

SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTOVÉHO A EXPERIMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ SPOJENÍ HLAVICE A DŘÍKU KYČELNÍ ENDOPROTÉZY

COMPARISON OF THE COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESULTS OF THE HIP JOINT ENDOPROSTHESIS HEAD AND STEM CONNECTION

Vladimír Fuis¹

Abstract:

This paper is concerned with the comparison of the computational and experimental results of the hip joint endoprosthesis ceramic head and stem cone self-adhesive connection. During the experiment according the ISO 7206-5 there were measured the tangential strain on the lower part of the head's sphere and vertically head displacement. The system FEM ANSYS was used for the computational modelling of the system deformation and stresses. The interaction of the modelled production inaccuracies on the head-stem cone contact region was assumed. Modelled production inaccuracies were deflections from the system's nominal value of degree of taper and non-roundness of the contact areas.

Klíčová slova: Totální kyčelní endoprotéza, výrobní nepřesnosti, samosvorné spojení, srovnání experimentálních a výpočtových výsledků, MKP

1. Úvod

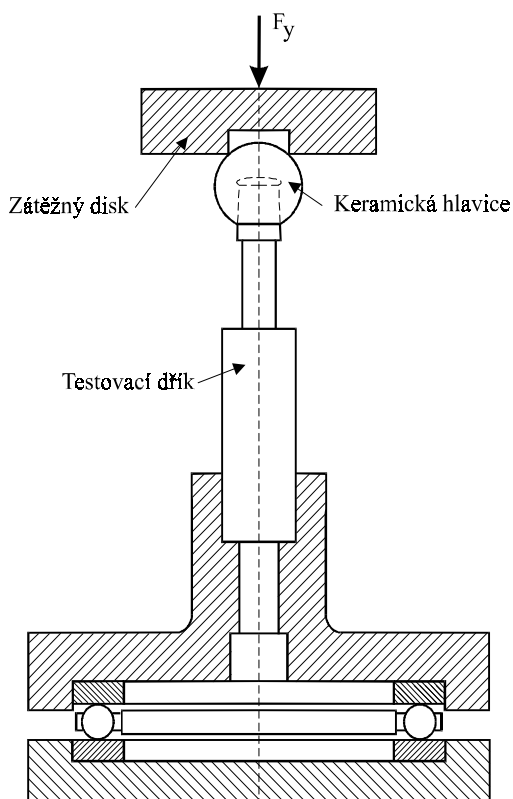
V současné době se v lékařské praxi nejčastěji používá pro totální náhradu kyčelního kloubu endoprotéza, která se skládá ze dvou komponent: keramické hlavice a dříku z korozivzdorné oceli. Na konci roku 1996 se objevily informace o tom, že u některých pacientů, kterým byla aplikována česká endoprotéza kyčelního kloubu, došlo k porušení soudržnosti keramické hlavice. Nejhorší situace z hlediska počtu reoperací kyčelních endoprotéz z důvodu destrukce keramické hlavice je v nemocnici v Havlíčkově Brodě, kde bylo nutné provést již 8 reoperací, což představuje více než 1% všech kyčelních implantací. Z tohoto důvodu bylo realizováno experimentální a výpočtové modelování chování keramické hlavice nasazené na testovací dřík dle ISO 7206-5 (norma na určování statické pevnosti keramických hlavic). Pro zajištění věrohodnosti výpočtově zjištěných hodnot je nutné, aby existoval soulad mezi výsledky získanými experimentálně a výpočtově, a proto se touto problematikou zabývám.

Na konferenci EAN'97 byly publikovány a srovnávány výsledky experimentálního a výpočtového modelování na výpočtovém modelu, který uvažoval pouze rotačně symetrickou výrobní nepřesnost typu „odchylka od nominální kuželovitosti“ viz [2]. Náplní tohoto článku je srovnání výsledků získaných experimentálně a výpočtově na výpočtovém modelu, který již uvažuje interakci modelových výrobních nepřesností (odchylku od nominální kuželovitosti a ovalitu) samosvorného kuželového spojení hlavice a dříku.

