



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

MANUFACTURING ACCURACY VERSUS RELIABILITY OF THE HIP JOINT ENDOPROSTHESIS CERAMIC HEAD

V. Fuis*

Summary: *The paper deals with the problems of the stress and failure probability of the ceramic head of hip joint endoprosthesis. Computational modeling is used to solve the problem - stress states are calculated by FEM, failure probability is based on the Weibull weakest link theory. The ceramic head is pressed on the stem cone under ISO 7206-5 conditions. There are considered the macro and micro shape deflections of the contacted cone areas, the values are given from the 3D measured device IMS UMPIRE. The macro shape deflection is different conicity of the contacted parts; micro shape deflections are the local shape deflections which are added with the macro shape deflections. The failure probability of the ceramic head for the random position against the stem will be analysed in detail.*

1. Úvod

Důvodem, proč se zabývám problematikou vztahu mezi přesností výroby a spolehlivostí keramické komponenty kyčelní endoprotézy je fakt, že u nezanedbatelného počtu pacientů došlo k jejím destrukcím *in vivo*. Z napjatostně deformační analýzy vyplynulo, že podstatným faktorem, který výrazně ovlivňuje tahová napětí v hlavici, jsou tvarové odchylky na samosvorném kuželovém spojení obou komponent (hlavice a dříku). Tvarové odchylky jsou jednak na makroúrovni – různá kuželovitost spojovaných komponent (makro-tvarové odchylky), jednak odchylky na mikroúrovni (mikro-tvarové odchylky), které jsou nasuperponované na makro-tvarové odchylky. Velikosti obou těchto skupin tvarových odchylek kuželů byly změřeny na 3D měřícím zařízení IMS UMPIRE ve firmě vyrábějící keramické hlavice. Příspěvek se navíc zabývá i tím, jak se změní napjatost a pravděpodobnost porušení keramické hlavice při náhodném nasazení těchto komponent při implantaci. Z tohoto důvodu byla realizována sada výpočtů s různou polohou keramické hlavice vůči dříku.

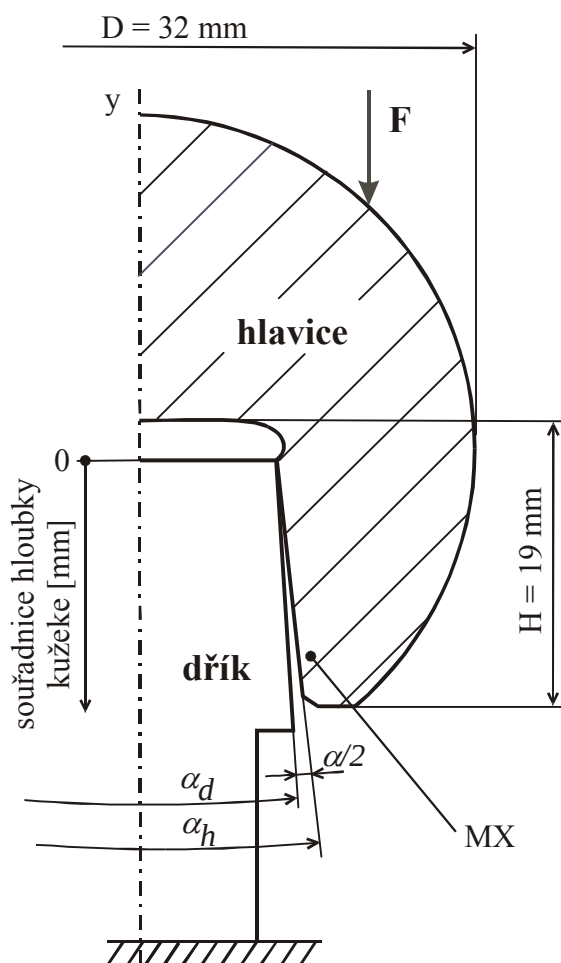
Problematika posouzení pravděpodobnosti porušení libovolné komponenty z keramického materiálu se skládá ze dvou etap, první etapou je určení napjatosti, nejčastěji metodou konečných prvků, v tomto případě systémem ANSYS, v druhé fázi je třeba určit materiálové charakteristiky popisující chování keramického materiálu a posléze výpočet pravděpodobnosti porušení keramické hlavice, která vychází z Weibullové teorie nejslabšího článku.

