

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Ivan Hejl

**NÁVRH METODIKY OPTIMÁLNÍ KONSTRUKCE
ŠNEKOVÉ PŘEVODOVKY V SYSTÉMU Pro/ENGINEER
A Pro/MECHANICA, ZOHLEDŇUJÍCÍ VEŠKERÉ PROVOZNÍ
PODMÍNKY, PŘI VYSOKÉ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI**

DESIGN OF METHODOLOGY OPTIMAL WORM-GEAR UNIT
CONSTRUCTION IN SYSTEM Pro/ENGINEER AND Pro/MECHANICA,
WITH RESPECT TO ALL WORKING CONDITIONS,
ON HIGH OPERATING LIFE AND RELIABILITY

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Dušan Kolář, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Ing. Květoslav Stupka, CSc.

Datum obhajoby: 13. 5. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

Šnekové převody, převodové skříně, CAE systémy, Pro/ENGINEER, Pro/MECHANICA, konstrukční optimalizace, tribologie, třecí vlastnosti, bronzы

KEY WORDS

Worm gear units, gear boxes, CAE systems, Pro/ENGINEER, Pro/MECHANICA, optimization, tribology, friction properties, bronzes

MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE	6
3 TEORIE ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ.....	7
3.1 Rozdělení a základní rozměry šnekových soukolí.....	8
3.2 Účinnost šnekových soukolí	9
4 VÝPOČTY ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ.....	10
4.1 Pevnostní výpočty.....	10
4.2 Výpočty na oteplení.....	10
4.3 Výpočet hřídelů.....	10
5 MATERIÁLY ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ	11
5.1 Kovové materiály.....	11
5.2 Nekovové materiály – plasty	12
6 KONSTRUKCE SKŘÍNÍ PRO ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ	13
6.1 Konstrukční provedení šnekových převodovek.....	13
6.2 Zásady pro návrh skříně.....	14
6.3 Výpočty skříně.....	14
7 STANOVENÍ TŘECÍCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ.....	16
7.1 Zkušební zařízení.....	16
7.2 Měřené materiály a oleje.....	16
7.3 Výsledky měření	17
8 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	18
8.1 Analýza naměřených dat – intervaly spolehlivosti	18
8.2 Analýza rozptylu – Friedmanův test.....	18
9 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ	19
10 ZÁVĚR.....	21
11 LITERATURA	22
AUTOROVY PUBLIKACE K DANÉ PROBLEMATICE	25
AUTOROVO CURRICULUM VITAE	26
ABSTRACT	27

1 ÚVOD

Ozubené převody jsou nejvíce rozšířeným typem mechanických převodů. Mechanismy s ozubenými koly umožňují přenos rotačního pohybu mezi rovnoběžnými, různoběžnými i mimoběžnými hřídeli. Základní typy ozubených převodů se rozdělují podle vzájemné polohy os hnacího a hnaného hřídele. Obecně mohou tyto osy být v prostoru mimoběžné.

V případě šnekových převodů jsou oba hřídele mimoběžné a svírají v prostoru pravý úhel. Šnekové převody se používají především pro své výhody, které je při výběru vhodného převodu v určitých případech upřednostňují před ostatními typy převodů. K hlavním výhodám patří především vysoký převodový poměr ($i = 50$ až 120 i více), velká zatížitelnost, tichý a plynulý chod v celém rozsahu provozních otáček, možnost dosažení samosvornosti (avšak na úkor účinnosti), malé rozměry a nízká hmotnost.

Šnekové převody mají samozřejmě také jisté nevýhody. Je to především velký skluz v ozubení, způsobující vyšší ztráty třením a tím i nižší účinnost převodu (cca 45 až 90 %). Důsledkem těchto vyšších ztrát je vznik poměrně velkého množství tepla. Toto vznikající teplo musí být dostatečně odváděno a proto by měl být u šnekových převodovek brán velký zřetel na vhodnou konstrukci skříně, popřípadě na návrh vhodného chlazení. Nevýhodou šnekových převodů je také náročnější a dražší výroba ozubení a jeho životnost bývá vinou opotřebení nižší než u jiných ozubených soukolí.

V souladu s celkovým trendem vývoje ozubených převodů, který směřuje k silně zatížitelným převodům malých rozměrů, schopným přenášet vysoké výkony, při dlouhé životnosti, je snahou zvýšit účinnost a možnost zatížení i u šnekových převodů. Tyto požadavky vedou k používání nových, nebo dříve málo používaných, profilů ozubení šneku (konkávní ozubení, obálkové šneky), k hledání nových materiálů věnců šnekových kol (např. bronzy s malým obsahem niklu), a především k nasazení moderních výpočtových a konstrukčních systémů ve fázi návrhu převodu.

2 CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

Šnekové převodovky mají horší účinnost než ostatní typy převodovek, např. s čelními koly. Vlivem většího ztrátového výkonu dochází ke značnému zahřívání převodové skříně a u převodovek přenášejících vyšší výkony a nebo pracujících v nepřetržitém provozu může dojít k přehřátí (překročení dovolené teploty použitého maziva). Nízká účinnost a nebezpečí přehřátí jsou obecně hlavními problémy u šnekových převodů. Tato práce se proto zabývá dimenzováním šnekových převodů s ohledem na maximální účinnost a zvláštní pozornost je věnována kontrolním výpočtům na oteplení.

Další problematikou je použití moderních konstrukčních a výpočtových systémů při návrhu a kontrolních výpočtech převodovek. Jedním z cílů této práce je proto ukázat možnosti nasazení a využití těchto systémů v konstrukční praxi při návrhu šnekových převodů.

Účinnost a životnost šnekových převodů významně ovlivněna použitými materiály. Třecí vlastnosti používaných materiálů však nejsou většinou známy, proto je praktická část této práce zaměřena na experimentální stanovení těchto vlastností.

Z hlediska dosažené úrovně poznání problematiky šnekových převodovek a dle analýzy výše uvedených problémů, byly hlavní cíle disertační práce stanoveny následovně:

- Podat ucelený přehled o současné úrovni problematiky šnekových převodů včetně skříní pro tyto převody.
- Ukázat možnosti použití moderních konstrukčních a výpočtových systémů (obecně CAE systémů) při návrhu a kontrole šnekových převodů.
- Vhodnou experimentální metodou zjistit třecí vybraných vlastnosti materiálů pro šnekové převody.

Pro lepší přehled o obsahu této disertační práce je možné uvedené hlavní cíle rozvést na dílčí cíle:

- přehledný popis současné teorie šnekových převodovek
- popis v technické literatuře často opomíjené části teorie převodů, kterou je konstrukce návrh a výpočet převodových skříní
- přehled v současné době používaných výpočtů šnekových soukolí, které nahrazují zastaralou a již nevyhovující normu ČSN 01 4780 z roku 1955
- analýza možností zvýšení účinnosti šnekových převodů
- možností použití moderních konstrukčních a výpočtových systémů při návrhu šnekových soukolí a převodových skříní
- podrobný přehled materiálů používaných na šneková soukolí se zvláštním zaměřením na možnosti použití plastů
- návrh metody pro zjištění třecích vlastností materiálů
- stanovení třecích vlastností vybraných materiálů navrženou experimentální metodou

3 TEORIE ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ

Šnekové soukolí slouží k vytvoření kinematické a silové vazby mezi dvěma mimoběžnými hřídeli v místě nejkratší příčky; úhel os je 90° . V přiblížení je možno šnekové soukolí považovat za zvláštní případ šroubového soukolí, u něhož počet zubů jednoho kola (zpravidla hnacího) klesl na minimum, tj. $z_1=1,2,3\dots$. Šířka tohoto kola několikanásobně překračuje roztečný průměr, takže ozubený člen připomíná jednochodý nebo i vícechodý šroub; je označován jako *šnek* a spolu zabírající člen jako *šnekové kolo*. Šneková soukolí se používají především pro své výhody oproti jiným druhům ozubených soukolí, i když mají samozřejmě i své nevýhody.

Výhody šnekových soukolí:

- Jedním šnekovým soukolím lze běžně dosáhnout převodu $i=50$ až 100 a v některých případech i více. K dosažení takového převodu jiným typem soukolí by bylo zapotřebí např. dvou až tří stupňů čelního a kuželového soukolí.
- Velká zatížitelnost. U šneku s klesajícím počtem zubů neroste křivost boku zubu. U všech ostatních druhů kol rychle vzrůstá křivost boku s klesajícím počtem zubů u pastorku. Tím má šnekové soukolí dobré podmínky pro vytváření olejového filmu. Výhodný je i relativní pohyb zabírajících ploch. Při záběru se nepatrně mění rychlost a smysl relativního pohybu skluzu a vzhledem k ploše působí skluz během celého záběru ve stejném smyslu. Při výhodné křivosti ploch a relativním pohybu skluzu může šnekové soukolí přenášet velké výkony.
- Tichý a plynulý chod při velkém i malém počtu otáček po celou dobu provozu. Díky příznivému tvaru a skluzu zabírajících ploch za působení maziva je šnekové soukolí nejtichším ozubeným převodem.
- Možnost dosažení samosvornosti při malé účinnosti.

