VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

DESKRIPCE ODVALOVACÍCH OZUBÁRENSKÝCH STROJŮ

DESCRIPTION OF GEAR – PRODUCING MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE **PETR JELÍNEK**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Ing. PETR BLECHA, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2008

ABSTRAKT

Bakalářská práce shrnuje poznatky z oblasti ozubárenských strojů se zaměřením na odvalovací ozubárenské stroje. Popisuje jednotlivé druhy strojů na výrobu ozubení odvalovacím způsobem a jejich princip. Hlavním cílem bakalářské práce je učinit průřez danou problematikou a shrnout jak klasické, tak moderní odvalovací ozubárenské stroje a směry ve vývoji těchto strojů.

Klíčová slova

Výroba ozubení, odvalování, ozubené kolo, obrážecí stroje, odvalovací frézka, brousicí stroje, ševingovací stroje, honovací stroje, lapovací stroje, odvalovací frézování, obrážení, broušení, ševingování, honování, lapování.

ABSTRACT

The bachelor´s thesis summarises knowledge from area of gear producing machines aimed on gear generating machines. It describes types and principles of gear generating machines. The main target of the thesis is to make an overview above this problems and summarize the classic and modern ways in the development of gear generating machines.

Key words

Gear – making, generating, gear, shaping machines, hobbing machine, grinding machines, shaving machines, honing machines, lapping machines, hobbing, shaping, grinding, shaving, honing, lapping.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JELÍNEK, P., *Deskripce odvalovacích ozubárenských strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Deskripce nástrojových soustav pro obrábění nerotačních součástí vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.5.2008 …….

Petr Jelínek

Poděkování

Za podporu, obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Blechovi, Ph.D.

OBSAH

ABSTRAKT
Prohlášení
Poděkování
OBSAH 7
ÚVOD 8
1. Z historie až po současnost 9
1.1 Současné ozubárenské stroje 9
1.2 Vývojové trendy ve stavbě obráběcích strojů na výrobu ozubení 10
2. Rozdělení strojů podle způsobů výroby ozubených kol 11
3. Stroje pracující odvalovacím způsobem 13
3.1 Obrážecí odvalovací stroje 14
3.1.1 Obrážečky odvalovací pro obrážení čelních ozubených kol 14
3.1.2 Obrážečky odvalovací pro obrážení kuželových ozubených kol 18
3.2 Frézovací odvalovací stroje 18
3.2.1 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu čelních ozubených kol 18
3.2.2 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu kuželových kol 23
3.2.3 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu šnekových kol a šneků 28
3.3 Brousicí odvalovací stroje 29
3.4 Ševingovací stroje 32
3.5 Honovací stroje 34
3.6 Lapovací stroje 35
ZÁVĚR 37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 38

ÚVOD

Obrábění ozubených kol a ozubení patří mezi velmi významné a také náročné technologie výroby. Ozubené kolo se stalo nenahraditelnou součástí snad ve všech oblastech strojírenství a i průmyslu obecně. S ozubenými koly se člověk setkává denně, aniž si to častokrát uvědomuje. Jsou součástí jak převodovek dopravních prostředků nebo kuchyňských strojů, tak i různých převodů v hodinkách, hodinách nebo hračkách pro děti.

Při výrobě ozubených kol je kladen velký důraz především na geometrickou přesnost obráběných ploch, tvrdost a pevnost materiálu po tepelném zpracování a na široký sortiment ozubených kol (různé počty zubů, moduly, tvary zubů atd.). Stroje na výrobu ozubení musí být schopny všechny tyto požadavky splnit.

Díky velkému využití ozubených kol jsou stroje pro výrobu ozubení jedny z nejdůležitějších a nejvýznamnějších v oblasti obráběcích strojů. Složitost technologie a význam výroby ozubených kol byly příčinou vzniku velkého množství různých druhů výroby ozubení. Tyto aspekty zapříčinily také jedinečnost strojů používaných pro tento druh obrábění. Stroje byly zařazeny do skupiny speciálních obráběcích strojů. Dokonce i v dnešní době, kdy je snaha vytvářet co nejuniverzálnější obráběcí stroje, si uchovaly ozubárenské stroje svoji jedinečnost a výjimečnost.

V důsledku mnohaletého výzkumu a vývoje dokáží moderní ozubárenské stroje vytvářet velmi přesné výrobky s vysokou produktivitou práce. Nejvýznamnější skupinou strojů v oblasti výroby ozubení jsou ozubárenské stroje pracující odvalovacím způsobem. Odvalovací způsob obrábění je nejpřesnějším způsobem výroby ozubených kol, kdy obrobek je vytvářen stejným způsobem, jakým bude po vlastní výrobě sám pracovat, a tedy odvalováním.

Velkým milníkem ve výrobě ozubení se stal vývoj číslicově řízené techniky a její aplikace na ozubárenské stroje. Číslicově řízené stroje pomocí počítače, také nazývané CNC stroje, dokázaly značně zefektivnit výrobu a dnes jsou nejvyužívanějšími stroji pro výrobu ozubení.



Obr. 1 Ukázka stroje na výrobu ozubení a jeho pracovního prostoru [14]

1 Z HISTORIE AŽ PO SOUČASNOST

V souvislosti se stroji na výrobu ozubení se nabízí otázky: Proč vlastně vznikla ozubená kola? A nejsou převody ozubenými koly jen doznívajícími přežitky minulosti?

Jednou z možných odpovědí na otázku vzniku ozubených kol je letmý pohled do minulosti. Z pohledu vývoje nejprve existovalo kolo bez ozubení, které umožňovalo realizovat pohyb spojený s valivými odpory – na rozdíl od pracnějšího překonávání třecí síly. Následné použití dvojice kol umožnilo přenos pohybu mezi dvěma osami, což se stalo základem převodových mechanismů. Převodové mechanismy s hladkými koly však nezajišťují stálý převodový poměr. A proto, s ohledem na rozvoj astronomie a posléze měření času (hodinářství), vzniká potřeba dodržení konstantního převodového poměru, který lze zajistit jen ozubenými koly. Důležitým momentem pro zajištění jejich výroby byl pilník. Jeho vznik se datuje do období 200 let př. n. l. Dvoutisíciletá tradice používání ozubení tak má značnou vypovídací schopnost. S přihlédnutím k podílu ČR na vývoji a zajišťování výroby ozubení nelze opomenout především jména prof. Šejvla a ing. Svobody. [4]

Prof. Šejvl u příležitosti svých 75. narozenin v roce 1986 napsal: „*Při výuce mechaniky jsem v oblasti pohonných mechanismů nalezl nejlepší a užitečnou aplikaci statiky, kinematiky a dynamiky, a to pokud jde o závažnost a zajímavost teorií a jejich potřebné uplatnění v praxi. Společným jmenovatelem většiny je geometrie, která dnes vymírá a které se v odborných kruzích věnuje malá pozornost. Stroj, který je v podstatě pohonný mechanismus, nelze pojímat jako hetakombu (zde míněno nahromadění) cifer nebo jako dynamiku složitě a těžko zvládnutelně se chovajícího hmotného kontinua. Stroj, to jsou konkrétní geometrické útvary a jejich pohyby.“* [4]

Zdání, že elektrické pohony a řídicí systémy vytlačí klasické převody ozubenými koly, je skutečně pouze zdáním. Nejedná se jen o cenové relace pohonů, ale i o jejich vlastnosti postižitelné geometricky a mechanicky, tedy jejich přesnost, tuhost a životnost. Vhodná řešení mechanických převodů umožňují kinematickou vazbu nejen mezi rovnoběžnými a různoběžnými osami, ale i mezi osami mimoběžnými, čehož je důkazem klasická odvalovací frézka na ozubení. Stálým spotřebitelem ozubených kol bude ještě po řadu let automobilový průmysl. Koncepční provedení automobilu využívá nejen čelních ozubených kol s přímými a šikmými zuby, ale i se zuby kuželovými, a to jak v kuželovém, tak i hypoidním uspořádání soukolí. [4]

V souvislosti se stále se zvyšujícími požadavky na přesnost a produktivitu výroby ozubení se musely vyvíjet i stroje. Klasické konvenční stroje již nemohly uspokojit potřeby trhu a tak za přispění velkého rozmachu číslicové techniky začaly vznikat první číslicově řízené stroje, které posunuly oblast výroby ozubení zcela do jiných rozměrů.

1.1 Současné ozubárenské stroje

Dnes se vyrábějí téměř výhradně číslicově řízené stroje pro výrobu ozubení. Číslicové řízení pomocí počítače se často označuje zkratkou CNC – Computer Numerical Control.

CNC obráběcí stroj je tedy obráběcí stroj, který je numericky řízen a konstrukčně uzpůsoben tak, aby pracoval v automatickém cyklu a měl automatickou výměnu nástrojů. [9]

Technika CNC jednoznačně zjednodušila kinematický řetězec konvenčních strojů na ozubení. Využití CNC strojů při výrobě ozubených kol má výhody oproti konvenčním strojům především v pružnosti při změně výroby, hospodárnosti při výrobě a to i při menších sériích a vysoké, trvalé přesnosti, kterou je možné opakovaně dosáhnout. [3]

Z nutné kinematické vazby pohybů mezi nástrojem a obrobkem u strojů na ozubení vyplývají následující dva požadavky na vazby posuvů. U odvalovacích frézovacích strojů musí být posuv vázán na otáčení stolu, u odvalovacích obrážecích strojů musí být posuv vázán na dvojzdvih nástroje. [3]

Kinematika pohonu CNC odvalovací frézky je výrazně zjednodušena. Všechny základní souřadnice pro docílení vázaného odvalovacího pohybu (B rotace nástroje, C otáčení obrobku, Z axiální posuv saní) mají své samostatné pohony (motory). [3]

Podle signálů z odměřovacích systémů rotace nástroje a posuvu saní řídí CNC systém otáčení stolu. Zjednodušení kinematiky má přínos nejen ve snížení mechanické složitosti těchto strojů, ale umožňuje zvýšit tuhost a přesnost, neboť vnitřní prostor rámu stroje nemusí obsahovat složité mechanismy. [3]

Konstrukce CNC strojů se vyznačuje vysokou tuhostí a přesností provedení, navrženými tak, aby docházelo k minimálnímu oteplování jednotlivých uzlů stroje (tzv. stabilizace teploty). Z důvodů hospodárného řezného režimu se užívají pohony s velkým regulačním rozsahem, nazývané servopohony, tzv. AC servopohony, a to jak pro pohon vřeten (rychlostní, popř. rychlostněpolohové servopohony), tak pro pohon posuvů (rychlostněpolohové servopohony). K dalšímu zhospodárnění a ke zvýšení výrobnosti se může používat tzv. adaptivní řízení obráběcího procesu. Jde o řídicí systémy, které zabezpečují v každém okamžiku obrábění automatikou volbu optimálních řezných podmínek. [9]

U číslicově řízených strojů je třeba velkou pozornost věnovat otázkám opotřebení. Vysoké odolnosti vůči opotřebení se dosáhne užitím valivých prvků ve vedení, případně obložením kluzného vedení umělou hmotou (tzv. Turcit) nebo hydrostatickým vedením. Vodicí plochy jsou alternativně kalené a broušené (případně zaškrabané) a měly by vhodnou konstrukcí zabezpečovat rychlou vyměnitelnost – např. profilové vedení. Pro zamezení nežádoucích pohybů po nastavení do určité přesné polohy se u některých strojů užívá zpevňovací zařízení, které v nastavené poloze zpevní pohyblivou část k vodicím plochám, čímž vzroste tuhost ve spojení mezi základem a pohyblivým uzlem. [9]

Charakteristickým znakem CNC strojů je zásobník nástrojů, který slouží pro výměnu nástrojů v automatickém cyklu podle sledu operací. Ten je umístěn buď přímo na stroji, nebo mimo něj. Stroje jsou uzpůsobeny pro automatický odvod třísek a některé i pro automatickou výměnu obrobků. [9]

1.2 Vývojové trendy ve stavbě obráběcích strojů na výrobu ozubení

U trendů v konstrukci a stavbě obráběcích strojů se jedná zejména o [10]:

- aplikaci HSC obrábění;
  HSC (High Speed Cutting) – vysokorychlostní obrábění
  - vysoká řezná rychlost (5 až 10krát vyšší než u konvenčního frézování)

- aplikaci HPC obrábění;
  HPC (High Performance Cutting) – vysoce výkonné obrábění
  - je to nový směr obrábění určen pro obrábění:
    - Al a slitiny Al
    - oceli s nízkou a střední pevností
    - oceli s vysokou pevností
    - kalené oceli do 70HRc
- aplikaci pětiosého obrábění;
- použití netradičních materiálů ve stavbě (plasty, beton apod.);
- snahu o standardizaci (normování) a modularitu (stavebnicovost);
- vysokou customizaci (individuální úpravu na míru zákazníka);
- spolehlivost vlastního obráběcího procesu;
- eliminaci tepelných zdrojů a teplotní stabilitu;
- obrábění typu vše na jednom stroji;
- rychlou manipulaci s obrobky a nástroji.