¹ Ing. Vladimír Fuis – sdružené pracoviště ÚT AV ČR a ÚMT FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69, Brno,
e-mail: fuis@cis.vutbr.cz

2. Experimentální modelování

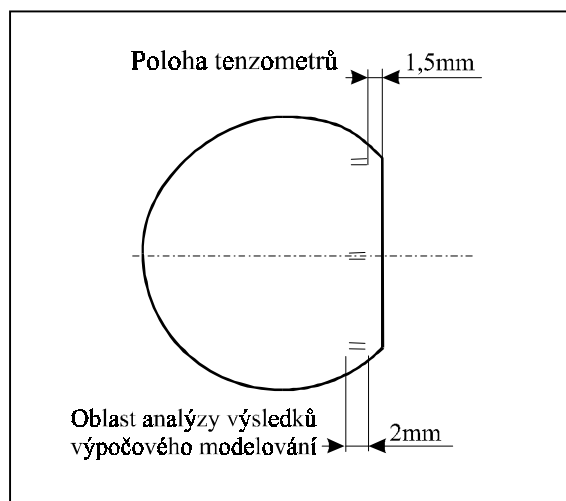
Experimentální modelování bylo realizováno v souladu s ISO 7206-5 na zatěžovacím stroji TIRA TEST 2300. Hlavice je nasazena na testovací dřík, který je upevněn v přípravku a zatěžována silovým zatížením, jehož výslednice je totožná s osou soustavy (obr.1). Experimentální modelování bylo realizováno pro dva typy kuželů dříků, které se lišily drsností kuželové kontaktní plochy : dříky hladké – dále označené HD, jejichž drsnost $R_a < 0,4 \mu\text{m}$, a dříky, na jejichž kuželové ploše byly vysoustruženy jemné lichoběžníkové zoubky velikosti řádově desetiny milimetru, dále označené jako ZD. Materiál dříků byla konstrukční ocel vykazující elastické chování. Z výpočtového modelování napjatosti a deformace soustavy vyplývá, že maximální tahová napětí a přetvoření, která jsou nejvýznamnější z hlediska křehkého porušení hlavice, mají směr obvodový [1] a maxim nabývají ve spodní části kužele hlavice – viz místo MX na obr.4. Z tohoto důvodu byly na vnější kulovou plochu hlavice nalepeny tenzometrické snímače (Hottinger 0,6/120LY11) orientované v obvodovém směru – viz obr. 2. Před vlastním experimentálním modelováním bylo realizováno měření výrobních nepřesností kuželového spojení hlavice a dříku, protože výrobní nepřesnosti výrazně ovlivňují tahovou napjatost v keramické hlavici, jak vyplývá z [3].



Obr. 1 Uspořádání experimentu

V průběhu zatěžování soustavy bylo realizováno měření obvodových přetvoření v šesti místech na obvodu hlavice a dále vertikální posuv hlavice. Výsledky experimentálního modelování pro oba typy dříků jsou znázorněny na obr.3 a obr.7, na nichž jsou vyneseny výše uvedené veličiny v průběhu zatěžování.

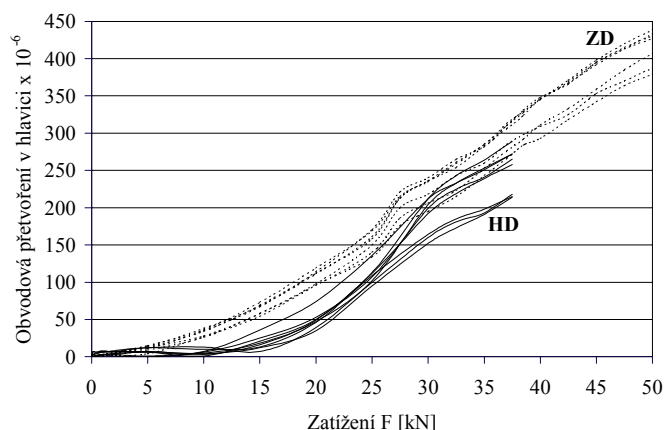
Z analýzy výsledků vyplývá:



Obr.2 Poloha tenzometrů na keramické hlavici

- destrukční síla u HD je nižší než u ZD, přičemž obvodová přetvoření při destrukci hlavice jsou u ZD podstatně vyšší než u HD,
- u ZD dochází k nárůstu obvodových přetvoření prakticky ihned od začátku zatěžování, u HD však dochází k nárůstu obvodových přetvoření až při $F > 12 \text{ kN}$,
- rozptyl hodnot přetvoření je u ZD nižší než u HD,
- vertikální posuv hlavice u HD je nižší než u ZD.