Nevýhody šnekových soukolí:

- Hlavní nevýhodou šnekových soukolí (hlavně s válcovým šnekem) je menší účinnost než má soukolí čelní a kuželové. Účinnost šnekových soukolí se prakticky pohybuje v rozsahu $\eta=45$ až 90% . Závisí hlavně na úhlu γ stoupání šneku. Při přesné výrobě se dosáhne větší účinnosti, avšak při nedokonalé výrobě a montáži často i menší. Při větším počtu chodů šneku a výhodném sdružování materiálů může být účinnost η podstatně větší.
- Při nízké účinnosti šnekového soukolí vzniká teplo, které je v některých případech nutné odvádět i umělým chlazením.

Dlouhá životnost, tichost a lepší účinnost šnekového soukolí závisí především na správné technologii jeho výroby, na přesném a tuhém uložení šneku a kola a rovněž na vhodném mazivu.

3.1 ROZDĚLENÍ A ZÁKLADNÍ ROZMĚRY ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ

Podle tvaru šneku a kola se šneková soukolí dělí na soukolí válcová, soukolí globoidní a soukolí smíšená. V praxi se však používají převážně jen soukolí smíšená a globoidní.

Šneková soukolí válcová se používají pouze v nenáročných případech (občasný provoz, ruční pohon). Šnek připomíná pohybový šroub s lichoběžníkovým profilem (tzv. *Archimédův šnek*) a šnekové kolo odpovídá válcovému kolu se šikmými zuby. Dotyk v ozubení je teoreticky bodový.

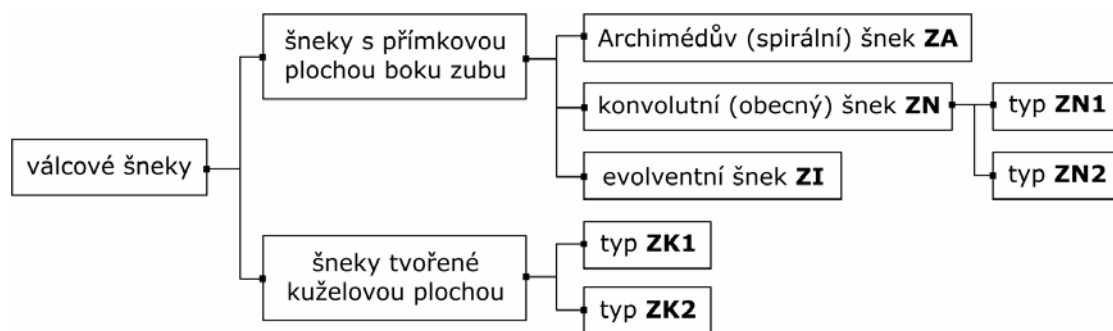
U soukolí smíšených je šnek válcový a kolo globoidní. Dotyk v ozubení je teoreticky čárový. Ozubení soukolí je determinováno ozubením šneku, které je geometricky určeno boční plochou zubů. V technické praxi je tento typ šnekových soukolí nejrozšířenější.

Šnek i kolo mají tvar globoidů, což umožňuje současný záběr poměrně velkého množství zubů, $z=4$ až 8. Tato soukolí mají výhodné záběrové poměry a jejich únosnost je 2-3krát vyšší než u rozměrově srovnatelných převodů s válcovým šnekem. Jejich většinu rozšíření a používání brání podstatně složitější a tím i dražší výroba.

Disertační práce je zaměřena především na nepoužívanější smíšená soukolí s válcovým šnekem a jen okrajově se zabývá i soukolími globoidními.

3.1.1 Šneková soukolí s válcovým šnekem

Válcové šneky se dále dělí podle plochy boku závitu šneku (tedy podle způsobu výroby) na šneky s přímkovou plochou boku závitu a na šneky tvořené kuželovou plochou. Rozdělení šnekových soukolí a způsob jejich značení je dán normou ČSN 01 4755.



Obr.1: Rozdělení a značení válcových šneků.

Výpočet geometrických rozměrů uvedených typů válcových šneků je uveden v disertační práci. Výpočty pro běžné typy válcových šneků (ZA a ZN) jsou poměrně často publikovány, např. v [2], [9], [10], [11], [47]. Rozměry ostatních typů šneků sice z těchto výpočtů také vycházejí, mají však některá svá specifika [11] [27] [35] [44].

3.1.2 Šneková soukolí s globoidním šnekem

Globoidní šnekové soukolí má roztečná tělesa obou členů, šneku i šnekového kola, globoidní. Stejně, jako u soukolí s válcovým šnekem, je určující tvar plochy závitu šneku a plocha boku zubu kola je obálkou zvolené plochy při dané vzdálenosti os a převodovém poměru.

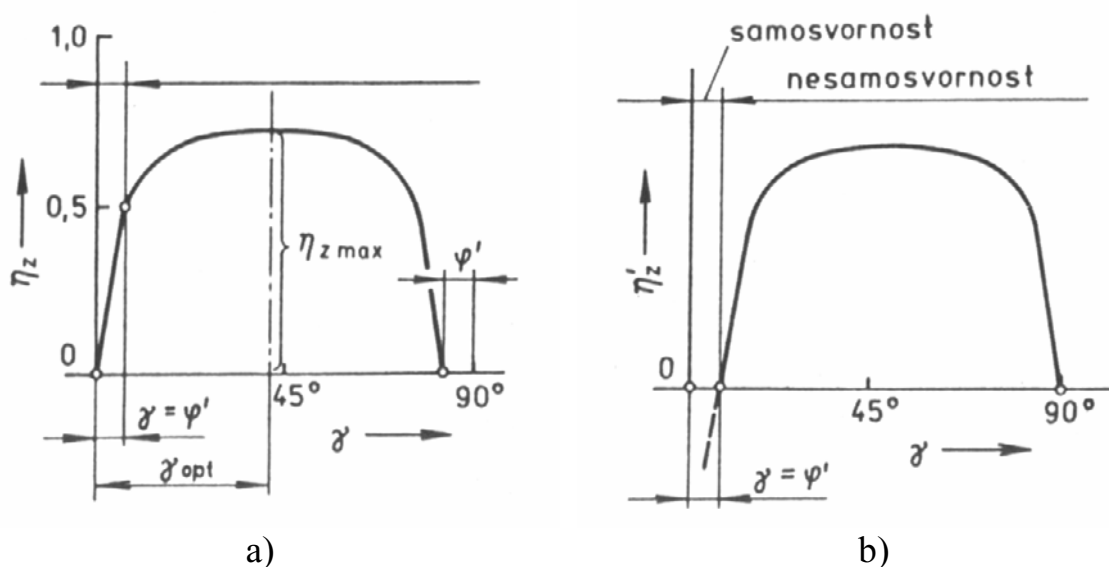
Rozdělení globoidních soukolí je tedy možné provést podle druhu ozubení globoidního šneku. Pro geometrii plochy boku závitu je určující způsob výroby, zejména tvar a pohyb nástroje na ozubení. Podle toho se globoidní šneková soukolí dělí do dvou základních skupin:

- globoidní soukolí se šnekem s přímkovou globoidní šroubovou plochou
- globoidní soukolí se šnekem obáلكovým

Další podrobné dělení globoidních šnekových soukolí, včetně výpočtu jejich geometrických rozměrů je uvedeno v disertační práci

3.2 ÚČINNOST ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ

Obecně je účinnost ozubení definována jako poměr výkonu na členu hnaném a hnacím. U šnekových soukolí je třeba rozlišovat případ, kdy hnacím členem je šnek a kdy šnekové kolo.



Obr.2: Účinnost - a) hnacím členem je šnek b) hnacím členem je kolo

S rostoucím úhlem stoupání účinnost η_z v obou případech rychle stoupá a přechází v téměř plochý extrém, pak stejně rychle klesá. Křivka je symetrická a její vrchol, odpovídá maximální účinnosti. V případě, kdy hnacím členem je kolo, je důležitým bodem průsečík křivky s osou, který vyznačuje tzv. mez samosvornosti. Převody, u nichž je úhel stoupání menší než tato mez samosvornosti jsou samosvorné, což znamená, že ani sebevětší moment na šnekovém kole nevede soukolí do pohybu

(využívá se především u zdvihacích mechanismů). Jak je vidět z grafu, je účinnost samosvorných soukolí velice nízká (vždy menší než 50 %).

Kromě úhlu stoupání má na účinnost vliv také součinitel tření. Velikost součinitele tření je závislá na dvojici materiálů spolu zabírajících zubů, na jakosti povrchů, na použitém mazivu a na skluzové (třecí) rychlosti. Vhodnou volbou materiálu šneku a šnekového kola a volbou vhodného maziva, lze značně ovlivnit nejen účinnost, ale i životnost ozubení šnekového soukolí [2] [47].