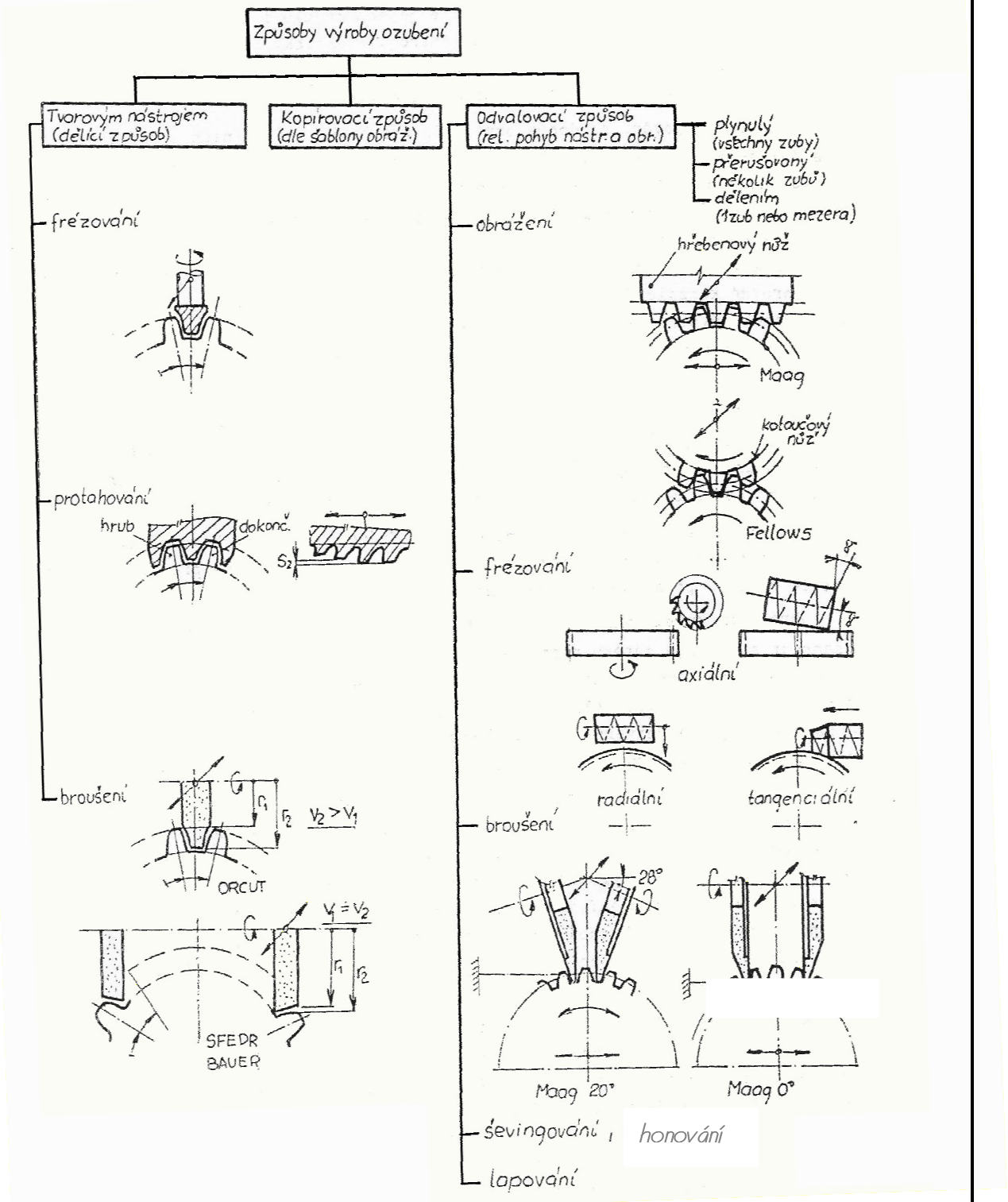
Vedle těchto technologických a zákaznických požadavků na konstrukci strojů nastala mnohem větší ochota samotných výrobců strojů i zákazníků akceptovat tak nekonvenční materiály, jako jsou kompozity, plasty, minerální litiny a další. Zákazníci z vyspělých zemí, zejména severní Evropy, velmi dbají na ekologii a zdravotní bezpečnost strojů. U strojů s vysokotlakým chlazením (1 až 30 MPa) je ekologické krytování spolu s odsáváním pracovního prostoru naprostou nutností. [10]

2 ROZDĚLENÍ STROJŮ PODLE ZPŮSOBŮ VÝROBY OZUBENÝCH KOL

Výroba ozubení patří mezi velmi důležité, ale také velmi složité technologické procesy.
Lze ji podle druhu ozubeného kola rozdělit na obrábění čelních kol s přímými, šikmými a šípovými zuby, šneků, šnekových kol a kuželových kol s přímými, šikmými nebo zakřivenými zuby. Technologická náročnost obrábění jednotlivých druhů ozubení roste v uvedeném pořadí. [2]
Podle způsobu výroby ozubení se ozubárenské stroje rozdělují do tří základních skupin:

- dělící - stroje s tvarovými nástroji (frézovací, obrážecí, brousicí, protahovací stroje)
- odvalovací - obrážecí stroje
  - frézovací stroje
  - brousící stroje
- kopírovací - hoblovací stroje (hoblování podle šablony)
  - obrážecí stroje (obrážení podle šablony)

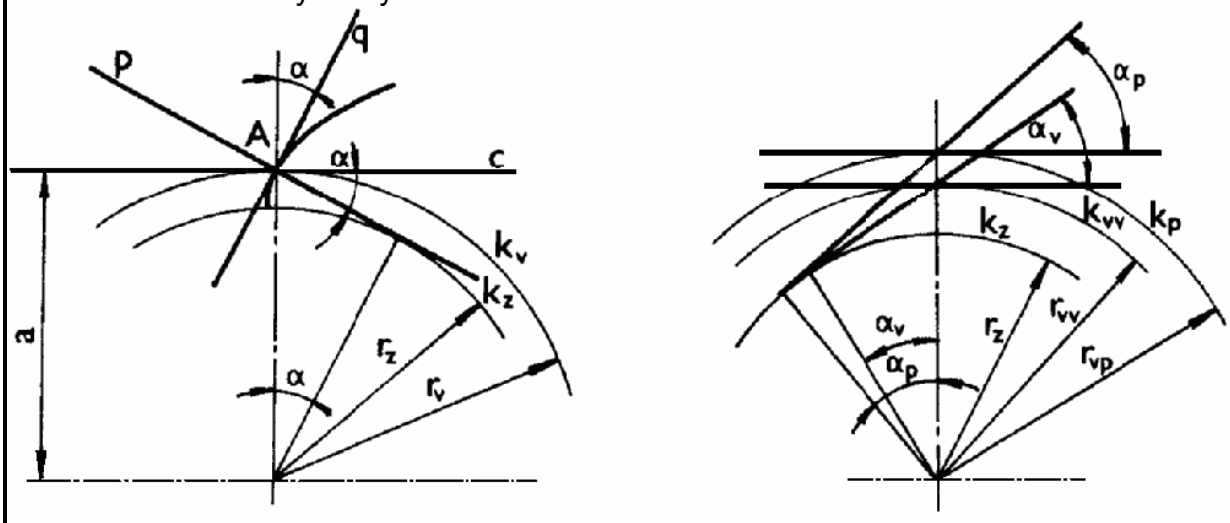
Pro zlepšení kvality povrchu a zvýšení přesnosti geometrického tvaru se nekalená kola ševingují, kalená kola se brousí a lapují nebo honují. U kalených kol se tím odstraňují také deformace vzniklé tepelným zpracováním. [1]
Podrobnější přehled způsobů výroby ozubení je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Přehled způsobů výroby ozubení [1]

3 STROJE PRACUJÍCÍ ODVALOVACÍM ZPŮSOBEM

Tyto stroje představují nejvýznamnější skupinu v kategorii ozubárenských strojů. Jsou využívány jak pro hlavní technologické principy obrábění (obrážení, frézování, broušení), tak i pro dokončovací obrábění. Odvalovací stroje pracují na principu tvorby evolventy odvalem, tj. že se boky zubů tvoří relativním odvalováním nástroje (hřebenový nebo kotoučový nůž) po válci, popř. tvarem odvalovacího nástroje (odvalovací frézy). [1]
Geometrie evolventy se vytváří dle obr. 3.1:



a) *b)*

Obr. 3.1 Principy vytváření evolventy [8]

Podle obr. 3.1a opisuje libovolný bod *A* tvořící přímky *p* evolventu při odvalovaní po základní kružnici k_z. Evolventa vzniká také jako obálka všech poloh přímky *q* kolmé na tvořící přímku *p* a svázané s ní při odvalování přímky *p* po základní kružnici k_z. Ta stejná evolventa vzniká i jako obálka všech poloh přímky *q* svázané s přímkou *c* při odvalování přímky *c* po valivé kružnici k_v. [8]

Úhel záběru α je úhel, jenž svírá přímka *q* s kolmicí k přímce *c.* Pro tento úhel platí vztah:

$$\cos\alpha = \frac{r_z}{r_v} \qquad (3.1c)$$

, kde r_z je poloměr základní kružnice,

r_v je poloměr valivé kružnice.

Pokud je valivá kružnice při záběru jiná za provozu ozubeného kola a při jeho výrobě, mění se také jeho provozní úhel záběru α_p (obr. 3.1b). Vztah pro provozní úhel záběru:

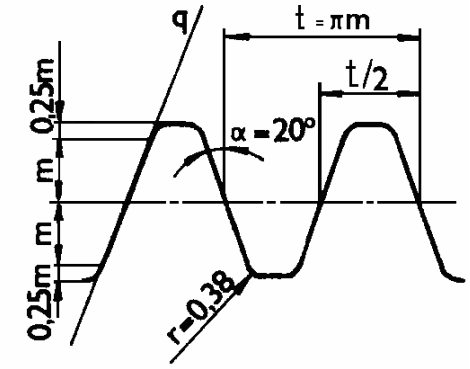
$$\cos\alpha_p = \frac{r_z}{r_{vp}} \qquad (3.1d)$$

, platí $r_z = r_{vv} \cdot \cos\alpha_v \Rightarrow \quad \cos\alpha_p = \frac{r_{vv}}{r_{vp}} \cdot \cos\alpha_v \qquad (3.1e)$

Kde: r_{vv} – poloměr výrobní valivé kružnice,
r_{vp} – poloměr provozní valivé kružnice,
α_v - výrobní úhel záběru nástroje.

Tvar zubů je určený základním profilem (obr. 3.2), který je normalizovaný.