* Ing. Vladimír Fuis, Ph.D. Společné pracoviště ÚT AV ČR a ÚMTMB FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69, Brno, tel. 541 142 891, fax. 541 142 876, e-mail: fuis@fme.vutbr.cz

2. Výpočtové modelování

Určení deformací a napjatosti v keramické hlavici je přímým problémem, protože pro známou geometrii a topologii soustavy, pro známé zatížení, vazby a materiálové vlastnosti prvků, se určují projevy soustavy, tedy zmíněná deformace a napjatost. Efektivní metodou řešení problému spolehlivosti je výpočtové modelování v propojení s experimentem. Pro řešení deformačně napěťových stavů v keramické komponentě byla použita metoda konečných prvků, a to programový systém ANSYS 6.1. Vstupní veličiny do algoritmu výpočtového modelování deformace a napjatosti byly:

- **geometrické** viz obr. 1, na němž je kromě základních rozměrů prvků analyzované soustavy znázorněna i makro-tvarová odchylka. Aby bylo možné realizovat výpočtové modelování vlivu tvarových odchylek na kuželích spojovaných komponent, které má stochastický charakter, bylo realizováno měření těchto odchylek na měřícím zařízení IMS – UMPIRE. Kvalitu změřené stykové plochy obou kuželů je možno vyjádřit makroparametry (přímkovitostí, úhly sklonů povrchů kuželů, kruhovitostí v různých výškách kuželů) a mikroparametry (lokální mikronerovnosti povrchu). Z hlediska úhlů sklonů povrchů kuželů (kuželovitost) lze říci, že výrobní dokumentace dovoluje pouze variantu, u níž je vrcholový úhel kužele hlavice (úhel α_h) větší než vrcholový úhel kužele dřívku (úhel α_d) – obr. 1, a kruhovitost jednotlivých řezů je nižší než 10 μm . Ukázka změřených tvarových odchylek od ideálního kuželového tvaru je znázorněna na rozvinutých kuželech na obr. 2 pro všechny tři



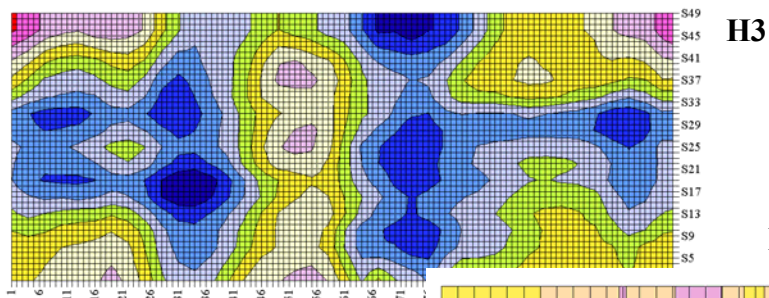
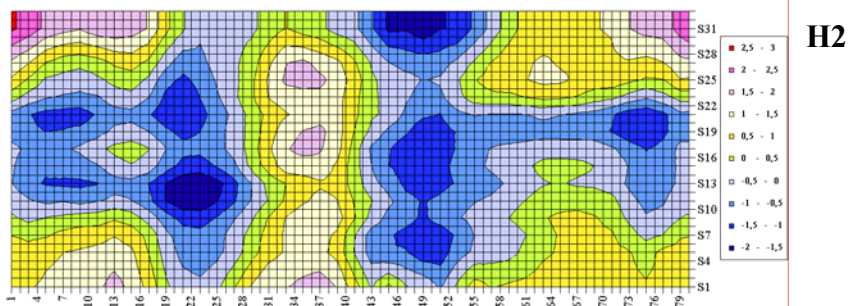
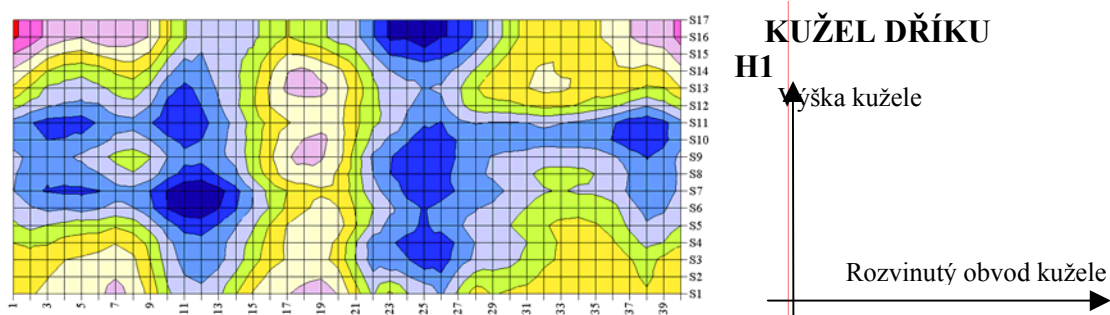
Obr. 1: Schéma analyzované soustavy, uspořádané dle ISO 7206-5

