Experimentální Analýza Napětí 2003

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF BONE CEMENT

EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOSTNÍHO CEMENTU

Tomáš Návrat [1], Zdeněk Florian [2]

The contribution deals with the experimental determination of the mechanical properties of the bone cement. The goal of this work was to determine these mechanical characteristics: Young's modulus, strength and termal expansion coefficient. Measurement was provided for several kinds of the bone cement. The bone cement was prepared by convention manual mixing technique. The bone cement specimens were created by means of particular equipment and they were undergone by four-point bend test.

Keywords

Bone cement, mixing procedure, antibiotics, mechanical properties, Young's modulus, strength

Úvod

Náhrady kyčelního kloubu můžeme podle způsobu fixace ke kostnímu lůžku rozdělit na dvě skupiny. První skupinu tvoří náhrady necementované, druhou pak náhrady cementované, které jsou ke kosti fixovány speciální rychle tuhnoucí hmotou kostním cementem. Podle švédského registru totálních náhrad se ukazuje, že užitím moderních cementačních technik se zvyšuje životnost implantátu a oddaluje se nutnost revizní operace. Proto je zapotřebí věnovat velkou pozornost mechanickým vlastnostem kostního cementu a dále rozvíjet metody na jejich zlepšování.

Příprava kostního cementu

Z hlediska historického vývoje se použily/používají následující způsoby přípravy kostního cementu:

- ruční míchání v misce přímo na operačním sále, dále pak může být směs zpracována: vibračně, mechanicky, odstředivě
- vakuové míchání

Tyto metody byly vyvinuty především pro zlepšení jejich mechanických vlastností. Ne všechny vedly ke zlepšení, proto se v současné době používají jen některé z nich.

[1] Ing. Tomáš Návrat: Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142869, e-mail: navrat.tomas@centrum.cz

[2] Ing. Zdeněk Florian, CSc.: Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 619 69 Brno tel.: +420-5-41142863; e-mail: florian@umt.fme.vutbr.cz

Kyčelní kloub může být během jednoho roku až miliónkrát zatížen silou dosahující až trojnásobek tíhy člověka. Proto je-li použit kostní cement pro fixaci implantátu ke kosti musí být schopen odolávat těmto proměnným zatížením. Únavové vlastnosti kostního cementu jsou výrazně ovlivněny pórovitostí, ale také v určité míře i molekulovou hmotností, viskozitou a použitým typem cementu.

Pórovitost kostního cementu

Pórovitost významně snižuje pevnost a únavové vlastnosti kostního cementu. Póry a jiné inkluze způsobují koncentrace napětí a iniciují únavové trhliny, což může přejít až v mezní stav porušení.

Vzduchové bubliny (póry) mohou být do cementu vneseny:
- jsou obsaženy již v přípravném prášku během smáčení
- jsou vnesený během míchání
- jsou vnesený během přenosu z míchacího zařízení do aplikačního nástroje

Množství pórů se dá ovlivnit použitým způsobem přípravy kostního cementu. Studie ukazují, že použitím vakuové přípravy se významně redukuje mikroporózita oproti ručnímu míchání, ale není až tak účinné na eliminaci velkých pórů (makropóry). Samozřejmě záleže na použitém způsobu vakuové přípravy.

Homogennost kostního cementu

Homogennost připravované směsi je dána použitým způsobem míchání a toto potom ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti směsi. Při ručním míchání dosáhneme homogenity velmi těžko proto se nahrazuje mícháním mechanickým kdy ruční stěrka je nahrazena rotačním míchadlem v uzavřené misce.

Vakuové míchání v současnosti nabízí následující vlastnosti: ovlivňuje pórovitost (mikro i makro), homogennost směsi (tj. počet nespojených částic), představuje uzavřený způsob míchání, takže chrání před přímým stykem s cementem a před vznikajícími výpary, zajišťuje identické vlastnosti cementu při opakovaných míchání, je dostupné pro vysoko a nízko viskózní cementy.