Podrobný popis účinnosti šnekových soukolí a možnosti její zvýšení jsou uvedeny v disertační práci.

4 VÝPOČTY ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ

Výpočtem se ověřuje, zda soukolí bude v provozu plně využité a zda bude během své životnosti pracovat bez poruch s nejmenším opotřebením a oteplením. Šneková soukolí se počítají na pevnost a na oteplení. Rovněž se kontrolují hřídele šneku i kola na kombinované namáhání ohybem a krutem.

4.1 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY

Řeší se především pevnost zubů šnekového kola, které mají zpravidla menší únosnost než zuby šneku. To je dáno rozlišným tvarem (u šneku spirála) a materiálem zubů (věnce kol z bronzů). Za výchozí se považuje výpočet na dotyk, kterým se předchází tvorbě pittingu (při použití cínových bronzů odolných proti zadírání) a zadírání (při použití bronzů s malým nebo žádným obsahem cínu nebo u litiny). Výpočet zubů na ohyb bývá pak většinou už jen kontrolní [10] [47].

Pevnostní výpočet šnekových soukolí uvádí norma ČSN 01 4780 z roku 1955, která je dnes již překonaná a v odborné literatuře se objevují novější výpočty, které jsou v disertační práci popsány.

4.2 VÝPOČTY NA OTEPLENÍ

Kontrolní výpočet proti nadměrnému oteplení (přehřátí) převodovky je v normě ČSN 01 4780 uveden jen „okrajově“. V technické literatuře se však objevují výpočty, které umožňují poměrně přesně stanovit vznikající ztráty v převodovce a počítají s tzv. tepelným výkonem převodové skříně, který udává, jaký zmařený výkon je skříně schopna odvádět [34] [41] [47].

V disertační práci jsou popsány nejčastěji používané výpočty, včetně výpočtu dle ČSN 01 4780.

4.3 VÝPOČET HŘÍDELŮ

Při přenosu kroutícího momentu vzniká ve šnekovém soukolí normální síla, která se dále rozkládá na obvodovou sílu, radiální sílu a axiální sílu. Těmito silami jsou hřídele šneku a kola namáhány na ohyb a na krut. U obou hřídelů je proto nutné kontrolovat napětí a deformace vznikající při ohybu a při kroucení.

Pro výpočet je možné použít „klasické“ analytické řešení, založené na výpočtu napětí a deformací v ohybu popř. v krutu pomocí průřezových modulů, nebo použít metodu konečných prvků - MKP. Při řešení pomocí MKP je vhodné použít výpočtový systém, který je na této metodě založen. V tomto případě je ukázán výpočet v systému *Pro/MECHANICA*. Řešení pomocí systému *Pro/MECHANICA* umožňuje provádět výpočty na modelu, který odpovídá skutečnosti. Proto jsou i získané výsledky podstatně přesnější a odpovídající skutečnému stavu, než u analytického výpočtu uvedeného v předchozí kapitole.

Pro dosažení přesného záběru ozubení šneku a kola, je kromě přesného uložení obou hřídelů, nutný i co nejmenší průhyb šnekového hřídele. Tento požadavek co nejmenšího průhybu vede k velkým průměrům šnekového hřídele a k umístění ložisek co nejblíže u šneku.

Prohnutí šnekového hřídele nesmí překročit hodnotu tzv. dovoleného průhybu, jehož velikost je stanovena dle zkušeností z provozu šnekových převodů a v odborné literatuře se objevují různé vztahy pro jeho stanovení, např. v [2] nebo [34].

5 MATERIÁLY ŠNEKOVÝCH SOUKOLÍ

Materiály šnekových soukolí (šneku a šnekového kola) se volí dle velikosti přenášeného výkonu, počtu otáček, převodového poměru, kluzné rychlosti, konstrukce vlastního soukolí a uložení, technologie výroby, sériovosti výroby, pracovního prostředí, druhu zatížení (klidné nebo rázy), časového průběhu zatížení a vhodnosti materiálové dvojice (různý materiál šneku a kola). Na všechny tyto parametry musí být při volbě materiálů soukolí brán zřetel.

Vzhledem k vysokým tlakům a velkým kluzným rychlostem v ozubení šnekových soukolí jsou při volbě materiálů spolu zabírajících členů rozhodující především třecí vlastnosti a dobrá zabíhavost (přizpůsobení povrchů při záběhu). Požadavky na mechanické vlastnosti materiálů vyplynou z výpočtů životnosti a bezpečnosti proti ulomení zubu.

5.1 KOVOVÉ MATERIÁLY

Pro výrobu šnekových převodů se používají především kombinace kovových materiálů. Šnek bývá z pravidla ocelový a šnekové kolo bronzové (z úsporných důvodů je bronzový jen věnec nalisovaný nebo nalitá na litinovém nebo ocelovém náboji), nebo pro malá zatížení i litinové. Při párování materiálů by měl být dodržen rozdíl v tvrdostech, šnek má být minimálně o 15 až 25 HB tvrdší oproti kolu, protože se otáčí rychleji než kolo a tak by se podstatně rychleji opotřebovával a také aby nedocházelo při vyšších zatíženích k zadírání.

5.1.1 Materiál šneku

Šneky, resp. šnekové hřídele, se většinou vyrábějí z ocelových tyčí, výjimečně z výkovků (u větších rozměrů). Pro nízké zatížení a malé rychlosti se používají materiály 11 600 a 11 700 bez tepelného zpracování. U rychloběžných a značně

zatížených převodů se na šneky používají zušlechtěné oceli 12 050, 12 060, 13 240, 15 131, 15 241 – boky zubů se povrchově kalí, nebo cementační oceli 12 020, 14 220, 16 220. Po kalení, případně po cementování (nitridování) a kalení se šneky brousí a leští (při nitridaci může odpadnout broušení a stačí jen leštit). Šneky ve stavu zušlechtěném, nebo normalizačně žíhaném, se nebrousí (vzhledem k jejich použití pro podřadnější případy). Volbou vhodného materiálu a technologie jeho zpracování, by se mělo dosáhnout toho, aby boky zubů šneku byly tvrdé a hladké. Mimo jiné se tím i snižuje nebezpečí tzv. nalepování bronzů z věnce šnekového kola na zuby šneku. Nejlepších účinností se dosahuje, je-li šnek cementovaný, kalený, broušený a leštěný při tvrdosti povrchu zubu 56 až 62 HRC.

5.1.2 Materiál šnekového kola

Základním materiálem pro šneková kola je bronz, v některých případech se však také používá mosaz nebo šedá litina.

Šneková kola pro malé výkony, klidný chod a kluzné rychlosti do 2 ms^{-1} se vyrábějí ze šedé litiny. Používají se především litiny 42 2415, 42 2420, 42 2425 a 42 2430. Pro více namáhané převody s nízkými rychlostmi se někdy používá i tvárná litina, např. 42 2442.

Za optimální materiál věnce šnekových kol se všeobecně považují cínové bronzы s vysokým obsahem cínu (10 až 12 %). Mají velice dobré třecí vlastnosti, vysokou odolnost proti zadírání a dobrou zabíhavost. Jejich nevýhodou je však vyšší cena a proto se používají jen v některých případech a to u velmi namáhaných převodů při kluzných rychlostech přesahujících 10 ms^{-1} . Pro rychlosti 4 ms^{-1} až 10 ms^{-1} se používají bronzы s nižším obsahem cínu (5 až 6 %).

Při rychlostech nepřekračujících 4 ms^{-1} je vhodné použít levnější bronzы bez přísady cínu, např. hliníkové nebo olovené a nebo mosazi. Mají sice lepší mechanické vlastnosti než cínové bronzы, jsou však méně odolné proti zadírání a hůře se zabíhají.

5.2 NEKOVOVÉ MATERIÁLY – PLASTY

U šnekových převodů je použití plastů omezeno jen na malá zatížení (kinematické převody), protože styk mezi zuby šneku a kola je malý a třecí (kluzná) rychlost velká, takže dochází ke značnému opotřebení. Použití plastů je vhodné, je-li požadován provoz bez mazání, dobré tlumení rázů a vibrací, tichý chod a odolnost proti korozi. Vstřikování termoplastů navíc umožňuje levnou sériovou výrobu.

Na šnekové kolo se obvykle používá *POM* (*polyformaldehyd*). Na šnek, kde by bylo větší opotřebení, buď ocel, nebo neplněný *PA66* (*polyamid*). Při provozu bez mazání nesmí, u kombinace materiálů *POM/ocel*, kluzná (třecí) rychlost překročit hodnotu $1,2 \text{ ms}^{-1}$, pokud je šnek z *PA66* pak $1,5 \text{ ms}^{-1}$. Je-li soukolí mazáno olejem, připouštějí se rychlosti zhruba dvakrát větší. Kromě třecí rychlosti je pro použití plastů limitující i tzv. dovolená obvodová síla [32].

