

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES**

**Ing. Vladimír Fuis**

**Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice  
kyčelní endoprotézy**

**Stress and Reliability Analyses of the Ceramic Head of Hip  
Joint Endoprosthesis**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**  
**PhD Thesis**

pro obor

**INŽENÝRSKÁ MECHANIKA**

**Školitel: Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.**

**Oponenti: Prof. Ing. Miroslav Petrtýl, DrSc.**  
**Prof. Ing. Josef Rosenberg, DrSc.**  
**Prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.**

**Datum obhajoby: 23. 3. 2000**

© 2000 V. Fuis  
ISBN 80-214-1670-X

# OBSAH

1 ÚVOD .....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	5
2.1 Testování vlastností a chování keramických hlavic .....	6
2.2 Experimentální modelování .....	6
2.3 Výpočtové modelování deformace a napjatosti .....	7
2.4 Spolehlivost aplikací keramických hlavic kyčelní endoprotézy .....	7
3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE .....	7
4 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ .....	9
4.1 Vstupní údaje do výpočtového modelování .....	9
4.2 Testovací úlohy .....	10
4.3 Realizační úlohy .....	11
4.3.1 Vliv zoubkování kužele dřívku .....	11
4.3.2 Vliv výrobních nepřesností .....	12
5 EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ .....	15
5.1 Metodika měření .....	16
5.2 Analýza výsledků experimentů .....	16
6 POSOUZENÍ PRAVDĚPODOBNOСТИ PORUŠENÍ .....	18
6.1 Určení materiálových charakteristik keramiky .....	19
6.2 Výpočtové modelování pravděpodobnosti porušení hlavice .....	20
6.2.1 Vliv rotačně symetrických výrobních nepřesností .....	20
6.2.2 Vliv ovality a interakce výrobních nepřesností .....	21
6.2.3 Posouzení spolehlivosti hlavice u reálné soustavy .....	22
7 NÁVRHY DALŠÍCH PRACÍ .....	23
8 ZÁVĚR .....	24
LITERATURA .....	25
AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRÁČÍ .....	27
SUMMARY .....	29
ŽIVOTOPIS .....	31



# 1 ÚVOD

Kyčelní kloub je největším a nejvíce namáhaným kloubem lidského těla. Jsou pro něho charakteristická onemocnění v dětském a seniorském věku. Některá z nich mohou být i takového typu, že omezují až znemožňují funkčnost tohoto kloubu. V těchto případech je nutná jeho náhrada, a to buď částečná (pouze dřík s hlavicí) nebo totální (i s jamkou). Ve světě došlo k výraznému nástupu tohoto radikálního způsobu navrácení funkčnosti kloubu asi před 50-ti lety, u nás však dochází k rozvoji aplikace kloubních implantátů až od začátku 70-tých let [4]. V průběhu těchto let byly používány různé struktury, geometrie a materiály pro jednotlivé komponenty kloubních náhrad, což bylo spojeno s existencí různých mezních stavů. V současné době je, jak ve světě, tak i u nás velmi často používaná totální endoprotéza, která se skládá z kovového dříku, z keramické hlavice a keramické nebo polyethylenové jamky. Kloubní implantáty vyrobené z keramických materiálů se vyznačují nízkou hodnotou opotřebení, vysokou tuhostí a odolností proti korozi, netoxičností a biokompatibilitou *in vivo*. Jejich nevýhodou je křehkost, z čehož vyplývá citlivost komponent z keramických materiálů na tahová napětí. Tato nebezpečná tahová napětí jsou do keramické hlavice vnášena díky samosvornému kuželovému spojení hlavice a dříku.

V roce 1995 došlo v naší republice u nezanedbatelného počtu pacientů k destrukci české varianty keramické hlavice, kterou vyrábí DIAS s.r.o. Turnov. Z hlediska geometrie jsou hlavice vyráběné v DIASu totožné s hlavicemi vyráběnými jinými firmami, liší se však technologií výroby a v neposlední řadě i velikostmi výrobních tolerancí. Z tohoto důvodu bylo nutné realizovat napjatostní a spolehlivostní analýzu pro českou variantu keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Keramické hlavice jsou pro implantáty totálních kyčelních endoprotéz používány od počátku sedmdesátých let [5]. Spojení hlavice a dříku je realizováno samosvorným kuželovým spojením, které je používáno pro snadnost, rychlost a soudržnost spojení. Nevýhodou tohoto typu spojení jsou vysoká tahová napětí v hlavici způsobená klínovým efektem, která v hlavici zůstávají i když dojde ke snížení vnějšího zatížení. U hlavic vyrobených z keramického materiálu je problematika tahových obvodových napětí o to významnější, neboť keramika je z hlediska mezního stavu křehkého porušení velmi citlivá na tahová napětí.

Vrcholový úhel dříku a hlavice se pro různé konstrukce pohyboval v intervalu od 3° do 6°. Větší hodnota vrcholového úhlu snižuje napětí v hlavici a je tedy výhodnější z hlediska bezpečnosti k meznímu stavu porušení keramické hlavice. Menší hodnota úhlu zaručuje trvalé spojení dříku a hlavice i při nízkých hodnotách součinitele tření a je tedy výhodnější z hlediska soudržnosti kuželového spojení. Kompromis mezi zmíněnými požadavky je zahrnut v normách DIN 254 a DIN ISO 3040, které doporučují kuželovitost spojení 1:10 (úhel 5°43'30").

V lékařské praxi se používají dva základní typy dříků, lišící se kvalitou opracování kontaktního kužele. Jsou to dříky hladké s drsností kužele  $R_a < 0,4 \mu\text{m}$  a dříky, na jejichž kuželi jsou vyrobeny jemné zoubky lichoběžníkového nebo trojúhelníkového profilu [2]. Z publikovaných experimentálních výsledků plyne, že s rostoucí hodnotou  $R_a$  kužele dříku roste i síla nutná na destrukci hlavice ze zirkoniové keramiky pro oba materiály dříku, kterými byly Ti a CoCr. Výsledky však nebyly realizovány pro hlavici z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a ocelový dřík.

## 2.1 Testování vlastností a chování keramických hlavic

S problematikou zkoušení (testování) keramických hlavic úzce souvisí problematika zatížení hlavice *in vivo*, protože způsob zatížení v testovacích a fyziologických podmínkách by se neměl příliš lišit.

Po aplikaci totální endoprotézy do lidského těla působí na vnější povrch keramické hlavice tlakové zatížení, způsobené kontaktem mezi hlavicí a jamkou. Silová výslednice tohoto zatížení svírá s osou hlavice úhel asi  $30^\circ$  [15]. V článku [3] se autoři zabývají měřením velikosti a orientace této silové výslednice v průběhu chůze, při běhu a při klopýtnutí. K tomuto účelu byly dvěma pacientům implantovány speciální totální endoprotézy, jejichž krček byl dutý a obsahoval tenzometrické snímače, které měřily deformaci krčku dříku. Takto získané hodnoty byly telemetricky vysílány z pacienta pomocí speciálního vysílacího zařízení. Z analýzy výsledků měření vyplývá, že při chůzi je maximální hodnota silové výslednice rovna asi 4 násobku hmotnosti pacienta, v případě klopýtnutí se tato síla zvětšuje až na 9-ti násobek hmotnosti pacienta.

Z publikací zabývajících se problematikou fyziologického zatížení vyplývá, že fyziologické zatížení není rovnoběžné s osou hlavice. Tento závěr však nebyl zahrnut v normě pro určování statické pevnosti keramických hlavic (ISO 7206-5) [12] a publikace zabývajících se problematikou napjatosti v keramické hlavici výpočtovým, případně experimentálním modelováním, vycházejí z vazebních a zátěžných podmínek definovaných touto normou. Z tohoto důvodu autoři používají rotačně symetrický model soustavy (hlavice a dříku) se zatížením rovnoběžným s osou hlavice. Pro modelování fyziologického zatížení by bylo nutné přejít z rotačně symetrického modelu na model prostorový a tím by se podstatně zvýšily kapacitní nároky na výpočetní techniku

## 2.2 Experimentální modelování

Nejrozsáhlejší fotoelasticimetrická studie na prostorovém modelu byla provedena v [11]. Autoři se však nezabývají problematikou výrobních nepřesností kontaktního spojení dřík-hlavice, protože jejich fotoelasticimetrický model byl velmi kvalitně vyrobený, navíc ani jejich předchůdci v [17] experimentálně nezjišťovali vliv těchto nepřesností na napjatost v hlavici. Prostorová fotoelasticimetrie se používá k verifikaci výsledků získaných z výpočtového modelování [8]. Z analýzy výsledků vyplývá dobrý soulad mezi změřenými a vypočítanými hodnotami.

Díky relativní jednoduchosti tenzometrických měření jsou tato velmi často používána pro určování přetvoření na hlavici [1]. Užitečnost této metody je snížena nemožností měřit napětí přímo v oblastech, kde nás napjatost nejvíce zajímá (na vnitřní kontaktní ploše).

### **2.3 Výpočtové modelování deformace a napjatosti**

K výpočtovému modelování napjatosti a deformace se v současné době používají systémy metody konečných prvků. Kontaktní prvky modelující kontakt hlavice a dřívku byly poprvé aplikovány v roce 1990 na rotačně symetrickém modelu soustavy [1]. Předcházející práce jiných autorů byly provedeny za neoprávněných zjednodušujících předpokladů, které souvisely s umožněnou úrovní modelování. Výsledky z rovinného modelu hlavice, který měl zamezen vertikální posuv vnitřního kužele hlavice [18], jsou velice vzdáleny výsledkům z experimentů, příp. výsledkům z rotačně symetrického modelu. Předpoklad dokonalé adheze mezi dřívkem a hlavicí [13] (v modelu se neuvažoval relativní posuv hlavice a dřívku při zatěžování) vedl k odlišné deformaci soustavy a tím i k odlišné napjatosti. Při uvažování relativního posuvu mezi dřívkem a hlavicí je dominantní deformací roztažení kužele hlavice. V případě, že je tomuto posuvu zabráněno, hlavice se deformuje pouze v horní části.

Problematikou výrobních nepřesností kuželového kontaktního spojení se zabývalo několik autorů, avšak pouze u hlavic z  $ZrO_2$  nasazených na dřív z Ti nebo CoCr a soustředili se pouze na odchylku od nominální kuželovitosti [9]. Z publikovaných výsledků vyplývá, že destrukční síla dle ISO 7206-5 je v intervalu 0-20' téměř konstantní. Mimo tento interval dochází k jejímu výraznému poklesu.

### **2.4 Spolehlivost aplikací keramických hlavic kyčelní endoprotézy**

Spolehlivost keramické hlavice nasazené na kuželový dřív je zajištěna přísnou kontrolou materiálových vlastností, přesností výroby kontaktních ploch a dodržení rozměrových tolerancí [19]. Z neoficiálních odhadů vyplývá, že v zahraničí je poměr rozlomených hlavic *in vivo* k celkovému počtu aplikací asi 1/10000 [8]. Počet aplikací implantátů obsahujících keramické hlavice je v současné době velmi vysoký a skutečný výskyt destrukcí hlavic je možné odhadnout z počtu prezentovaných lékařských článků, zabývajících se problematikou selhání prvků endoprotézy.

