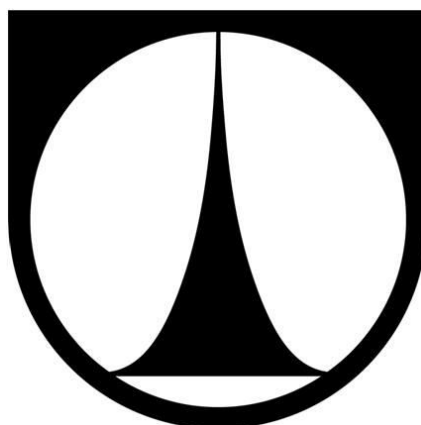




TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

Bakalářská práce



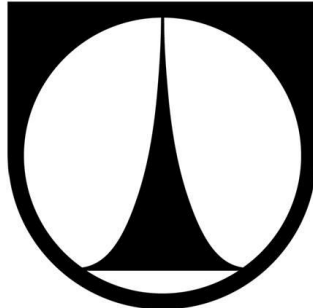
Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Martin Balabán**
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Studijní program B2301

Strojní inženýrství

Obor 2301R000

TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

Bakalářská práce

Martin Balabán

Vedoucí diplomové práce: Doc. Dr. Ing. Tomeh Elias – TUL FS, KVM

Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Hejcman – Škoda Auto, a.s.

Počet stran: 64

Počet obrázků: 45

Počet příloh: 6

Počet grafů: 2

Liberec 2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Balabán Martin**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

TECHNOLOGIE VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

Zásady pro vypracování:

(uvedte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Studijní práce zaměřené na moderní technologie a metody výroby čelních ozubených kol, které se používají v automobilovém průmyslu, letadlech a dalších místech.

- 1) Vytvořte přehled rozdělení čelního ozubení včetně používaných materiálů, základní geometrické parametry, důvody použití u strojů a zařízení, jmenujte jejich klady a zápory.
- 2) Popište technologie a metody výroby čelního ozubení včetně dokončovacích metod. Popište vliv kvality montáže ozubených kol na spolehlivost a životnost strojů a zařízení.
- 3) Specifikujte příčiny poškození ozubených kol strojů a zařízení.
- 4) Popište metody kontroly ozubených kol v praxi. Provedte měření vyrobeného kola, hodnoty zpracujte do tabulek a grafů a proveďte doporučení pro výrobce.
- 5) Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.

Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva - v rozsahu cca 40 stran textu, vč. příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu bakalářské práce.

Seznam literatury (uvedte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] NĚMEC D.: Strojírenská technologie 3, PRAHA 1979.
- [2] ŘASA J., GABRIEL V.: Strojírenská technologie 3, PRAHA 2000. ISBN 80-7183-207-3
- [3] KŘÍŽ, R.: Strojnické tabulky II. Pohony. Ostrava 1997. ISBN 80-85780-51-8
- [4] Cutting Tools. Andrallex - online <http://andrallexinc.com/cutting.html>.
- [5] American Broach & Machine [online www.americanbroach.com].
- [6] HOSNEDL, Stanislav - Jaroslav KRÁTKÝ: Příručka strojního inženýra. ISBN 80-722-6202-5.
- [7] MORAVEC, V.: Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola, teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola. Ostrava 2001. ISBN 80-722-5051-5.
- [8] MRKVICA, I.: Speciální technologie: výroba ozubených kol I. Ostrava 2009. ISBN 978-80-248-1931-0.
- [9] MRKVICA, I.: Speciální technologie: výroba ozubených kol II. Ostrava 2009. ISBN 978-80-248-2134-4.
- [10] Hlavní katalog TOS a.s.
- [11] Časopisy a katalogy firem.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Elias Tomeh - TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Miroslav Hejcman - TK VAT/5

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Petr LENFELD

vedoucí katedry

děkan

V Liberci dne 6. 3. 2015

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo. Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL. Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše. Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem. Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především svému vedoucímu bakalářské práce Doc. Dr. Ing. Eliasu Tomehovi za jeho odborné vedení a konzultace. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Miroslavu Hejcmanovi za poskytnutí velmi cenných rad, připomínek a užitečných materiálů a také za pomoc s organizací a přípravou měření. Nakonec děkuji svým rodičům za podporu při studiu.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na výrobu čelního ozubení. V teoretické části je popsána geometrie ozubení a podrobně jsou popsány jednotlivé technologie výroby čelního ozubení a také druhy poškození ozubení. V praktické části je popsán způsob kontroly ozubených kol v praxi. V závěru jsou zhodnoceny výsledky měření a navrženy změny pro výrobce s ohledem na zvýšení kvality výroby.

Klíčová slova

Čelní ozubení, ozubené kolo, technologie, výroba, kontrola ozubení, kontrola

Annotation

This Bachelor thesis focuses on gear manufacturing. Theoretical part describes gear geometry, gear manufacturing technologies and types of gear damage. Practical part describes methods of gear inspection. Final part includes suggestions to manufacturer for increase of production quality.

Key words

Spur gear, gear, technology, manufacturing, gear inspection, inspection

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
Úvod	11
1. Rozdělení čelního ozubení.....	12
1.1 Rozdělení čelního ozubení dle profilu zubu.....	12
Cykloidní profil zubu	12
Kruhový profil zubu	12
Evolventní profil zubu	13
1.2 Rozdělení čelního ozubení dle profilu zubu.....	13
1.3 Vnější a vnitřní čelní ozubení	15
1.4 Rozdělení dle materiálu ozubených kol.....	16
Ocel	16
Šedá a tvárná litina.....	16
Mosazi, bronzy a hliníkové slitiny	16
Plasty	16
2. Základní geometrické parametry ozubení	17
3. Vlastnosti a použití ozubených převodů	20
4. Technologie výroby čelního ozubení.....	22
4.1 Frézování dělicím způsobem	22
4.2 Frézování odvalovacím způsobem.....	23
4.3 Obrázení dělicím způsobem	24
4.4 Obrázení odvalovacím způsobem.....	25
4.4.1 Systém Fellows.....	25
4.4.2 Systém Maag.....	25
4.5 Protahování.....	26
4.6 Výroba ozubení 3D tiskem	26
5. Dokončovací operace výroby ozubení	29
Broušení	29
Lapování	31
Ševingování	31
Honování	32

Superfinašování.....	32
Zaběhávání	32
5.2 Přesnost způsobů výroby a dokončovacích operací.....	33
5.3 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování ozubených kol.....	33
5.4 Vliv montáže ozubených kol na spolehlivost a životnost strojů a zařízení.....	34
6. Poškození ozubených kol.....	35
6.1 Opotřebení ozubených kol	36
6.2 Zadírání	39
6.3 Poškození plastickou deformací	40
6.4 Pitting.....	41
6.5 Spalling.....	42
6.6 Únavový lom zubů	43
7. Kontrola ozubených kol.....	44
8. Závěr	53

Seznam symbolů a zkratk

SLS	Technologie výroby 3D tisku (Selective laser sintering)
FDP	Aditivní technologie výroby 3D tisku (Fused deposition modeling)
I.O.	Vyhovující díl (z německého In Ordnung)
N.I.O.	Nevyhovující díl (z německého Nicht In Ordnung)
CNC	Číslicově řízený stroj (Computer Numerical Control)
α	Úhel záběru ozubeného kola
β	Úhel sklonu zubů ozubeného kola se šikmými zuby
m	Modul ozubení ozubeného kola
$f_{H\alpha}$	Úhlová odchylka profilu ozubení
F_{α}	Celková odchylka profilu ozubení
$f_{f\alpha}$	Tvarová odchylka profilu ozubení
$f_{H\beta}$	Úhlová odchylka sklonu zubu ozubení
F_{β}	Celková odchylka sklonu zubu ozubení
$f_{f\beta}$	Tvarová odchylka sklonu zubu ozubení
c_a	Výšková modifikace tvaru evolventy ozubení
c_b	Podélná modifikace tvaru boční křivky zubu

Úvod

Ozubená kola s čelním ozubením jsou důležité, velmi často používané strojní součásti, přestože jejich konstrukce i výroba je složitá. Vzhledem k jejich unikátnímu tvaru je můžeme považovat za symbol strojírenství. Používají se k přenosu a transformaci mechanické energie a pohybu.

První informace o ozubených kolech pochází z roku 50 př. n. l. od Herona z Alexandrie, ale zmínky o nich lze nalézt v řeckých spisech z Alexandrijské školy datovaných přibližně 300 let př. n. l. O jejich další rozvoj se zasadil známý řecký matematik Archimedes. Příkladem raného použití ozubených kol je Mechanismus z Antikythéry. Ten se skládal z 37 ozubených kol zasazených v pouzdře s výřezy a sloužil k předpovídání pohybu Slunce a Měsíce.

Dnes se můžeme s převody ozubenými koly setkat ve všech strojních zařízeních, kde je potřeba jakkoliv měnit otáčky, krouticí moment, nebo smysl pohybu. Používají se od malých zařízení, jako například náramkové hodinky až po obrovské konstrukce převodů lodních motorů. Nejčastěji se používají v automobilovém průmyslu pro převodovky osobních a nákladních vozů.

S ozubenými převody se však můžeme setkat i v přírodě. V roce 2013 objevil zoolog Malcolm Burrows z University of Cambridge v kloubech končetin běžného hmyzu svítílka ozubení.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na způsoby výroby ozubených kol. V této oblasti došlo vzhledem k rozvoji výpočetní techniky k velkým pokrokům. Díky výkonným počítačům a použití specializovaných programů lze lépe navrhovat geometrii ozubených kol. Vzhledem k rozšíření číslicově řízených obráběcích strojů lze zvýšit produktivitu a přesnost ozubených kol a především je možné vyrobit ozubená kola s nestandardními tvary zubů. Praktická část obsahuje měření ozubených kol vyrobených v závodě Škoda Auto a.s. Cílem této práce je popsat problematiku výroby čelního ozubení a dle měření navrhnout změny pro výrobce v zájmu zvýšení produktivity a kvality výroby. [1, 2]

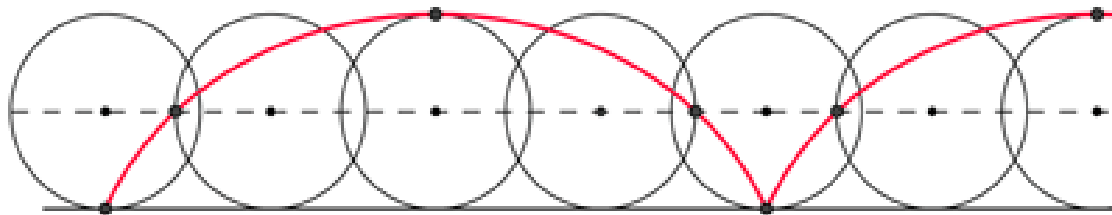
1. Rozdělení čelního ozubení

1.1 Rozdělení čelního ozubení dle profilu zubu

Základním stavebním prvkem ozubených převodů je profil boku zubu. Technický význam mají profily cykloidní, kruhové a evolventní.

Cykloidní profil zubu

Cykloidní profil vytváříme cykloidou (obr. 1), křivkou, kterou vytvoří bod pevně spojený s kružnicí, která se valí po přímce. U převodů ozubenými koly používáme epicykloidu nebo hypocykloidu. V praxi se vzhledem k náročnosti na výrobu používá výjimečně. Výhodou je možnost použití malého počtu zubů (6 až 7) u kol s cykloidním profilem zubů.



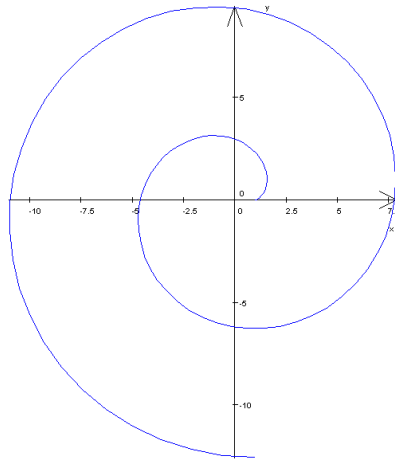
Obr. 1 Vytvoření cykloidy[11]

Kruhový profil zubu

U tohoto druhu ozubení boky zubů jsou tvořeny kruhovými oblouky. Stejně jako u cykloidních kol je jejich výroba náročná.

Evolventní profil zubu

Evolventní profil je nejpoužívanější profil zubu ve strojírenství. Evolventa (obr. 2) je rovinná křivka, která vznikne při odvalování tvořící přímky po základní kružnici.

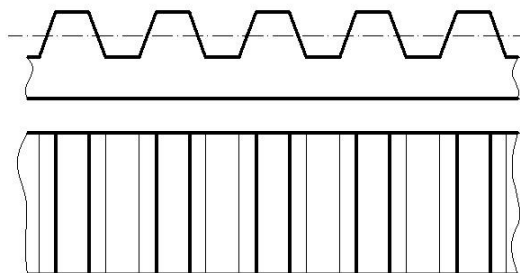


Obr. 2 Evolventa [12]

Významnou výhodou evolventního ozubení je jeho méně náročná výroba (oproti dříve uvedeným profilům), při které se používá jednoduchý přímoboký nástroj. Další výhodou je, že síly v ozubení mají konstantní směr. Nevýhodou je, že při malém počtu zubů dochází k podřezání paty zubu a u vnějšího ozubení vznikají nepříznivé tlakové poměry při záběru dvou zubů. [3]

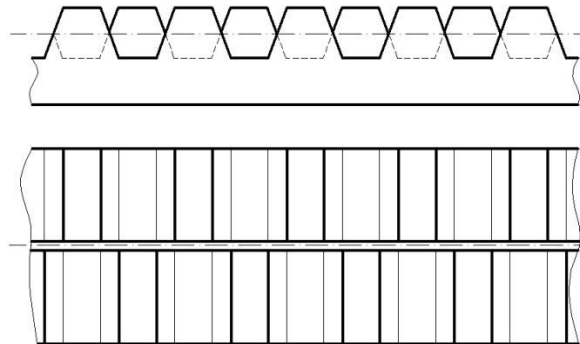
1.2 Rozdělení čelního ozubení dle profilu zubu

S přímými zuby – (obr. 3) jedná se o nejjednodušší a nejčastěji používaný druh, vzhledem k menším nákladům na výrobu ve srovnání se složitějšími druhy ozubení se používá při přenosu menších zatížení a tam, kde nám nevdí hlučnost vznikající při provozu.



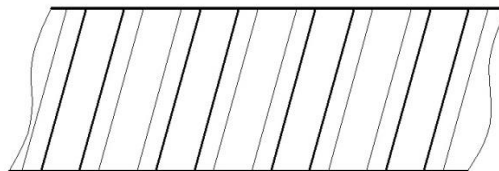
Obr. 3 Čelní ozubení přímé

Se stupňovitými zuby – (obr. 4) Kolo tvoří dvě identická kola pootočená o polovinu rozteče zubů. Tím se dosáhne rovnoměrnějšího přenosu výkonu.



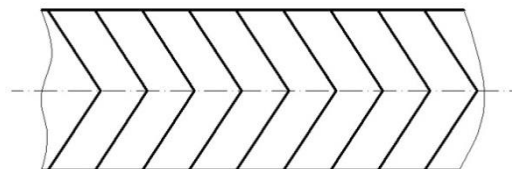
Obr. 4 Stupňovití ozubení

Se šikmými zuby – (obr. 5) na rozdíl od kol s přímými zuby jsou jejich skloněny zuby pod úhlem sklonu zubů β . Spoluzabírající kola mají stejný úhel sklonu ale opačný smysl stoupání. Jejich výhodou je, že kola pozvolna a plynule vstupují a vystupují ze záběru. Díky tomu získáme větší součinitel záběru, klidnější, tichý chod a menší dynamické účinky. Nevýhodou je vznik axiálních sil působících na uložení hřídele.



