

# FRACTURE OF CERAMICS UNDER IMPACT LOADING. LOM KERAMIKY PŘI RÁZOVÉM ZATĚŽOVÁNÍ.

Jaroslav Buchar,<sup>1</sup> Milan Forejt<sup>2</sup>, Stanislav Rolc<sup>3</sup>

*This paper studies the dynamic behavior of  $Al_2O_3$  specimens by using of the Hopkinson Split Pressure Bar method. The method is also used in form of the Brazilian test when the tensile loading is achieved. Experimental results show the increase in the dynamic strength with the increasing strain rate. The validity of the obtained results is further confirmed by the numerical simulation of the Brazilian test using of the finite element code LS DYNA 3D.*

## **Keywords**

Brasil test; ceramics; dynamic strength; strain rate; numerical simulation

## **Úvod.**

V současnosti pozorujeme stále výraznější uplatnění keramiky při konstrukci balistických ochran, zejména jako součásti složených pancířů, keramika – kov, keramika – polymer, resp. obecně keramika – kompozit. Ukazuje se totiž, že použití keramiky vede jak k růstu balistické odolnosti, tak k podstatné redukci hmotnosti. V posledních deseti letech byly věnována značná pozornost keramikám :  $Al_2O_3$ , SiC, AlN,  $Si_3N_4$  a  $TiB_2$ . Byly rovněž zkoumány jejich mechanické vlastnosti při rázovém zatěžování (Coscolluela et al 1991) . Pro toto studium je používáno řady metod, zejména pak metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče a metoda rázu desek (Bless et al. 1990) . Ukazuje se, že mechanické vlastnosti keramických materiálů , stejně jak jiných typů křehkých látek, jsou poměrně citlivé na rychlost deformace a na tlaku. S růstem rychlosti deformace roste dynamická mez kluzu a mez pevnosti (Bourne et al,1994,1995) . V rámci dané práce jsme se zaměřili na výzkum deformačního a lomového chování keramiky pomocí metody Hopkinsonovy měrné dělené tyče. Při použití této metody je vzorek zkoumaného materiálu zatěžován převážně v tlaku. Pro dosažení tahového zatěžování je pak možné použít uspořádání tzv. Brazílského testu (Rodriguez et al.1994, Galvez et al. 1997). V rámci našich výzkumů jsme se zaměřili jak na tlakové, tak na tahové zatěžování. Získané hodnoty meze pevnosti byly srovnávány s pevnostmi stanovenými při statickém zatěžování.

## **Materiál a experimentální postup.**

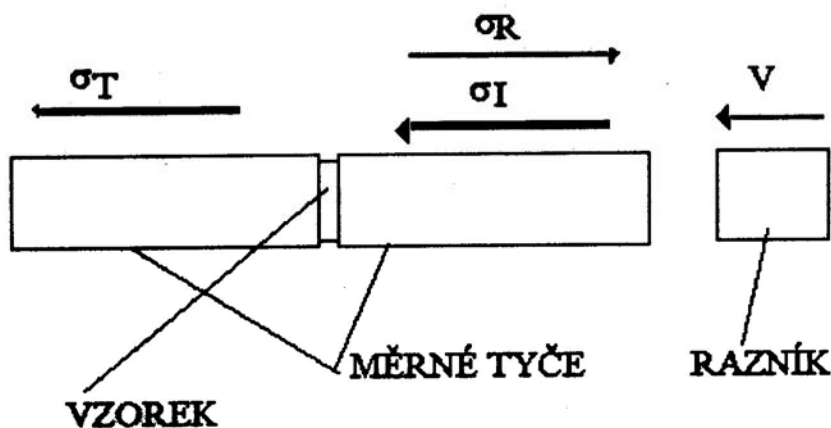
Její schéma je znázorněno na obr1. Vzorek ve tvaru válečku o délce  $l$  je umístěn mezi dvě tyče kruhového průřezu. Na konci jedné z tyčí je rázem razníku urychleném na rychlost  $v_0$  iniciován napěťový puls  $\sigma_I(t)$ . Po dopadu na vzorek se tento puls částečně odráží zpět do první tyče  $\sigma_R(t)$  a částečně se přeneso do druhé tyče – puls  $\sigma_T(t)$ . Znalost těchto pulsů umožňuje stanovit časový průběh deformační rychlosti ve vzorku :

---

<sup>1</sup> Prof.Ing.Jaroslav Buchar,DrSc. : AF, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita, Zemědělská 1, 6130 Brno, tel.: +420545132120, e – mail : [buchar@mendelu.cz](mailto:buchar@mendelu.cz).