## **3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE**

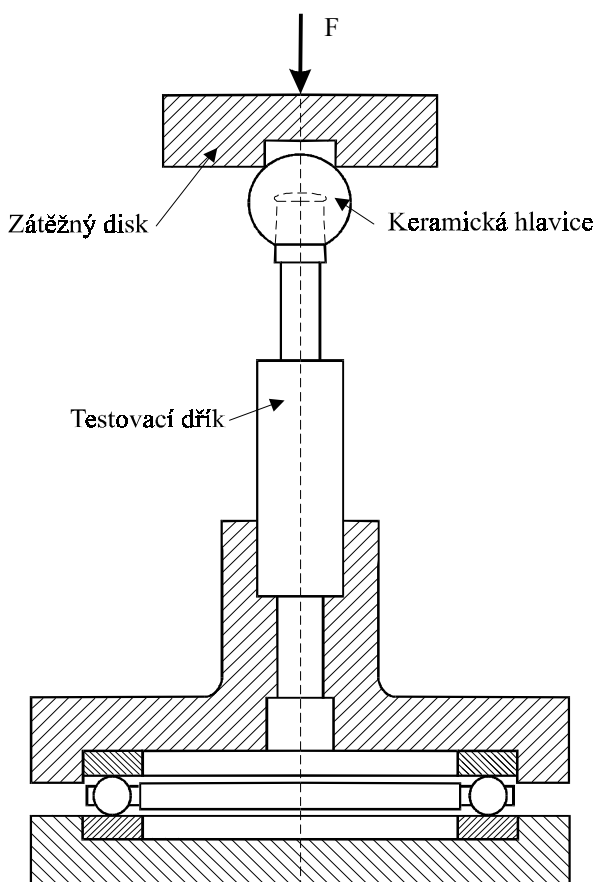
V České republice se výrobou prvků totální endoprotézy zabývá několik firem, mezi něž patří firma Beznoska (výrobce dřívků od roku 1972) a DIAS Turnov s.r.o. (výrobce keramických hlavic od roku 1989). Formulace problému, který je řešen v rámci disertační práce, vyplývá ze situace v oblasti aplikací totálních endoprotéz kyčelního kloubu typu „Beznoska-DIAS“, u kterých došlo u nezanedbatelného množství pacientů k porušení keramické hlavice. Nejhorší situace je patrně v nemocnici v Havlíčkově Brodě, kde do dnešního dne bylo nutné provést 8 reoperací kyčelních endoprotéz, což představuje pravděpodobnost porušení

hlavice větší než 0,9% (zahraniční zdroje uvádějí maximální akceptovatelnou hodnotu pravděpodobnosti porušení implantátů 0,1% [8])

Cílem disertační práce je přispět k objasnění příčin destrukcí keramických hlavic kyčelní endoprotézy. Problém řešený v disertační práci byl formulován následovně:

***Provést napjatostně spolehlivostní analýzu u české varianty keramické hlavice z  $Al_2O_3$ , zatížené v souladu s ISO 7206-5, výpočtovým a experimentálním modelováním s cílem prošetřit příčiny porušování hlavic a navrhnout opatření.***

Na světě existuje okolo 5000 biomechanických pracovišť. Otázkou je, proč právě naše pracoviště se zabývá problematikou totálních endoprotéz. Není daná problematika již dávno vyřešena? V zahraničí byly publikovány studie o napjatosti v hlavici kyčelní endoprotézy (viz kap.2.3). Tyto výsledky jsou však aplikovatelné pouze na konkrétní hlavici a dřík, které se v dané zemi používají. Výrobce hlavic (DIAS Turnov s.r.o.) převzal tvar implantátů od zahraničních výrobců. Nebylo však možné převzít know-how a technologii výroby keramických hlavic. S technologií výroby je úzce spojena problematika povrchové úpravy a výrobních nepřesností. Technologické a materiálové parametry se pro každý podnik liší a je tedy nutné provést výpočty napjatosti a deformace i pro české varianty totální endoprotézy typu „Beznoska-DIAS“, které nebyly doposud provedeny až na jednu výjimku [16], na kterou tato práce úzce navazuje.



Obr.3.1 Schéma experimentálního zařízení dle ISO 7206-5

V roce 1993 byly zahájeny na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR experimenty (Ing. Jitka Jírová, CSc.), jejichž cílem bylo určit statickou pevnost keramických hlavic totální endoprotézy kyčelního kloubu podle normy ISO 7206-5 [12]. Na sklonku roku 1995 se objevily informace o tom, že u některých pacientů, kterým byla aplikována endoprotéza kyčelního kloubu, došlo k porušení soudržnosti keramické hlavice, což problematiku spolehlivosti keramických hlavic velmi zaktualizovalo. Dle uvedené normy byla hlavice nasazena na kužel testovacího dříku, který byl upevněn ve speciálním přípravku upnutém v trhacím stroji obr.3.1. Silové působení ze zátěžného stroje se přenášelo přes ocelový zátěžný disk na keramickou hlavici, která se nasouvala na ocelový dřík. Při experimentu se určovala síla, při které došlo k destrukci hlavice. Kontaktní kuželová plocha dříku byla



ve dvojnásobném provedení: hladký kužel dřívku a kužel s jemně vysoustruženými zoubky (obr.4.2).

Výsledkem experimentu bylo zjištění, že průměrná destrukční síla byla v případě hlavice nasazené na hladký dřív 27 kN, zatímco v případě hlavice nasazené na zoubkovaný dřív byla 47 kN, tj. o 74% vyšší [16].

Pracovníci ÚTAMu se rozhodli objasnit příčiny tohoto experimentálně zjištěného jevu výpočtovým modelováním. V této fázi řešení problému začali s ÚTAMem spolupracovat i pracovníci Ústavu mechaniky těles strojní fakulty v Brně. Původní cíle řešení problému byly modifikovány následovně:

- přechod od izolovaného výpočtového modelování, resp. izolovaných experimentálních činností ke komplexnímu posuzování deformace, napjatosti a spolehlivosti keramické hlavice,
- důraz klást na výpočtové modelování, v němž bude mít experiment nezastupitelnou úlohu, a to v získávání vstupních údajů do výpočtového modelování, ověřování toho, co je a co není podstatné z hlediska řešení problému a v ověřování správnosti výsledků získaných výpočtovým modelováním.

Předkládaná práce je tedy zaměřena na řešení těchto dílčích problémů:

- **určení napjatosti a deformace v soustavě „dřív - hlavice“ s využitím výpočtového modelování (kap.4),**
- **experimentální určování deformace prvků této soustavy (kap.5),**
- **posuzování pravděpodobnosti porušení keramické hlavice (kap.6).**

## 4 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Důležitým prvkem výpočtového modelu je systém veličin, obsahující na zvolené rozlišovací úrovni podstatné prvky a vazby objektu z hlediska řešeného problému na daném objektu. Podstatnými prvky systému jsou: vlastnosti objektu (geometrie, materiál, vazby), působení na objekt (zatížení objektu, ovlivnění objektu) a chování objektu (napjatost, deformace a porušení objektu). Určení deformace a napjatosti představuje přímou úlohu, u níž vstupy do výpočtového modelování tvoří geometrie, materiálové charakteristiky, vazby a zatížení a výstupem jsou hodnoty parametrů chování, tj. deformace, napjatosti a pravděpodobnosti porušení.

### 4.1 Vstupní údaje do výpočtového modelování

V současné době se vyrábí několik typů keramických hlavice (obr.4.1) lišících se:

- vnějším průměrem (**D=32 a 28 mm**),
- hloubkou kuželového otvoru v hlavici (pro hlavici s D=32mm: **H=15mm, 19mm a 23mm**),
- hodnotou maximálního a minimálního průměru kužele:  $D_1/D_2 = 12/14\text{mm}$  nebo  **$D_1/D_2 = 14/16\text{mm}$** .

Kužele dřívku i hlavice se vyrábějí podle normy ISO 3040 s nominálním úhlem  $5^{\circ}43'30''$ . Dřívky se vyrábějí s hladkou a se zdrsňelou kontaktní kuželovou plochou.

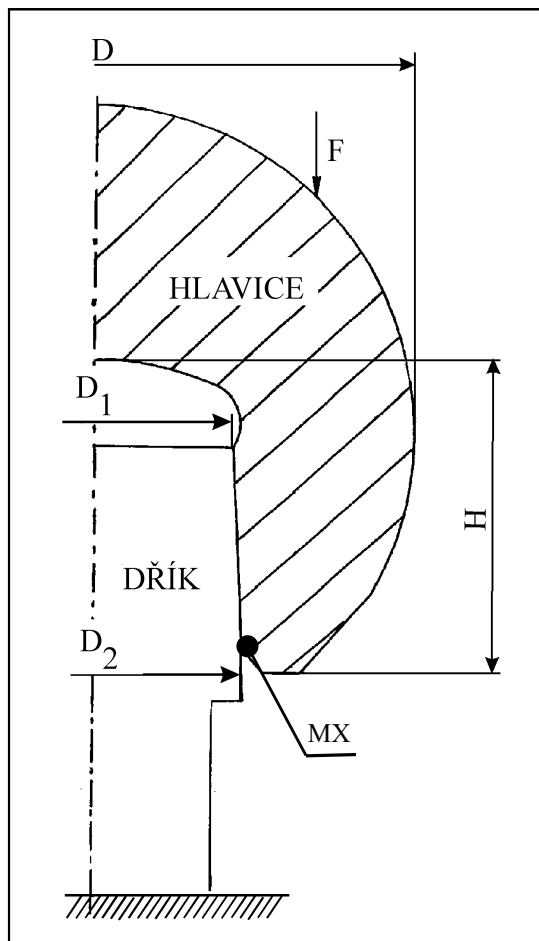
V této práci je detailně analyzována geometrická varianta, která je v předcházejícím odstavci zvýrazněna. Ke geometrickým vstupům lze řadit i výrobní nepřesnosti kontaktní plochy dříku a hlavice, a proto u sledované soustavy bylo analyzováno několik variant výrobních nepřesností (kap.4.3.2).

Z hlediska návaznosti na práce provedené na ÚTAMu byl materiál testovacího

dříku modelován jako elastický a charakterizován s následujícími konstantami  $E_d=2,1 \cdot 10^5$  MPa a  $\mu_h=0,3$ . Hlavice byla zhotovena z  $Al_2O_3$  a je uvažována jako izotropní lineárně pružné kontinuum s elastickými konstantami  $E_h=3,9 \cdot 10^5$  MPa a  $\mu_h=0,23$ .

Z hlediska vazeb a zatížení se výpočtové modelování omezuje pouze na případ, který je definován normou ISO 7206-5 [12]. Podle této normy je spodní konec dříku upevněn ve speciálním přípravku, který zamezuje jak osový tak i podélný posuv (obr.3.1). Tato realita byla modelována předepsáním nulových okrajových podmínek spodního konce dříku. Vazba mezi dříkem a hlavicí se realizovala pomocí kontaktu a uvažovalo se elastické Coulombovo tření charakterizované součinitelem tření  $f$ , jehož hodnota byla uvažována  $f=0,15$ . Zatížení soustavy je realizováno silovým zatížením v místě, v němž dochází ke kontaktu mezi zátěžným diskem a keramickou hlavicí obr.3.1.

Pro výpočtové modelování byl v procesu řešení použit systém MKP – ANSYS.



Obr.4.1 Schéma modelové soustavy

## 4.2 Testovací úlohy

V počáteční fázi řešení problému interakce mezi dříkem a hlavicí a stanovení napjatosti a deformace v soustavě bylo nutné provést řadu testovacích výpočtů pro snížení časové náročnosti výpočtu při zachování jeho přesnosti a důvěryhodnosti. Testovací úlohy se zaměřily na:

- využití deformačního zatížení soustavy místo zatížení silového,
- určení optimální hustoty diskretizace soustavy bez zoubků,
- určení optimální hustoty diskretizace v případě ultrajemných zoubků,
- určení optimální hodnoty tečné a normálové tuhosti kontaktních prvků,
- posouzení použitelnosti makroprvků.

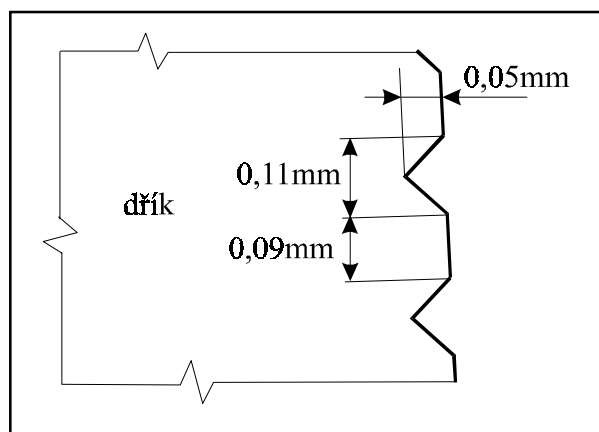
S využitím výsledků z uvedených testovacích výpočtů bylo možné snížit časovou náročnost výpočtů asi na 1/40 při uvažování elastického materiálu dříku, nebo na 1/20 při uvažování elasto-plastického chování materiálu dříku, což představuje radikální zrychlení výpočtů a poukazuje na důležitost těchto testovacích výpočtů. Uvedené snížení časové náročnosti výpočtů umožnilo realizovat výpočtové modelování i u prostorových úloh na modelech s vyšší hustotou diskretizace.

### 4.3 Realizační úlohy

Po provedení testovacích úloh bylo možné přistoupit k vlastnímu výpočtovému modelování. Nejvýznamnější realizační úlohy se zaměřily na posouzení vlivu zoubků na kontaktní ploše dříku a vlivu výrobních nepřesností na napjatost v hlavici.