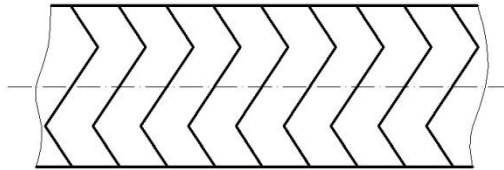
Obr. 5 Šikmým ozubení

Se šípovými zuby – (obr. 6) speciální druh šikmého ozubení. Má stejné výhody jako ozubení šikmé a navíc se vyruší axiální síla. Nevýhodou je náročná výroba a větší šířka kola.



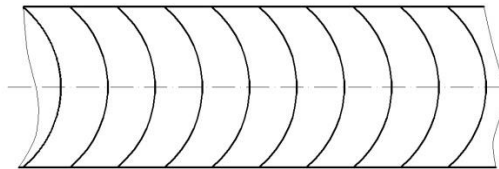
Obr. 6 Šípové ozubení

S **dvojnásobně šípovými zuby** (obr. 7) – zalomení umožňuje přenášení velmi vysokých výkonů.



Obr. 7 Dvojnásobně šípové ozubení

S **kruhovými zuby** – (obr. 8) také se používá k přenosu extrémních zatížení a oproti předchozímu typu mají kruhové zuby lepší pevnostní charakteristiku. [3]

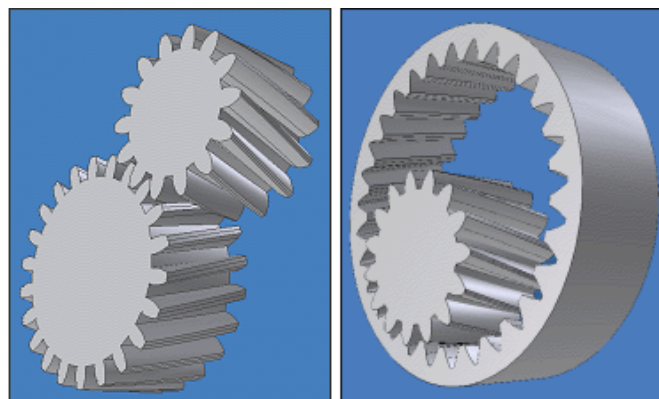


Obr. 8 Kruhové ozubení

1.3 Vnější a vnitřní čelní ozubení

Ozubená kola s ozubením na vnější válcové ploše jsou klasická ozubená kola nejčastěji používaná v průmyslu (obr.9).

Soukolí s vnitřním ozubením se skládá z pastorku s vnějším ozubením a z kola s ozubením vnitřním. Výhodou těchto soukolí je malý zastavěný prostor, lepší kluzné poměry, menší opotřebení a hlučnost. Nevýhodou je složitější výroba kola s vnitřním ozubením obrážením. [3]



Obr. 9 Soukolí s vnějším ozubením a soukolí s vnitřním ozubením [13]

1.4 Rozdělení dle materiálu ozubených kol

Ocel

Ocel, nejpoužívanější konstrukční materiál ve strojírenství, se uplatňuje i při výrobě ozubených kol.

Ocel na odlitky se vzhledem k nevhodné výsledné struktuře litého materiálu používá při výrobě málo namáhaných ozubených kol.

Konstrukční ocel (třída 11) se také používá u málo zatěžovaných kol. Tato kola se většinou párují s pastorky z pevnějších ocelí (třída 12 nebo třída 13)

Pokud pro výrobu ozubených kol použijeme ocel třídy 12 (např. 12 050.5), ozubená kola následně povrchově kalíme. Kola namáhaná otěrem se vyrábí z cementační oceli 12 020.

Pro vyšší krouticí momenty používáme zušlechtěné oceli s lepšími mechanickými vlastnostmi (12 060, 13 240.7, 15 241.7).

Šedá a tvárná litina

Litina se používá pro kola namáhaná malým statickým zatížením a pro malé obvodové rychlosti. Výhodou je nízká hlučnost soukolí a odolnost proti zadírání. Zuby ozubených kol vyrobených z litiny mají malou pevnost v ohybu a vzhledem ke křehkosti materiálu hrozí nebezpečí křehkého lomu. Litinová kola se mohou kombinovat s ocelovými pastorky.

Mosazi, bronzы a hliníkové slitiny

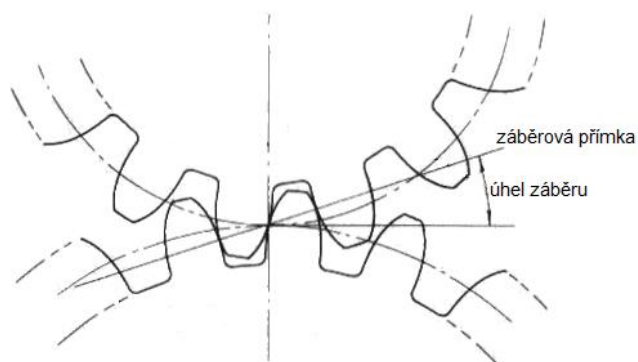
Ozubená kola z neželezných kovů se využívají v přístrojové technice a pro kinematické převody v jemné mechanice.

Plasty

Plastické hmoty (textolit, kapron, nylon, silon) se uplatňují při výrobě ozubených kol pro kinematické převody. Nevýhodou ozubených kol vyrobených z plastu je nízká únosnost v ohybu i v dotyku a špatná tepelná vodivost způsobující zadírání soukolí. Mezi výhody patří nízká hmotnost, dobrá odolnost proti korozi a chemickým vlivům, malá hlučnost, jednodušší výroba a nízká cena. [3]

2. Základní geometrické parametry ozubení

Úhel záběru α – (obr. 10) je úhel, který svírá záběrová (tvořící) přímka evolventy procházející valivým bodem s tečnou k roztečné kružnici. V praxi se běžně používá úhel záběru 20° .



Obr. 10 Úhel záběru u evolventního soukolí [14]

Modul m – (obr. 11) jedná se o délku roztečné kružnice připadající na jeden zub ozubeného kola. Spolu s počtem zubů se jedná o základní údaj určující velikost a únosnost kola. Pomocí modulu vypočítáváme další základní parametry ozubených kol. Jedná se o normalizovanou veličinu a udává se v milimetrech.



Obr. 11 Různé hodnoty velikosti modulu m [15]

Roztečná kružnice d – rozděluje zub a zubovou mezeru stejným dílem. Na průměru d svírá evolventa profilu s osou soukolí úhel α .

$$d = z \cdot m$$

Rozteč p – udává vzdálenost dvou sousedních bodů zubu na roztečné kružnici.

$$p = \pi \cdot m$$

Základní kružnice d_b – je evoluta jednoznačně určující evolventní profil.

$$d_b = d \cdot \cos\alpha$$

Vzdálenost os a – osová vzdálenost soukolí.

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{z_1 + z_2}{2} m$$

Hlavová kružnice d_a – určuje maximální vnější obrys ozubeného kola.

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

Patní kružnice d_f – určuje vnitřní obrys ozubeného kola.

$$d_f = d - 2 \cdot h_f$$

Výška hlavy zubu h_a – udává velikost zubu mezi roztečnou a hlavovou kružnicí.

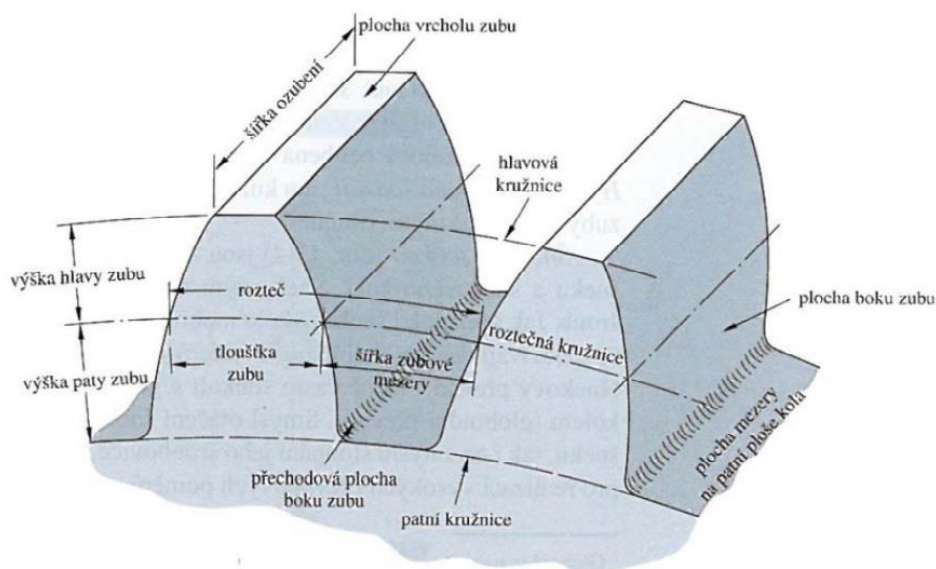
$$h_a = m$$

Výška zubu h – celková výška zubu.

$$h = h_a + h_f$$

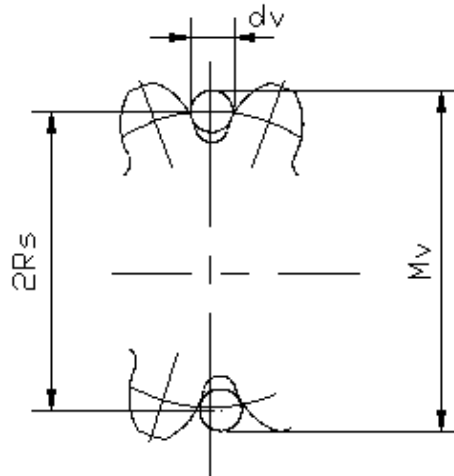
Tloušťka zubu s a šířka zubové mezery e

$$s = e + p$$



Obr. 12 Názvosloví čelního ozubeného kola s přímými zuby [16]

Míra přes kuličky – (obr. 13) kontrolní rozměr M_{dk} – jedná se o vzdálenost protilehlých zubových mezer, kontroluje se tloušťka zubů vložení kuliček (válečků) do zubové mezery.



Obr. 13 Měření míry přes kuličky [17]

Kontrolované mezní úchytky:

- úhlová odchylka profilu $f_{H\alpha}$
- celková odchylka profilu F_α
- tvarová odchylka profilu $f_{f\alpha}$
- úhlová odchylka sklonu zubu $f_{H\beta}$
- celková odchylka sklonu zubu F_β
- tvarová odchylka sklonu zubu $f_{f\beta}$

Kontrolované geometrické úpravy:

- výšková modifikace c_a – modifikace tvaru evolventy - eliminuje nepřesnosti rozteče a profilu, zamezuje vzniku deformací zubů při velkých změnách zatížení
- podélná modifikace c_b – modifikace tvaru boční křivky zubu – eliminuje výrobní úchytky sklonu zubů, zabraňuje deformacím hřídelů u kol při velkých změnách zatížení [3]

3. Vlastnosti a použití ozubených převodů

Ozubené převody jsou tříčlenné převodové mechanismy s konstantním převodovým poměrem a tvarovým stykem.

Mezi převodové mechanismy s konstantním převodovým poměrem dále patří:

- Třecí převody – tříčlenné převodové mechanismy se silovým stykem. Jsou jednoduché, mají klidný, téměř nehlukný chod, a tlumí rázy. K dosažení stálého přenosu výkonu je zapotřebí použít přitlačnou sílu, což způsobuje zvýšené namáhání hřídelů a ložisek.
- Řemenové převody – čtyřčlenné převodové mechanismy se silovým stykem. Jedná se o nejméně nákladný druh převodu. Mají velmi tichý chod, snesou velmi vysoké obvodové rychlosti a nevyžadují přesnou výrobu a montáž. Vyžadují však předpětí, jejich kinematika je nespolehlivá a jsou citlivé na změny teplot a nečistoty v prostředí.
- Lanové převody – používají se u zdvihacích zařízení. Díky použití ocelových lan mají tyto mechanismy velikou únosnost, vysokou účinnost a jsou levné.
- Řetězové převody – čtyřčlenné převodové mechanismy s tvarovým stykem. Mají vysokou účinnost, dlouhou životnost a můžeme jedním řetězem pohánět více hřídelů najednou. Tyto převody vyžadují mazání a jsou hlučnější než převody se silovým stykem.

Díky tvarovému styku zajišťujícímu přenos výkonu mají ozubené převody vysokou účinnost a převodový poměr je stálý – nedochází k prokluzu. Jsou také spolehlivé, mají dlouhou životnost a jsou nenáročné na údržbu. Umožňují přenos velikých výkonů na malé vzdálenosti. Různými konstrukcemi můžeme dosáhnout relativně vysokých převodových poměrů.

Největší nevýhodou je náročnost a nákladnost výroby vyplývající ze složité geometrie ozubených kol. Převody ozubenými koly vyžadují kvalitní montáž, přesné a tuhé uložení a jsou zdrojem hluku a vibrací.

Ozubená kola se používají všude tam, kde je potřeba vysoká účinnost, stálost převodu a nejsou na překážku vyšší náklady na výrobu ozubených kol. Běžně se používají v převodkách strojů a zařízení a jako součásti kinematických převodů.

Nejčastěji se můžeme setkat s převodkami v automobilech. Jedná se o soustavu ozubených kol sloužící ke změně a přenosu otáček a krouticího momentu. V automobilech se používají výhradně převodovky se stupňovitým převodem a to buď manuální, nebo automatické. Manuální převodovky jsou jednodušší a levnější, zatímco automatické převodovky zvyšují komfort řidiče.

Můžeme se s nimi setkat i v běžných spotřebních zařízeních (hračky,...), kde jsou ozubená kola vyrobena z levnějších materiálů, především plastů. [3]

4. Technologie výroby čelního ozubení

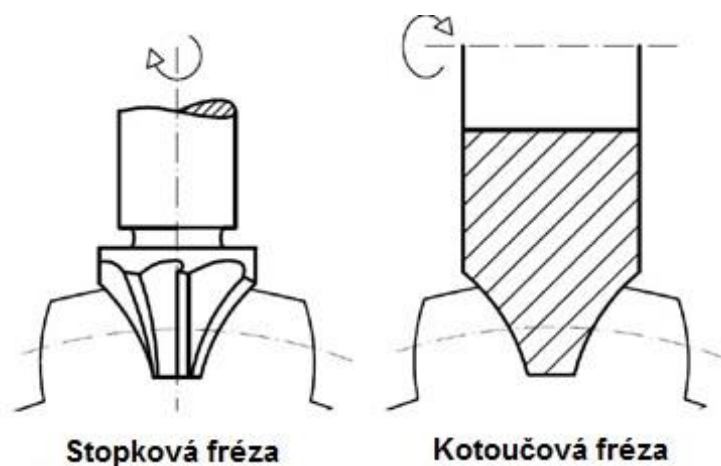
Vzhledem k častému použití ozubených kol v technické praxi představuje jejich výroba významnou část celkového objemu výroby ve strojírenství. K výrobě tvarově složitě součásti, jakou je ozubené kolo, se musí použít kvalitní obráběcí stroje a nástroje, což způsobuje vysokou nákladnost procesu. I při přesné výrobě může vlivem nepřesné montáže a pružné deformaci hřídelů být záběr kol neplynulý, jejich chod hlučný a mohou vznikat vibrace. Výrobou ozubených kol rozumíme obrábění tvarových ploch víceřitým nástrojem. Čelní ozubená kola se vyrábí především frézováním, obrážením a protahováním. [6, 7]

4.1 Frézování dělicím způsobem

Frézování dělicím způsobem je méně přesná technologie hodící se pro kusovou a malosériovou výrobu. Jako nástroj (obr. 14) lze použít tvarovou stopkovou frézu, nebo tvarovou kotoučovou frézu. Frézování kotoučovou frézou je produktivnější, ale při použití stopkové frézy můžeme vyrábět šípové ozubení. Profil frézy má tvar zubové mezery. Obráběné kolo se upíná do dělicího přístroje, díky kterému můžeme po vyfrézování jedné zubové mezery kolo pootočit o jednu zubovou rozteč.