<sup>2</sup> Prof.Ing.Milan Forejt,CSc., Fakulta strojní , VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69, Brno, tel.: +420541142623

<sup>3</sup> Doc.Ing.Stanislav Rolc,CSc., Vojenský technický ústav ochrany v Brně, Veslařská 230 , 637 00 Brno, e – mail :rolc@vtuo.cz



Obr. 1. Schéma metody Hopkinsonovy měrné dělené tyče.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{Zl} \{ \sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t) \}$$

kde  $Z$  je měrná akustická impedance materiálu tyče (součin hustoty a rychlosti podélné elastické vlny). Integrací pak dostaneme časový průběh deformace  $\varepsilon(t)$  vzorku a pro napětí ve vzorku  $\sigma$  platí :

$$\sigma(t) = \sigma_T(t) \approx \sigma_I(t) + \sigma_R(t)$$

Na obr. 2. je vynesena experimentální záznam napěťových pulsů. Doba trvání dopadajícího napěťového pulsu je cca  $\lambda = 28 \mu\text{s}$ . Pro dopadové pulsy je dále vhodné stanovit impuls  $I_I$  a energie nesená pulsem  $w_I$  :

$$I_I = \int_0^{\lambda} \sigma_I(t) dt \quad w_I = \frac{1}{Z} \int_0^{\lambda} \sigma_I^2(t) dt$$

Tento test byl proveden pro vzorky keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které měly tvar válce o poloměru 14 mm, tloušťka vzorků byla 7 mm. Průměrný rozměr zrna byl  $3.2 \mu\text{m}$ , hustota  $\rho = 3877 \text{ kg/m}^3$ , Youngův modul  $E = 366 \text{ GPa}$ , Poissonova konstanta  $\nu = 0.16$ .

### Experimentální výsledky.

Vzorky byly zatěžovány pomocí Hopkinsonovy měrné dělené tyče, která sestává ze dvou ocelových tyčí o průměru 15 mm. Napěťový puls byl buzen nárazem ocelového válečku o délce 20 mm, stejného průměru jako měrné tyče. Doba trvání dopadajícího napěťového pulsu je cca  $\lambda = 28 \mu\text{s}$  a prakticky nezávisí na dopadové rychlosti projektilu. Parametry zatěžujících napěťových pulsů jsou obsaženy v Tabulce 1, kde  $\sigma_{Im}$  je maximální napětí přenášené pulsem.

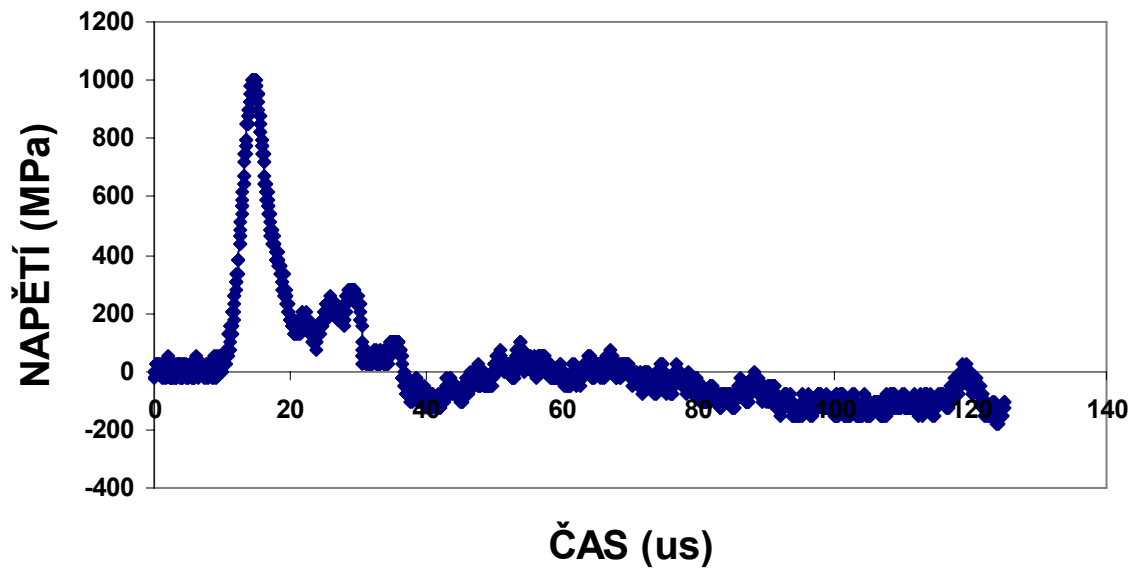
Tabulka 1. Podmínky zatěžování vzorků keramiky pomocí metody HMDT. Tlaková zkouška.

