaných hřídelů. Čas obráběcího cyklu je ve srovnání s konvenčními metodami obrábění, jako jsou protahování, obrážení nebo odvalovací frézování, výrazně kratší. Na univerzálních 5-ti osých strojích umožňuje obrobení celé součásti na jedno upnutí. Metoda je vhodná pro výrobu vnitřních i vnějších ozubení s přímými i šikmými zuby. [19, 20]



Obrázek 31 - Metoda Power skiving – vnitřní ozubení [21]

Firma Sandvik Coromant, která se touto problematikou zabývá, vyrábí také nástroje pro tuto obráběcí metodu. Nástroje na první pohled připomínají kotoučový nástroj na obrážení s tím rozdílem, že čela jednotlivých zubů nástroje pro Power skiving jsou zkosena pod úhly (Obrázek 32). Nástroje jsou buď z rychlořezné oceli pro rozsah modulů 0,2 až 6, nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami s rozsahem modulů 2 až 9. Metoda Power skiving je efektivní také při obrábění za sucha, což eliminuje náklady na řeznou kapalinu a přispívá k uživatelsky příjemnému a k životnímu prostředí šetrnému obrábění. [19, 20]



Obrázek 32 - Nástroj pro Power skiving [22]

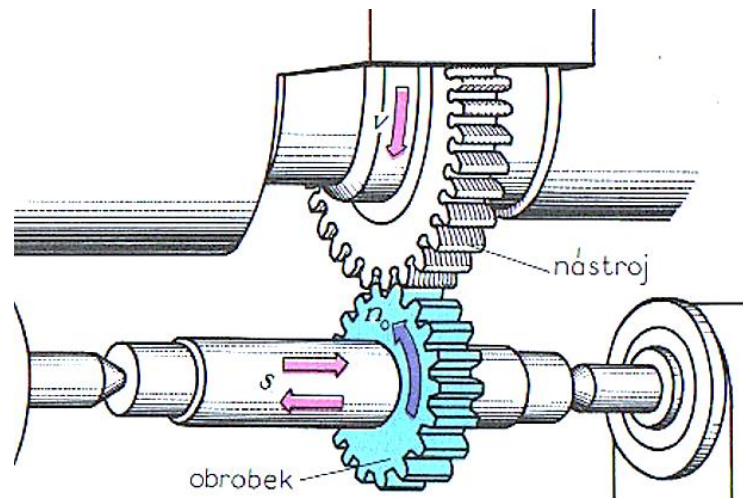
Koncepce metody nesoucí mnoho možných označení (loupání, kosení), nejvíce známá pod názvem Power skiving. Je známa již více než sto let. Je to teprve nedávno, co se její vývoj začal ubírat novým směrem. V důsledku rychlého nástupu robustnějších a tužších strojů a synchronizovaných vřeten, se tato metoda začíná čím dál více objevovat. [21]

V případové studii uvedené výrobcem nahradila metoda Power skiving proces obrážení vnitřních ozubených kol, u kterého zkrátila dobu obrábění o 90 %. V rámci této studie byly nahrazeny čtyři původně používané speciální jednoúčelové stroje dvěma víceúčelovými obráběcími stroji. [21]

## 2.6 Dokončovací operace

### Ševingování [7]

Ševingování ozubených kol spadá do dokončovacích operací pro tzv. měkká ozubení, tj. nekalených. Pro ševingování musí být ozubená kola vyrobena s větší přesností než pro broušení, kterému se věnuji v další podkapitole. Příklad na obrábění je v tomto případě maximálně 0,15 mm na zub. Nástrojem je korigované ozubené kolo s přímými nebo také šikmými zuby, na jehož bocích jsou drážky pro vytvoření řezných hran a potřebný odvod třísek.



Obrázek 33 – Ševingování [7]

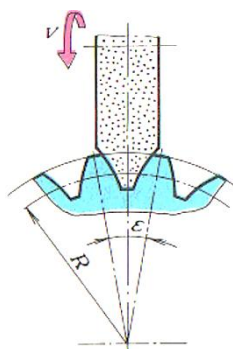
Během tohoto procesu tvoří nástroj společně s obrobkem záběr dvou šikmozubých kol s mimoběžnými osami. Vzniká zde relativní skluz podél zubů ozubení. Při ševingování jsou osy kola a nástroje zkříženy pod úhlem 5 – 15°. Ševingovací kolo má obvodovou rychlost ve většině případů 60 až 140 m/min a je přitlačováno k obráběnému kolu, které je unášeno.

### Broušení a lapování [7]

Kalená ozubená kola pro velké výkony a velké obvodové rychlosti mají zuby broušené. Nejhladších povrchů se docílí tzv. lapováním.

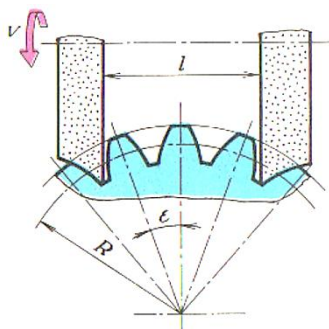
**Broušení** zubů čelních kol se provádí dvěma způsoby, o kterých již bylo několikrát zmíněno: dělicím a odvalovacím.

Broušení **jedním brousícím kotoučem** brousíme dva sousední boky zubů současně a schematicky to připomíná frézování zubové mezery kotoučovou frézou (Obrázek 34). Liší se ale rotační osa nástroje. Profil brusného kotouče má tvar zubové mezery nesoucí určitý modul a dále je závislý na počtu zubů a úhlu záběru.



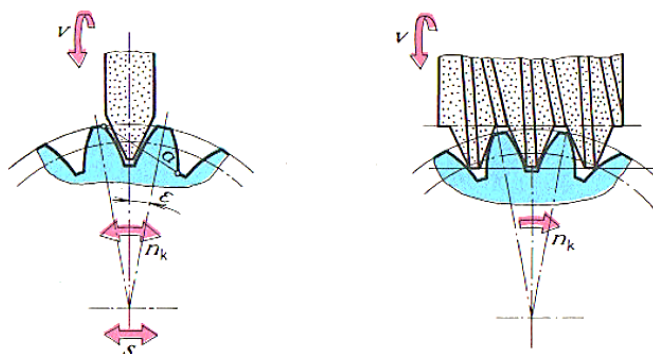
Obrázek 34 – Broušení jedním tvarovým kotoučem [7]

Broušení **dvěma brousícími kotouči** je přesnější a také výkonnější (Obrázek 35). Kotouče jsou od sebe vzdáleny na hodnotu  $l$ , která je závislá na počtu zubů. Každý kotouč brousí jeden bok zubu a tím se vyrovnávají výrobní nepřesnosti.



Obrázek 35 - broušení dvěma tvarovými kotouči [7]

Odvalovací způsob broušení je přesnější a také více využívaným než tvarovými kotouči. Při broušení lichoběžníkovým kotoučem (Obrázek 36 – vlevo) se brousící kotouč dotýká zubu kola pouze v jednom bodě, který se odvalováním pohybuje.



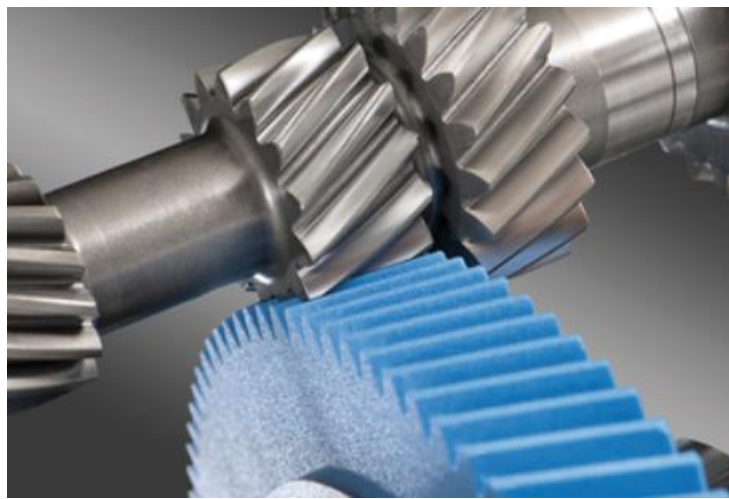
Obrázek 36 - Broušení: vlevo- lichoběžníkovým kotoučem, vpravo - kotoučem tvaru evolventního šneku [7]

**Lapování** je způsob obrábění kalených kol. Provádí se na lapovacích strojích ozubenými koly s lapovacím prostředkem, kterým je směs jemného brusiva (nejčastěji korund). Lapované

kolo zabírá s lapovacím a navíc koná přímočarý vratný pohyb ve směru osy. Lapované kolo je poháněno lapovacím, které je brzděno. Přídavky na lapování se pohybují v rozmezí 0,02 až 0,05 mm.

### Honování

Honování je založeno na stejném principu jako ševingování (Obrázek 33). Nástroje bývají ozubená kola vyrobená buď z plastu s podílem brusiva, nebo ocelová kola s vrstvou přidaného brusiva. Používá se výhradně u kalených kol pro zlepšení tvaru zubů, snížení drsnosti, odstranění úchylek po tepelném zpracování nebo odstranění menších defektů. Následující Obrázek 37 ukazuje honování plastovým kotoučem (modrý) obsahujícím brusivo. [7]



Obrázek 37 – Honování [23]

#### 2.6.1 Dosažitelná přesnost ozubených kol pro různé technologie

Výsledná přesnost výroby ozubených kol závisí silně na způsobu výroby (frézování, obrážení atd.), tepelném nebo chemicko-tepelném zpracování, dokončovacích operacích a také na stavu strojů. V Tabulka 2 je uveden přehled základních a nejčastěji užívaných způsobů výroby. Jednotlivé výrobní způsoby se vyznačují možností dosažení určité přesnosti a drsnosti boků zubů (Tabulka 3 a Tabulka 4).

Tabulka 2 - Dosažitelná přesnost ozubených kol pro různé technologie [24]

způsob finálního opracování boků zubů (systém)		dosažitelná jakost			možnost vytváření modifikace			
		stupeň přesnosti Q		drsnost povrchu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	výškové (evolventy)		podélné (boční křivky)	
		netvrze- ná kola	tvrzená kola		strojem	nástrojem	strojem	nástro- jem
frézováním		6÷8	8÷10	1,6÷3,2	ne	libovolně tvarem profilu frézy	přísuvem a změnou polohy osy frézy	ne
obrážením		5÷7	7÷9	0,8÷3,2	ne	libovolně tvarem obrážecí- ho ná- stroje	ne	ne
ševingováním		6÷7	7÷8	0,8÷1,6	ne	tvarem ševingo- vacího nástroje	kývavý pohyb stolu, změna polohy osy obrobku	libovol- ně u diago- nálního ševingo- vání
		pro $m \leq 3$						
		7÷8	8÷9					
odvalo- vacím brouše- ním		2÷5		0,4÷0,8	přímo ne (obtaho- vací zařízení brusné- ho kotouče)	libovolně tvarem brusného kotouče (obtaho- vaným spec. zaříze- ním, strojem nebo výrobou - CNC)	pohybem stolu	ne
		4÷7 pro $m \leq 4$		0,4÷0,8				
		5÷7 pro $m > 4$						
profilo- vým brouše- ním		1÷7		0,2÷0,8	ne	libovolně radiálním pohybem nástroje	ne	
		kotouč CNL (KAPP)		3÷7				0,2÷0,8

Tabulka 3 - Třídy dosažených přesností [24]

finální způsob výroby	třída přesnosti ČSN – ISO, DIN										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
frézování											
obrážení											
ševingování											
broušení											
světle šedá – přesná výroba, vyšší náklady tmavě šedá – standardní výroba, běžné náklady											

Tabulka 4 - Dosažené hodnoty Ra [24]

způsob výroby	$R_a$ střední aritmetická drsnost [ $\mu\text{m}$ ]							
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5
frézování								
obrážení								
ševingování								
broušení								
světle šedá – přesné standardní opracování, menší moduly tmavě šedá – běžné opracování až hrubovými, větší moduly								



### 3 Druhy poškození zubů u valivých soukolí

Ozubená kola jsou vysoce namáhané strojní součásti, u kterých může dojít k několika druhům poškození zapříčiněné mnoha faktory, jako je například nevhodné konstrukční řešení, volba materiálu kola, povrchové úpravy, manipulace s polotovarem i již hotovým výrobkem a v neposlední řadě provozními podmínkami. Klasifikace vzniklých poruch ozubení a jejich příčin je velmi důležitá z pohledu eliminace chyb ve výrobním procesu, případně v provozních podmínkách. [24]

Poruchy ozubených kol lze rozdělit na dvě hlavní skupiny podle charakteru jejich poškození lomem zubů a povrchu zubů.

Poškození povrchu zubů lze rozdělit na:

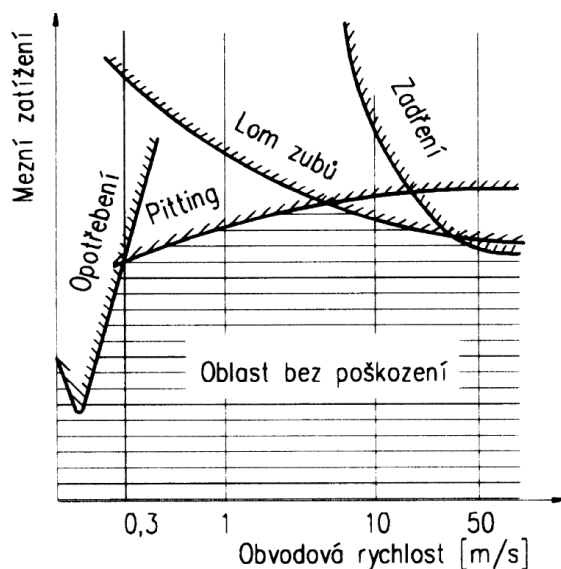
- Abrazivní opotřebení
- Zadírání
- Únavové poškození (Pitting, Spalling)

Lom zubů dělíme na:

- Lom v důsledku přetížení
- Únavový lom zubů

Druh poškození, jak již bylo zmíněno, velmi závisí také na volbě materiálu, výrobní technologii a na tepelném nebo chemicko-tepelném zpracování. Právě z tohoto hlediska se dále vyskytují poruchy technologického typu (trhliny výkovků a odlitků, trhliny vzniklé při povrchových úpravách, brusné trhliny), které mohou být iniciátorem pro další poruchy. [24]

Vznik poruch lze uvést do souvislosti s mezním zatížením a rychlostí otáčení. Tato závislost je znázorněna schematicky na Obrázek 38, kde jsou vyznačeny oblasti se zvýšeným nebezpečím vzniku jednotlivých poruch. [24]



Obrázek 38 – Vznik poruch v závislosti obvodové rychlosti na mezním zatížení [24]

### 3.1 Poškození povrchu zubů

#### Abrazivní opotřebení

Problém převažující hlavně u otevřených převodů, které nejsou nijak chráněny proti přístupu nečistot a s nedostatečným mazacím intervalem. Nečistoty z okolí zde zastávají abrazivní funkci a postupně vybrušují boky zubů. Funkce mazání je sice důležitá, ale nečistoty na mazivu u otevřených soukolí snadněji přilnou. Výsledkem této problematiky je nejčastěji nerovnoměrné opotřebení profilu, což způsobuje zvýšené dynamické zatížení, chvění, zvýšenou hlučnost a v krajním případě nadměrné zeslabení zubu vedoucí k lomu. Pro snížení opotřebení tohoto typu se doporučuje povrchová úprava s vysokou tvrdostí boků, ochrana soukolí před pronikáním nečistot, filtrace nebo pravidelná výměna maziva. [24]

#### Zadírání

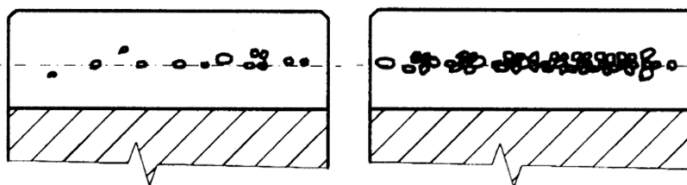
Nastává u soukolí, které jsou vystaveny vysokým tlakům, pracovním rychlostem a teplotám. Vlivem těchto podmínek může dojít k narušení olejového filmu a odpaření povrchové vrstvy maziva a v tom momentu vznikají vysoce pevné atomární vazby mezi povrchy spolu zabírajících boků. Tyto „přivařená“ povrchová zrna se navzájem vytrhávají a vytvářejí nárůstky, které narušují boky zubů a vytvářejí na jeho povrchu rýhy. [24, 25]

#### Únavové poškození (Pitting, Spalling)

Únavové poškození povrchu boků zubů je způsobeno vysokým dotykovým napětím, cyklicky se opakujícím za přítomnosti hydrodynamického působení oleje v mazací vrstvě. Tento druh poškození je charakteristický pro ozubená kola pracující v uzavřených převodech

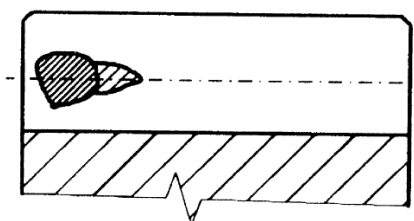
(neabrazivní) a s dostatkem maziva. Na povrchu v místě působení mezního tlaku a působením kluzného tření vznikají únavové trhlinky. Dosahují hloubky 10-20  $\mu\text{m}$  a jsou skloněny k povrchu boků zubů pod ostrým úhlem. Mazací kapalina vniká za pomoci hydrostatických sil do vzniklých trhlin a tlakem zapříčiní vytrhávání částic povrchu. Tím vznikají tzv. jamky neboli jamková koroze (pitting). [24]

Existují dva typy pittingu. Pitting záběhový (počáteční), na Obrázek 39 - vlevo, vznikající v důsledku většího lokálního zatížení při zahájení provozu. Tento druh není tolik nebezpečný, protože po vzniku jamek se zvětší styková plocha a dojde k uhlazení povrchu zubů. Pitting progresivní, na Obrázku 39 - vpravo, objevující se při vyšším zatížení až přetížení, je charakteristický většími rozměry jamek a rozšiřuje se po celé ploše zubu až do jeho zničení. Tento typ poškození je typický pro zušlechťená ozubená kola nebo kola bez chemicko-tepelné úpravy. [24]



Obrázek 39 – Pitting [24]

Spalling, neboli odlupování (Obrázek 40) je oproti pittingu charakteristický vylamování větších částí kovu z povrchu zubu. Nastává nejčastěji u ozubených kol s tvrzenou vrstvou, získanou například cementováním, nitrocementováním, nitridováním nebo povrchovým kalením. Tento druh poškození je v některých případech nazýván také šupinkový pitting. [24]



Obrázek 40 – Spalling [24]

### Lom zubů [24]

Jedná se o nejnebezpečnější druh poškození ozubených kol, který má za následek nejen vyřazení konkrétního kola z provozu, ale může zapříčinit vážné poškození ostatních částí mechanismu a ohrožení zdravotního stavu osob. Na základě charakteru lomové plochy lze rozdělit na lom křehký a lom únavový.

Lom únavový nastává po dlouhodobém cyklickém namáhání a jeho iniciátorem je zpravidla mikroskopický defekt na boku zubu, ze kterého se šíří trhliny. Lomová plocha má v únavové části hladký povrch a zbytek připomíná svou zrnitou strukturou lom křehký.

Křehký lom je výsledkem nepředvídatelného přetížení rázového charakteru a je typický pro zuby s křehkou strukturou. Může také nastat u kol po nesprávném povrchovém kalení. Lomová plocha je charakteristická zrnitou strukturou povrchu.

## 4 Měření ozubených kol

V rámci lícování čelních ozubených kol je aktuální především norma ČSN ISO 1328, která se sestává ze dvou částí se společným názvem *Čelní ozubená kola – Soustava přesnosti ISO*.

První část, tedy norma ČSN ISO 1328-1 ustavuje klasifikační systém mezních úchylek vzhledem k výrobě a posuzování shody boků zubu jednotlivých čelních kol s evolventním ozubením. Obsahuje definice pro termíny mezi úchylky boku ozubeného kola, strukturu systému stupňů přesnosti boku a jejich přípustné hodnoty. Stanovuje celkem 11 stupňů přesnosti boku, které jsou očíslovány od 1 až do 11, v pořadí narůstajících mezních úchylek. [26]

Druhá část ČSN ISO 1328-2: Definice a hodnoty dovolených úchylek týkajících se radiálních kinematických úchylek a obvodového házení. Systém radiálního měření přesnosti obsahuje odlišný rozsah stupňů přesnosti než první část a skládá se z 9ti stupňů, kde stupeň 4 je nejvyšší a stupeň 12 je nejnižší. Tato část pracuje s rozsahy modulů od 0,2 mm do 10 mm a průměry kol od 5 mm do 1000 mm. [27]

Pro jednotlivé, normou dané stupně přesnosti, rozdělujeme skupiny úchylek kinematické přesnosti, plynulosti chodu, dotyku zubů a boční vůle.

### **Kinematická přesnost**

Zahrnuje úchylky projevující se pravidelně během každé jedné otáčky ozubeného kola. Výrobní chyby v této skupině mají za následek nekonstantní obvodovou rychlost ozubeného kola. V rámci kontroly se zapojí do záběru s hnacím kolem s rovnoměrnými otáčkami a v případě chyb tedy buď zpomaluje, nebo zrychluje. Kinematickou nepřesnost měříme například jednobokým a dvoubokým odvalem. [24]

### **Plynulost chodu**

Do této skupiny patří úchylky popisující nepřesnosti evolventní plochy zubu a ovlivňují rovnoměrné otáčení kola. [24]

### **Dotyk zubů**

Úchylky ovlivňující přesnost ozubení a tím rozložení sil při záběru zubů a tím i snížení únosnosti a životnosti ozubení. [24]

## Boční vůle

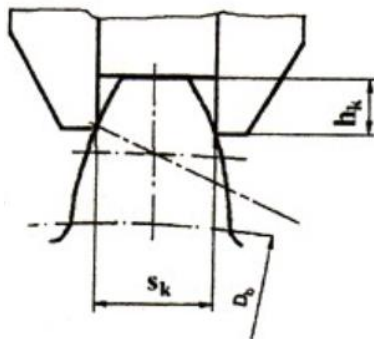
Úchylky stanovující potřebnou vůli mezi boky zubů, tzv. nepracujícími. Kontrolujeme je například pomocí měření přes zuby, měřením tloušťky zubu nebo měřením přes válečky (kuličky). [24]

### 4.1 Měření pomocí dílenských měřidel

Měření pomocí jednoduchých dílenských měřidel je nejrychlejší způsob kontroly jednotlivých parametrů ozubení přímo ve výrobě. Měřením těmito způsoby ale není přesné v porovnání se strojním měřením.

#### Měření tloušťky zubu

Tato metoda se používá převážně pro rychlé měření přímo na stroji s využitím jednoduchého měřidla (zuboměr). Kontrola je důležitá pro zjištění, zda při záběru zubu bude dodržena stanovená vůle na dané osové vzdálenosti. Nevyužívá se pro přesná měření, protože změřená tloušťka zubu  $s_k$  je závislá na přesnosti hlavové kružnice, neboť se měří v konstantní hloubce  $h_k$  právě od této kružnice. [28]



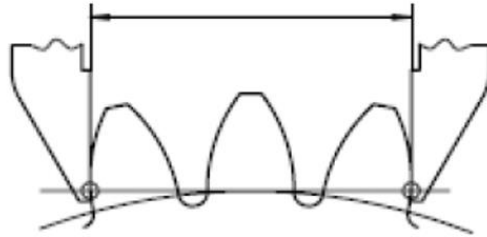
Obrázek 41 - Měření tloušťky zubu [28]

#### Měření míry přes zuby

Tato metoda je nejrozšířenějším způsobem jak přímo stanovit boční vůli. Pro zjištění rozměru přes zuby je nutné nejprve stanovit, přes kolik zubů se bude měřit. Počet zubů se stanoví tak, aby dotyk měřících ploch měřidla byl přibližně na roztečné kružnici. Tento počet se vyhledá v příslušné tabulce na základě skutečného počtu zubů ozubeného kola. K měření se využívá buď talířkový mikrometr nebo kalibr (Obrázek 42). [29]

Definice rozměru přes zuby dle normy ČSN ISO 1122-1 zní:

„Vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými rovinami tečnými k vnějším bokům určitého počtu zubů (vnější ozubení) nebo zubních mezer (vnitřní ozubení)“ [4]



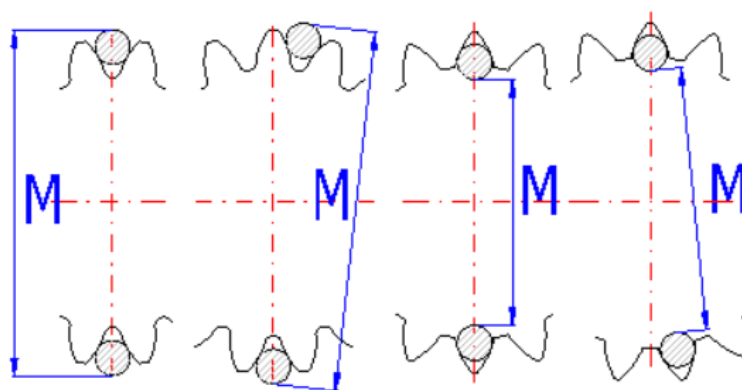
Obrázek 42 - Schéma kontroly rozměru přes zuby M [4]

### Měření přes válečky (kuličky)

Touto metodou měříme tloušťku dvou zubních mezer. Lze měřit vnější i vnitřní ozubení a není zde závislost na ose kola. Pro přímé zuby se využívají kuličky nebo válečky, pro šikmé zuby pouze kuličky.