Bok zubu čelního ozubeného kola vzniká při výrobě jako obálka přímky q, jenž tvoří část boku základního profilu odvalovací frézy, profilu ozubeného hřebenového nože nebo profilu obrážecího kola při jejich relativním odvalování po valivé kružnici válce kola. [1]



Obr. 3.2 Základní profil [8]

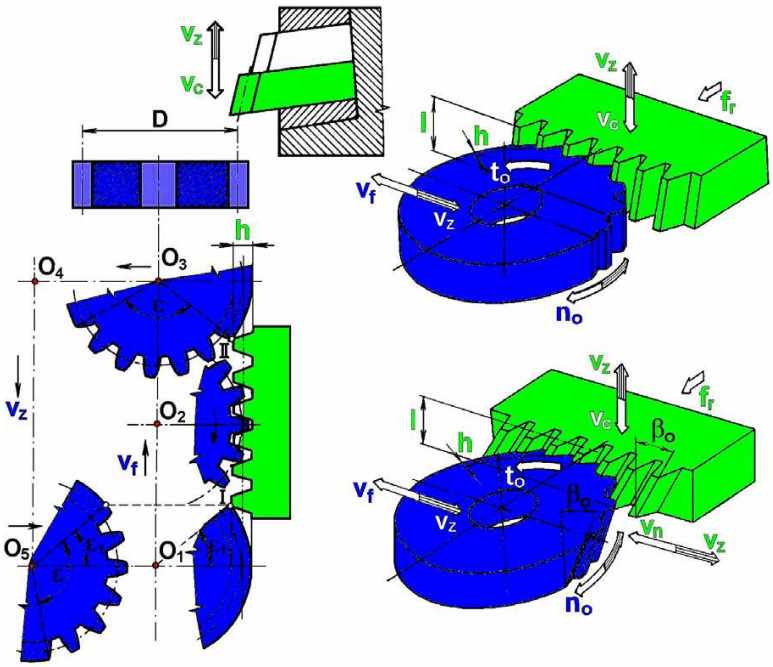
3.1 Obrážecí odvalovací stroje

3.1.1 Obrážečky odvalovací pro obrážení čelních ozubených kol

Tyto stroje používají nástroj ve tvaru hřebene nebo kotoučového nože.

Při práci s hřebenovým nožem je cyklus přerušovaný. Tímto způsobem se vyrábějí čelní kola s přímými i se šroubovými (šikmými) zuby. [1]

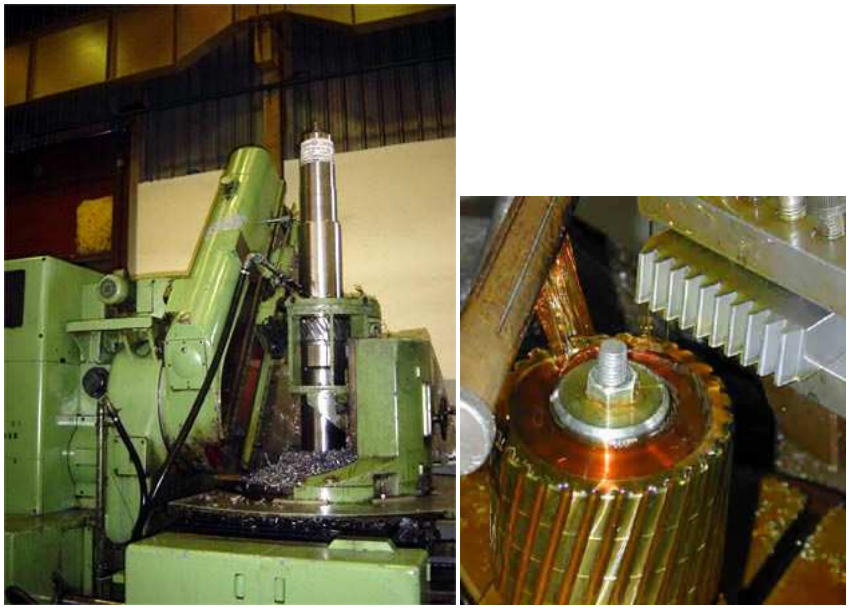
Obrážení ozubení čelních ozubených kol hřebenovým nožem je založeno na principu záběru ozubeného hřebene (*nástroj*) s ozubeným kolem (*obrobek*). Nástroj je v radiálním směru nastaven na hloubku zubu h a koná přímočarý vratný pohyb (l - délka zdvihu, v_c - střední hodnota řezné rychlosti, v_z - střední hodnota rychlosti zpětného pohybu). Odvalování je dosaženo složením otáčivého (n_o) a posuvového pohybu (v_f) obrobku, u šikmého ozubení obráženého nástrojem se šikmými zuby navíc ještě dodatečným posuvem nástroje v_n , v_z - obr. 3.3. Po obrobení části ozubení v segmentu na kruhové výseči s úhlem ε (poloha O_3) dojde k odsunutí obrobku od nástroje, jeho přesunutí do polohy O_5, kde se nastaví na úhel ε_1 a znovu přisune k nástroji do výchozí polohy O_1. Tímto způsobem se při postupném obrábění jednotlivých segmentů vyrobí kompletní ozubení. [2]



Obr. 3.3 Kinematika pohybů při obrážení čelního ozubení metodou Maag [2]

Na odvalovacích obrážecích strojích s hřebenovým nožem lze jedním nástrojem daného modulu vyrábět kola s libovolným počtem zubů, s přímými i šikmými zuby (obr. 3.4). Pokud má nástroj přímé zuby (obvyklý případ) a ozubené kolo zuby šikmé, probíhá obrážení se smykadlem vykloněným o úhel sklonu zubů obrobku (β_0). Šípové ozubení se obráží na strojích, které jsou vybaveny dvěma protiběžnými smykadly. [2]

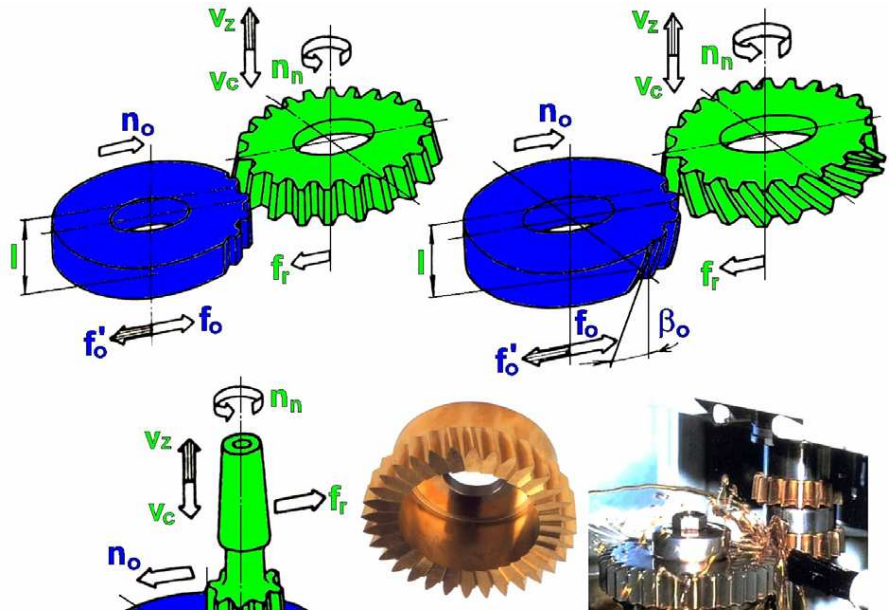
Obrážecí odvalovací stroje se vyznačují zejména poměrně vysokými pořizovacími náklady, relativně levným nástrojem a dlouhými výrobními časy. Uvedený způsob obrábění je v provozních podmínkách označován jako systém *Maag*. [2]



Obr. 3.4 Ukázka obrážecího stroje Maag s pracovním prostorem [17]

Výhodou těchto strojů (systém *Maag*) je možnost vyrábět bloky několika odstupňovaných kol s minimální šířkou mezery mezi koly. [1]

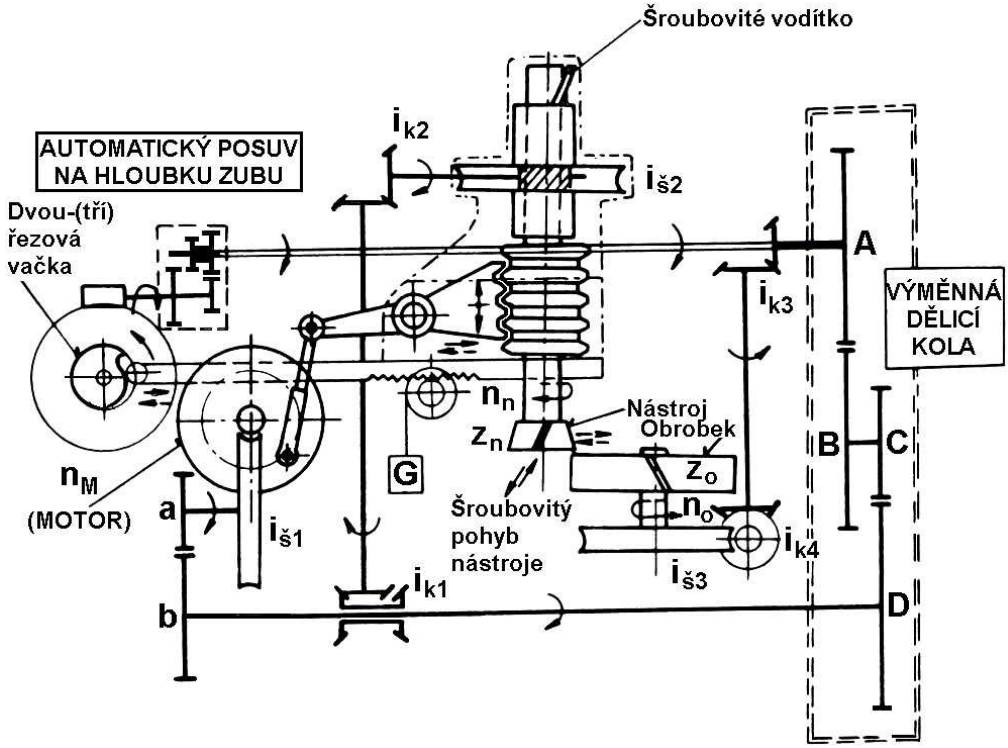
Při práci s kotoučovým nožem je cyklus plynulý. Odvalovací obrážečky tohoto typu pracují na principu záběru dvou ozubených kol bez vůle, tzn., že při obrážení se nástroj i obrobek po sobě odvalují tak, jako by spolu zabírala dvě čelní ozubená kola - obr. 3.5. Nástroj je upnutý ve smykadle a koná přímočarý vratný pohyb ve směru své osy díky klikovému mechanizmu (*l* - délka zdvihu, v_c - střední hodnota řezné rychlosti, v_z - střední hodnota rychlosti zpětného pohybu) a rotuje otáčkami n_n, obráběné kolo rotuje otáčkami n_o. Uvedenou kombinací rotačních a translačních pohybů je vytvořen výslední evolventní profil zubů obráběného kola jako obálka evolventních boků zubů nástroje. Při zpětném pohybu se obrobek oddaluje od nástroje, aby se břity netřely o obrobenou plochu (toho lze dosáhnout radiálním nebo šikmým odskokem - f_o'). [2] Oddálením nástroje od obrobku se ušetří ostří nástroje a sníží se namáhání stroje. [1]



Obr. 3.5 Kinematika pohybů při obrážení čelního ozubení metodou Fellows[2]

Nástroj (obr. 3.5) je ve tvaru evolventního ozubeného kola, jehož ozubení vzniklo odvalem po základním hřebenu. Ve směru osy je spojitě korigován. [1]

Zuby vytvářejí nástrojové břity (čelo na čele zubu, hlavní hřbet na hlavě zubu, vedlejší hřbety na bocích zubu). Kotoučovými noži lze obrábět také vnitřní ozubení. V důsledku krátkého náběhu i přeběhu nástroje se tato metoda uplatňuje i při výrobě dvojkol. Šikmé ozubení se obráží nástrojem s přímými nebo šikmými zuby. Nástroj v průběhu pracovního dvojzdvihu (do záběru, i ze záběru) koná pomocí šroubovitých vodítek přídavný rotační pohyb ve šroubovici s úhlem stoupání βo (úhel sklonu zubů obráženého kola). Tento druh obrážení (kotoučovými noži) je v provozních podmínkách označován jako systém *Fellows*. [2]



Obr. 3.6 Kinematické schéma odvalovací obrážečky[2]

Stroje typu *Fellows* s planetovým pohybem obrobku jsou využívány hlavně při hromadné výrobě ozubených kol malých průměrů. [1]



Obr. 3.7 Odvalovací obrážečka OHA 50A CNC5 [11]