Vzorek	$V_o$ (m/s)	$\sigma_{Im}$ (MPa)	$I_I$ (Pas)	$w_I$ ( $\text{Jm}^{-2}$ )
KERAMIKA 1	39,12	1004	9820	138280
KERAMIKA 2	40,73	1047	10223	153450
KERAMIKA 3	49,75	1279	12487	252290

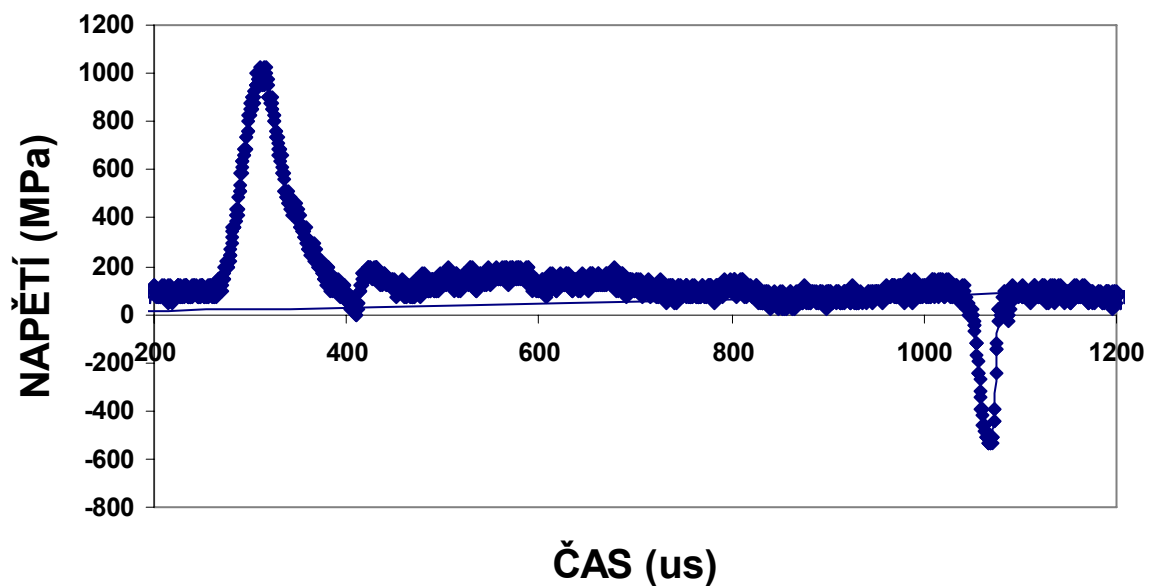
KERAMIKA 4	54,50	1405	13680	313820
KERAMIKA 5	59,34	1522	14910	383180

Z výsledků se ukazuje, že vzorky jsou neporušeny, nebyly pozorovány ani vnitřní trhliny při použití optického mikroskopu (zvětšení 200 x) . To znamená, že pevnost v tlaku daných materiálů je vyšší jak 1400 – 1500 MPa.