Definice rozměru přes kuličky/válečky dle normy ČSN ISO 1122-1 zní:

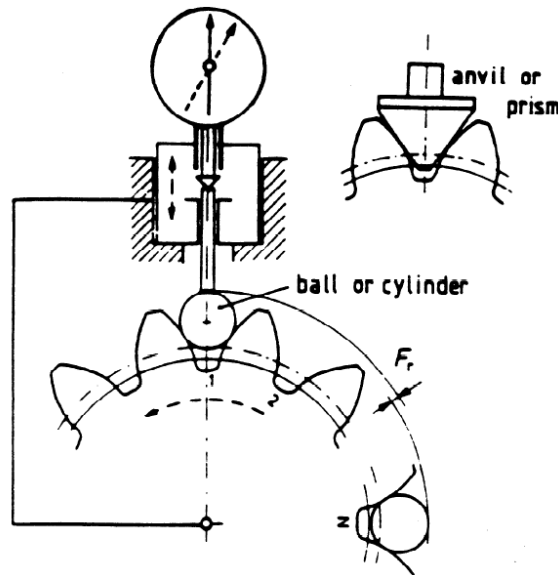
„Vzdálenost měřená přes dvě kuličky nebo válečky umístěné v zubních mezerách, které leží v co nejvíce diametrálně vzdálené opačné poloze“ [4]



Obrázek 43 - Měření přes válečky [30]

## Kontrola obvodového házení

Během měření se postupně vkládá do každé zubové mezery kontrolní přípravek (kulička, váleček, prisma), na který se seřídí dotek číselníkového úchylkoměru. Pomocí úchylkoměru zjistíme největší radiální odchylku polohy. Průměr přípravku se volí tak, aby se dotýkal boků zubů v místě roztečné kružnice. [31]



Obrázek 44 - Obvodové házení [32]

## 4.2 Měření s využitím strojů

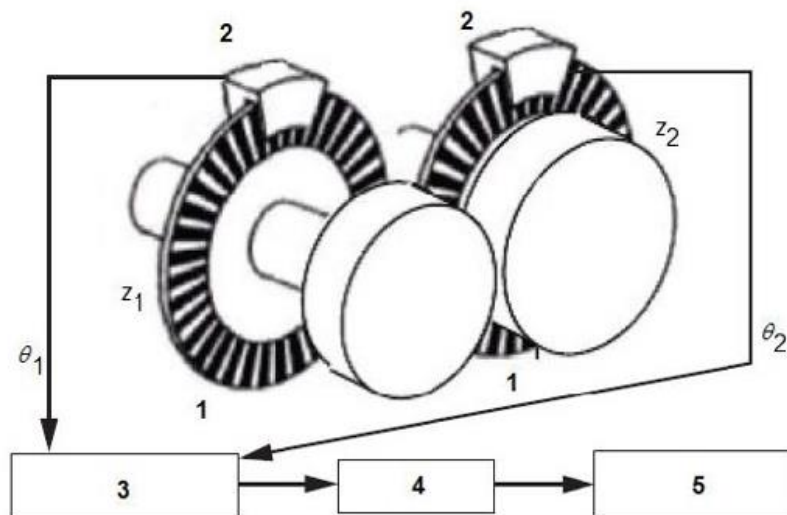
Po přelomu tisíciletí byl zaznamenán vznik a následný vývoj metod zpracování obrazu a laserové techniky, které jsou vysokým předpokladem pro moderní optickou měřicí techniku v souřadnicovém systému. Takzvané multisenzorové souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny jak dotykovými, tak i optoelektronickými senzory. Spojují a kombinují tedy výhody a možnosti dotykového a optického měření. V této kombinaci jsou schopny zvládnout velké spektrum úkolů, které jsou na ně kladeny v rozvíjejícím se průmyslu. Optoelektronické senzory získávají na významu zvláště kvůli vzrůstající komplexnosti tvarů a rozmanité velikosti jednotlivých součástí. Za vysokou hospodárností a efektivitou stojí především vysoká rychlost měření multisenzorových souřadnicových měřicích strojů. [33]



#### 4.2.1 Jednoúčelové měřicí stroje

##### Kontrola jednobokým odvalem

Tato metoda měření je základní metodou kontroly pro hodnocení a zjištění kinematické přesnosti ozubeného kola. V principu jde o záběr dvou ozubených kol, kdy jedním je vzorový prvek (hnací), takzvaný master, a druhým kontrolované (hnané) kolo, které je slabě bržděné tak, aby byl zajištěn stálý styk boků zubů. Kontrolním prvkem je nejčastěji používané ozubené kolo, nebo například ozubený hřeben či šnek. V tomto soukolí jsou nastavena ozubení v předepsané osové (provozní) vzdálenosti, tedy s určitou boční vůlí, která odpovídají skutečným pracovním podmínkám daného soukolí. Během celého měření je jejich osová vzdálenost konstantní. Podmínky jsou tedy nastaveny totožně jako při reálném provozu soukolí. Během měření se v reálném čase zaznamenávají a zhodnocují kinematické nepřesnosti, které určují průběh změn chyb úhlových poloh měřeného kola závislé na jeho pootočení. Schematický pohled na testovač jednobokého odvalu je na Obrázek 45. [26,31]



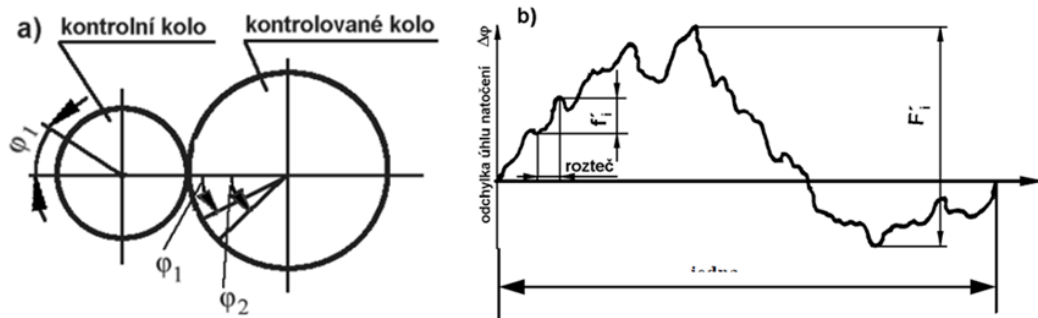
Obrázek 45 - Schematický pohled na jednoboký odval (1-rotační kodér, 2-čtecí zařízení, 3-výpočet chyby převodu, 4-filtrace, 5-fourierova transformace) [26]

##### Kinematická úchylka kola při jednobokém odvalu $F_i'$

Je popsána jako rozdíl mezi maximální a minimální úchylkou měřeného kola, který značí rozdíl mezi teoretickým a skutečným posunutím po obvodu kontrolního kola na jeho roztečné kružnici. Tento rozdíl se vztahuje na jednu plnou otáčku měřeného kola. Vyhodnocení tohoto měření lze vidět na Obrázek 46. [27]

## Kinematická úchylky kola $f_i'$

Hodnota kinematické úchylky je rovna nejvyššímu rozdílu maximální a minimální odchylky vzniklé při obvodovém pohybu odpovídající jedné rozteči, kterou můžeme definovat jako  $360^\circ/z$ . [27]

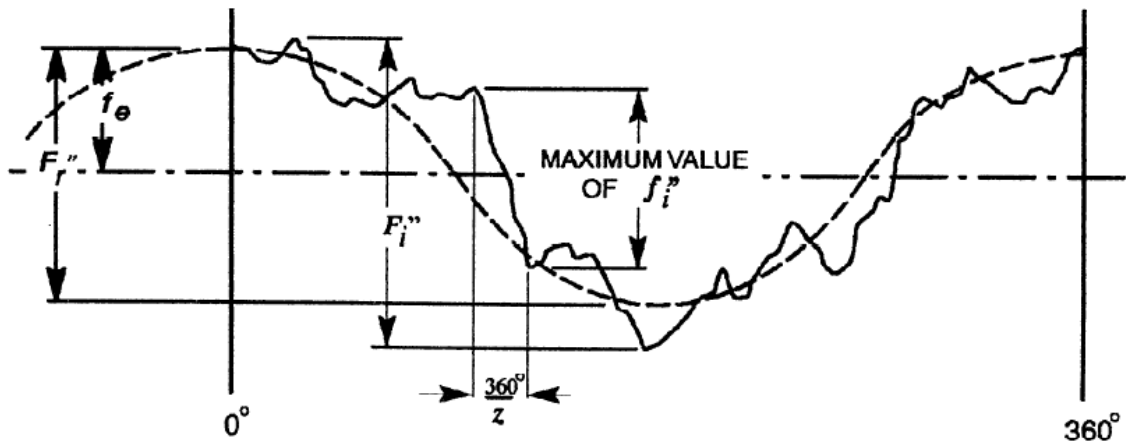


Obrázek 46 – Jednoboký odval – a) princip jednobokého odvalu, b) graf odchylky;  $\varphi_1$  - úhel pootočení kontrolního kola,  $\varphi_2$  - zaznamenaný úhel pootočení kontrolovaného kola,  $f_i'$  - odchylka při pootočení o 1 rozteč,  $F_i'$  - kinematická odchylka jednobokého odvalu za 1 otáčku [31]

## Parametry měření

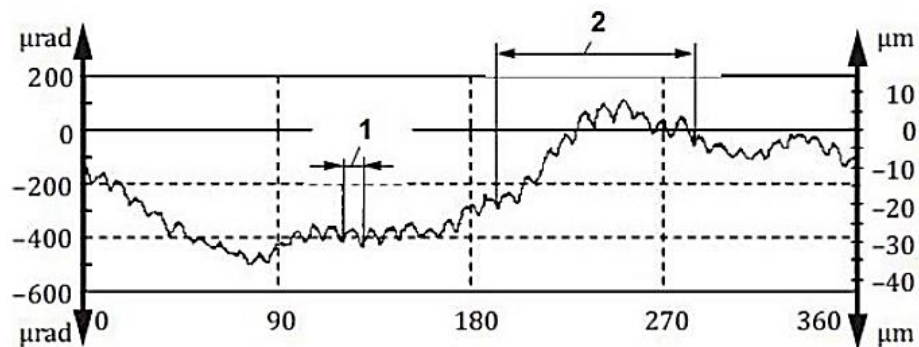
Během toho měření tedy dochází k záběru a odvalu dvou ozubených kol v předepsané osové vzdálenosti s určitou boční vůlí. Účinek otáčivého momentu je během měření stálý, zabírají tedy buď pravé, nebo levé boky zubů. Nepřesnosti a odchylky polohy od teoretického tvaru se projeví během odvalu nepravidelným odvalem, který je od začátku měření. Zařízení pro tento druh odvalu obsahuje přístroj, který současně snímá otáčení obou kol a zaznamenává tak úchylku odvalu mezi reálným otočením a teoretickým otočením. Vyhodnocení úchylky měřeného kola od teoretické hodnoty je realizováno polohou měřicího kola v závislosti na poměru počtu zubů obou kol v soukolí. Výsledkem jednobokého odvalu je obvodová délka na roztečné kružnici. V rámci požadované přesnosti měření by mělo být měřicí ozubené kolo alespoň o tři stupně přesnější než měřené kolo. [31]

Na následném grafu uvedeném na Obrázek 47 je zobrazen typický diagram vyhodnocení jednobokého odvalu. Měření kinematické úchylky  $F_i'$  je vyhodnoceno v oblasti celé otáčky kola (otočení o  $360^\circ$ ) a pro kinematickou úchylku  $f_i'$  je rozsahem měření dráha záběru jednoho zubu. V případě pravidelné sinusoidy, lze vyhodnotit excentricitu  $f_e$ . [31]



Obrázek 47 - Diagram měření jednobokým odvalem [32]

Doporučený minimální počet měřených bodů k vyhodnocení parametrů jednobokého odvalu je 30 bodů na jeden zub. Následně jsou data filtrována na základu Fourierovy transformace. Příklad přenosu tvaru křivky je znázorněn na Obrázek 48. [26]



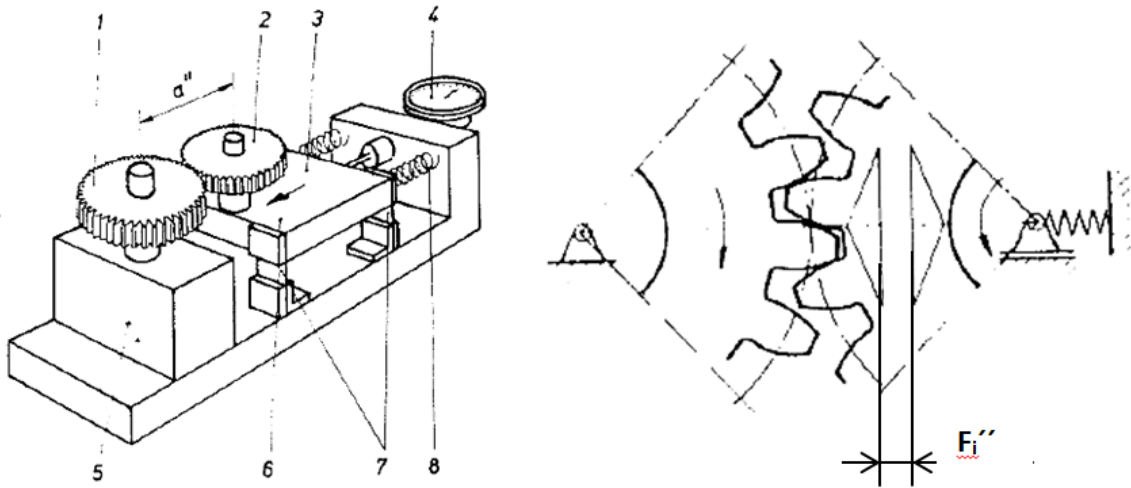
Obrázek 48 - Příklad chyb převodu [26]

Tato metoda, metoda jednobokého odvalu, ze všech metod měření ozubení nejbližše simuluje provozní simulaci. Vyhodnocením je informace o pravidelnosti obvodového přenosu. Výsledkem ale nezískáme informace o druhu a velikosti jednotlivých úchylek potřebné pro optimalizaci výrobní technologie. Z důvodu nákladnosti měření a omezeným rozsahem získaných dat je tato technologie měření využívána zřídka. Vhodná je v aplikacích, kde je vyžadována nejvyšší rovnoměrnost obvodového pohybu. [27,31]

### Kontrola dvoubokým odvalem

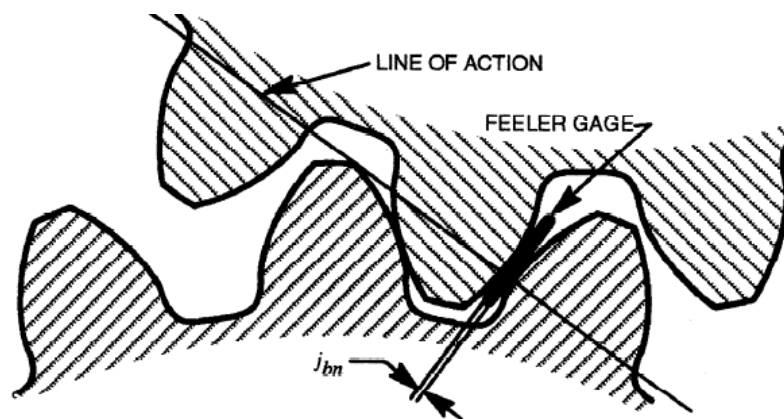
V této metodě kontroly, dvoubokým odvalem, se na rozdíl od jednobokého, po sobě vzájemně odvalují a zabírají dvě ozubená kola bez vůle. Během záběru jsou k sobě lehce přitlačována. Jedno kolo je pohyblivě uložené, takže je možné volně nastavit osovou vzdálenost. Z konstrukčního pohledu musí mít obě kola stejný modul, úhel záběru a v případě

šikmého ozubení i úhel sklonu zubů. Během měření jsou zaznamenávány odchylky od předem nastavené osové vzdálenosti v podobě kartézských či polárních souřadnic. Schématická ukázka přístroje pro kontrolu dvoubokým odvalem je znázorněna na Obrázek 49. [31]



Obrázek 49 - Princip kontroly dvoubokým odvalem (1-kontrolované kolo, 2-Kontrolní kolo, 3-měřicí saně, 4-snímač hodnot, 5-pevný upínač, 6-směr měření, 7-pružné uložení, 8-nastavení síly pro měření) [31]

Pokud jsou kola nastavena na provozní vzdálenost, je možné měřit spárovou měrkou i boční vůli (Obrázek 50).



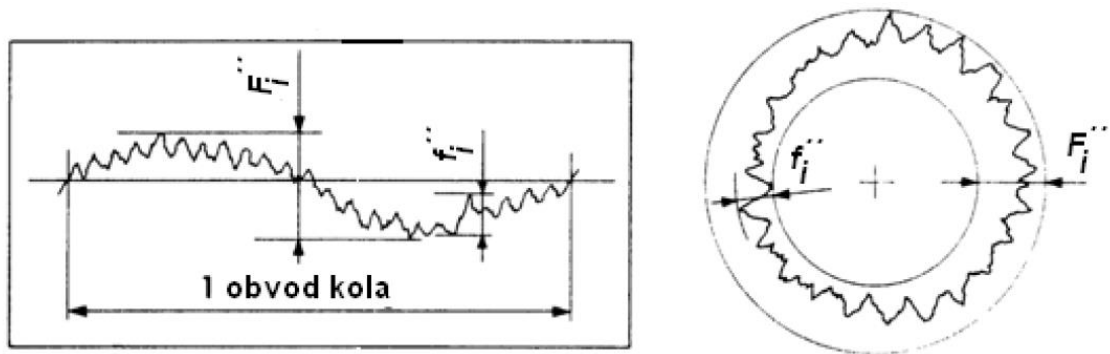
Obrázek 50 - Měření vůle s využitím spárové měrky [32]

### Celková radiální kinematická úchylka $F_i''$

Je vyjádřena jako rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou polohy středu, který nastane během zkoušky v případě, že jsou oba boky zubů (pravý i levý) současně v dotyku během jedné celé otáčky měřeného ozubeného kola. [27]

### Místní radiální kinematická úchylka $f_i''$

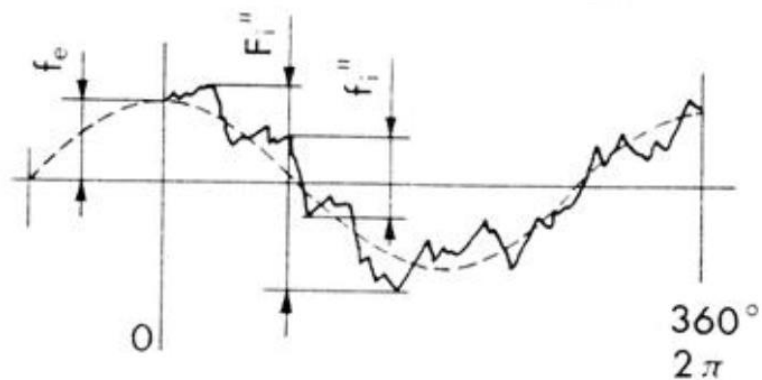
Hodnota je rovna jedné nejvyšší amplitudě vzniklé při odvalu odpovídajícího jedné rozteči,  $360^\circ/z$ , z průběhu celého cyklu obvodu kola a jeho všech zubů. [27]



Obrázek 51 – Diagram kontroly dvoubokým odvalem [27]

### Vyhodnocení dvoubokého odvalu

Ve výsledném diagramu se v rámci dvoubokého odvalu vyhodnocuje buď celková radiální kinematická úchylka  $F_i''$  pokud bereme oblastí měření celý obvod ozubeného kola. V tom případě je výsledná úchylka rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty (bodem) křivky. Případně se vyhodnocuje místní radiální kinematická úchylka  $f_i''$ , pokud je oblastí měření dráha záběru zubu. V případě pravidelné sinusoidy lze vyhodnotit excentricitu  $f_e$  viz. Obrázek 52. [31]



Obrázek 52 Diagram dvoubokého odvalu [31]

Metoda kontroly dvoubokým odvalem je značně rozšířena z důvodu její jednoduchosti a hospodárnosti. Touto metodou lze snadno a rychle odhalit, zda došlo k nepřesnostem při výrobě kola, např. chybně upnutého obrobku, použití silně opotřebeného nástroje nebo nepravidelném pohybu nástroje vůči obrobku. [31]

Z průběhu křivky diagramu lze hodnotit úchyly záběrové rozteče (úchyly tvaru boku zubu). V případě velkých dílčích úchylek odvalu lze usuzovat, že se jedná o větší úchyly rozteče. Sinusový průběh křivky poukazuje na excentricitu ozubení. V případě kol, která musí zabírat s minimální vůlí mezi boky zubů, je kontrola dvoubokým odvalem velmi vhodná, neboť kontrola kolísání osové vzdálenosti je prakticky totožná s kontrolou kolísání boční vůle. [31]

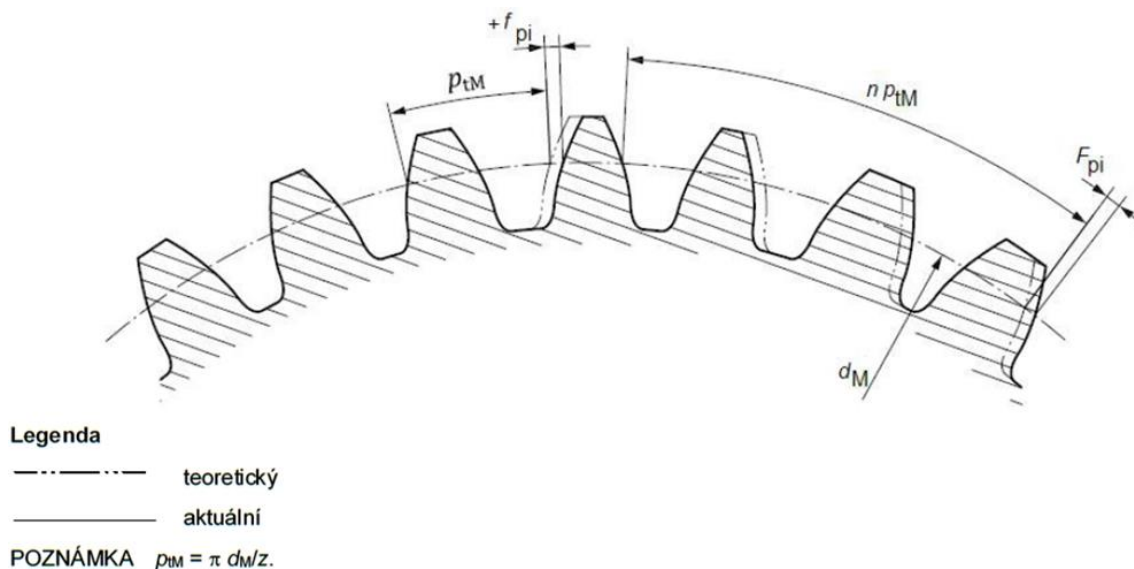
Vypovídající schopnost kontroly dvoubokým odvalem je závislá na několika faktorech, které není lehké korigovat. Velký vliv na výsledky má především trvání záběru a provozní úhel záběru soukolí. Hodnoty na pravém a levém boku se navzájem stále ovlivňují a dílčí úchyly se mohou navzájem zesilovat nebo zeslabovat. Nejčastější výrobou odvalovacím frézováním se obrábí jak pravý, tak levý bok současně. Diagram následně u takto vyrobených součástí zobrazuje především kolísání osové vzdálenosti způsobené výrobou. Chyby odvalovacího pohybu (kinematické chyby), které zapříčiňují jak úchyly profilu, rozteče a sklonu zubu, nejsou kontrolou zachytitelné. Není tedy možné odvodit žádné vazby na úchyly boku zubů, rozteče a součtové úchyly rozteče. Výsledek kontroly měření dvoubokého odvalu tedy není rozhodující pro stanovení celkového stupně přesnosti ozubeného kola. Z tohoto pohledu nelze spojovat toleranční hodnoty úchylek odvalu s ostatními úchyly ozubení. [31]

Pokud lze předpokládat dostatečnou přesnost valivého pohybu výrobního stroje a nástroje, je kontrola ozubení s využitím této metody výhodná především pro kontrolu sériově vyráběných kol malých rozměrů.

### Kontrola roztečí

Kontrola roztečí zahrnuje určení skutečných (úhlových) hodnot úchylek mezi stejnohlými boky zubů po obvodu čelního ozubeného kola. Tyto úchyly jsou měřeny v tečných rovinách k základnímu válci, a proto jsou nezávislé na poloze osy čelního ozubeného kola. [31]

**Dílčí úchylka jednotlivé rozteče ( $f_{pi}$ )** je algebraický rozdíl mezi aktuální roztečí a odpovídající teoretickou roztečí v čelní rovině na měřicí kružnici ozubeného kola. **Úchylka jednotlivé rozteče ( $f_p$ )** je maximální absolutní hodnota všech sledovaných dílčích úchylek jednotlivých roztečí. **Dílčí úchylka součtové rozteče ( $F_{pi}$ )** je rovna algebraickému rozdílu přes oblast  $n$  sousedních roztečí mezi délkou a teoretickou délkou příslušného oblouku. **Celková úchylka součtové rozteče ( $F_p$ )** je největší algebraický rozdíl mezi hodnotami dílčích úchylek součtové rozteče získanými ze všech specifikovaných boků zubů ozubeného kola. [26]

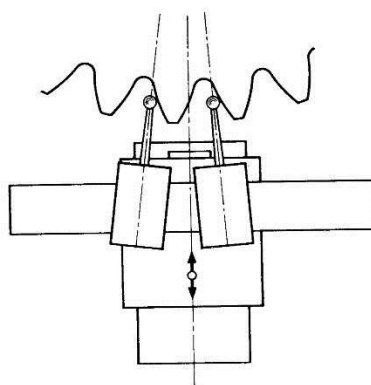


Obrázek 53 - Měření úchylek rozteče [26]

### Způsoby kontrol úchylek roztečí:

#### Tětivové měření roztečí komparátorem

Dva dotyky jsou umístěny v čelní rovině a ve shodné radiální vzdálenosti od osy kola. Během tohoto měření se nezjišťuje jejich osová vzdálenost nebo délka oblouku, nýbrž délka tětivy mezi body dotyků. Následným srovnáním několika naměřených hodnot získáme obraz o existující přesnosti rozteče. Výsledná hodnota dílčí úchytky čelní rozteče je určena porovnáním rozdílu mezi naměřenou hodnotou příslušné rozteče a střední hodnotou ze všech měření na obvodu měřeného kola. Na Obrázek 54 je vidět schematicky vyznačena metoda měření, u které je komparátor umístěn na lineárním vedení. Po změření se zasunou, ozubené kolo se pootočí okolo své osy a komparátor se znovu vysune do konstantní radiální hloubky. [31]



Obrázek 54 - Měření rozteče komparátorem [31]

## Měření čelní rozteče úhlovou indexovou metodou

Měření jedním dotykem využívá úhlový dělicí stroj. Měřicí hlava s dotykem se pohybuje radiálně a postupně na každém boku zubu změří rozdíl mezi skutečnou a teoretickou polohou dotyku. Každá hodnota má tedy vlastní polohovou úchylku odpovídajícího boku zubu. Z výsledného záznamu lze stanovit součtovou úchylku roztečí. [31]

Dále jsou způsoby s využitím přenosných komparátorů na měření např. Základní nebo normální rozteče.

