

CALCULATION OF THE CERAMICS MATERIAL PARAMETERS FROM THE TESTING DESTRUCTIONS OF THE HEADS

V. Fuis*, P. Hlavoň*, T. Návrat*

Summary: *This paper deals with increasing of the computation modelling level of the reliability problem of ceramic heads of total hip joint endoprostheses. The solution to this problem was invoked by recent more frequent failures of these heads in clinical practice. Results of computational and experimental modelling have shown a substantial influence of shape deviations in the conical connection between stem and head on the initiation of ceramic head fractures. The fracture probability was evaluated step by step for various macroscopic shape deviations in the conical connection and then for microscopic shape deviations superposed on the macroscopic deviations. The solution to the problem of ceramic head reliability requires realization of two computational models: one for determination of stress states and another one for evaluation of the fracture probability. Material characteristics of ceramics used in fracture probability evaluation have been determined by a three-point-bending test till now. Within the framework of this paper is that the characteristics will be determined by destruction tests of ceramic heads and they will be used as new input data in the computational variants realized till now.*

1. Úvod

Problémovou situací, kterou je třeba vyřešit, jsou destrukce keramických hlavic totální kyčelní endoprotézy *in vivo*, ke kterým docházelo od poloviny devadesátých let v řadě českých nemocnic. Jednalo se o keramické hlavice české provenience vyrobené z Al_2O_3 nasazené na kužel dřívku z austenitické oceli ULTRA AKV 2. Selhání implantátu typu „destrukce keramické hlavice“ má vždy pro pacienta traumatologické následky, neboť je nutné provést reoperaci části nebo dokonce celé endoprotézy, po které opět následuje rekonvalescence a rehabilitace. Je tedy žádoucí, aby se počet reoperací implantátů minimalizoval. Proces implantace endoprotézy ortopédem je až konečnou etapou procesu tvorby a aplikace technického objektu (v tomto případě totální kyčelní endoprotézy). Předchází mu proces návrhu, výroby, testování, dopravy, skladování a sterilizace. V každém z těchto procesů je možné spolehlivost konečného výrobku zvýšit, nebo naopak nevhodnými zásahy snížit. Spolehlivost součásti z keramického materiálu se určuje na základě Weibullové teorie nejslabšího článku (Bush (1993)) a závisí na třech materiálových parametrech. Tyto parametry je nutné experimentálně určit ze sady zkoušek 3 nebo 4-bodovým ohybem normalizovaných zkušebních vzorků vyřezaných z analyzovaných keramických součástí.

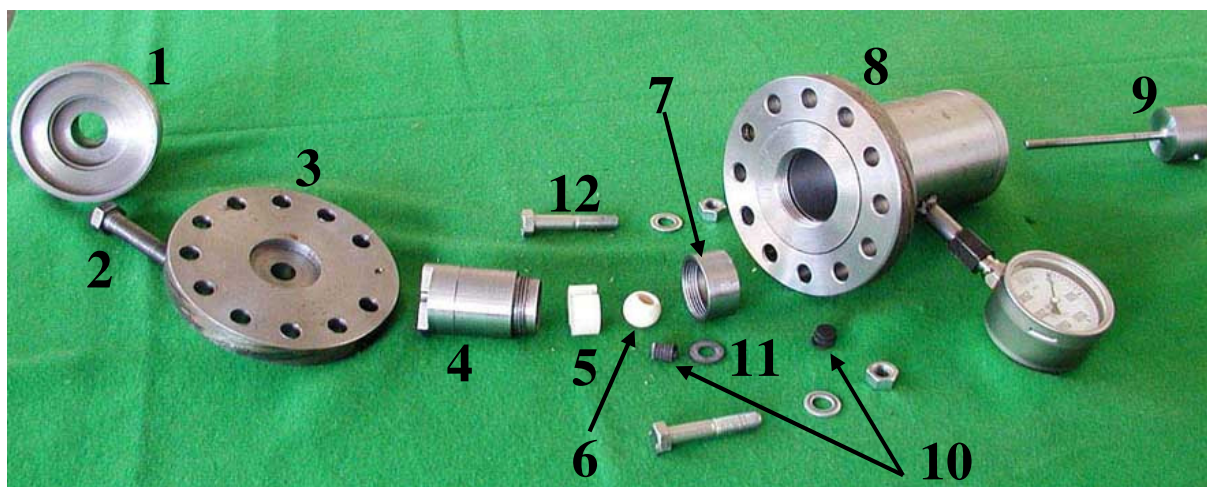
* Ing. Vladimír Fuis, Ph.D., Ing. Pavel Hlavoň, Ph.D., Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.: Společné pracoviště ÚT AV ČR a ÚMTMB FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69, Brno; tel.: +420.541 142 891, fax: +420.541 142 876; e-mail: fuis@fme.vutbr.cz, hlavon@fme.vutbr.cz, navrat@fme.vutbr.cz