#### 4.3.1 Vliv zoubkování kužele dříku

V počáteční fázi řešení této problematiky nebyla k dispozici výkresová dokumentace dříku, a proto bylo nutné provést měření povrchu kužele zoubkovaného dříku. K měření byl použit profiloměr ME-10, z jehož záznamu byl získán tvar a rozměry zoubků [20]. Reálný profil zoubků byl nahrazen profilem lichoběžníkovým obr.4.2.



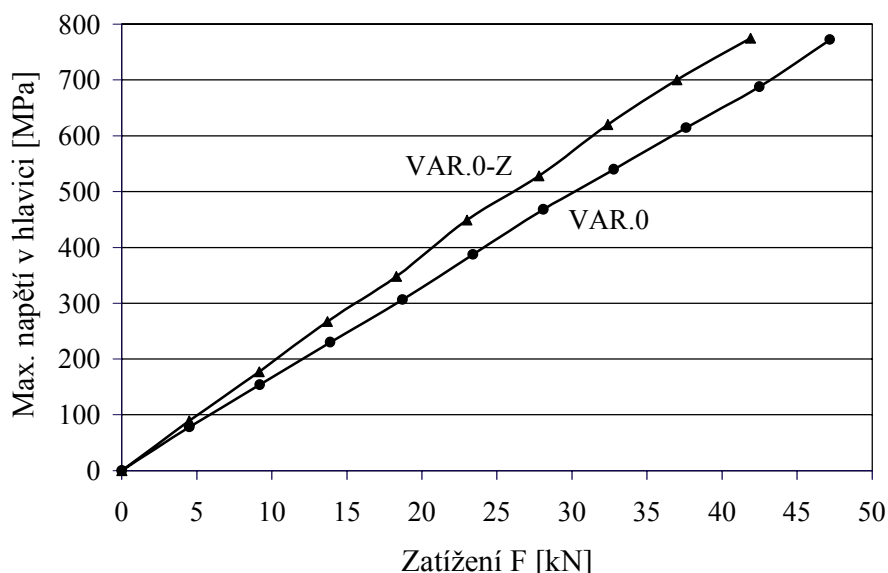
Obr.4.2 Tvar a velikosti zoubků na kuželi dříku

lichoběžníkovým obr.4.2.

Soustava s hladkým dříkem je označena jako **VAR.0**, soustava s dříkem zoubkovaným jako **VAR.0Z**. Z analýzy a ze srovnání izoploch jednotlivých napětí v keramické hlavici pro VAR.0 a VAR.0-Z vyplývá, že jsou prakticky shodné, liší se pouze v blízkosti kontaktní plochy, kde je patrný lokální vliv zoubků. Maximální tahové napětí v hlavici, které je z hlediska mezního stavu

porušení nejvýznamnější, se nachází v blízkosti kontaktní plochy, viz MX na obr.4.1, a má téměř v celém průřezu směr obvodový (výjimku tvoří horní oblast, v níž je hlavice zatížena). Proto budou v další části detailně analyzována obvodová napětí, a to pouze jejich maximální hodnoty.

Z analýzy závislostí na obr.4.3 je zřejmé, že obě křivky jsou téměř lineární, přičemž platí, že závislost pro VAR.0-Z vykazuje vyšší hodnoty maximálních napětí než VAR.0. To by však znamenalo, že by se dříve měla porušit hlavice nasazená na dřík zoubkovaný, což je v rozporu s výsledky experimentů (kap.3). V této fázi výpočtového modelování bylo tedy nutné se vrátit na začátek výpočtového modelování a hledat nový parametr, který byl doposud považován za nepodstatný a zahrnout ho do výpočtového modelování. Jako nové parametry, které by mohly dát do souladu výsledky experimentálního a výpočtového modelování, byly uvažovány výrobní nepřesnosti kontaktního kužele.



Obr. 4.3 Průběh maximálního tahového napětí v hlavici

### 4.3.2 Vliv výrobních nepřesností

Po analýze výrobních dokumentací obou komponent soustavy, po konzultacích s výrobcí a po realizaci měření tvarových a rozměrových odchylek hlavic a dříků, byly jako podstatné výrobní nepřesnosti uvažovány:

- odchylka od nominální kuželovitosti,
- ovalita kontaktních ploch.

V první etapě výpočtového modelování byl analyzován vliv uvedených výrobních nepřesností odděleně, v následné etapě bylo realizováno výpočtové modelování interakce zmíněných výrobních nepřesností.

#### *Odchylka od nominální kuželovitosti dříku a hlavice*

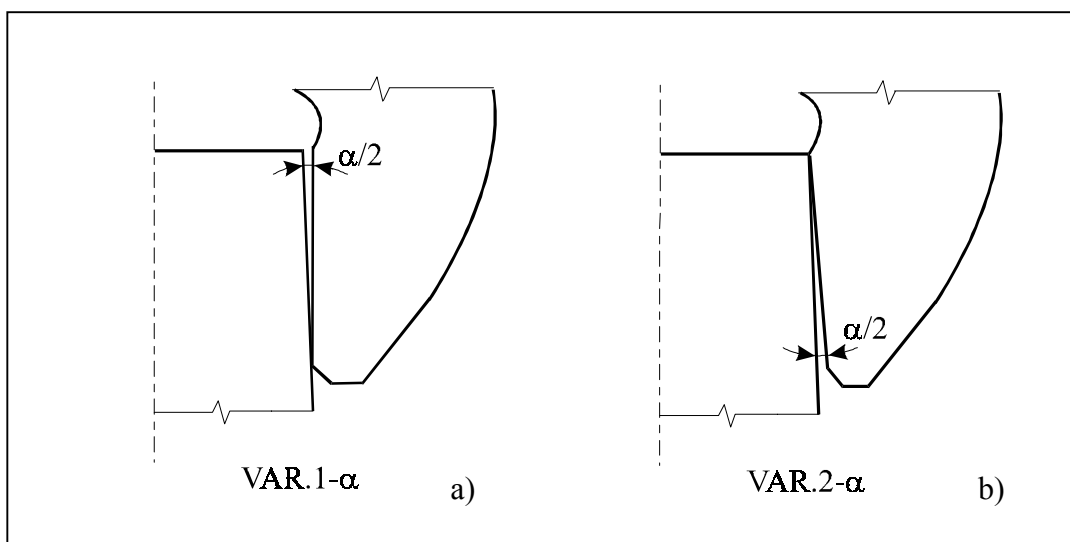
Pro analýzu vlivu této výrobní nepřesnosti na deformaci a napjatost analyzované soustavy se předpokládalo, že dřík je vyroben přesně s nominálním vrcholovým úhlem  $5^{\circ}43'30''$ . Nepřesnost byla modelována pouze na kuželi hlavice, kde jsou uvažovány následující varianty :

- **VAR.0** - vrcholový úhel dříku i hlavice je shodný (přesně vyrobený) - obr.4.1.
- **VAR.1- $\alpha$**  - vrcholový úhel hlavice je menší než úhel dříku - obr.4.4a,
- **VAR.2- $\alpha$**  - vrcholový úhel hlavice je větší než úhel dříku - obr.4.4b.

Výrobní nepřesnost typu VAR.1 je z hlediska současné výrobní dokumentace hlavice a dříku nedovolená. Přesto je tato varianta výrobní nepřesnosti v této práci uvažována, a to z toho důvodu, že při operaci je možné neúmyslně tento typ výrobní nepřesnosti vytvořit tím, že ke kompletaci totální endoprotézy se použijí komponenty od různých výrobců.

Výrobní nepřesnost VAR.2 je z hlediska současných výrobních dokumentací hlavice a dříku povolena [19], její mezní hodnota pro celou soustavu je  $\alpha=10'$  a tato hodnota byla použita při výpočtovém modelování, a to jak u VAR.2, tak i u VAR.1.

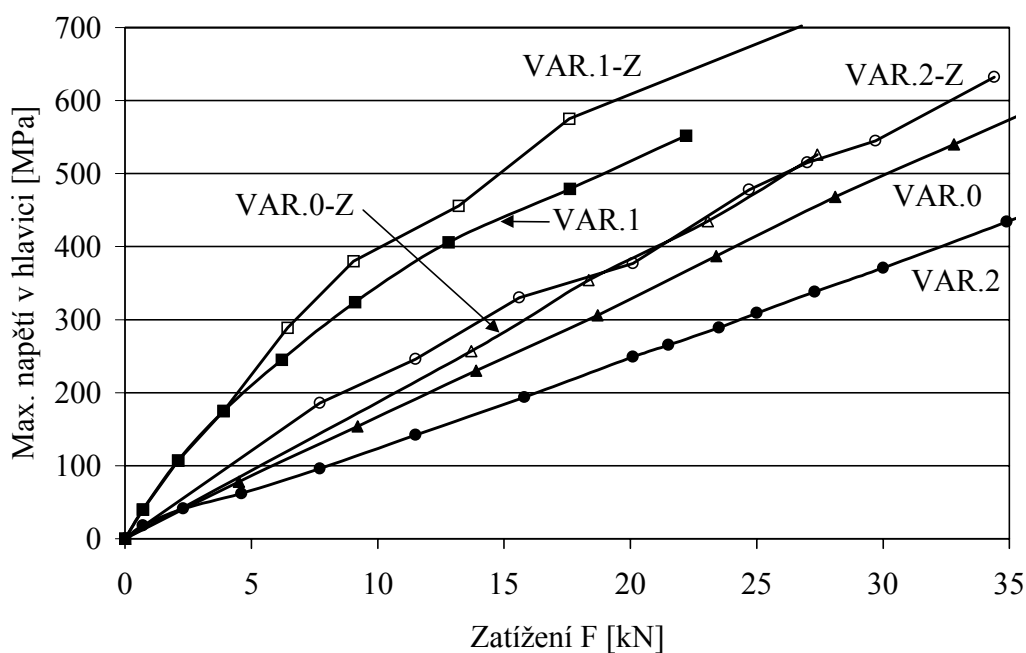
Výrobní nepřesnost typu „odchylka od nominální kuželovitosti“ je možné modelovat jako rotačně symetrickou, protože rozptyl změřených hodnot úhlu kužele



Obr.4.4 Varianty výrobní nepřesnosti typu „odchylka od nominální kuželovitosti“

dříku a hlavice po obvodě soustavy je nepodstatný. Využití rotační symetrie snížilo kapacitní nároky na výpočet a umožnilo modelování procesu zalisování hlavice i na zoubkovaný dřík.

V keramické hlavici vzniká v procesu jejího zatěžování trojosá napjatost. Na rozdíl od přesně vyrobené varianty (VAR.0) se charakter napjatosti v průběhu zatěžování mění, a to v důsledku vymezování výrobní nepřesnosti. Extrémní tahová napětí ( $\sigma_1$ ) jsou však v průběhu zatěžování stále orientována v obvodovém směru. Maximální tahová napětí se u VAR.0 a VAR.1 nachází v průběhu celého zatěžování v okolí místa MX na obr.4.1. U VAR.2 je situace odlišná v tom, že se místo maximálního napětí v průběhu zatěžování posouvá přes celou kontaktní plochu hlavice a až po vymezení výrobní nepřesnosti se nachází v okolí místa MX.



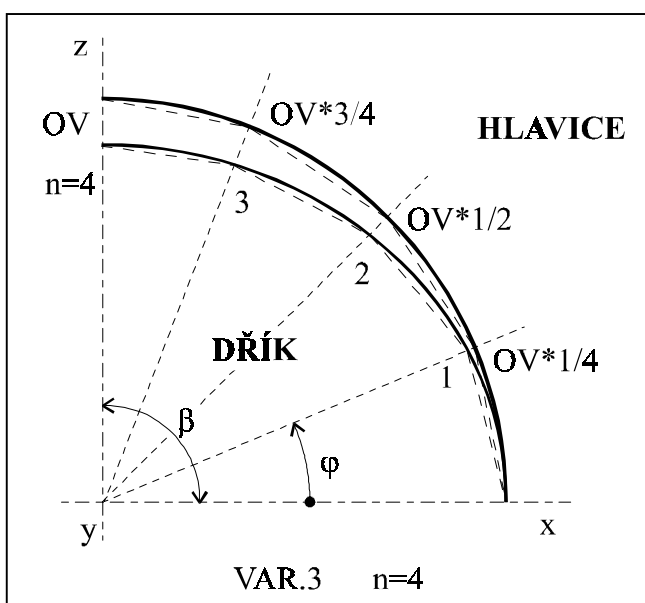
Obr.4.5 Průběh hodnoty maximálního napětí v hlavici pro VAR.0,1,2

Uvedená konstatování platí i pro zoubkovanou variantu. Srovnání maximálních tahových napětí jednotlivých uvažovaných variant v závislosti na zatížení je znázorněno na obr.4.5. Z analýzy vyplývá, že v případě VAR.1 jsou maximální hodnoty napětí  $\sigma_1$  podstatně vyšší než pro ostatní uvažované varianty. Toto zvýšení tahových napětí je způsobeno tím, že u VAR.1 dochází od začátku zatěžování k výrazné deformaci v oblasti spodní části kužele hlavice (místo MX), což je oblast, ve které působí maximální napětí u přesně vyrobené soustavy (VAR.0). Tato varianta výrobní nepřesnosti je tedy z hlediska napjatosti v keramické hlavici zcela nevhodná. Z analýzy výsledků dále vyplývá, že maximální tahová napětí jsou u VAR.2 nižší ve srovnání s VAR.0, výjimku tvoří interval nízkých hodnot zatížení (do 3 kN). Ze srovnání výsledků pro soustavu s hladkým a zoubkovaným dříkem vyplývá, že v případě hlavice nasazené na zoubkovaný dřík dochází ke zvýšení maximálních tahových napětí ve srovnání s hlavicí nasazenou na dřík hladký, a to pro všechny uvažované varianty, což však není v souladu s výsledky získanými experimentálně (kap.3).

