

NUMERICKÁ A EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA DEFORMAČNÉHO A NAPÄŤOVÉHO STAVU ZVÁRANÝCH SPOJOV

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DEFORMATIONAL AND STRESS STATE OF WELDED JOINT

Pavel ÉLESZTÓS, Vladimír VOŠTIAR¹, Ľuboš MRÁZ²

Abstrakt

Predikcia zostatkovej životnosti aj v súčasnosti je mimoriadne vážnym problémom strojových zariadení a konštrukcií, pričom nesporne dôležitú úlohu zohrávajú zostatkové napäťia vznikajúce pri zváraní. Príspevok je zameraný na numerickú simuláciu zvárania a experimentálnemu určovaniu výsledníc vnútorných síl a vznikajúcich deformácií pri zváraní pri rôznych tuhostiach uloženia. Základom je aplikácia numerického Goldakovho modelu, ktorý bol nastavený pomocou parametrov tak, aby sa výsledky termálnej analýzy zhodovali s experimentálne nameranými hodnotami teplôt meranými pomocou termočlánkov, pri dodržaní základných parametrov zvárania (napätie, prúd, tepelný príkon). Teplotná história a prebiehajúce fázové transformácie ovplyvnili výsledný vývoj deformácií a reakcie boli vypočítané numerickou simuláciou a porovnávané s experimentálnymi výsledkami získané skúškou VUZ-ERC.

Kľúčové slová: simulácia zvárania, experimentálna analýza.

Abstract

Remaining lifetime prediction of mechanical devices and constructions represent a serious problem in contemporary mechanical engineering, in which residual stress state initiated with welding has to be taken into consideration. This article is focusing on the numerical simulation of a welding process and the experimental determination of resultant internal forces and deformations of a solid body fixed with various stiffness restraints during welding. The calculation is based on the application of Goldakov's numerical model with the use of parameters in such a way, that the thermal analysis results are equal to the experimentally measured temperature values coming from temperature gauges, while keeping the same basic parameters of welding (voltage, electric current, electric power) in both the numerical simulation and the experiment. The thermal history and the ongoing phase transformations affected the final deformation state and the reactions, which were calculated using numerical analysis and then compared with the experimental results coming from the VUZ-ERC test.

Keywords: welding simulation, experimental analysis.

ÚVOD

Práca je venovaná analýze zvyškových napäťí vznikajúcich po zváraní. Riešená úloha bola rozdelená na dve etapy. V prvej etape sme nastavili parametre numerickej simulácie zvárania na základe experimentálne vykonaných skúšok. Takto získané parametre sme následne použili

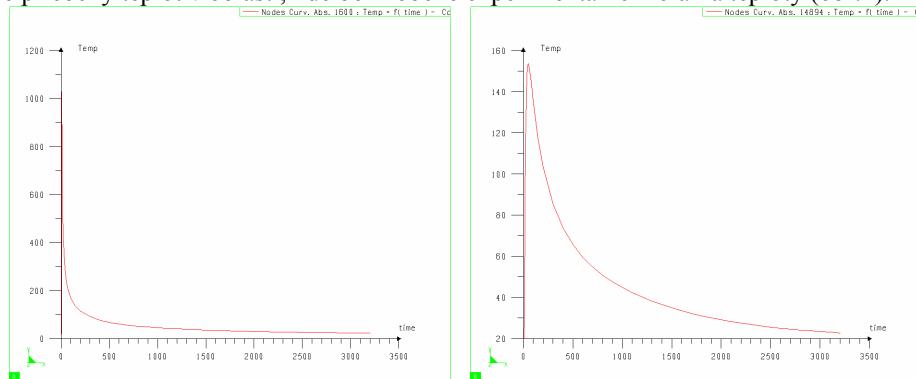
¹ doc. Ing. Pavel ÉLESZTÓS, CSc., Ing. Vladimír VOŠTIAR, KTM SjF STU Bratislava,
pavel.elesztos@stuba.sk, vladimir.vostiar@stuba.sk

² Ing. Ľuboš MRÁZ, CSc., VÚZ Bratislava, mraz.lubos@vuz.sk
Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SjF TU v Košiciach,
frantisek.trebuna@tuke.sk

v druhej etape, teda pri samotnej numerickej simulácii zvárania. V tejto časti úlohy sme analyzovali vplyv rozdielnej medze klzu materiálu na výsledný napäťovo-deformačný stav. Okrem merania priebehu teplôt (na nastavenie tepelného zdroja pri simulácii) sme v špeciálnom prípravku merali (tenzometricky) výslednice vnútorných síl v smere kolmom na zvar.

NASTAVENIE PARAMETROV ZVÁRANIA

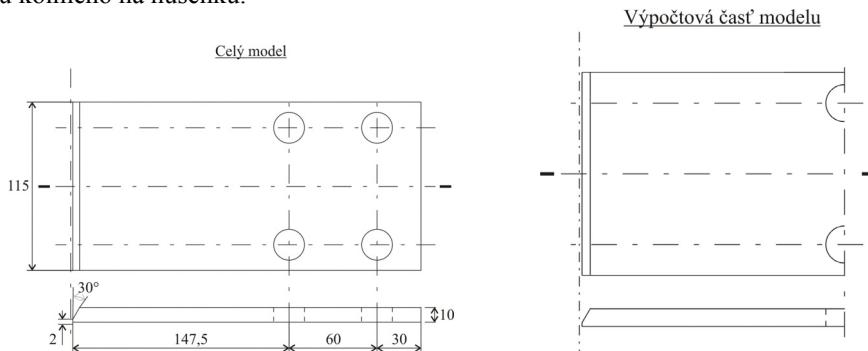
V rámci numerického riešenia problematiky bolo potrebné na základe získaných priebehov teplôt z experimentov nastaviť rozmery Goldakovho modelu (modelu opisujúceho distribúciu tepelného toku pri simulácii zvárania). Výsledný stav po nastavení všetkých parametrov modelu a s použitím základných parametrov zvárania (viď. nižšie), sme získali nasledujúce priebehy teplôt v oblasti, kde boli robené experimentálne merania teploty (obr.1).