Způsob aplikace

- ruční
- pod tlakem (eliminuje vznik a vnesení vzduchových bublin, redukuje vrstvení, zajistí kompletní vyplnění kostní dutiny a kostních nerovnosti)

Obecně tedy můžeme konstatovat, že mechanické vlastnosti kostního cementu závisí na použitém typu a přípravě kostního cementu (metody přípravy a dodržení návodu dodaného výrobcem), způsobu aplikace, dále pak jsou ovlivněny povrchovou nepravidelností, krvavými vměstky vnesenými během operace, pórovitostí apod.

Cíl práce

V současné době se celá řada biomechanických problémů v oblasti kyčelního kloubu řeší výpočtovým modelováním metodou konečných prvků. Mezi vstupní hodnoty do výpočtového modelu patří mnohdy i materiálové charakteristiky kostního cementu. Něco málo můžeme získat v literatuře, ale většinou autoři poskytují velmi odlišné hodnoty s velkým rozptylem. Proto cílem této práce bylo změřit modul pružnosti a pevnost dodaných kostních cementů s případným posouzením vlivu různého způsobu míchání. Bohužel zatím jsme neměli k dispozici zařízení na vakuové míchání proto jsou zde uvedeny jen výsledky získané na

vzorcích, které byly připravený ručním mícháním. Pro úplnost jsou uvedeny i výsledky naměřené na vzorcích z biokeramiky (Norian).

Na dvou vzorcích bylo provedeno měření součinitele teplotní roztažnosti, jež nám může posloužit jako vstupní hodnota do výpočtového modelování, ve kterém bychom mohli posoudit vliv rozdílnosti těchto součinitelů u ocelové náhrady a cementové vrstvy na napěťově deformační poměry v kosti apod.

Měřené cementy

Pro měření jsme měli k dispozici čtyři typy kostních cementů:

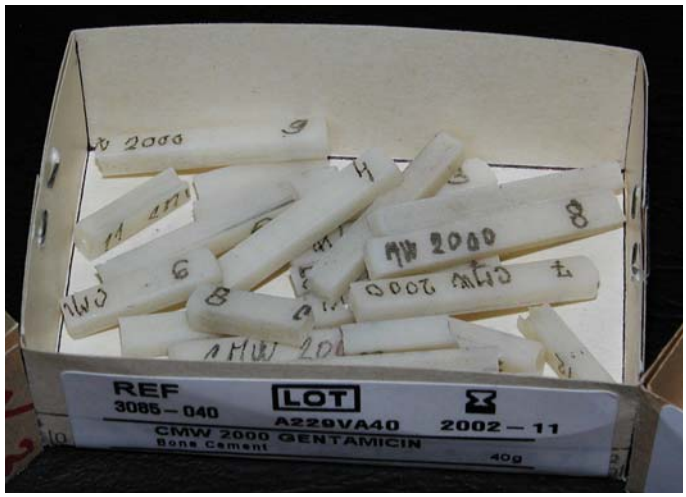
- **ALLOFIX® – G** (antibiotický kostní cement – gentamycin)
- **CMW 1 Gentamicin** (vysoko-viskozní antibiotický kostní cement, určený pro ruční aplikaci, ale může být použit také s vhodnou cementovou pistolí nebo stříkačkou)
- **CMW 2000 Gentamicin** (vysoko-viskozní antibiotický kostní cement, určený pro ruční aplikaci, ale může být použit také s vhodnou cementovou pistolí nebo stříkačkou)
- **Palacos® R with Gentamicin** (radiopaktní kostní cement)

Příprava vzorků

Jednotlivé balení kostních cementů jsou tvořeny práškovou (polymer) a tekutou komponentou (monomer). Prášek pro kostní cement je uložen ve sterilním polyethylenovém sáčku nebo ampuli uvnitř sterilního odtrhnutelného sáčku a nesterilního laminátového sáčku z alobalu. Tekutina pro kostní cement je uložena ve sterilním ampulce uvnitř balení. Z hlediska složení je v práškové složce nejvíce obsažen polymetyl metakrylát, kapalné složce pak metyl metakrylát.