### ***Ovalita kontaktních ploch dříku a hlavice***

Pro modelování výrobní nepřesnosti typu ovalita kontaktních kuželových ploch dříku a hlavice bylo nutné využít prostorového modelu, čímž došlo k výraznému zvýšení počtu prvků a tím i ke zpomalení výpočtů. Z důvodu snížení počtu prvků byla obecná ovalita nahrazena ovalitou modelovou, která vycházela z následujícího zjednodušujícího předpokladu: výrobní nepřesnost je symetrická, tzn. že se lokalizuje pouze na určité oblasti (dané úhlem  $\beta$  - obr.4.6) a po obvodu je symetrická. Tento předpoklad dovoluje využití symetrie soustavy a pro  $\beta = 90^\circ$  se modeluje pouze  $\frac{1}{4}$  soustavy.

Geometrie výrobní nepřesnosti je znázorněna v horizontálním řezu soustavy



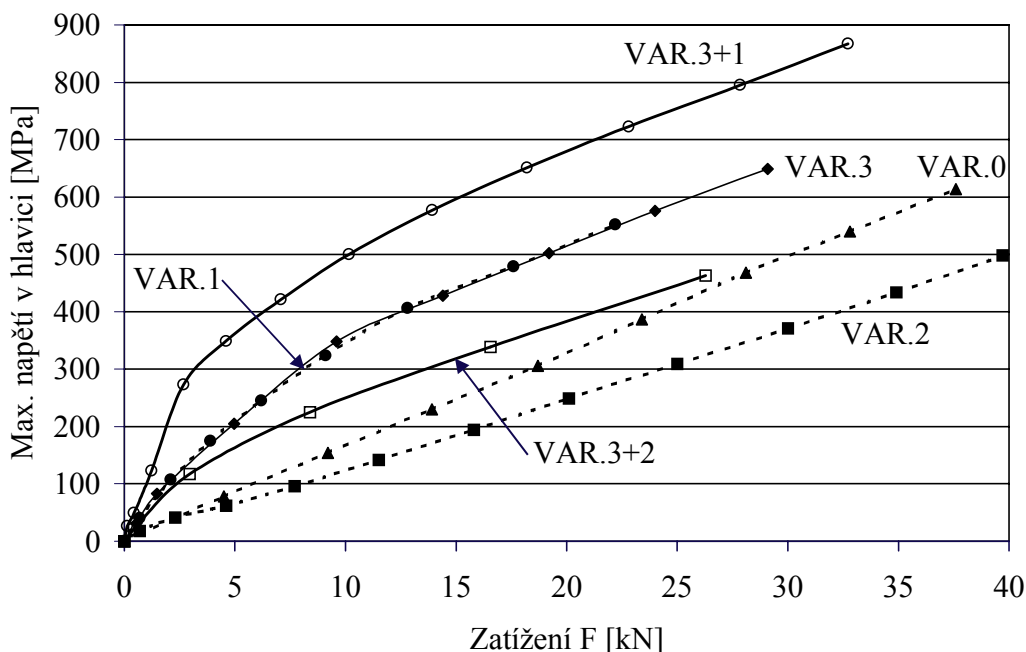
Obr.4.6 Horizontální řez kontaktní plochou hlavice a dříku

na obr.4.6, označení varianty je **VAR.3**. Na začátku zatěžování dochází ke kontaktu pouze na jedné povrchu kužele v rovině X–Y ( $\varphi=0^\circ$ ), se vzrůstající hodnotou úhlu  $\varphi$  roste i velikost výrobní nepřesnosti (mezery mezi hlavicí a dříkem) a maximální hodnota výrobní nepřesnosti je modelována v rovině kolmé, tedy Z–Y ( $\varphi=\beta$ ). Do obrázku je také čárkovane zakreslena aproximace kontaktní křivky částí m-úhelníku ( $m=n*360^\circ/\beta$ ), protože v použitém systému ANSYS není zatím možné používat pro diskretizaci kontaktní plochy prvky vyšších řádů. Mezní hodnota

výrobní nepřesnosti vycházející z výrobních dokumentací je  $OV=0,01$  mm [19] a tato hodnota byla využita i při výpočtovém modelování.

U reálné endoprotézy kyčelního kloubu je vždy přítomno více výrobních nepřesností a z tohoto důvodu je realizováno výpočtové modelování interakce výrobních nepřesností na následujících dvou variantách: **VAR.1+3** – interakce VAR.3 a VAR.1 a **VAR.2+3** – interakce VAR.3 a VAR.2.

Výsledky výpočtového modelování jsou znázorněny na obr.4.7, do něhož jsou čárkovaně zakresleny průběhy pro rotačně symetrické varianty (VAR.0, VAR.1 a VAR.2). Z hlediska maximálních tahových napětí se podle očekávání ukázalo, že nejvyšší hodnoty těchto napětí se vyskytují u VAR.1+3, a to z toho důvodu, že dílčí výrobní nepřesnosti (VAR.1 a VAR.3) způsobovaly samy o sobě vysoká tahová napětí. Tento typ interakce výrobních nepřesností je z hlediska napjatosti v keramické hlavici zcela nevhodný. U druhého typu interakce (VAR.2+3) jsou maximální tahová napětí vyšší než u VAR.2, ale nižší než u VAR.3, tzn. že přítomnost výrobní nepřesnosti typu VAR.2 společně s ovalitou (VAR.3) snižuje extrémní tahová napětí v hlavici ve srovnání s případem existence pouze ovality.



Obr.4.7 Maximální tahové napětí v hlavici v průběhu zatěžování

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Experimentální analýza chování hlavic kyčelní endoprotézy navazuje na výsledky uvedené v [16] v tom, že vedle vyšetřování velikosti sil vedoucích k porušení jejich soudržnosti byly:

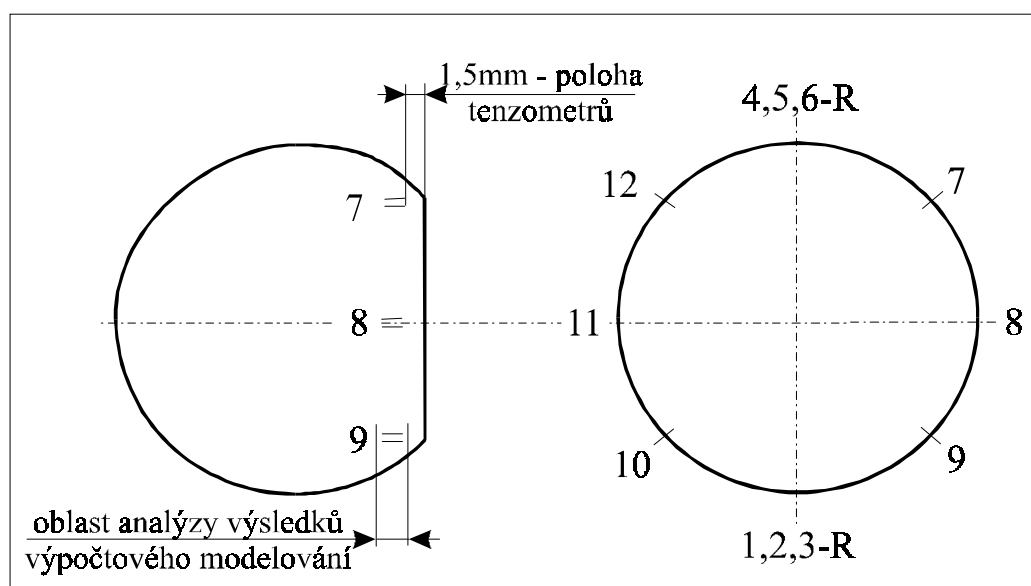
- měřením zjišťovány velikosti výrobních nepřesností stykových ploch,
- proměřeny profily zoubků před a po experimentu,
- prováděla se tenzometrická měření v procesu zatěžování,
- provádělo se měření vertikálního posuvu hlavice.

## 5.1 Metodika měření

Před realizací vlastního experimentu byly kužele dříku i hlavice proměřeny s ohledem na velikosti výrobních nepřesností typu „odchylka od nominální kuželovitosti“ a „ovalita kontaktních ploch“. Maximální odchylka úhlu kužele hlavice a dříku byla 6', a sice hlavice měla větší úhel než dřík - VAR.2. K výrobní nepřesnosti typu „ovalita“ lze říci, že u keramických hlavice byla maximálně 0,006mm; u dříku maximálně 0,012 mm.

Zatěžování se realizovalo na stroji TIRA TEST 2300. Zatížení F se přenášelo na hlavici přes zátěžný disk; hlavice tedy byla zatěžována liniovou silou na kružnici s poloměrem 11 mm (obr.3.1).

Z výsledků výpočtového modelování vyplývá (kap.4.3.1), že maximální tahová napětí v keramické hlavici mají obvodový směr a maxim nabývají ve spodní části kužele hlavice (místo MX obr.4.1). Z tohoto důvodu byly tenzometrické snímače nalepeny po obvodu hlavice v její dolní části (obr.5.1). Šest snímačů pro jednoosou napjatost (Hottinger 0,6/120LY11) bylo orientováno v obvodovém směru, dva snímače typu růžice (Micro-measurements WA-06-030WR-120) byly orientovány tak, že jeden jejich snímač byl v obvodovém směru. Tenzometrické snímače byly zapojeny do „půlmostu“ s kompenzací vlivu teploty. Pro měření byla použita aparatura UPM 60. K měření vertikálního posuvu hlavice bylo použito indukčního snímače podélné deformace.



Obr.5.1 Rozmístění a čísla tenzometrů na keramické hlavici

## 5.2 Analýza výsledků experimentů

V průběhu zatěžování keramické hlavice byla měřena obvodová přetvoření na vnějším kulovém povrchu hlavice (obr.5.2) a vertikální posuv hlavice (obr.5.3). Experimenty byly realizovány na soustavách s hladkým dříkem (dále VAR.HD) a na soustavách s dříkem zoubkovaným (dále VAR.ZD). V práci jsou však



analyzovány výsledky pouze pro jeden reprezentant VAR.HD a jeden pro VAR.ZD, a to z důvodu podobnosti průběhů změřených veličin. Z výsledků experimentálního modelování vyplývá:

- závislosti  $\varepsilon_t - F$  jsou nelineární (obr.5.2) a přetvoření  $\varepsilon_t$  u varianty VAR.HD jsou menší než u VAR.ZD, což je způsobeno odlišným procesem vymezování výrobních nepřesností na začátku zatěžování.
- obvodová přetvoření po obvodu hlavice vykazují u VAR.ZD menší rozptyl než u VAR.HD. Nižší rozptyl obvodových přetvoření u VAR.ZD je způsoben tím, že si hlavice lépe „sedla“ na kužel dřívku díky jemným zoubkům, které se podstatně lépe a rychleji tvarově přizpůsobí výrobním nepřesnostem ve srovnání s hladkým dřívkem.
- nelinearitu vyazuje i závislost vertikálního posuvu hlavice  $u_y$  na zatížení  $F$  (obr.5.3), což je způsobeno přítomností výrobních nepřesností. Velikost  $u_y$  je v průběhu celého zatěžování u VAR.HD nižší než u VAR.ZD, což je způsobeno vysokým otěrem při nízkých hodnotách zatížení u VAR.ZD.
- porušení hlavice s hladkým dřívkem nastalo při zatížení 38,5 kN, se zoubkovaným dřívkem při 52,5 kN, což je v souladu s výsledky [16].
- po destrukci hlavice byl detailně proměřen zoubkovaný dřívek vyrobený z konstrukční oceli. Při zalisovávání hlavice na kužel dřívku došlo k tvarové změně profilů zoubků – ke zmenšení výšky zoubků až o 0,02 mm otěrem [27], aniž by se výrazně plastifikovaly.