6 KONSTRUKCE SKŘÍNÍ PRO ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ

Šnekové převodovky jsou velice citlivé na změnu záběrových poměrů během jejich provozu. Aby byl zajištěn správný záběr šnekového soukolí, musí být uložení šneku i kola přesné a nesmí se během času a při trvalém zatížení prakticky měnit. Proto je nutné konstruovat skříně šnekových převodovek dostatečně tuhé. U šnekových převodovek je také množství tepla vznikajícího vlivem tření šneku a kola podstatně větší než u běžných převodovek s koly s čelním ozubením. Těmto zvýšeným požadavkům na tuhost a odvod tepla se vyhovuje především správnou konstrukcí a použitím správného materiálu, popř. volbou vhodného technologického postupu.

6.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ ŠNEKOVÝCH PŘEVODOVEK

V technické praxi jsou v současné době nejvíce rozšířeny jednostupňové převodovky s válcovým šnekem. Je to dáno především jejich menší náročností na výrobu a montáž, než je tomu u převodovek globoidních.

Podle polohy os hřídelů se u šnekových převodovek vyskytují následující varianty:

- osy hřídelů jsou vodorovné a šnek je nad kolem
- osy hřídelů jsou vodorovné a šnek je pod kolem
- osa hřídele šneku je vodorovná a osa hřídele kola je svislá
- osa hřídele šneku je svislá a osa hřídele kola je vodorovná

Pro konstrukci globoidních převodovek platí podobné zásady jako pro konstrukci převodovek s válcovým šnekem. Protože se však globoidní převodovky používají pro přenos větších výkonů než převodovky s válcovým šnekem, liší se jejich konstrukce hlavně v těchto bodech:

- Pro stejný výkon bude globoidní převodovka menší než převodovka s válcovým šnekem. Proto je nutné vyrobít skříň tužší, aby byla zaručena správná poloha globoidního šneku a kola.
- Globoidní soukolí vyžaduje velmi přesnou vzájemnou polohu šneku a kola. Konstrukce převodovky by proto měla umožňovat seřízení polohy globoidního šneku a kola v rovinách os.
- Množství tepla vznikajícího v globoidních převodovkách je větší než u převodovek s válcovým šnekem. Skříň by proto měla být bohatě žebrovaná, aby se zlepšilo odvádění tepla a zároveň zvětšila tuhost skříně. V mnoha případech je množství tepla vznikajícího v převodovce značně větší, než množství tepla unikajícího přestupem, a proto je nutné mazací olej chladit (ventilátor, olejový chladič).

Z hlediska technologie výroby se používají skříně lité, svařované a skříně vyrobené kombinací obou těchto technologií. Způsob výroby se obvykle volí podle množství vyráběných kusů.

Lité skříně se používají při větších sériích. Dle použité technologie lití se rozlišují dva základní typy litých skříní. Prvním, nejrozšířenějším typem je gravitačně litá skříň většinou ze šedé litiny. Výhodou těchto skříní je především jejich dobrá tuhost a poměrně nenáročná technologie jejich výroby. Druhým typem je tenkostěnná tlakově litá skříň. Výhodou tlakově litých skříní je jejich dobrý odvod tepla a nízká hmotnost, což je dáno hlavně použitými materiály které umožňují tento způsob výroby (hliníkové a hořčíkové slitiny). Neduhem tlakově litých skříní je nižší tuhost a nákladná výroba formy.

Svařované skříně se používají hlavně při kusové a malosériové výrobě. Výrobně jsou složitější než lité, zato však jsou lehčí (neuvažujeme-li skříně odlévané z hliníkových slitin) a při malém počtu vyráběných kusů jsou i levnější. Tloušťka stěn svařovaných skříní je o 30 až 40 % menší než u skříní litých ze šedé litiny. Toto však platí pouze u větších skříní, protože malé skříně převodovek pro malé výkony se dnes již většinou vyrábějí z hliníkových slitin tlakovým litím, kde je tento poměr spíše naopak. Prvořadý význam u svařovaných skříní má jejich tuhost.

Kombinací litých a svařovaných částí se zmenší nejen pracnost výroby, ale také váha skříně a tím zároveň její cena. Příkladem takové konstrukce může být převodovka u níž je skříň litá a víka ložisek svařované, nebo naopak. V případech, kdy se svařují lité a např. válcované části, je nutné věnovat velkou pozornost správné volbě materiálu těchto částí z hlediska svařitelnosti.

6.2 ZÁSADY PRO NÁVRH SKŘÍNĚ

Převodová skříň musí splňovat několik základních požadavků. Je to především pevnost, tuhost, dostatečný odvod tepla (u šnekových převodů obzvláště důležité), tlumení hluku (u šnekových převodů není až tak důležité), dodržení souososti hřídelů, těsnost vůči úniku oleje, atd. Skříň může být jednodílná (víka musí umožňovat montáž a demontáž hřídelů a ložisek), zpravidla však bývá dvoudílná (dělicí rovina je vodorovná nebo svislá) a v některých případech i vícedílná.

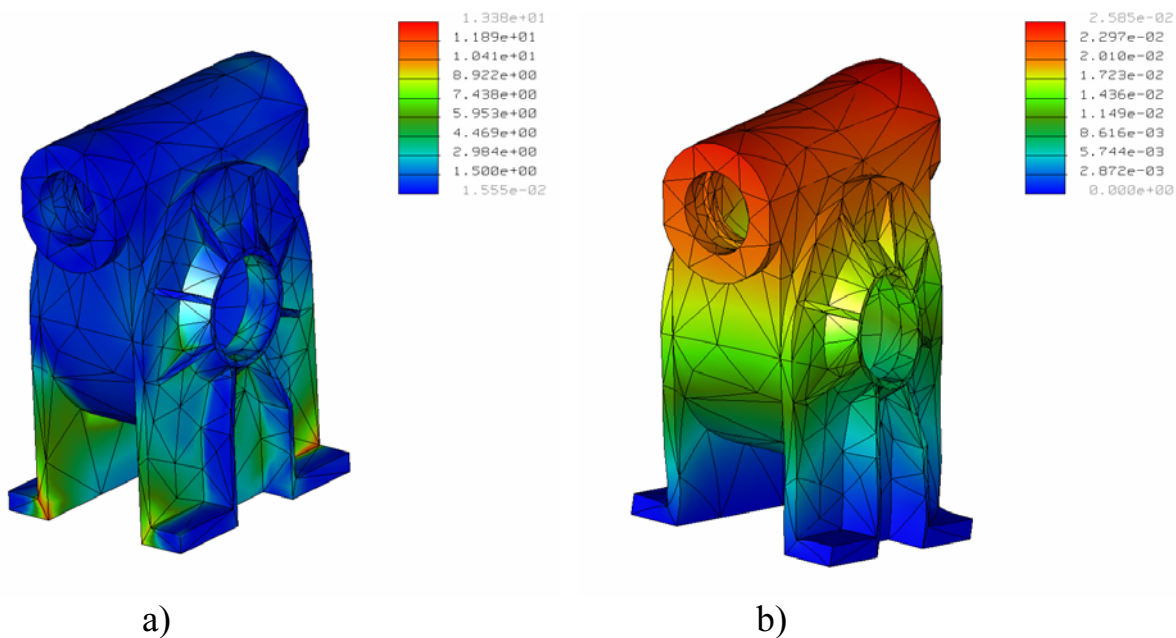
Hlavní rozměry skříní se navrhují pomocí empirických vzorců vztažených k základnímu rozměru šnekových převodovek, tj. k jejich osové vzdálenosti. V technické literatuře se objevuje poměrně mnoho různých variant těchto empirických vzorců [39]. V empirických vztazích je zohledněna především snadná vyrobiteľnosť skříně. Konstruovat skříně s ohledem na pevnost, tuhost a dostatečný odvod tepla, při zachování snadné vyrobiteľnosti, umožňuje nasazení CAD a CAE systémů. Možný postup takového řešení je ukázán v disertační práci.