Obr.1 Přípravek pro přípravu vzorků



Obr.2 Hotové vzorky (vzorky až po zkouškách)

Sáček s práškem se otevře a celý obsah se vysype do vhodné čisté, suché směšovací nádoby. Ampulka s tekutinou se otevře tak, aby nedošlo ke kontaminaci kostního cementu úlomky skla a celý její obsah se vylije rovnoměrně na prášek ve směšovací nádobě. Cement se důkladně promíchá tak, aby se minimalizovalo množství vzduchu v cementu, časově dle návodu pro příslušný typ cementu. U jednotlivých cementů se postup přípravy v některých detailech liší. Při smísení práškového polymeru a tekutého monomeru dojde k iniciaci polymerizací monomeru, který se váže na již vzniklé částice polymeru. S postupující

polymerizací monomeru se formuje pastovitá hmota, která po několika minutách ztuhne. Polymerizace je exotermní reakce.

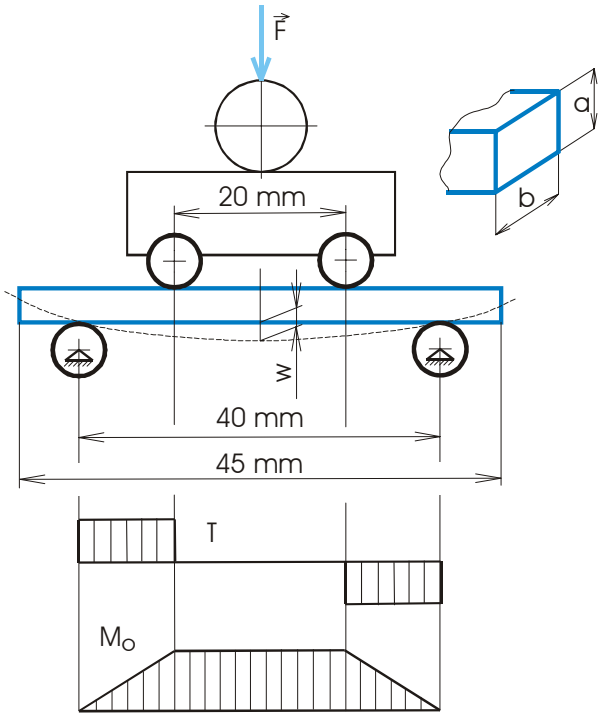
Takto připravenou směsí jsme vyplnili dutiny v přípravku (obr.1). Plnění jsem prováděli buď ručně nebo pomocí stříkačky. Po vyplnění jsme přípravek sestavili utažením šroubů tak, abychom dostali vzorky příslušných rozměrů. Po zatvrdnutí byl přípravek rozebrán, jednotlivé vzorky očištěny a popsány.

Rozměry vzorku: vyška vzorku: a = 3 mm, šířka vzorku: b = 4 mm, délka vzorku: l = 45 mm