### KERAMIKA 1 - 1.stopa



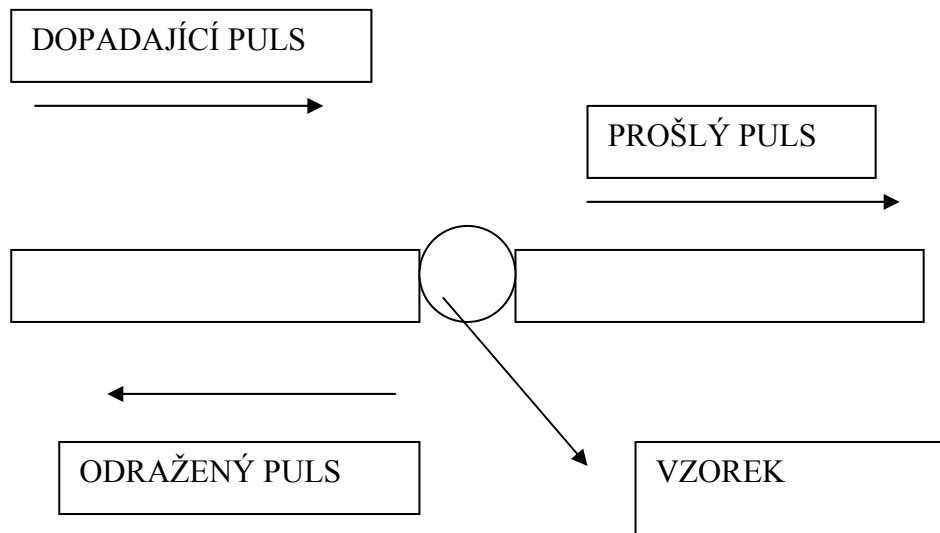
### KERAMIKA 1 2.STOPA



Obr.2. Příklad experimentálního záznamu napěťových pulsů.

Z rozboru experimentálních záznamů vyplývá, že prakticky nedochází k odrazu pulsu a prošlý puls je téměř identický s pulsem dopadajícím.

Jak již bylo uvedeno, je pro zkoušení mechanických vlastností křehkých materiálů často užíváno tzv. Bratilského testu. Schéma tohoto experimentu, který je nejčastěji realizován pro statické zatěžování je pro dynamické zatěžování znázorněn na obr.3.



Obr.3. Schéma Brazilského testu.

Porovnání obr.1 a obr.2 ukazuje, že jediný rozdíl mezi klasickou metodou Hopkinsonova testu a brazilského testu je uložení vzorku. V případě Brazilského testu dochází k vývoji tahového napětí a to ve směru kolmém na rovinu procházející osou tyčí a osou vzorku. Klasická teorie Hopkinsonova testu, která vychází z předpokladu o rovnováze napětí ve vzorku, vede k závěru, že toto napětí je v každém bodě roviny stejné a má velikost :

$$\sigma = \frac{2P}{\pi WD}$$

kde P je síla přenesená vzorkem do druhé tyče, W je tloušťka vzorku a D je jeho průměr. Pro sílu P platí :

$$P = A\sigma_r(t)$$

kde A je průřez měrné tyče. Pro rychlost deformace pak dostaneme vztah :

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

Mez pevnosti  $\sigma_c$  je stanovena pro sílu P, pro kterou ještě nedojde k lomu vzorku. Oprávněnost tohoto postupu je třeba ověřit numerickými výpočty.

Podmínky zatěžování vzorků pomocí Brazilského testu jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2. Podmínky zatěžování vzorků keramiky pomocí metody HMDT. Brazilský test.

Vzorek	$V_o$ (m/s)	$\sigma_{Im}$ (MPa)	$I_I$ (Pas)	$w_I$ (Jm <sup>-2</sup> )
KERAMIKA 6	26,04	665	6530	42820
KERAMIKA 7	13,94	356	3502	10265
KERAMIKA 8	13,79	342	3410	10115
KERAMIKA 9	25,97	647	6518	42380
KERAMIKA 10	25,03	645	6285	37520