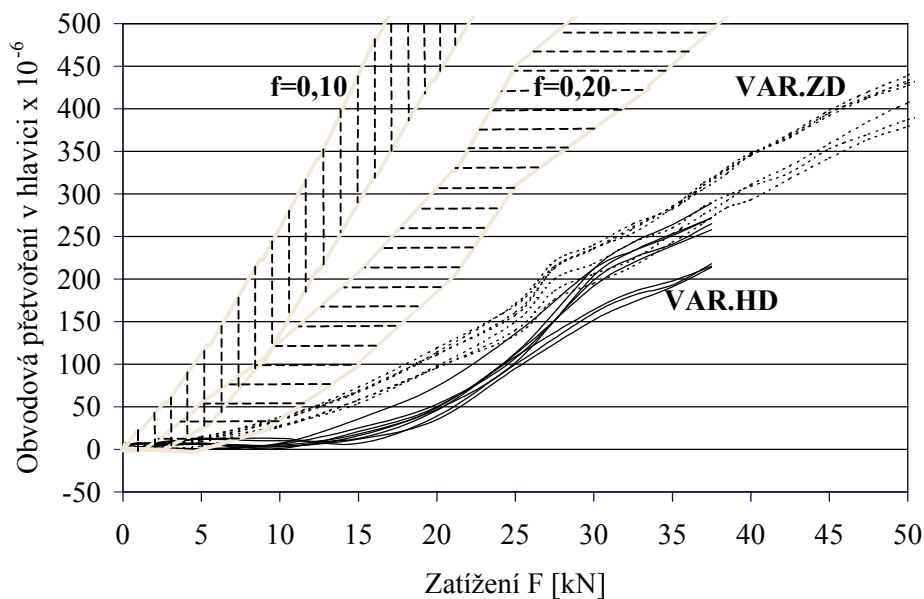
Výsledky experimentálního modelování jsou na obr.5.2 a obr.5.3 doplněny i o výsledky získané výpočtovým modelováním na soustavách s hladkým dřívkem a s uvažováním reálných výrobních nepřesností (ovalita + odchylka od nominální kuželovitosti, tedy VAR.3+2), jejichž velikosti byly zjištěny měřením -  $\alpha=5'11''$ ,  $\beta=90^\circ$ ,  $OV=0,0055\text{mm}$ . Výpočtové modelování se realizovalo pro různou hodnotu součinitele tření  $f \in (0,10;0,20)$ . Hodnoty vypočtených obvodových přetvoření  $\varepsilon_t$  se po obvodu hlavice mění a jsou na obr.5.2 znázorněny vždy dvěma mezními křivkami (maximální a minimální hodnota  $\varepsilon_t$  v analyzované oblasti – obr.5.1) a oblast mezi těmito křivkami je vyšrafovaná (vertikálně pro  $f=0,10$ , horizontálně pro  $f=0,20$ ). Z analýzy uvedených závislostí vyplývá, že s rostoucí velikostí součinitele tření mezi hlavicí a dřívkem dochází:

- k posuvu křivek  $\varepsilon_t$  k vyšším hodnotám zatížení na začátku zatěžování,
- k poklesu sklonu průběhů křivek  $\varepsilon_t$ , čímž se blíží sklonu experimentálně získaných křivek,
- k poklesu sklonu křivek vertikálního posuvu hlavice  $u_y$  (obr.5.3).

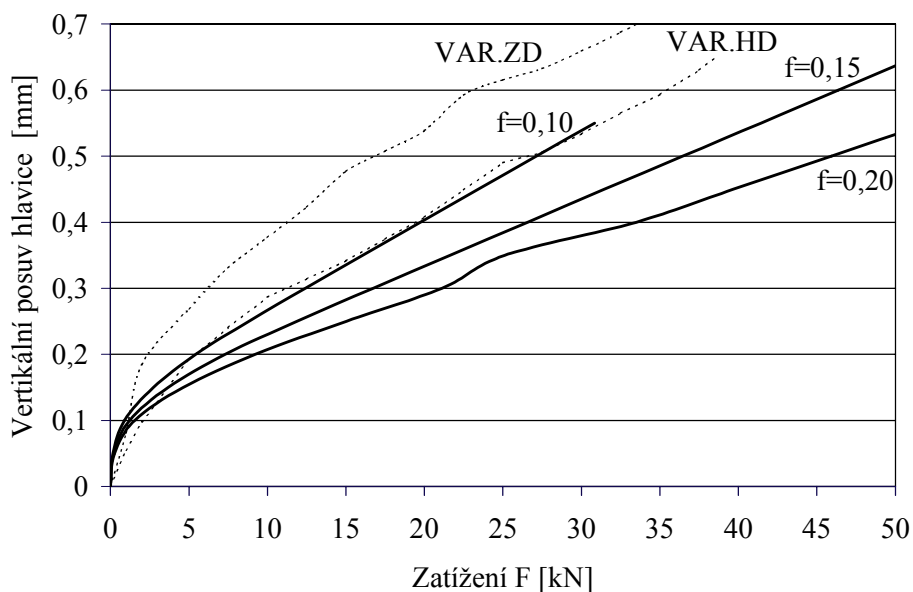
Z analýzy výsledků na obr.5.2 vyplývá, že k souladu mezi experimentálně a výpočtově získanými hodnotami bude docházet pro součinitel tření vyšší než 0,20. Ze srovnání sklonů závislostí  $u_y$  však vyplývá, že hodnota součinitele tření se nachází v intervalu  $f \in (0,10;0,15)$ , což však není v souladu s předchozím závěrem.

**Z této nejednotnosti uvedených závěrů plyne, že je nutné zvýšit úroveň jak experimentálního tak i výpočtového modelování, a to převážně v oblasti měření a modelování výrobních nepřesností kuželového kontaktního spojení. Detailní**

analýzou kroků nutných ke zpřesnění výpočtového a experimentálního modelování se zabývá kap.7.



Obr.5.2 Průběh změřených a vypočtených hodnot obvodových přetvoření hlavice



Obr.5.3 Průběh změřených a vypočtených hodnot vertikálního posuvu hlavice

## 6 POSOUZENÍ PRAVDĚPODOBNOСТИ PORUŠENÍ

Převážná většina keramických materiálů se při statickém i dynamickém zatěžování chová křehce a vykazuje až do lomu lineární závislost mezi napětím a deformací. Keramický materiál se na jedné straně vyznačuje vysokou odolností matrice vůči deformaci (vysoká hodnota  $E$ ) a na straně druhé nízkou hodnotou lomové houževnatosti  $K_I$ . Situace je o to nepříznivější, neboť keramické materiály vždy obsahují určité trhliny a vady - při technologii slinování vznikají ostré póry

velikosti zrn, při ochlazování mohou vznikat tahová napětí, která mohou iniciovat mikrotrhliny. Tyto mohou vznikat i při provozu součástí vyrobených z keramiky v důsledku koroze (často způsobená vodou) a abraze.

Pro keramiku, která se v současné době používá, je typické, že pevnost ať v tahu či ohybu není vzhledem k velkému rozptylu reprezentována jedinou hodnotou, ale je vyjádřena statistickým rozložením hodnot pevnosti. Pevnost pak není charakteristikou materiálu a závisí na velikosti a distribuci trhlin a na lomové houževnatosti. Pevnostní chování keramického materiálu lze nejčastěji popsat Weibullovým pravděpodobnostním modelem, který vychází z teorie „nejslabšího článku“. Nejjednodušší Weibullův model určující pravděpodobnost porušení keramické komponenty uvažuje při výpočtu pouze jedno hlavní napětí [6] a je definován vztahem:

$$P_f = 1 - e^{-\int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o}\right)^m dV}, \quad \sigma > \sigma_u, \quad (6.1)$$

kde:  $V$  - objem namáhaného materiálu,  $\sigma$  - napětí působící v objemu  $dV$ ,  $\sigma_u$  - napětí, pod jehož hodnotou nedochází k porušení materiálu,  $\sigma_o$  - normalizovaná materiálová pevnost objemové jednotky,  $m$  - Weibullův modul. Hodnoty  $m$ ,  $\sigma_u$ ,  $\sigma_o$  je možné považovat za materiálové charakteristiky, které však mohou být různé uvnitř tělesa a na jeho povrchu, což záleží na technologii zpracování a zejména na způsobu a kvalitě jeho opracování. V praxi se často používá konzervativního výpočetního postupu, u kterého se uvažuje, že napětí  $\sigma_u = 0$  MPa, tedy na porušení tělesa mají vliv všechna tahová napětí  $\sigma_1$ . Tím přejde 3-parametrický model na model 2-parametrický. Hodnota Weibullova modulu  $m$  souvisí s rozptylem hodnot pevnosti; nízká hodnota  $m$  znamená široký interval hodnot pevnosti a tím i větší pravděpodobnost výskytu „slabého článku“ a obráceně.

Existují i modely uvažující při výpočtu pravděpodobnosti porušení vliv všech tří hlavních napětí [14]. Vliv ostatních hlavních napětí ( $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) na výslednou pravděpodobnost porušení roste s hodnotou Weibullova modulu  $m$  a s hodnotami napětí  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ . U keramické hlavice kyčelní endoprotézy jsou hodnoty  $\sigma_{2max}$  cca 30%  $\sigma_{1max}$  a hodnoty  $\sigma_{3max}$  cca 8%  $\sigma_{1max}$  [36] a hodnota Weibullova modulu je poměrně nízká ( $m=3,2$ , viz dále). Z tohoto důvodu je tedy možné vliv zbývajících dvou hlavních napětí zanedbat a realizovat výpočtové modelování pravděpodobnosti porušení hlavice podle vztahu (6.1).

## 6.1 Určení materiálových charakteristik keramiky

Pro určování a posuzování pravděpodobnosti porušení keramické hlavice bylo využito poznatků a metod z [6], [14]. Pro určení materiálových charakteristik keramického materiálu bylo nutné realizovat zkoušku 3-bodovým ohybem 53 zkušebních vzorků. Výsledkem této zkoušky je soubor sil, při nichž došlo k porušení jednotlivých zkušebních vzorků. Vzorky se seřadí podle velikosti destrukční síly a vypočte se maximální ohybové napětí a pravděpodobnost porušení každého vzorku. Po logaritmických transformacích uvedených dat a po provedení lineární

regrese získáme Weibullův modul a napětí  $\sigma_u$ . Zbývají materiálovou charakteristiku  $\sigma_o$  získáme výpočtem dle (6.1) pro napjatost ve vzorku, kterému odpovídá pravděpodobnost porušení  $P_f=1-1/e$ . Vypočtené materiálové charakteristiky použité keramiky jsou:  $m = 3,2$ ;  $\sigma_u = 250 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_o = 238 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{3/m}$ .