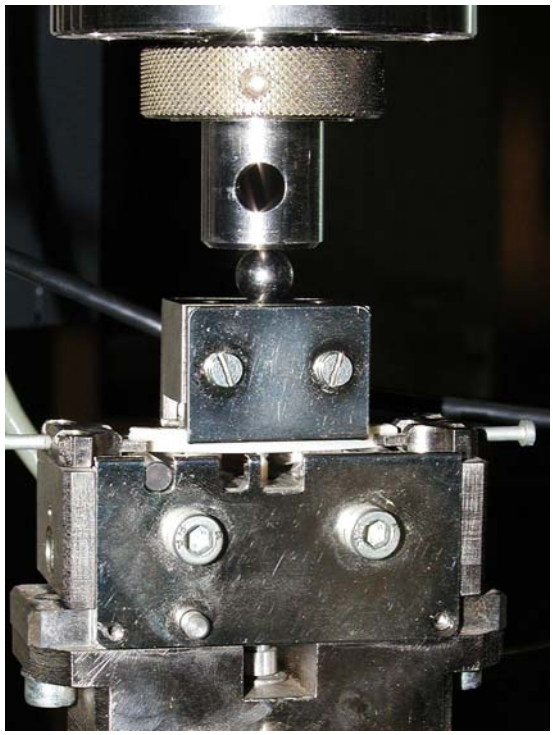
Měřené veličiny

Měření modulu pružnosti E a pevnosti R_m u vzorků z kostního cementu

Tyto veličiny byly měřeny u všech čtyř kostních cementů uvedených v předchozím. Jednotlivé vzorky byly zatěžovány čtyřbodovým ohybem (obr.3 a obr.4) na zkušebním stroji ZWICK. Během měření byla měřena síla na siloměrné hlavě s rozsahem 100 N a průhyb vzorku speciálním snímačem s přesností 0,1 μm a rozsahem 1 mm. Vzhledem k tomu, že tento rozsah nestačil na porušení vzorku bylo měření rozděleno na dvě fáze. V první fázi jsme ze závislosti $F - w$ (průhyb w – měřen přesným snímačem) určili modul pružnosti (rychlost zatěžování 0,5 mm/min) v druhé fázi jsem odstranili hrot přesného snímače (posuv odečítali z méně přesného příčníku), zatěžovali vzorek až do lomu a vyhodnocovali pevnost. Rozměry vzorku byly měřeny digitálním posuvným měřítkem.



Obr.3 Schéma zatěžování čtyřbodovým ohybem



Obr.4 Pohled na zkušební zařízení

Zkušební stroj

Zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji ZWICK Z 020-TND. Je to mechanický, počítačem řízený stroj, pro zkoušky jak v tlakové, tak v tahové oblasti. Maximální hodnota zatížení je 20 kN. Stroj je dále vybaven snímačem prodloužení Multi-sens s přesností 0,1 mikrometru, torzní hlavou 20Nm atd. Počítačové řízení umožňuje volbu zátěžného cyklu. K

vybavení stroje patří systém zpětné vazby, která umožňuje nastavit i velmi malé rychlosti zatěžování. Pro naše měření byla použita siloměrná měřící hlava s rozsahem do 100N.

Měření modulu pružnosti E a pevnosti R_m u vzorku vyrobených z NORIANU

Čtyřbodovému a tříbodovému ohybu byly podrobeny i vzorky vyrobené z biokeramiky (Norian).

Norian je bioaktivní keramika, která se používá pro stabilizaci zborcených obratlů po úrazech (vertebroplastika). Vzhledem k tomu, že se provádí i výpočtové modelování deformačně napjatostních poměrů degenerovaných páteřních prvků i s aplikovanou biokeramikou, je potřeba znát jeho mechanické vlastnosti.

Měření součinitele tepelné roztažnosti

Vzorek kostního cementu byl vystaven různým teplotám a byla sledována délková změna. Závislost mezi relativní délkovou změnou a teplotou byl vynesen do grafu $dL/L_0 - T$ z něhož pak byl podle vztahu $\alpha_{T_1}^{T_2} = \frac{dL / L_0}{\Delta T}$ vypočten součinitel teplotní roztažnosti.