hustoty diskretizace, které budou v tomto příspěvku srovnávány. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní geometrické hodnoty tvarů stykových kuželů do výpočtového modelování napjatosti a deformace.

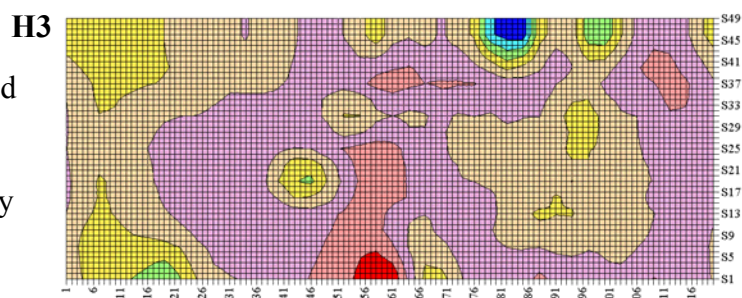
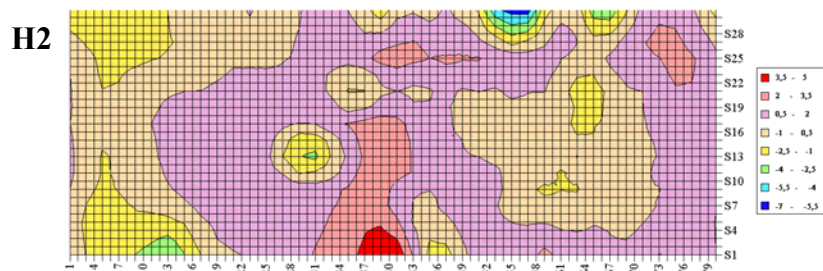
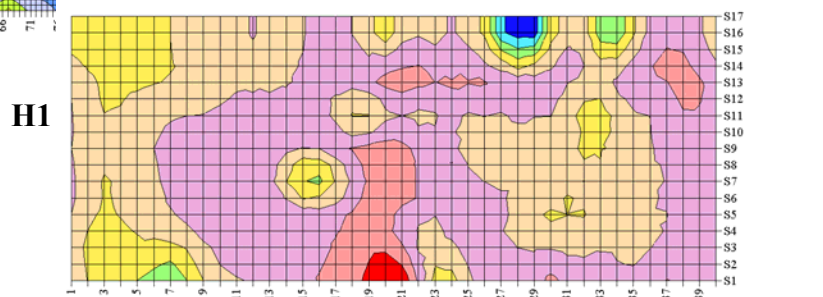
- **zatěžovací** – pro analyzovanou soustavu je předepsaná norma pro její testování (ISO 7206-5) a podle této normy bude soustava zatěžována – obr. 1 – silové působení je liniové a působí na kružnici, přičemž směr zatížení je rovnoběžný s osou soustavy.