Tuto technologii lze použít i pro výrobu šikmého čelního ozubení. Stůl univerzální frézky se natočí o úhel sklonu zubu a výroba probíhá při současném posuvu stolu a otáčení dělicího přístroje.

Hlavní nevýhodou této technologie je malá přesnost vyrobených ozubených kol. Tvar zubové mezery záleží nejen na zvoleném modulu, ale i na počtu zubů kola. Nástroje pro frézování dělicím způsobem se vyrábějí pro daný modul v určitém rozsahu počtu zubů, což způsobuje nepřesnost vyrobeného boku zubu. [6, 7]



Obr. 14 Nástroje pro frézování dělícím způsobem [18]

4.2 Frézování odvalovacím způsobem

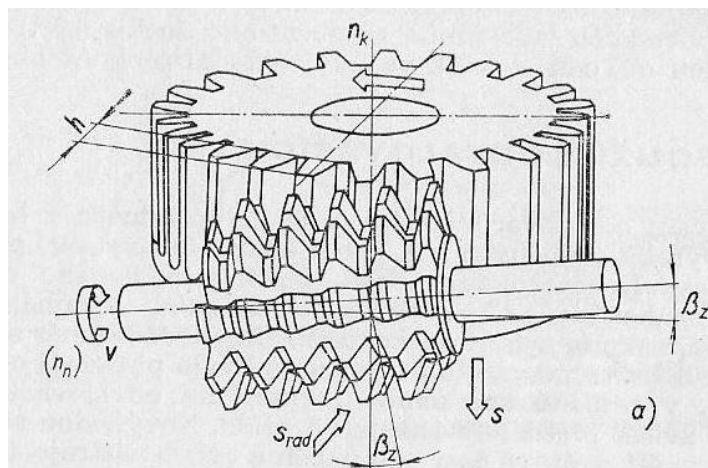
Frézování odvalovacím způsobem je nejčastěji používaná technologie pro výrobu ozubených kol. Jako nástroj se používá odvalovací fréza (obr. 15). Tyto frézy jsou speciální nástroje ve tvaru šneku, na němž jsou vyrobeny drážky tvořící jednotlivé zuby frézy. Vyrábí se z rychlořezné oceli a nanáší se na ně povlaky pro zvýšení tvrdosti a odolnosti proti otěru, např. TiC, TiN. Další možnou konstrukcí odvalovacích fréz je použití nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů, keramiky či jiných, velmi tvrdých materiálů.



Obr. 15 Odvalovací fréza z nástrojové oceli [19]

Profil zubů nástroje je jednoduchý, lichoběžníkový. Evolventní profil zubů vyráběného kola vznikne odvalováním boku zubů frézy, a proto lze jednou frézou pro určitý modul přesně vyrobit ozubená kola s různým počtem zubů a to přímá i šikmá, korigovaná i nekorigovaná a také kola šneková. Odvalovací frézou lze vyrobit pouze vnější ozubení s evolventním profilem. Ozubení je vytvářeno plynule což podstatně zvyšuje produktivitu.

Při výrobě přímého ozubení (obr. 16) je fréza upnuta ve vřetení stroje a je natočena o úhel stoupání šroubovice β_z , koná rotační pohyb řeznou rychlostí v a posuvné pohyby: s_{rad} – přířuv do řezu odpovídající výšce zubu h ; s – svislý pohyb rovnoběžný s osou rotace obrobku. Obrobek je upnut na stole, který se otáčí.



Obr. 16 Výroba přímého ozubení odvalovacím způsobem [20]

Při výrobě šikmého ozubení je nástroj skloněn ještě o úhel sklonu zubů kola a obrobek musí navíc vykonávat doplňkový (přídavný) pohyb po celou dobu frézování. [6, 7]

4.3 Obrážení dělicím způsobem

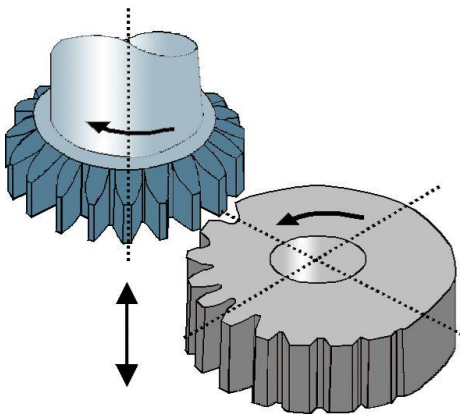
Obrážení dělicím způsobem je málo produktivní a méně přesná technologie výroby ozubení. Stroj používaný pro tuto technologii se nazývá svislá obrážečka s dělicím stolem. Ostří nástroje má tvar zubové mezery a obrobek se upíná do dělicího zařízení. Po obrobení jedné zubové mezery se obrobek pootočí a vyrábí se další zubová mezera. Výhodou je, že můžeme vyrábět i kola s vnitřním ozubením. [6, 7]

4.4 Obrázení odvalovacím způsobem

Obrázení odvalovacím způsobem je kontinuální technologie výroby ozubení a díky tomu je mnohem přesnější a produktivnější než dělicí způsob výroby. Musí se ale použít speciální obrážecí stroj. Jako nástroj lze použít kotoučový obráběcí nůž (systém Fellows), nebo hřebenový obrážecí nůž (systém Maag). [6, 7]

4.4.1 Systém Fellows

Při použití systému Fellows (obr. 17) koná nástroj (obr. 18) pomalý rotační pohyb a přímočarý vratný pohyb. Obrobek, upnutý ve stole obrážčečky, také koná rotační pohyb. Nástroj a obrobek se na začátku obrábění nastaví na dotek, nástroj se postupně přibližuje, dokud nedosáhne plné hloubky zubové mezery, přísuv se zastaví a nástroj i obrobek se nadále otáčejí a nástroj vykonává přímočarý vratný řezný pohyb. Touto technologií lze vyrábět i ozubená kola se šikmým ozubením, kdy má nástroj šikmé zuby a vykonává navíc šroubový pohyb. [6, 7]



Obr. 17 Schéma systému Fellows [21]



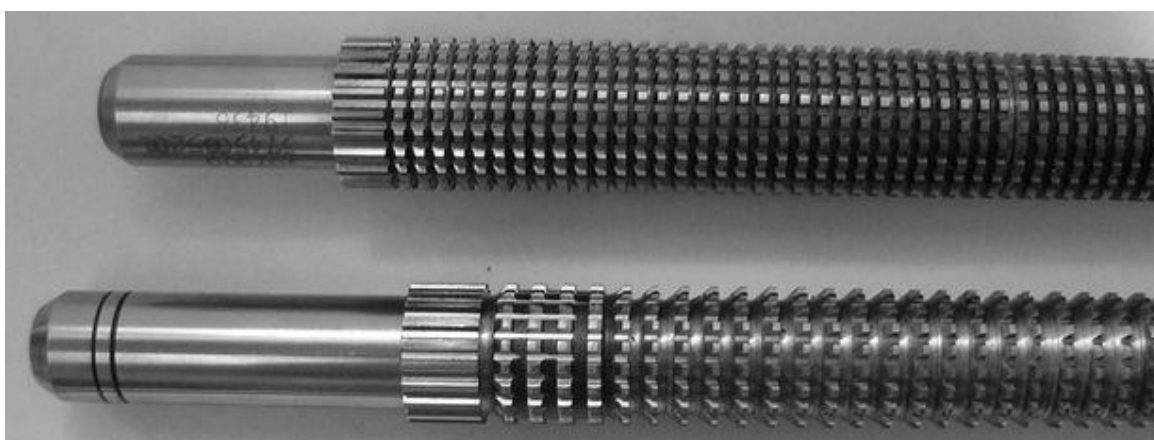
Obr. 18 Obrážecí kotouče s povlakem z TiN [22]

4.4.2 Systém Maag

Druh obrázení, kdy je jako nástroj použit hřebenový nůž, jehož zuby mají tvar lichoběžníku. Nástroj koná přímočarý vratný řezný pohyb a obrobek se po něm odvaluje. Tato technologie není kontinuální a po obrobení několika zubových mezer se musí proces přerušit, kolo se pootočí o několik zubových roztečí zpět a vrátí se do výchozí polohy. To se musí opakovat, dokud nejsou vyrobeny všechny zuby po obvodu. [6, 7]

4.5 Protahování

Technologie používaná především pro výrobu vnitřního ozubení. Kvůli vysoké ceně nástroje se protahování uplatňuje pouze v hromadné a sériové výrobě. Jako nástroj (obr. 19) se používá protahovací trn s řadou zubů, kalibrovací zuby nástroje mají přesný tvar zubové mezery a po jejím vyrobění již není třeba tvarové plochy ozubeného kola brousit. Jako nástroj lze použít i protahovací kotouč, který koná rotační řezný pohyb a protahování ozubení probíhá dělicím způsobem, kdy po vyrobění jedné zubové mezery se obrobek pootočí o jednu rozteč a cyklus se opakuje. [6, 7]



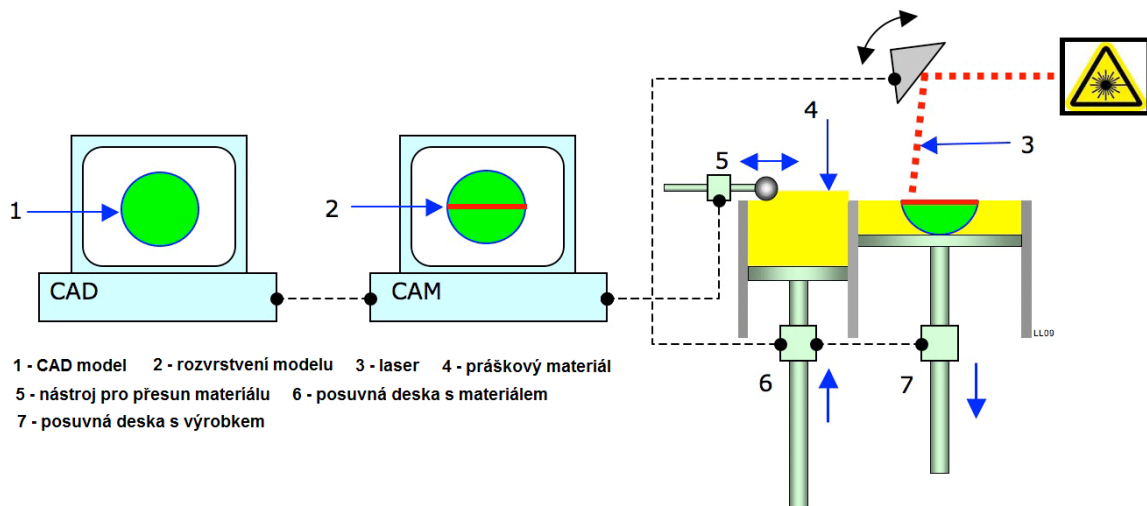
Obr. 19 Protahovací trny pro výrobu vnitřního evolventního ozubení [23]

4.6 Výroba ozubení 3D tiskem

3D tisk je aditivní technologie výroby, kdy je třírozměrný objekt vytvářen postupným vrstvením materiálu. Jedná se o moderní technologii vyvinutou v osmdesátých letech dvacátého století. Výroba probíhá na 3D tiskárnách, do kterých se nahraje počítačový 3D model složený z vrstev a tiskárna následně automaticky vytvoří trojrozměrný fyzický objekt. 3D tiskárny jsou rychlejší, levnější a jednodušší na používání než běžné výrobní stroje a zařízení a díky tomu můžeme být svědky velkého rozšíření 3D tisku v průmyslu. V dnešní době se tato technologie nejvíce používá v oblasti Rapid prototyping k výrobě prototypů především v automotive a leteckém průmyslu. Vzhledem k neustálému

zdokonalování této technologie je možné, že 3D tisk v budoucnu nahradí tradiční výrobní technologie. K výrobě je možné použít širokou škálu materiálů, od plastů až po železné a neželezné kovy. Mezi nejpoužívanější metody 3D tisku patří Selective laser sintering (SLS) a Fused deposition modeling (FDM).

Selective laser sintering (obr. 20) je aditivní technologie, používající výkonný laser k tavení částic plastového, kovového, keramického či skleněného prášku. Laser nataví v jedné vrstvě prachu na posuvné desce požadovaný tvar, deska se posune a je nanесena další vrstva prachu, v níž laser opět nataví daný tvar a celý cyklus se opakuje, dokud se nevyrobí celý 3D objekt (obr. 21). Ani u složitějších výrobků nejsou potřeba podpůrné konstrukce, protože výrobek je podpírán neroztaveným materiálem.

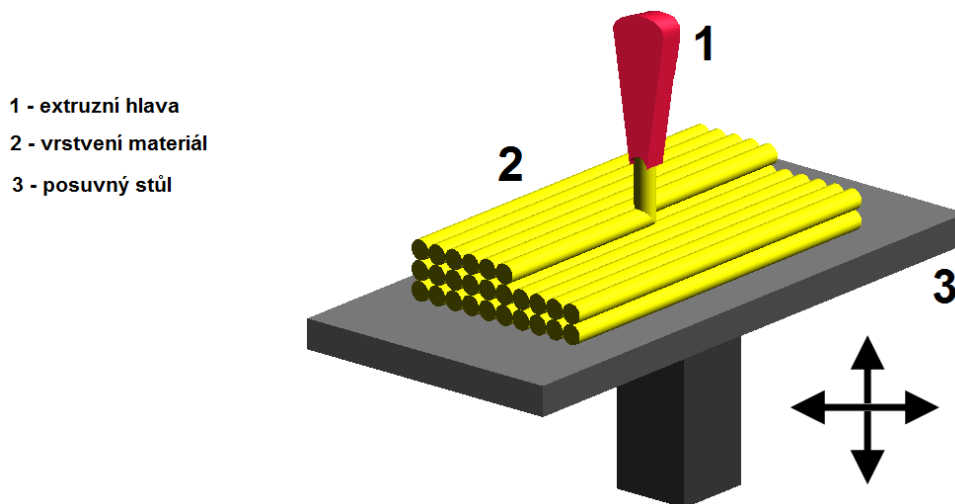


Obr. 20 Schéma metody SLS [24]



Obr. 21 Kovové ozubené kolo vyrobené metodou SLS [25]

Fused deposition modeling (obr. 22) je aditivní způsob výroby, při kterém je roztavený termoplast vytlačován z extruzní hlavy, která vrství materiál po dráze definované počítačovým modelem. Tloušťka vytlačované vrstvy je přibližně 0,01 milimetru a součástka (obr. 23) je postupně vyráběna od nejnižší k nejvyšší vrstvě. U složitějších výrobků se navíc musí vytisknout podpůrné sloupky. [8]



Obr. 22 Schéma metody FDP [26]



Obr. 23 Planetová převodovka vyrobená metodou FDP [27]

5. Dokončovací operace výroby ozubení

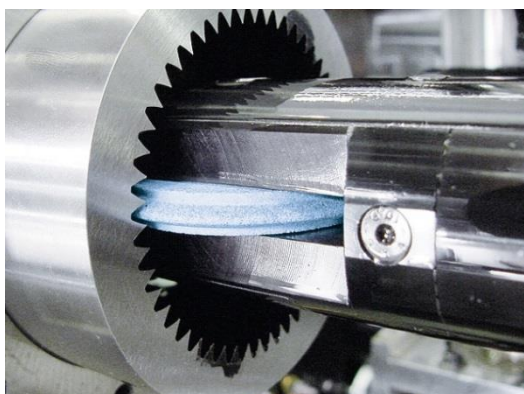
Kvůli dosažení požadované rozměrové přesnosti a kvality povrchu se po obrobení ozubených kol používají dokončovací operace. Dochází při nich pouze k minimálnímu odběru materiálu. Mezi dokončovací operace výroby ozubení patří broušení, ševingování, lapování, honování, superfinišování a zaběhávání.