## Kontrola profilu a sklonu zubu

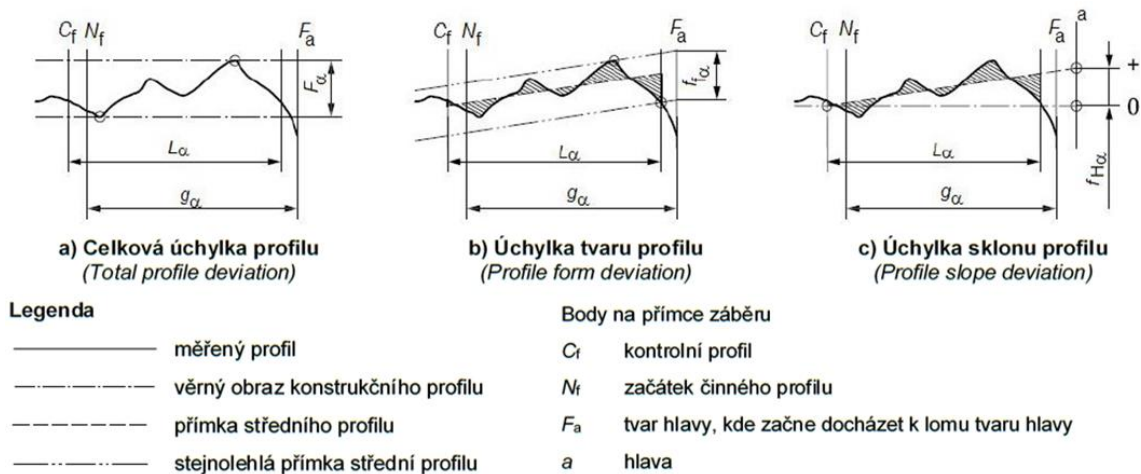
Kontrola úchylek boků zubů, které vznikají v čelním řezu uvnitř kontrolované oblasti mezi skutečnou a jmenovitou evolventní plochou k základnímu válci při respektování zvolené korekce profilu, případně sklonu zubu. [31]

## Kontrola profilu

Na přesnosti tvaru profilové křivky (evolventy) jsou částečně závislé výsledky kontrol ostatních parametrů ozubeného kola. Odchytky evolventy by měly být v přípustných mezích. Úchylky se měří ve vyhodnocované oblasti kolmo k evolventě a jsou vztaženy k čelnímu řezu. Pro vyhodnocování platí oblast podle ČSN ISO 1328. [31]

**Měřený profil** je část boku zubu, podél kterého je sonda v dotyku během měření. **Úchylka profilu** je část, o kterou se měřený profil odlišuje od konstrukčního profilu. **Konstrukční profil** - diagram konstrukčního profilu specifikovaný konstruktérem předpokládající na jedné straně modifikovaný tvar evolventy a na druhé straně odval tečny k základní kružnici. **Přímka středního profilu** je přímka, která představuje tvar konstrukčního profilu, v rozsahu měření. **Celková úchylka profilu ( $F_{\alpha}$ )** je definována vzdáleností mezi dvěma stejnohlými konstrukčními profily, které vymezují měřený profil v rozsahu vyhodnocení profilu. **Úchylka tvaru profilu ( $f_{ra}$ )** je vzdálenost mezi dvěma stejnohlými přímkami středního profilu. **Úchylka tvaru profilu ( $f_{Ha}$ )** je vzdálenost mezi dvěma stejnohlými konstrukčními profily, které protíná extrapolovaná přímka středního profilu. [26]

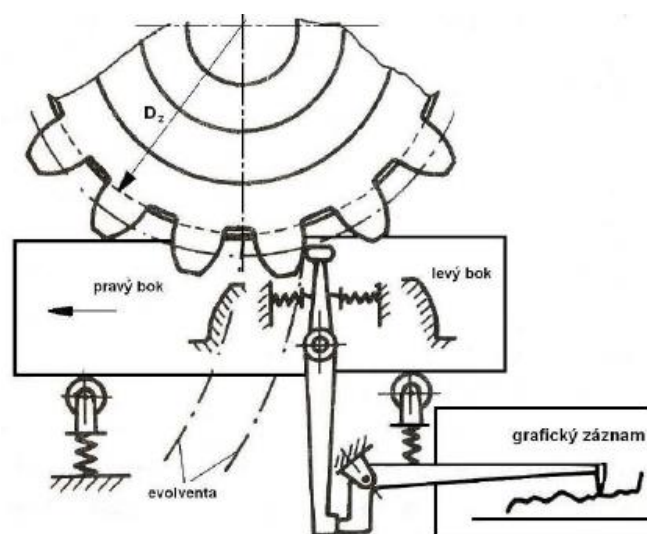




Obrázek 55 - Kontrola profilu zubu [26]

### Přístroje pro kontrolu úchylek profilu zubu

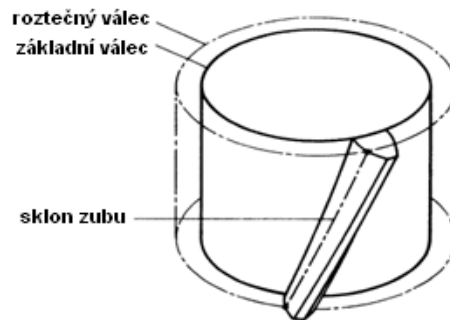
Tyto úchylky lze kontrolovat buď opticky, nebo mechanicky. Optickou metodou se kontroluje tvar evolventy na profilprojektorech u malých modulech, kde nelze použít dotykovou metodu. Tvar profilu zubů s větším modulem se kontroluje pomocí tzv. evolventoměru, který vytváří přesnou evolventu tím, že odvaluje pravítko po kotouči stejného průměru jako má základní kružnice měřeného kola. Přístroj snímá a zapisuje odchylky kontrolovaného profilu ve zvětšení na milimetrový papír. Také je možnost odečítat odchylky na číselníkovém úchylkoměru. Dle konstrukce rozlišujeme evolventoměry s pevnou (Obrázek 56) a stavitelnou základní kružnicí (např. ZEISS VG 450). [31]



Obrázek 56 - Schéma evolventoměru s pevnou zákl. kružnicí [31]

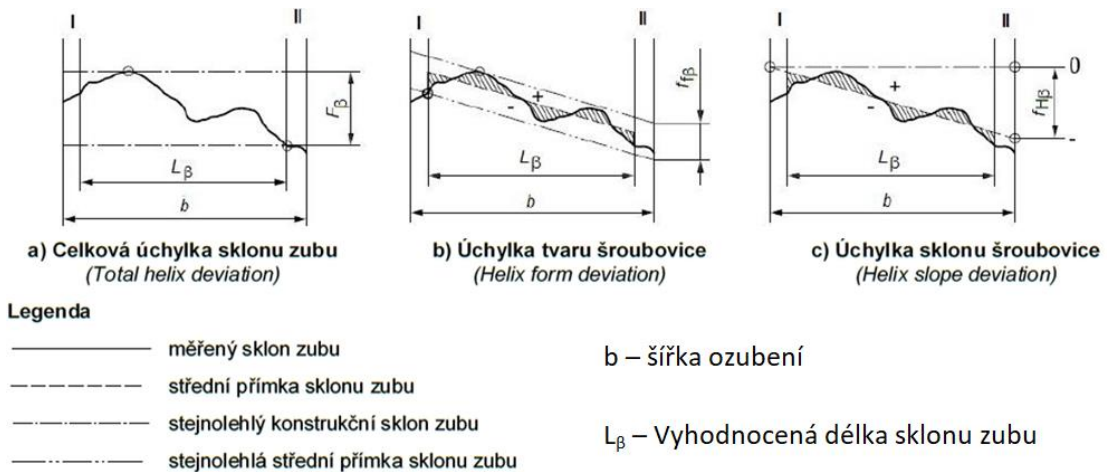
## Kontrola sklonu zubu

Sklon zubu je řez boku zubu souosým válcem (roztečným válcem ozubeného kola). Určující je v tomto případě čelní rovina, do které jsou údaje převedeny z normální. Diagramy jsou záznamem skutečné boční křivky zubu. Rozdíly mezi křivkou a vhodně umístěnou přímkou jsou úchylkami skutečného a nemodifikovaného sklonu zubu. Pro vyhodnocování platí oblast podle ČSN ISO 1328. Výsledné hodnoty zkoušky pomáhají zařazovat do jednotlivých skupin tříd přesnosti této normy. [31]



Obrázek 57 - Sklon zubu ozubeného kola [31]

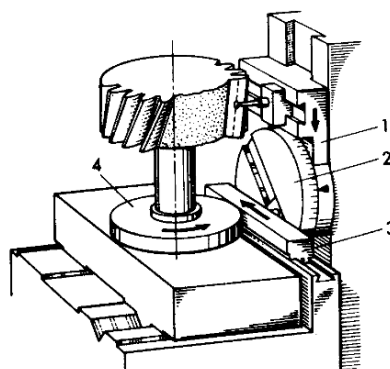
**Měřený sklon zubu** je úplný bok zubu mezi protilehlými čely v dotyku se sondou. V případě zaoblení či zkosení je tento rozsah upraven o jejich rozměr. **Úchylka sklonu zubu** je část, o kterou se měřený sklon zubu odlišuje od konstrukčního sklonu zubu. **Konstrukční sklon zubu** je specifikován konstruktérem v diagramu, kde je na jedné ose modifikovaný tvar sklonu zubu a na druhé ose šířka ozubení. **Střední přímká sklonu zubu** představuje tvar konstrukčního sklonu zubu v rozsahu měření. **Celková úchylka sklonu zubu ( $F_{\beta}$ )** je vzdálenost mezi dvěma stejnohlými konstrukčními sklony zubu, které vymezují měřený sklon zubu v rozsahu měření. **Úchylka tvaru sklonu zubu ( $f_{\beta}$ )** je vzdáleností mezi dvěma stejnohlými středními přímkami sklonu zubu, které uzavírají měřený sklon zubu. **Úchylka sklonu zubu ( $f_{H\beta}$ )** je vzdáleností mezi dvěma stejnohlými konstrukčními sklony zubu, které protínají extrapolovanou střední přímkou sklonu zubu v koncových bodech šířky ozubení  $b$ . [26]



Obrázek 58 - Kontrola sklonu zubu [26]

### Přístroje pro kontrolu úchylek sklonu zubu

Kontrolní přístroje jsou ve většině koncipovány tak, že zobrazují nekorigovaný sklon zubu v diagramech jako přímku. Následně jsou úchylky sklonu zubu zobrazeny jako úchylky od této přímky. Pro kontroly sklonu zubu se používají přístroje s plynulým nebo přerušovaným snímáním pomocí měřicího dotyku. Nejčastěji se využívají kombinované přístroje, které umožňují měřit na jedno upnutí sklon zubu a profil zubu. Ve velkosériové výrobě se používají převážně přístroje s vyměnitelnými kotouči základní kružnice (Obrázek 59). Fungují na jednoduchém principu a robustní konstrukci. Princip spočívá v paralelním přesunu měřících saní vůči ose kola. Na saních je umístěn měřicí dotek a kotouč kulisy nastavený podle úhlu sklonu zubu na základní kružnici. Vedení kulisy přesouvá pohyb na posuv valivého pravítka, které udává měřenému kolu potřebný rotační pohyb přes valivý kotouč. [31]



Obrázek 59 - Přístroj na měření sklonu zubu [31]

Dále se využívá přístroj s nastavitelnou základní kružnicí, u kterého nahrazují pevně zabudovaný valivý válec vyměnitelné kotouče s možností posunu. Tento přístroj se využívá v aplikacích s rozmanitými průměry základních kružnic. Dalším známým způsobem je měření

s rovinnou měřicí plochou, která se otáčí kolem své osy a na stupnici s optickým odečítáním úhlu lze vidět aktuální hodnoty. [31]

#### 4.2.2 Univerzální měřicí stroje

Tyto stroje slouží k měření nejrůznějších geometrických prvků, jako jsou například délky, průměry, sklony, úhly, rovnoběžnosti a podobně. Typickým a nejrozšířenějším univerzálním strojem pro měření součástí je souřadnicový měřicí stroj (zkratka angl. CMM - Coordinate measuring machine). [33]

Souřadnicové měřicí stroje představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti metrologie. Jedná se o složitý měřicí systém, který realizuje měření v rovině nebo prostoru s možnostmi automatizace měření a vyhodnocování. Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru, a polohy dalších bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Jednotlivé body se popisují v nepohyblivém, nejčastěji kartézském souřadnicovém prostoru, který je pevně spojen s rámem stroje. Následně se z těchto jednotlivých naměřených bodů vypočítají geometrické prvky (elementy), za jejichž pomoci je možné vyjádřit např. charakteristiky rozměrové a geometrické tolerance. [33,34]

Z pohledu konstrukce jsou v praxi nejčastěji využívány portálové (Obrázek 60 – vlevo), mostové (Obrázek 60 – vpravo), konzolové (Obrázek 61 – vlevo) a stojanové s horizontálním ramenem (Obrázek 61 – vpravo). Jejich volba závisí například na tvarové složitosti součásti, jejích rozměrech, zástavbových možnostech, frekvenci měření, časových možnostech a tak dále.



Obrázek 60 – Kartézsky uspořádané CMM značky Zeiss (vlevo – portálový CMM, vpravo – mostový CMM) [35,36]



Obrázek 61 – Kartézsky uspořádané CMM značky Zeiss (vlevo – konzolový CMM, vpravo – stojanový s horizontálním ramenem CMM) [37,38]

Souřadnicové měřicí stroje s pohyblivým portálem jsou v současnosti nejčastěji využívaným konstrukčním principem větších strojů. Portál se pohybuje ve směru osy Y. Na portálu se pohybuje suport, který zastává funkci příčného pohybu (v ose X) vzhledem k portálu. Na suportu je nainstalována třetí osa (Z), tzv. pinola. Pokud je měřený dílec během měření v klidu, je možné měřit i velmi těžké dílce. Při využití přídatného otočného stolu se svise orientovanou funkční osou vznikají další možnosti měření. [33]

Pro měření právě ozubených kol a jejich parametrů nabízí firma Zeiss program GEAR® PRO. S programem GEAR PRO lze měřit v podstatě každý typ evolventního ozubení, např. hnací i spojková ozubení, vnější či vnitřní ozubení. Pro různé typy ozubených kol se nabízí různé varianty (bevel – kuželová kola, involute – čelní kola, worm – šneková kola). Možné je i posouzení zvláštní geometrické charakteristiky jako extrémní úhly sklonu nebo záběru, velké modifikace tloušťky zubu, chybějící zuby nebo modifikace boku. S programem lze vyhodnocovat různé parametry ozubeného kola (např. profil zubu, sklon boku, rozteč, patní a hlavová kružnice). Vyhodnocení jsou možná podle normy DIN 3962 (např. sklon boku, profil, soudkovitost, rozteč, obvodové házení, tloušťka zubu a míra přes kuličky). V rámci programu je možné tedy měřit jako ozubená kola, tak i nástroje pro výrobu evolventních čelních ozubených kol (např. jednoduché i vícechodé odvalovací frézy). [39]

Dále je možné připojit na pinolu laserové optické skenery pro bezdotykové měření. Například firma Zeiss nabízí možnost optického skeneru LineScan, který je ve spojení s otočnou polohovací hlavou RDS s krokem natočení 2,5 stupně schopný celoplošně zachytit tvar. Získané

hodnoty (mračno bodů) se můžou dále využít pro porovnání s existujícími CAD daty nebo pro vytvoření nového CAD modelu. [40,41]

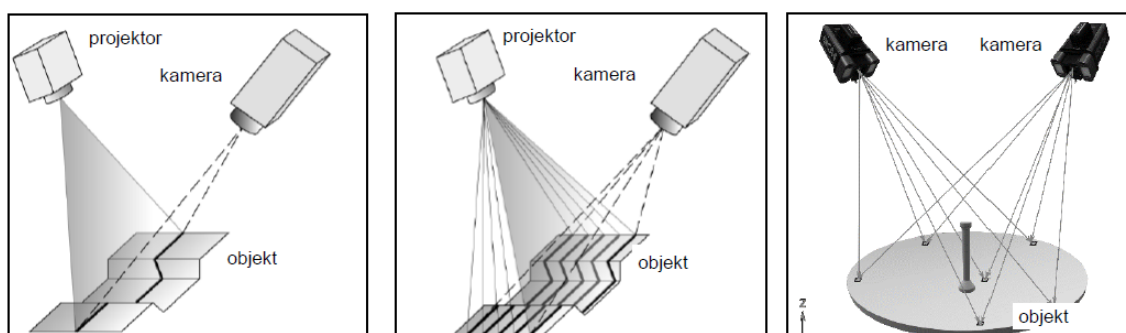
### Bezdotykové měření

V rámci bezdotykového měření existuje několik možných způsobů snímání, například liniové senzory (2D) a plošné senzory (3D). U metody linie laserového paprsku (Obrázek 62 - vlevo) je rozšířena klasická laserová triangulační metoda na dvourozměrné měření. Laserový paprsek během pohybu po povrchu součásti kopíruje jeho profil, senzor zaznamenává celou oblast a vyhodnocuje laserové linie pomocí triangulace pod určitým úhlem. Triangulace v případě měření scannerem funguje na principu trigonometrického výpočtu. Pomyslný trojúhelník o námi známé jedné vzdálenosti (mezi laserovým zdrojem a optickým snímačem). Třetí bod je na povrchu zkoumaného objektu, jehož souřadnice nás zajímají. [33]

Senzory používající pruhovou projekci (Obrázek 62 - uprostřed) pracují také na triangulačním principu. Pomocí projektoru je promítán na povrch materiálu vzor pruhů a vyhodnocení probíhá obdobně jako u metody linie laserového paprsku. [33]

Fotogrammetrická metoda (Obrázek 62 – vpravo) pracuje na principu snímání povrchu ze dvou různých směrů. Pomocí triangulace se vypočítají prostorové souřadnice každého snímaného prvku objektu pomocí vztahů mezi úhly. Z důvodu nízké strukturalizace objektu se na povrch promítne mřížka a vzniklý vzor se zachytí oběma kamerami a vyhodnotí. [33]

Dále je znám princip konfokální mikroskopie. Pohyblivá kamera pomocí výškového polohování získá během jednoho „projetí“ velké množství naměřených bodů ve formě série optických řezů obrazu. Základním principem je v naskládané sérii nasnímaných optických řezů v hladině Z. Výsledný 3D obraz obsahuje informace o výšce v libovolné poloze, což umožňuje 3D měření skutečného tvaru. [34]



Obrázek 62 - Příklady bezdotykového měření [34]

### 4.2.3 Měření GMI

Přístroje GMI (Gear-measuring instrument) se využívají při potřebě důkladné kontroly kvality finálního výrobku a jsou uváděny jako jednoúčelové stroje. GMI jsou ovládány pomocí CNC (Computer Numerical Control), nebo PC a provádějí měření kontinuální detekce na základě geometrie měřeného ozubeného kola. Získané hodnoty z trajektorie se poté porovnají s teoretickým modelem s odpovídajícími parametry tak, jako tomu bylo u výše zmíněných měření. Na jedno upnutí tedy lze měřit typické parametry ozubeného kola jako je úchylka profilu zubu, rozteče, sklonu zubu, obvodové házení nebo tloušťka zubu a dalších parametrů tolerancí, rozměrů a poloh souvisejících s jeho tvarem. Stroje tohoto typu dokáží měřit čelní ozubená kola s příkými i šikmými zuby, šroubové, šnekové ozubení. [42]

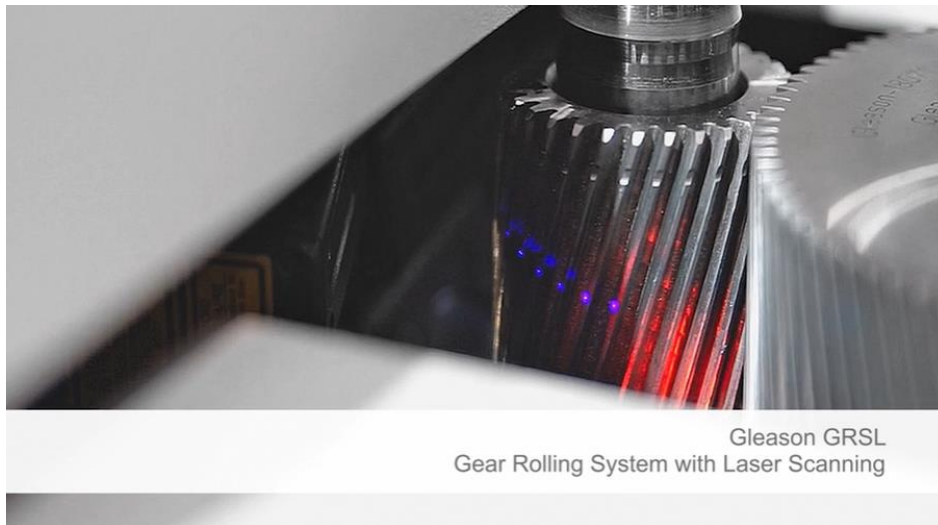
Firma Gleason patří k jedné z nejvýznamnějších v oblasti řešení převodových poměrů, vývoje strojů pro výrobu a měření ozubených kol. V roce 2018 představila multisenzorový stroj 300GMSL. Stroj je vybaven dotykovým snímačem, který snímá charakteristické údaje ozubení (čelní příčné, šikmé, spirálové a kuželové) o průměru do 300 mm dotykovou metodou, jak již bylo popsáno výše. Platforma podporuje dále bezkontaktní laserové skenování, které oproti dotykovému umožňuje získávat data mnohem rychleji. Mezi volitelné funkce kontroly patří také měření povrchové úpravy a Barkhausenova analýza šumu. [42]



Obrázek 63 - Gleason 300GMSL [42]

Firma Gleason dále nabízí stroj GRSL (Gear Rolling System with Integrated Laser Technology), který kombinuje tradiční testování odvaem s pokročilou bezkontaktní laserovou technologií v jednom systému. Cykly pro inspekci probíhají během několika sekund. Maximální

průměr kola pro GRSL je 250 mm a maximální modul je 7,2 mm. Použití automatizace pro manipulaci s díly představuje také značnou úsporu času. [43]



*Obrázek 64 - Gleason GRSL [43]*



## 5 Realizace experimentu

Hlavním cílem této práce v rámci experimentální části byla analýza defektů třech dodaných ozubených kol od průmyslového partnera, pomocí vybavení laboratoří Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

Na základě toho jsem se zabýval následujícími body:

- Lokalizace defektů na ozubených kolech a jejich vizualizace pomocí digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000
- Za pomoci CMM (souřadnicového měřicího stroje) Zeiss Prismo 7 proměřit 3 dodaná kola a jejich defekty
- Analýza studie zvolené bezdotykové metody snímání 2D scannerem

## 5.1 Zadané součásti

Pro analýzu defektů byla zadána tři odlišná ozubená kola průmyslovým partnerem. U všech třech se jedná o ozubení přímé se šikmými zuby. Každé kolo obsahuje defekt na pracovní části ozubení, který určitým způsobem zasahuje do plynulosti chodu a znemožňuje bezproblémové plnění účelu ozubeného kola.

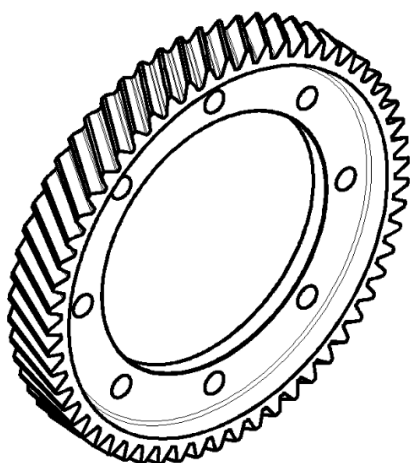
Specifikace defektů:

Defekty se nachází nebo zasahují na pracovní plochy zubů těchto kol. Je na začátku nutné říci, že se nejedná o defekty způsobené faktory, jako jsou konstrukční řešení, volba materiálu kola, povrchové úpravy, opotřebení nebo nevhodné provozní podmínky. V tomto případě se u všech třech kol jedná o defekty způsobené nevhodnou manipulací a nedodržením jejího pracovního postupu. Každé kolo má defekt na jiném místě, ale ve výsledku všechny defekty způsobují narušení pracovní plochy boku zubu.

### Kolo č. 1

První dodanou součástí je diferenciál (Obrázek 65). Řešeným objektem u této součásti je vnější ozubený věnec s přímými šikmými zuby. Defekt, který nás zajímá, se nachází na hraně mezi zkosenou částí profilu zubu a plochou boku zubu. Poškození této hrany má za následek vyboulení materiálu do hlavové části boku zubu.

Číslo dílu: TAB 030 063.



Obrázek 65 - Náhled a fotografie ozubeného kola č. 1 - TAB030063

Fotografie oblasti defektu kola č. 1 je na následujícím Obrázek 66.