Rozměry keramické hlavice totální kyčelní endoprotézy jsou příliš malé, a proto z ní nelze vyřezat normalizované testovací vzorky. Vyřezané vzorky jsou výrazně menší než normalizované, a proto výsledky vykazují vyšší hodnoty pevnostních charakteristik, než které by se určily z destrukcí normalizovaných vzorků. Jednou z možností, jak tento problém vyřešit, je určovat materiálové parametry keramiky přímo z destrukcí keramických součástí.

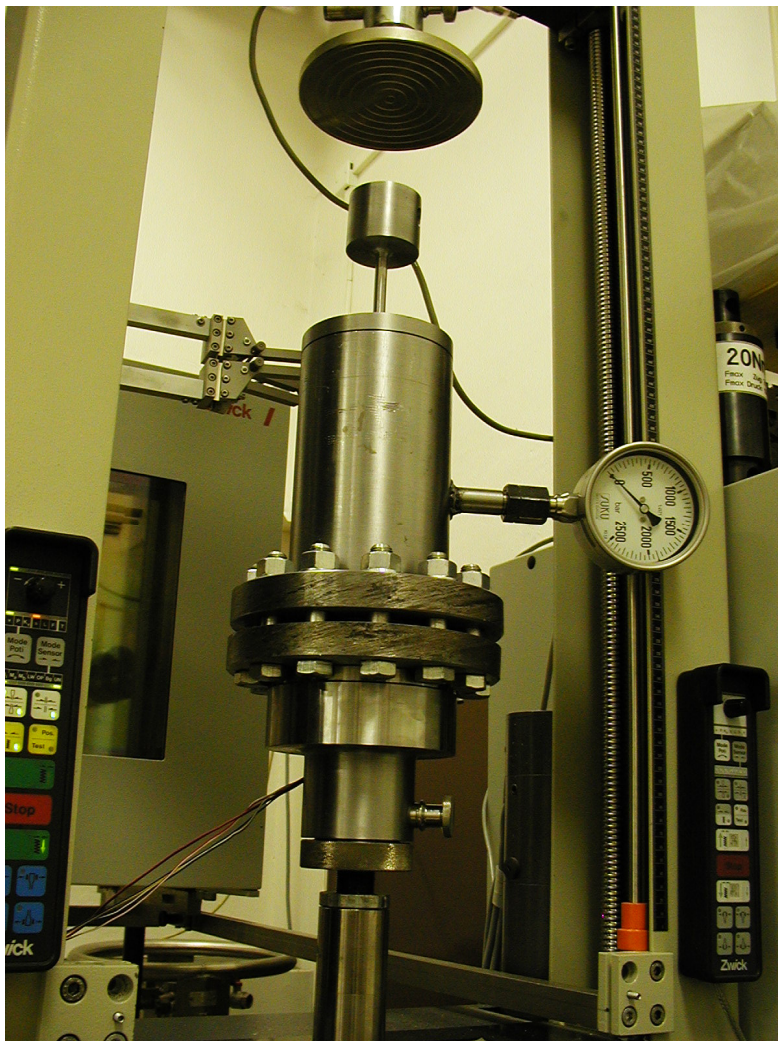
2. Realizace destrukcí keramických hlavic