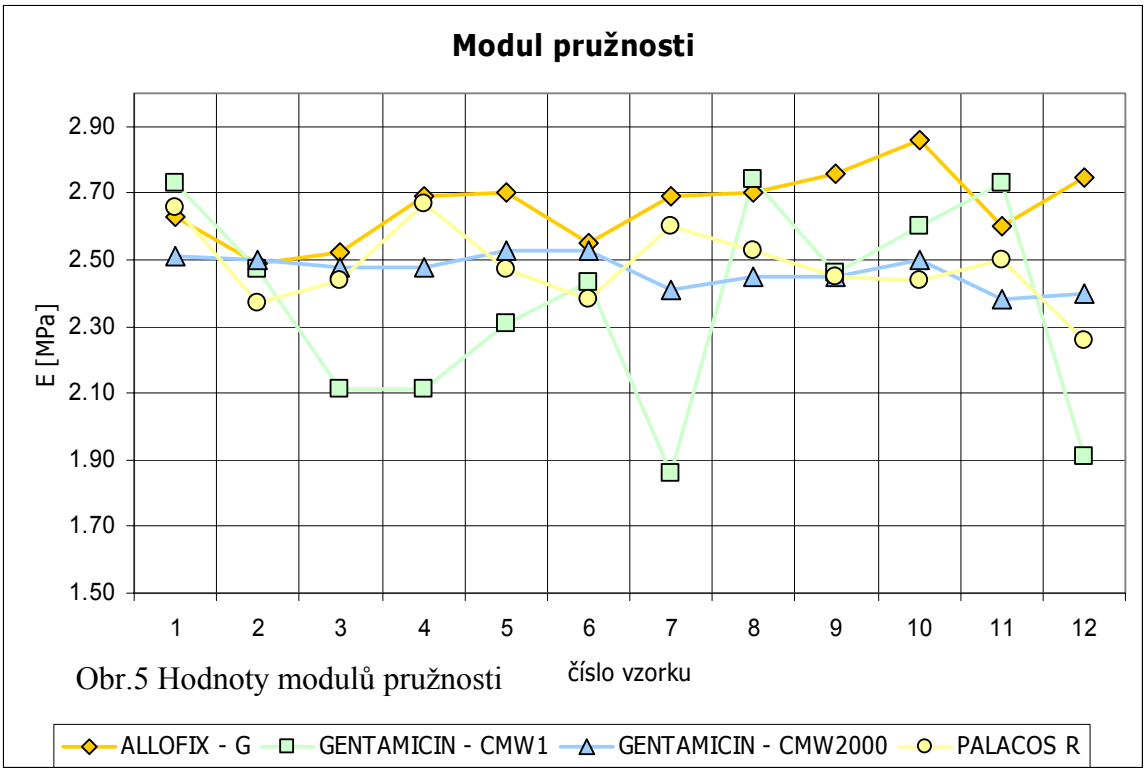
Kde: L_0 – je původní délka před zkouškou, L – délka vzorku při určité teplotě, $dL = L - L_0$, $\Delta T = T_2 - T_1$, T_1 a T_2 jsou dvě zvolené teploty.

Měření této veličiny nebylo provedeno na našem pracovišti, proto zde nejsou uvedeny další podrobnosti.