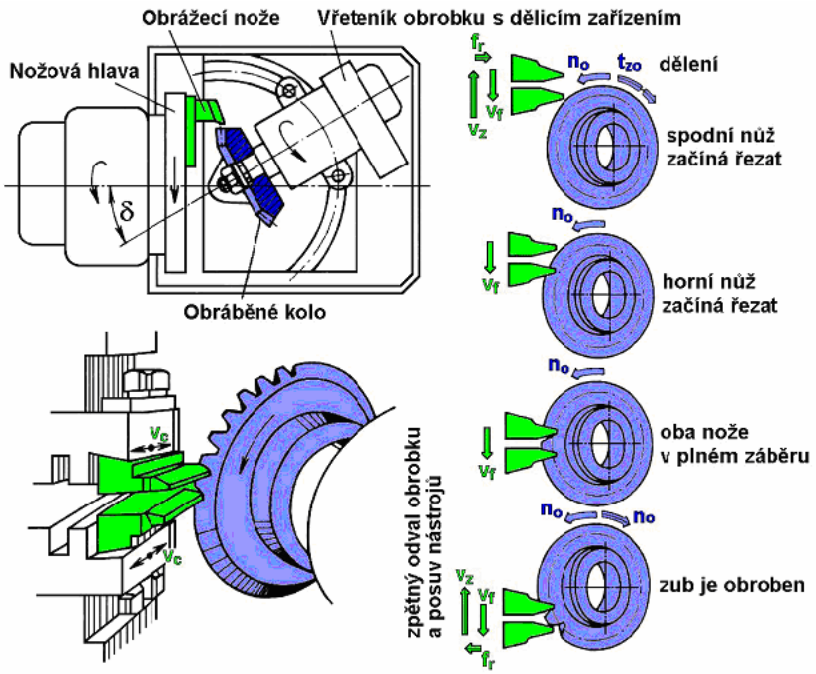
Stroje obrábějící kotoučovými noži jsou kinematicky jednodušší, ale méně výkonné a to i přesto, že pracují nepřetržitě, neboť smýkadlo nelze konstruovat dostatečně tuhé a nelze zabírat větší průřezy třísek. Na strojích lze obrábět vnější i

vnitřní ozubení s přímými i šroubovými (šikmými) zuby. Nástroj má krátký výběh, tudíž lze obrážet několikastupňová kola s malou vzdáleností jednotlivých ozubení. [1]

3.1.2 Obrážečky odvalovací pro obrážení kuželových ozubených kol

Odvalovacími obrážečkami lze obrábět i kuželová kola a to metodou *obrážení dvěma noži*.

U této metody (*obrážení dvěma noži*) jde o způsob výroby s odvalem boku zubu - obr. 3.8. Nože lichoběžníkového profilu jsou upnuté v otočné hlavě a konají řezný pohyb (v_c) ve směru povrchových přímek boků zubů. Jejich ostří představují zubovou mezeru pomyslného plochého základního kola (kuželové kolo s úhlem roztečného kužele $\delta = 90°$), se kterým je obráběné kolo v záběru. Boky vyráběných zubů ve tvaru evolventy jsou vytvořeny jako obálka postupných poloh břitů nástrojů při záběru obráběného a základního kola (n_o - rotace obráběného kola, v_f - posuvový pohyb nožů odvozený z rotace nožové hlavy). Po obrobení jednoho zubu (každý nůž obrábí jeden bok) se nožová hlava i obrobek vrací do výchozí polohy a obrobek se dělicím zařízením pootočí o jednu rozteč. Takto se hrubují nebo dokončují ozubená kola do hodnoty modulu *m = 20 mm* a *průměru 1200 mm*. Na některých typech strojů lze obrážením dvěma noži vyrábět kuželová kola se šikmými zuby, s výškově i podélně modifikovaným profilem. [2]



Obr. 3.8 Odvalovací obrážení ozubení kuželového kola dvěma noži [2]

3.2 Frézovací odvalovací stroje

3.2.1 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu čelních ozubených kol

Tradiční výroba čelních ozubených kol je zpravidla spojována s odvalovacími frézkami a odvalovacími frézami. Odvalovací frézky jako většina obráběcích strojů musejí splňovat základní kvalitativní požadavky, a to je bezpečnost vymezená příslušnými směrnicemi Evropské unie, respektive nařízeními vlády. Dalším

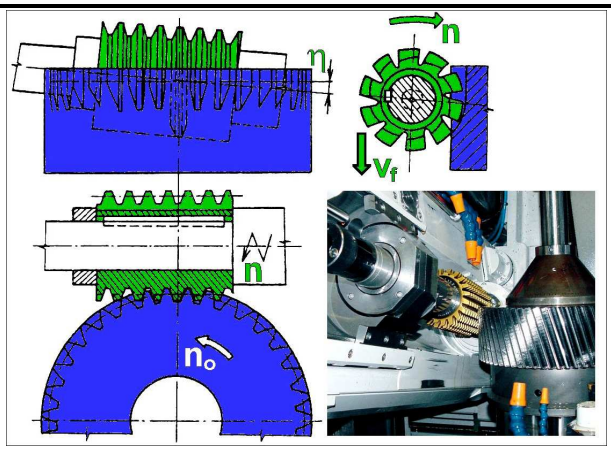
požadavkem je přesnost – jak geometrická, tak i pracovní a kinematická, která je zpravidla vztahována k obrobkové a nástrojové větvi kinematického řetězce. S přesností nástrojové větve odvalovacích frézek úzce souvisí přesnost odvalovacích fréz a tedy i přesnost konečného produktu, což je ozubení ozubeného kola. [5]

Snaha o zvýšení produktivity obrábění vede k neustálému vývoji frézovacích odvalovacích strojů i odvalovacích nástrojů (fréz). Velmi efektivním způsobem, jak u frézovacích odvalovacích strojů zvýšit produktivitu, je volba vysoce výkonných nástrojů (fréz) s moderními PVD (Physical Vapour Deposition) povlaky.

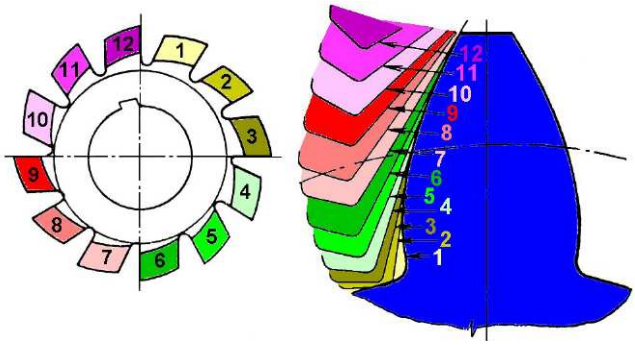
Následující příklad frézování charakterizuje, jaké mohou být skutečné přínosy více sofistikovaných vrstev v náročnějších podmínkách. Rozdíly ve výkonnosti nástrojů s různými PVD povlaky se značně prohlubují v případě intenzivnějších řezných parametrů, které mají vliv na produktivitu obrábění. Z následujícího příkladu je patrné, že role vrstev s vysokou tepelnou a chemickou stabilitou roste se zvyšujícím se zatížením nástroje. Odvalovací frézy z HSS nebo PM HSS jsou ve většině případů několikanásobně přebrušovány a přepovlakovány a jejich celková doba životnosti je tak značně vysoká. Samotná vrstva pak má zlepšit výkon nástroje, ale také umožnit jeho renovaci, která zahrnuje i vhodnou chemickou metodu stažení starého povlaku z použitého nástroje. To nemusí být v případě velmi kvalitních a moderních vrstev na bázi CrAlN tak samozřejmé. Vrstvy s vysokým obsahem Cr lze velmi obtížně odstraňovat z povrchu použitého nástroje. Přesto tyto vrstvy mají pro oblast odvalovacích fréz velký význam. Proto řešení přípravy vrstev s nízkým obsahem Cr při zachování vysoké tvrdosti a chemické stability je opravdovým průlomem v těchto aplikacích. Kombinací s přídavkem Si do struktury vrstvy je pak získána nanokompozitní struktura, která svou tvrdostí předčí i CrAlN vrstvy s vyšším obsahem Cr. Vrstvu s nízkým obsahem Cr pod 5 % pak lze snadněji chemicky odstranit z povrchu použitého nástroje a nástroj se může renovovat několikanásobně, jak je zvykem při aplikaci jiných typů povlaků. [6]

Odvalovací frézování čelních ozubených kol je založeno na principu záběru válcového šneku (nástroj) s ozubeným kolem (obrobek). Nástroj je odvalovací fréza (obr. 3.9), která má tvar evolventního šneku, jehož profil je v normálné rovině tvořen základním hřebenem. Spirála šneku je přerušena drážkami, které vytvářejí na základním hřebenu čelní plochy břitů (zubů) nástroje. Hlava a také boky zubů jsou podbroušeny nebo podsoustruženy, aby byly na hlavním hřbetu i vedlejších hřbetech vytvořeny požadované úhly hřbetu. [2]

Řezný pohyb je vyvozen rotací frézy (n), obrobek rotuje otáčkami n_o tak, že se za jednu otáčku frézy pootočí o jednu zubovou rozteč, čímž se plynule frézují všechny zuby. Aby se vytvořilo ozubení po celé šířce frézovaného kola, musí se fréza současně pohybovat ve směru obráběných zubů rychlostí v_f (obr. 3.9). Smysl posuvu frézy se může shodovat se smyslem její rotace (nesousledné frézování), nebo může být opačný (sousledné frézování). Boky zubů se vytvářejí jako obalové plochy jednotlivých poloh nástroje (obr. 3.10). Jednou odvalovací frézou lze obrábět ozubená kola stejného modulu s libovolným počtem a sklonem zubů. [2]



Obr. 3.9 Kinematika pohybů při odvalovacím frézování čelního ozubení[2]



Obr. 3.10 Princip vytvoření evolventy při odvalovacím frézování[2]

Kinematika řezného pohybu vychází z podmínky [2]:

$$\frac{n_o}{n} = \frac{z}{z_o} = [-] \text{ , (3.11)}$$

kde: n_o [min-1] jsou otáčky obráběného kola,
n [min^{-1}] jsou otáčky odvalovací frézy,
z_o [-] je počet zubů obráběného kola,
z [-] je počet chodů odvalovací frézy.

Pro výrobu ozubených kol se šikmými zuby slouží další důležitý mechanizmus odvalovacích frézek – diferenciál. Ten v závislosti na úhlu sklonu zubu zákonitým a přesným pohybem přitáčí obrobkem. [1]

Při výrobě čelních kol s přímými zuby se před začátkem práce fréza postaví k obráběnému kolu tak, že boky jejich zubů jsou rovnoběžné s osou kola, tzn., aby osa frézy svírala s rovinou otáčení kola úhel stoupání šroubovice η (obr. 3.9). Při práci se fréza otáčí, posouvá do řezu rovnoběžně s osou kola a obráběné kolo se plynule otáčí. Při tom je obráběné kolo upnuto na vodorovném nebo svislém trnu podle druhu stroje. [1]