Cílem práce je tedy určit materiálové parametry keramického materiálu přímo z destrukčních zkoušek keramických hlavic a pomocí následného výpočtového modelování napjatosti v komponentě metodou konečných prvků. Zatížení keramického materiálu by mělo být technicky jednoduché a mělo by vytvářet v součásti tahovou napjatost, která způsobí porušení soudržnosti. Keramická hlavice má v sobě kuželový otvor, do kterého je při operaci vložen dílek endoprotézy. Abychom v hlavici získali tahovou napjatost, je třeba působit tlakovým zatížením na kuželový otvor. V původním plánu bylo uvažováno jako médium olej, ale vznikly problémy s utěsněním přípravku při tlacích větších než 100 MPa. Z tohoto důvodu se přešlo na elasticko-plastickou pryž NBR90, která je ve formě kroužků vkládána jak do válce tak i do kuželového otvoru hlavice (pozice 10 na obr.1). Tímto způsobem zatížení se v hlavici vytváří tahová napjatost v obvodovém směru, která se podobá napjatosti od kontaktu se dílkem endoprotézy v těle pacienta. Na rozdíl od kontaktní úlohy však napjatost v hlavici není ovlivňována makro a mikro tvarovými odchylkami (Fuis (2000)) a je funkcí pouze vnějšího tlakového zatížení.

Keramické hlavice jsou destruovány ve speciálním přípravku, který je znázorněn na obr. 1 a 2. Schéma celé soustavy v rozloženém stavu je na obr. 1 – píst (9) je vložen do válce s tlakoměrem (8). Hlavice (6) je vložena na podložku (5), která je vložena do pouzdra (4), a zašroubována víčkem (7). Šroub (2) je zašroubován přes přírubu (3) do pouzdra (4) a slouží k přitlačení hlavice na pryžovou podložku (11) a víčko (7). Šroub (2) je po celé délce dutý a prochází jím dráty od tenzometrických snímačů. Pro přenos tlaku z pístu na hlavici jsou použity pryžové kroužky (10), které jsou vloženy do válce i do kuželového otvoru hlavice. Pomocí šroubů (12) je sestavené pouzdro spojeno s válcem. Sestavený přípravek ve zkušební stroji je znázorněn na obr. 2.



Obr.1 Rozložený zkušební přípravek na destrukce keramických hlavic



Obr.2 Složený přípravek na destrukce keramických hlavic ve zkušebním zařízení

V procesu zatěžování hlavice až do její destrukce jsou měřena obvodová přetvoření na vnější kulové ploše hlavice, která jsou následně použita při výpočtovém modelování napjatosti a deformace v hlavici metodou konečných prvků. Po obvodu hlavice jsou nalepeny dva tenzometry (po 180°), které v průběhu zatěžování kvantifikují nehomogenitu obvodových přetvoření, která signalizuje odchylku od rotačně symetrického zatěžování.



Obr. 3 Destruovaná hlavice

V první fázi byly realizovány testovací destrukce keramických hlavic, jejichž výsledek je možné shrnout do následujících konstatování:

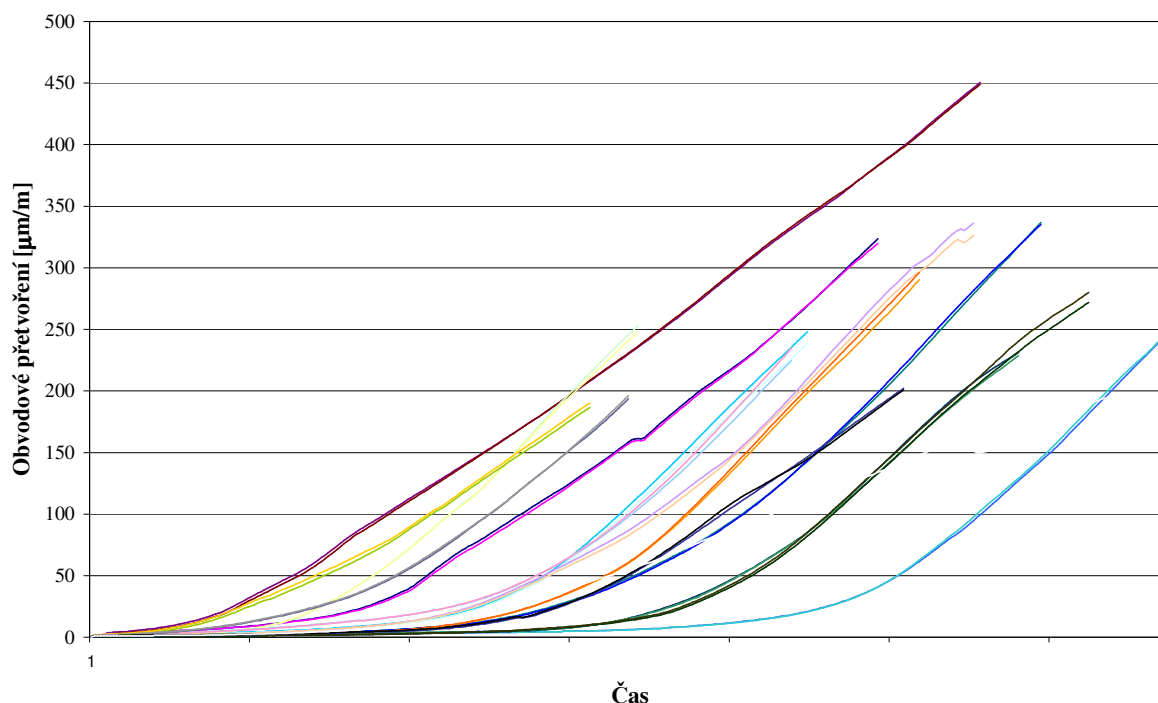
- v místech, kde jsou nalepeny tenzometry, není nutné hlavice opískovávat – tenzometry „drží“ i na lesklém kulovém povrchu hlavice až do její destrukce.

- Průběh změřených přetvoření ze čtyř tenzometrů nalepených rovnoměrně po obvodu hlavice ukázal, že změřené hodnoty nevykazují výrazný rozptyl, což dokazuje, že zatížení hlavice je i přes pryžové těleso rovnoměrné (podobně jako při zatížení od tlakového oleje). Z tohoto důvodu není nutné na hlavici lepit víc než 2 tenzometry.
- Velikost změřeného obvodového přetvoření výrazně závisí na vzdálenosti tenzometru od spodní hrany hlavice (na obr. 3 jsou vidět 3 tenzometry nalepené nad sebou), což bylo potvrzeno i následným výpočtovým modelováním.
- Šrouby 12 je třeba po obvodu přípravku utahovat rovnoměrně, aby nedošlo k přidavnému zatížení hlavice, které by ovlivnilo výsledky experimentu.