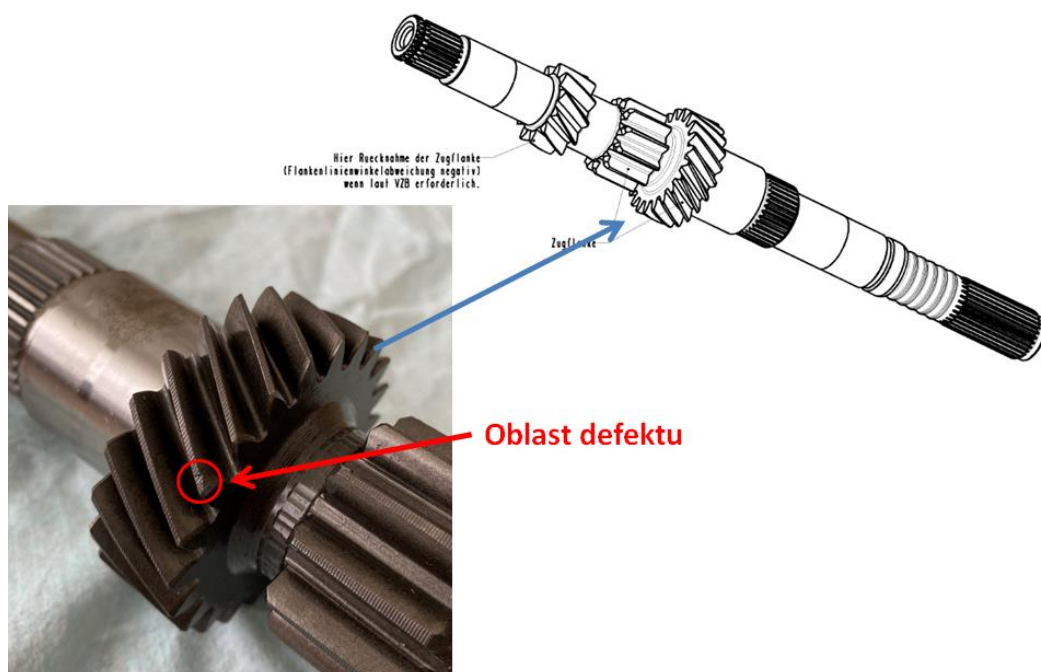


Obrázek 66 - Oblast defektu kola č. 1

## Kolo č. 2

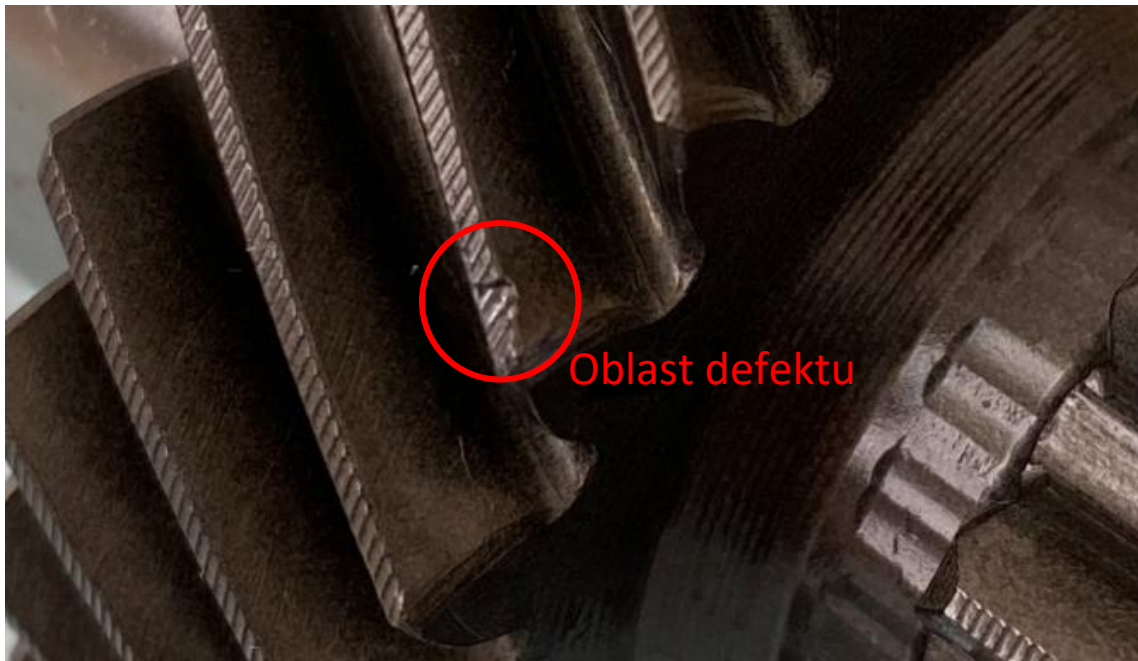
Druhou dodanou součástí je hřídel s ozubením (Obrázek 67). Řešeným objektem u této součásti je vnější ozubení s přímými šikmými zuby. Defekt, který nás zajímá, se nachází na vrcholu zubu a částečně přechází a zasahuje přes hranu až do hlavové části boku zubu. Poškození této hrany má za následek vyboulení materiálu do hlavové části boku zubu.

Číslo dílu: TAB 001 827 D.



Obrázek 67 – Náhled a fotografie ozubeného kola č. 2 TAB 001 827 D

Fotografie oblasti defektu kola č. 2 je na následujícím Obrázek 68.



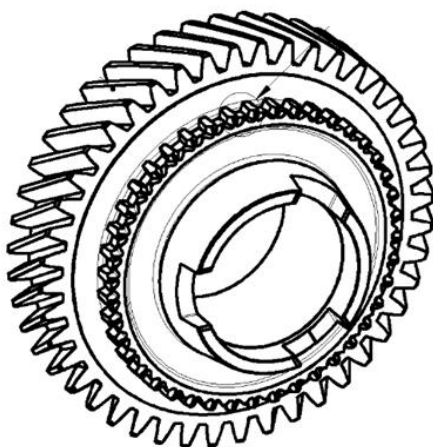
Obrázek 68 - Oblast defektu kola č. 2

### Kolo č. 3

Třetí dodanou součástí je ozubený pastorek (Obrázek 69). Řešeným objektem u této součásti je jeho vnější ozubení s přímými šikmými zuby. Defekt, který nás zajímá, se nachází na rohu zubu, kde se setkává vrchol zubu a zkosení  $0,5 \times 45^\circ$ . Poškození této hrany má za následek vyboulení materiálu do hlavové části boku zubu.

Číslo dílu: TAB 001 808 BQ.

### 3D-Ansicht



Obrázek 69 - Náhled a fotografie ozubeného kola č. 3 - TAB001808BQ

## 5.2 Lokalizace defektů a jejich vizualizace

Po lokalizaci poškození na jednotlivých ozubených kolech jsem součásti umístil a na podložku digitálního mikroskopu VHX-6000 od firmy Keyence. Pomocí tohoto mikroskopu byla provedena kompletní vizualizace defektů. Během snímání byla využita funkce 3D obrazu s hloubkovou kompozicí, která je realizována pomocí motorizovaného pohonu v ose Z. Vytvoří se tak řada snímků v různých výškových polohách. Výsledný 3D obraz obsahuje informace o výšce v libovolné poloze, což umožňuje 3D měření skutečného tvaru.

Použitý přístroj: **Digitální mikroskop řady VHS-6000**

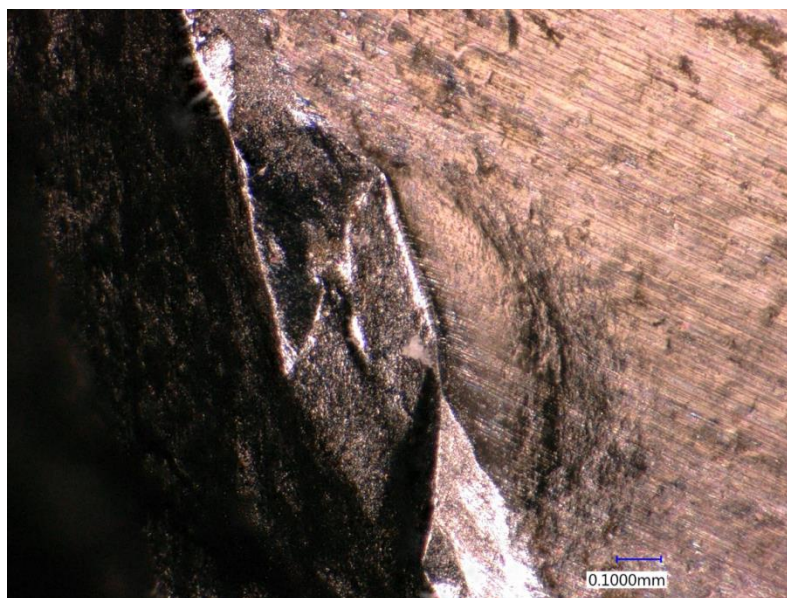
Výrobce: Keyence



Obrázek 70 - Digitální mikroskop VHX-6000

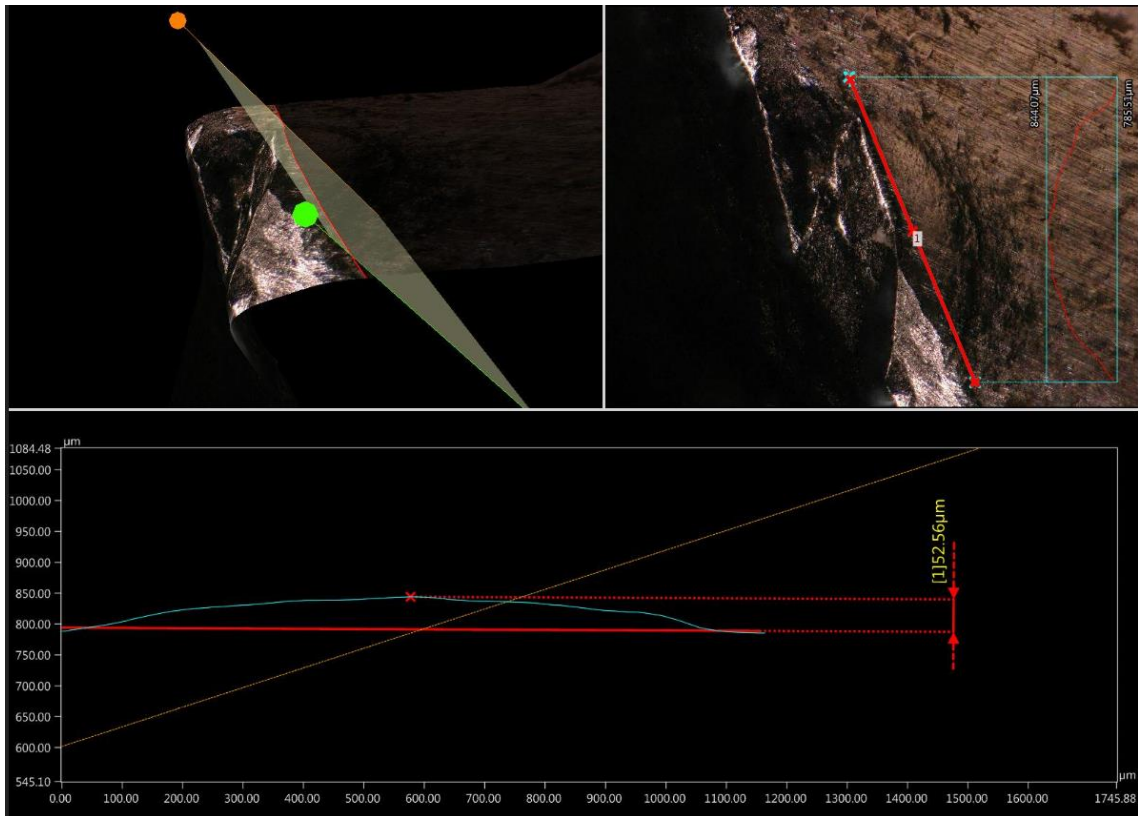
### Kolo č. 1

Na následujícím Obrázek 71 je mikroskopický snímek defektu na ozubeném kole č. 1.



Obrázek 71 - Mikroskopický snímek defektu kola č. 1

Po nasnímání poškození byl vyhodnocen jeho 3D obraz (Obrázek 72), který byl proložen rovinou měření a vyhodnocena křivka profilu ležící na této rovině.

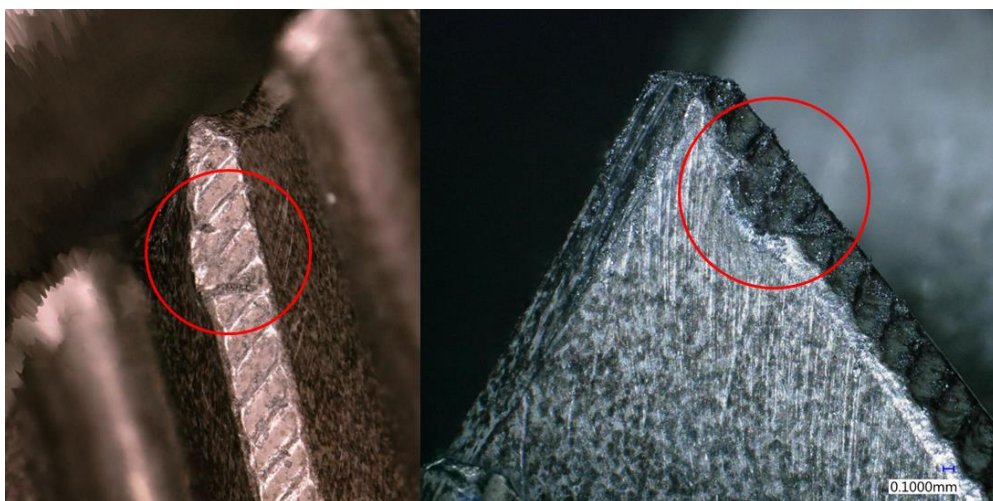


Obrázek 72 - 3D obraz a měření tvaru

Křivka se poté proložila přímkou rovnoběžnou s nepoškozenou částí boku zubu a změřena její vzdálenost (výškový rozdíl) od nejvyšší hodnoty defektu. Výsledná hodnota nejvyšší odchylky defektu od plochy boku zubu je 0,053 mm.

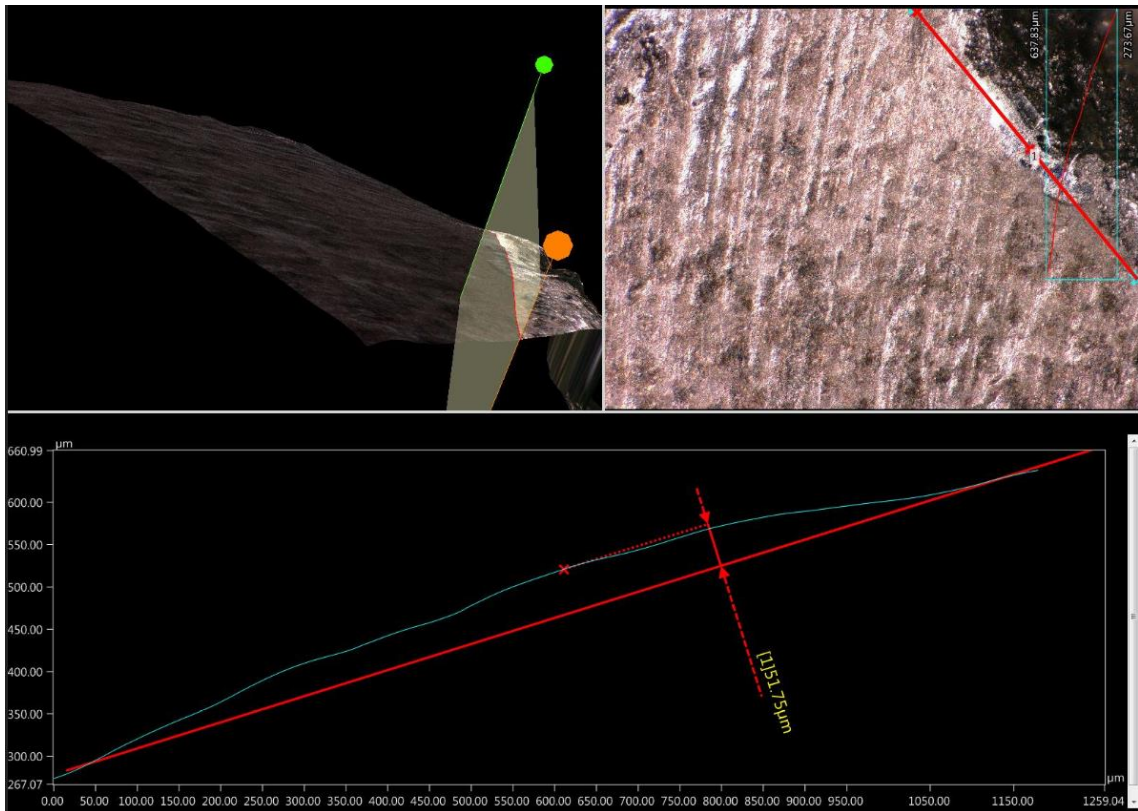
## Kolo č. 2

Na následujícím Obrázek 73 jsou mikroskopické snímky defektu na ozubeném kole č. 2.



Obrázek 73 - Mikroskopické snímky defektu na kole č. 2

Po nasnímání poškození byl vyhodnocen jeho 3D obraz (Obrázek 74), který byl proložen rovinou měření a vyhodnocena křivka profilu ležící na této rovině.

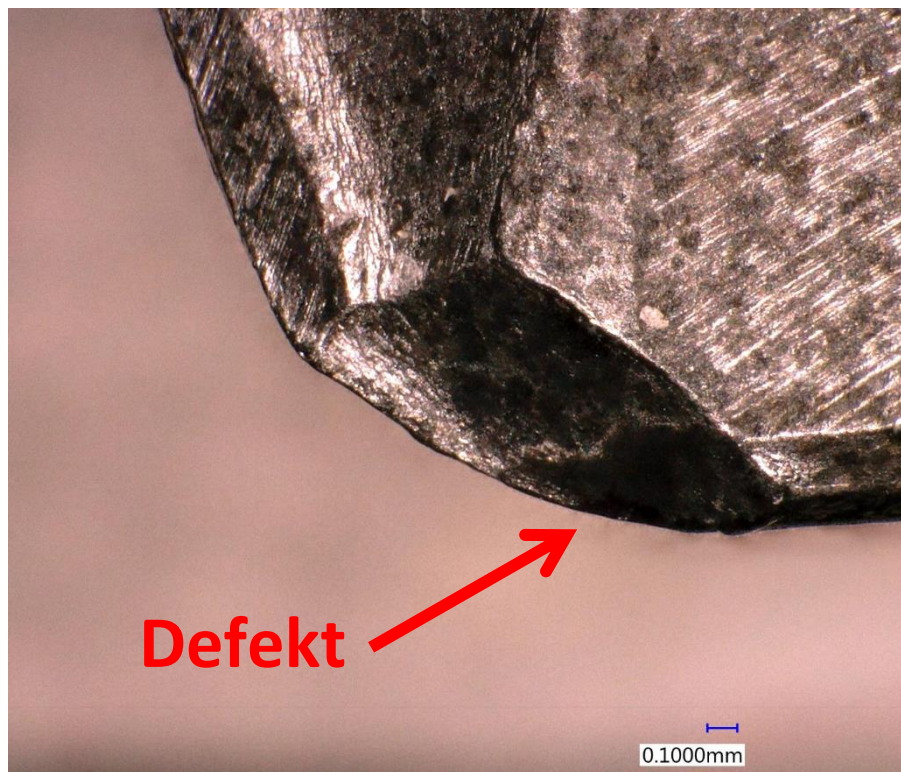


Obrázek 74 – 3D obraz a měření tvaru

Křivka se zpracovala a vyhodnotila stejně jako u kola č. 1. Výsledná hodnota nejvyšší odchylky defektu od plochy boku zubu je 0,052 mm.

### Kolo č. 3

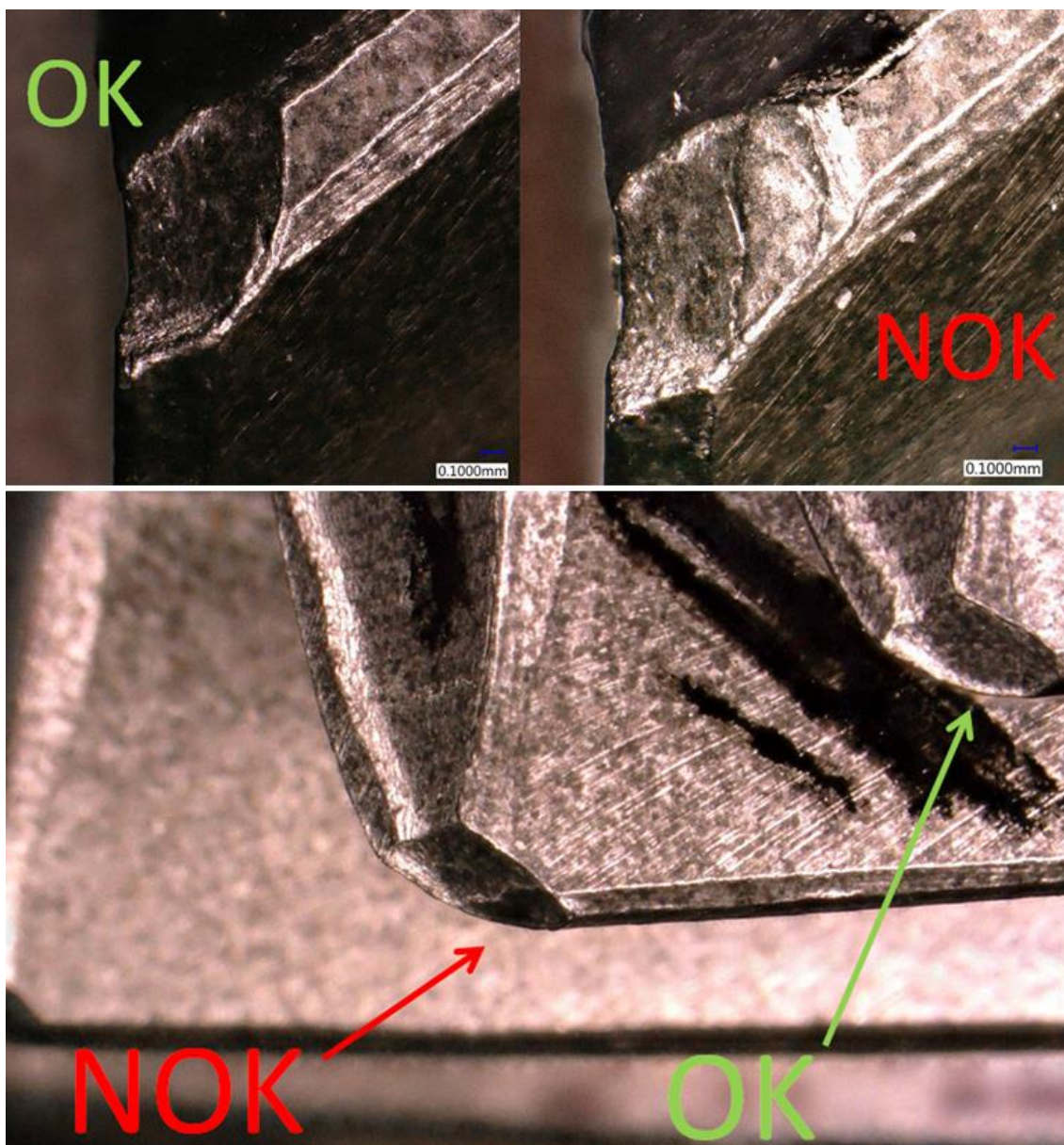
Na následujícím Obrázek 75 je mikroskopický snímek defektu na ozubeném kole č. 3.



*Obrázek 75 – Mikroskopický snímek defektu kola č. 3*

Z důvodu velikosti a poloze poškození jej nebylo možné touto metodou vyhodnotit. Proběhla tedy pouze důkladná vizualizace, kterou lze vidět na následujícím Obrázek 76.





Obrázek 76 - Vizualizace kola č. 3 - porovnání

#### Shrnutí a zhodnocení metody

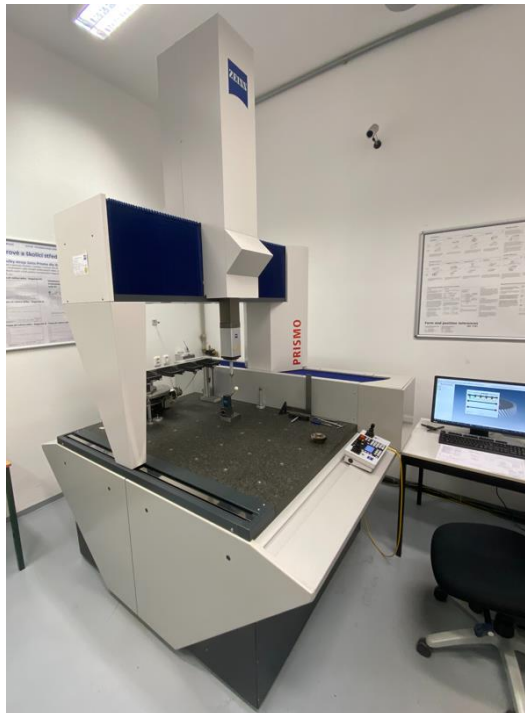
Tato metoda s využitím digitálního mikroskopu s funkcí 3D obrazu s hloubkovou kompozicí pomohla s vizualizací defektů. 3D vizualizace byla velmi užitečná k seznámení se s charakterem poškození, představou o jeho velikosti, a pro následnou studii přístupu k měření jednotlivých kol na souřadnicovém měřicím stroji.

### 5.3 Měření defektů ozubených kol na CMM Zeiss Prismo 7

Použitý přístroj: Souřadnicový měřicí stroj Prismo 7

Výrobce: Zeiss

Kartézsky uspořádaný souřadnicový měřicí stroj Prismo 7. Konstrukce tohoto stroje je portálová. Udávaná maximální chyba indikace při měření rozměru  $MPE_E$  je  $2,7 + L/300 \mu\text{m}$ .



Obrázek 77 - CMM Zeiss Prismo 7

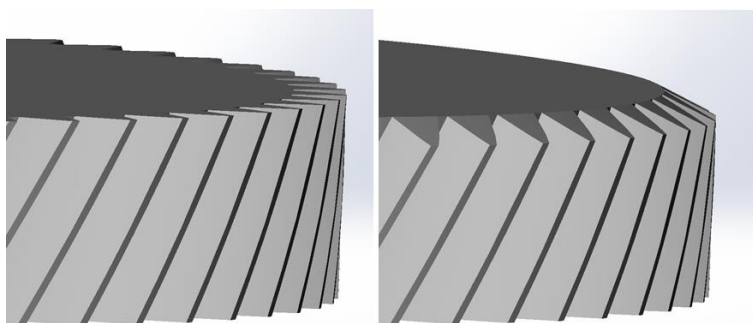
V rámci tohoto měření byl použit přídavný otočný stůl, který se používá při měření rotačně symetrických součástí. Vytvoříme tak možnost „4 osy“, konkrétně rotace kolem osy Z. V první kroku je nutné tento otočný stůl tzv. zaměřit. Zaměření se provádí pomocí metody s tvarově přesným válcem. Osa otočného stolu je zaměřena po celé výšce válce. Zbytkové chyby pravouhlosti měřicího stroje jsou tak kompenzovány a mají menší vliv na nejistotu měření. Po zaměření otočného stolu je zapotřebí mechanicky vyrovnat nově upnutou součást do sklíčidla. Následně zaměřit součást, což se provede obdobným způsobem jako zaměření otočného stolu, tentokrát s využitím softwaru CALYPSO. K zaměření se může využít rotační část součásti (průměr), vodorovná (čelní) plocha v rovině (XY) a bok zubu pro zjištění natočení ozubeného kola.

Pro měření bylo zapotřebí získat 3D model součásti, který nebyl výrobcem dostupný. Postup byl tedy takový, že pomocí softwaru GEAR PRO, se po zadání všech potřebných

parametrů ozubení vygeneroval 3D model ozubeného kola. Měření probíhalo s využitím snímače s rubínovým dotykem o průměru 1 mm.

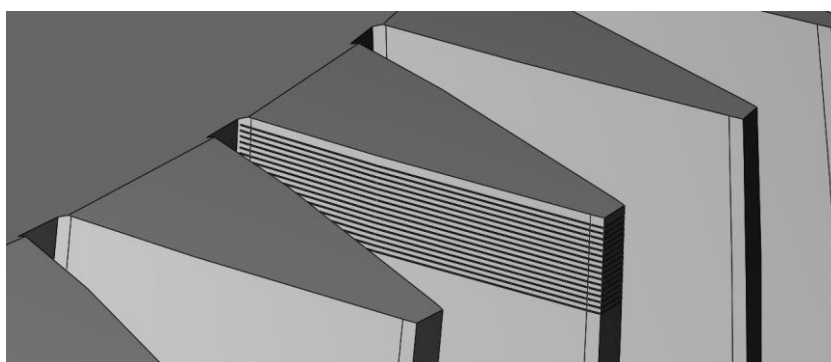
### Kolo č. 1

V případě ozubení č. 1 byla nutná úprava modelu, konkrétně přidání zkosení pod úhlem 25°. Ta byla provedena v programu SolidWorks .