Broušení

Broušení se používá zejména pro kola, která byla kalena a odstraníme jím nepřesnosti vzniklé obráběním a deformace způsobené tepelným zpracováním. Broušení se uplatňuje i při výrobě ozubených kol malých modulů, kdy kotoučem vybrousíme celou zubovou mezeru. Ozubená kola můžeme brousit tvarovými kotouči dělicím způsobem, nebo odvalovacím způsobem.

Broušení dělicím způsobem

Při broušení dělicím způsobem se brousí buď oba boky mezery najednou kotoučem s tvarem zubové mezery (obr. 24), nebo dva boky zubu dvěma kotouči. Pro zvýšení produktivity je možné oba způsoby kombinovat a použít tři kotouče (obr. 25). Po vybroušení tvarové plochy se proces přeruší, kolo se pootočí o jednu rozteč a celý cyklus se opakuje. Kvůli tomu patří tato technologie mezi méně přesné.



Obr. 24 Broušení tvarovým kotoučem [28]



Obr. 25 Broušení třemi brusnými kotouči [29]

Broušení odvalovacím způsobem

Vzájemné odvalování nástroje a obrobku může probíhat v jedné zubové mezeře s následným otočením obrobku dělicím přístrojem, nebo nepřetržitě brousícím kotoučem ve tvaru šneku

Pro broušení odvalováním (obr. 26) v jedné zubové mezeře se používá jeden nebo dva jednoduché tvarové kotouče. Obrobek koná odvalovací pohyb kolem své osy a zároveň se posouvá ve směru osy tak, aby se obrobila celá délka zubu. Po obrobení tvarové plochy odvalovacím způsobem se kolo pootočí pomocí dělicího přístroje a obrábí se další zubová mezera.



Obr. 26 Broušení ozubení odvalováním [30]

Při použití kotouče ve tvaru šneku (obr. 27) je proces kontinuální a tím pádem mnohonásobně produktivnější než předchozí technologie. Řezné pohyby při odvalovacím broušení jsou podobné jako při odvalovacím frézování.



Obr. 27 Broušení ozubeného kola kotoučem ve tvaru evolventního šneku [31]

Lapování

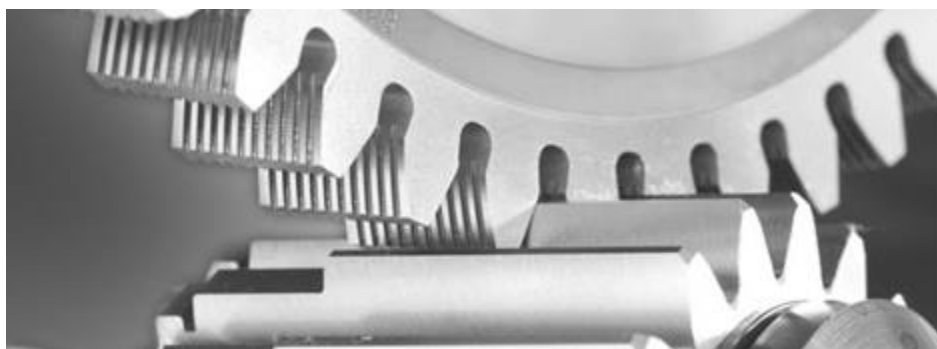
Při lapování ozubených kol (obr. 28) se jako nástroj používá ozubené kolo vyrobené z měkčího materiálu než obrobek, většinou z litiny, a jako lapovací prostředek brusná kapalina či brusná pasta. Kola se po sobě odvalují, lapovací kolo je bržděné a koná přímočarý vratný pohyb. Jedná se o nejpřesnější druh dokončovací operace.



Obr. 28 Lapování ozubeného kola [32]

Ševingování

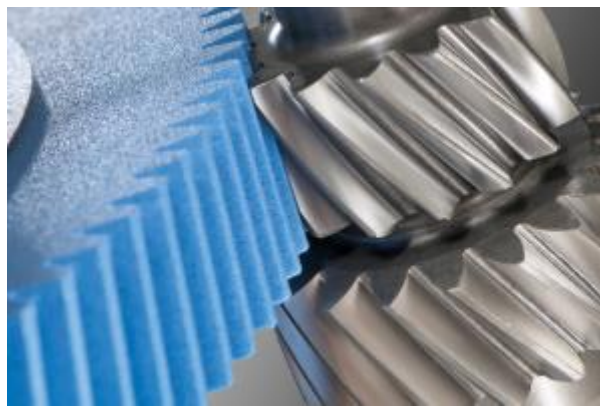
Ševingování (obr. 29) je dokončovací technologie obrábění, při které se jako nástroj používá ozubené kolo s drážkami pro odvod třísek. Osy nástroje a obrobku jsou mimoběžné. Nástroj se otáčí řeznou rychlostí v_n a obrobek je unášen. Aby se dosáhlo stejné kvality povrchu po celé šířce ozubení, posouvá se obrobek podél své osy.



Obr. 29 Ševingování ozubeného kola [33]

Honování

Při honování ozubených kol (obr. 30) se jako nástroj používá tvarový brusný kotouč. Nástroj je přitlačován na obrobek, nástroj i obrobek se otáčí a tím dochází k obrušování a zpevňování povrchu. Řezné rychlosti jsou u honování malé oproti broušení, a proto není povrch obrobku tepelně namáhán. Honovaná ozubená kola se často používají v automobilovém průmyslu, jelikož díky kvalitě povrchu je jejich chod velmi tichý a vzhledem ke zpevnění povrchové vrstvy během výrobního procesu mají kola vysokou trvanlivost a odolnost proti pittingu.



Obr. 30 Honování ozubeného kola [34]

Superfinašování

Při použití superfinašování je obrobek obráběn jemnými brusnými kameny. Řezné rychlosti jsou malé, stejně jako tlak nástroje (0,25 MPa). Nástroj koná kmitavý a přímočarý pohyb, zatímco obrobek se otáčí kolem své osy. Díky složitému výslednému pohybu dosáhneme vysoké kvality povrchu. Při superfinašování se používají řezné kapaliny

Zaběhávání

Technologie používaná u kol se složitou geometrií, která se nedají jednoduše brousit. Při vzájemném záběru kol se mezi zuby přidává medium s rozptýleným brusivem a kola se k sobě přibližují, dokud není dosaženo požadované osové vzdálenosti. [6, 7]

5.2 Přesnost způsobů výroby a dokončovacích operací

Způsob výroby	třída přesnosti	drsnost Ra [μm]
frézování	7 ÷ 8	3,2 ÷ 6,3
obrážení	6 ÷ 7	1,6 ÷ 3,2
ševingování	5 ÷ 7	0,4 ÷ 1,6
broušení	3 ÷ 6	0,2 ÷ 0,8
lapování	2 ÷ 4	0,05 ÷ 0,1

tab. 1 Přesnost technologií

5.3 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování ozubených kol

Tepelné a chemicko-tepelné zpracování se používá u ocelových ozubených kol pro zlepšení jejich mechanických vlastností. Tyto technologie se používají především u vysoce namáhaných kol s požadovanou dlouhou životností, kdy tvrdost výchozího materiálu není dostatečná, nebo nelze vzhledem ke složité výrobě ozubených kol vysoce tvrdé a pevné materiály použít.

Tepelné zpracování

Základní technologií tepelného zpracování je kalení. Při kalení se materiál ohřeje na vysokou teplotu (700 – 800°C) a následně se velmi rychle ochladí ve vodě či oleji. Tento proces způsobí změnu vnitřní struktury a zvýšení tvrdosti. Dochází také ke zvýšení křehkosti a vzniku vnitřního pnutí. U ozubených kol se v praxi, především v sériové výrobě, nejčastěji využívá technologie povrchového kalení, kdy se povrch součásti rychle ohřeje plamenem, nebo indukční cívkou na vysokou teplotu a následně se zchladí proudem vody. Ke změně struktury dojde na povrch, v jádru součásti zůstane struktura původní. U některých druhů ocelí je ke kompletní změně struktury nutné materiál zchladit až na teplotu -190°C.

Chemicko-tepelné zpracování

Technologie chemicko-tepelného zpracování používají chemické sloučeniny ke zlepšení vlastností materiálu součásti a běžně se používá především cementování a nitridování. Cementování je technologie, při které se povrch materiálu za vysokých teplot sytí uhlíkem. Díky vyššímu obsahu uhlíku má po následném kalení povrchová vrstva lepší mechanické vlastnosti. Při nitridování se za vysokých teplot sytí povrch již dokončené součásti dusíkem a vlivem chemických reakcí na povrchu vzniknou sloučeniny zvyšující tvrdost povrchové vrstvy.

5.4 Vliv montáže ozubených kol na spolehlivost a životnost strojů a zařízení

Přesně a kvalitně vyrobená ozubená kola sama o sobě nemohou zajistit klidný a spolehlivý chod stroje či zařízení. Velmi důležitá je přesnost montáže ozubených kol. Ozubené převody jsou významným zdrojem hluku a vibrací vlivem rázů při vstupu zubů do záběru. Špatná montáž má za následek nevyváženost, excentricitu a nesouosost strojních součástí a tím dochází ke kinematickému buzení vibrací a výraznému zhoršení chodu soukolí. Následkem zvýšení vibrací je vyšší hlučnost, menší spolehlivost a kratší životnost. Proto může u převodovek docházet k poruchám s fatálními následky a vlivem vyšší hlučnosti dochází ke zvýšení poruchovosti. U výrobních strojů dochází vlivem vibrací také ke snížení rozměrové přesnosti a ke zhoršení kvality povrchu obrobku.

6. Poškození ozubených kol

Ozubená kola patří mezi velmi namáhané součásti. Při přenášení vysokých výkonů vznikají velká napětí, která mohou mít za následek poškození ozubení. Vzhledem k vysokým nákladům na výrobu a důležité funkci ozubených kol používaných ve strojních zařízeních musíme dbát na kvalitní návrh ozubených kol, abychom předešli jejich poškození a zajistili správné fungování strojů. V praxi se rozlišují dvě hlavní skupiny poškození ozubených kol a to poškození povrchu zubů a poškození lomem zubů.

Poškození povrchu zubů dělíme na:

- opotřebení
- zadírání
- trvalá deformace povrchu zubů
- jamková koroze – pitting – projev povrchové únavy boku netvrzených zubů
- odlupování povrchové vrstvy – spalling – projev povrchové únavy boku zubů povrchově tvrzených.

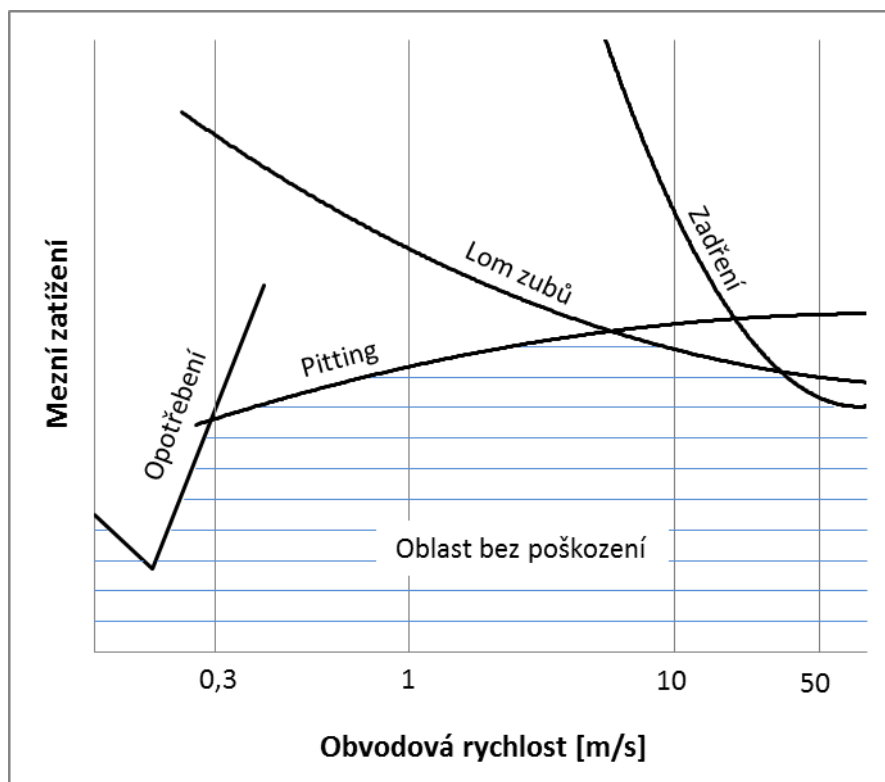
Poškození ozubených kol lomem zubů můžeme rozdělit na:

- lom zubů v důsledku přetížení
- únavový lom zubů.

Dále se u ozubených kol objevují poruchy technologické, např. brusné trhliny, trhliny výkovků, odlitků apod., které mohou mít za následek další poruchy během provozu.

Vznik poruch lze dát do souvislosti s mezním zatížením a rychlostí otáčení (graf 1).

Vzhledem k použití ozubených kol jsou nejvýznamnější poruchy mající únavový charakter, a také zadření při vysokých rychlostech. Únavové poruchy jsou ty, jejichž vznik závisí na velikosti a počtu cyklicky se opakujících zatížení a u ozubených kol rozlišujeme dva hlavní druhy těchto poruch: únavový lom zubů a únavové poškození povrchu boku zubů. [9]



Graf 1: Vznik poruch v závislosti na mezním zatížení a obvodové rychlosti

6.1 Opatření ozubených kol

Opatřením rozumíme poškození povrchu součásti, kdy dojde k odstranění malých vrstev materiálu ve stykových plochách.

Vyleštění

Velmi pomalý proces, při kterém se opotřebovávají nerovnosti ve stykových plochách, dokud nevznikne velmi hladký, vyleštěný povrch. Příčinou je kovový styk v záběru ozubených kol. Objevuje se u soukolí pracujících při nižších obvodových rychlostech, kdy olejový film nemá dostatečnou tloušťku. Vyleštění boků zubu lze eliminovat zvolením vhodného maziva, nebo zvýšením rychlosti, což zajistí kvalitní mazání povrchu kol.

Mírné opotřebení

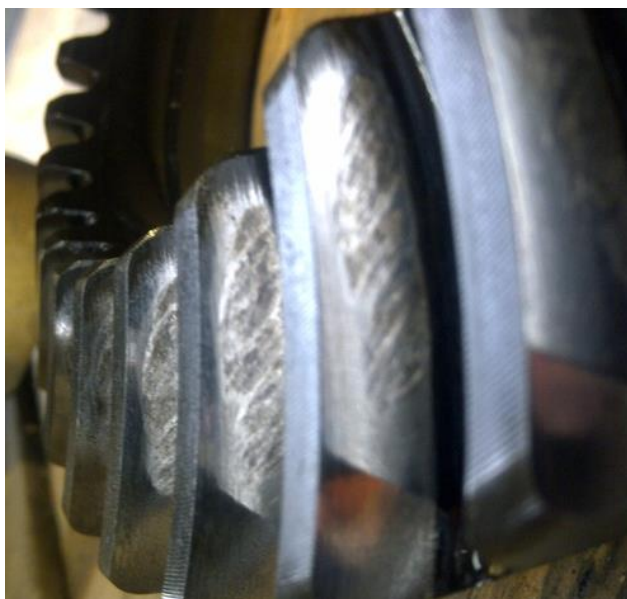
Dlouhodobý proces opotřebení, kdy dochází k odstraňování materiálu na hlavách a patách zubů (obr 31). Je způsobeno nevhodnou volbou maziva a může se zhoršovat při přítomnosti nečistot. Tomuto druhu opotřebení můžeme zabránit použitím maziva s vyšší viskozitou, nebo pevnějšího materiálu ozubených kol.