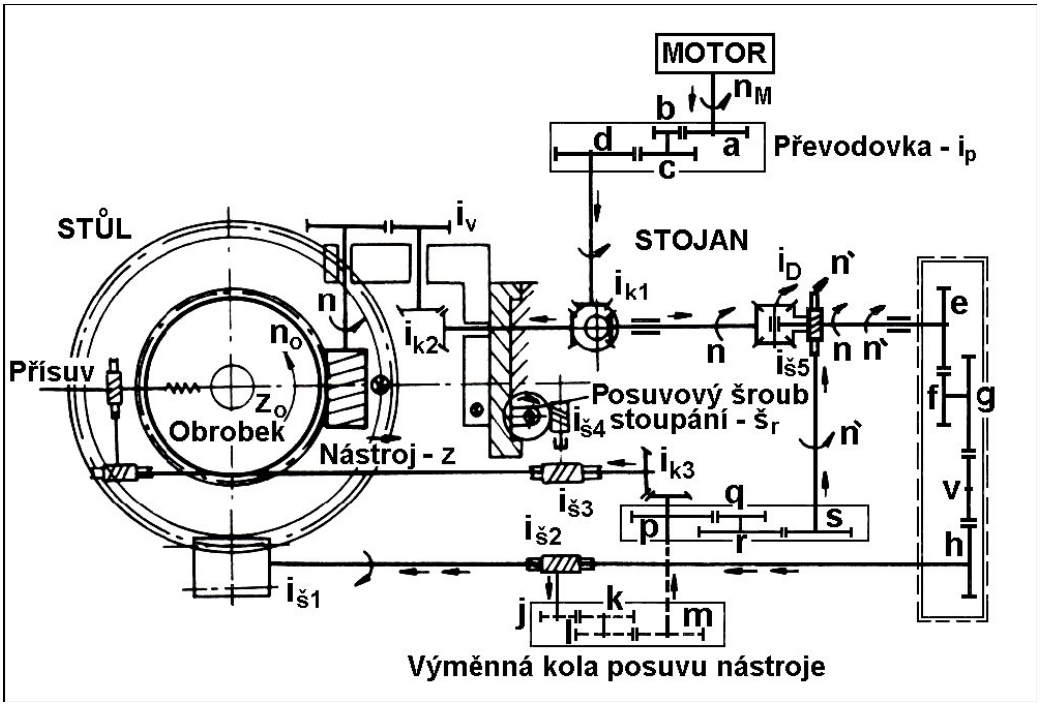
Břity odvalovacích fréz jsou zatíženy nerovnoměrně, protože při frézování je v záběru pouze několik zubů. Z uvedeného důvodu jsou moderní odvalovací frézky vybaveny automatickým krokováním frézy (anglicky „shifting“), které vždy po určitém počtu vyrobených kol přesune frézu o potřebnou hodnotu ve směru její osy. Použitím

této technologie frézování lze zvýšit trvanlivost nástroje o 50 až 70%. Některé typy odvalovacích frézek umožňují diagonální frézování, při kterém koná fréza malý osový pohyb, v závislosti na přídavném pootočení obrobku. [2]

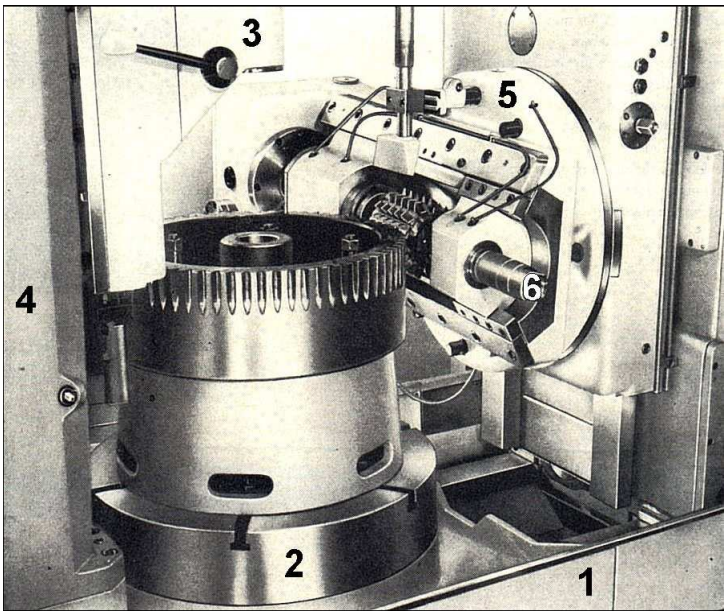
Frézování odvalovacím způsobem se provádí na odvalovacích frézkách, které bývají vybaveny zpravidla zařízením pro práci v automatickém cyklu. [2]

Odvalovací frézování je metoda univerzální a velmi výkonná. Je možno jí obrábět čelní ozubená kola s přímými i šroubovými (šikmými) zuby, šneková kola, kuželová kola se zakřivenými zuby a speciálním nástrojem, např. drážkové hřídele, rohatky, bubnové vačky, řetězová kola, drážky vrtáků apod. [1]

Složitý systém nastavování a řízení potřebných pohybů obráběcího stroje (obr. 3.12) klade vysoké nároky na kvalifikaci a zkušenost obsluhujícího pracovníka. [2] Proto se dnes využívají především číslicově řízené stroje (obr. 3.13), které snižují nároky kladené na obsluhu.

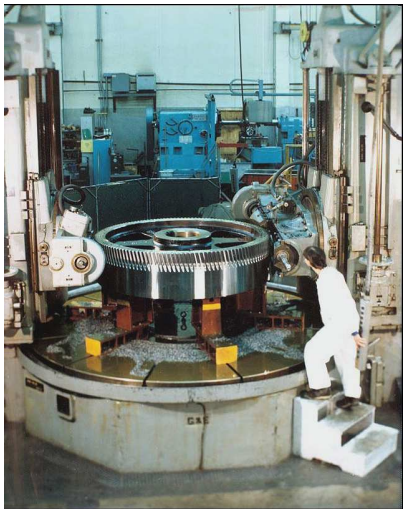


Obr. 3.12 Kinematické schéma odvalovací frézky [2]



Obr. 3.14 Základní stavební prvky odvalovací frézky: 1 - lože, 2 - otočný stůl, 3 - opěrné ložisko, 4 - opěrný stojan, 5 - vřeteník, 6 - upínací trn [2]

Odvalovací frézka - viz obrázek 3.14 - se skládá z lože (1), na němž je otočný stůl (2) pro upínání obrobků. Ozubená kola malých průměrů jsou upínána na trn, který je svým volným koncem veden v opěrném ložisku (3) posuvném po vedení opěrného stojanu (4). Vřeteník (5) s upínacím trnem (6) pro odvalovací frézu koná posuvový pohyb podél osy obrobku (rychlostí v_f) a lze jej natáčet podle dané kombinace nástroj - obrobek (úhel η). [2]



Obr. 3.15 Velkoprůměrová odvalovací frézka se dvěma vřeteníky [2]



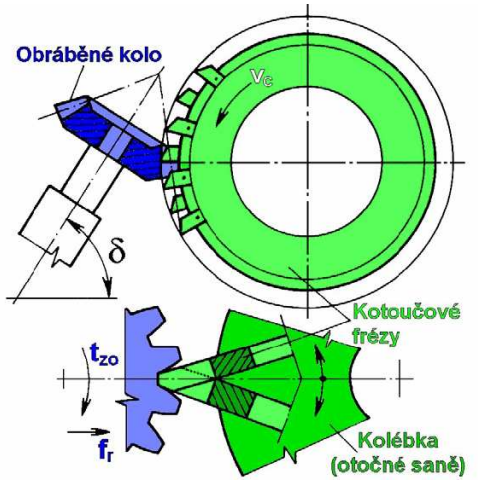
Obr. 3.13 Ukázka CNC odvalovací frézky[11]

3.2.2 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu kuželových kol

Frézovací stroje odvalovací pro výrobu kuželových kol s přímými a šikmými zuby

Kola s přímými a šikmými zuby se vyrábí *frézováním nožovými hlavami*.

Tato metoda se používá při výrobě kol menších a středních rozměrů (modul m=0,3 až 10 mm). Jako nástroj jsou používány dvě kotoučové nožové hlavy (pravá a levá) se vsazenými břity, které se v zubové mezeře překrývají (obr. 3.16). Princip práce spočívá v odvalování vyráběného ozubení po plochém základním kole, jehož zuby jsou tvořeny vnějšími břity dvou frézovacích hlav. Odvalování je zajištěno natáčením kolébky nebo odvalováním frézovacích hlav a natáčením obrobku. Zubová mezera je tedy vytvořena zapichováním a odvalováním, bez podélného posuvového pohybu frézovacích hlav. Ozubení se frézuje dělicím způsobem, obrobek vykonává radiální posuv na hloubku zubu (zapichování), potom následuje frézování boku zubu odvalem. Zuby mají soudečkový tvar, zubové mezery mají tvar kruhového oblouku. [2]



Obr. 3.16 Frézování ozubení kuželového kola pomocí dvou kotoučových nožových hlav[2]

Frézovací stroje odvalovací pro výrobu kuželových kol se zakřivenými zuby

Tvar zubů na obráběném kole může být v podstatě libovolný. Jedinou podmínkou je, aby se křivek na tomto kole dosáhlo pohyby nástroje racionálně a přesně a aby i nástroj byl co nejjednodušší a dal se jednoduše a přesně ostřit. Pro zaručení správného záběru zubů kuželového kola se zuby pastorku je nutné, aby se obě kola, na kterých vznikne odvalováním ozubení (pastorek i kolo), při myšleném překlopení přesně vyplňovala. [8]

V praxi se používají kuželová ozubená kola se zakřivenými zuby, které vznikly odvalováním po obráběném kole se zuby zakřivenými podle kružnice, prodloužené evolventy nebo prodloužené epicykloidy. [8]

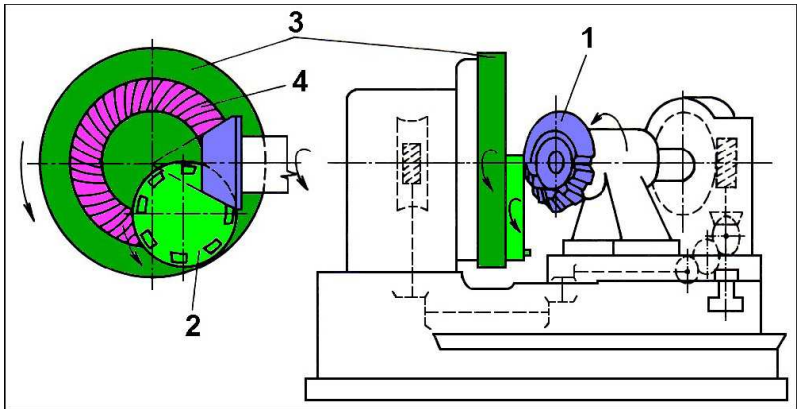
Obrábění ozubení kuželových kol se zakřivenými zuby (obr. 3.17) se provádí odvalovacím frézováním těmito způsoby:

- *Gleason* - kruhově zakřivené zuby (ozubení Zerol, Hypoid),
- *Oerlikon* - zuby zakřivené podle prodloužené epicykloidy (eloidní ozubení),
- *Klingelnberg* - zuby zakřivené podle prodloužené evolventy (paloidní ozubení) nebo epicykloidy (cyklopaloidní ozubení).



Obr. 3.17 Kuželové soukolí se zakřivenými zuby[12]

Metoda *Gleason* je charakterizována jako odvalovací frézování kuželových kol dělicím způsobem pomocí čelní nožové hlavy (obr. 3.18). Princip obrábění vyplývá z dvoubokého záběru (odvalu) pomyslného plochého základního kola (4) s obráběným ozubeným kolem (1). Základní kolo je tvořeno unášecí deskou (3), na níž je upnuta frézovací hlava (2). Nože frézovací hlavy mají lichoběžníkový profil a jsou uspořádány obvykle za sebou, s vystřídanými vnějšími a vnitřními břity. Řezná rychlost, která není vázána na ostatní pracovní pohyby, je určena rotací frézovací hlavy. [2]



Obr. 3.18 Frézování ozubení kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Gleason

1 - obráběné kolo, 2 - nožová hlava, 3 - unášecí deska, 4 - pomyslné základní kolo [2]

Na začátku práce se obrobek přisune radiálně na hloubku zubové mezery, poté jsou automaticky zapnuty odvalovací pohyby. Unášecí deska i nástroj se otáčejí úhlovými rychlostmi, které jsou dány převodovým poměrem záběru základního a obráběného kola. Protože břity nástroje tvoří zub základního kola, obrobí vnější a vnitřní boky zubové mezery obráběného kola. Úhel odvalovacího pohybu musí být tak velký, aby se odvalila celá zubová mezera. Potom se obrobek odsune od nástroje, změní se smysl otáčení unášecí desky a dojde k jejímu odvalení do výchozí polohy. Obráběné kolo se odvalí do polohy, která se liší o jednu úhlovou rozteč proti odvalu unášecí desky. Tím se uskuteční dělení na další zubovou mezeru, zapne se přísuv a celý cyklus se opakuje, dokud nejsou vyrobeny všechny zubové mezery obráběného kuželového kola. [2]