Dále bylo zjištěno, že v průběhu zatěžování dochází k výraznému otěru kontaktní kuželové plochy dříku, přičemž platí, že u ZD je velikost otěru podstatně

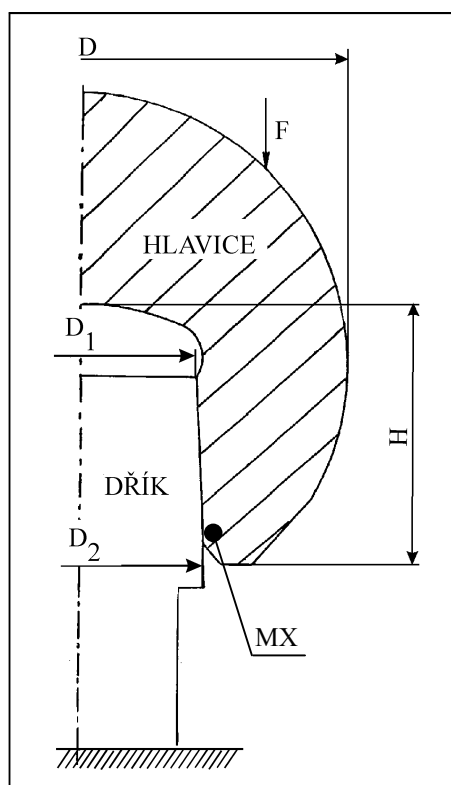


Obr.3 Průběh změřených obvodových přetvoření

větší a je rovnoměrněji rozložený po kontaktní ploše, ve srovnání s HD.

3. Výpočtové modelování

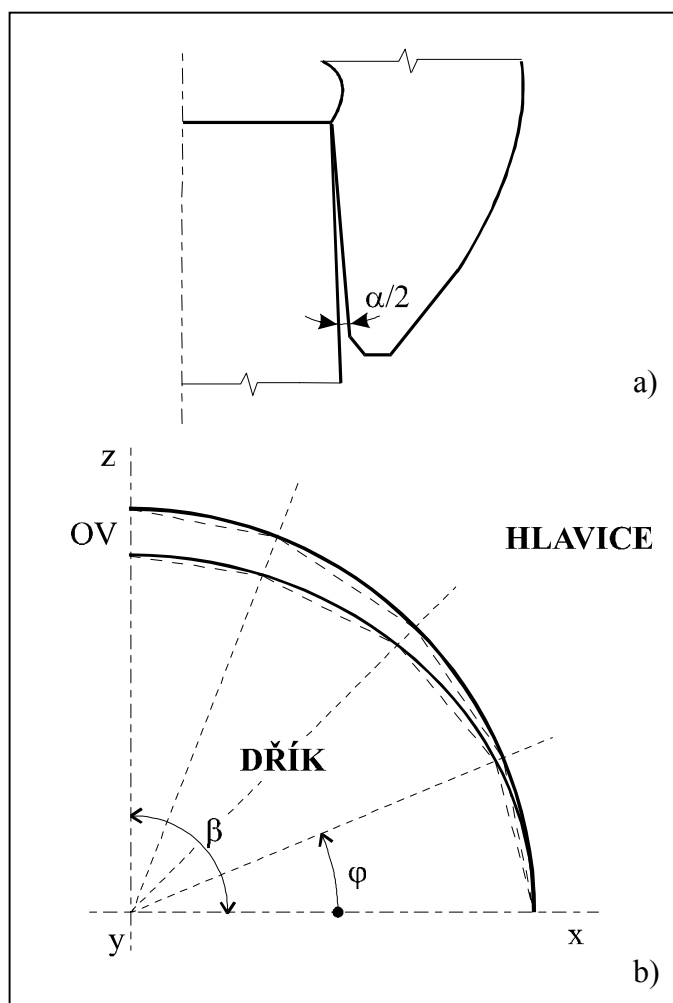
Pro výpočtové modelování deformace a napjatosti v soustavě byl využit systém MKP ANSYS 5.5. Modelová soustava se skládá ze dvou prvků – hlavice a hladkého dříku (realizace výpočtu na prostorovém modelu s uvažováním zoubkovaného dříku není v současné době z časového a hardwarového hlediska možná).