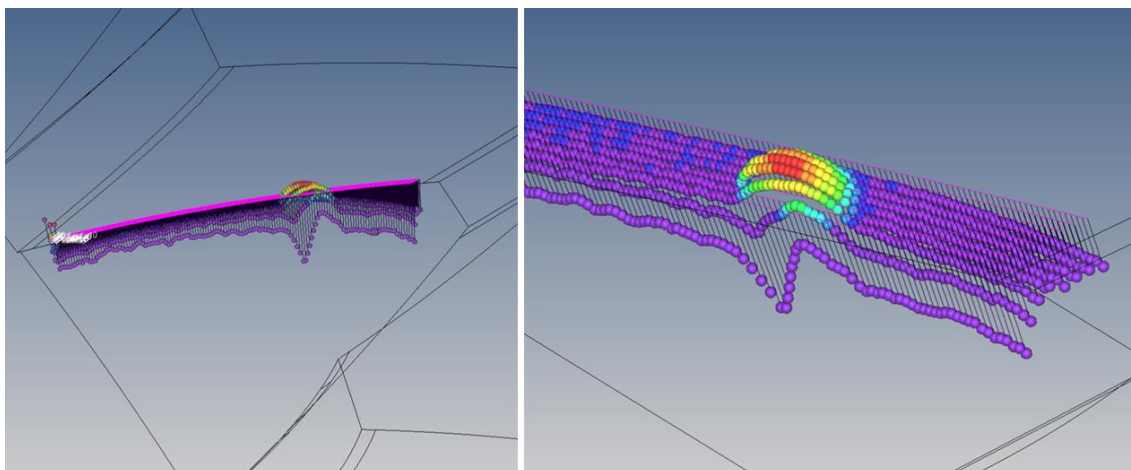
Obrázek 78 - Úprava modelu - zkosení

V softwaru GEARPRO bylo provedeno kompletní proměření ozubeného kola s vyhodnocením ve formě protokolu. Každopádně pro účel měření defektů nelze software GEARPRO použít. Vyhovující v tomto směru je software CALYPSO, ve kterém můžeme definovat přesně dráhu dotyku snímače s povrchem součásti, například křivkou. Tento postup byl použit při definici dráhy pro měření defektu na aktuálním kole č. 1. Křivka se nachází na teoretické normální rovině natočené právě o úhel 25° a kopíruje tak tento profil zubu. Těchto křivek se nadefinovalo několik, aby se zahrnula celá oblast defektu. Pro představu je na Obrázek 79 znázorněno.



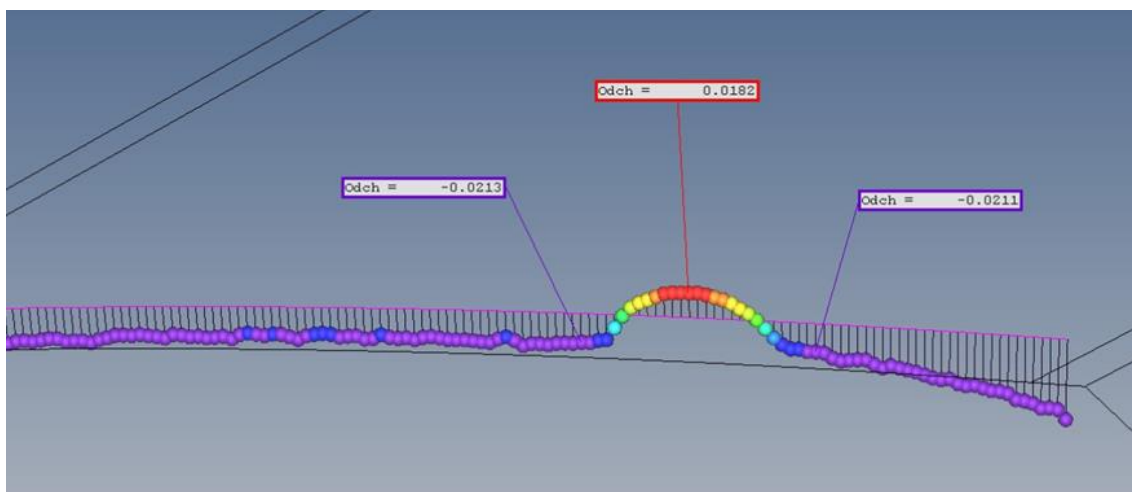
Obrázek 79 - Ilustrační zobrazení pohybu dotykové sondy nástroje

Vyhodnocené měření je vizualizováno na následujícím Obrázek 80. Pro vizualizaci je vždy použito desetinásobné zvětšení trajektorie pohybu snímače.



Obrázek 80 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 1

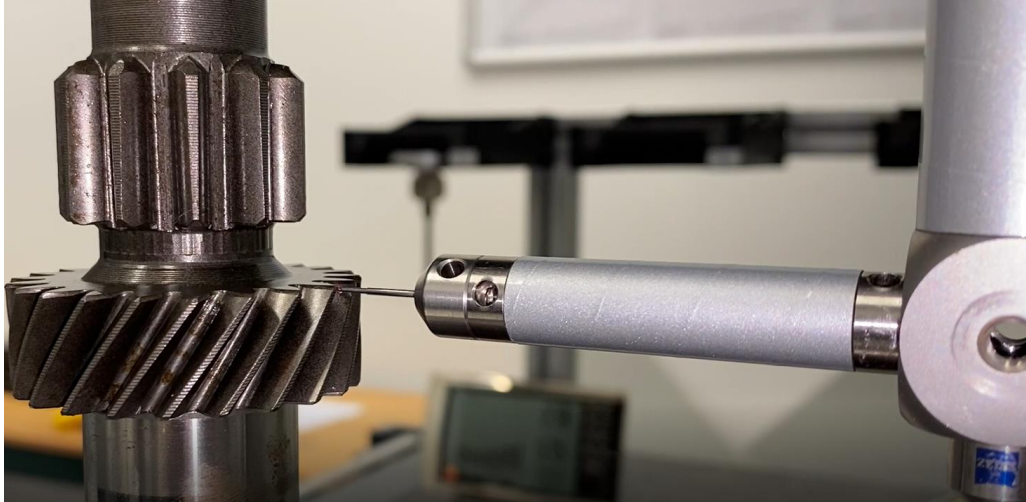
Výsledná hodnota nejvyšší odchylky defektu od plochy boku zubu je **0,0395 mm**. Výsledky měření jsou vizualizovány na Obrázek 81.



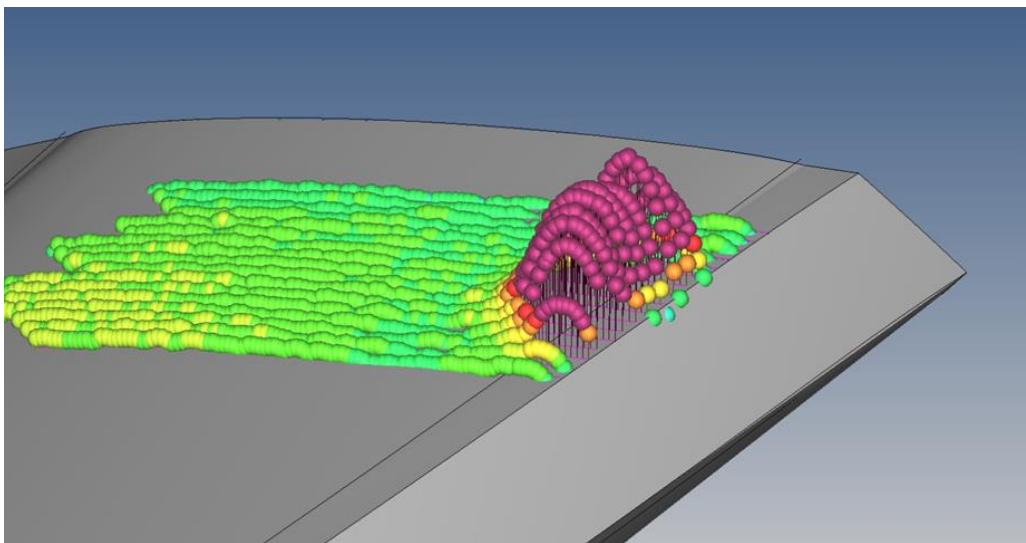
Obrázek 81 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 1

## Kolo č. 2

U kola č. 2 nebyla potřeba žádná úprava vygenerovaného modelu softwarem GEARPRO. A po vytvoření modelu se rovnou mohlo pracovat na definování trajektorie snímače, která kopíruje tvar čelního profilu zubu (Obrázek 82). Těchto křivek se v tomto případě nadefinovalo 17, aby se zahrnula celá oblast defektu, což je viditelné na následujícím Obrázek 83.

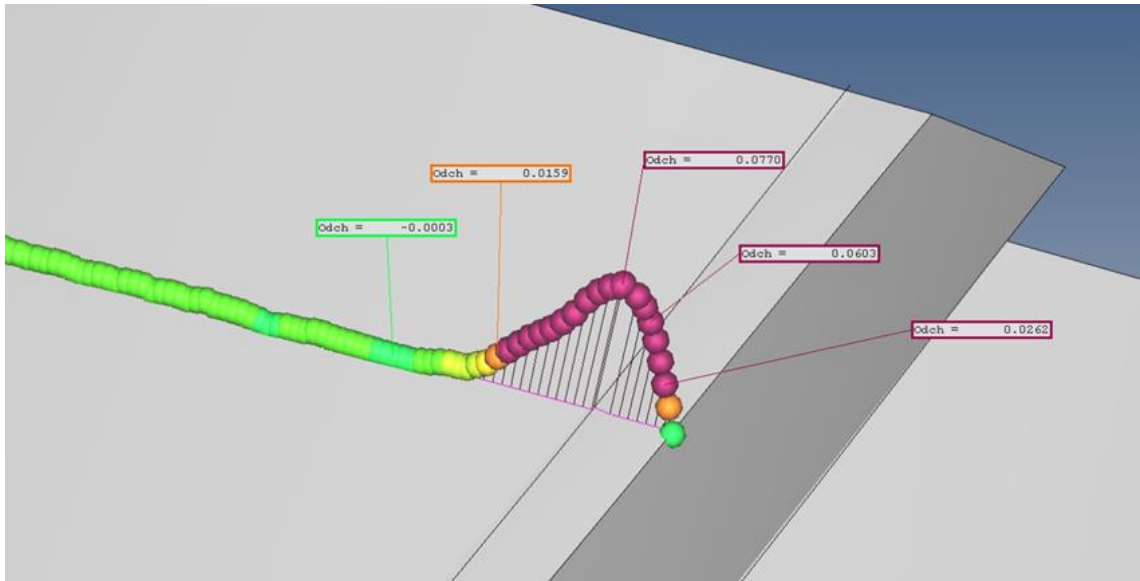


Obrázek 82 - Měření kola č. 2 metodou CMM



Obrázek 83 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 2

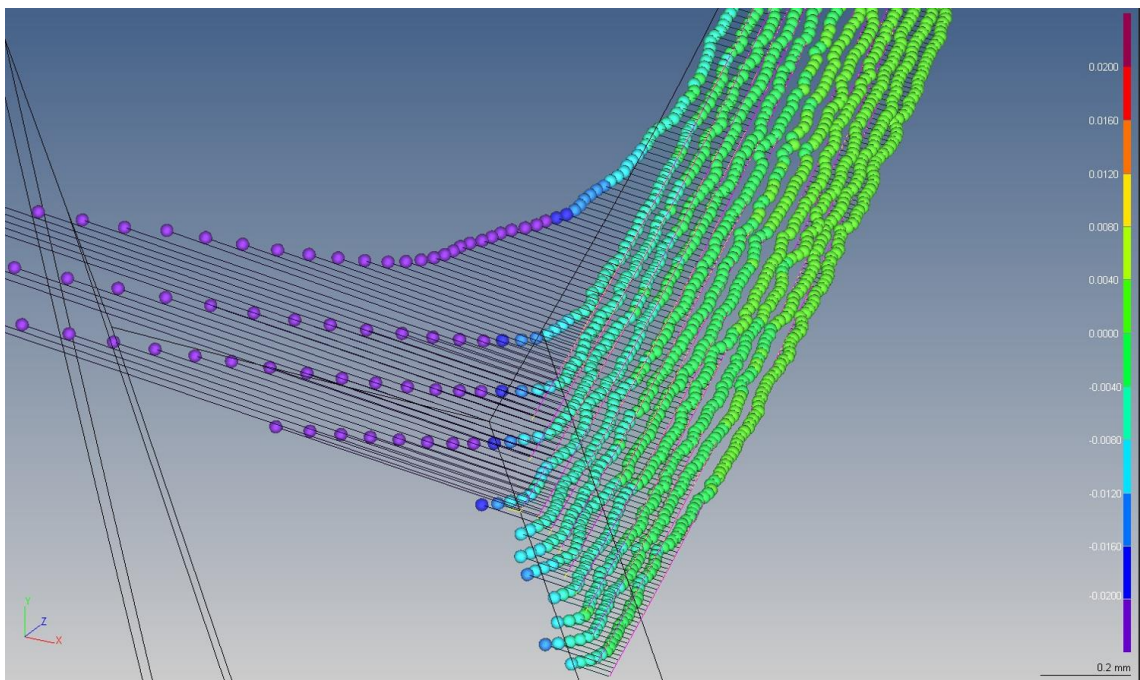
Výsledná hodnota nejvyšší odchylky defektu od plochy boku zubu je **0,0773 mm**. Výsledky měření jsou vizualizovány na Obrázek 84.



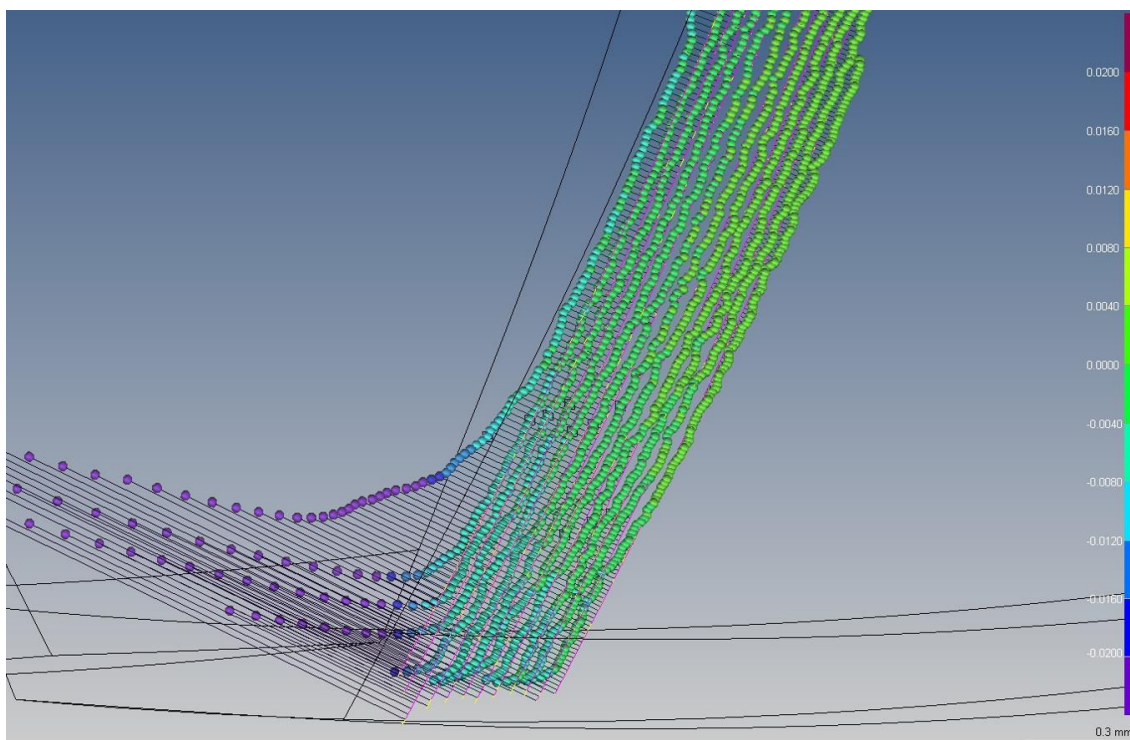
Obrázek 84 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 2

### Kolo č. 3

U kola č. 3 a jeho defektu nebylo možné z hlediska měření na CMM vyhodnotit výsledek, z důvodu velikosti a umístění defektu. Výsledky měření na následujících obrázcích ukazují, že defekt nebyl snímačem detekován.



Obrázek 85 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 3



Obrázek 86 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 3

### Shrnutí a zhodnocení metody

Tato metoda s využitím CMM je vhodná pro detailní změření veškerých vad na povrchu zubů a splnila očekávané požadavky. Podařilo se získat informace ohledně typu poškození, které zahrnují jeho charakteristické vlastnosti a velikost. Výsledky s přesností odpovídají měřicímu stroji jsou kvalitně zpracovány jak v číselné, tak i grafické podobě. I přes tyto kladné přínosy této metody je nutné konstatovat, že není vhodná pro toto zadání detekce defektů. Hlavním důvodem je časová náročnost celého procesu měření. Proměření defektu zabere řádově desítky sekund, ale veškeré přípravné práce pro spuštění samotného měření jsou v řádech desítek minut. Je tedy nereálné se touto metodou přiblížit zadání, měření ideálně v taktu linky.

## 5.4 Analýza zvolené bezdotykové metody snímání 2D scannerem

Zadáním bylo provést kontrolu defektů ozubených kol pokud možno v co nejkratším čase, ideálně ve výrobním taktu linky. Jak již bylo zmíněno, metoda CMM tento požadavek nesplňuje z důvodu časové náročnosti upnutí a vyrovnání součásti a následně volbě a realizaci měřicí strategie. Proto se výběr snímacích metod ubíral směrem k metodám bezkontaktním. Jejich hlavní předností je právě rychlost snímání. Pro měření ozubení v praxi se začínají čím dál více uplatňovat metody měření s využitím laser scanneru. Tento druh snímání je popsán v podkapitole „Bezdotykové měření“ a princip je schematicky znázorněn na Obrázek 62 – a). Pro analýzu v rámci této části práce bylo vybráno ozubené kolo č. 1.

### 5.4.1 Zařízení TLE1

Pro vybranou metodu, tedy metodu měření s využitím 2D scanneru, byl zvolen laserový triangulační senzor s Ethernet rozhraním TLE1-35-65 od firmy Metralight (Obrázek 87). Jedná se o průmyslový snímač o rozměrech 100x70x25 mm. Projekce laserového paprsku diodou dopadá na měřený povrch a je následně snímána snímkovou frekvencí 51 fps pomocí CMOS (angl. *Complementary Metal–Oxide–Semiconductor*) detektoru o rozlišení 1280x1024 pixelů. Z nasnímaného profilu je poté vypočtena vzdálenost všech jednotlivých bodů a případně vizualizována v programu. Senzor TLE integruje technologii triangulace laserové čáry s ethernetovým rozhraním. [44]



Obrázek 87 - Triangulační senzor TLE1 [44]



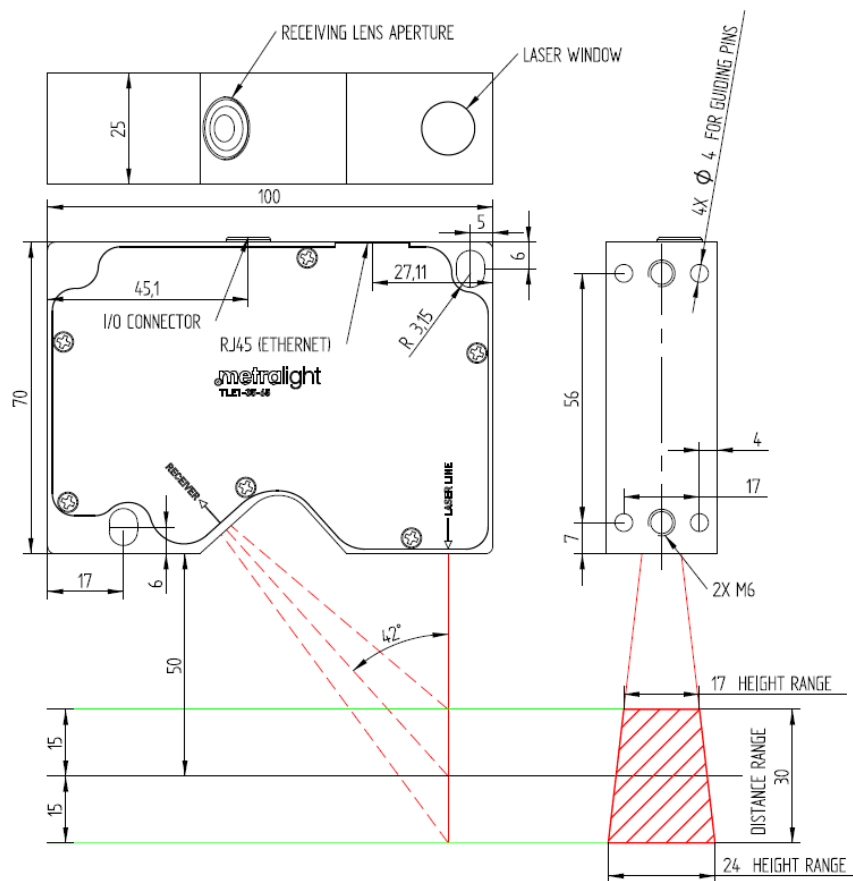
Tento scanner je jedním ze tří v řadě TLE1 firmy Metralight. V následující Tabulka 5 jsou uvedeny parametry všech třech typů této řady. Použitý scanner a jeho vlastnosti jsou zvýrazněny zelenou barvou.

Tabulka 5 - Metralight scannery řady TLE1 [44]

	TLE1-35-65	TLE1-58-122	TLE1-100-300
Distance measurement range	35 to 65 mm	58 to 122 mm	100 to 300 mm
Height measurement range	17 mm at 35 mm distance 24 mm at 65 mm distance	23 mm at 58 mm distance 40 mm at 122 mm distance	30 mm at 100 mm distance 90 mm at 300 mm distance
Line size *	40 $\mu\text{m}$ $\times$ 20.5 mm	60 $\mu\text{m}$ $\times$ 31.5 mm	140 $\mu\text{m}$ $\times$ 60 mm
Detector	CMOS (1280x1024 pixels)		
Distance Resolution	1 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
Distance Nonlinearity	10 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Height Resolution	24 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
Response Time	33.34 ms for full readout or faster for partial readout		
Interface	RJ45 (Ethernet) - 10/100 Mbit		
Communication	TCP protocol, ICMP (ping)		
Digital inputs (optional)	minimum pulse width 200 $\mu\text{s}$		
Power	POE (Power over Ethernet), from 12 (150mA) to 24 VDC (80mA)		
Weight	105 g		
Dimensions	100 $\times$ 70 $\times$ 25 mm		
Laser	650 nm, Class 1M, P<3mW	650 nm, Class 2M, P<10mW	650 nm, Class 2M, P<10mW

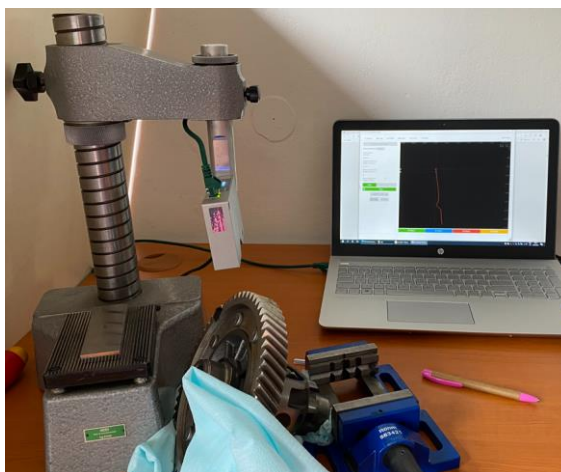
\* at middle measuring range

Výrobce uvedené schéma (Obrázek 88) zobrazuje laserový scanner TLE1-35-65. Měřicí pole, ve kterém je snímač schopen zachytit laserovou linii, vyhodnotit a dodržet parametry uvedené výrobcem, je ve tvaru lichoběžníku.



Obrázek 88 - Schéma scanneru TLE1-35-65 [mm] [44]

Prvotní seznámení se scannerem, softwarem TL Studio pro vyhodnocení a s metodou snímání, proběhlo na měřicím stojanu Somet (typ 67209), který má možnost výškového polohování v jedné ose a otáčení okolo této osy. Ostatní potřebné polohování bylo nutné provést manipulací s ozubeným kolem. Tato metoda byla vyhovující pro seznámení se základní problematikou snímání a manipulací během procesu. Pro jakýkoliv další postup měření je nevhovující.