- **vazbové** – z hlediska vazeb je spodnímu konci dřívku zamezen pohyb, vazba mezi hlavicí a dřívkem je realizována kontaktem. Veličinou, která kvalitativně i kvantitativně ovlivňuje deformačně-napěťové stavy v hlavici, je hodnota součinitele tření f na stykové ploše. Na základě provedených analýz² byla u všech počítaných variant uvažována hodnota $f = 0,15$.

- **materiálové** – materiál obou komponent je uvažován jako lineární izotropní kontinuum. Dřívko je ocelové a ve výpočtu jsou uvažovány tyto konstitutivní charakteristiky: $E = 210 \text{ GPa}$, $\mu = 0,3$.



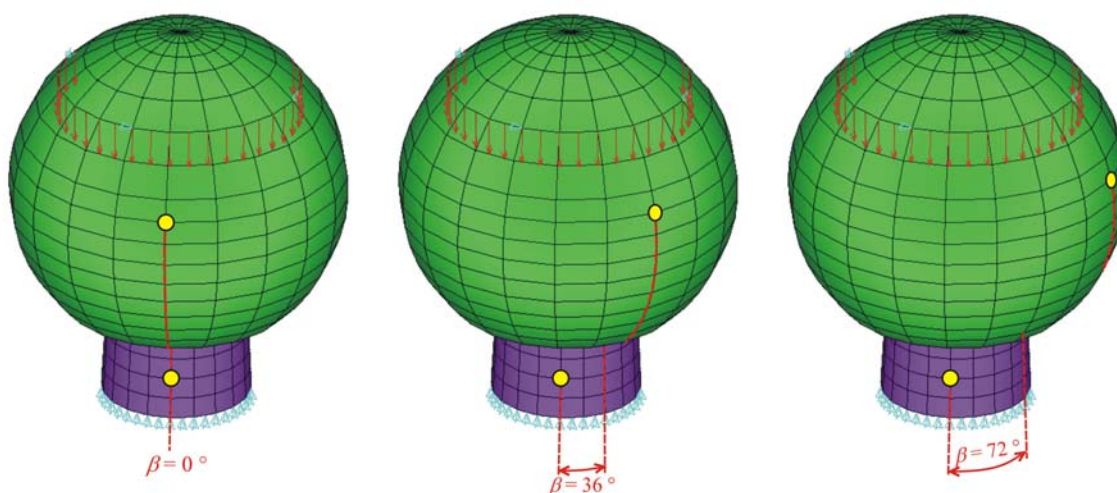
KUŽEL HLAVICE



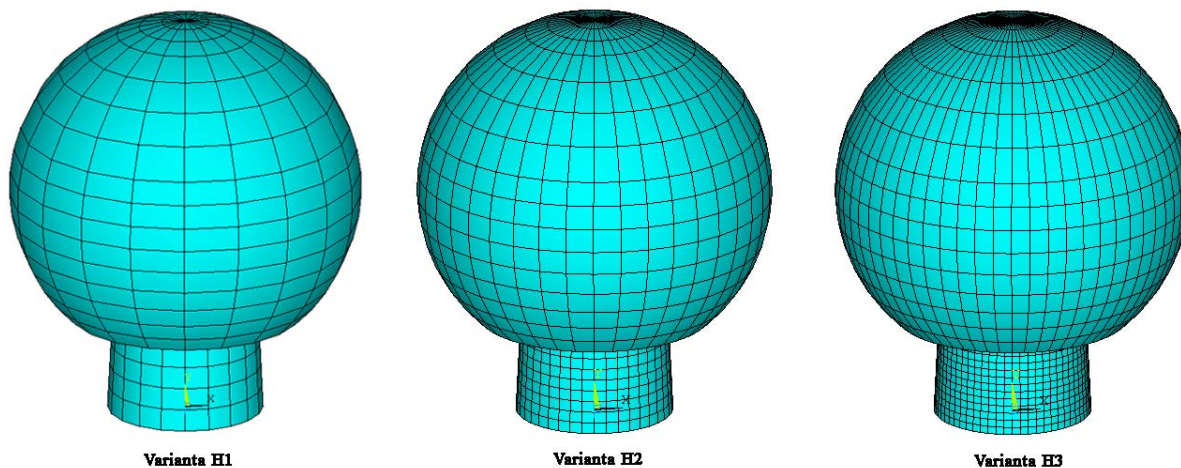
Obr. 2: Tvarové odchylky od ideálního kužele v μm znázorněné na rozvinutém kuželi pro jednotlivé hustoty diskretizace (varianta H1, H2 a H3)