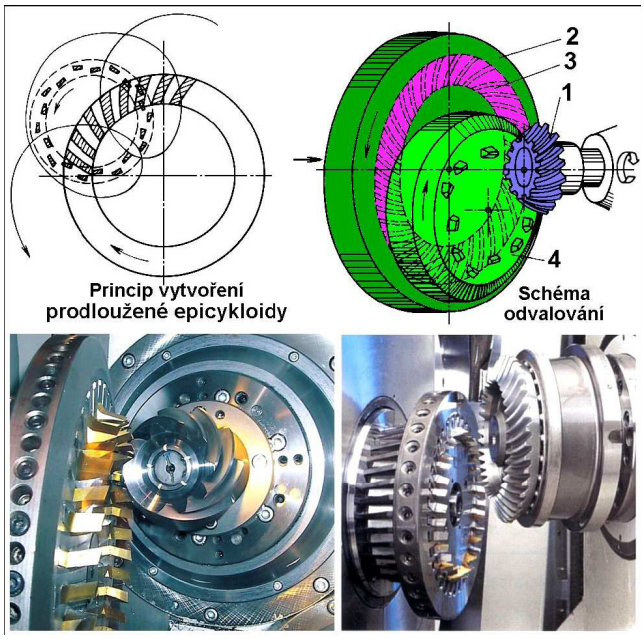
Na strojích typu *Gleason* (obr. 3.19) se dají obrábět kuželová ozubená kola pro soukolí s různoběžnými osami i s mimoběžnými osami (hypoidní soukolí) s moduly od 3 do 15 mm a průměry až do 830 mm. Výhodou strojů je jejich kinematická jednoduchost a vysoká přesnost. Určitou nevýhodou je nutnost pracovat dělícím způsobem (v každé zubové mezeře zvlášť a podle způsobu výroby někdy také každý bok v jedné zubové mezeře zvlášť). Produktivita těchto strojů je nižší. [8]



Obr. 3.19 Frézovací stroj typu Gleason [13]

U způsobu *Oerlikon* se jedná o odvalovací frézování čelní nožovou hlavou (obr. 3.20), která vytváří boky zubů obráběného kola plynulým odvalem (to znamená, že nejsou zapotřebí dělicí pohyby jako v případě metody Gleason). Kuželové ozubení vzniká kombinací tří na sobě navzájem závislých pohybů - rotačním pohybem nožové hlavy, rotačním pohybem obrobku, který je současně dělicím

pohybem a natáčením unášecí desky, na níž je výstředně upnuta čelní nožová hlava. Jednotlivé břity čelní nožové hlavy (s přímkovým ostřím) jsou uspořádány po skupinách tak, že tvoří části samostatných spirál. [2]



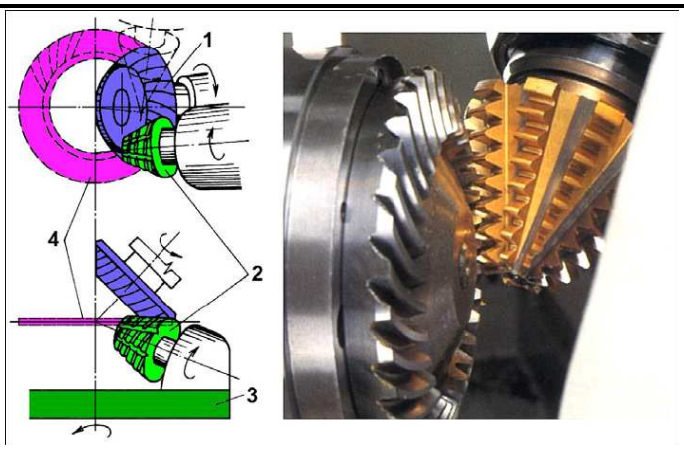
Obr. 3.20 Frézování ozubení kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Oerlikon 1 - obráběné kol, 2 - unášecí deska, 3 - pomyslné základní kolo, 4 - nožová hlava [2]

Výhodou těchto strojů (obr.3.21) je jejich vysoká přesnost a produktivita, protože jde o plynulý způsob výroby - zuby (jedna tříska) se na obráběném kole vytvoří jedním otočením kola. Protože nástroj se dá sestavit z jednoduchých nožů, které se dají lehko brousit na čele, je relativně levný. Jeho přesné nastavení je však ztížené spirálovým rozložením zubů na upínací desce. [8]



Obr.3.21 Frézka Oerlikon na eloidní ozubení [14]

Metodou *Klingelnberg* se kuželová kola s paloidním ozubením vyrábějí odvalovacím frézováním pomocí kuželové frézy, která vytváří boky zubů obráběného kola plynulým odvalem (obr. 3.22). Podobně jako u způsobu Oerlikon jsou zubové mezery obráběného kola vytvářeny kombinací tří pohybů - rotačního pohybu frézy, rotačního pohybu obrobku a odvalovacího pohybu frézy na unášecí desce. Tento způsob je vhodný pro kusovou a malosériovou výrobu. [2]



Obr. 3.22 Frézování kuželových kol s paloidním ozubením metodou Klingelnberg 1 - obráběné kolo, 2 - kuželová odvalovací fréza, 3 - unášecí deska, 4 - pomyslné základní kolo [2]

Kuželová kola s cyklopaloidním ozubením jsou vyráběna odvalovacím frézováním čelní nožovou hlavou na stejném principu jako u metody Oerlikon. Rozdíl spočívá v konstrukci nožové hlavy, která je dvoudílná a uspořádaná tak, že všechny vnější nože jsou v jedné části a vnitřní nože v druhé části hlavy. Obě části se mohou vzájemně posouvat, což umožňuje vnitřním i vnějším nožům vytvářet křivky s různými poloměry křivosti. Tím vzniká požadované zakřivení s podélnou modifikací tvaru zubu. [2]

Obrábět se dají kola s různoběžnými i mimoběžnými osami. Výhodou strojů je jejich vysoká přesnost a i produktivita, protože obrábění je plynulé. Rozsah modulů obráběných kol je od 4 do 8 mm a rozsah průměrů od 10 do 500 mm. Určitou nevýhodou je relativně drahý nástroj. [8]



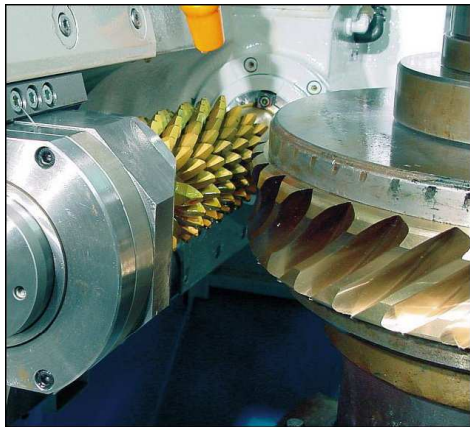
Obr. 3.23 Frézka Klingelnberg na palloidní ozubení [8]

3.2.3 Frézovací stroje odvalovací pro výrobu šnekových kol a šneků

Na odvalovacích frézkách lze obrábět i šneky (obr. 3.24) a šneková kola (obr. 3.25).



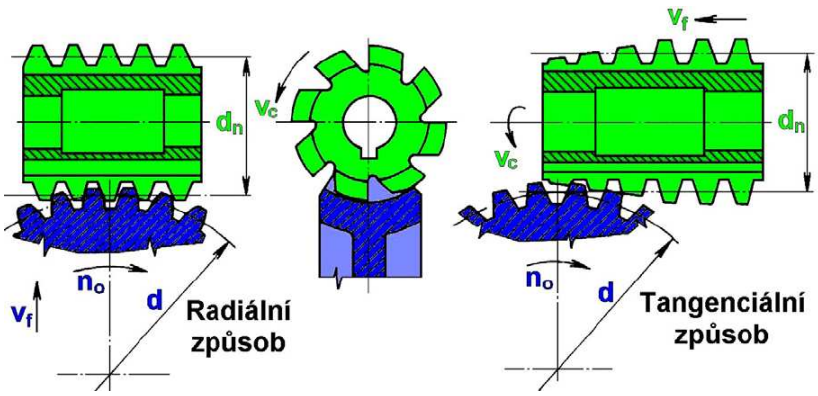
Obr. 3.24 Frézování válcového šneku na odvalovací frézce [2]



Obr. 3.25 Odvalovací frézování šnekového kola [2]

U frézování šnekových kol na odvalovacích frézkách má odvalovací fréza tvar a rozměry shodné se spoluzabírajícím šnekem. Šneková kola lze vyrábět těmito způsoby [2]:

- *radiálním*, kdy se obráběné kolo posouvá proti nástroji (využívá se při výrobě šnekových kol s úhlem stoupání 6º až 8º),
- *tangenciálním*, při kterém se odvalovací fréza s náběhovým kuželem posouvá ve směru tečném k roztečné kružnici kola (přesnější způsob výroby),
- *radiálně tangenciálním*, kdy se radiálním posuvem hrubuje a tangenciálním obrábí na čisto (jako nástroj lze místo odvalovací frézy použít tvarový nůž).



Obr. 3.26 Odvalovací frézování šnekových kol [2]

3.3 Brousicí odvalovací stroje

Některé z třískových technologií pracujících s nástroji s definovaným tvarem břitu (např.frézování) zaznamenaly v minulé dekádě výrazný rozvoj a svými dobrými výsledky v oblasti dosažitelné drsnosti povrchu a schopnosti opracovat kalený povrch se začaly přibližovat technologii broušení. Výrobci brousicích strojů na tento stav zareagovali zdůrazněním výhod technologie broušení a rozšířením možností brousicích strojů a nástrojů. Mezi hlavní výhody broušení patří stabilní přesná výroba dílů s malými tolerancemi a dobrá integrita obrobeného povrchu. Integritou se rozumí souhrn faktorů popisujících vlastnosti obrobené plochy – drsnost, mikrotvrdost nebo průběh napětí v povrchové vrstvě. Velkou důležitost má kromě dosažené drsnosti také pnutí materiálu vzniklé v důsledku výrobní technologie. Z hlediska integrity povrchu má broušení mezi třískovými technologiemi stále významnou výhodu. [7]

Oblast výroby brousicích strojů a obecně brousicích technologií je relativně konzervativní v zavádění novinek. Každý výrobce si pečlivě hlídá vysokou přesnost strojů a nechce ji ohrozit zaváděním nových a nevyzkoušených komponent. Avšak úspěšný postup technologie vysokorychlostního broušení kotouči s CBN (kubický nitrid boru), požadavky na zkrácení průběžných časů výroby a potvrzení určitých výhod lineárních motorů v aplikacích na frézovacích strojích vytvořily základ pro změny v tradičním provedení některých hlavních částí brousicích strojů. Klasická lože brusek byla dříve vyráběna z odlitků ze šedé litiny. Její výhodou byla především stabilita po vyžíhání a dobré tlumení. Toto téměř monopolní postavení litiny je stále více narušováno jinými řešeními. Ze stejných důvodů, tedy kvůli stabilitě a dobrému tlumení, a dále kvůli snížení tepelných deformací, vyrábějí někteří výrobci lože litá z minerální litiny. Příkladem jsou např. stroje Studer nebo ELB. Stroje Tschudin mají lože ze žulového monobloku. Svařence, které se pro stavbu nosných soustav stále více používají u frézovacích center, je možno ojediněle najít i u brousicích strojů. Svařovaná lože používají např. brusky Reform nebo Morara. [7]

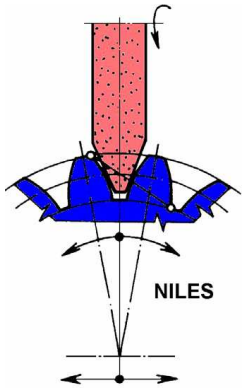
Samozřejmostí jsou i nové trendy v oblasti pohonů. Prstencové motory, jejichž hlavními výhodami jsou jednoduchá a kompaktní zástavba do konstrukce, bezvůlovost, vysoké propustné pásmo regulačních smyček a nulové pasivní odpory v důsledku bezkontaktního propojení jednotlivých skupin stroje našly své uplatnění především jako pohony osy B, tzn. natáčení brousicího vřeteníku. V tomto uzlu začínají vytlačovat tradiční šnekové pohony, což mimo jiné umožňuje zvýšit dynamiku této rotační osy. Také lineární motory se začínají ve stavbě brousicích strojů více prosazovat. Nejde však o plošnou náhradu tradičních kuličkových šroubů, ale o cílené aplikace, kde jsou lineární motory nasazovány především z důvodu zvýšení pojezdové rychlosti, zlepšení dynamiky stroje a vysoké přesnosti při dráhovém řízení. [7]