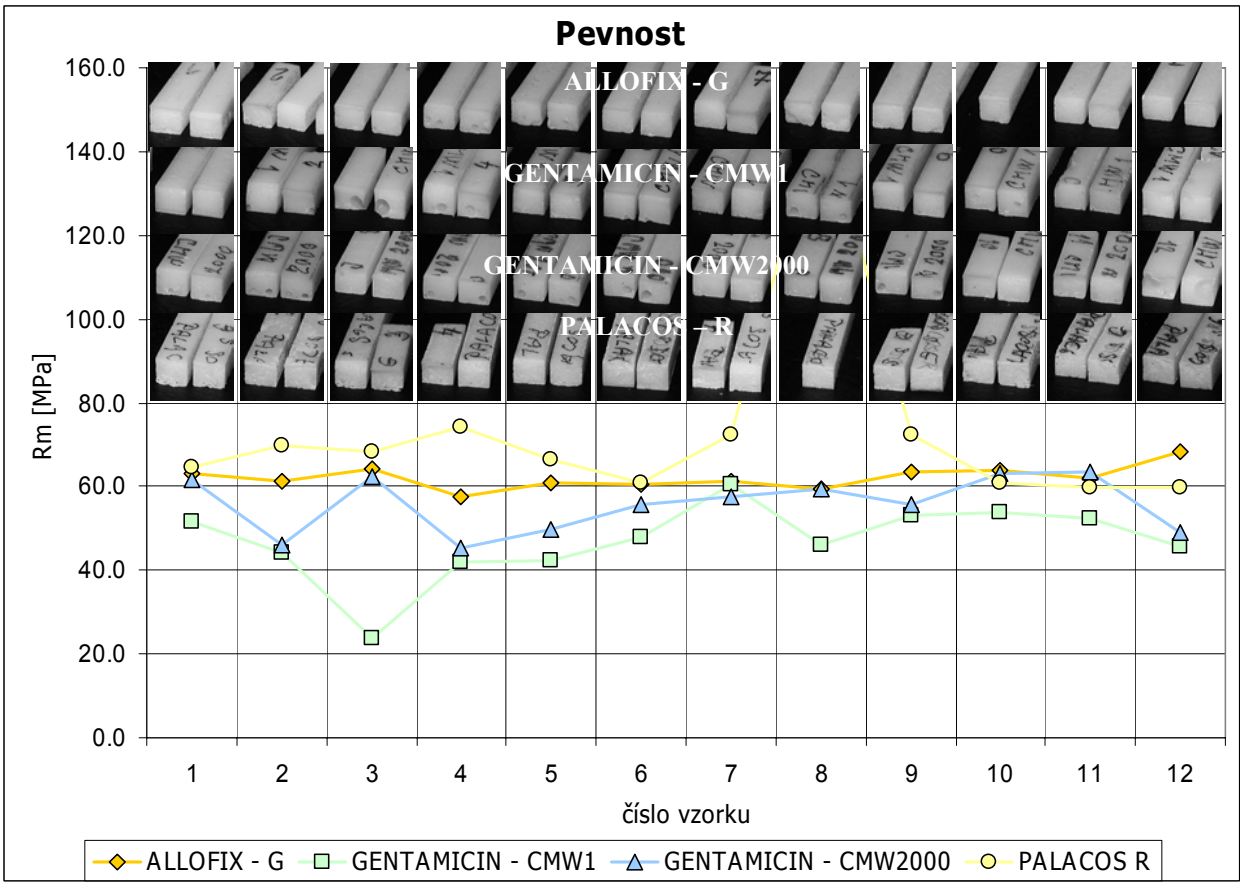
Výsledky měření

Tab.1 Modul pružnosti a pevnost pro vzorky z kostních cementů

	ALLOFIX - G		GENTAMICIN - CMW1		GENTAMICIN - CMW2000		PALACOS R	
Vzorek	E modul [GPa]	R_m [MPa]	E modul [GPa]	R_m [MPa]	E modul [GPa]	R_m [MPa]	E modul [GPa]	R_m [MPa]
1	2,63	62,93	2,73	51,76	2,51	61,72	2,66	64,52
2	2,49	61,08	2,47	44,06	2,50	45,96	2,37	69,90
3	2,52	64,04	2,11	23,67	2,48	62,55	2,44	68,28
4	2,69	57,45	2,11	41,93	2,48	45,42	2,67	74,29
5	2,70	60,71	2,31	42,43	2,53	49,59	2,47	66,48
6	2,55	60,51	2,43	47,87	2,53	55,74	2,38	60,74
7	2,69	61,26	1,86	60,46	2,41	57,62	2,60	72,55
8	2,70	59,47	2,74	45,91	2,45	59,46	2,53	-
9	2,76	63,48	2,46	53,22	2,45	55,81	2,45	72,49
10	2,86	63,75	2,60	53,78	2,50	62,95	2,44	60,87
11	2,60	62,12	2,73	52,22	2,38	63,51	2,50	59,86
12	2,75	68,32	1,91	45,84	2,40	48,93	2,26	59,87
průměr	2,66	62,09	2,37	46,93	2,47	55,77	2,48	66,35
směrodatná odchylka	0,10	2,62	0,30	8,75	0,05	6,44	0,12	5,26



Obr.5 Hodnoty modulů pružnosti



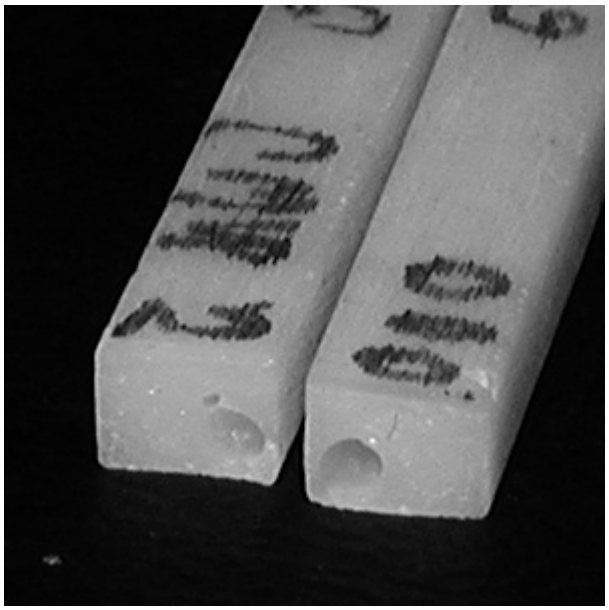
Obr.6 Hodnoty pevnosti s zobrazením lomových ploch jednotlivých vzorků