Obr. 31 Mírné opotřebení [35]

Nadměrné opotřebení

Nadměrným opotřebováním rozumíme výrazný úbytek materiálu z povrchu zubů (obr. 32). Dochází tak ke změně boční křivky zubu a zhoršení chodu soukolí, což má za následek další zvýšení opotřebení. Příčinou je nečasné odhalení počátečního opotřebení, které se zhoršuje až do stavu, kdy soukolí nemůže vykonávat svou funkci. Můžeme ho odstranit stejně jako předchozí druhy opotřebení vhodnou volbou maziva, zvýšením obvodové rychlosti, použitím pevnějšího materiálu ozubených kol a také použitím oběhového mazání.



Obr. 32 Nadměrné opotřebení [36]

Abrazivní opotřebení

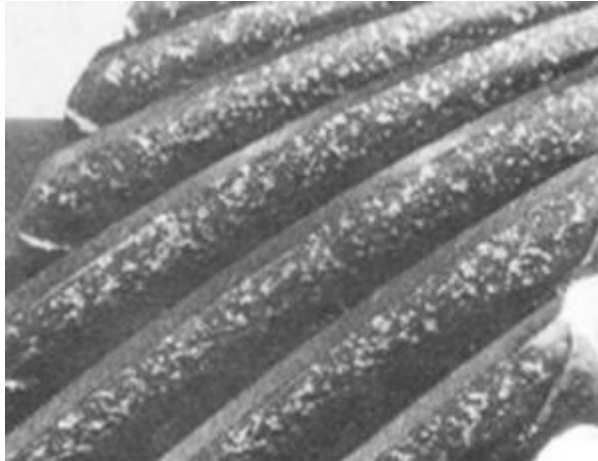
Brusné opotřebení (obr. 33) poznáme podle příčných drážek na povrchu boků zubů. Vzniká působením nečistot, které odebírají materiál na povrchu zubu při záběru soukolí. Můžeme mu zabránit použitím maziva s vyšší viskozitou, použitím jemnějšího filtru u oběhového mazání a častější výměnou oleje v uzavřených převodovkách bez filtrace.



Obr. 33 Abrazivní opotřebení [37]

Korozivní opotřebení

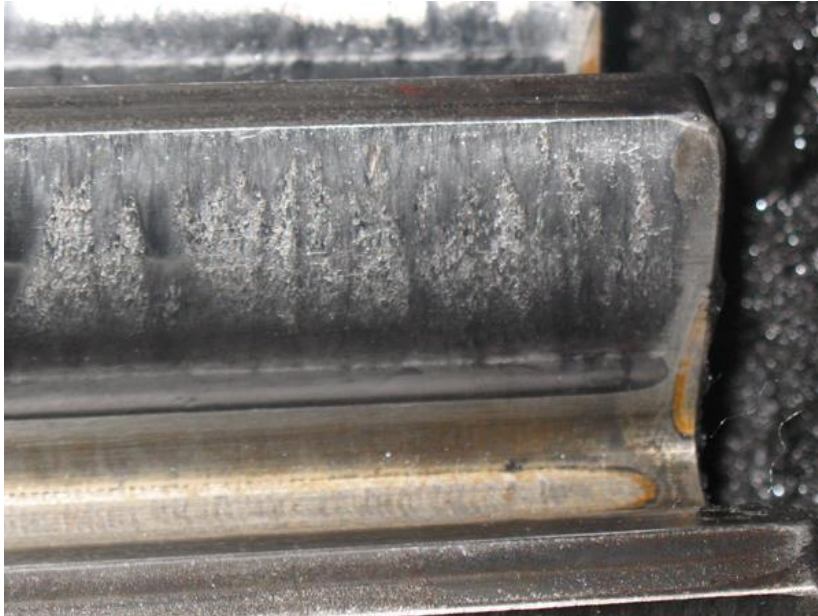
Jedná se o zhoršení kvality povrchu vlivem chemických reakcí (obr. 34). Příčinou je působení agresivních složek maziva na povrch zubů při vysokých teplotách a tlacích. Proto je nutné dbát na správnou volbu oleje, jeho častou kontrolu a také pravidelnou výměnu. Vzhledem k tomu, že olej může být znečištěn chemikáliemi z okolí či ovzduší, je vhodné konstruovat převodové soustavy jako uzavřené celky. [9, 10]



Obr. 34 Korozivní opotřebení [38]

6.2 Zadírání

Poškození objevující se u soukolí s nesouvislým olejovým filmem pracujících při vysokých obvodových rychlostech. Vzhledem k nedostatečnému promazání zubů soukolí se jednotlivé zuby dotýkají kov na kov a kvůli vysokým teplotám vznikajícím v místě záběru dochází ke vzniku mikrosvarů a následnému odtržení materiálu, což má za následek poškození povrchu zubu a vznik příčných trhlin na povrchu boku zubu (obr. 35). Vzniká při použití nevhodného maziva, nadměrných teplotách, zatíženích a rychlostech, způsobující další tepelné zatížení zubů. Proto je nutné použít vysoce viskózní maziva se speciálními aditivy, která zajistí bezporuchový chod soukolí. Zadírání lze také předejít pečlivým návrhem soukolí a analýzou vzniku tepla při záběru ozubených kol. [9, 10]



Obr. 35 Poškození zadíráním [39]

6.3 Poškození plastickou deformací

Deformace povrchu zubu vznikající při vysokém zatížení během odvalování zubů (obr. 36). Vzájemným pohybem obou kol a působením vysokého tlaku dochází k tváření materiálu za studena. K deformacím dochází na bocích zubů, nebo se zaoblí hrana na hlavě zubu a také může být materiál vytlačován přes špičku zubu. Objevuje se především u kol z měkčích materiálů, ale může k ní docházet i u přetěžovaných kol z tvrdých materiálů a u kol tvrzených. Tento druh poškození lze odstranit snížením dotykového napětí mezi zuby při záběru kol, či použitím tvrdšího materiálu při jejich výrobě. [9, 10]



Obr. 36 Poškození plastickou deformací [40]

6.4 Pitting

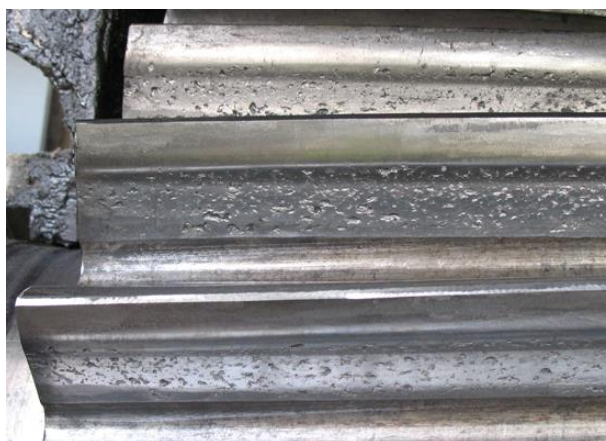
Jedná se o druh únavového poškození zubů bez chemickotepelné povrchové úpravy, které je způsobeno překročením mezního tlaku v místě styku ozubených kol. Při působení mezního tlaku na povrch zubu vznikají mikrotrhliny o hloubce až $20\mu\text{m}$, do nichž působením hydrostatických sil vniká olej, který svým tlakem způsobí vytrhávání částic materiálu a vznik jamek.

Záběhový pittingu (obr. 37) je druh poškození vznikající na počátku provozu. K poškození dochází v místech, kde vlivem nepřesností na povrchu zubů nedochází k dokonalému odvalování. Po odstranění nerovností pittingem se zvýší styková plocha, povrch se uhladí a nedochází k dalšímu vzniku jamek.

Progresivní pitting (obr. 38) vzniká při dlouhodobém přetěžování ozubených kol. Jamky začínají vznikat na hlavě zubu a postupně se rozšiřují na celou jeho plochu, což způsobí zničení profilu zubu, neklidný chod soukolí a výrazný hluk. Poškození progresivním pittingem může mít za následek i lom zubu ozubeného kola. [9, 10]



Obr. 37 Záběhový pitting [41]



Obr. 38 Progresivní pitting [42]

6.5 Spalling

Druh únavového poškození podobný pittingu, objevující se u přetěžovaných kol z tvrdých materiálů, nebo u kol s tvrzeným povrchem. Při spallingu dochází k vylamování plochých částic nepravidelného tvaru z povrchu zubu (obr. 39). Oproti pittingu mají jednotlivé částice mnohonásobně větší rozměry. Únavovým poškozením povrchu lze zabránit použitím tvrdších materiálů s vyšší únosností, ale většinou je třeba znova navrhnout dané soukolí tak, abychom zajistili potřebnou životnost ozubených kol. [9, 10]



Obr. 39 Spalling [43]

6.6 Únavový lom zubů

Druh poškození vznikající při cyklickém namáhání a přetěžování ozubených kol. Počátek lomu se díky působení ohybových napětí nachází u paty zubu a postupně se šíří dál, dokud nedojde ke kompletnímu (obr. 40) či částečnému lomu zubu.



Obr. 40 Lom zubu [44]

U čelních ozubení dochází nejčastěji k lomu celého zubu, u kol se šikmým ozubením jsou poruchy rozmanitější a vzhledem k postupnému odvalování a hranovému záběru zubů dochází častěji k odlomení části zubu (obr. 41). [9, 10]



Obr. 41 Lom zubu šikmého ozubení [45]

7. Kontrola ozubených kol

Konečnou fází výroby ozubených kol je stejně jako u každé jiné strojní součásti jejich kontrola. Vzhledem k důležité funkci, již ozubená kola vykonávají, se musí dbát na přesný návrh, výrobu a také na důslednou kontrolu. Tato kapitola se bude zabývat kontrolou ozubených kol v praxi, konkrétně v Mladoboleslavském závodě firmy Škoda Auto a.s. Zde se vyrábí ozubená kola do převodovek MQ100 s maximálním krouticím momentem 120Nm a MQ 200 (obr. 42) s maximálním krouticím momentem 200Nm. Kontrola ozubených kol probíhá jak během výroby (mezioperační kontroly), tak i u dokončených výrobků (konečná kontrola).



Obr. 42 Převodovka MQ200 [46]

Mezioperační kontroly ozubených kol probíhají přímo ve výrobě na pracovištích se speciálními dílenskými měřidly. Kontroluje se tloušťka zubu, obvodové házení a záběr ozubení. Tloušťka zubu se kontroluje měřením tzv. míry přes kuličky, kdy se do dvou protilehlých zubových mezer vloží kuličky a změří se vzdálenost kuliček od sebe.

Obvodové házení se měří tak, že se do jedné zubové mezery vloží kulička, na kterou se seřídí číselníkový úchylkoměr a následně se proměří několik dalších zubových mezer po obvodu ozubeného kola. Porovnáním naměřených výsledků zjistíme, zda je kolo vyrobeno bez házení, či trpí excentricitou nebo ovalitou.

Záběr ozubení se kontroluje dvoubokým odvalem ozubených kol. Při této zkoušce se používá dvojice kol, hnací (etalon) a hnané (kontrolované), která se navzájem odvalují a jsou k sobě přitlačována. Případné geometrické odchylky se projeví změnou osové vzdálenosti zaznamenávanou číselníkovým úchylkoměrem.

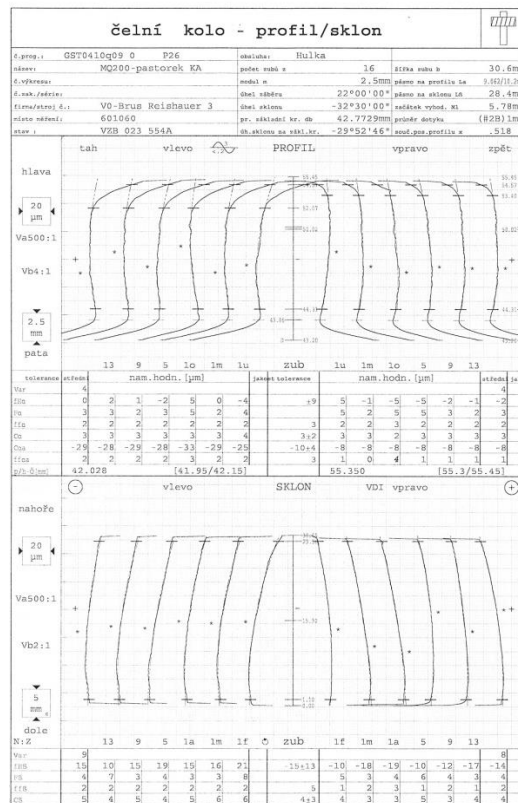
Konečná kontrola probíhá na speciálních oddělených klimatizovaných pracovištích s kvalifikovaným personálem. Používají se měřicí stroje německé firmy KlingelInberg pracující na principu snímání polohy měřicího dotyku s přesností 1 mikronu (0,001 mm). Stroj pohybuje měřicí hlavou s dotykem po boku zubu a snímá jeho okamžitou polohu (obr. 43).



Obr. 43 Dotykové měření ozubení [47]

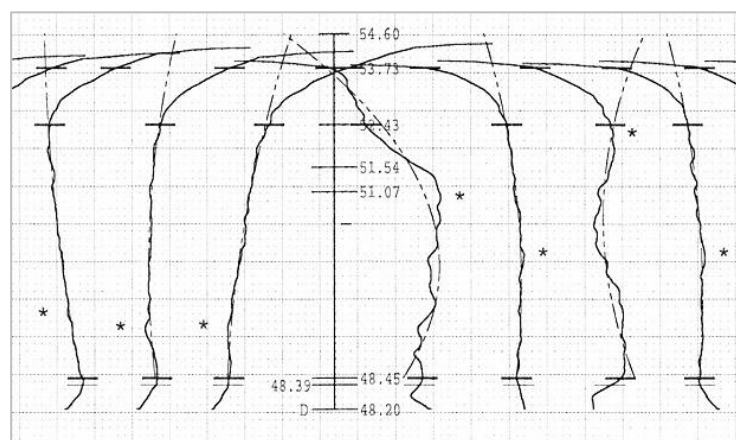
Naměřené hodnoty se zobrazují v protokolu o měření parametrů ozubení (obr. 44). V jeho záhlaví jsou uvedeny všechny důležité údaje o měřeném kole (počet zubů, modul apod.) včetně čísla výkresu a výrobního stroje. Křivky profilu evolventy a sklonu šroubovice, vytvořené dle naměřených hodnot, jsou na protokolu pro snadné vyhodnocení zobrazeny v měřítku. Pod nimi jsou vždy tabulky obsahující tolerance konkrétních měřených hodnot a jejich naměřené úchyly. Úchyly mimo toleranci jsou na protokolech tučně zvýrazněny. Nejčastěji se měří čtyři zuby a první zub se měří ve třech rovinách. Měření jednoho ozubeného kola trvá přibližně patnáct minut a měření probíhá vždy na začátku směny a v její polovině, tedy každé čtyři hodiny. Vyhodnocení každého protokolu závisí na daném pracovníkovi obsluhující měřicí stroj, jeho zkušenostech, vědomostech a znalosti problematiky fungování soukolí. Některé úchyly naměřené mimo toleranci nemají významný negativní vliv na funkci ozubených kol a lze je tolerovat.