V oblasti nástrojů se pro technologii HSG (vysokorychlostní broušení) dnes nejčastěji používají kotouče s CBN. Řezné rychlosti v oblasti 200 $m.s^{-1}$ vyžadují vysoké otáčky i u kotoučů velkých průměrů. Tyto kotouče jsou obvykle značně těžké, což při požadovaných otáčkách zvyšuje požadavky na vyvážení kotouče. Velká hmotnost kotouče také snižuje dynamické vlastnosti vřetena. Kombinace kompozitového kotouče a slinutého CBN byla prezentována jako nejlepší řešení pro HSG. Tyto nástroje jsou schopny ve srovnání s kotouči z korundu nebo klasického CBN dosáhnout větší výrobní výkonnosti, lze prodloužit interval mezi orovnáním a obrobená plocha má příznivější průběh napětí v povrchové vrstvě. [7]

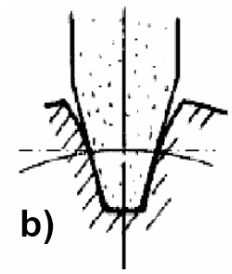
Broušení ozubených kol se provádí pro zvýšení jejich přesnosti a zlepšení kvality povrchu zubů po předchozím obrábění nebo tepelném zpracování. Existuje mnoho způsobů, nejdůležitější systémy mají základní profil vytvořen takto [1]:

- lichoběžníkovým profilem činné části kotouče (systém *Niles*, *Kolb*)
- kolmým profilem závitu šneku vytvořeného na obvodě brousícího kotouče (systém *Reishauer*)
- obvodovými okraji talířových brousících kotoučů (systém *MAAG*)

Na bruskách typu *Niles* a *Kolb* se brousí lichoběžníkovým profilem činné části brusného kotouče, který zodpovídá příslušnému základnímu profilu (*Kolb* – obr. 3.27b), nebo je zúžený (*Niles* – obr. 3.27a). Dotyk brusného kotouče s bokem broušeného zubu je bodový, přičemž tento bod se při odvalování postupně přemísťuje po úsečce **u** (obr. 3.27c), z čehož vyplývá malá potřebná dráha nástroje **H** pro rovnocenné přebroušení celé plochy zubu. Odvalovací pohyb vykonává obrobek (pootočení a posunutí) po vykonání každého dvojzdvihu nástroje. Brousí se každý zubový bok (*Niles*), resp. dva protilehlé boky zubů (*Kolb*) zvlášť, jde tedy o dělící způsob. Blokové kinematické schéma brusek typu *Niles* a *Kolb* je zobrazené na obr. 3.27d. [8]

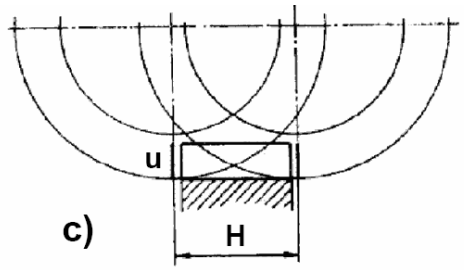


obr. 3.27a [2]



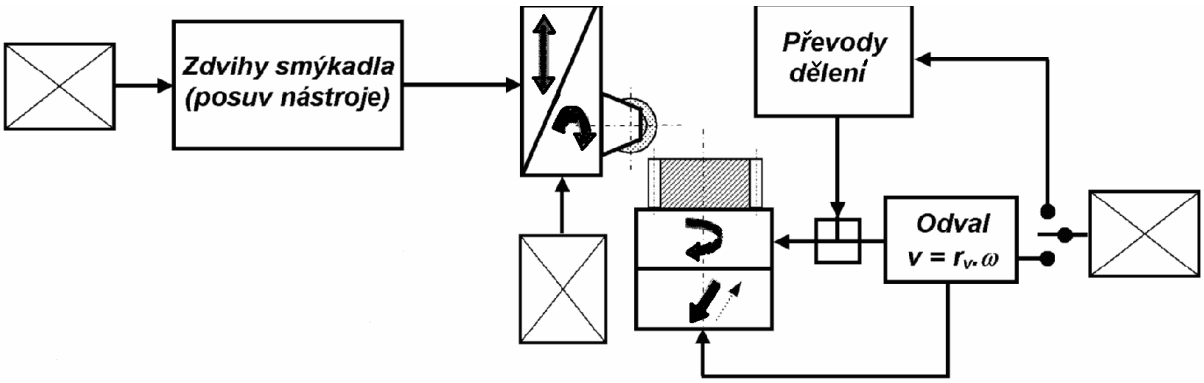
Princip KOLB

obr. 3.27b [8]



Výběh nástroje na bruskách Niles (Kolb)

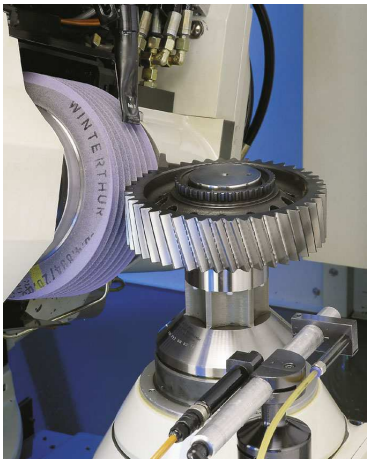
obr. 3.27c [8]



Obr. 3.27d Blokové kinematické schéma brusek typu Niles a Kolb [8]

Na bruskách typu *Reishauer* se brousí odvalovacím brousícím šnekem (obr. 3.28). Tento systém je vhodný i pro nejmenší moduly, přičemž je to metoda velmi přesná a výkonná. [1]

Princip činnosti odvalovacích brusek typu *Reishauer* je shodný s principem odvalovacích frézek. [8]



Obr. 3.28 Odvalovací broušení ozubených kol systémem Reishauer [15]



Obr. 3.29 Bruska pro odvalovací broušení [15]

Na bruskách typu *Maag* se ozubené kolo brousí dvěma tenkostěnnými talířovými brusnými kotouči, které jsou buď vzájemně skloněné pod úhlem 2α, nebo jsou rovnoběžné. [8]

U systému *Maag* je odvalovací pohyb vytvářen superpozicí příčného a rotačního pohybu obrobku. Otáčení obrobku se dosahuje odvinováním ocelových pásů z kotouče (nebo kruhového segmentu), jehož poloměr je roven poloměru základní kružnice brouseného kola, zmenšeného o tloušťku odvinovaných pásů. Střídavým pohybem příčného suportu je zajištěno postupné odvalování a broušení zubové mezery. Kromě toho koná podélný suport pohyb ve směru osy kola, čímž je dosaženo obroušení zubu po celé délce zubu. Po dokončení jedné zubové mezery se broušené kolo pootočí o jednu rozteč a cyklus se opakuje. [2]

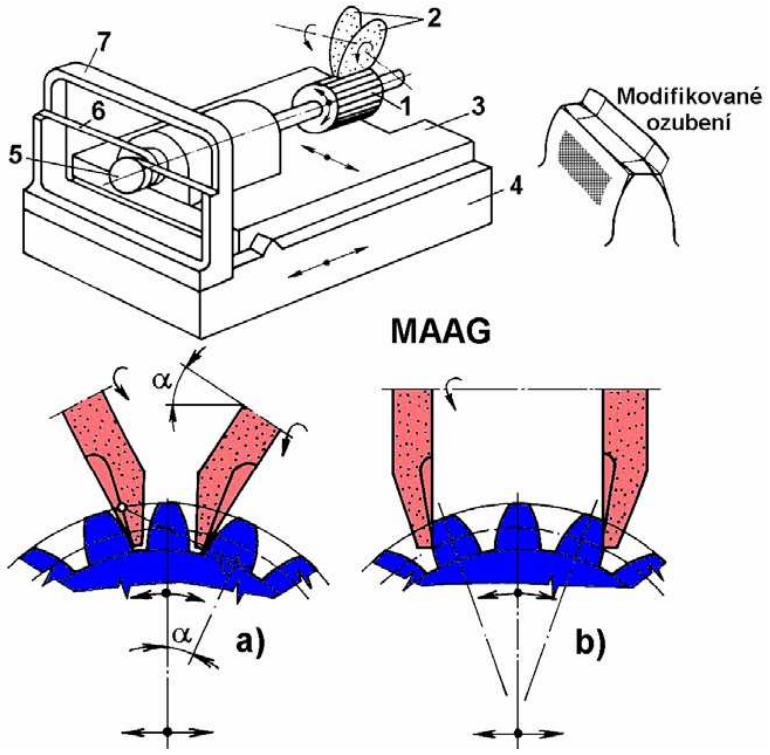
Jestliže jsou brusné kotouče vzájemně skloněné (obr. 3.30a), hovoříme o tzv. *20 nebo 15stupňovém způsobu*. Brusné kotouče jsou vzájemně skloněné o dvojnásobný úhel záběru 2α (α = 20° nebo 15°) a představují základní profil brouseného ozubeného kola. [8]

Pokud jsou brusné kotouče vzájemně rovnoběžné (svírají nulový úhel), hovoříme o tzv. *nulovém způsobu* (obr. 3.30b). [8]

Brousicí kotouč se dotýká boku zubu v jediném bodě, takže dokončený povrch zubu nemá křížový výbrus, ale podélné rovnoběžné stopy. Pomocí zvláštního zařízení lze při tomto způsobu broušení upravit (modifikovat) zuby výškově i podélně (obr. 3.30). Úprava evolventy na hlavě a patě, tj. modifikace profilu, se uskutečňuje tak, že se obrysová křivka profilu odsune za evolventu v místech hlavy a paty, a tím se omezuje dotyk hlavy zubů jednoho kola se zuby druhého kola. Úpravou po délce zubu se odsunuje obrysová čára na obou koncích zubu, takže zub dostane soudečkovitý tvar, který zabraňuje nosnému styku na hranách zubu. [2]

Výhodou brusek typu *Maag* je jejich kinematická jednoduchost a vysoká přesnost. Nevýhodou je nižší řezný výkon, protože tenkostěnné kotouče jsou málo tuhé a dovolují jen malý možný úběr materiálu. Další nevýhodou je rychlé opotřebení brusných kotoučů. [8]

Vzhledem k rychlému opotřebení kotoučů má stroj automatické zařízení pro orovnávání činné části brousících kotoučů. [1]



Obr. 3.30 Broušení čelního ozubení s odvalem boku zubu [2]

a) broušení Maag pomocí kotoučů skloněných pod úhlem záběru, b) broušení Maag kolmo postavenými kotouči (tzv. nulový způsob), 1 - obrobek, 2 - brousicí kotouče, 3- příčný suport, 4 - podélný suport, 5 - odvalovací kotouč, 6 - ocelový pás, 7 - stojan odvalovacího zařízení

3.4 Ševingovací stroje

Zuby nekalených kol s tvrdostí do HRC 36 lze dokončovat zaškrabáváním neboli ševingováním. Ševingovací stroje pracují odvalovacím způsobem. [1]

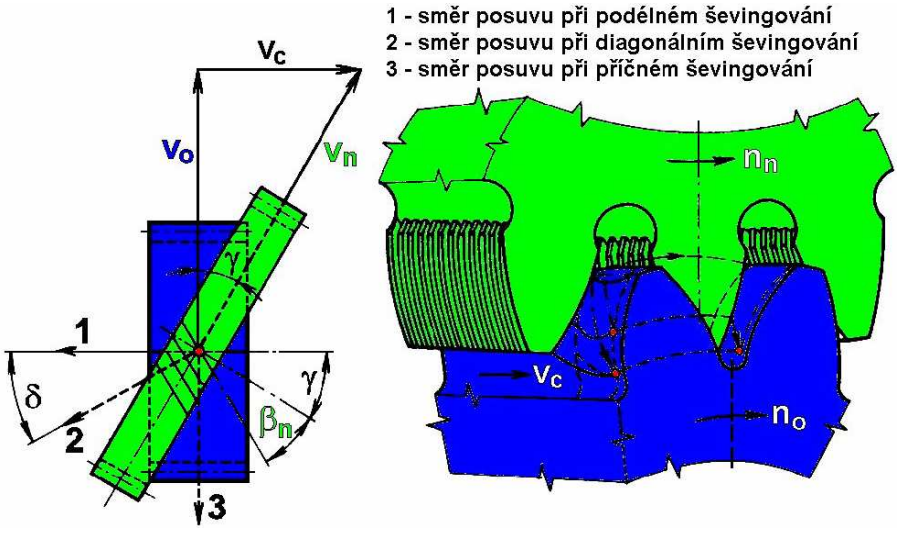
Nástroj (ševingovací kolo) na evolventní ozubení (méně často ozubený hřeben) je ozubené kolo, u něhož jsou na bocích šikmých (šroubových) zubů zhotoveny drážky vhodných rozměrů a tvaru. Tím se vytvoří řada řezných hran, které při záběru odebírají jemné třísky. Mezi nástrojem a obrobkem vzniká relativní pohyb ve směru osy obrobku a vzniklý relativní skluz zubů je řezný pohyb. Při ševingování je nástroj s obrobkem v záběru bez vůle. Hloubka rýh v bocích zubů nástroje je 0,6 až 1 mm (obr. 3.31). Rozteč drážek, které tvoří řezné hrany, je asi 0,75 mm. Princip této dokončovací operace na ozubených kolech je na obr. 3.32. [1]