Obr.7 ALLOFIX-G (detail lomové plochy)



Obr.8 CMW1 (detail lomové plochy)



Obr.9 CMW2000 (detail lomové plochy)



Obr.10 PALACOS (detail lomové plochy)

Tab.2 Modul pružnosti a pevnost pro vzorky z Norianu

vzorek	tříbodový ohyb		vzorek	čtyřbodový ohyb	
	E [MPa]	R_m [MPa]		E [MPa]	R_m [MPa]
1	5542,96	9,14	1	4480,38	5,78
2	5745,44	9,63	2	3596,42	2,74
3	-	-	3	4598,78	5,91
průměrná hodnota	5644,2	9,39	průměrná hodnota	4225,19	4,81

Tab.3 Součinitel teplotní roztažnosti

	Součinitel teplotní roztažnosti
Vzorek 1 – cement	$\alpha_{30}^{50} = 9{,}795 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$
Vzorek 2 – cement	$\alpha_{35}^{55} = 9{,}895 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$
Ocel	$\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$

Kostní cement dosahuje 8krát větší hodnotu součinitele teplotní roztažnosti než ocel. Zda tato skutečnost bude nějakým významným způsoben ovlivňovat napěťově deformační poměry v kyčelním kloubu při určitých teplotních změnách bude předmětem dalšího zkoumání.

Závěr

Z průběhu modulu pružnosti a pevnosti vyplývá následující:

Největší průměrná hodnota modulu pružnosti je dosažena u cementu ALLOFIX. Největší průměrná hodnota pevnosti je dosažena u cementu PALACOS. Nejmenší rozptyl hodnot pevnosti nabízí cement ALLOFIX, naopak největší rozptyl poskytuje cement CMW1.

Při pohledu na lomové plochy zjistíme, že u cementu ALLOFIX jsou viditelné makropóry (vzduchové bubliny obr.6) u pěti vzorků, u cementu CMW1 a CMW2000 u deseti vzorků a u cementu PALACOS u tří vzorků (velikost makropórů byla u tohoto cementu podstatně menší oproti cementům předchozím). Porovnáním obr.6 až obr.10 můžeme říci, že v cementech ALLOFIX, CMW1 a CMW2000 se převážne vyskytují makropóry, kdežto u cementu PALACOS spíše mikropóry. Makropóry (vzduchové bubliny) způsobují koncentraci napětí a iniciují únavové trhliny, což se projeví ve snížení hodnoty pevnosti. A tato skutečnost, jak je také možno vidět na naměřených hodnotách, vysvětluje největší pevnost cementu PALACOS.

Všechny zde uvedené naměřené výsledky náleží kostním cementům připravovaným ručním mícháním. Na lomových plochách jsou velmi často vidět vzduchové bubliny (makropóry), které jsou do cementu vneseny právě ručním mícháním. Proto připravujeme také měření na vzorcích, jež budou vyrobené z cementů připravených vakuovým mícháním, což by mělo snížit množství těchto nežádoucích makro i mikropórů.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory GA ČR 101/01/0974 a MŠMT MSM262100024.

Literatura

[1] Florian, Z., Kotek, V., Wendsche, P.: Lumbar Vertebra with Norian, Engineering mechanics 2001, Svratka, 73-74

[2] Instrukční leták pro lékaře, pro kostní cement CMW 1, CMW 2000, Allofix-G, Palacos-R

[3] http://www.bonecement.com, aktualizace 16.4.2003