Pracovník obsluhující měřicí stroj proto musí u každého měření individuálně rozhodovat o uvolnění či zastavení výroby.



Obr. 44 Protokol o měření parametrů ozubení

Chyby lze díky grafickému znázornění vyhodnotit okamžitě i bez porovnání naměřených hodnot s tolerancemi (obr. 45). Křivka má nepravidelný tvar, nebo její tvar neodpovídá běžnému tvaru u dobře vyrobených kusů.



Obr. 45 Křivky z protokolu o měření parametrů ozubení zobrazující vady profilu

Pro potřeby bakalářské práce bylo na strojích Klingelnberg naměřeno celkem šest ozubených kol, všechna určená pro použití v převodovkách MQ200. Dva pastorky používané v šestistupňové převodovce, dva pastorky používané v pětistupňové převodovce a dvě ozubená kola šestého převodu. Naměřené hodnoty (v mikrometrech) jsou zaznamenány v následujících tabulkách.

Profil														
		zub												
	střední hodnota	13	9	5	1a	1m	1f	1f	1m	1a	5	9	13	střední hodnota
Var	9													17
fH α	-7	-1	-6	-10	-16	-10	-4	1	6	8	-7	-3	10	2
F α	11	8	10	13	19	14	13	7	10	11	13	12	15	13
ff α	4	3	3	4	4	5	9	4	3	6	3	3	3	3
C α	12	12	12	12	5	11	11	8	13	10	14	14	15	14
Sklon														
Var	9													7
fH β	-19	-15	-24	-19	-24	-17	-20	-29	-31	-39	-24	-30	-28	-28
F β	15	13	17	15	17	13	20	14	11	17	7	11	9	10
ff β	3	3	3	3	4	2	4	3	3	3	3	4	4	4
c β	9	10	9	10	9	8	5	5	9	8	5	9	8	8

tab. 2 Naměřené hodnoty I.O. ozubeného kola pastorku pětistupňové převodovky

Profil														
		zub												
	střední hodnota	13	9	5	1a	1m	1f	1f	1m	1a	5	9	13	střední hodnota
Var	58													58
fH α	-5	-25	24	14	-31	-34	-45	-35	-27	-15	0	31	2	2
F α	25	27	24	12	33	38	48	35	31	21	12	34	7	21
ff α	5	4	4	7	3	5	3	2	5	7	5	10	5	6
C α	12	14	13	8	9	11	14	11	13	13	13	14	10	13
Sklon														
Var	136													89
fH β	10	79	4	-57	-1	15	36	35	41	34	-47	-48	39	-4
F β	33	59	15	44	5	13	24	35	44	41	23	29	51	34
ff β	3	3	4	2	3	1	7	6	2	3	4	4	2	3
c β	12	11	18	13	9	6	4	11	9	11	6	-1	1	4

tab. 3 Naměřené hodnoty N.I.O. ozubeného kola pastorku pětistupňové převodovky

Profil														
		zub												
	střední hodnota	13	9	5	1a	1m	1f	1f	1m	1a	5	9	13	střední hodnota
Var	5													0
fH α	-2	1	-4	1	5	-4	-5	0	-4	-5	-4	-4	-4	-4
F α	4	3	4	4	6	4	5	3	5	5	5	5	5	5
ff α	2	2	2	2	3	2	2	3	3	4	2	3	2	3
C α	2	1	3	1	2	3	3	2	1	2	3	1	3	2
C $\alpha\alpha$	-27	-28	-25	-29	-30	-25	-25	-8	-8	-9	-7	-7	-8	-8
ff $\alpha\alpha$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sklon														
Var	2													4
fH β	14	14	14	14	14	12	18	-10	-14	-14	-12	-12	-11	-12
F β	10	10	11	8	12	10	4	5	3	2	3	4	5	4
ff β	4	3	3	3	4	5	4	2	3	2	2	2	4	3
c β	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	4

tab. 4 Naměřené hodnoty I.O. ozubeného kola pastorku šestistupňové převodovky

Profil														
		zub												
	střední hodnota	13	9	5	1a	1m	1f	1f	1m	1a	5	9	13	střední hodnota
Var	4													4
fH α	0	2	1	-2	5	0	-4	5	-1	-5	-5	-2	-1	-2
F α	3	3	2	3	5	2	4	5	2	5	5	3	2	3
ff α	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2
C α	3	3	3	3	3	3	4	3	3	2	3	3	3	3
C $\alpha\alpha$	-29	-28	-29	-28	-33	-29	-25	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
ff $\alpha\alpha$	2	2	2	2	2	2	2	1	0	4	1	1	1	1
Sklon														
Var	9													8
fH β	15	10	15	19	15	16	21	-10	-18	-19	-10	-12	-17	-14
F β	4	7	3	4	3	3	8	5	3	4	6	4	3	4
ff β	2	2	2	2	2	2	2	1	2	3	1	2	1	2
c β	5	4	5	4	5	6	6	4	3	3	5	3	4	4

tab. 5 Naměřené hodnoty N.I.O. ozubeného kola pastorku šestistupňové převodovky

Profil														
		zub												
	střední hodnota	26	16	9	1a	1m	1f	1f	1m	1a	9	16	26	střední hodnota
Var	2													5
fH α	-2	-1	-3	-3	7	-1	8	5	-1	-8	-4	-6	-2	-3
F α	3	2	3	3	7	3	7	6	3	7	5	6	2	4
ff α	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2
C α	3	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2
C $\alpha\alpha$	-20	-18	-19	-21	-20	-20	-20	-21	-19	-19	-19	-18	-19	-19
ff $\alpha\alpha$	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	1	1	2	2
Sklon														
Var	3													3
fH β	-8	-10	-9	-7	-13	-7	4	13	2	-2	4	2	1	2
F β	8	8	8	7	12	7	4	11	3	2	4	3	2	3
ff β	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2
c β	4	4	4	4	4	5	5	6	5	5	5	7	6	6

tab. 6 Naměřené hodnoty I.O. ozubeného kola šestého převodového stupně

Profil														
		zub												
	střední hodnota	26	16	9	1a	1m	1f	1f	1m	1a	9	16	26	střední hodnota
Var	2													4
fH α	-2	-3	-3	-2	9	-1	-10	-6	-3	-6	-3	-7	-6	-5
F α	4	4	4	3	9	3	11	17	3	11	4	7	6	5
ff α	2	2	2	2	1	2	2	9	2	6	2	2	2	2
C α	2	2	2	2	1	2	2	12	3	-5	2	2	3	3
C $\alpha\alpha$	-19	-19	-19	-19	-20	-19	-19	-11	-18	-19	-17	-17	-16	-17
ff $\alpha\alpha$	1	1	1	1	1	0	1	2	3	1	2	1	1	2
Sklon														
Var	18													17
fH β	-5	4	-6	-14	-11	-4	12	14	5	9	-6	-3	11	2
F β	7	5	6	13	10	4	11	14	7	23	6	4	11	7
ff β	1	1	1	1	4	1	1	2	4	16	1	1	1	2
c β	6	6	6	6	5	6	6	6	6	8	4	4	4	5

tab. 7 Naměřené hodnoty N.I.O. ozubeného kola šestého převodového stupně

Tyto moderní stroje jsou schopny měřit také topografii zubů. Naměřená data se zobrazí ve 3D a vznikne tak zvětšený obraz boku zubu názorně a přesně zobrazující jeho tvar.

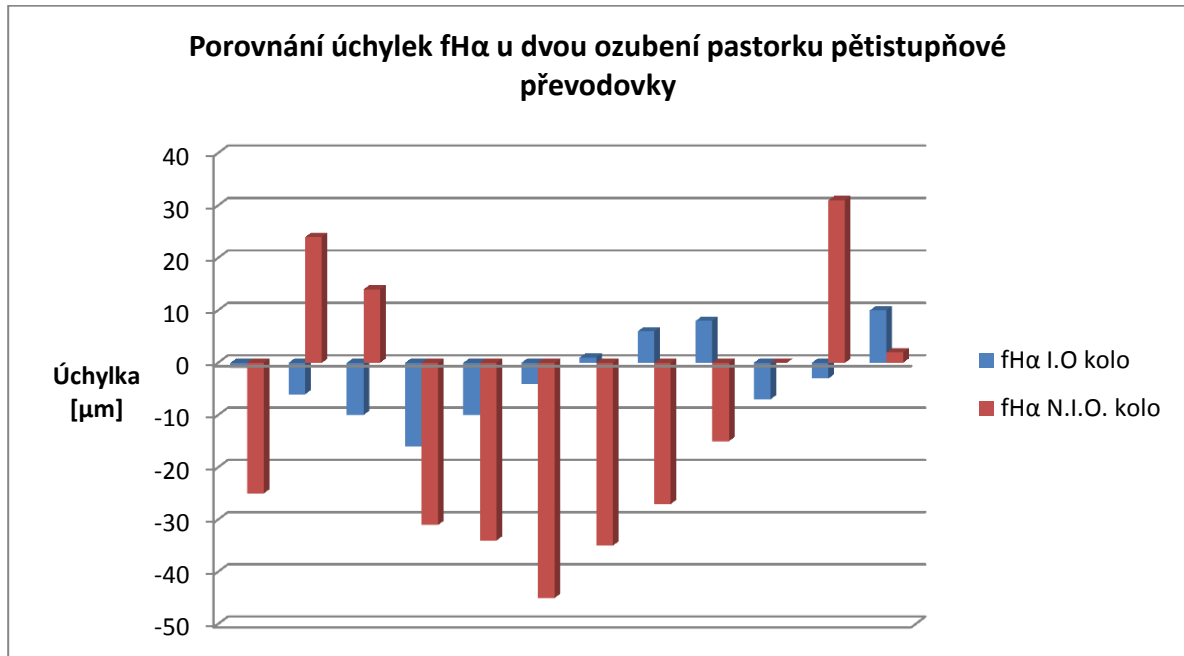
Kontrola správné funkce a hlučnosti převodovky probíhá buďto na speciálních měřících stavech, nebo při jízdách zkouškách u hotových automobilů na zkušebním okruhu uvnitř závodu firmy Škoda.

Vzhledem k sériovému charakteru výroby v závodě Škoda Auto je počet nevyhovujících vyrobených kusů velmi malý (méně než jedno procento) a nejčastěji souvisí s vadou nástroje nebo chybou lidského faktoru. Mezi nejčastější závady patří:

- Poškození při manipulaci – poškození funkční části kola při neopatrné mezioperační manipulaci.
- Špatně provedená operace – nejčastější příčina vyrobení vadné součásti, způsobená především vadou nástroje, jeho špatným nastavením, špatným naostřením či výrazným opotřebením.
- Vynechaná operace – pracovník umístí nehotovou součást k dokončeným výrobkům místo do stroje.
- Házení ozubeného kola – excentricita či ovalita způsobená špatným rovnáním po kalení.
- Otřep do činné části plochy – závada vznikající při dokončovacích operacích, odhalí se díky výstupkům na okrajích křivky sklonu zubu v protokolu o měření parametrů ozubení.
- Špatné opracování díry ozubeného kola – způsobí, že při každé další operaci dojde k nepřesnému upnutí a tím pádem i k nepřesnému obrobení.
- Závada na povrchu ozubeného kola – velmi nahodilá závada, způsobuje buzení vibrací a zvýšení hlučnosti převodovky.
- Nečistoty na povrchu ozubeného kola.

Pokud dojde při měření k odhalení špatné součásti, pracovníci používají metodu polovičního intervalu. Interval všech vyrobených kol mezi I.O. a N.I.O. kolem se rozdělí na půl a kolo vyrobené právě v půlce intervalu se změří. Je-li kolo změřeno a vyhodnoceno jako I.O., interval se opět rozdělí na půl (z původní velikosti intervalu tedy na čtvrtinu) a kolo vyrobené v dané půlce intervalu se opět změří. Tento postup se opakuje do té doby, dokud měřené kolo není N.I.O. Po změření N.I.O. kola získáme interval vyrobených kol, které jsou s nejvyšší pravděpodobností vyrobeny s určitou vadou. Vyrobené kusy

vyhodnocené jako N.I.O., které lze opravit, se opraví, a pokud je nelze opravit, vyřadí se buďto jako zmetky, nebo se v případě vady nemající významný vliv na fungování převodovky uvolní dále do výroby.



Graf 2: Porovnání úchylek fH α

Ke snížení zmetkovitosti a zvýšení produktivity se zavedlo mnoho opatření, např. jsou ve výrobě televizory zobrazující výsledky měření ozubených kol vyrobených jednotlivými stroji. Pokud se na televizoru objeví označení stroje zeleně, pracovník ve výrobě okamžitě ví, že může začít na daném stroji vyrábět a když se na televizoru objeví označení stroje červeně, musí pracovník počkat, dokud nedojde k odhalení příčiny vzniku závady a jejímu odstranění. Tato signalizace usnadňuje komunikaci mezi výrobou a měrovým střediskem a snižuje nevýrobní časy.

Vzhledem k velmi nízké zmetkovitosti a již zavedeným inovacím je složité hledat další vylepšení, která by zvýšila kvalitu produkce. Vždy je nutné řešit nejčtenější příčiny způsobující závady, kterými jsou v tomto případě chyby lidského faktoru (poškození při mezioperační manipulaci a vynechání operace následkem špatného umístění součásti) a závady způsobené nástrojem (nový nebo opotřebovaný nástroj).

Chybám lidského faktoru se dá zabránit pravidelným proškolením personálu a také úpravami pracoviště. Jednou z úprav může být použití gumových či jiných měkkých

materiálů na pracovištích (podlahy, desky pracovních stolů, různé sloupky, rohy a ostré hrany), které zabrání poškození součástí při pádu či nárazu součásti během manipulace. Další úprava pracoviště spočívá v jednoduché změně konstrukce výrobního stroje. Některé stroje mají nakládání neopracovaných a vykládání dokončených součástí blízko sebe, a proto může dojít k špatnému umístění součásti do, nebo ze stroje. U takovýchto strojů je potřeba oddělit místa nakládání a vykládání přepážkou, což zabrání záměně, protože pracovník musí vždy obejít přepážku, aby se dostal z jednoho místa na druhé.

Řešením obou problémů by bylo přejít na tzv. Lights-Out Manufacturing, což je druh výroby bez přítomnosti lidských pracovníků, využívající CNC obráběcí stroje a robotické manipulátory. Většinou se tento model využívá jen částečně, ale pracovníci zajišťují pouze doplňování materiálu, provozních kapalin a také konečnou kontrolu. Tento typ výroby používá např. firma Philips v jedné ze svých Holandských továren, kde pracuje 128 strojů a 9 pracovníků kontrolujících kvalitu výroby. Tento způsob výroby se od počátku tisíciletí postupně rozšiřuje v továrnách po celém světě a je jisté, že tento trend bude pokračovat i nadále. [48, 49]

Závady způsobené nástrojem by bylo možné snížit několika způsoby, např. zavedením plovoucího intervalu měření nástroje na začátku jeho životnosti (po orovnění) a po jeho výrazném opotřebení (před orovnáváním). Právě tehdy je výskyt závad způsobených nástrojem vzhledem k nutnosti nastavit stroj a seřídít nástroj nejčastější. Problémem je, že jedno měření trvá přibližně patnáct minut, a aby se tato metoda mohla zavést, muselo by se měření znatelně urychlit, což není na současných strojích možné.

Jako další možnost se nabízí častější orovnávaní brousicích nástrojů. Nástroje by tedy vyráběli přesněji, nedocházelo by k závadám způsobeným opotřebovaným nástrojem, ale došlo by ke zvýšení nevýrobních časů.