Na následujícím obrázku je znázorněno poškození vzorku



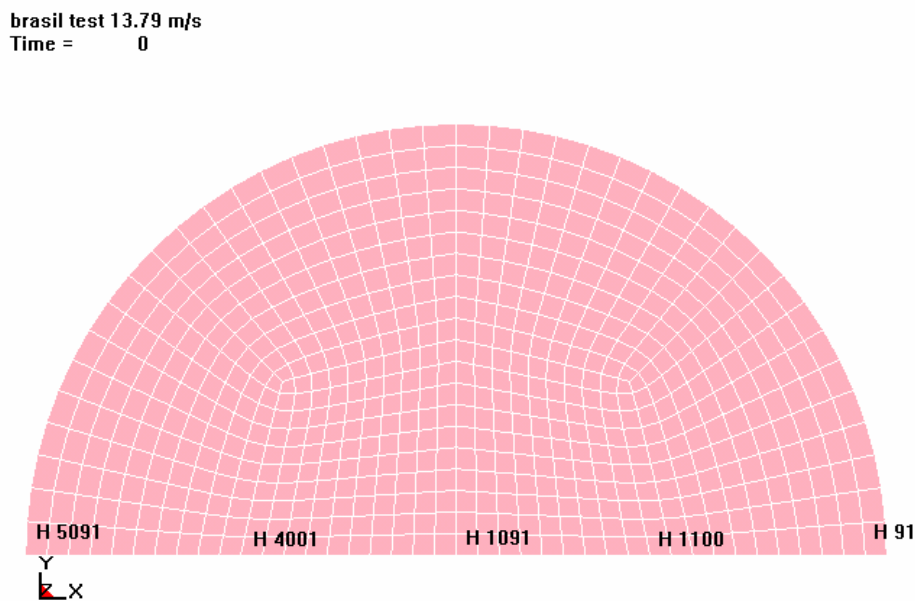
Obr.4. Vzorek KERAMIKA 6.

Pokud provedeme analýzu výsledků podle výše uvedených vztahů, zjistíme, že dynamická mez pevnosti  $\sigma_c$  má hodnotu 362 MPa při rychlosti deformace cca  $83 \text{ s}^{-1}$ . Při statickém zatěžování dostaneme mez pevnosti 185 MPa. Rychlost deformace je  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Je zřejmé, že mez pevnosti vzroste vlivem zvýšení rychlosti deformace takřka na dvojnásobek své hodnoty při statickém zatěžování. Současně je však podstatně nižší, než dynamická mez pevnosti v tahu.

## Numerická simulace

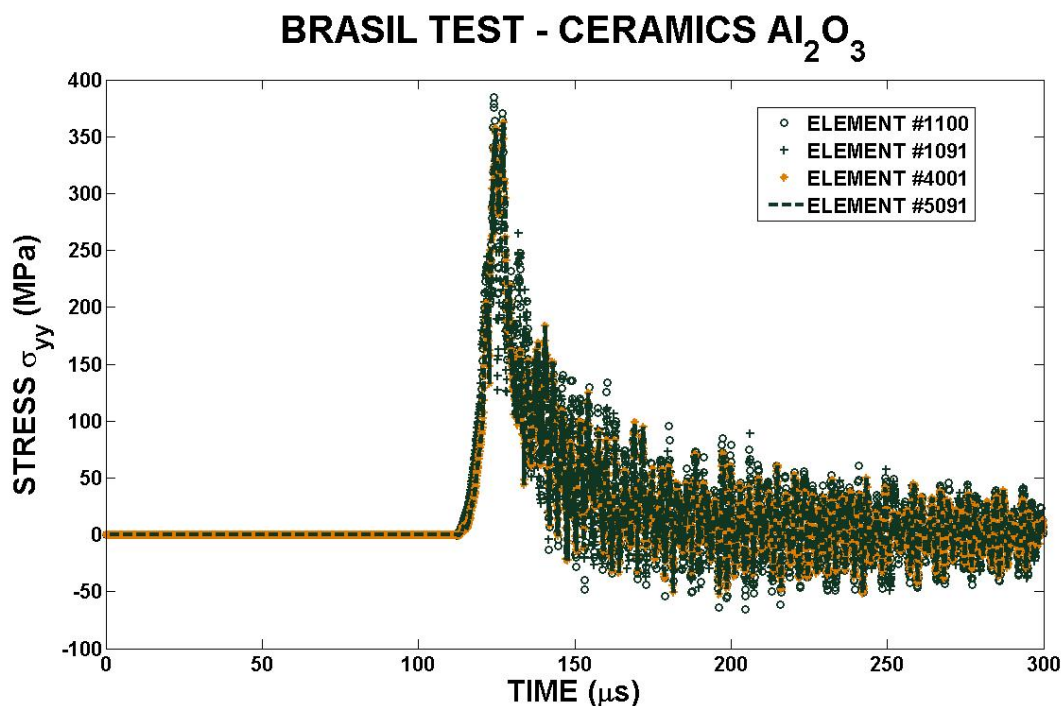
Pro numerickou simulaci byl zvolen vzorek, kdy rychlost razníku byla 13.79 m/s. Jak ukazují výsledky, pro tuto rychlost a tím pro odpovídající napěťový puls ještě nedojde ke vzniku lomového poškození vzorku. Protože nebyl pozorován vznik trvalé deformace, je materiál vzorku považován za lineárně elastický, jehož vlastnosti plně určuje hustota, Youngův modul a Poissonova konstanta. Pro numerickou simulaci byl použit program LS DYNA 3D založený na metodě konečných prvků.