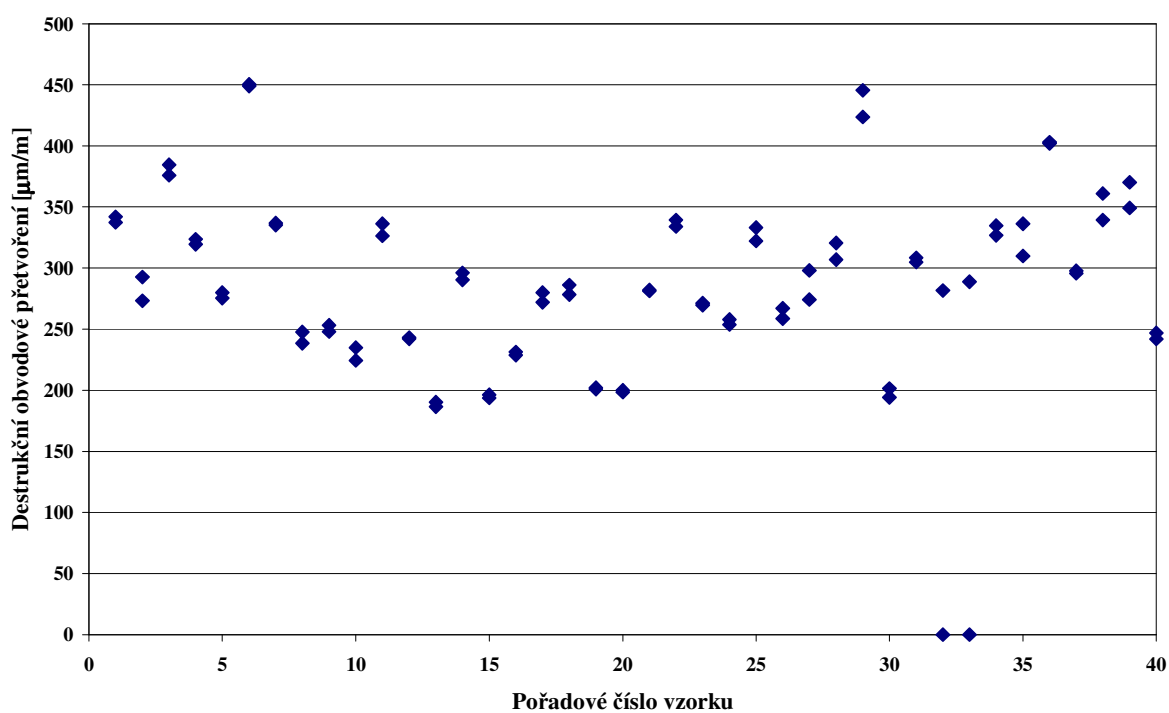
3. Analýza výsledků experimentálního modelování

Celkem bylo destruováno 40 hlavíc průměr 28 mm, typ L a kužel 12/14 mm. Některé průběhy obvodových přetvoření z obou tenzometrů jsou znázorněny na obr. 4. Destrukční hodnoty změřených přetvoření jsou na obr. 5 a analýza procentuálního rozdílu hodnot přetvoření ze dvou tenzometrů je na obr. 6 a 7. Na obr. 8 a 9 je znázorněna pravděpodobnost porušení hlavice v závislosti na destrukčním přetvoření.

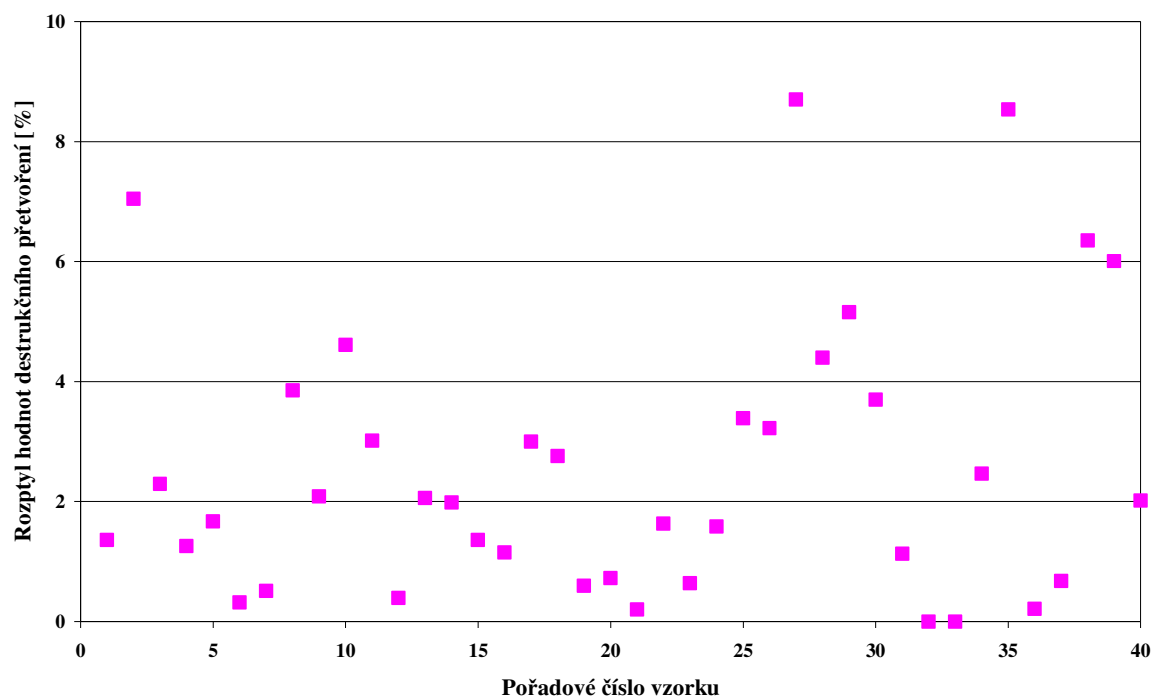
Hodnoty destrukčních přetvoření na jedné hlavici vykazují maximální procentuální rozdíl 8,25 %. Tyto vysoké hodnoty však byly pouze pro případy, při kterých šrouby v přípravku nebyly utaženy zcela rovnoměrně (vzorky č. 2, 27, 35 a 38). Ostatní vzorky vykazují procentuální rozdíl podstatně menší, jak ukazuje obr. 7, z čehož lze konstatovat, že tlakové zatížení hlavice v ní způsobilo napjatost blížíící se rotačně symetrické napjatosti