Obr.4 Schéma modelové soustavy

Uspořádání soustavy odpovídá normě ISO 7206-5 viz obr.4. Hlavice i dřík jsou uvažovány jako izotropní kontinua, kontakt mezi hlavicí a dříkem je modelován jako elastické Coulombovo tření.

Při výpočtovém modelování bylo zjištěno, že tahová obvodová přetvoření i vertikální posuv hlavice jsou výrazně ovlivněny přítomností výrobních nepřesností na kuželovém kontaktním spojení. Z tohoto důvodu byla uvažována interakce následujících dvou modelových výrobních nepřesností: odchylka od nominální kuželovitosti (obr.5a) a ovalita kontaktních ploch (obr.5b). Velikosti výrobních nepřesností zjištěné měřením byly: $\alpha = 5'11''$ a $OV = 0,0055$ mm. Předpokládalo se, že se ovalita lokalizuje na úhlu $\beta = 90^\circ$.



Obr.5 Uvažované modelové výrobní nepřesnosti

Z hlediska geometrie, vazeb a materiálu je uvažovaná soustava modelována na v současné době nejvyšší možné úrovni výpočtového modelování. Jediným parametrem, jehož vliv na napjatost v soustavě je významný a jehož hodnota není přesně určena, je velikost součinitele tření mezi hlavicí a dříkem. Z tohoto důvodu je tento parametr zvolen jako parametr srovnávacích výpočtů a jeho velikost je uvažována v intervalu $f \in (0,1;0,2)$.

4. Srovnání výsledků výpočtového a experimentálního modelování

Pro srovnání výsledků výpočtového a experimentálního modelování byly použity obě veličiny, které byly v průběhu experimentu měřeny: vertikální posuv hlavice u_y a obvodová přetvoření ε_t na vnějším kulovém povrchu hlavice o šířce cca 2 mm (obr.2). Průběhy uvedených veličin získaných z výpočtového a experimentálního modelování jsou uvedeny na obr.6a,b,c a obr.7.

Hodnoty vypočtených ε_t se po obvodu hlavice mění a jsou na obr.6a,b,c znázorněny vždy dvěma mezními křivkami (maximální a minimální hodnota ε_t v analyzované oblasti – obr.2). Vliv velikosti součinitele tření na průběhy hodnot ε_t je patrný z analýzy uvedených obrázků. S rostoucí velikostí součinitele tření mezi hlavicí a dříkem dochází:

- k posuvu křivek ε_t k vyšším hodnotám zatížení,
- k poklesu sklonu průběhů vypočtených křivek, čímž se blíží sklonu experimentálně získaných křivek.

Z těchto dílčích závěrů tedy vyplývá, že k souladu mezi experimentálně a výpočtově získanými hodnotami bude docházet pro součinitel tření vyšší než 0,2.

Druhou veličinou, která byla porovnávána je vertikální posuv hlavice u_y (obr.7). Při nízkých hodnotách zatížení je průběh u_y výrazně nelineární, a to jak pro experimentální, tak i vypočtené hodnoty (nelinearita je způsobená vymezením výrobní nepřesnosti viz [3]). Vypočtené průběhy hodnoty u_y vykazují při nízkých hodnotách zatížení podstatně strmější nárůst než experimentálně zjištěné průběhy, což ukazuje na skutečnost, že výrobní nepřesnosti u reálné soustavy zcela neodpovídají modelovým výrobním nepřesnostem (u reálné soustavy dochází na začátku zatěžování ke kontaktu na větší ploše než u modelové soustavy). Po vymezení výrobních nepřesností souvisí sklon křivek u_y s hodnotou součinitele tření, jak vyplývá z [1].

Ze srovnání sklonů získaných závislostí experimentálního a výpočtového modelování se dochází k závěru, že hodnota součinitele tření mezi hlavicí a dříkem je v intervalu $f \in (0,1;0,15)$. Tento dílčí závěr však není v souladu se předchozím závěrem, z něhož vyplývá, že pro soulad experimentálně a výpočtově získaných průběhů je nutné volit hodnotu součinitele tření $f > 0,2$.