6.3 VÝPOČTY SKŘÍNĚ

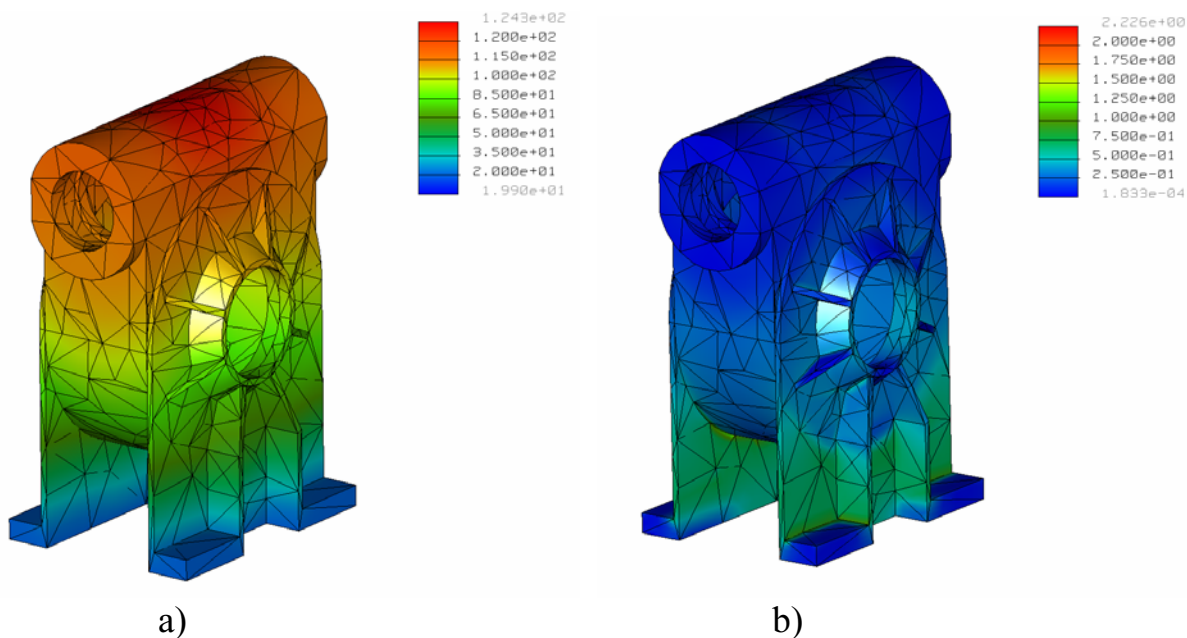
Jak již bylo uvedeno, na skříně šnekových převodovek jsou kladeny poměrně vysoké nároky týkající se především tuhosti a odvodu tepla. Při konstrukci skříně se obvykle vychází z již používaných tvarů, nebo se hlavní rozměry určí pomocí empirických vztahů a ostatní už záleží jen na zkušenostech a znalostech konstruktéra. Správnost konstrukce skříně se v tomto případě projeví až při vlastním

provozu převodovky, kdy už však bývají veškeré úpravy nákladné a komplikované. Nasazení vhodného CAE systému však umožňuje konstruovat skříně s ohledem na všechny uvedené aspekty rychle a s podstatně nižším rizikem chyb odhalených až při provozu převodovky.

V disertační práci je kromě analytického výpočtu pomocí empirických vztahů uveden také postup výpočtu pomocí CAE systému *Pro/MECHANICA*.



Obr.3: Ukázka výsledků pevnostního výpočtu lité skříně.
 a) redukované napětí [MPa] b) deformace a velikost posunutí[mm]



Obr.4: Ukázka teplotního výpočtu lité skříně - a) teplota [°C] b) teplotní gradient

7 STANOVENÍ TŘECÍCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ

Pro prodloužení životnosti, pro zvýšení únosnosti a pro přesné stanovení ztrát je nutné znát třecí vlastnosti dané materiálové dvojice. Pod pojmem „*třecí vlastnosti*“ je možné si představit celou řadu převážně fyzikálních vlastností, ale v technické praxi obvykle vystačíme se součinitelem (resp. koeficientem) tření a s odolností proti opotřebení (tzv. otěruvzdornost). V disertační práci je popsán teoretický základ pro experimentální určování těchto třecích vlastností materiálových dvojic a následně především praktická realizace těchto poznatků pro experimenty na zkušebním zařízení *R-mat3*.

7.1 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Zkušební stroj *R-mat3* je koncipován jako univerzální zařízení a umožňuje pouhou výměnou zkušebního uzlu provádět celou řadu experimentů s různými typy kontaktů třecích dvojic. Pro experimenty byl použit uzel typu „*ring-on-disc*“, který vyžaduje vždy dva vzorky, trubku a kroužek. Vzorky se dotýkají v mezikruhové ploše a jedná se tedy o plošný dotyk. Vzorek ve tvaru trubky je nasazen na unášecím čepu, který se otáčí a je přitlačován na nepohyblivě uchycený druhý vzorek - kroužek. Oblast kontaktu je z důvodu zabezpečení dostatečného mazání a odvodu vznikajícího tepla ponořena v oleji. Přímo mezi kontaktní plochy se mazivo dostává drážkami v trubce. Do třecího uzlu je olej dodáván pístovým čerpadlem. Přebytečný olej je po přefiltrování veden do zásobní nádrže a následně zpět do uzlu. Celý třecí uzel se v průběhu experimentu značně zahřívá, proto je vnější plášť hliníkový a bohatě žebrovaný. Navíc je uzel ofukován ventilátorem. Tím je udržována teplota oleje uvnitř uzlu v dovoleném rozsahu pracovních teplot. Elektronický ovládací a měřicí panel umožňuje zaznamenat průběh třecího momentu, teplotu uzlu, okolní teplotu a dobu chodu. Z bezpečnostních důvodů vypíná zkušební stroj při překročení nastavené teploty a úrovně vibrací.

7.2 MĚŘENÉ MATERIÁLY A OLEJE

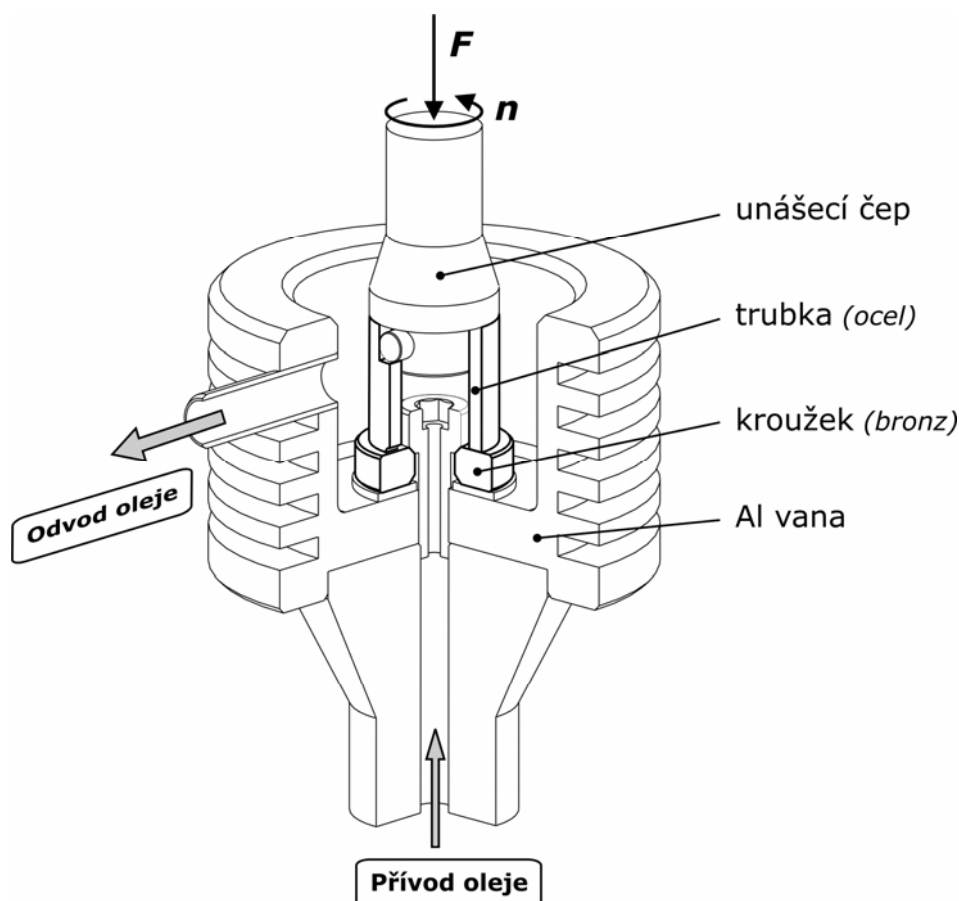
Pro experimenty byly vybrány materiály běžně používané na výrobu šnekových soukolí. Věnc šnekového kola je obvykle vyroben z cínového nebo hliníkového bronzu a šnek je ocelový cementovaný a kalený. Třecí materiálovou dvojici tedy tvoří ocelová trubka a bronzový kroužek

Materiál trubky byl u všech experimentů stejný: ocel 14 220.3, cementovaná do hloubky 0,4 - 0,6 mm, kalená na 60 ± 2 HRC. Kroužek byl bronzový a byly testovány následující materiály: *CuAl*, *CuSn8*, *CuSn12*, *CuSn14*, *CuSn10Ni2*, *CuSn14+1%Ni* a *CuSn14+2%Ni*. Kontakt každé materiálové dvojice byl při experimentu mazán těmito oleji: *OMV PG460*, *OMV PG220*, *Shell HD320* a *Fuchs 84W-140*.