Materiál hlavice je keramika na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 , u níž jsou uvažovány tyto konstitutivní charakteristiky $E = 390 \text{ GPa}$, $\mu = 0,23$. Napjatost a spolehlivost keramické komponenty může být výrazně ovlivněna procesem montáže, při níž se do kuželového otvoru keramické hlavice vloží kužel ocelový, přičemž tento proces je náhodný z hlediska vzájemné polohy obou komponent vůči sobě (ve smyslu natočení hlavice okolo osy, definované úhlem β – obr. 3). Vzniká tedy otázka, jestli lokální tvarové odchylky kuželů nemohou při náhodném zkompletování vyvolat vysoká tahová napětí, která mohou snížit spolehlivost keramické komponenty. Z tohoto důvodu bude pro každý analyzovaný pár realizována sada výpočtů pro různou polohu obou komponent.

Jsou uvažovány tři varianty lišící se hustotou diskretizace (obr.4)– varianta H1 má



Obr. 3: Znázornění různé polohy hlavice vůči dříku definované úhlem β



Obr. 4: Uvažované varianty různé hustoty diskretizace soustavy

velikost prvku na kontaktní kuželové ploše $2 \times 2 \text{ mm}$ (obvodový směr x osový směr), varianta H2 má velikost prvku $1 \times 1 \text{ mm}$ a varianta H3 má velikost prvku $0,66 \times 0,66 \text{ mm}$.

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 [1] a je definován vztahem, který je upraven pro vstupní hodnoty získané metodou konečných prvků:

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

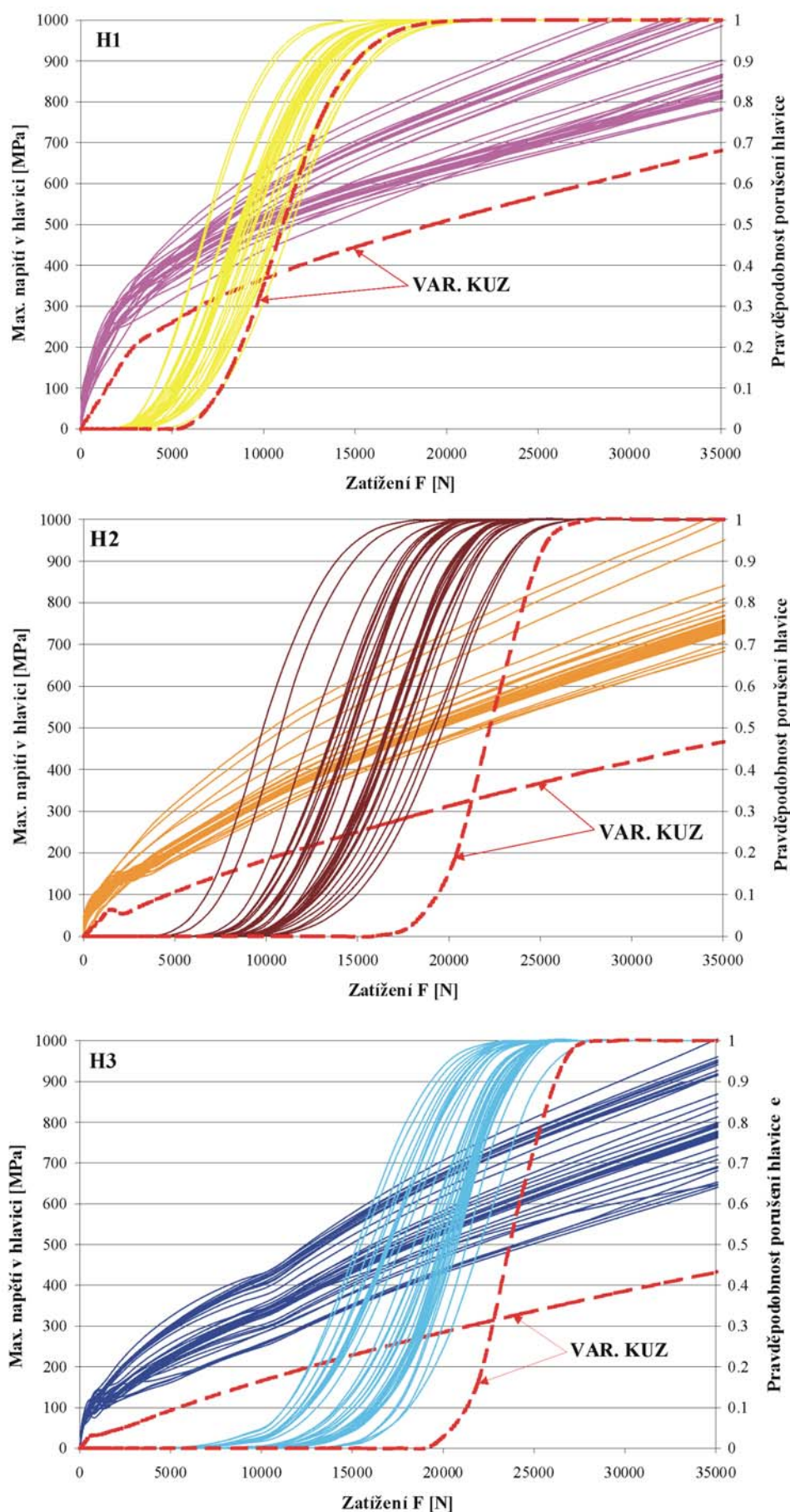
kde: n – počet prvků, na něž je rozdělena analyzovaná hlavice metodou konečných prvků, ΔV_i – objem i -tého prvku, σ_i – první hlavní napětí (σ_1) působící v objemu ΔV_i , σ_u – napětí, pod jehož hodnotou nedochází k porušení materiálu, σ_o – normalizovaná materiálová pevnost objemové jednotky materiálu, m – Weibullův modul. Hodnoty m , σ_u , σ_o je možné považovat za materiálové charakteristiky, které se určují statistickým zpracováním výsledků zkoušek 3–bodového nebo 4–bodového ohybu sady zkušebních vzorků. 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 σ_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.

Z analýzy výsledků ze zkoušek 3–bodovým ohybem vyplývá, že nejlepší soulad experimentálně získaných dat pravděpodobnosti porušení s teoretickými hodnotami je pro případ $\sigma_u = 250$ MPa [2]. Zbývající materiálové parametry jsou $m = 3,2$ a $\sigma_o = 238$ MPa.m^{3/3,2}.

3. Výsledky výpočtového modelování napjatosti a pravděpodobnosti porušení

V keramické hlavici vzniká v průběhu zatěžování trojosá napjatost [3]. Z hlediska spolehlivosti keramické komponenty, která je zhotovena z křehkého materiálu, jsou nejvýznamnější tahová napětí. Z tohoto důvodu jsou dále analyzována pouze extrémní tahová napětí. Průběhy maximálních hodnot tahových napětí v keramické hlavici ($\sigma_{\max}$) v závislosti na velikosti zatížení jsou pro jednotlivé hustoty diskretizace znázorněny na obr. 5 H1, H2 a H3. Tyto obrázky obsahují i průběhy pravděpodobnosti porušení – P_f (křivky ve tvaru písmene „S“) v závislosti na zatížení. Hodnoty $\sigma_{\max}$ i P_f pro analyzovaný pár a různou polohu hlavice vůči dřívku (různou hodnotu úhlu β) vytvářejí na obr. 5 pás závislostí, jehož šířka, resp. výška se v průběhu zatěžování mění a souvisí s velikostí rozptylu hodnot $\sigma_{\max}$ a P_f . Pro srovnání byla modelována i varianta, která uvažuje pouze odchylku od nominální kuželovitosti $\alpha = 5^\circ 8''$ ($\alpha_h = 5,755^\circ$ a $\alpha_d = 5,6694^\circ$), je v grafech označena VAR.KUZ.