8. Závěr

V této práci je popsána geometrie a druhy ozubení, detailně jsou popsány jednotlivé technologie výroby ozubení, dokončovací technologie, tepelné a chemicko-tepelné zpracování a také druhy poškození ozubených kol a jejich příčiny. Uvedeny jsou taktéž moderní technologie 3D tisku, využívající se k výrobě ozubení a představující budoucnost tohoto odvětví.

Praktická část se zabývá metodami kontroly ozubení v Mladoboleslavském závodě firmy Škoda Auto a.s. Popsány jsou všechny způsoby měření využívané v praxi během výroby i u dokončených součástí.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvýznamnější příčinou vyrobení nevyhovující součásti je porucha způsobená nástrojem při frézování či broušení, což je v souladu se zkušenostmi pracovníků měřicího střediska.

Vzhledem k tomu je v této práci uvedeno několik návrhů, jak by bylo možné dané problémy řešit. Častější orovnávaní nástrojů zajistí přesnější výrobu bez rizika používání opotřebeného nástroje. Plovoucí interval měření zajistí správnou výrobu při použití nových nástrojů, nebo u nástrojů blížící se ke kritické hranici opotřebení.

Pro eliminaci poruch vzniklých chybou lidského faktoru je zapotřebí upravit pracoviště tak, aby co nejméně docházelo poškození součástí při mezioperační manipulaci. Dalším návrhem je upravit stroje, u kterých se součásti nakládají a vykládají blízko sebe přepážkou, díky které nebude docházet ke špatnému umístění součásti a tím pádem ani k vynechání dané operace. Chyby lidského faktoru lze vyřešit výrobou typu Lights-Out Manufacturing, tedy výrobou pomocí CNC strojů a robotických manipulátorů bez přítomnosti lidských pracovníků. Tento způsob výroby se již ve světě používá a po zavedení výrobních CNC strojů se jedná o další stupeň automatizace, ke kterému se všeobecně ve strojírenství směřuje.

Použité zdroje a literatura

- [1] <http://en.wikipedia.org/>, dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Antikythera_mechanism
- [2] BURROWS M., SUTTON G.: Interacting Gears Synchronize Propulsive Leg Movements in a Jumping Insect, dostupné z <http://www.slas.ac.cn/upload/20130916-4.pdf>
- [3] HOSNEDL S., KRÁTKÝ J.: Příručka strojírenského inženýra. ISBN 80-722-6202
- [6] ŘASA, J., GABRIEL, V.: Strojírenská technologie 3, PRAHA 2000. ISBN 80-7183-207-3
- [7] NĚMEC D.: Strojírenská technologie 3, PRAHA 1979.
- [8] ROEBUCK, K., 3D Printing, Lexington, 2012, ISBN 9781743042700
- [9] MORAVEC, V.: Konstrukce strojů a zařízení II: čelní ozubená kola, teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola. Ostrava 2001. ISBN 80-722-5051-5.
- [10] Gear failures, Machine Design, 1967, dostupné z <http://www.xtek.com/pdf/wp-gear-failures.pdf>
- [11] www.techmania.cz dostupné z http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=178
- [12] <http://sk.wikipedia.org/> dostupné z http://sk.wikipedia.org/wiki/Evolventa#mediaviewer/File:Involute_of_circle.png
- [13] www.mitcalc.com dostupné z http://www.mitcalc.com/cz/pr_spurgear.htm
- [14] <http://www.me.metu.edu.tr/> dostupné z http://www.me.metu.edu.tr/courses/me114/Lectures/gear_cam_files/mating_gear.gif
- [15] <http://www.roymech.co.uk/> dostupné z http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Drive/Gears.html
- [16] Měření ozubených kol, Střední škola strojírenská a elektrotechnická, Brno, Trnkova 113: dostupné z http://www.ssebrno.cz/files/ovmt/ozubena_kola.pdf
- [17] <http://www.ozubeni.cz/>, dostupné z http://www.ozubeni.cz/ozubeni/ostatni/f3_6b_d2.gif
- [18] www.uvp3d.cz dostupné z http://uvp3d.cz/drtic/wpcontent/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST48_004.jpg
- [19] firmy.mmspektrum.com dostupné z <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-cast-5-rezne-nastroje.html>
- [20] <http://www.tumlikovo.cz/> dostupné z <http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/#more-2101>
- [21] <http://www.wzl.rwth-aachen.de/> dostupné z http://www.wzl.rwth-aachen.de/_C1256E970034898A.nsf/html/en_c4144f72fa8ee049c1256f390032e1f0.htm
- [22] <http://demler.en.alibaba.com/> dostupné z http://demler.en.alibaba.com/productshowimg/1047485051-219110867/Gear_shaper_cutters.html
- [23] www.monometal.com dostupné z http://www.monometal.com/_thumb/media/monometal/gallery/10136_protahovani1.jpg?size=614x230&crop

- [24] www.wikipedia.org, dostupné z http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_sintering_principle.png
- [25] www.solidconcepts.com, dostupné z <https://www.solidconcepts.com/resources/galleries/direct-metal-laser-sintering-dmls-gallery/>
- [26] en.wikipedia.org, dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling#mediaviewer/File:FDM_by_Zur_eks.png
- [27] www.thingiverse.com, dostupné z <http://www.thingiverse.com/thing:264769>
- [28] www.sampingranaggi.com dostupné z <http://www.sampingranaggi.com/products/cylindrical-gears/internal-gear-grinding/12953.html>
- [29] www.mmsonline.com dostupné z <http://www.mmsonline.com/products/grinding-process-for-large-gear-profiles>
- [30] www.geartechnology.com dostupné z <http://www.geartechnology.com/alerts/0115a/luren.jpg>
- [31] www.cvmpp.com dostupné z <http://www.cvmpp.com/machinery.html>
- [32] www.directindustry.com dostupné z http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/lapping-machine-9207-6050463.jpg
- [33] www.kacsajoszef.hu dostupné z <http://www.kacsajoszef.hu/szerviz/>
- [34] www.machinery.co.uk dostupné z <http://www.machinery.co.uk/machinery-news/sicmat-num-gear-honing-gear-shaving-gear-grinding/43980/>
- [35] <http://www.thesamba.com/>, dostupné z <http://www.thesamba.com/vw/forum/viewtopic.php?t=396263>
- [36] <http://rennlist.com/>, dostupné z <http://rennlist.com/forums/993-forum/675004-ring-and-pinion-gear-wear-ugh.html>
- [37] <http://machinedesign.com/>, dostupné z <http://machinedesign.com/mechanical-drives/how-install-bevel-gears-peak-performance-assemble-spur-and-helical-types-different>
- [38] <http://www.nptel.ac.in/>, dostupné z <http://www.nptel.ac.in/courses/112102015/11>
- [39] <http://www.novexa.com/>, dostupné z <http://www.novexa.com/en/engrenage-defaults.php>
- [40] <http://velocette-mac.co.uk/>, dostupné z <http://velocette-mac.co.uk/velo-gearbox.php>
- [41] <http://forums.clubrsx.com/>, dostupné z <http://forums.clubrsx.com/showthread.php?t=989650>
- [42] <http://www.novexa.com/>, dostupné z <http://www.novexa.com/images/galerie/gd/pitting2.jpg>
- [43] <http://mypeoplepc.com/>, dostupné z <http://mypeoplepc.com/members/tleone/gears/id6.html>
- [44] <http://www.tribology.co.uk/>, dostupné z <http://www.tribology.co.uk/services/investigate/g01-0.htm>

- [45] <http://en.wikipedia.org/>, dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Tooth_interior_fatigue_fracture
- [46] <http://www.springer.com/>, dostupné z http://static-content.springer.com/image/chp%3A10.1007%2F978-3-658-04451-0_4/MediaObjects/309261_1_De_4_Fig4_HTML.jpg
- [47] <http://www.hexagonmetrology.co.uk/>, dostupné z <http://www.hexagonmetrology.co.uk/media/images/CMM-Gear-Inspection.jpg>
- [48] <http://en.wikipedia.org/>, dostupné z [http://en.wikipedia.org/wiki/Lights_out_\(manufacturing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lights_out_(manufacturing))
- [49] <http://www.economist.com/>, dostupné z <http://www.economist.com/node/21552897>

Seznam příloh:

Příloha č. 1 – Protokol o měření ozubeného kola 311 205 EH

Příloha č. 3 – Protokol o měření ozubeného kola 311 205 EH

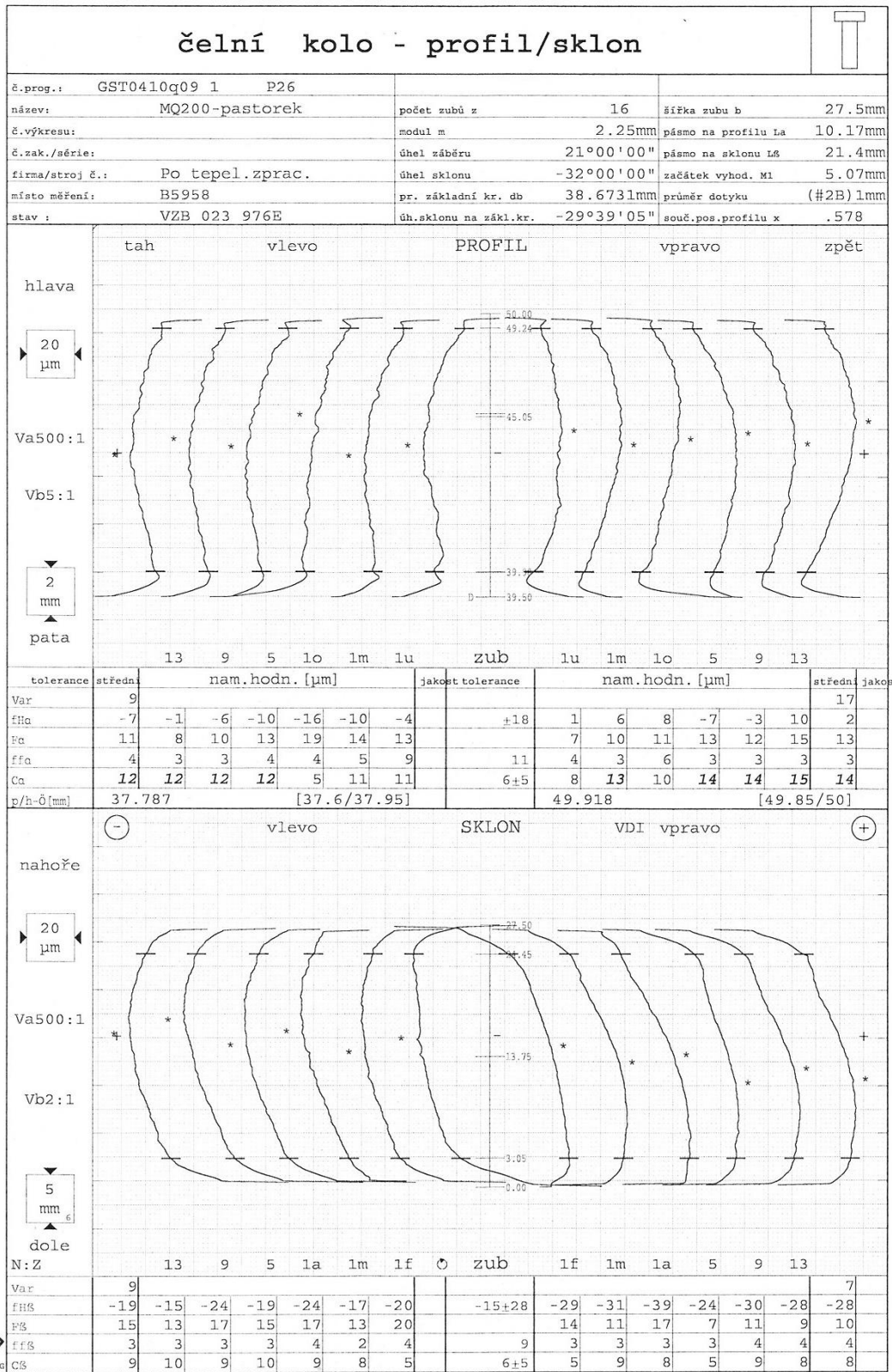
Příloha č. 3 – Protokol o měření ozubeného kola 311 165 LH

Příloha č. 4 – Protokol o měření ozubeného kola 311 165 LH

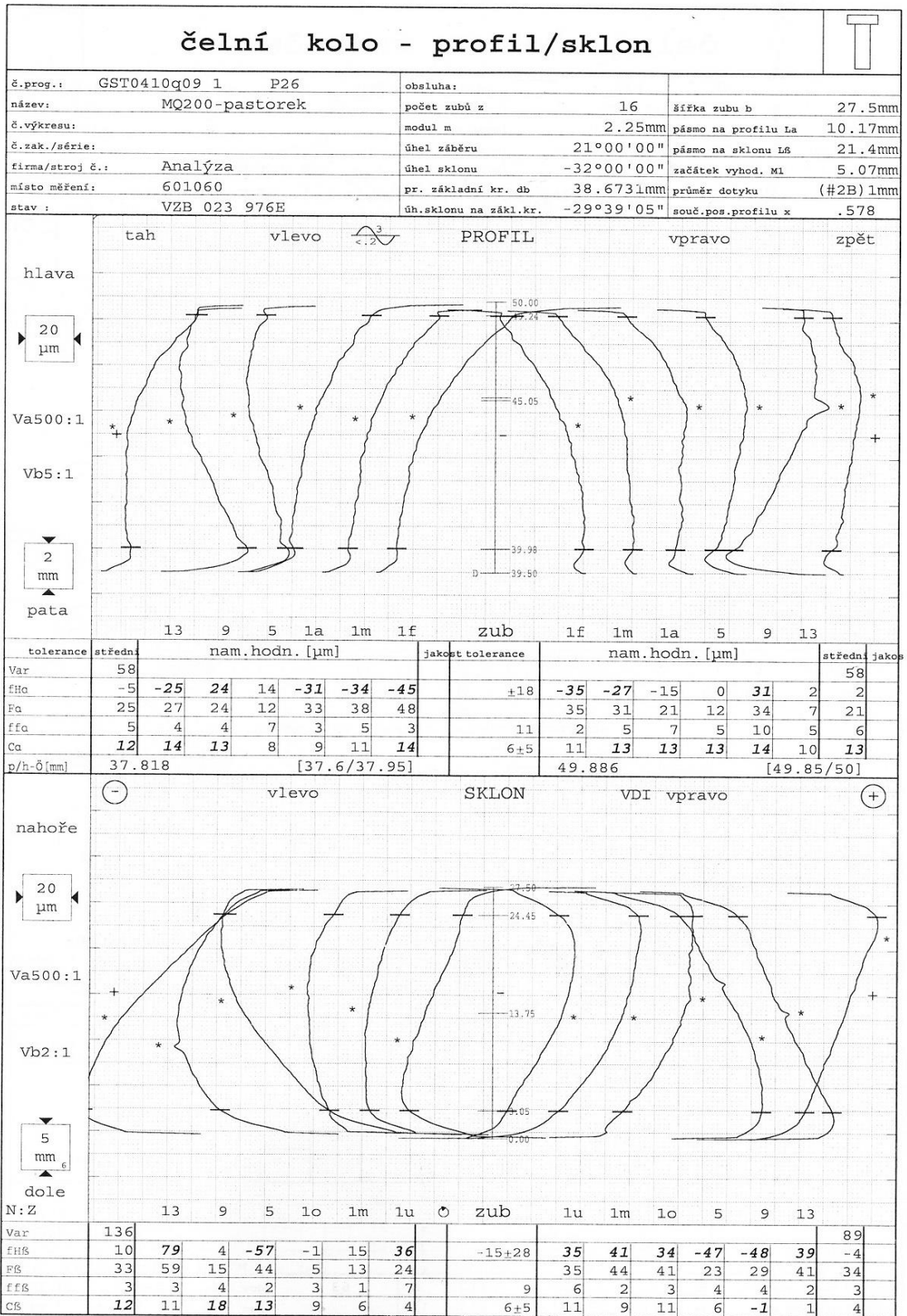
Příloha č. 5 – Protokol o měření ozubeného kola 311 205 FH