7.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Výsledkem experimentů jsou hodnoty hmotnostních úbytků a třecího momentu měřených materiálových dvojic při mazání uvedenými oleji. Kompletní přehled naměřených hodnot je v příloze disertační práce. Všechny naměřené hodnoty hmotnostních úbytků a třecího momentu je však nutné statisticky zpracovat a vyhodnotit. Vzhledem k malému počtu opakování měření (3 až 5) mají průměrné hodnoty jen malou vypovídající schopnost o chování jednotlivých materiálových dvojic a o vlivu použitého oleje na třecí vlastnosti.

V průběhu realizace experimentů byly také získány zcela zásadní poznatky, týkající se jak zvoleného typu zkušebního uzlu „ring-on-disc“, tak i vlastního měření třecích vlastností materiálů. Tyto poznatky byly získávány v celém průběhu experimentálního stanovení třecích vlastností materiálových dvojic a dodržení z nich plynoucích doporučení zaručuje poměrně klidný průběh měření a získání kvalitních údajů.



Obr.5: Uzel typu „ring-on-disc“ zkušebního zařízení R-mat3

8 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Opotřebení je komplikovaný proces ovlivňovaný řadou působících faktorů. Při analýze opotřebení je proto nutné přistupovat k daným procesům jako k náhodným dějům, které je třeba hodnotit metodami matematické statistiky [6].

Hodnoty získané popsány měřeními musejí být zpracovány vhodně zvolenými statistickými metodami. Pomocí Hornova postupu analýzy malých výběrů byly stanoveny intervalové odhady, ve kterých se s danou pravděpodobností nalézá skutečná hodnota, která byla měřením zjištěna jen přibližně. Dále bylo pomocí analýzy rozptylu (Friedmanův test) stanoveno, jaký vliv má na opotřebení a součinitel tření použitý olej, nebo materiál vzorku.

8.1 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT – INTERVALY SPOLEHLIVOSTI

U malých výběrů jsou závěry vždy zatíženy značnou mírou nejistoty. Malých výběrů se užívá jen tam, kde obvykle z ekonomických či časových důvodů není možné získat větší počet dat. Pro analýzu malých výběrů se používá Hornův postup [36]. Pomocí Hornova postupu pro analýzu malých výběrů byly z naměřených dat hmotnostních úbytků a třecího momentu (součinitele tření) stanoveny 95%ní intervaly spolehlivosti středních hodnot. Postup výpočtů a výsledné intervaly pro hmotnostní úbytky jsou uvedeny v disertační práci.

Ze zjištěných intervalů spolehlivosti vyplývá, že mezi naměřenými hodnotami nejsou velké rozdíly a intervaly spolehlivosti středních hodnot se vzájemně překrývají, takže nelze jednoznačně určit, která materiálová dvojice měla za daných podmínek a při mazání určitým olejem nejmenší úbytky hmotnosti (tzn. nejmenší opotřebení), resp. součinitel tření. Pro určení toho, zda jsou rozdíly mezi úbytky hmotnosti, resp. součiniteli tření, u jednotlivých materiálových dvojic statisticky významné je třeba použít analýzu rozptylu. Analýzou rozptylu se také stanoví vliv použitého oleje na velikost hmotnostních úbytků a součinitele tření.

8.2 ANALÝZA ROZPTYLU – FRIEDMANŮV TEST

Pro posouzení významnosti vlivu materiálu a maziva na opotřebení a na součinitel tření nemohla být z důvodu malého počtu opakování měření použita klasická analýza rozptylu. Byla použita tzv. Friedmanova analýza rozptylu, v odborné literatuře častěji uváděná jako Friedmanův test [1] [36].

Friedmanův test je rozšířením Wilcoxonova testu pro dva závislé výběry na případ, kdy je k dispozici $k \geq 3$ závislých výběrů. Používá se k ověření shody úrovně sledovaného znaku v souborech vytvořených z k závislých výběrů se stejnými rozsahy n jednotek. Typickým použitím jsou situace, kdy u stejných n jednotek je sledován určitý znak při k různých podmínkách. Úkolem potom je posoudit, jestli úroveň sledovaného znaku závisí na daných podmínkách. Na rozdíl od klasické analýzy rozptylu nepředpokládá Friedmanův test výběry z normálního rozdělení a shodu rozptylů ve skupinách, předpokládá pouze spojitost rozdělení. Aplikací Friedmanova testu na naměřená data je možné posoudit, zda je vliv materiálu na

opotřebení, vliv materiálu na součinitel tření, vliv oleje na opotřebení a vliv oleje na součinitel tření statisticky významný.

Podmínky pro testování splňují pouze 4 materiály, které byly měřeny se třemi oleji. K testování je bylo tedy možné použít pouze naměřené hmotnostní úbytky u materiálů *CuSn12*, *CuSn14*, *CuSn10Ni2* a *CuSn14+2%Ni* pro oleje *OMV PG460*, *OMV PG220* a *Shell HD320*. Detailní popis jednotlivých testů a jejich výsledků je popsán v disertační práci.

Z provedených testů různých hypotéz vyplývají následující důležité poznatky:

- velikost opotřebení materiálové dvojice je ovlivněno pouze použitým olejem a ne materiálem
- na velikost součinitele tření má vliv pouze materiál třecí dvojice a ne použitý olej

Tato zjištění odporují počátečním předpokladům, že jak opotřebení tak i součinitel tření budou ovlivněny použitým olejem i zvoleným materiálem třecí dvojice. Příčiny, proč se tyto předpoklady nepotvrdily je možné hledat v malém množství opakování měření, ve velkých rozptylech naměřených hodnot a také v možná nedostatečné rozlišovací schopnosti použitých měřicích metod a přístrojů.

Z výsledků testů dále vyplývají následující pořadí olejů a bronzových materiálů:

- pořadí olejů z hlediska nejmenších úbytků hmotnosti je:
Shell HD320, *OMV PG460*, *OMV PG220*
- pořadí bronzových materiálů z hlediska nejmenšího součinitele tření je:
CuSn12, *CuSn14*, *CuSn14+2%Ni*, *CuSn10Ni2*

9 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ

Z teorie šnekových soukolí vyplývá, že účinnost těchto soukolí je určena především úhlem stoupání, tj. geometrií šneku, a součinitelem tření. Velikost součinitele tření je závislá na dvojici materiálů spolu zabírajících zubů, na jakosti povrchů, na použitém mazivu a na skluzové (třecí) rychlosti. Vhodnou volbou materiálu šneku a šnekového kola a volbou vhodného maziva, lze značně ovlivnit nejen účinnost, ale i životnost ozubení šnekového soukolí.

Při kontrolních výpočtech hřídelů šneku a kola je velice výhodné použít výpočetní systém založený na metodě konečných prvků (MKP). Tyto systémy umožňují přesné zjištění koncentrací napětí a stanovení průhybu, který je důležitý z hlediska správného záběru. Uvedené způsoby výpočtů pomocí CAE systému *Pro/MECHANICA* jsou podstatně přesnější a více odpovídají skutečnému stavu, protože se počítá s modelem odpovídajícím reálnému hřídeli, včetně např. závitů šneku nebo odstupňování různých průměrů hřídele.

Kromě pevnostních výpočtů je u šnekových převodů obzvláště důležitý výpočet oteplení. Proto je třeba velkou pozornost věnovat přesnému určení vznikajících ztrát, tj. stanovení celkového ztrátového výkonu, a podle toho nedimenzovat skříň s dostatečným tepelným výkonem, popřípadě uvažovat o chladicím systému.

Analyticky je možné stanovit tepelný výkon navržené skříně jen přibližně. Proto je zde vhodnější použít např. systém *Pro/MECHANICA Thermal*, který na základě ztrátového výkonu nadefinovaného uvnitř skříně dokáže spočítat rozložení teploty a teplotního na povrchu skříně. Na základě takovýchto výsledků je možné skříně optimalizovat nejen z hlediska tuhosti ale i z hlediska dostatečného odvodu tepla.

Z hlediska popisovaných materiálů pro šneková soukolí jsou zajímavé poznatky týkající se použití plastů. Důležité jsou informace týkající se chování plastů z hlediska tření a opotřebení za sucha a při mazání. Pro šnekové převody jsou podstatné především omezení týkající se tvrdosti a drsnosti povrchu u spolu zabírajícího členu.

V průběhu realizace experimentů pro stanovení třecích vlastností vybraných materiálů byly získány zcela zásadní poznatky, týkající se jak zvoleného typu zkušebního uzlu „*ring-on-disc*“, tak i vlastního měření třecích vlastností materiálů. Dodržení doporučení plynoucích z těchto poznatků zaručuje poměrně klidný průběh měření a získání kvalitních údajů.

Mezi naměřenými hodnotami nejsou velké rozdíly a intervaly spolehlivosti středních hodnot se vzájemně překrývají, takže nelze jednoznačně určit, která materiálová dvojice má za daných podmínek a při mazání určitým olejem nejmenší úbytky hmotnosti (tzn. nejmenší opotřebení), nebo nejmenší součinitel tření.