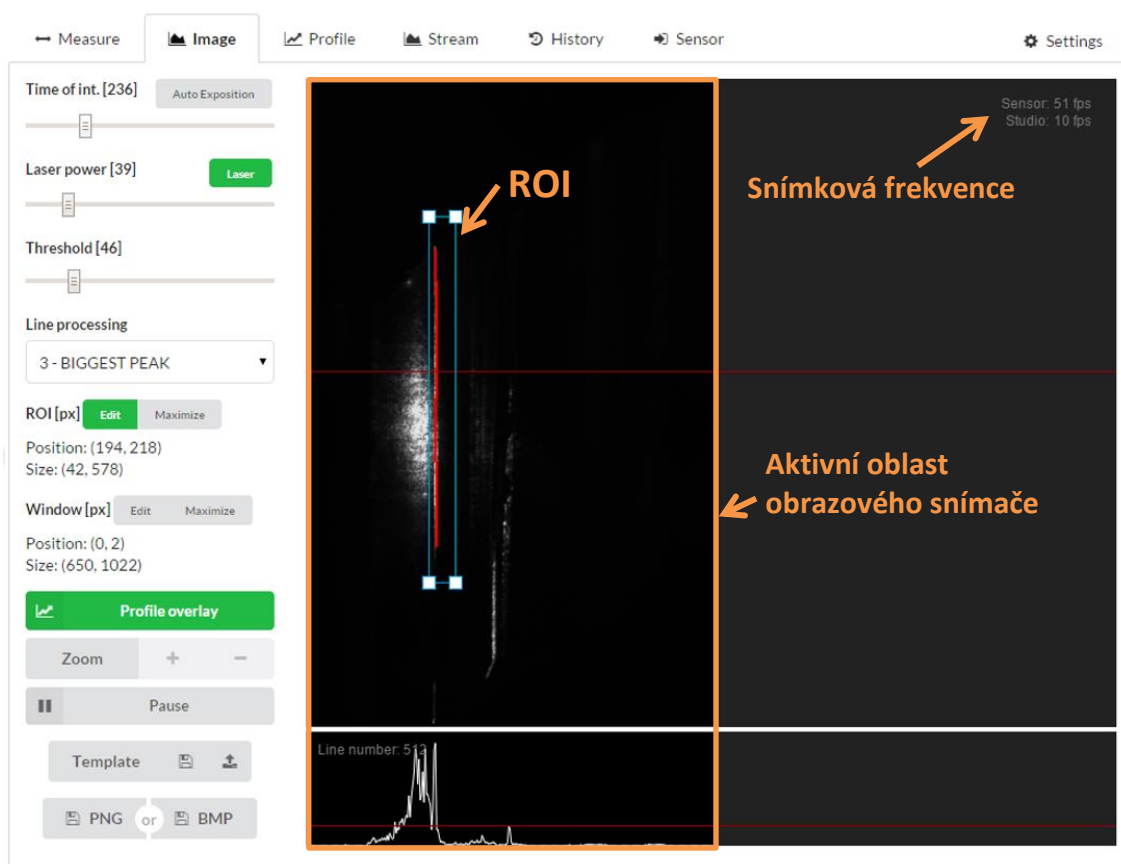
Obrázek 89 - Prvotní měřicí pracoviště

Software TL studio je dodáván společně se scannerem. Používá se primárně pro nastavení jednotlivých parametrů senzoru pro konkrétní měřicí aplikace. Po nastavení je nutná integrace do systému zákazníka. Výsledky jsou čteny softwarem přes datové příkazy. Zařízení lze nastavit až na 8 různých „profilů“, z nichž každý obsahuje jiné parametry. Pro základní orientaci software nabízí 7 karet (Measure, Image, Profile, Stream, History, Sensor, Settings). Karta Measure, tedy Měření obsahuje parametry (Vzdálenost a výška) čtyř měřených bodů na profilu měřeného objektu. Body mají různý význam podle měřicího režimu. Karta Image, která je v rámci této studie nejdůležitější, obsahuje nezpracovaná data snímače obrazu. Jednotky uvedených dat jsou pixely. V levém sloupci je možnost nastavení parametrů, které ovlivňují zpracování profilu z obrazových dat. Profil overlay (překrytí profilu) umožňuje detekci a následné proložení křivkou (spojené souřadnice jednotlivých bodů, tzv. mračna bodů) vyhodnoceného profilu a lze jím sledovat jeho změny. [45]

Lze nastavovat tyto parametry:

- **Time of integration** (Čas integrace)  
Jedná se o dobu expozice. Vyšší hodnota zaručí jasnější obraz. [45]
- **Laser power** (Výkon laseru)  
Nastavení intenzity laserového světla. [45]
- **Threshold** (Práh)  
Nastavení hodnoty minimálního světla v pixelech v řadě obrazu, které mají být přeneseny do algoritmu zpracování profilu. [45]
- **Line processing** (Zpracování linie)  
Nastavení metody výpočtu profilu z pixelů přes „Threshold“. Na výběr jsou první vrchol, poslední vrchol, největší vrchol nebo celkový práh (průměr). Pro účely tohoto experimentu byla využita volba „3-Biggest peak“ (největší vrchol). [45]
- **ROI** (region of interest – oblast zájmu)  
Oblast zájmu, ve které je profil zpracováván. Jeho nastavením lze zamezit a eliminovat nežádoucí oblast (odrazy apod.) [45]
- **Window** (Okno)  
Jedná se o aktivní oblast obrazového snímače. Snížením obrazu lze zvýšit snímkovou frekvenci. Při plném rozsahu jsou parametry snímkové frekvence: Senzor 30 fps, Studio 7 fps. Při omezeném rozsahu na polovinu

(použito při tomto experimentu) se docílí snímkové frekvence: Senzor 51 fps, Studio 10 fps. [45]

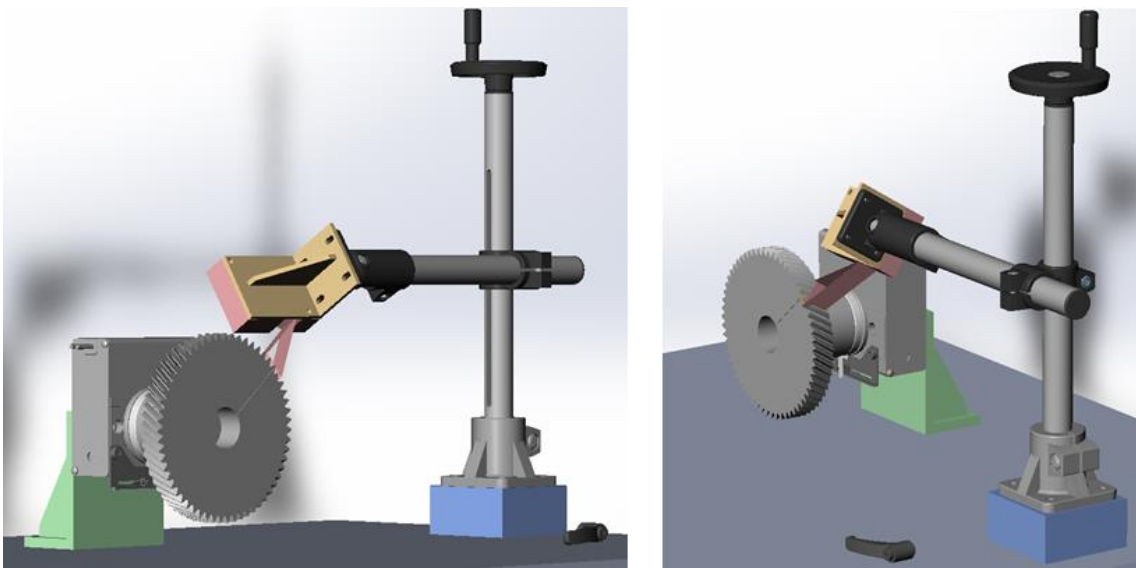


Obrázek 90 – Snímek ze softwaru TL Studio - karta Image

Karta Profile (Profil) obsahuje již zpracovaný a kalibrovaný profil složený z bodů na základě dat z obrazového snímače. Jednotky je možné nastavit v TL Studiu a na výběr jsou mikrometry, milimetry a palce. Dva kurzory lze použít k měření svislých nebo vodorovných vzdáleností mezi libovolnými body profilu. Karta Stream umožňuje číst a analyzovat data při aktuální maximální snímkové frekvenci snímače. Je umožněno analyzovat dynamické scény a jevy. Karta History (Historie) vizualizuje všechny měření, která proběhla ve vybraném čase a lze ji použít k monitorování vývoje měřených hodnot za čas. Karta Senzor obsahuje všechny dostupné parametry senzoru na jednom konfiguračním panelu. Jednotlivé parametry lze nastavovat a ukládat do 8 různých „profilů“. Karta Settings (nastavení) obsahuje informace o nastavené IP adrese, aktualizací nástroje, odečet firmwaru a paměti a informace o aktuální verzi. [45]

#### 5.4.2 Návrh pracoviště č. 1

Na základě zjištěných informací z prvotního stanoviště kontroly byl pro bezdotykové měření realizován v programu SolidWorks návrh pracoviště s využitím polohovatelného mechanismu z hliníkových profilů, polohovatelných spojek a lineárního mechanismu od firmy Eles+Ganter. Princip pracoviště je v pevně uchyceném ozubeném kole na elektrickém pohonu SMC přes sklíčidlo. Tím je zaručen potřebný rotační pohyb součásti pro měření s polohováním řízeným přes program. 2D scanner je umístěn na polohovacím zařízení, které umožňuje lineární polohování ve dvou osách. V případě umístění konstrukce na lineární vedení by bylo možné doplnit polohování ve třetí ose. Dále umožňuje rotaci okolo třech os.



Obrázek 91 - Návrh pracoviště č. 1 (program SolidWorks)

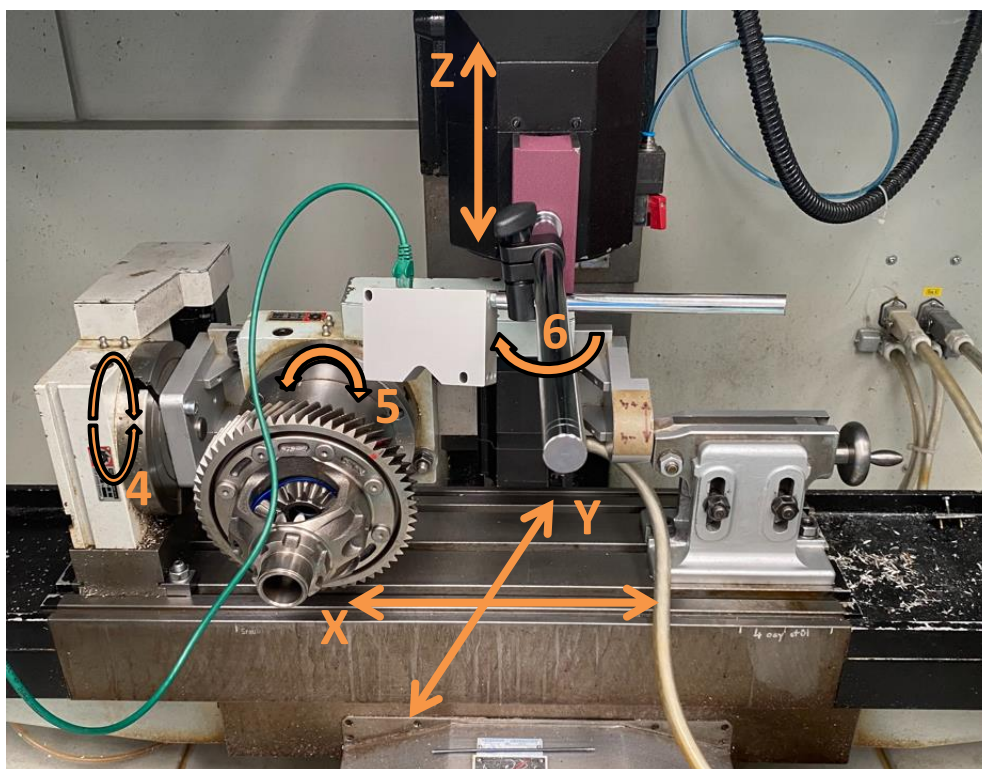
#### 5.4.3 Analýza defektů na stroji FC 22 CNC

Pro realizaci experimentu analýzy defektu na kole č. 1 bylo použito pracoviště č. 2, v rámci kterého byla využita frézka FC 22 CNC (Obrázek 92). Jedná se o stroj vybaven čtvrtou řízenou CNC osou, na které je přimontováno přes konstrukci sklíčidlo také s řízenou CNC osou. To zastává funkci páté řízené osy. V tomto sklíčidle je upnuto měřené ozubené kolo. Pro uchycení 2D scanneru byla využita konstrukce osy Z a k ní uchycený univerzální magnetický stojan (Obrázek 93). Základní parametry stroje jsou následující:

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| • Pracovní zdvih os             | X=450 mm, Y=220 mm, Z=320 mm. |
| • Rychlost posuvu               | 0 – 5000 mm/min               |
| • Otáčky vřetene                | 50 – 3000 1/min               |
| • Opakovaná přesnost polohování | 0,005 mm                      |

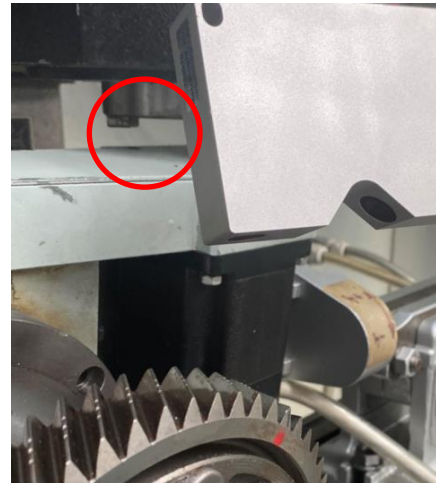


Obrázek 92 - Experimentální pracoviště č. 2 (stroj FC 22 CNC)



Obrázek 93 - Experimentální pracoviště č. 2

Omezení z hlediska konstrukce pracoviště během měření nastalo pouze v jednom případě, konkrétně osy Z společně s konstrukcí 5-té řízené osy. To částečně omezovalo možnosti polohování (rotace kolem osy X) při nastavení optimálních poloh snímání. Při polohování rotace 4té osy a současně nastavení základny snímače do dolní polohy by mohlo dojít ke kolizi. Toto omezení ale nebylo nijak limitující pro vyhodnocení výsledků této studie.



Obrázek 94 - Vyznačení možné kolize

### Nastavení polohy a trajektorie 2D scanneru

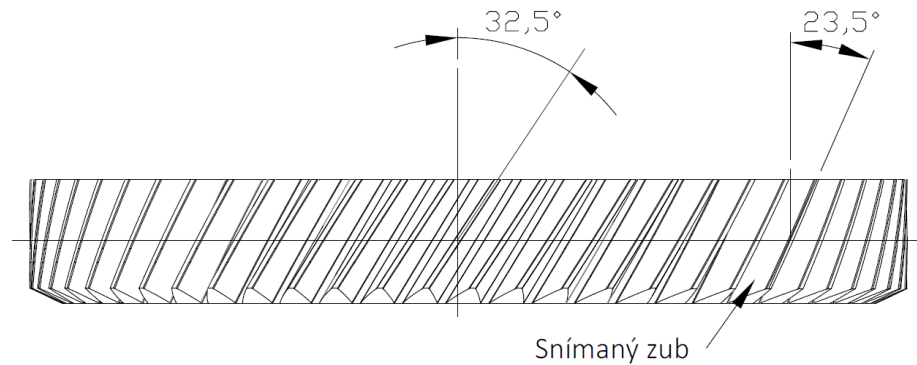
V rámci studie byla nejprve vyzkoušena trajektorie laserového paprsku, která svírala s čelní rovinou kola úhel přibližně 40°. Nejen že by tato zvolená strategie byla nevhodná z důvodu stínění sousedním zubem, ale také by se měření a následné vyhodnocení týkalo pouze části zubu. S úpravami by byla možná použít v případě, že by se defekt opakoval a vyskytoval na stejné hraně u více kol. V tom případě by bylo možné aplikovat pro vyhodnocení pouze této hrany.



Obrázek 95 - Trajektorie laserového paprsku pod úhlem 40°

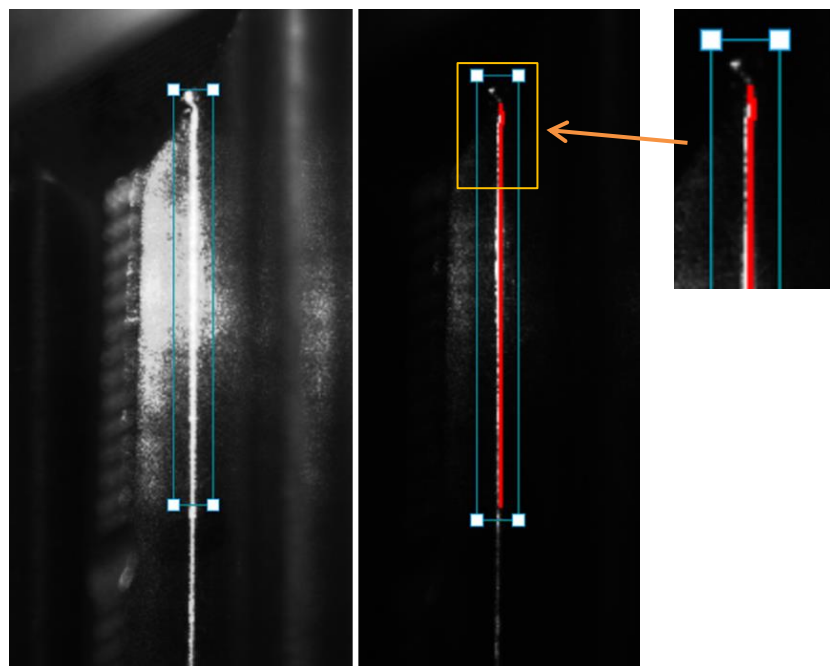
K problematice bylo přistoupeno tak, že by se mělo jednat o kontrolu ozubených kol tzv. in-line v rámci výrobního taktu linky, a není před kontrolou jisté, kde se defekt nachází, případně zda vůbec je kolo poškozeno. Jedná se tedy o komplexnější pojetí problematiky. Pro měření byla zvolena pevná výchozí poloha laser scanneru, ve které je jeho horní plocha ve vodorovné poloze. Pouze se natočil skener okolo osy Z, aby se dosáhlo rovnoběžnosti

promítnuté linie laseru s boční čarou měřeného zubu. A tato podmínka se udržela po celou dobu aktuálního měřicího cyklu. Toto natočení odpovídá sklonu zubu, který je ovlivněn o aktuální hodnotu natočení ozubeného kola. V tomto případě byl tento úhel ovlivněn natočením o  $9^\circ$  (Obrázek 96). Nastavený úhel natočení byl změřen optickým úhloměrem Somet.



Obrázek 96 – Ovlivnění sklonu zubu natočením kola

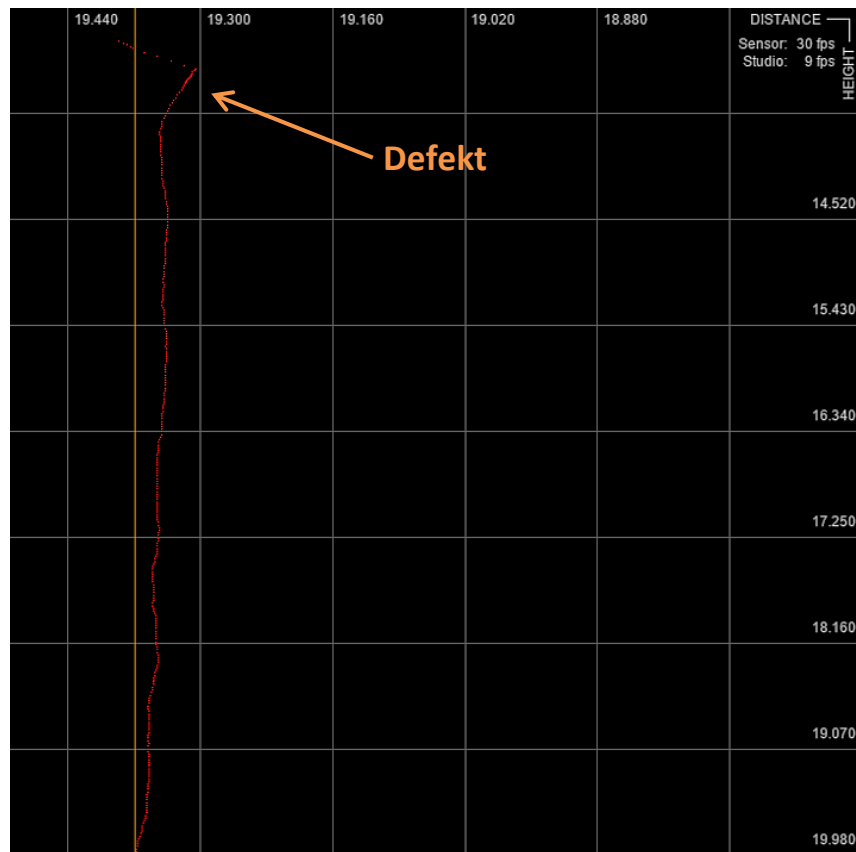
Dále bylo potřeba zjistit, zda je scanner vůbec schopný tuto vadu detekovat. Pomocí ručního režimu byla nastavena poloha, ve které dosahuje defekt největší odchylky od snímané plochy. Na následujícím Obrázek 97 lze vidět detekovanou vadu scannerem. Vlevo je snímek z karty Image, kde byla úmyslně nastavena vysoká hodnota času integrace, čím je zajištěn jasnější obraz. Napravo je snímek z karty Image, již s upravenými parametry pro vhodné vyhodnocení a detekovaná hrana je proložena funkcí „Profile overaly“ (překrytí profilu) křivkou červené barvy.



Obrázek 97 – Ukázka detekce vady

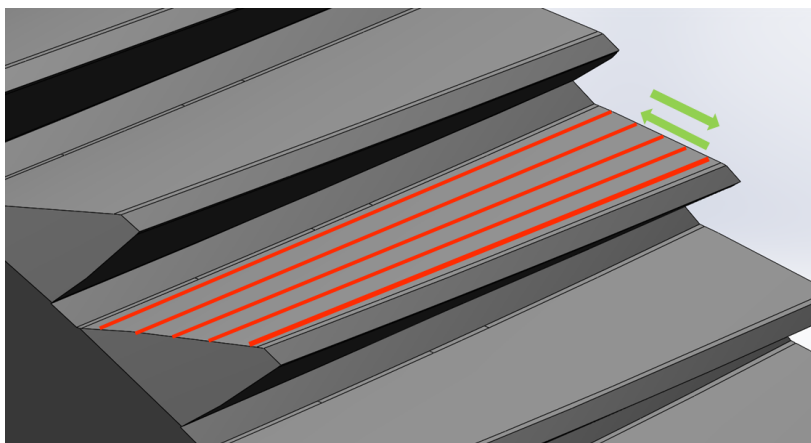


Program TL Studio následně disponuje funkcí proložení křivky (profile overaly) soustavou bodů (Obrázek 98) s pevně danými souřadnicemi, které lze vyhodnotit v kartézské soustavě v rámci jedné roviny. Následující snímek je názornou ilustrací, že je touto metodou možné detekovat defekt na kole č. 1. Nerovnoběžný průběh křivky před defektem je způsoben neoptimálním nastavením snímacích parametrů a vlivem odrazů, kterým se věnuji v jedné z následujících podkapitol v rámci problematiky snímání. Tímto se tedy potvrdil předpoklad, že je scannerem TLE1-35-65 možné detekovat tento konkrétní defekt.



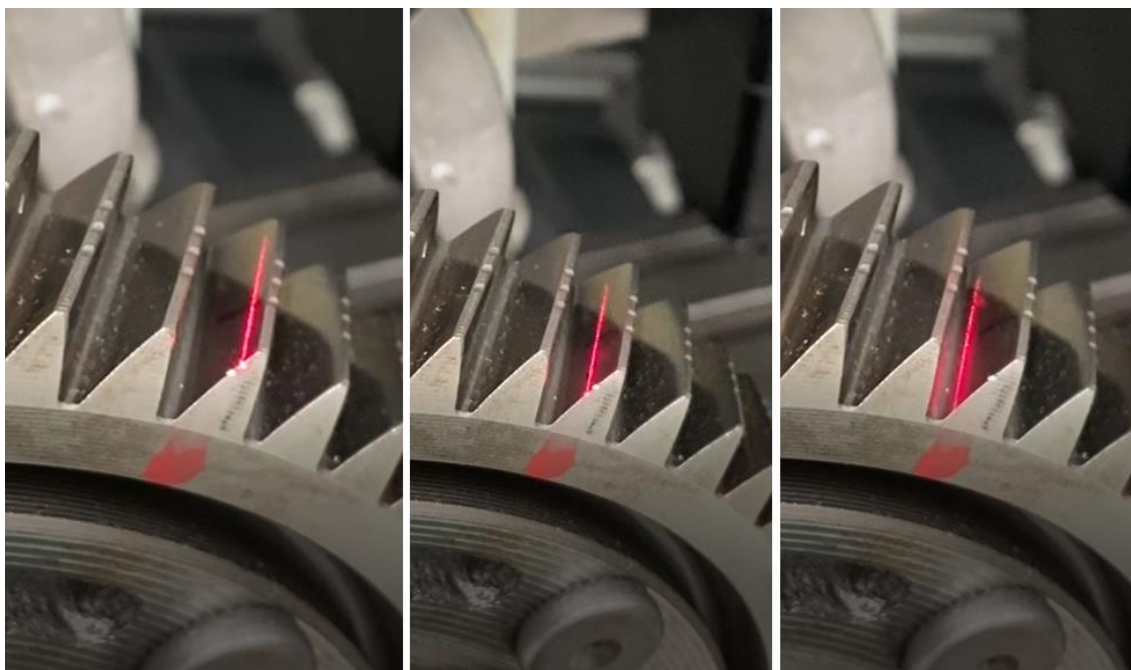
Obrázek 98 – Vyhodnocení profilu

Zvolená trajektorie 2D scanneru (Obrázek 99) kopíruje tvar normálního profilu a kontroluje tak celou funkční plochu zubu od vrcholu zubu po patní plochu.



*Obrázek 99 - Schématické naznačení trajektorie snímání kola č. 1*

Pro porovnání je na Obrázek 100 zobrazen reálný průběh trajektorie měření. Zobrazení je ve směru od hlavové plochy k patní ploše.



*Obrázek 100 - Zobrazení průběhu snímání kola č. 1*

Po vyrovnání a určení polohy linie laseru bylo zapotřebí nadefinovat trajektorii 2D scanneru a s ním i jeho promítnuté linie laseru. Nejprve bylo nutné simulovat pohyb snímání pouze v ručním režimu polohování, ve kterém se ověřilo, zda je scanner schopný takto detekovat vadu. Po ověření proběhlo programování přesně definovaného pohybu pomocí řídicího systému MIKROPROG F, kterým je stroj FC 22 CNC vybaven. Programování proběhlo v kódu ISO, tzv. G-kódem, za pomoci jednoduchých příkazů přírůstkového programování. Technologický NC program, který je tvořen řetězcem příkazů a číselných hodnot. Pro simulaci měření byl tedy vytvořen program, který zajistil požadovanou trajektorii pohybu scanneru po

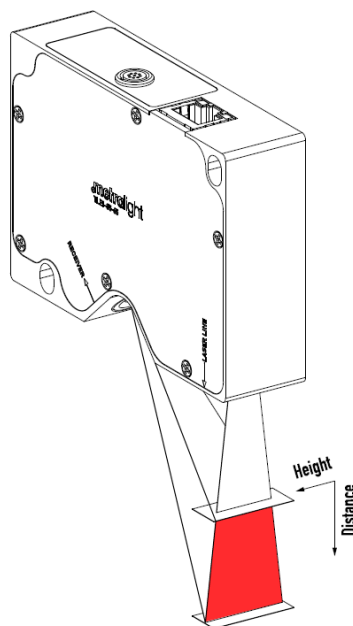
celém rozsahu výšky zubu. Program byl napsán tak, aby se scanner vrátil vždy zpět do výchozí polohy, ze které startoval (tj. na hranu vrcholu zubu a hlavové části boku zubu).