Model obsahoval celkem 190 320 prvků a 230840 uzlů. Výpočty byly provedeny v rovině symetrie vzorku a to v prvcích znázorněných na obr.5.



Obr.5. Označení prvků na rovině symetrie vzorku. Vzorek je zatěžován směrem od prvku H 91.

Z výpočtů byly stanoveny zejména průběhy hlavních napětí ve směru osy y, tzn. ve směru, kde dochází k vývoji tahového napětí. Průběhy těchto napětí jsou uvedeny na obr.6



. Obr.6. Průběhy napětí ve směru osy y.

Maximum tahového napětí je cca 385 MPa (průměr ze všech prvků). Tato hodnota je poněkud vyšší, než dynamická mez pevnosti stanovená podle vztahu z minulé kapitoly. Jde o poněkud obrácený výsledek, než který byl získán v práci Rena et al. (2004).

## Závěr.

Z výsledku dané práce vyplývá, že metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče umožňuje stanovit jak mez pevnosti v tlaku, tak mez pevnosti v tahu. Jak je typické pro veškeré křehké materiály je mez pevnosti v tahu výrazně menší jak mez pevnosti v tlaku. Dynamická mez pevnosti je nejméně dvojnásobná než mez pevnosti stanovená při statickém zatěžování. Numerická simulace pak ukazuje, že stávající vztahy dávají nižší mez pevnosti, než vyplývá z numerického výpočtu. Pro další ověření získaných poznatků bude zapotřebí dalších testů. Jedním z nich je např. Taylorův test. Jeho realizace bude náplní dalších prací.

## Literatura.

- Bless, S.J., Brar, N.S. and Rosenberg, Z. (1990) "Failure of ceramic and glass rods under dynamic compression", in "Shock Compression of Condensed Matter - 1989", ed. S.C. Schmidt, J.N. Johnson and L.W. Davidson, publ. Amsterdam, Elsevier: pp. 939-
- Bourne, N.K., Rosenberg, Z., Crouch, I.G. and Field, J.E. (1994) "Microstructural variations in seven aluminas and their effect on impact response", in "High Pressure Science and Technology 1993", ed. S.C. Schmidt, J.W. Shaner, G.A. Samara and M. Ross, publ. New York, American Institute of Physics: pp. 769-772.
- Bourne, N.K., Rosenberg, Z. and Field, J.E. (1995) "High-speed photography of compressive failure waves in glasses" *J. Appl. Phys.* **78** 3736-3739

- Coscolluela, A., Cagnoux, J. and Collombet, F. (1991) "Uniaxial compression of alumina: structure, microstructure and strain rate" *J. Phys. IV France* **1 Colloq. C3 (DYMAT 91)** 109-116
- Rodriguez J, Navarro C, Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. *J Phys IV* 1994;4(C8):101–6.
- Galvez F, Rodriguez J, Sanchez-Galvez V. Tensile measurements of ceramic materials at high rates of strain. *J Phys IV* 1997;C3:151–157.
- Rena C. Yu, Gonzalo Ruiz, Anna Pandol. Numerical Investigation on the dynamic behaviour of advanced ceramics. *Engineering Fracture Mechanics* 71 (2004): 897 – 911.