## 6.2 Výpočtové modelování pravděpodobnosti porušení hlavice

Napjatost v keramické hlavici byla určována pomocí metody konečných prvků, a proto je nutné převést rovnici (6.1) z diferenciálního tvaru na tvar diferenční:

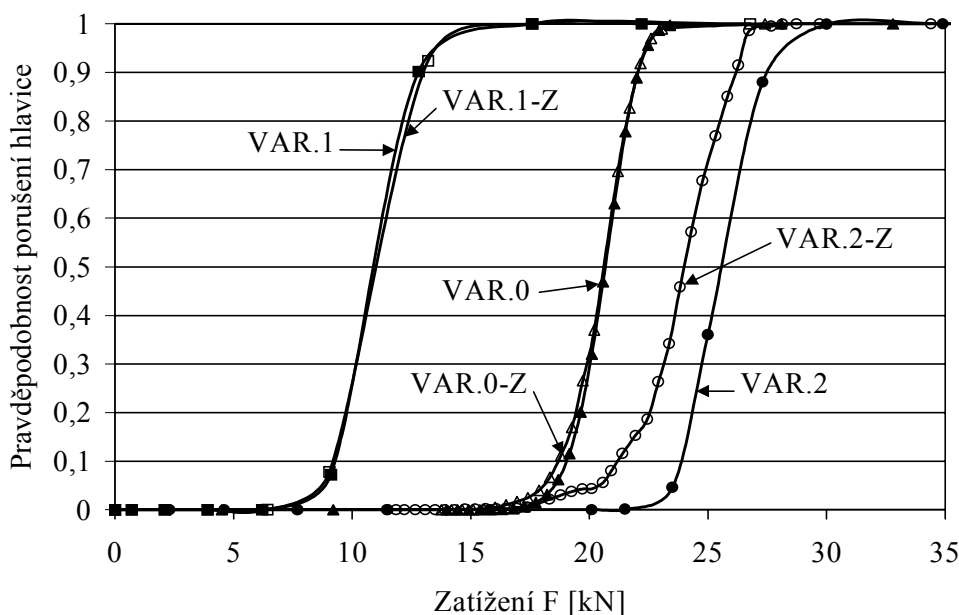
$$P_f = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \left( \frac{\sigma_i - \sigma_u}{\sigma_o} \right)^m \Delta V_i}, \sigma_i \geq \sigma_u, \quad (6.2)$$

kde:  $n$  - celkový počet prvků,  $V_i$  - objem prvku  $i$ ,  $\sigma_i$  - maximální tahové napětí v objemu  $V_i$  a  $m$ ,  $\sigma_o$ ,  $\sigma_u$  jsou již zmíněné materiálové charakteristiky.

Vstupními údaji do výpočtového modelování pravděpodobnosti porušení byly použity materiálové charakteristiky a výsledky z výpočtového modelování napjatosti (kap.4.3), pro vlastní výpočtové modelování pravděpodobnosti porušení keramické hlavice byl použit vlastní program v jazyku C. V další části se soustředíme pouze na vliv výrobních nepřesností na pravděpodobnost porušení keramické hlavice.

### 6.2.1 Vliv rotačně symetrických výrobních nepřesností

Výsledky výpočtového modelování jsou znázorněny na obr.6.1. Maximální tahová napětí analyzovaných variant jsou uvedena na obr.4.5. Ze srovnání průběhů závislosti na obou obrázcích vyplývá, že hodnoty maximálních napětí v hlavici jsou u VAR.x-Z vyšší než u VAR.x (pro  $x = 0; 1; 2$ ) a těmto výsledkům odpovídá i průběh pravděpodobnosti porušení (křivky pro VAR.x-Z jsou posunuty k nižším hodnotám zatížení ve srovnání s VAR.x). Nejvyšší posun křivek je patrný u VAR.2 a VAR.2-Z, přičemž s rostoucím zatížením se velikost tohoto posunu zmenšuje.



Obr.6.1 Průběh  $P_f$  keramické hlavice u rotačně symetrických variant

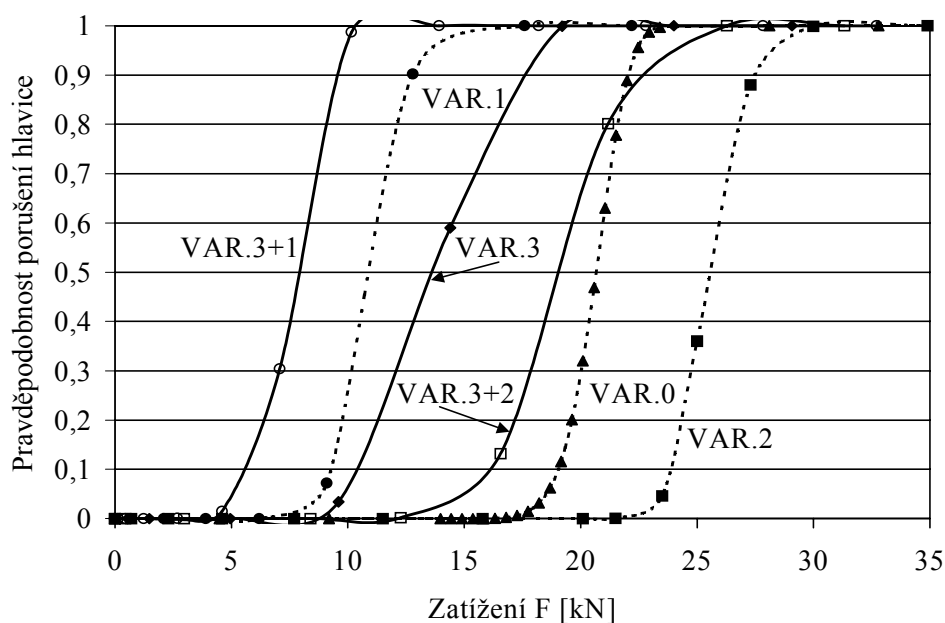
Nejnižší spolehlivost je zjištěna u VAR.1 a VAR.1-Z, následuje VAR.0-Z a VAR.0 (posun křivek pro VAR.1 a VAR.0 je pro  $P_f=50\%$  cca 9,5 kN). Nejvyšší spolehlivost (nejnižší  $P_f$  při daném zatížení) je u VAR.2-Z a VAR.2.

Ze srovnání obr.4.5 a obr.6.1 je vidět, že výsledky ze spolehlivostní analýzy mohou dát jiné výsledky než z analýzy napjatostní:

- $\sigma_{\max}$  u VAR.1-Z je **větší** než u VAR.1, ale  $P_f$  je **prakticky shodná**,
- $\sigma_{\max}$  u VAR.2-Z je **větší** než u VAR.0, ale  $P_f$  u VAR.2-Z je **nižší** než u VAR.0.

### 6.2.2 Vliv ovality a interakce výrobních nepřesností

Výsledky výpočtového modelování jsou znázorněny na obr.6.2 – odpovídající tahová napětí jsou zobrazena na obr.4.7. Do těchto obrázků jsou pro srovnání čárkovaně zakresleny i výsledky pro rotačně symetrické varianty (VAR.0, VAR.1, VAR.2). Z analýzy obr.6.2 vyplývá, že všechny uvažované varianty s výrobní nepřesností typu „ovalita“ (VAR.3, VAR.3+1, VAR.3+2) vykazují podstatně nižší spolehlivost (vyšší  $P_f$ ) než přesně vyrobená varianta (VAR.0) nebo VAR.2, což je způsobeno vysokými tahovými napětími v hlavici (obr.4.7). Nejvyšší napětí a současně i nejnižší spolehlivost je u VAR.3+1, následuje VAR.1 a VAR.3, nejnižší hodnoty napětí a nejvyšší spolehlivost má VAR.3+2, VAR.0 a VAR.2. Výsledky z napjatostní analýzy jsou velmi podobné výsledkům z analýzy spolehlivostní, za zmínku však stojí následující zjištění: průběhy  $\sigma_{\max}$  v průběhu zatěžování hlavice jsou pro VAR.1 a VAR.3 prakticky totožné, avšak průběh pravděpodobnosti porušení u VAR.1 je posunut k nižším silám než u VAR.3. Tuto skutečnost je možné vysvětlit tím, že do spolehlivostní analýzy vstupuje kromě napjatosti i objem, v němž daná napjatost působí. Hodnoty  $\sigma_{\max}$  u obou analyzovaných variant jsou sice shodné, ale není shodný objem, v němž tato napětí působí. U rotačně symetrické



Obr.6.2 Vliv interakce výrobních nepřesností na  $P_f$  keramické hlavice

varianty VAR.1 tato napětí působí podél celého obvodu hlavice, zatímco u VAR.3 se lokalizují pouze do dvou míst (pro  $\varphi=90^\circ$  a  $\varphi=270^\circ$  viz obr.4.6). U VAR.1 je tedy objem, v němž se  $\sigma_{\max}$  vyskytují, větší než u VAR.3, což se projeví snížením spolehlivosti u VAR.1.

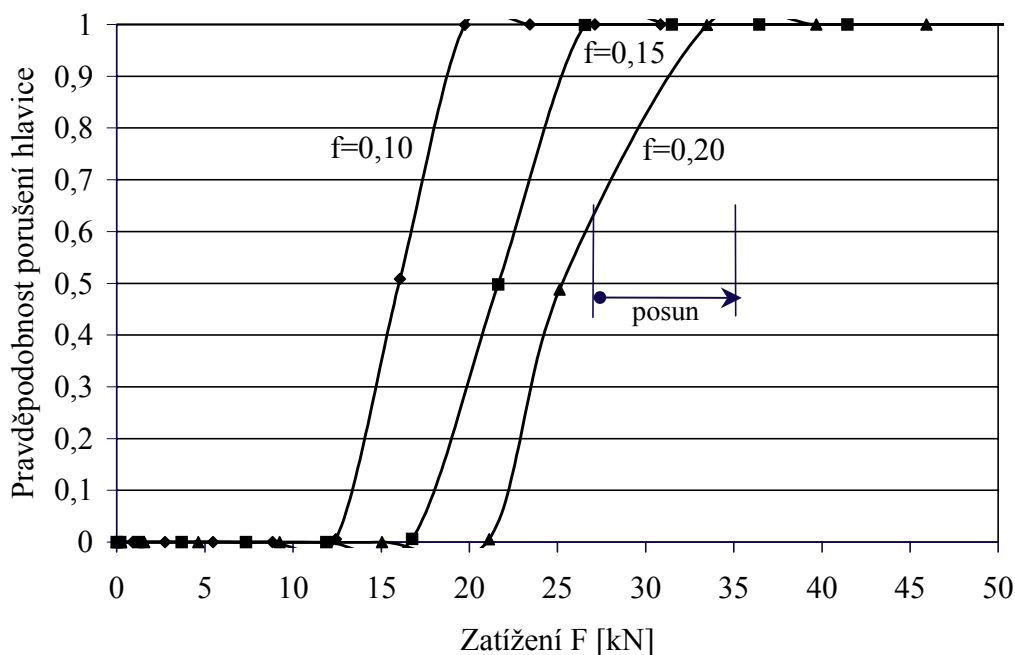
Z uvedených tvrzení vyplývá nutnost použití spolehlivostní analýzy u součástí vyráběných z keramiky.

### 6.2.3 Posouzení spolehlivosti hlavice u reálné soustavy

Tato kapitola navazuje na výsledky výpočtového modelování uvedené v kap.5.2. Výpočtové modelování bylo realizováno na reálné soustavě (VAR.2+3,  $\alpha=5'11''$ ,  $OV = 0,0055$  mm., materiál dřívku M1). Velikost součinitele tření byla uvažována v intervalu  $f \in (0,10;0,20)$ .

Výsledky výpočtového modelování pro všechny uvažované součinitele tření jsou zobrazeny na obr.6.3, ze kterého je zřejmý vzájemný posun jednotlivých závislostí, který je způsoben vlivem velikosti součinitele tření.

Z výsledků experimentálního modelování vyplývá, že průměrná destrukční síla u soustavy s hladkým dřívkem byla 33,5 kN (kap.5.2). Z obr.6.3 vyplývá, že s rostoucí velikostí součinitele tření roste i velikost průměrné destrukční síly. Pro dosažení souladu mezi výsledky experimentálního a výpočtového modelování by bylo třeba dosáhnout posunutí křivky pravděpodobnosti porušení hlavice asi o 8 kN od křivky pro  $f=0,20$  k vyšším hodnotám zatížení (požadovaný posun znázorněn na obr.6.3). Tohoto posunu je možné docílit zpřesněním vstupních údajů do výpočtového modelování, kterými jsou tahová napětí v hlavici a materiálové charakteristiky.



Obr.6.3 Průběh  $P_f$  keramické hlavice reálné soustavy

## 7 NÁVRHY DALŠÍCH PRACÍ

Ze srovnání výsledků výpočtového a experimentálního modelování (kap.5.2 a kap.6.2.3) vyplývá nesoulad mezi experimentálně a výpočtově zjištěnými hodnotami srovnávaných veličin (vertikální posuv hlavice a obvodová přetvoření). Průběh vertikálního posuvu hlavice je možné výrazně ovlivnit pouze velikostí součinitele tření nebo změnou geometrie hlavice (např. změna hloubky kuželového otvoru). Vliv výrobních nepřesností se na průběh vertikálního posuvu hlavice projeví pouze při nízkém zatížení (obr.5.3), a to v průběhu vymezování výrobních nepřesností. Z těchto analýz vyplývá, že vertikální posuv hlavice je veličina, která je pro danou geometrii hlavice podstatně méně citlivá na vliv různých typů výrobních nepřesností ve srovnání s obvodovým přetvořením hlavice. Je tedy možné změřený průběh vertikálního posuvu hlavice považovat za reprezentativnější, z čehož plyne, že hodnota součinitele tření by se měla pohybovat v intervalu  $f \in (0,10; 0,15)$ . Jednou možností, jak dosáhnout lepšího souladu experimentálně a výpočtově získaných průběhů obvodových přetvoření bez zvyšování hodnoty součinitele tření, je realizace přechodu od modelových výrobních nepřesností k reálným výrobním nepřesnostem.