#### 5.4.4 Problematika snímání

Při analýze defektu kola č. 1 v rámci experimentální části se vyskytlo několik faktorů, které ovlivnily plánovanou strategii přístupu k měření a jsou popsány v následujících odstavcích.

##### Pracovní vzdálenost scanneru

Jak již bylo popsáno v kapitole 5.4.1 Zařízení TLE1, každý 2D scanner má svůj určitý rozsah měření. Z hlediska konstrukčního návrhu měření je stěžejní jeho rozsah měřicí vzdálenosti. U použitého scanneru TLE1-35-65 je tento rozsah, jak již napovídá název, 35 až 65 mm od spodní hrany těla scanneru.

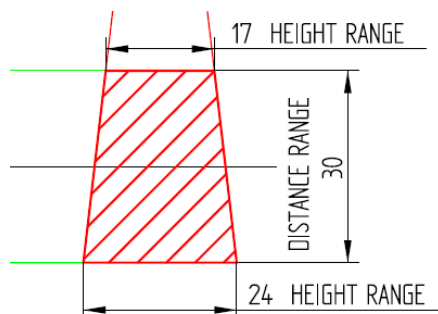


Obrázek 101 - Schématické vyznačení měřicího rozsahu scanneru [44]

Rozsah tohoto scanneru byl pro tuto aplikaci vyhovující a nikterak omezující. Související s tímto rozsahem byla volba trajektorie scanneru během měřicího pohybu, přesněji řečeno vzájemný pohyb a z toho plynoucí vzdálenost scanneru a měřené plochy boku zubu. Tato problematika je více rozebrána v kapitole Odlesky uvedené níže.

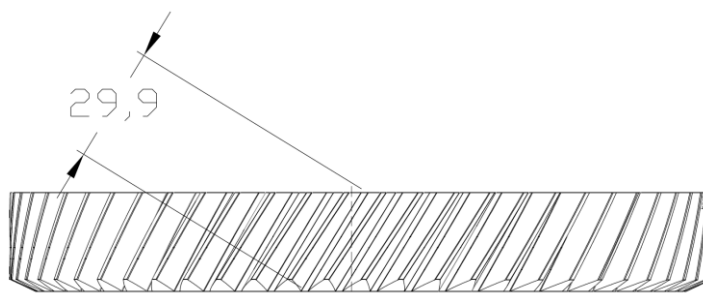
## Výškový rozsah snímané plochy laserového paprsku

Hodnoty výškového rozsahu pro zařízení TLE1-35-65 jsou 17 mm ve vzdálenosti 35 mm od spodní hrany těla scanneru a 24 mm (Obrázek 102). [44]



Obrázek 102 - Rozměry rozsahu snímané plochy TLE1-35-65 [44]

Tento parametr je již pro tuto aplikaci (Kolo č. 1) částečně limitující. To z toho důvodu, že není schopen svým výškovým rozmezím pokrýt celou délku zubu, a to ani v nejvzdálenějším okraji rozsahu vzdálenosti 65 mm od hrany těla scanneru. Délka zubu totiž ve svém maximu dosahuje přibližně 29,9 mm (Obrázek 103). V tomto případě přichází v úvahu dvě řešení. Prvním je použití dvou scannerů TLE1-35-65 na snímání jednoho boku zubu. Pro komplexní detekci jednoho ozubeného kola by se tedy jednalo celkem o čtyři 2D scannery tohoto typu, tak, aby byly kontrolovány oba dva boky zubů. Nebo druhá možnost je využití scanneru typu TLE1-58-122, který má výškový rozsah 40 mm v nejvzdálenějším bodě rozsahu vzdálenosti. Samozřejmě s použitím tohoto typu scanneru přichází současně i snížení rozlišení při měření vzdálenosti a výšky nebo například zvýšení distanční nelinearity (viz. Tabulka 5). [44]

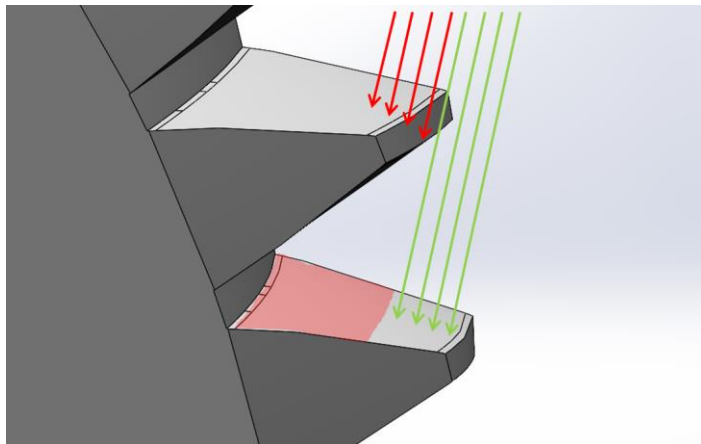


Obrázek 103 - Délka zubu kola č. 1

## Stínění

Dalším faktorem, na který se narazilo během definování snímací polohy scanneru, a který limituje snímání, je ovlivnění úhlu snímání vlivem stínění sousedních zubů. Schematicky je tento případ naznačen na Obrázek 104. Tomuto nežádoucímu faktoru nelze předejít jinak,

než vhodným nastavením úhlu, pod kterým bude laserový paprsek scanneru promítán na požadovaný bok zubu.



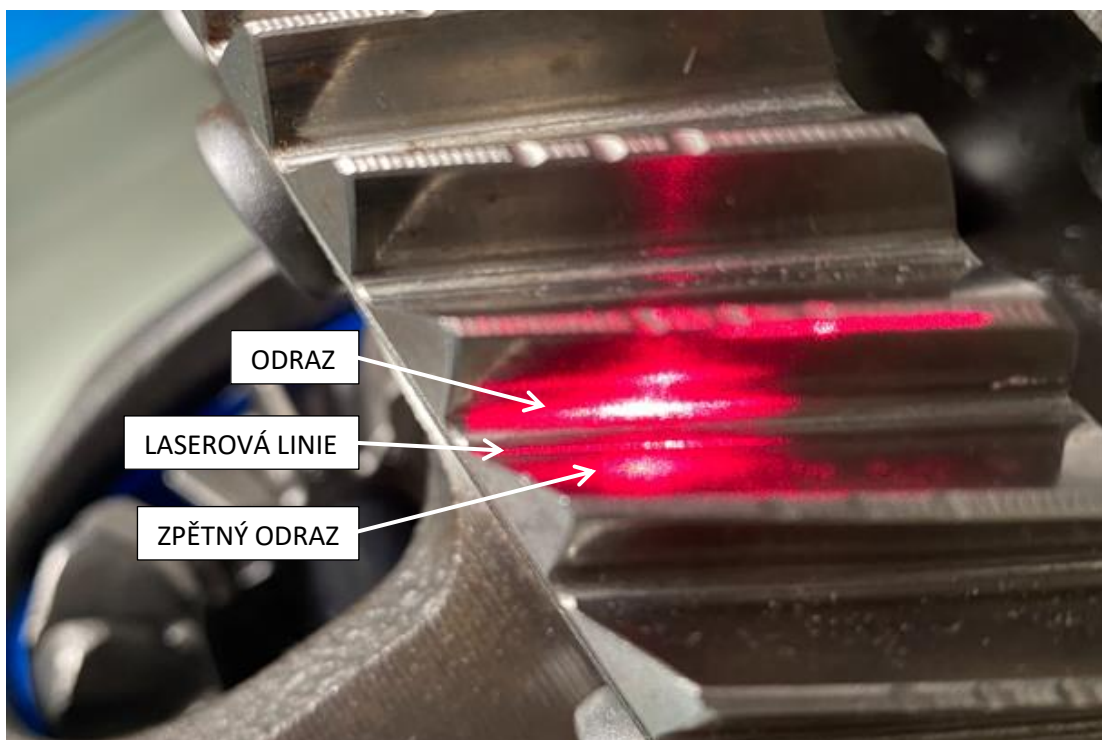
*Obrázek 104 - Stínění sousedním zubem*

### **Odrazy**

Největším nežádoucím faktorem, který nastal během studie snímání, byl odraz laserového paprsku, přesněji řečeno promítnuté laserové linie na měřeném boku zubu. Obraz světla laserové linie se odrazí od lesklého povrchu boku na bok vedlejšího zubu a zpět. Toto zpětné promítnutí odrazu má za následek světelný šum v místě vyhodnocení a narušení detekce laserové linie pomocí snímače. Tento jev byl a stále je velkým problémem při vyhodnocování výsledků měření v rámci tohoto experimentu. Na následujícím Obrázek 105 je vyfoceno promítnutí laserové linie z boku a další (Obrázek 106) je snímek z pohledu snímače, na kterém lze vidět odraz a tím značné ovlivnění oblasti laserové linie.

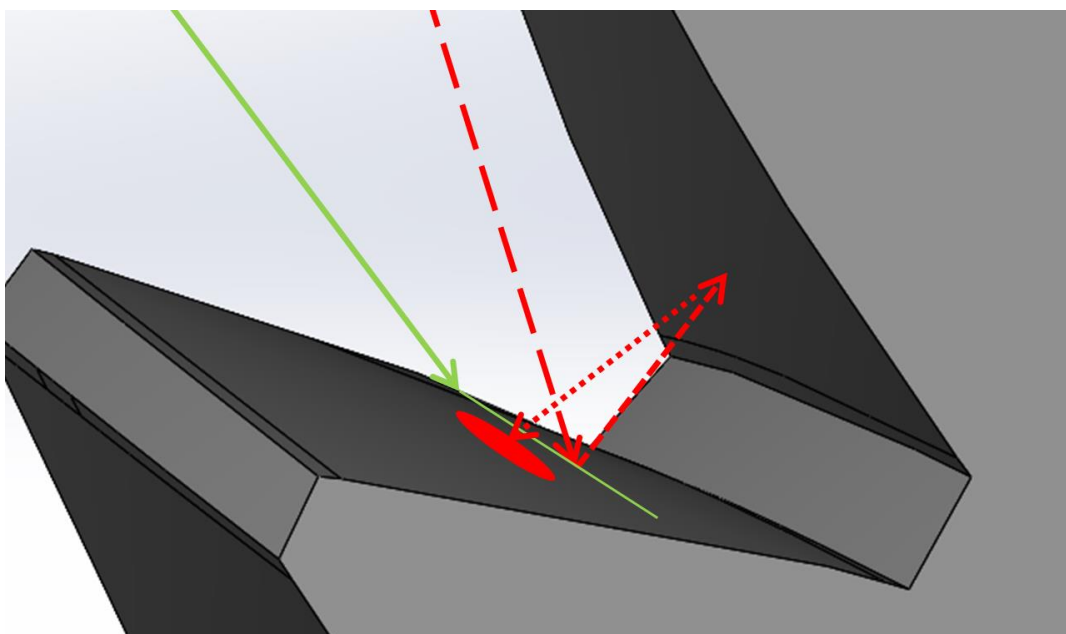


*Obrázek 105 - Fotografie promítnutí laserové linie*



Obrázek 106 – Fotografie odlesku na boku vedlejšího zubu

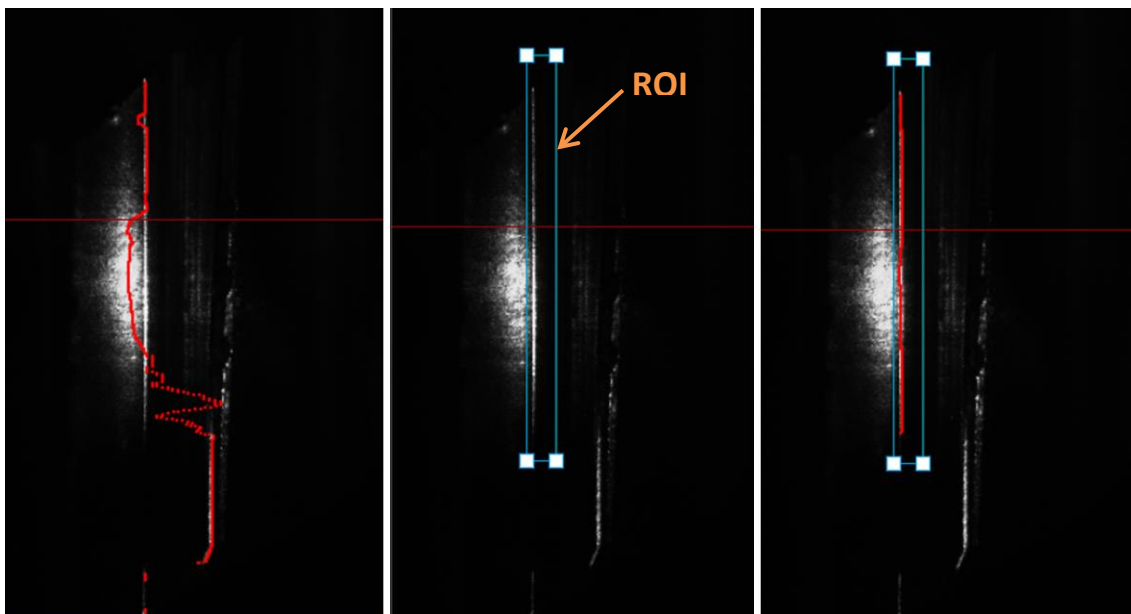
Schématické zobrazení tohoto efektu je zobrazeno na následujícím Obrázek 107. Zelenou šipkou je znázorněn směr snímání, červené šipky znázorňují průběh odrazu laserového paprsku a červeným oválem je vyznačeno místo světelného šumu.



Obrázek 107 - Efekt odrazu na boku zubu

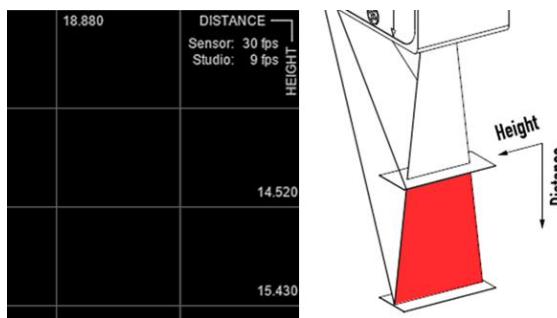
## Parametr ROI

V rámci eliminace tohoto problému se dostáváme k problematice řešené již v jedné z předchozích kapitol „Pracovní vzdálenost scanneru“, ve které byla zmíněna volba trajektorie scanneru během měřicího pohybu. Potřebným krokem pro tento způsob eliminace odrazů je dodržení pokud možno konstantní vzdálenosti scanneru a právě měřeného povrchu. Důvodem je využití funkce nastavení parametru ROI v programu TL Studio. Již bylo zmíněno, že parametr ROI (region of interest) je oblastí zájmu, ve které je zpracováván profil. Jeho nastavením lze zamezit a eliminovat jakékoliv rušivé elementy, do kterých spadají právě i odrazy. Parametr se v programu TL Studio nastavuje jednoduše vymezením hranic obdélníkové oblasti, kterou chceme zahrnout do výsledného vyhodnocení. Názorně předvedeno na následujícím Obrázek 108 složeném ze tří případů. Vlevo je pohled na vyhodnocení obrazu laserové linie funkcí Profile overlay, kterou napravo od ní ovlivňuje vedlejší zub a nalevo ji ovlivňuje právě řešený odraz (světelný šum). Na prostředním obrazu je již použita funkce ROI a její vymezení hranicemi, do kterých je zahrnut pouze námi požadovaná oblast pro vyhodnocení. Na pravém obrazu je stejný případ jako uprostřed, pouze s rozdílem, že je zapnuta funkce Profile overaly, tedy překrytí profilu křivkou. V tomto porovnání lze zřetelně vidět pozitivní přínos tohoto parametru a jeho nastavení.



Obrázek 108 - Úprava parametru ROI

V obrazovém okně představuje vodorovná osa rozsah vzdálenosti snímaného pole a svislá osa jeho výškový rozsah.



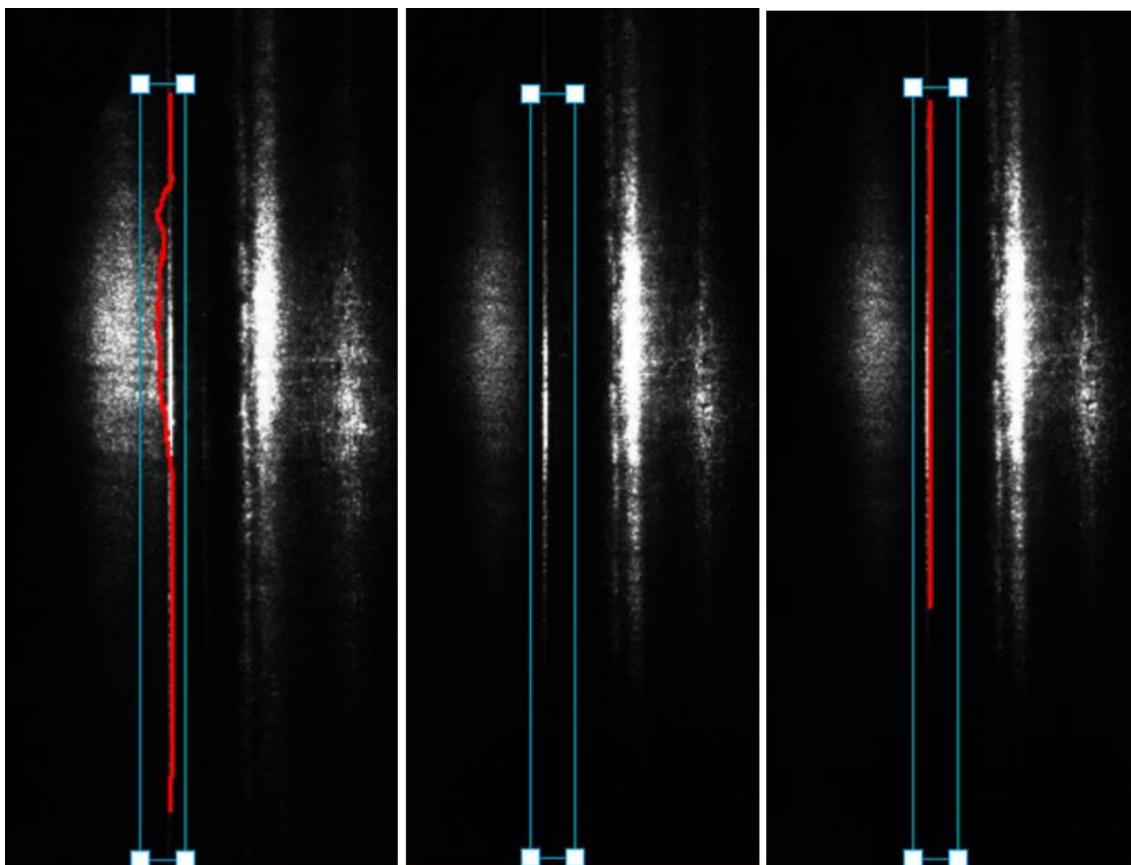
Obrázek 109 – Vzdálenost a výška [44]

V rámci použití parametru ROI pro eliminaci odlesků je důležité jak nastavení natočení skeneru vůči zubu, které bylo již popsáno, tak i dodržení pokud možno konstantní vzdálenosti scanneru a právě měřeného povrchu. Naším cílem je docílit pokud možno co největší rovnoběžnosti vyhodnocené křivky překrytého profilu se svislou osou, aby bylo možné profil co nejvíce omezit hranicemi ROI a eliminovat tak nežádoucí odrazy. Dalším faktorem, který je potřeba dodržet, je zmíněná konstantní vzdálenost scanneru a měřeného povrchu během celého rozsahu měření, aby snímaný profil zubu „nevybíhal“ z vymezené oblasti ROI. Pro lepší představu lze pozorovat na Obrázek 108.

Obecně lze říci, že větší citlivosti dosáhneme při měření v rozmezí měřicího pole u bližší polohy ke scanneru (menší vzdálenosti), kde výška dosahuje 17 mm než na druhém konci, kde výška dosahuje 24 mm. Rozložení konstantního počtu pixelů je při menší vzdálenosti schopno detekovat citlivěji.

Dalším faktorem pro eliminaci odrazů v rámci využití parametru ROI je úhel, pod kterým je nastaven 2D scanner vůči snímanému boku zubu. Pečlivým nastavením, v tomto případě natočením kola 5 osou stroje, lze dosáhnout oddálení oblasti odrazu (světelného šumu) od snímané křivky profilu a získání tak dostatečného prostoru pro nastavení oblasti ROI. Tento postup je vizualizován na (Obrázek 110).

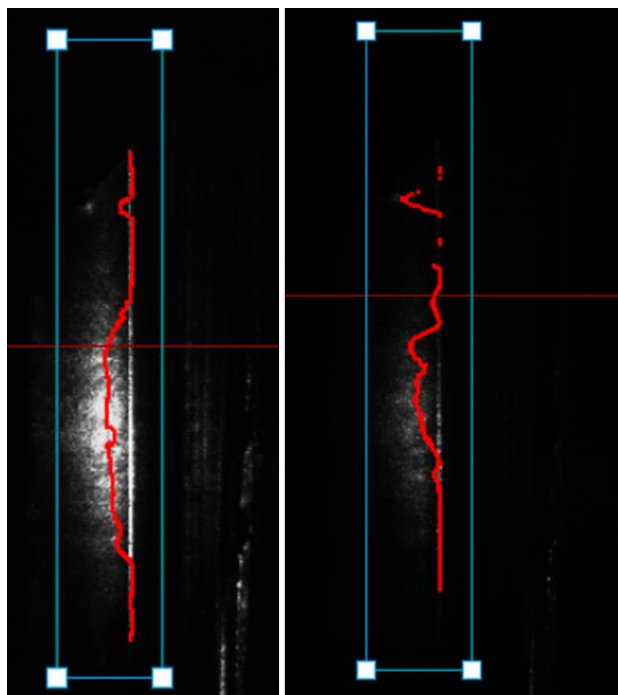




Obrázek 110 - Vliv úhlu natočení na odraz

### Polarizační sklo

Dalším nápadem, který by mohl pomoci s eliminací odrazů, bylo použití polarizačního filtru před čočkou snímače. Požadovaným efektem by bylo pohlcení nežádoucích odrazů od vedlejšího boku zubu. Eliminace by mohlo být dosaženo v rámci prvotního odrazu na neměřeném boku vedlejšího zubu, ale ne při zpětném promítnutí tohoto odrazu na bok měřeného zubu a zpět přibližným směrem ke snímači. V takovém případě je rozdíl úhlů natolik nízký, že není možné ho redukovat polarizačním filtrem (viz. Obrázek 107). Na následujícím Obrázek 111 je vidět použití polarizačního filtru v reálném zobrazení snímače. Je zřetelné, že polarizací bylo dosaženo snížení nejen světelného šumu odraženého světla, ale také snížení intenzity laserové linie a tím znemožnění jejího vyhodnocení parametrem Profil overaly. Tento postup tedy k eliminaci odrazů tohoto charakteru není vhodný.



Obrázek 111 - Použití polarizačního filtru

### Použití scanneru s modrým světlem

Tento bod nepojednává konkrétně o eliminaci odrazů v tomto experimentu, nýbrž o možnosti prevence proti tomuto problému. V případě, že se jedná o aplikaci, ve které by mohlo být riziko odlesků způsobené lesklým materiálem, můžeme uvažovat o aplikaci laserového 2D scanneru vybaveného modrým světlem. Tyto lasery a jejich paprsky jsou méně náchylné na odrazy. Pro příklad uvedu snímač LJ-X8080 konkurenční firmy Keyence. Tento modrý polovodičový laser se liší od červených vlnovou délkou, která je 405 nm, zatímco scanner TLE1 disponuje laserem o vlnové délce 650 nm. Laser TLE spadá do třídy 1M a laser LJ.X8080 do třídy 2M. [46]



Obrázek 112 - Scanner Keyence LJ-X8080 [56]

Jedná se o 2D scannery vybavené funkcí měřit i 3D. Scanner Keyence funguje na stejném principu triangulace jako námi použitý. Disponuje snímačem CMOS s využitím 3200 bodů (pixelů) na profil. Parametry jsou uvedeny v Tabulka 6. [46]

Tabulka 6 - Parametry laseru Keyence LJ-X8080 [46]

Model		LJ-X8080	
Referenční vzdálenost		73 mm	
Rozsah měření	Osa Z (výška)	±20,5 mm (pl. rozs. = 41 mm)	
	Osa X (šířka)	Bližší strana	30 mm
		Referenční vzdálenost	35 mm
	Vzdálenější strana	39 mm	
Velikost paprsku (referenční vzdálenost)		Cca 44 mm × 72 μm	
Opakovatelnost*2	Osa Z (výška)*3	0,5 μm	
	Osa X (šířka)*4	1,0 μm	
Linearita	Osa Z (výška)*5	±0,03 % z pl. rozs. (±0,004 %)	
Interval dat profilu*12*13	Osa X (šířka)	12,5 μm (10 μm~)	

Při úvaze nad aplikací tohoto druhu scanneru je nutné vzít v potaz pořizovací cenu. Ta se pohybuje v řádech set tisíc korun, zatímco scanner TLE „pouze“ v řádech desítek tisíc korun.

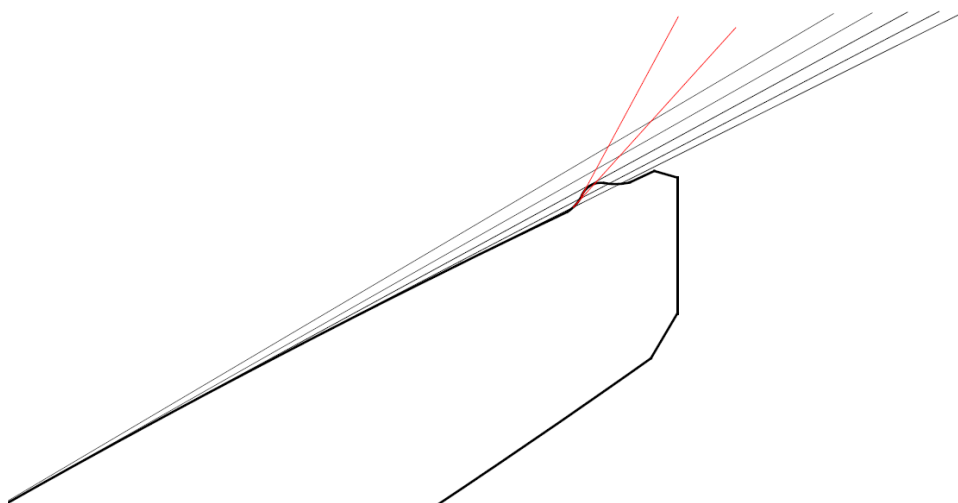
Pro další vývoj experimentu je v plánu použít laserový scanner s modrým světlem a vytvořit porovnání s použitým scannerem s červeným světlem.