Příloha č. 6 – Protokol o měření ozubeného kola 311 205 FH

Příloha č. 1



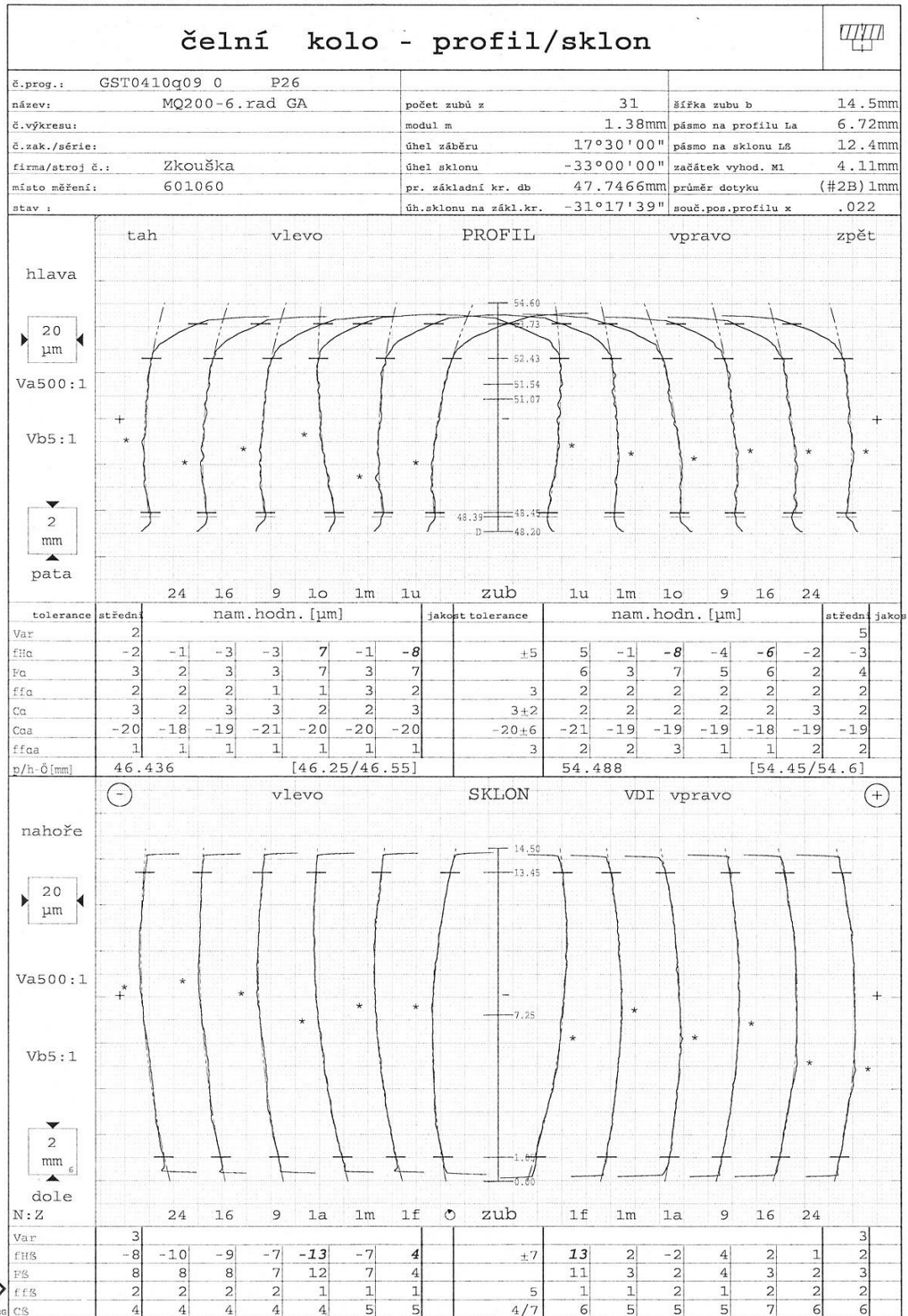
Příloha č. 2

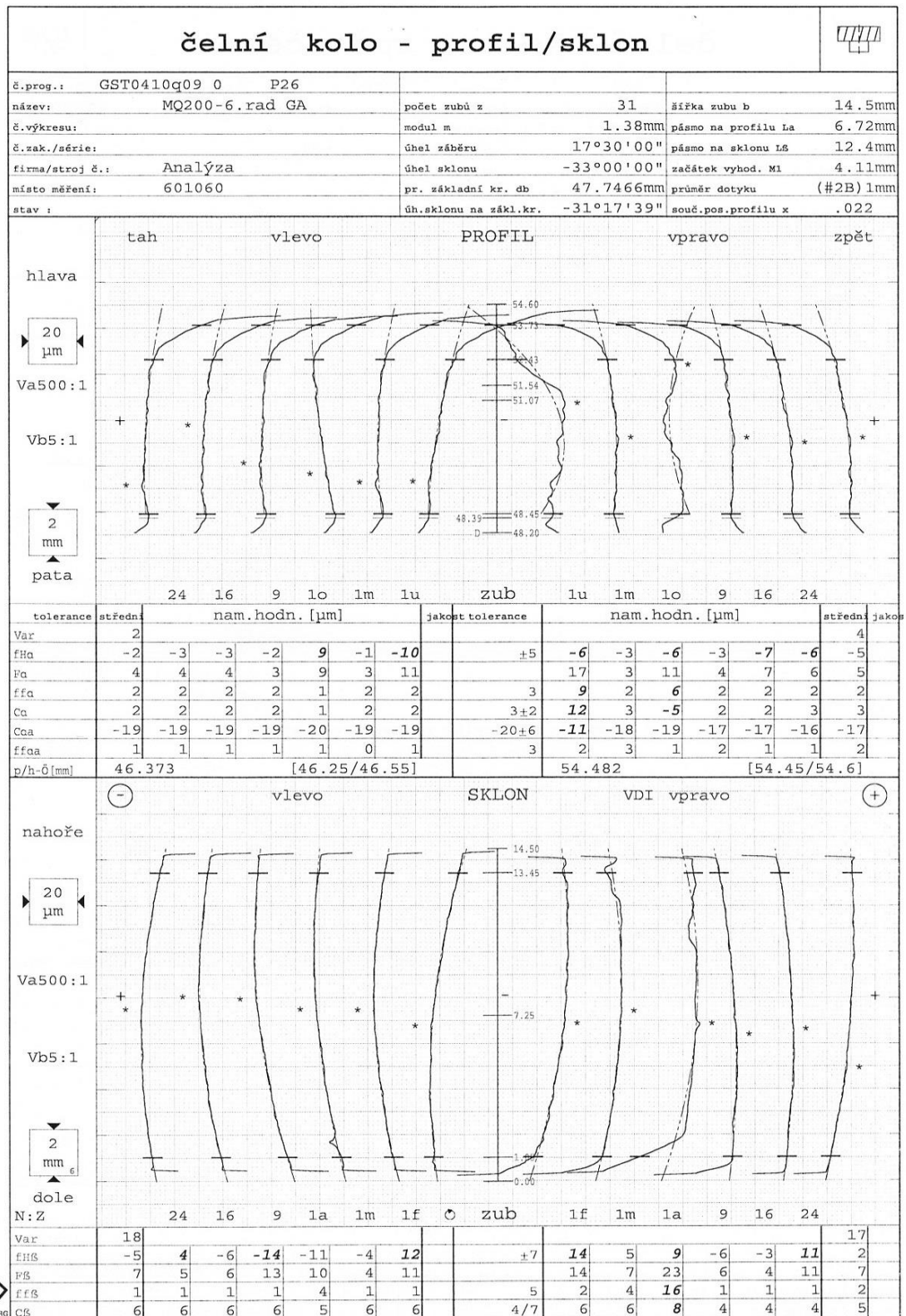


Copyright (c) Klingelberg GmbH



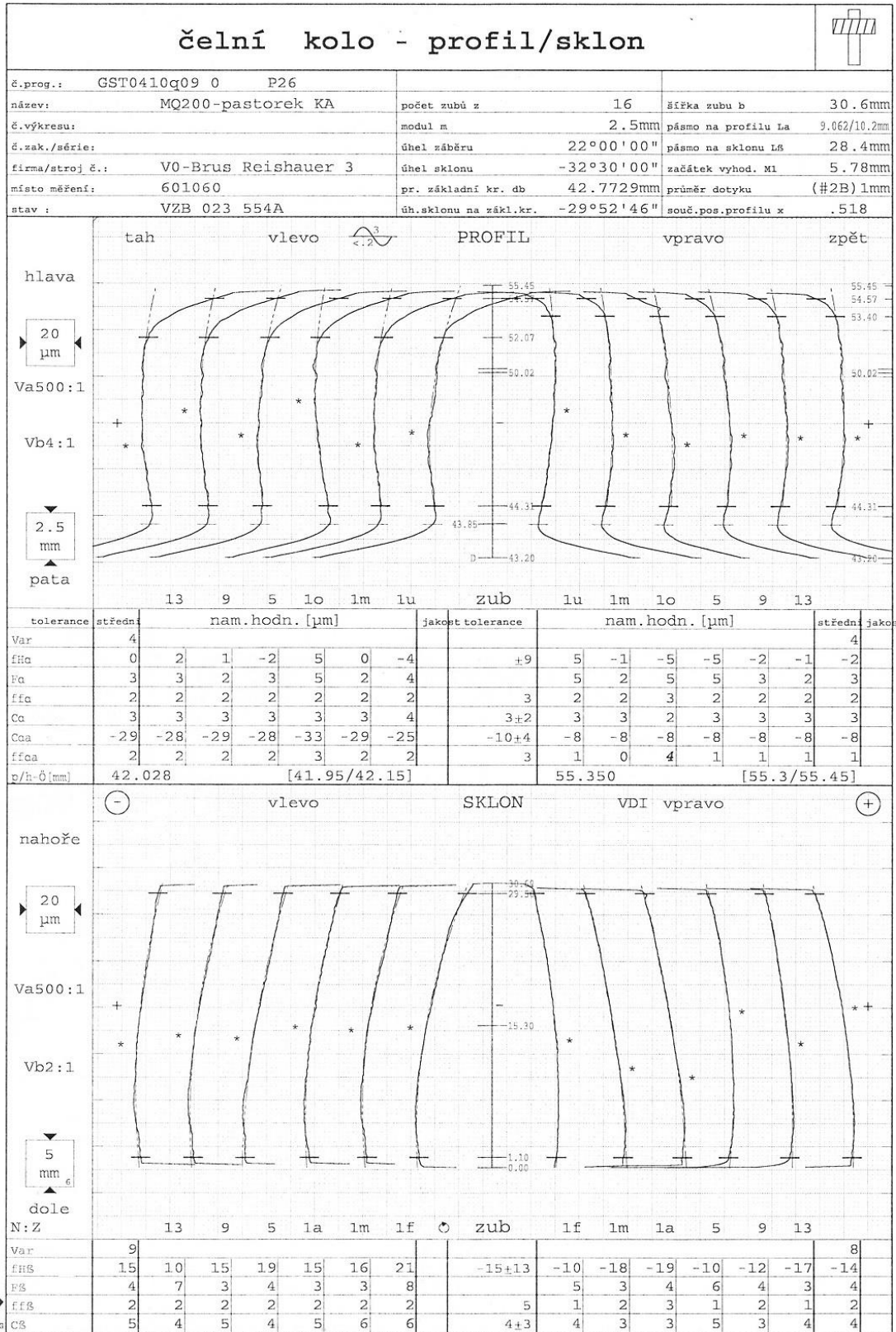
KLINGELBERG

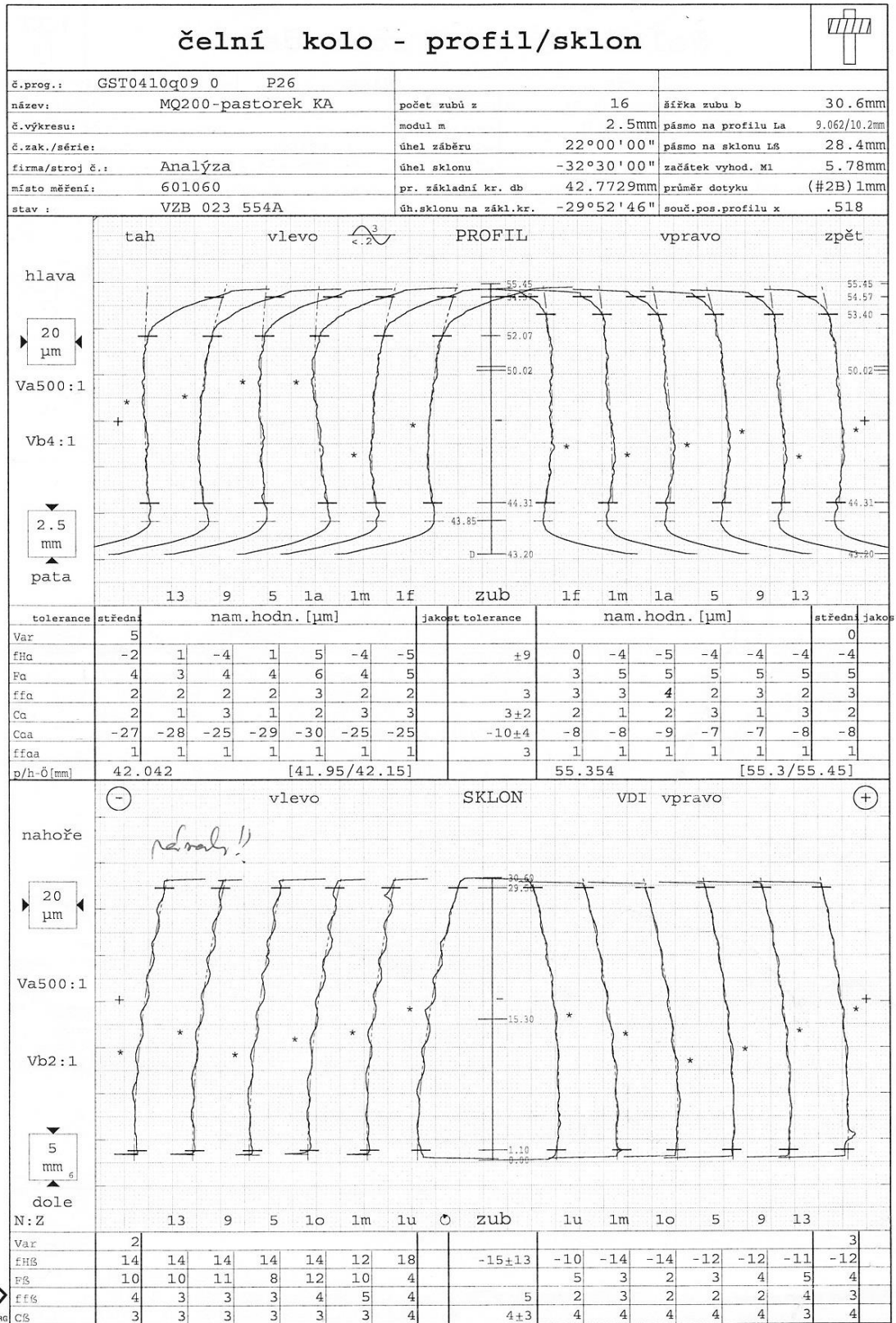




Copyright (c) Klingelberg GmbH







Copyright (c) Klingelberg GmbH



KLINGELBERG