4.1 Analýza příčin nesouladu výsledků výpočtového a experimentálního modelování

Jak vyplývá z [1], jsou průběhy obvodových přetvoření výrazně ovlivněny výrobními nepřesnostmi, a to i v případě jejich vymezení deformací soustavy, zatímco vertikální posuv hlavice je po vymezení výrobních nepřesností na nich prakticky nezávislý. Vertikální posuv hlavice je možné ovlivnit pouze velikostí součinitele tření nebo změnou geometrie hlavice (např. změna hloubky kuželového otvoru H – obr.4 viz [1]). Z této analýzy tedy 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 $f \in (0,1; 0,15)$.

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. Problémem však zůstává modelování otěru kuželové plochy dřívku v průběhu zatěžování, protože jak vyplývá z kap.2 bylo při experimentu zjištěno, že dochází k relativně velkému otěru kontaktní plochy dřívku, což se projeví, jak na průbězích obvodových napětí, tak i na vertikálním posuvu hlavice. V současné době však neexistuje teorie popisující otěr, kterou by bylo možné efektivně implementovat do systému MKP.

5. Závěr

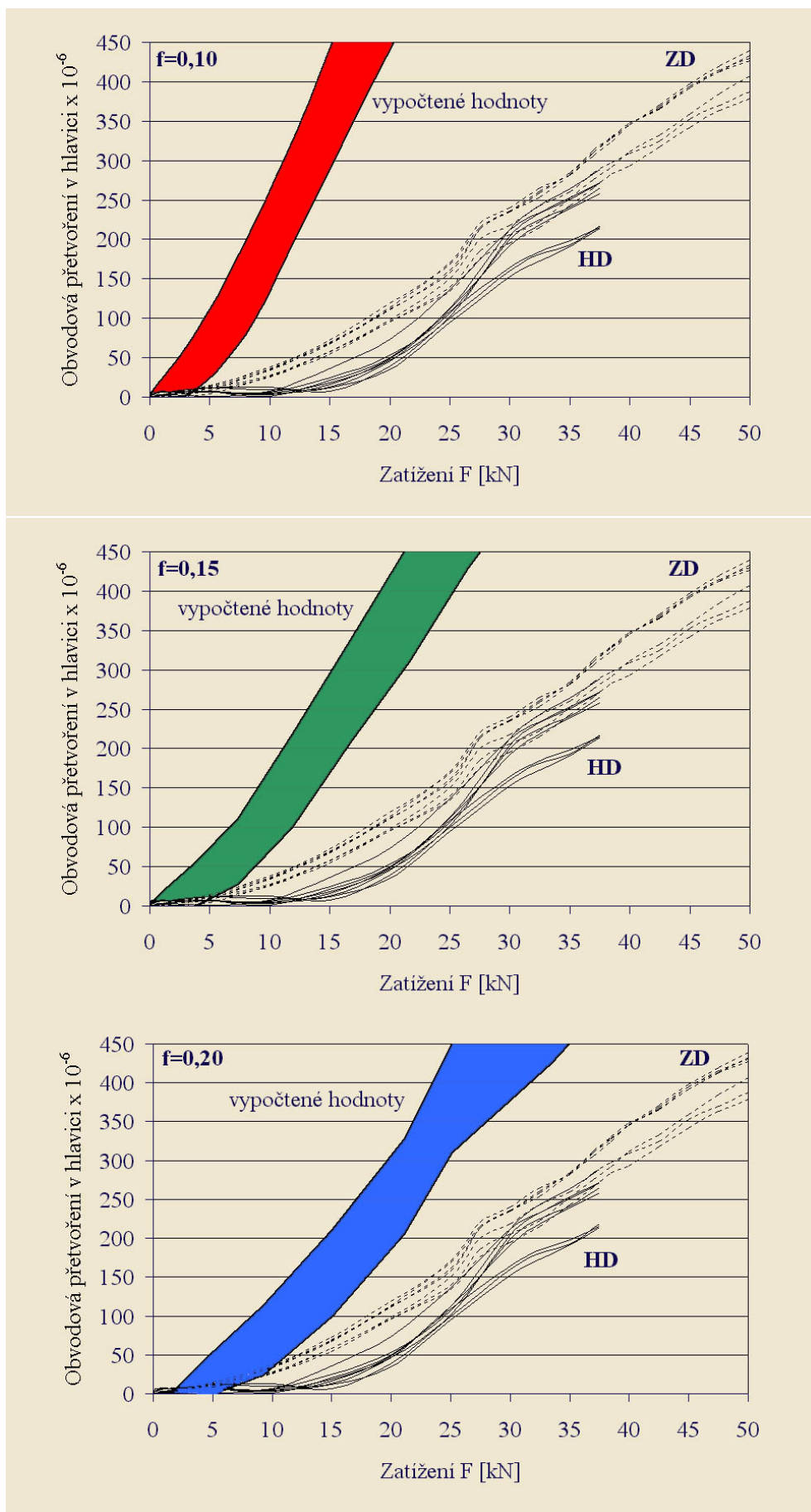
Ze srovnání výsledků výpočtového a experimentálního modelování vyplývá, že zatím nebylo dosaženo úplného souladu, což je způsobené „relativně nízkou“ úrovní výpočtového a experimentálního modelování. Relativita úrovně modelování spočívá v tom, že se u výpočtového modelování pohybujeme na jeho hranici, dané použitým hardwarem a softwarem, což je jednou z bariér bránící dosažení souladu s experimentálně zjištěnými skutečnostmi.