Z analýzy závislostí na obr. 5 vyplývá, že v průběhu zatěžování jsou patrné dvě oblasti, které se liší tvarem křivky $\sigma_{\max} - F$. První oblast je na začátku zatěžování, kdy dochází k výraznému vymezování makro-tvarových odchylek, což se v grafu projeví strmým nárůstem hodnot $\sigma_{\max}$, který však se vzrůstajícím zatížením klesá. Po tomto vymezení dochází k tomu, že křivka roste téměř lineárně, přičemž směrnice růstu $\sigma_{\max}$ závisí na aktuální poloze mikro-tvarových odchylek obou komponent, které výrazně ovlivňují tuto hodnotu. Ze srovnání pásů křivek pro různou hodnotu hustoty diskretizace sítě prvků vyplývá, že na začátku zatěžování dochází u varianty H1 (malá hustota diskretizace) k nárůstu $\sigma_{\max}$ ve srovnání s variantou H2, přičemž rozptyl hodnoty u varianty H1 je menší než pro variantu H2.



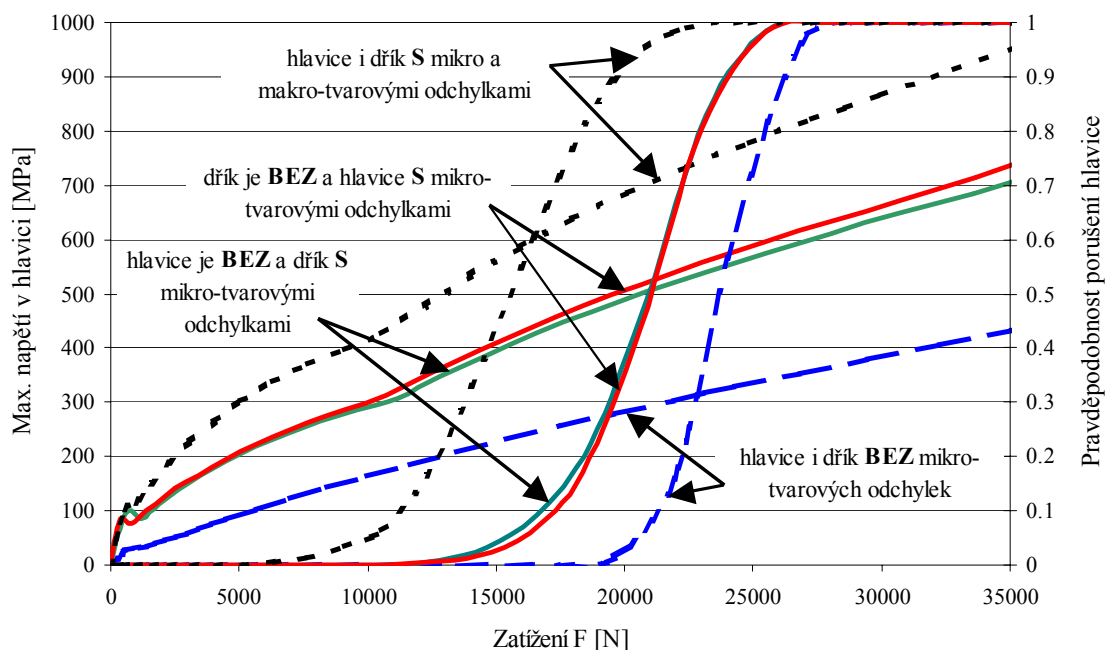
Obr. 5: Průběh maximálního tahového napětí v hlavici a její pravděpodobnost porušení v závislosti na zatížení pro různou hustotu diskretizace soustavy a pro různou vzájemnou polohu hlavice a dřívku charakterizovanou úhlem β