Na základě testů hypotéz o vlivu použitého oleje, nebo materiálu vzorku na opotřebení a velikost součinitele tření bylo zjištěno, že velikost opotřebení materiálové dvojice je ovlivněno pouze použitým olejem a na velikost součinitele tření má vliv pouze materiál třecí dvojice. Tato zjištění možná odporují předpokladům, že jak opotřebení tak i součinitel tření jsou ovlivňovány použitým olejem i zvoleným materiálem třecí dvojice. Příčiny, proč se tyto předpoklady při experimentech nepotvrdily je možné hledat v malém množství opakování měření, ve velkých rozptylech naměřených hodnot a také v možná nedostatečné rozlišovací schopnosti zvolených měřicích metod a přístrojů.

Podle statistického zpracování výsledků lze tedy říct, že pořadí testovaných olejů z hlediska nejmenšího opotřebení vzorků je: *Shell HD320*, *OMV PG460* a *OMV PG220*. Pořadí bronzových materiálů z hlediska nejmenšího součinitele tření je: *CuSn12*, *CuSn14*, *CuSn14+2%Ni* a *CuSn10Ni2*.

Zjištěné pořadí a naměřené hodnoty byly zřejmě značně ovlivněny strukturou vzorků. U všech vzorků byla zjištěna přítomnost nečistot a ředin. Značná pórovitost některých vzorků zkreslovala jejich přesné vážení (zbytky oleje v pórech i po opakovaném čištění). Složení některých materiálů také neodpovídalo hodnotám uvedeným v jejich názvu (např. u žádného z materiálů označených *CuSn14* nebyl zjištěn větší obsah cínu než 12 %).

10 ZÁVĚR

Závěrem této disertační práce je možné konstatovat, že byly splněny všechny na počátku definované cíle.

V práci je uveden ucelený přehled o současné úrovni problematiky šnekových převodů a zvláštní kapitola je věnována konstrukci, dimenzování a kontrolním výpočtům převodových skříní. Většina autorů, kteří se zabývají ozubenými převody, se zaměřuje pouze na vlastní převod a zcela opomíjejí problematiku převodových skříní, která je však u šnekových převodů velice důležitá a to především z důvodu vyšších nároků na tuhost a na tepelný výkon. Proto alespoň částečné (pouze skříně pro šnekové převodovky) zpracování problematiky převodových skříní v této práci považuji za jeden z podstatných přínosů.

Možnosti použití moderních konstrukčních a výpočtových systémů při návrhu a kontrole šnekových převodovek bylo ukázáno na systému *Pro/MECHANICA*. Kromě pevnostních výpočtů, tj. kontrola napětí a dovoleného průhybu, je ukázán i teplotní výpočet převodové skříně. Výpočty v *Pro/MECHANICA* jsou popisovány co možná nejobecněji, aby bylo možné uvedené postupy aplikovat i v jiných systémech (např. *ANSYS*, *COSMOS*, *NASTRAN*, ...). V předvedení možností nasazení CAE systémů do procesu návrhu a výpočtů šnekových převodovek spatřuji další z přínosů disertační práce.

Na základě provedených měření byly zjištěny třecí vlastnosti vybraných materiálů používaných pro šnekové převody. Z důvodu značné časové náročnosti prováděných měření nebyla měření provedena v celém původně plánovaném rozsahu. To se týká především počtu opakování jednotlivých měření. I přesto byly získány hodnotné údaje důležité především pro volbu vhodného materiálu věnce šnekového kola z hlediska opotřebení a součinitele tření. Při měření materiálových dvojic ocel-bronz na modifikovaném zařízení *R-mat3* bylo také získáno velké množství poznatků, týkajících se jak přímo zvolené metody měření (uzel typu *ring-on-disc*) tak i měření třecích vlastností obecně. Tyto poznatky mohou mít přínos pro realizace měření třecích vlastností na zařízeních s plošným kontaktem vzorků.

Případná další témata bádání v dané problematice spatřuji v následujícím:

- výpočty kontaktních napětí na modelech skutečného ozubení šnekového soukolí ve vhodném MKP systému
- podrobné rozpracování problematiky převodových skříní
- realizace měření třecích vlastností dalších vhodných materiálových dvojic, případně rozšířit množství opakování měření pro stávající materiály

Teorie, postupy a výsledky experimentů uvedené v této disertační práci, by měly být dostatečnými podklady pro návrh optimální šnekové převodovky s ohledem na vysokou životnost a spolehlivost.

11 LITERATURA

- [1] ANDĚL, J. Matematická statistika. 1. vydání. Praha : SNTL/ALFA, 1978. 352 s.
- [2] BÁŠA, F. Konstrukce šnekových převodovek. 1. vydání. Praha : SNTL, 1964. 296 s.
- [3] BÁŠA, F. Globoidní šnekové soukolí. 1. vydání. Praha : SNTL, 1961. 104 s.
- [4] BÁŠA, F. Mazání, chlazení, těsnění a ztráty v průmyslových i trakčních převodovkách. In *Ropa a uhlie*. Č.7, 1970, roč.12, s. 375-385
- [5] BÁŠA, F. Druhy opotřebení a poruch ozubených kol. In *Ropa a uhlie*. Č.7, 1970, roč.12, s. 375-385
- [6] BEČKA, J. Tribologie. 1. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 212 s. ISBN 80-01-01621-8
- [7] BENEŠ, A. aj. Kovové materiály: vlastnosti a použití. 1. vydání. Praha : SNTL, 1968. 768 s.
- [8] BOHÁČEK, F. aj. Části a mechanismy strojů II : hřídele, tribologie, ložiska. 2. vydání. Brno : VUT, duben 1987. 215 s.
- [9] BOHÁČEK, F. aj. Části a mechanismy strojů III : převody. 2. vydání. Brno : VUT, květen 1987. 267 s.
- [10] BOLEK, A. – KOCHMAN, J. aj. Části strojů : 2. svazek. 5. vydání. Praha : SNTL, 1990
- [11] BUCKINGHAM, E. – RYFFEL, H. Design of worm and spiral gears. 1st edition. Springfield : Industrial Press, 1960. 450 p. ISBN 0-8311-3112-8
- [12] BUREŠ, V. Části strojů IV: Převody ozubené. dotisk. Praha : SNTL, 1959. 194 s.
- [13] CZICHOS, H. Tribology : a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. 1st edition. Amsterdam : Elsevier, 1978. 400 p. ISBN 0-444-41676-5
- [14] ČSN 01 4755. Závítovkové převody s valcovou závítovkou : počet zubov, súčinitele priemeru, moduly a prevodové čísla. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1987. 8 s.
- [15] ČSN 01 4756. Závítovkové převody s valcovou závítovkou: súčinitele ozubenia a uhol profilu. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1986. 8 s.
- [16] ČSN 01 4771. Stanovení rozměrů globoidních šnekových soukolí. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1972. 13 s.
- [17] ČSN 01 4780. Směrnice pro výpočet šnekových soukolí. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1956. 21 s.
- [18] ČSN 01 4909. Poloměry vnitřních zaoblení odlitků ze šedé litiny. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1955. 3 s.
- [19] ČSN 04 2021. Slévárenské úkosy modelů a odlitků. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, c 1962. 4 s.
- [20] DORAZIL, E. aj. Nauka o materiálu II. 3. vydání. Brno : VUT, červenec 1979. 266 s.