V současné době je možné zvýšit úroveň výpočtového modelování tím, že se bude realizovat přechod od modelových k reálným výrobním nepřesnostem, které budou určeny změřením kuželů obou analyzovaných komponent.

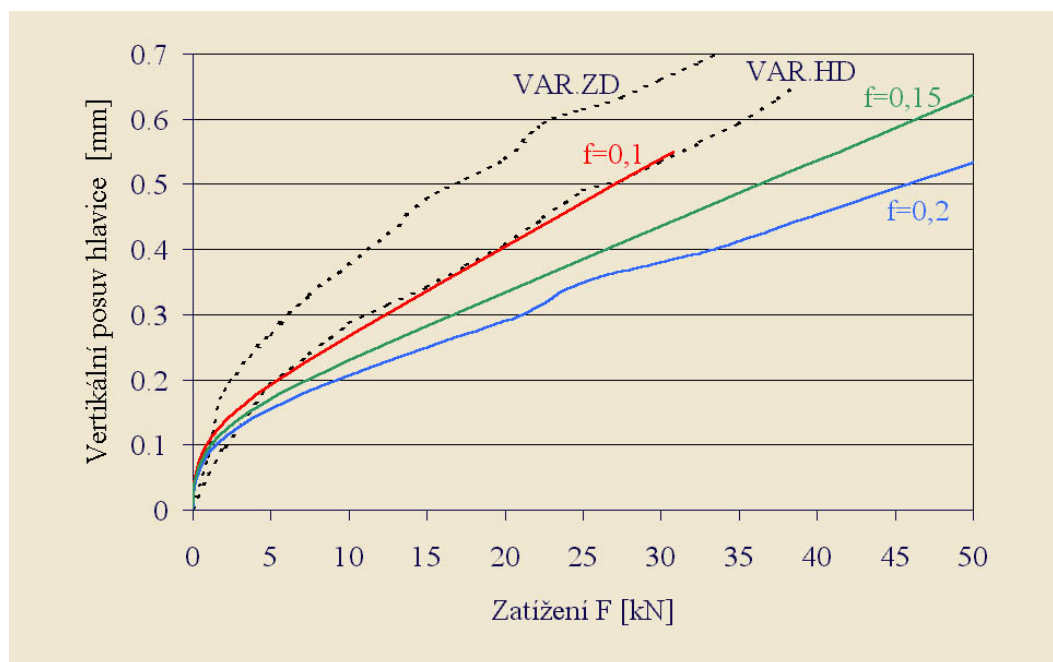
Tato práce byla podporována pilotním projektem ÚT AV ČR č. 20/7U.

Literatura

- [1] Fuis V.: Napjatostně spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy. Disertační práce ÚMT FSI VUT Brno, 1999.
- [2] 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.
- [3] Fuis,V.: Interakce výrobních nepřesností a jejich vliv na spolehlivost hlavic totální kyčelní endoprotézy. Mezinárodní konference Skelet 2000, str.11, Praha.



Obr.6 Průběh změřených a vypočtených hodnot obvodových přetvoření v závislosti na zatížení pro různé hodnoty součinitele tření



Obr.7 Průběhy vertikálního posuvu hlavice získané experimentálně a výpočtově