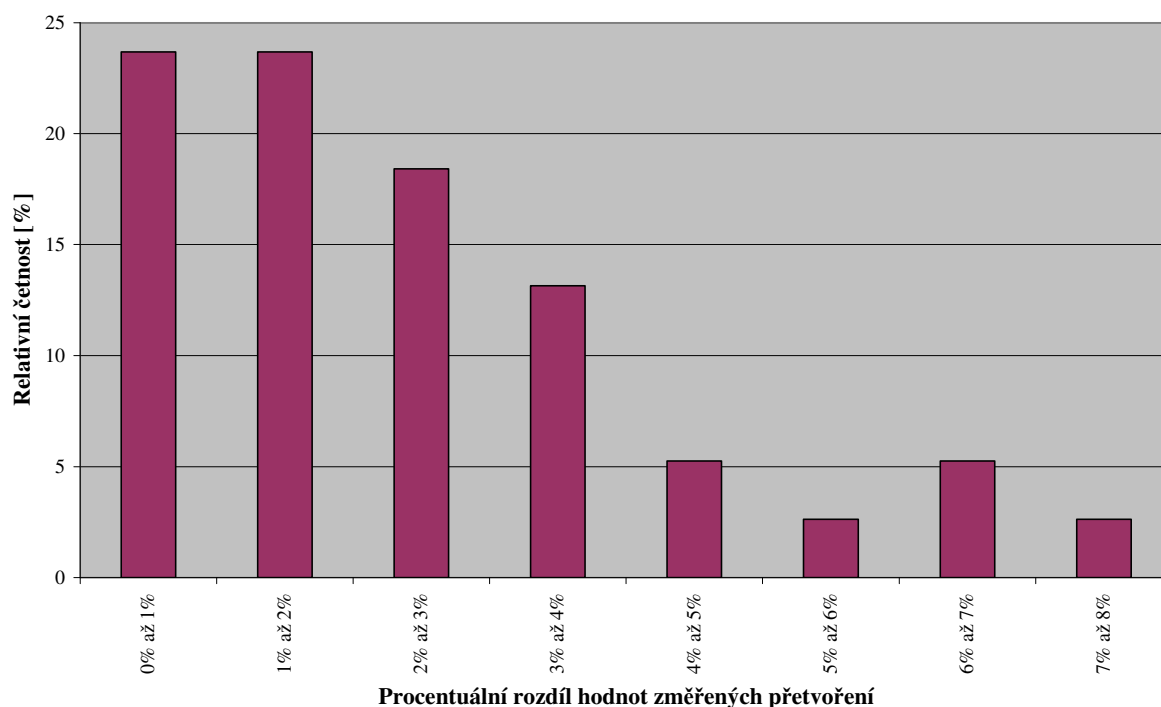
Obr. 4 Průběhy obvodových přetvoření v závislosti na čase