#### 5.4.5 Program a vize vyhodnocování

V rámci experimentální části byla probána problematika 2D scanneru ohledně přístupu k měření a jeho faktory vyhodnocení, což bylo jedním z cílů práce. V dalším kroku realizace měření, který již není předmětem této práce, je zapotřebí navázat na tuto analýzu a její výsledky. Vizí pro pokračování v tomto experimentu a jeho vyhodnocování je úvaha nad samotnou detekcí vad a následně jejich měření.

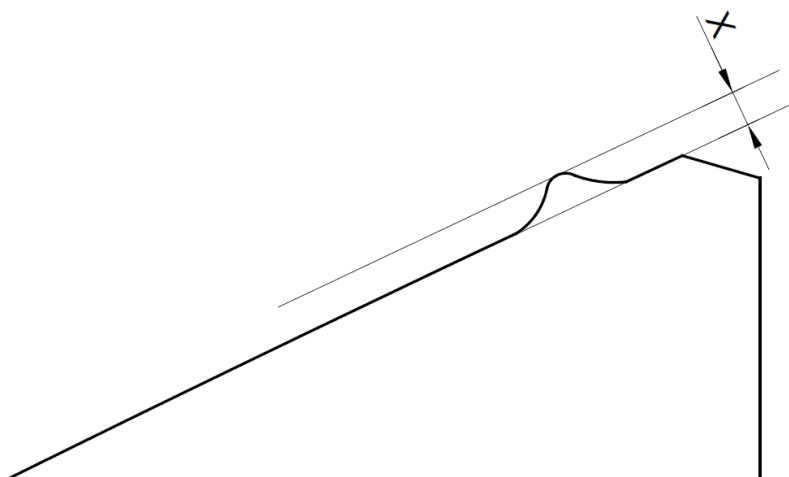
V rámci detekce vad je myšlenka vytvoření měřicího softwaru, který bude založen na principu proložení soustavy bodů přímkou (tečny) a sledování její tendence na zkoumaném profilu. Konkrétněji sledování a vyhodnocení derivace průběhu úhlu dané tečny, která v případě náhlé změny trendu změní své znaménko. Znázorněno je na Obrázek 113, kde je

zobrazen průřez zubu ve snímací rovině s nasimulovaným defektem. Červeně jsou znázorněny tečny, které mění trend a vybočí.



Obrázek 113 - Změna tendence tečny

Po detekci by následovalo měření a dopočítání největší odchylky, v tomto případě od plochy boku zubu (viz. Obrázek 114).



Obrázek 114 - Měření výšky defektu

## 6 Závěr

Hlavní předmětem této diplomové práce byla problematika **možností kontroly ozubení ve výrobním prostředí**.

Úvodní část pojednává o problematice ozubených kol v rámci základní charakteristiky, ve které je rozebrána základní terminologie, rozdělení a definice v rámci lícování čelních ozubených kol. Ve druhé kapitole se zabývám výrobou ozubení. V rámci této kapitoly seznámím čtenáře s rozdělením a jednotlivými metodami výroby. Jsou zde uvedeny klasické konvenční metody a také ty moderní, jako je InvoMilling a Power skiving. V následující kapitole zmiňuji druhy poškození zubů u valivých soukolí. Čtvrtá kapitola je zaměřena na měření ozubených kol. V její první části jsou popsány známé metody měření pomocí dílenských měřidel a v druhé části měřicí způsoby s využitím CMM, bezdotykových metod a jednoúčelových strojů.

Hlavním cílem v rámci **experimentální části** byla analýza třech dodaných ozubených kol s defekty od průmyslového partnera, pomocí vybavení laboratoří Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. V rámci této analýzy proběhla kompletní vizualizace defektů kol na digitálním mikroskopu Keyence řada VHX-6000, která byla užitečná k seznámení se s charakterem poškození, představou o jeho velikosti, a pro následnou studii přístupu k měřicí strategii jednotlivých kol na CMM.

Měřicí metoda s využitím CMM je vhodná pro detailní změření veškerých vad na povrchu zubů a splnila očekávané požadavky. Podařilo se získat informace ohledně typu poškození, které zahrnují jeho charakteristické vlastnosti a velikost. Výsledky s přesností odpovídající měřicímu stroji jsou kvalitně zpracovány jak v číselné, tak i grafické podobě. I přes tyto kladné přínosy této metody je nutné konstatovat, že není vhodná pro toto zadání detekce defektů. Hlavním důvodem je časová náročnost celého procesu měření. Proměření defektu zabere řádově desítky sekund, ale veškeré přípravné práce pro spuštění samotného měření jsou v řádech desítek minut. Je tedy nereálné se touto metodou přiblížit zadání, měření ideálně v taktu linky.

Kapitola Analýza zvolené bezdotykové metody snímání 2D scannerem seznamuje s použitým zařízením pro bezdotykovou kontrolu v rámci této práce. Dále s vývojem přístupu k měření z hlediska použitého pracoviště. Od prvotního použitého stanoviště, přes návrh

pracoviště v programu SolidWorks s polohovatelným mechanismem, po analýzu defektů na finálním pracovišti s použitím stroje FC 22 CNC.

Stroj FC 22 CNC vyhovoval řešené studii a jejím požadavkům pro měření a vyhodnocení dané problematiky defektů ozubených kol. Jediným omezením bylo konstrukční provedení stroje, konkrétně osy Z společně s konstrukcí 5-té řízené osy, které částečně omezovalo možnosti polohování (rotace kolem osy X) při nastavení optimálních poloh snížení. Toto omezení nebylo limitující pro výsledky této studie a pro budoucí vývoj by se dalo eliminovat jednoduchým konstrukčním nastavením, zajišťujícím nižší polohu magnetického stojanu s 2D scannerem. Dále z řešené problematiky na stroji (FC 22 CNC) vyplynula výsledná úvaha ohledně konstrukčního řešení pracoviště taková, že původní návrh pracoviště č. 1 je pro tento případ nevyhovující. A to z důvodu nemožné opakovatelnosti celého procesu měření po přenastavení pracoviště, tedy absence možnosti přesně zjistit a zpětně nastavit dané hodnoty polohy 2D scanneru. Polohovací zařízení s případnou konstrukční úpravou by bylo vhodné jedině pro individuální řešení specifických defektů na ozubených kolech s dostatečnou časovou kapacitou. Řešením je tedy použití ideálně 6-ti osého CNC (Computer Numerical Control – Číselně řízený počítačem) stroje. Dále je nutné zmínit, že konstrukční řešení uchycení 2D scanneru přes univerzální magnetický stojan v rámci tohoto měření, nezaručuje potřebnou tuhost a stabilitu, která by byla požadována při konečném a výsledném pojetí měřicího projektu. Ale zároveň zaručila potřebnou a požadovanou tuhost a stabilitu v rámci experimentální úrovně, ve které se tato studie nachází.

Dále bylo podrobně popsáno nastavení polohy a trajektorie 2D scanneru s přihlédnutím na možnosti vyhodnocení výsledků v programu TL Studio. Pro simulaci trajektorie sloužilo nejprve polohování v ručním režimu stroje a následně programování přesně definovaného pohybu pomocí řídicího systému MIKROPROG F, kterým je stroj FC 22 CNC vybaven. Programování proběhlo v kódu ISO, tzv. G kódem, za pomoci přírůstkového programování. V rámci této studie byl potvrzen předpoklad, že je scannerem TLE1-35-65 možné detekovat tento konkrétní defekt na kole č. 1. Měření 2D scannerem proběhlo u kola č. 1 a zvolenou strategií trajektorie pohybu by bylo vhodné použít i u kola č. 2. Pro detekci defektu kola č. 3 by byla strategie složitější a vyžadovala by další a hlubší studii.

V kapitole Problematika snímání jsou rozepsány faktory, které ovlivnily plánovanou strategii přístupu k měření. Prvním důležitým faktorem je výškové rozmezí použitého laser scanneru TLE1-35-65, které není schopno pokrýt celou délku zubu. V tomto případě přichází v úvahu dvě řešení. Prvním je použití dvou scannerů TLE1-35-65 na snímání jednoho boku

zubu. Pro komplexní detekci jednoho ozubeného kola by se tedy jednalo celkem o čtyři 2D scannery tohoto typu tak, aby byly kontrolovány oba dva boky zubů. Nebo druhá možnost je využití scanneru typu TLE1-58-122, který má výškový rozsah 40 mm v nejbližším bodě rozsahu vzdálenosti. Samozřejmě s použitím tohoto typu scanneru přichází současně i snížení rozlišení při měření vzdálenosti a výšky nebo například zvýšení distanční nelinearity. Dalším a největším nežádoucím faktorem, který nastal během studie snímání, byl odraz laserového paprsku, přesněji řečeno promítnuté laserové linie na měřeném boku zubu. Obraz světla laserové linie se odrazí od lesklého povrchu boku na bok vedlejšího zubu a zpět. Toto zpětné promítnutí odrazu má za následek světelný šum v místě vyhodnocení a narušení detekce laserové linie pomocí snímače. Řešením tohoto problému by bylo přesné nastavení trajektorie snímače a jeho konstantní vzdálenosti a následnou kombinací parametru ROI v programu TL Studio. Dalším řešením bylo použití polarizačního skla, které se po vyzkoušení neosvědčilo. Následně byla navržena alternativa ke snímači TLE1, volbou scanneru s modrým světlem. Tyto lasery a jejich paprsky jsou méně náchylné na odrazy od lesklých povrchů. Při úvaze nad aplikací tohoto druhu scanneru je nutné vzít v potaz pořizovací cenu. Ta se pohybuje v řádech set tisíc korun, zatímco scanner TLE „pouze“ v řádech desítek tisíc korun. Pro další vývoj experimentu je v plánu použít laserový scanner s modrým světlem a vytvořit porovnání s použitým scannerem s červeným světlem.

V rámci experimentu byl zvolen jeden modelový případ řešení dané problematiky, který byl proveden s využitím dostupných prostředků vybavení laboratoří Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Pokud by se měl projekt realizovat implementací do výroby, bylo by zapotřebí přihlídnout k několika faktorům, které je potřeba diskutovat. Mezi tyto faktory patří například požadované přesnosti a rozlišení scanneru, barva laseru s návazností na měřený povrch, odrazy, rychlost snímání, polohování, světlo a v neposlední řadě finanční možnosti projektu.

Výsledky experimentální části a její studie jsou základem pro detekování a vyhodnocení defektů ozubených kol. Dále slouží pro budoucí vývoj řešení této problematiky a přístupu k vyhodnocování metodou snímání 2D scannerem.

### Seznam použitých zkratk:

2D	dvoudimenzionální (dvourozměrný)
3D	trojdimenzionální (trojrozměrný)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem řízená výroba)
CMM	Coordinate Measurement Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
ČSN	Česká technická norma
GMI	Gear-measuring instrument
ISO	International Organization for Standardization



## 7 Seznam použité literatury:

1. BOLEK, Alfred, Josef KOCHMAN a kolektiv. *Části strojů: 2. svazek*. Páté. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00426-8.
2. *Spline Ultra Duty Quick Change Gears* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.quartermasterusa.com/product/10-spline-ultra-duty-quick-change-gears>
3. *Ozubené kolo* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ozuben%C3%A9\\_kolo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ozuben%C3%A9_kolo)
4. ČSN ISO 1122-1: *Slovník termínů ozubení - Část 1: Definice vztahující se ke geometrii*. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
5. ŠAFÁŘ, Michal. *Mezní možnosti evolventního ozubení*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
6. POSPÍCHAL, Jaroslav. *Technické kreslení*. Vydání třetí přepracované. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03214-0.
7. NĚMEC, Dobroslav. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění*. Druhé, opravené vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
8. *Flexible spline machining* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/mww/pages/t\\_splinemachining.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/mww/pages/t_splinemachining.aspx)
9. *CoroMill 176* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill\\_176/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_176/pages/default.aspx)
10. *Výroba ozubení odvalováním* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/>
11. *Profesionální podpora pro vaše měřicí úlohy: Měření ozubení* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/sluzby/merici-sluzby/gear-measurement.html>
12. *Gear Shaping and Spline Shaping* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=fU01NIP-dNI>
13. JAN, Mádl. *Teorie obrábění*. Dotisk. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1990.
14. *Broaching*. *Vestavia.eu* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <https://vestavia.eu/product/broaching-internal-gear-keyway/>
15. KUBÍČEK, Miroslav. *Obrábění: Protahování, protlačování*. Brno. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/15645160-Protahovani-protlacovani.html>
16. *The Broach Masters: Gear & Spline Broaches: SPUR* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <http://www.broachmasters.com/the-broach-masters/>

17. InvoMilling® [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroplus-toolpath/pages/invomilling.aspx>
18. CoroMill 162 [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill-162/pages/default.aspx>
19. A Breakthrough in Power Skiving [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/a-breakthrough-in-power-skiving>
20. Pokrok k digitální výrobě ozubených kol [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-k-digitalni-vyrobe-ozubenych-kol>
21. Metoda Power skiving: Produktivní a flexibilní obrábění ozubených kol a drážkovaných hřídelů [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/news/pages/power-skiving.aspx>
22. CYLINDRICAL POWER SKIVING TOOL [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.franchigaetano.it/en/gear-cutting-tools/power-skiving-tools/cylindrical-power-skiving-tool/>
23. Inovativní honovací CNC stroj urychlí výrobu přesných ozubených kol [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/inovativni-honovaci-cnc-stroj-urychli-vyrobu-presnych-ozubenych-kol/>
24. MORAVEC, Vladimír. *Konstrukce strojů a zařízení II.: Čelní ozubená kola*. Ostrava: MONTANEX, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
25. ČSN ISO 10825: *Ozubená kola - Opatření a poškození zubů - Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
26. ČSN ISO 1328-1. *Čelní ozubená kola - Soustava přesností ISO: Část 1: Definice a mezní úchytky vztahené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola*. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
27. ČSN ISO 1328-2. *Čelní ozubená kola - Soustava přesností ISO: Část 2: Definice a hodnoty dovolených úchylek relevantní k radiální kinematickým úchytkám a informativně k obvodovému házení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
28. *Metrologie: 9. přednáška - Měření ozubených kol* [online]. In: . s. 10 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2327511/>
29. PETŘKOVSKÁ, Lenka. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE - V PŘÍKLADECH: 6. MĚŘENÁ ÚLOHA – KONTROLA VYBRANÝCH PARAMETRŮ OZUBENÉHO KOLA* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/106188890-Technicka-mereni-a-metrologie-v-prikladech.html>

30. Čelní ozubení s přímými a šikmými zuby: Kontrolní rozměry ozubení [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/doc/gear1/help/cz/gear1txt.htm>
31. TICHÁ, Šárka a Ivan MRKVICA. *Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2709-4.
32. ISO TR 10064-2 *Cylindrical gears - Code of inspection - Practice: Part 2 Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash*. 1996.
33. CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Měření rozměrů, tvaru, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4 přeprac. a rozš vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
34. BERÁNEK, Libor. *Průmyslová metrologie: výukový text ČVUT*. Praha, 2019
35. ZEISS PRISMO [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/zeiss-prismo.html>
36. ZEISS MMZ M [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/velke-souradnicove-merici-stroje/zeiss-mmz-m.html>
37. ZEISS DuraMax [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/souradnicove-merici-stroje-do-vyrobniho-prostredi/zeiss-duramax.html#technicaldata>
38. ZEISS PRO T [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/stojanove-merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/zeiss-pro-t.html>
39. CALYPSO *Základní program: Návod k obsluze (61212-2011812)*. 2020.
40. ZEISS LineScan [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/zeiss-linescan.html>
41. ZEISS RDS [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/probe-holder/zeiss-rds.html>
42. *Gear Inspection Machine Has Multiple Types of Sensors* [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/products/gear-inspection-machine-has-multiple-types-of-sensors>
43. *GRSL - Gear Rolling Meets Advanced Laser Technology* [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/metrology/metrology-systems/gear-rolling-systems/grsl-gear-rolling-meets-advanced-laser-technology>

44. *TLE1 Sensor: Technical specification* [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.metralight.com/our-products/reflective-laser-sensors/tle1/?lang=cs#1510650673138-e6aebb20-0c64>
45. *TLE1 Sensor: Quickstart guide* [online]. [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.metralight.com/our-products/reflective-laser-sensors/tle1/?lang=cs#1510650673138-e6aebb20-0c64>
46. *2D/3D laserový skener: Řada LJ-X8000* [online]. 2021 [cit. 2021-8-6]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-2d/lj-x8000/>

## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Příklad vnějších ozubených kol s čelními přímými zuby [2] .....	7
Obrázek 2 – Vlevo - Popis ozubeného kola; vpravo – Geometrie evolventního ozubení [1,3] ....	8
Obrázek 3 - Druhy ozubení: Čelní s přímými zuby - a) vnější, d) vnitřní, e) ozubené kolo a hřeben; Čelní s šikmými zuby b); Čelní s šípovými zuby c); Kuželové – f) s přímými zuby, g) s šikmými zuby, h) se zakřivenými zuby; Šroubové – i) válcové, m) kuželové; Šnekové k); Spiroidní n) [1].....	9
Obrázek 4 - Hlavová plocha [4] .....	9
Obrázek 5 -- Patní plocha [4].....	10
Obrázek 6 - Referenční plocha [4].....	10
Obrázek 7 – Hlava zubu, Vrchol zubu [4] .....	10
Obrázek 8 – Pata zubu [4] .....	10
Obrázek 9 - Bok zubu [4].....	11
Obrázek 10 - Profil zubu [4] .....	11
Obrázek 11 – Evolventa [4] .....	12
Obrázek 12 - Základní profil [6].....	12
Obrázek 13 – Evolventní ozubení s přímými zuby [6].....	13
Obrázek 14 – Ozubené kolo se šikmými zuby [6].....	14
Obrázek 15 – Vlevo – Kotoučová fréza na evolventní ozubení, vpravo – Stopkové fréza na evolventní ozubení [7] .....	16
Obrázek 16 - Kotoučová fréza CoroMill® 172 [8] .....	17
Obrázek 17 – Vlevo - Odvalovací fréza, vpravo – frézování přímého ozubení [7] .....	17
Obrázek 18 - Odvalovací frézování ozubeného kola (žluté šipky značí směr otáček, zelená šipka značí směr pohybu nástroje vůči obrobku) [9] .....	18
Obrázek 19 - Vytváření zubové mezery [10].....	18
Obrázek 20 - Odvalovací frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami [11] .....	19
Obrázek 21 – Obrázení hřebenovým nožem [7] .....	21
Obrázek 22 - Obrázení kotoučovým nožem [7] .....	22
Obrázek 23 – Proces obrázení kotoučovým nožem [12].....	22
Obrázek 24 – Kinematika sil při obrázení [13] .....	23
Obrázek 25 – Technologie protahování [14].....	23
Obrázek 26 – Princip protlačování ozubených kol [7].....	24
Obrázek 27 – Protahovací nástroj a výsledné vnitřní ozubení [16] .....	24
Obrázek 28 Působící síly – protahování [7].....	25

Obrázek 29 - Znázornění metody InvoMilling společnosti Sandvik Coromant [17].....	25
Obrázek 30 - Metoda InvoMilling (Zleva: hrubování zubové mezery, Frézování paty zubu, Frézování dolní a horní části profilu zubu, Dokončená zubová mezera) [18].....	26
Obrázek 31 - Metoda Power skiving – vnitřní ozubení [21].....	27
Obrázek 32 - Nástroj pro Power skiving [22] .....	27
Obrázek 33 – Švingování [7].....	28
Obrázek 34 – Broušení jedním tvarovým kotoučem [7] .....	29
Obrázek 35 - broušení dvěma tvarovými kotouči [7].....	29
Obrázek 36 - Broušení: vlevo- lichoběžníkovým kotoučem, vpravo - kotoučem tvaru evolventního šneku [7].....	29
Obrázek 37 – Honování [23].....	30
Obrázek 38 – Vznik poruch v závislosti obvodové rychlosti na mezním zatížení [24] .....	34
Obrázek 39 – Pitting [24].....	35
Obrázek 40 – Spalling [24].....	35
Obrázek 41 - Měření tloušťky zubu [28] .....	38
Obrázek 42 - Schéma kontroly rozměru přes zuby M [4] .....	39
Obrázek 43 - Měření přes válečky [30] .....	39
Obrázek 44 - Obvodové házení [32].....	40
Obrázek 45 - Schematicky pohled na jednoboký odval (1-rotační kodér, 2-čtecí zařízení, 3-výpočet chyby převodu, 4-filtrace, 5-fourierova transformace) [26] .....	41
Obrázek 46 – Jednoboký odval – a) princip jednobokého odvalu, b) graf odchyly; $\phi 1$ - úhel pootočení kontrolního kola, $\phi 2$ - zaznamenaný úhel pootočení kontrolovaného kola, $f_i'$ - odchylnka při pootočení o 1 rozteč, $F_i'$ - kinematická odchylnka jednobokého odvalu za 1 otáčku [31] .....	42
Obrázek 47 - Diagram měření jednobokým odvalem [32].....	43
Obrázek 48 - Příklad chyb převodu [26].....	43
Obrázek 49 - Princip kontroly dvoubokým odvalem (1-kontrolované kolo, 2-Kontrolní kolo, 3-měřicí saně, 4-snímač hodnot, 5-pevný upínač, 6-směr měření, 7-pružné uložení, 8-nastavení síly pro měření) [31].....	44
Obrázek 50 - Měření vůle s využitím spárové měřky [32].....	44
Obrázek 51 – Diagram kontroly dvoubokým odvalem [27] .....	45
Obrázek 52 Diagram dvoubokého odvalu [31] .....	45
Obrázek 53 - Měření úchylek rozteče [26].....	47
Obrázek 54 - Měření rozteče komparátorem [31].....	47
Obrázek 55 - Kontrola profilu zubu [26] .....	49

Obrázek 56 - Schéma evolventoměru s pevnou zákl. kružnicí [31] .....	49
Obrázek 57 - Sklon zubu ozubeného kola [31].....	50
Obrázek 58 - Kontrola sklonu zubu [26].....	51
Obrázek 59 - Příklad na měření sklonu zubu [31].....	51
Obrázek 60 – Kartézsky uspořádané CMM značky Zeiss (vlevo – portálový CMM, vpravo – mostový CMM) [35,36] .....	52
Obrázek 61 – Kartézsky uspořádané CMM značky Zeiss (vlevo – konzolový CMM, vpravo – stojanový s horizontálním ramenem CMM) [37,38].....	53
Obrázek 62 - Příklady bezdotykového měření [33].....	54
Obrázek 63 - Gleason 300GMSL [42] .....	55
Obrázek 64 - Gleason GRSL [43].....	56
Obrázek 65 - Náhled a fotografie ozubeného kola č. 1 - TAB030063 .....	58
Obrázek 66 - Oblast defektu kola č. 1 .....	59
Obrázek 67 – Náhled a fotografie ozubeného kola č. 2 TAB 001 827 D .....	59
Obrázek 68 - Oblast defektu kola č. 2 .....	60
Obrázek 69 - Náhled a fotografie ozubeného kola č. 3 - TAB001808BQ .....	60
Obrázek 70 - Digitální mikroskop VHX-6000.....	61
Obrázek 71 - Mikroskopický snímek defektu kola č. 1.....	61
Obrázek 72 - 3D obraz a měření tvaru .....	62
Obrázek 73 - Mikroskopické snímky defektu na kole č. 2.....	62
Obrázek 74 – 3D obraz a měření tvaru .....	63
Obrázek 75 – Mikroskopický snímek defektu kola č. 3 .....	64
Obrázek 76 - Vizualizace kola č. 3 - porovnání.....	65
Obrázek 77 - CMM Zeiss Prismo 7 .....	66
Obrázek 78 - Úprava modelu - zkosení .....	67
Obrázek 79 - Ilustrační zobrazení pohybu dotykové sondy nástroje.....	67
Obrázek 80 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 1.....	68
Obrázek 81 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 1 .....	68
Obrázek 82 - Měření kola č. 2 metodou CMM.....	69
Obrázek 83 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 2.....	69
Obrázek 84 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 2 .....	70
Obrázek 85 - Vyhodnocení výsledků měření (CMM) kola č. 3 .....	70
Obrázek 86 - Vizualizace měření (CMM) kola č. 3.....	71
Obrázek 87 - Triangulační senzor TLE1 [44].....	72
Obrázek 88 - Schéma scanneru TLE1-35-65 [mm] [44].....	74

Obrázek 89 - Prvotní měřicí pracoviště .....	74
Obrázek 90 – Snímek ze softwaru TL Studio - karta Image .....	76
Obrázek 91 - Návrh pracoviště č. 1 (program SolidWorks) .....	77
Obrázek 92 - Experimentální pracoviště č. 2 (stroj FC 22 CNC) .....	78
Obrázek 93 - Experimentální pracoviště č. 2.....	78
Obrázek 94 - Vyznačení možné kolize.....	79
Obrázek 95 - Trajektorie laserového paprsku pod úhlem 40° .....	79
Obrázek 96 – Ovlivnění sklonu zubu natočením kola .....	80
Obrázek 97 – Ukázka detekce vady.....	80
Obrázek 98 – Vyhodnocení profilu.....	81
Obrázek 99 - Schématické naznačení trajektorie snímání kola č. 1 .....	82
Obrázek 100 - Zobrazení průběhu snímání kola č. 1.....	82
Obrázek 101 - Schématické vyznačení měřicího rozsahu scanneru [44] .....	83
Obrázek 102 - Rozměry rozsahu snímané plochy TLE1-35-65 [44].....	84
Obrázek 103 - Délka zubu kola č. 1 .....	84
Obrázek 104 - Stínění sousedním zubem.....	85
Obrázek 105 - Fotografie promítnutí laserové linie .....	85
Obrázek 106 – Fotografie odlesku na boku vedlejšího zubu .....	86
Obrázek 107 - Efekt odrazu na boku zubu .....	86
Obrázek 108 - Úprava parametru ROI.....	87
Obrázek 109 – Vzdálenost a výška [44].....	88
Obrázek 110 - Vliv úhlu natočení na odraz .....	89
Obrázek 111 - Použití polarizačního filtru .....	90
Obrázek 112 - Scanner KeyenceLJ-X8080 [56] .....	90
Obrázek 113 - Změna tendence tečny .....	92
Obrázek 114 - Měření výšky defektu .....	92



## 9 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Normalizované moduly – výběr hodnot [mm] [6] .....	13
Tabulka 2 - Dosažitelná přesnost ozubených kol pro různé technologie [24] .....	31
Tabulka 3 - Třídy dosažených přesností [24].....	31
Tabulka 4 - Dosažené hodnoty Ra [24] .....	32
Tabulka 5 - Metralight scannery řady TLE1 [44] .....	73
Tabulka 6 - Parametry laseru Keyence LJ-X8080 [46] .....	91