U spolehlivostní analýzy vstupují do výpočtového modelování kromě tahové napjatosti i materiálové charakteristiky, které mohou výrazně ovlivnit průběh křivky pravděpodobnosti porušení. Posunu křivky k vyšším hodnotám zatížení (obr.6.3) je možné dosáhnout jak změnou napjatosti (vliv reálných výrobních nepřesností), tak i zpřesněním materiálových charakteristik ( $m, \sigma_u, \sigma_o$ ).

Souhrnně lze tedy říci, že uvedený nesoulad výsledků výpočtového a experimentálního modelování je způsoben jeho relativně nízkou úrovní. Relativita úrovně výpočtového modelování spočívá v tom, že výpočtový model byl sice vytvořen na v současnosti nejvyšší možné úrovni z hlediska použitého software a hardware, ale ani tato nejvyšší možná úroveň nestačí na dosažení souladu výsledků výpočtového a experimentálního modelování. Další práce v problematice posuzování spolehlivosti keramických hlavic kyčelní endoprotézy by se proto měly soustředit na následující oblasti:

- přesnějšího změření výrobních nepřesností kontaktního kužele hlavice a dřívku a tím dát přesnější vstupní údaje o geometrii kužele do výpočtového modelování.
- aplikovat větší počet tenzometrů na hlavici, zejména v obvodovém směru, s cílem získat přesnější průběh obvodových přetvoření, a to převážně u soustav s testovacím dřívkem vyrobeným z oceli ULTRA AKV 2.
- realizace výpočtového modelování se zahrnutím reálných výrobních nepřesností, získaných měřeními (viz předcházející kapitola). Přejít od 3D úloh, v nichž se využívalo symetrie, k úlohám, v nichž bude modelována celá soustava.
- testování nového typu kontaktního prvku typu bod na plochu, který by bylo možné aplikovat na kvadratické prvky.

- přechodu od osového zatížení soustavy daného normou ISO 7206-5 k zatížení šikmému, které lépe odpovídá fyziologickému zatížení v lidském těle, s cílem porovnat napjatost a spolehlivost s osovým zatěžováním.

## 8 ZÁVĚR

Předkládaná práce prezentuje výsledky výpočtového modelování a experimentálního modelování napjatosti a deformace keramické hlavice endoprotézy kyčelního kloubu a výpočtové modelování pravděpodobnosti porušení její soudržnosti v souladu s cíli formulovanými v kap.3. Z analýz výpočtového a experimentálního modelování plynou následující nové poznatky:

- Realizací vlastního výpočtového modelování napjatosti a deformace v soustavě bylo zjištěno, že nejvýznamnějším napětím, které podstatně ovlivňuje spolehlivost hlavice, je obvodové napětí, které je v převážné části hlavice totožné s největším hlavním tahovým napětím  $\sigma_1$ . Maximální hodnoty obvodových napětí se nacházejí v oblasti stykové plochy ve spodní části hlavice a jsou výrazně ovlivněny přítomností výrobních nepřesností kuželového kontaktního spojení hlavice a dříku. V převážné většině vyšetřovaných variant (odděleně řešené výrobní nepřesnosti – VAR.1, VAR.3 a interakce výrobních nepřesností – VAR.3+1, VAR.3+2) došlo k nárůstu hodnot maximálních tahových napětí v hlavici ve srovnání s přesně vyrobenou soustavou. Jedinou výjimku tvoří rotačně symetrická výrobní nepřesnost, u níž je úhel hlavice větší než úhel dříku (VAR.2). Pouze v tomto případě došlo ke snížení hodnot maximálních tahových napětí v hlavici ve srovnání s přesně vyrobenou soustavou (VAR.0). V případě uvažování interakcí výrobních nepřesností (ovalita + odchylka od nominální kuželovitosti) došlo v jednom případě (VAR.3+1) k nárůstu  $\sigma_{\max}$  ve srovnání s variantou, uvažující pouze ovalitu (VAR.3), ve druhém případě (VAR.3+2) došlo k poklesu  $\sigma_{\max}$  ve srovnání s VAR.3, z čehož plyne pozitivní vliv výrobní nepřesnosti VAR.2 na hodnoty extrémních tahových napětí v hlavici.
- Z analýzy vlivu ostatních parametrů na napjatost a deformaci v analyzované soustavě vyplývá, že kromě již zmíněných výrobních nepřesností jsou extrémní tahová napětí výrazně ovlivněna velikostí součinitele tření.
- Z analýzy výsledků experimentálního modelování chování hlavic nasazených na testovací dřík dle ISO 7206-5 vyplývá, že průměrná hodnota zatížení, které vedlo k porušení soudržnosti hlavice nasazené na hladký dřík, je o 48% menší, než pro případ nasazení na dřík opatřený jemnými zoubky s řádovými rozměry desetiny milimetru, což odpovídá dříve publikovaným výsledkům. Z průběhů vertikálního posuvu hlavice a z průběhů obvodových přetvoření vyplývá, že u soustavy s hladkým dříkem dochází na začátku zatěžování ke kontaktu pouze v několika místech kontaktní plochy, která se výrazně lokálně deformují (vymezování výrobních nepřesností otěrem příp. plastifikací), u soustavy se zoubkovaným dříkem je deformace kontaktní plochy podstatně snazší díky zoubkům, a to jak při plastifikaci tak i při otěru.



- Z výsledků spolehlivostní analýzy, která je kvantifikována pravděpodobností porušení ( $P_f$ ) keramické hlavice a vychází z Weibullové teorie nejslabšího článku, vyplývá, že její závěry nemusí být totožné se závěry z napjatostní analýzy. Obdobně jako u napjatostní analýzy se ukazuje, že výrobní nepřesnosti výrazně snižují spolehlivost keramické hlavice, a to jak v případě odděleně analyzovaných výrobních nepřesností, tak i v případě jejich interakce. Jedinou výjimkou je opět rotačně symetrická výrobní nepřesnost, u níž je úhel hlavice větší než úhel dříku (VAR.2), jejíž spolehlivost je vyšší než u přesně vyrobené varianty (VAR.0).
- Ze srovnání výsledků výpočtového a experimentálního modelování vyplývá, že nebylo dosaženo souladu, což je způsobené „relativně nízkou“ úrovní výpočtového a experimentálního modelování. Relativita úrovně modelování spočívá v tom, že se u výpočtového modelování pohybujeme na jeho hranici, dané použitým hardwarem a softwarem, což je jednou z bariér, bránící dosažení souladu s experimentálně zjištěnými skutečnostmi. Příčiny nesouladu a návrh potřebných opatření na jejich odstranění a globální pohled na úroveň a současné bariéry ve výpočtovém a experimentálním modelování jsou detailně analyzovány v kap.7.

**Z analýzy výsledků výpočtového a experimentálního modelování lze říci, že příčinou destrukce keramických hlavic in vivo byly nevhodné výrobní nepřesnosti hlavice a dříku, s čímž souhlasí i oba výrobci těchto komponent.**

*Práce vznikla za podpory GAČR v rámci grantového projektu č. 106/96/0652 „Počítačové podpory v biomedicínském inženýrství a v biomechanice“.*

## LITERATURA

- [1] Andrisano, A. O.; Dragoni, E.; Strozzi, A.: Axisymmetric mechanical analysis of ceramic heads for total hip replacement. Proc. Inst. Mech. Engrs, Part H, Vol. 204, 1990, pp. 157-167.
- [2] Bachnick, M.; Hasenpusch, M.; Richter, H.; Boenick, U.: Einfluß von Härte und Oberflächenqualität von Metallkonen auf die Bruchlast von keramischen Kugelköpfen bei Huftendoprothesen. Biomed. Technik 39, 1994, s.302-306.
- [3] Bergmann, G.; Graichen, F.; Rohlmann, A.: Hip Joint Loading During Walking and Running Measured in two Patients. Journal of Biomechanics, Vol. 26, No.8, 1993, pp. 965-990.
- [4] Beznoska, S.; Čech, O.; Löbl, K.: Umělé náhrady lidských kloubů. Biomechanické, materiálové a technologické aspekty. První vydání, Praha, SNTL Praha, 248 stran, 04-205-87.
- [5] Boutin, P.; Christel, P.; Dorlot, J.-M.; Meunir, A.; de Roquancourt, A.; Blanquaert, D.; Herman, S.; Sedel, L.; Witvoet, J.: The use of dense alumina-alumina ceramic combination in total hip replacement. J. Biomedical Materials Research, Vol. 22, 1988 pp. 1203-1232.

- [6] Bush, D. R.: Designing Ceramic Components for Structural Applications. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 2, ASM International, December 1993, pp. 851-862.
- [7] ČSN 417350: Ocel 17350, Úřad pro normalizaci a měření Praha, 1972.
- [8] Dragoni, E.; Andrisano, A. O.: Structural Evaluation of Ceramic Femoral Heads: Effect of Taper, Friction, Support Conditions and Trunnion Compliance. Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 117, August 1995, pp. 293-299.
- [9] Drouin, J. M.; Cales, B.: Ytria-stabilized Zirconia Ceramic for Improved Hip Joint Head. 7th International Symposium on Ceramics in medicine, Finland, July 1994, pp. 21-24.
- [10] Dufková, J.; Problematika kuželového spojení keramické hlavice a kovového dřívku endoprotézy. Diplomová práce. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, Fakulta strojní, 1993.
- [11] Fessler, H.; Fricker, D. C.: A study of stress in alumina universal heads of femoral prostheses. . Proc. Instn Mech, Engrs, Part H, Vol. 203, 1989, pp. 15-30.
- [12] ISO 7206-5: Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses. Determination of resistance to static load of head and neck region of stemmed femoral components. 1992.
- [13] Kleer, G.; Siegele, D.; Soltész, U.: Evaluation of stresses in ceramic hip-joint heads. Martinus Nijhoff, Dordrecht, Biomechanics: Current Interdisciplinary Research, edited by Perren, S.M. and Schneider, E, 1985, pp. 353-358.
- [14] McLean, A. F.; Hartsock, D. L.: Engineered materials handbook, Volume 4, Ceramics and Glasses. ASM International 1991, pp. 676-689.
- [15] Paul, J. P.: Loading on normal hip and knee joints and on joint replacement. in Advances in artificial hip and knee joint technology, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, Eds. M.Schaldach, D.Hohmann, 1976, 276 p., ISBN 3-540-07428-7.
- [16] Rubricius, D.; Jírová, J.: Konfrontace experimentální analýzy s výpočtem napjatosti keramické hlavice kyčelní endoprotézy. Sborník s 31. konference o experimentální analýze napjatosti, 1993, str. 267-270.
- [17] Soltész, U; Heimke, G.: Stress analysis in ceramic hip-joint heads of various shape and fitting. Martinus Nijhoff, The Hague Biomechanics: Principles and Applications, Huyskes,R., et al., eds, 1982, pp. 283-290.
- [18] Sotelo, D. H.; Kummer, F. J.; Frankel, V. H.: A finite element analysis of ceramic THR heads. Proc. 30th Annual Meeting Orthopaedic Research Society, Atlanta, 1984, p. 373.
- [19] Šída, V.: Bezpečnost keramických materiálů v endoprotézách kyčelního kloubu. Acta Chirurgiae Orthopaedicae et Traumatologiae Čechosl. 63, 1996, str.294-297.

## AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ

- [20] Fuis,V.; Janíček,P.; Florian,Z.: The effect of geometry, material and friction on deformation and state of stress in the system "ceramic head pressed on conical steel shank". International conference Biomechanics of man '94. pp. 161–165, Benešov.
- [21] Fuis,V.; Janíček,P.: Analýza deformace a napjatosti v keramické hlavici kyčelní endoprotézy. Seminář Výpočtová mechanika '94. str. 55–62, Pernink.
- [22] Fuis,V.; Janíček,P.: Zkušenosti s výpočtovým modelováním kontaktního útvaru mezi dříkem a hlavici kyčelní endoprotézy. Inženýrská mechanika, roč.2, 1995, č.2. str. 131–138.
- [23] Fuis,V.: Potvrdí výsledky výpočtového modelování výsledky experimentu? (u hlavice kyčelní endoprotézy nasazené na dřík). Konference Inženýrská mechanika '95. Volume I. str. 117–121, Svratka.
- [24] Janíček,P.; Fuis,V.: Výpočtové modelování napjatosti v kuželovém kontaktu s ultrajemnými zoubky. Strojnícky časopis, 47, 1996, č.1. str. 31-43.
- [25] Fuis,V.; Janíček,P.: The application of the numerical method to the solution of the special contact problem. International Conference Numerical Methods in Continuum Mechanics. pp. 51–55, Slovakia, 1996.
- [26] Fuis,V.: Analýza vlivu výrobních nepřesností kontaktní plochy dříku a hlavice endoprotézy kyčelního kloubu na napjatost v hlavici. Konference Inženýrská mechanika '96. Volume III, str. 151–156, Svratka.
- [27] Janíček,P.; Fuis,V.; Jírová,J.: Experimentální analýza chování keramické hlavice zalisovávané na ocelový dřík. Konference Biomechanika člověka '96. str. 71–76, Tichonice.
- [28] Fuis,V.: Analýza soudržnosti samosvorného spojení dříku a hlavice endoprotézy kyčelního kloubu. Konference Biomechanika člověka '96. str. 27- 32, Tichonice.
- [29] Janíček,P.; Fuis,V.: Komplexní analýza interakce mezi dříkem a hlavici endoprotézy kyčelního kloubu. Seminář Interakce a zpětné vazby '96. str. 31–40, Praha.
- [30] Fuis,V.: Jak mohou výrobní nepřesnosti ovlivnit napjatost v hlavici endoprotézy kyčelního kloubu. Konference Inženýrská mechanika '97. Volume 3, str. 137-142, Svratka.
- [31] Fuis,V.: Výpočtové modelování výrobních nepřesností na kuželovém kontaktu. 31. Mezinárodní konference MOSIS'97, volume 3, str. 71-76, Hradec nad Moravicí.
- [32] Fuis,V.; Janíček,P.: The role of experiment in the problem of reliability computation of the ceramic head of the hip joint endoprosthesis. Conference Experimental stress analysis EAN'97, pp. 96-101, Olomouc.
- [33] Fuis,V.: Determining the reliability of ceramic head of hip joint. Workshop'97 Biomechanical Modeling & Numerical Simulation, pp. 74-75. Prague 1997.

- [34] Fuis,V.: Analýza napjatosti v soustavě dřík-hlavice totální kyčelní endoprotézy při uvažování výrobních nepřesností. Konference Výpočtová mechanika '97. str. 63-68, Pernink.
- [35] Lužný,A.; Fuis,V.; Janíček,P.: Jak ovlivní napjatost v keramické hlavici totální endoprotézy kyčelního kloubu zápich v dříku. Konference Výpočtová mechanika '97. str. 157-164, Pernink.
- [36] Fuis,V.: Posouzení spolehlivosti keramické hlavice Weibullovou teorií nejslabšího článku. Konference Inženýrská mechanika '98. Volume 1, str. 185-190, Svratka.
- [37] Lužný,A.; Fuis,V.; Janíček,P.: Analýza vlivu odlehčení dříku na napjatost prvků totální endoprotézy kyčelního kloubu. Konference Inženýrská mechanika '98. Volume 2, str. 413-416, Svratka.
- [38] Ochránová,M.; Janíček,P.; Fuis,V.: Analýza vlivu zkrácení délky dříku na napjatost prvků totální endoprotézy kyčelního kloubu. Konference Inženýrská mechanika '98. Volume 3, str. 547-552, Svratka.
- [39] Fuis,V.; Janíček,P.: Analýza chování keramické hlavice zalisovávané na ocelový dřík. Acta Mechanica Slovaca, 2/1998, str. 83-86.
- [40] Fuis,V.; Lužný,A.; Janíček,P.: Comparison of Different FEM Program Systems for Solving the Contact Elasto-Plastic Task. VII th International Conference Numerical Methods in Continuum Mechanics, pp.446-451, High Tatras, Slovakia, October 1998.
- [41] Fuis,V.: Influence of the Stem-Head Conical Joint Production Inaccuracies on the Stress in the System. VII th International Conference Numerical Methods in Continuum Mechanics, pp.440-445, High Tatras, Slovakia, October 1998.
- [42] Fuis,V.: Posouzení spolehlivosti keramické hlavice kyčelní endoprotézy. Sborník abstrakt konference Biomechanika člověka '98, str. 15-16, Praha.
- [43] Lužný,A.; Fuis,V.; Janíček,P.: Analýza napjatosti v keramické hlavici totální kyčelní endoprotézy systémy ANSYS a MARC. Sborník abstrakt konference Biomechanika člověka '98, str. 51-52, Praha.
- [44] Ochránová,M.; Fuis,V.; Janíček,P.: Vliv různé geometrie keramické hlavice endoprotézy kyčelního kloubu na její deformačně napjatostní stavy. Sborník abstrakt konference Biomechanika člověka '98, str. 69-70, Praha.
- [45] Fuis,V.: Spolehlivost hlavice totální endoprotézy kyčelního kloubu. Mezinárodní konference Skelet '99, str. 13, Praha
- [46] Ochránová,M.; Fuis,V.: Vliv různé geometrie keramické hlavice endoprotézy kyčelního kloubu na její napjatost. Mezinárodní konference Skelet '99, str. 38, Praha
- [47] Fuis,V.: Analýza vlivu výrobních nepřesností samosvorného kuželového spojení. Konference Aplikovaná mechanika '99, str. 71-76, Brno.
- [48] Lužný,A.; Fuis,V.: Testování vlivu materiálových a diskretizačních charakteristik na napjatost v soustavě. Konference Aplikovaná mechanika '99, str. 153-156, Brno.

- [49] Ochránová, M.; Fuis, V.; Janíček, P.: Srovnání vlivu změny geometrie keramické hlavice a dřívku endoprotézy kyčelního kloubu na její napjatost. Konference Aplikovaná mechanika '99, str. 163-170, Brno.
- [50] Fuis, V.: Vliv ovality kontaktní plochy hlavice kyčelní endoprotézy na její napjatost. Konference Inženýrská mechanika '99. Svazek 2, str. 509-514, Svratka.
- [51] Lužný, A.; Fuis, V.: Analýza vlivu hustoty sítě na rozložení kontaktního tlaku mezi vroubkovaným dřívkem a hlavici totální endoprotézy. Konference Inženýrská mechanika '99. Svazek 2, str. 541-544, Svratka.
- [52] Ochránová, M.; Fuis, V.: Vliv různého způsobu zatížení keramické hlavice endoprotézy kyčelního kloubu na její napjatost. Konference Inženýrská mechanika '99. Svazek 2, str. 567-570, Svratka.
- [53] Fuis, V.: Experimental Analysis of Hip Joint Endoprosthesis Head Pressed on the Stem Made of Steel ULTRA AKV 2. 37-th International Conference on Experimental Stress Analysis, pp.37.
- [54] Fuis, V.: Stress and Reliability Analyses of the Hip Joint Ceramic Head with Production Inaccuracies. Editors Jan Musil & František Maršík. Workshop'99 Biomechanical Modeling & Numerical Simulation. Prague, 1999, pp-33-34.

## SUMMARY

Today the implantation of the joint prosthesis is a radical yet very frequent way of making a paralyzed joint fully functional once again. The implants are to satisfy high standards as to their biocompatibility as well as a long-term operability which directly relates to their reliability. Hence the analysis of the complex functioning of the implants in the human body is among the fundamental problems in the biomechanics of the implants. The doctoral thesis presented concerns this very set of issues.

The thesis takes up the solution of the problems of the deformation, stress and reliability of the ceramic hip joint head. The system is loaded in accordance with the norm ISO 7206-5 which is used for the determination of resistance to static load of these heads. The resultant force of the loaded head is to be found in the axis of the system which consists of the head and stem. The head is put on the stem and is being pressed against the stem during the testing procedure. This mode of loading is probably not in accordance with the physiological loading of the head in the human body. The real load on the head is unknown as yet, but currently this problem is being solved with great force.

The results presented in this study might very well serve in the near future as basic information for the reliability determination of the ceramic heads of the hip joint endoprostheses in vivo as it were.

The thesis takes up two fundamental problems whose solution appears to be necessary in order to determine the reliability of the ceramic heads. The problems are the following:

- the problem of determining of the stress and deformation in the ISO test system components (head and stem)

- the problem of the determination proper of the head failure probability. To this end the information concerning the stress in the head volume and the material parameters of the ceramics (in our case  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) appear to be necessary.

The computation modeling, the modeling by the program system of the finite element method ANSYS in particular, was used in determination of the deformation and stress in the head. The task was being solved on the axis-symmetry and 3D model levels. A particular attention was paid to securing the credibility of the computation modeling results. The influence of the mesh density of the analyzed areas, especially in the contact area, as well as the influence of the chosen value of the contact element normal stiffness were being tested. Stress and reliability were being solved in the case of heads pressed on smooth stem cones and stems with ultra-fine teeth (sized in the order of the tenths of mm).

Experiment was actively used in the computation modeling as the source of input data, especially as relates the determination of the coefficient of friction value between the head and the stem. Secondly, experiment was used to verify the computation modeling results. The experiment utilized the resistance strain gages measurement method and was done for the load according to ISO and for the oblique head load.

The results of the head stress computation modeling imply the following main conclusions:

- marked influence of the stress by the head – stem coefficient of friction value
- marked influence of the stress by the production inaccuracies of the cone contact area (mismatched angles, non-roundness and its interactions in particular).
- the tangential tensile stress appears to be dangerous from the point of view of the head reliability in the lower part of the head near the cone. The magnitude of this stress is markedly influenced by the latter production inaccuracies.

The solution of the ceramic head reliability in relation to the limit state as such was realized by computation modeling as well. The Weibull Weakest-Link Theory was used. The computation algorithm which enables one to determine the failure probability of the ceramic component based on the stresses in the components and based on the ceramic material parameters was designed and perfected.

The following original finding is implied by the complex analysis of the computation modeling of the stress and failure probability in the head: There is no direct link between the maximal tensile stress in the head and the value of the failure probability. It was determined that while the maximum value of the tensile stress of the head pressed on the teathed stem (VAR.2-Z) was greater than that of the precisely manufactured variant (VAR.0), the failure probability of the head VAR.2-Z was lower than that of VAR.0. Therefore, to deduce the failure probability of the ceramic body based on the stress analysis only can lead to false conclusions.

In spite of a number of original findings implied by the process and the solution of the problem, this paper is merely an introductory study in the problem of the reliability of the total hip joint endoprostheses in the conditions within the human. The complex solution of this set of issues is beyond the scope of one PhD thesis.

# ŽIVOTOPIS

**Narozen:** 13.10.1970 v Brně

**Stav:** ženatý od roku 1995, syn Lukáš

**Bydliště:** Kounicova 93, 602 00, Brno

## Vzdělání:

1977 - 1985 ZŠ Jana Babáka, Brno

1985 - 1989 SPŠS Sokolská, Brno

1989 - 1994 VUT - FS, Brno - název diplomové práce - Určení vlivu drážkování kuželového dříku na napjatost v soustavě dřík-keramická hlavice, nalisovaná na dřík

1994 - 1997 VUT - FS - Ústav mechaniky těles - doktorandské studium.

2000 - obhájení disertační práce s názvem Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy.

## Praxe:

od 1997 výzkumný pracovník na společném pracovišti FS VUT Brno a ÚT AV ČR Praha

## Vědecká práce:

Výzkum v oblasti náhrad kyčelních endoprotéz se zaměřením na vliv výrobních nepřesností na jejich napjatost a spolehlivost.

## Výuka:

Základní kurzy – cvičení Pružnost a pevnost I a pružnost a pevnost II.

**Jazykové znalosti:** angličtina a ruština

## Účast na řešení grantových projektů:

GAČR 103/94/0419 – Numerická analýza interakčních procesů v lidském těle

GAČR 106/95/0359 – Perspektivní biokompatibilní strukturní materiály

GAČR 106/96/0652 – Počítačové podpory v biomedicínském inženýrství a v biomechanice

Grant MŠMT ČR VS 96122 – Laboratoř pro výzkum a vývoj mechatronických systémů

FS 1998 – FP 380017 – Analýza chování hlavice kyčelní endoprotézy.

FSI 1999 – FP 390006 – Komplexní modelování deformačně-napjatostních stavů v prvcích kyčelní endoprotézy