Obr. 5 Hodnoty obvodových přetvoření při destrukcích hlavic



Obr. 6 Procentální rozdíl hodnot změřených přetvoření ze dvou tenzometrů



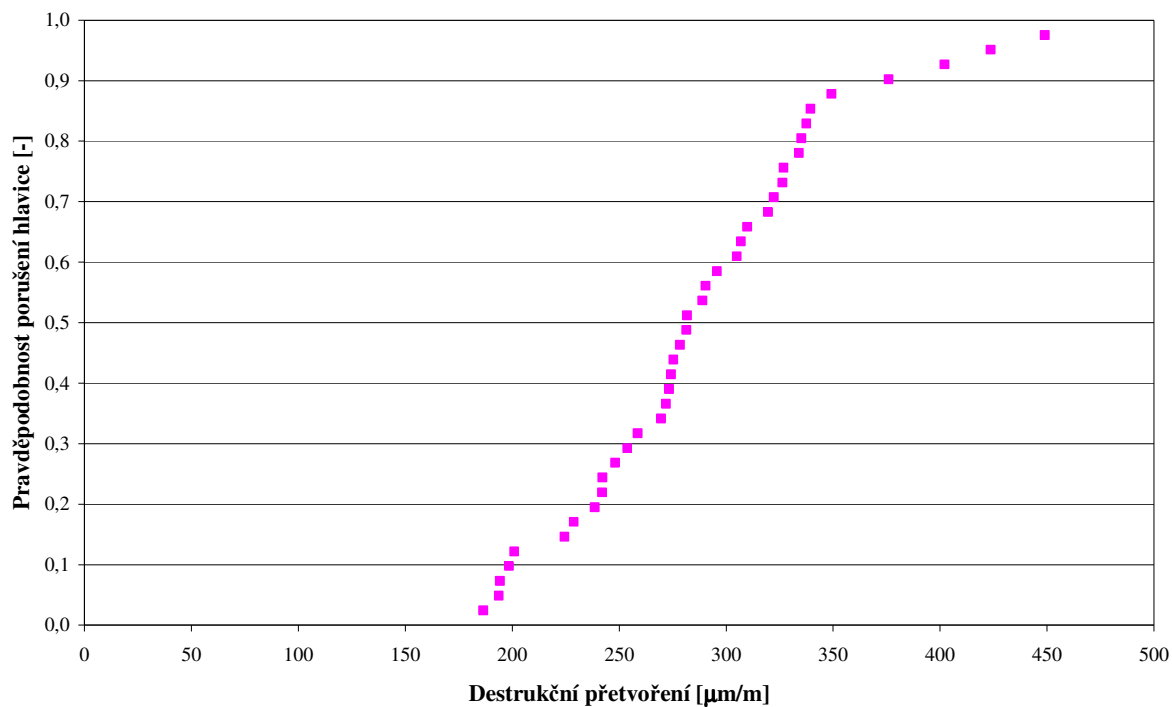
Obr. 7 Relativní četnost procentuálního rozdílu hodnot změřených přetvoření

V další fázi výsledná destrukční přetvoření seřadíme podle velikosti a vypočteme pravděpodobnost porušení jednotlivého vzorku podle vztahu