- [21] FRÖHLICH, J. Technika uložení s valivými ložisky. 2. vydání. Praha : SNTL, 1980. 448 s.
- [22] Friction and wear devices. 2nd edition. ASLE, 1976. 458 p.
- [23] HANZLÍK, J. Rozbor tribologických podmínek v záběru šnekového soukolí. Brno, 1998. 113 s. Diplomová práce na FSI VUT Ústavu konstruování. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Dušan Kolář, CSc.
- [24] HEJL, I. Teplotní analýza různých konstrukčních řešení šnekových převodovek s použitím MKP. In sborník přednášek : XLI konference kateder částí a mechanismov strojov. 6.-8. september, 2000, Košice-Herlany, Slovensko. 105-108 s. ISBN 80-7099-480-0
- [25] HEJL, I. Evaluation of Tribological Properties of Bronzes. In 3rd International Conference of PhD Students. 13.-19. august, 2001, Miskolc, Hungary. 605-610 p. ISBN 963-661-482-2
- [26] HEJL, I. Napěťová a teplotní optimalizace skříní šnekových převodovek. Brno, 1999. 41s. Závěrečná zpráva projektu FSI VUT č. FP 390024
- [27] CHARUZA, J. – WALTER, J. konstrukce a výpočty ozubených soukolí pro převodovky. 1. vydání. Praha : SNTL, 1967. 216 s.
- [28] JANÍČEK, P. – ONDRÁČEK, E. Řešení problémů modelováním : téměř nic o téměř všem. 1. vydání. Brno : VUT, 1998. 335 s. ISBN 80-214-1233-X
- [29] KLEPAL, V. Výroba ozubených kol. 1. vydání. Praha : SNTL, 1959. 404 s.
- [30] KLIMO, V. Skúmanie únosnosti bokov zubov valcových závitovkových súkolesí. In Slovenská vedeckotechnická spoločnosť : Závitovkové (šnekové) prevody. Bratislava : SVTS, 1978. s. 23-28
- [31] KOLÁŘ, D. aj. Části a mechanismy strojů : konstrukční cvičení, návody, podklady. 1. vydání. Brno : VUT, listopad 1991. 236 s. ISBN 80-214-0371-3
- [32] KOLOUCH, J. Strojní součásti z plastů. 1. vydání. Praha : SNTL, 1981. 260 s.
- [33] KOUBA, J. Algoritmus pro racionální návrh mazání a chlazení čelních převodovek. Brno, 1998. 80 s. Výzkumná zpráva na na FSI VUT Ústavu konstruování. Zodpovědný vedoucí Doc. Ing. Dušan Kolář, CSc.
- [34] KRŽIŽ, R. Strojnické tabulky II. - Pohony. 1. vydání. Praha : MONTANEX, 1997. 213 s. ISBN 80-85780-51-8
- [35] MANAS, F. Ozubenie v konštrukčnej praxi. 1. vydání. Bratislava : Alfa, 1976. 456 s.
- [36] MELOUN, M. – MILITKÝ, J. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. 1. vydání. Praha : Academia, 2002. 764 s. ISBN 80-200-1008-4
- [37] MRKVICA, M. Rozbor válcových šnekových převodů z hlediska sdružených profilů. In Slovenská vedeckotechnická spoločnosť : Závitovkové (šnekové) prevody. Bratislava : SVTS, 1978. s. 58-75
- [38] NECKÁŘOVÁ, J. aj. Části a mechanismy strojů : cvičení. 1. vydání. Praha : ČVUT, 1991

- [39] NĚMČEK, M. – MIKEŠ, I. Návody na cvičení I : konstrukce převodových skříní. 1. vydání. Ostrava : VŠB, 1993. 124 s. ISBN 80-7078-200-5
- [40] NOHOVEC, V. Účinnost a ztráty v převodovkách s čelními ozubenými koly. In *Strojírenství*. Č.1, 1985, roč.9, s. 22-28
- [41] NOHOVEC, V. Tepelný výpočet převodovek. In *Ropa a uhlie*. 1987, roč.29, s. 236-240
- [42] PAŽÁK, A. – KLIMO, V. Rozbor kinematických a geometrických pomerov valcových závitovkových súkolesí. In Slovenská vedeckotechnická spoločnosť: Závitovkové (šnekové) prevody. Bratislava: SVTS, 1978. s. 29-38
- [43] SEDLÁČEK, V. Neželezné kovy a slitiny. 1. vydání. Praha : SNTL, 1979. 400 s.
- [44] SIMON, V. Characteristics of a New Type of Cylindrical Worm-Gear Drive. In *Journal of Mechanical Design*. March 1998. vol. 120, p. 139-146.
- [45] SIMON, V. EHD Lubrication Characteristics of a New Type of Ground Cylindrical Worm Gearing. In *Journal of Mechanical Design*. March 1997. vol.119, p.101-106.
- [46] ŠVEC, V. Části a mechanismy strojů : ozubené převody. dotisk. Praha : ČVUT, 1985. 240 s.
- [47] ŠVEC, V. Části a mechanismy strojů : mechanické převody. 1. vydání. Praha : ČVUT, únor 1999. 174 s. ISBN 80-01-01934-9
- [48] TOOGOOD, R. Pro/MECHANICA 2000i Structure Tutorial: A Click-by-Click Primer. 3rd edition. Edmonton : SDC, 2000. ISBN 1-58503-015-5
- [49] VANDAS, J. Části strojů: kapitola 15: šnekové převody. 1. vydání. Praha : SNTL, 1960. 94 s.
- [50] VOCEL, J – DUFEK, V. aj. Tření a opotřebení strojních součástí. 1. vydání. Praha : SNTL, 1976. 376 s.

AUTOROVY PUBLIKACE K DANÉ PROBLEMATICE

- [A1] HEJL, I. Teplotní analýza různých konstrukčních řešení šnekových převodovek s použitím MKP. *In* sborník přednášek : XLI konference kateder částí a mechanismov strojov. 6.-8. september, 2000, Košice-Herlany, Slovensko. 105-108 s. ISBN 80-7099-480-0
- [A2] HEJL, I. Stanovení ztrát u různých typů šnekových převodů a teplotní analýza skříní pro tyto převody.. *In* Pedagogicko-vědecká konference u příležitosti 100. výročí založení FSI . 5.-6. prosince, 2000, Brno, Česká Rep. 71-74 s.
- [A3] HEJL, I. – ŠRETR, R. Evaluation of Tribological Properties of Bronzes Used for Worm Gears. *In* 4th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications. 25.-27. june, 2001, Žilina, Slovak Republic. 315-318 p. ISBN 80-7100-850-8
- [A4] HEJL, I. Evaluation of Tribological Properties of Bronzes. *In* 3rd International Conference of PhD Students. 13.-19. august, 2001, Miskolc, Hungary. 605-610 p. ISBN 963-661-482-2
- [A5] HEJL, I. Hodnocení tribologických vlastností bronzů používaných pro věnce šnekových kol.. *In* FSI Junior konference 2001, soutěžní posterová konference vědeckovýzkumných prací doktorandů. 10.-14. prosince, 2001, Brno, Česká Republika. 52-55 s. ISBN 80-214-2071-5

AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Ing. Ivan Hejl, narozen 17. 4. 1975 v Lanškrouně, bydliště: Výprachtice

Dosažené vzdělání:

- 1998 – 2001 Doktorandské studium na Ústavu konstruování FSI VUT Brno
1993 – 1998 Inženýrské studium na VUT v Brně, Fakulta strojní, Ústav konstruování, obor Počítačové navrhování. Téma diplomové práce: „Optimalizace návrhu pohonu a konstrukce nožové části příčné sekačky papíru“.
1989 – 1993 Gymnázium Lanškroun

Dosavadní praxe:

- od r. 2003 zaměstnán jako konstruktér v Soma Lanškroun s.r.o
1998 – 2002 externí spolupráce s firmou Soma, s.r.o Lanškroun, konstrukce a výroba jednoúčelových strojů a strojů pro papírenský průmysl
1999 měsíční stáž u firmy ACR v SRN, konstrukce obráběcích strojů s využitím moderních CAD systémů (Pro/ENGINEER)
1999 školení k systému Pro/MECHANICA Structure. ZPS-SYSTEMS

Výuka na FSI VUT Brno: CAD, Konstruování a CAD, cvičení pro 2. ročník

Grantové úkoly:

- 2001 Hodnocení tribologických vlastností bronzů používaných pro věnce šnekových kol. Fond vědy FSI VUT Brno, FP 310026
2000 Stanovení ztrát u různých typů šnekových převodů a teplotní analýza skříní pro tyto převody. Fond vědy FSI VUT Brno, FP 300014
1999 Napěťová a teplotní optimalizace skříní šnekových převodovek. Fond vědy FSI VUT Brno, FP 390024

Účast na výzkumu v rámci Ústavu konstruování:

- Kontaktní únava ložiskových materiálů na anlogonu R-mat2 I.
- Kontaktní únava spékaných materiálů III.
- Zkoušky malorozměrových valivých ložisek 6000, kde kroužky byly vyrobeny práškovou metarulgíí.
- Rozložení napětí a deformací na vnějším kroužku ložiska PLC 15-25 pomocí MKP.
- Posouzení vlivu zápichu a zaoblení na koncentraci napětí u přírubového hřídele.

Jazykové znalosti:

Angličtina, ruština

ABSTRACT

There is described a theory of the design and calculations of worm gear units in this work. You can find here a review of the contemporary theory level of the calculation of the worm gearings. A part of the work is destined to the design, dimensioning and checking calculations of the gear boxes where in case of the worm gearing must be calculated with higher exigencies on the toughness and above all on the heat output.

The great attention is destined to the use of the CAE systems in the phasis of the design and calculation of the worm gearings. The concrete calculations are shown in the system *Pro/MECHANICA*. The calculations in *Pro/MECHANICA* are descibed commonly to make possible to apply the mentionned methods even in other systems as for example *ANSYS*, *COSMOS*, *NASTRAN*, etc.

The experimental part of the work concerns the determination of the friction property of the chosen material couples. On the ground of the realised measurement were determinated the friction properties of the chosen materials used in the worm gearings. The knowledge of these properties is important for the designing of gears with the maximum of the effeciency and operating life.

The theory, methods and results of the experiments in this dissertation work shoud be sufficient for the designing of an optimal worm gear drive with regard to a high operating life and reliability.