Obr. 3.31 Ševingovací kola [2]

V závislosti na kinematických poměrech ševingovacího procesu se rozlišuje ševingování podélné (posuvový pohyb je rovnoběžný s osou obráběného kola), diagonální (osa obráběného kola svírá se směrem posuvového pohybu úhel **δ**, 0º<δ<45º), diagonálně příčné (45º<δ<90º), příčné (δ=90º) a zapichovací (nástroj koná radiální posuv). [2]

Nástroj i obrobek při ševingování rotují obvodovou rychlostí 80 až 120 m . min^{-1} (hodnoty v_n a v_o musí však být rozdílné), rychlost ševingování (v_c) dosahuje až 30 m . min^{-1}. Hodnoty radiálního posuvu se při podélném ševingování pohybují v rozsahu 0,015 až 0,045 mm na jeden dvojzdvih stolu, podélný posuv v rozsahu 0,2 až 0,5 mm na jednu otáčku obrobku. Odebírané přídavky na bocích zubů dosahují velikosti 0,04 až 0,10 mm. [2]



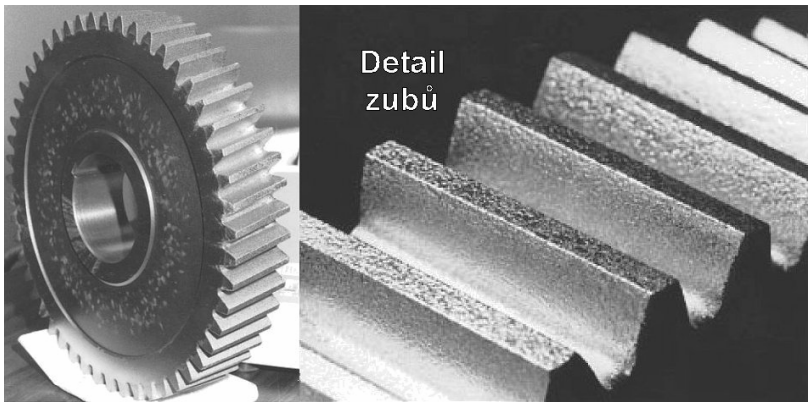
Obr. 3.32 Princip podélného ševingování [2]



Obr. 3.33 Ukázka ševingovacího stroje [16]

3.5 Honovací stroje

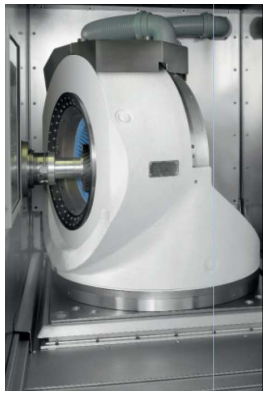
Na stejném principu jako ševingování je založeno i *honování ozubených kol*, které bývá někdy též označováno jako „brousicí ševingování“. Používá se výhradně u kalených kol a to pro zlepšení tvaru zubů, snížení drsnosti jejich funkčních povrchů nebo k odstranění malých úchylek po tepelném zpracování, případně menších poškození na zubech, vzniklých při manipulaci. Provádí se na stejných strojích jako ševingování nebo na speciálních strojích. Nástrojem může být ozubené kolo vyrobené ze směsi plastu a brusiva nebo ocelové ozubené kolo, jehož zuby jsou pokryty tenkou vrstvou diamantového brusiva, vázaného pryskyřičným nebo kovovým pojivem (obr. 3.34). [2]



Obr. 3.34 Nástroj s diamantovým brusivem pro honování ozubených kol [2]



Obr. 3.35 Honovací stroj [13]

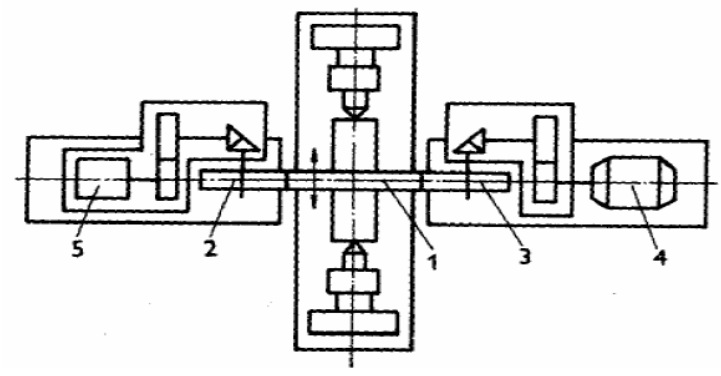


Obr. 3.36 Pracovní prostor s honovací hlavou, nástrojem a obrobkem [13]

3.6 Lapovací stroje

Využívají se především u kalených ozubených kol pro zlepšení kvality povrchu a zvýšení přesnosti geometrického tvaru zubů nebo pro odstranění deformací vzniklých tepelným zpracováním.

Lapováním se docílí hladký povrch kol (R_a=0,1 až 0,2μm). Na obr. 3.37 je schematické uspořádání stroje. Lapované kolo (1) je v záběru s jedním nebo dvěma ozubenými litinovými lapovacími koly(2 a 3). Kola se brodí v petrolejové nebo olejové lázni s rozptýleným smirkem nebo grafitem. Lapovací kolo (3) je poháněno motorem (4), další kolo (2) je brzděno hydraulickou brzdou (5), u které lze nastavit tlak i točivý moment. Lapované kolo je uloženo mezi hroty na příčně pohyblivých saních ve směru osy kola. Počet i velikost zdvihu saní jsou regulovatelné. Doba lapování je od 2 sekund do 20 minut. Po této době se změní smysl otáčení a lapují se opačné boky zubů. [1]



Obr.3.37 Schéma lapovačky na ozubení [8]



Obr. 3.38 Ukázka CNC lapovačky s pracovním prostorem [14]

ZÁVĚR

Odvalovací ozubárenské stroje se díky vývoji technologie výroby, aplikaci nových řezných materiálů a využití nových materiálů ve stavbě strojů stávají stále výkonnějšími. Stoupá rychlost a přesnost těchto strojů. Zvyšuje se komfort při obsluze strojů pomocí nových řídicích systémů strojů, které umožňují i při nižší kvalifikaci obsluhujících pracovníků zvyšovat produktivitu práce.

Tato bakalářská práce byla zaměřena na popis a rešerši odvalovacích ozubárenských strojů současné produkce. Z nastudovaných teoretických poznatků vyplývají tyto body:

- současné ozubárenské stroje pracující odvalovacím způsobem jsou téměř výhradně číslicově řízené pomocí počítače (CNC stroje), díky těmto strojům se výrazně zjednodušil kinematický řetězec oproti konvenčním strojům,
- moderní trendy ve výrobě a stavbě strojů jsou především v aplikaci pětiosého a víceosého obrábění, HSC nebo HSP obrábění, eliminaci tepelných zdrojů, teplotní stabilitě, snižování strojních časů, snaze o standardizaci, modularitu a využití nových materiálů ve stavbě strojů (např.plastů), zvyšování rychlosti manipulace s nástroji a obrobky a větším využití lineárních motorů,
- snaha o zvyšování produktivity obrábění používáním vysoce výkonných nástrojů, např. s moderními PVD povlaky u frézování nebo kotouči s CBN u broušení,
- stále větší význam se přikládá ekologii, a proto se i výrobci ozubárenských strojů snaží nabízet řešení strojů s ekologickým provozem – využívá se ekologické krytování spolu s odsáváním pracovního prostoru,
- velký důraz je kladen na bezpečnost práce, proto jsou stroje současné produkce vybaveny bezpečnostními prvky, včetně zakrytování.

Význam a využití ozubených kol dává jistotu, že i nadále budou hrát stroje pro výrobu ozubení, a to především stroje pracující odvalovacím způsobem, důležitou a významnou roli v celkovém spektru obráběcích strojů. V době, kdy se na strojích začíná využívat ovládání hlasem, vytváří se nové materiály a technologie, lze jen těžko předvídat, jakým směrem se budou odvalovací ozubárenské stroje dále vyvíjet. Z velkého zájmu o tyto stroje je však patrné, že to budou právě stroje pracující odvalovacím způsobem, které budou určovat nové směry ve výrobě ozubení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] BORSKÝ, V. *Obráběcí stroje*, *skriptum ES VUT*, I. vydání, Olprint Šlapanice, 1992, s.216, ISBN 80-214-0470-1
[2] HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění – 2. část*, *studijní opory pro magisterskou formu studia*, 2004, s. 95
[3] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*, 2006, ISSN 1212-2572. Kapitola 11, CNC obráběcí stroje na ozubení, s. 176-182.
[4] VĚTROVEC, K.,SKOPAL, J. *Normalizace a rozvoj převodových systémů s ozubenými koly*. MM Průmyslové spektrum, listopad 2004, číslo 11, ISSN 1212-2572
[5] SKOPAL, J., UHLÍŘ, R. *Mezinárodní normy určené pro oblast výroby a provoz ozubených kol*. MM Průmyslové spektrum, červen 2006, číslo 6, ISSN 1212-2572
[6] HOLUBÁŘ, P., CSELLE, T. *Výkonnost nástrojů s moderními PVD povlaky*. MM Průmyslové spektrum, prosinec 2004, číslo 12, ISSN 1212-2572
[7] KOLÁŘ, P. *EMO Hannover potřetí– Brousicí stroje*. MM Průmyslové spektrum, prosinec 2007, číslo 12, ISSN 1212-2572
[8] *Stroje na výrobu ozubenia. Študijný materiál.* Technická univerzita v Košiciach, Strojnická fakulta. [online] <http://www.sjf.tuke.sk/kvtar/1/files/15_Stroje_na_Vyrobu_Ozubenia.pdf> [cit. 2008-03-25]
[9] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*, 2006, ISSN 1212-2572. Kapitola 3, O CNC strojích, s. 12 - 16.
[10] NOVOTNÝ, W., L., MAREK, J. *EMO Hannover podruhé – Obráběcí stroje*. MM Průmyslové spektrum, listopad 2007, číslo 11, ISSN 1212-2572
[11] TOS výrobce obráběcích strojů. *Nabídka ozubárenských strojů*. [online] <http://www.tosas.cz/index.php?id_document=10088> [cit. 2008-03-28]
[12] GRUBER, J. *Převody ozubenými koly*. [online] <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/prezent/12ozub.pps > [cit. 2008-03-28]
[13] Gleason Corporation. *Products*. [online] <http://www.gleason.com/products.html> [cit. 2008-03-28]
[14] Klingelnberg. *Products*. [online] <http://www.klingelnberg.info/en/produkte/c_42.php > [cit. 2008-03-28]
[15] Reishauer. *Gear Grinding Machines*. [online] <http://www.reishauer.com/portal/loader.php?seite=rz303c_en&navigation=13759&root=2327> [cit. 2008-03-28]
[16] Samputensili. *Machines*. [online] <http://www.samputensili.com/nqcontent.cfm?a_id=16864> [cit. 2008-03-28]
[17] *Tecnología Mecánica I.* Universidad de Buenos Aires, Facultad de ingenieria. [online] <http://www.fi.uba.ar/materias/6715/Fotos_archivos/Engranajes/Engranaje.htm> [cit. 2008-03-28]