Tento jev je způsoben tím, že u varianty H1 dochází k lokálním koncentracím napětí, protože prvky jsou relativně velké a gradienty napětí vysoké. U varianty H2 je velikost prvků poloviční ve srovnání s variantou H1, a proto se vliv koncentrace napětí na prvku snižuje. Křivky pro variantu H3 se nacházejí v oblasti mezi variantami H1 a H2. Nárůst hodnot $\sigma_{\max}$ u varianty H3 oproti variantě H2 je způsoben tím, že velikost prvku u varianty H3 umožňuje zahrnout do modelu i velmi malé mikro-tvarové odchylky, které zvyšují hodnotu $\sigma_{\max}$. Lze tedy konstatovat, že pro nízké hodnoty zatížení (do 8 kN, což je oblast fyziologického zatížení kyčelní endoprotézy) je varianta H3 nejvhodnější. Při vyšším zatížení dochází k výraznému nárůstu hodnot $\sigma_{\max}$ tak, že pro variantu H3 jsou tyto hodnoty největší a pro variantu H1 nejmenší. Obr. 5 ukazuje i výrazný posun křivek s uvažováním a bez uvažování mikro-tvarových odchylek, z čehož vyplývá, že výsledky výpočtového modelování bez uvažování mikro-tvarových odchylek jsou zcela nevěrohodné.

V průběhu výpočtové modelování byl též určováno, jak výslednou napjatost v soustavě ovlivňují mikro-tvarové odchylky jednotlivých komponent – obr. 6, ve kterém jsou znázorněny závislosti pro čtyři různé varianty lišící se tím, zda jsou na dané kontaktní ploše v modelu přítomny mikro-tvarové odchylky (makro-tvarové odchylky jsou přítomny u všech analyzovaných variant):

- dřík i hlavice s mikro-tvarovými odchylkami,
- pouze dřík s mikro-tvarovými odchylkami,
- pouze hlavice s mikro-tvarovými odchylkami,
- dřík i hlavice bez mikro-tvarových odchylek.

Z analýzy závislostí na obr. 6 vyplývá, že při uvažování mikro-tvarových odchylek dochází k výraznému posunu křivek popisujících napjatost nebo spolehlivost k vyšším hodnotám zatížení. Závěrem lze konstatovat, že pokud při napjatostní nebo spolehlivostní analýze nebudeme uvažovat mikro-tvarové odchylky na kontaktních plochách obou kuželů obdržíme zcela chybné a nevěrohodné výsledky.



Obr. 6 Průběh maximálních hodnot napětí v keramické hlavici a její pravděpodobnost porušení

4. Závěr

Výpočtovým modelováním bylo prokázáno, že charakter a velikost tvarových odchylek na kuželové stykové ploše mezi keramickou hlavicí a dříkem výrazně ovlivňují charakter a velikost napětí v keramické komponentě a tím i hodnotu pravděpodobnosti porušování její soudržnosti. Vypočtené hodnoty navíc výrazně souvisejí s hustotou diskretizace soustavy v oblasti kontaktního kužele. Nízká hustota diskretizace soustavy vede k nevěrohodným výsledkům - v oblasti malých zatížení vykazuje vyšší hodnoty maximálních tahových napětí, zatímco v oblasti vyšších zatížení jsou vypočtené hodnoty maximálních napětí nižší, než odpovídá realitě. Výpočtové modelování bez uvažování mikro-tvarových odchylek kuželových ploch vede ke zcela nevěrohodným výsledkům.

5. Poděkování

Uvedená práce byla podporována grantem GA ČR 101/05/P037 a záměrem AV0Z20760514.

6. Literatura

- [1] Bush, D. R. (1993) Designing Ceramic Components for Structural Applications. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 2, ASM International pp. 851-862.
- [2] Fuis, V. (2000) Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy. Vědecké spisy VUT v Brně, edice PhD Thesis, sv. 34, Brno.
- [3] Fuis, V.; Janíček, P. (2003) Behaviour of the Hip Joint Endoprosthesis Ceramic Head with Manufacturing Inaccuracies under ISO 7206-5 Loading. Engineering Mechanics, Vol. 10, No. 5, pp. 399-411.