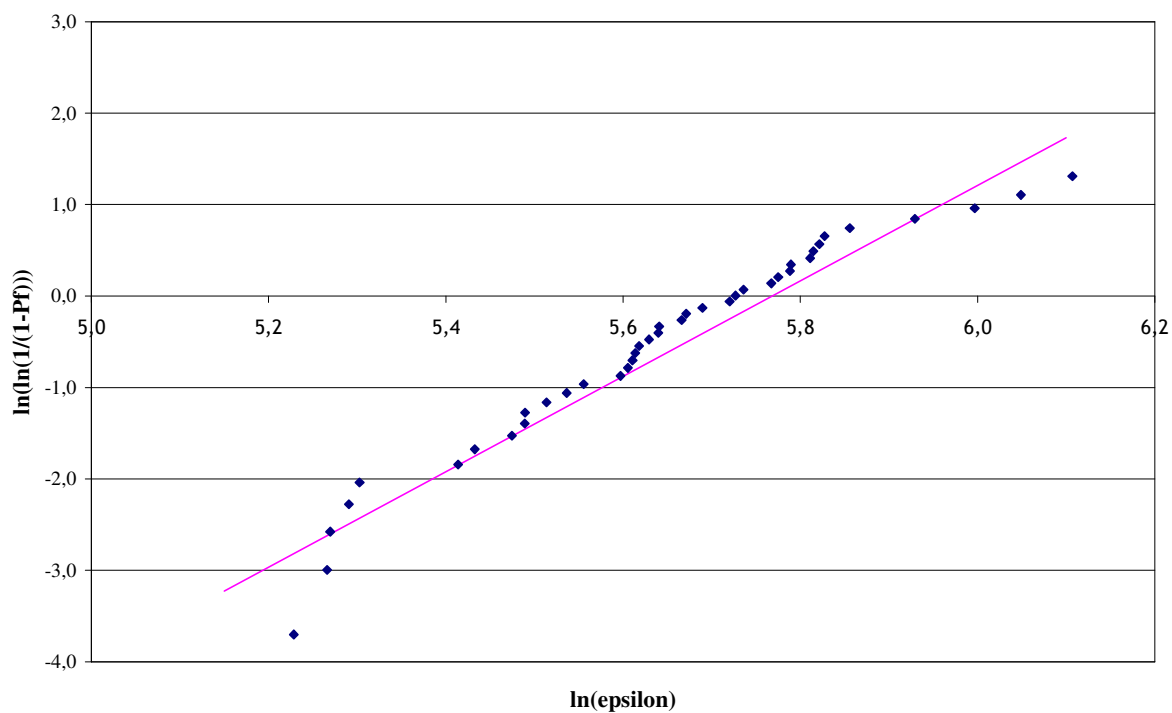
$$P_f(j) = \frac{j}{n+1}, \quad (1)$$

kde n je celkový počet hodnot v souboru, v našem případě $n = 40$, a j je pořadové číslo seřazené hlavice, které se mění od 1 do 40 a tím určuje pravděpodobnost porušení j -té hlavice P_f . Pokud vyneseme vypočtená data do grafu, obdržíme obr. 8, ze kterého vyplývá, že závislost je téměř lineární. Linearitu nejvíce narušují 4 hodnoty přetvoření pro nejnižší a nejvyšší hodnoty pravděpodobnosti porušení, což je způsobeno patrně jiným mechanismem mezního stavu lomu ve srovnání s centrální částí – v následující etapě budou detailně analyzovány lomové plochy hlavic, které se porušily při nízkých a vysokých hodnotách obvodových přetvoření.

Pevnostní parametry křehkých materiálů, ke kterým patří i hliníková keramika, ze které jsou vyrobeny hlavice kyčelní endoprotézy, vykazují Weibullovo rozdělení. Pro určení materiálových charakteristik je třeba provést logaritmickou transformaci pravděpodobnosti porušení a destrukčních přetvoření, čímž získáme obr. 9. Weibullovo rozdělení pracuje se třemi parametry: m – souvisí s rozptylem změřených hodnot (odpovídá směrnici přímky proložené daty na obr. 9 $m = 5,28$), σ_0 – jednotková pevnost a σ_u je napětí, pod jehož hodnotou nedochází k porušování materiálu. Pro určení zbývajících materiálových parametrů je třeba realizovat výpočtové modelování napjatosti v hlavici pro situaci odpovídající destrukčním zkouškám.



Obr. 8 Průběh pravděpodobnosti porušení keramické hlavice v závislosti na destrukčním přetvoření



Obr. 9 Logaritmicky transformovaná pravděpodobnost porušení keramické hlavice a destrukční přetvoření

Tato práce vznikla za podpory grantu GAČR 101/04/P037 a záměru MSM 0021630518.

4. Literatura

Bush, D.: Designing Ceramic Components for Structural Applications. J. Mater. Eng. Perf. ASM Int., 2, pp. 851-862, 1993.

Fuis, V.: Napjatostní a spolehlivostní analýza keramické hlavice kyčelní endoprotézy. Vědecké spisy VUT v Brně, edice PhD Thesis, sv. 34, Brno, 2000