Obr.1 Priebeh teploty

ANALÝZA NA 2D MODELMI

Geometrický model jednovrstvového a dvojvrstvového zvaru bol vyhotovený na základe skutočných vzoriek. 2D výpočtový model bol vytvorený ako rez 3D vzorky rovinou prechádzajúcou stredom v smere kolmom na pohyb zdroja, obr.2. Obe strany vzorky boli štyrmi skrutkami uchytené do rámu, na ktorom sme tenzometricky merali výslednice vznikajúcich napäti do smeru kolmého na húsenku.



Obr.2 Geometrický model vzorky

Riešenie sme robili pomocou programu SYSWELD, ktorý je založený na metóde konečných prvkov. Pomocou neho sme vyhotovili konečnoprvkový model samotného zvaru. V takto vytvorenom modeli sú modelované aj elementy prídavného materiálu, pritom reálny proces zvárania (teda postupné pridávanie materiálu), je zabezpečené aktiváciou resp. deaktiváciou príslušných elementov.

VÝSLEDKY ANALÝZY JEDNOVRSTVOVÉHO ZVARU (350MPA, 235MPA, 700MPA)

Všetky prípady zvarov boli simulované pre alternatívnu absolútne tuhého uchytenia na okrajoch zváraného materiálu (obr. 3). Jedná sa o jednovrstvový zvar. Výsledný deformačno-napäťový stav bol sledovaný počas samotného procesu zvárania, ale aj počas chladnutia na teplotu okolia.



Obr.3 Delenie vzorky na prvky a okrajové podmienky

Na obr.4 môžeme sledovať deformačný stav pre materiály rôznej pevnosti po vychladnutí zvaru na teplotu okolia. Z obrázku je zrejmé, že znižovaním medze pevnosti výsledná deformácia narastá. Zo zadaných väzieb vyplýva, že maximálne hodnoty posunutí (deformácií) musia nastat' v miestach koreňa zvaru (symetria úlohy).

Medza pevnosti 350MPa

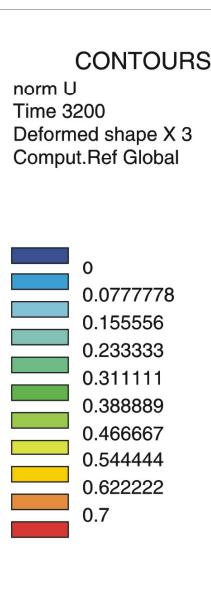
Min = 0
Max = 0.639377

Medza pevnosti 235MPa

Min = 0
Max = 0.645767

Medza pevnosti 700MPa

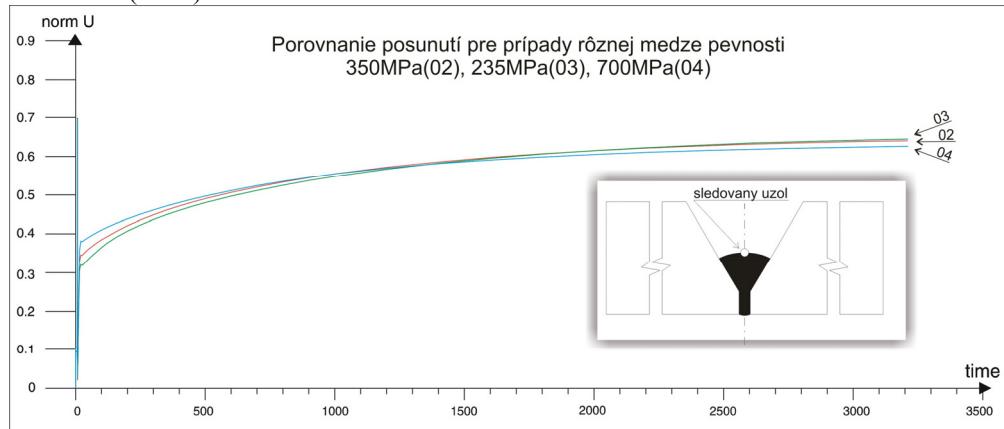
Min = 0.000255
Max = 0.626918



Obr.4 Priebeh výsledných posunutí

Na grafe sú uvedené závislosti výsledných posunutí uzlov v priebehu kladenia zvaru, až po úplné vychladnutie na teplotu okolia.

Zmena medze klzu použitých materiálov nemá výrazný vplyv na výsledný deformačný stav, čo dokumentuje aj to, že rozdiel medzi najnižšou a najvyššou hodnotou medze klzu použitých materiálov (465 MPa) spôsobí zmenu maximálnej hodnoty výsledných posunutí len o 0.0188 mm (obr.5).

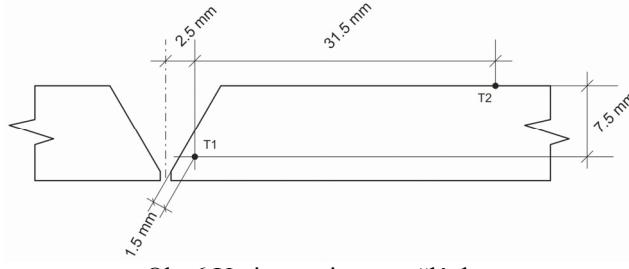


Obr. 5 Priebehy posunutí sledovaného uzla pre materiály rôznej medze klzu

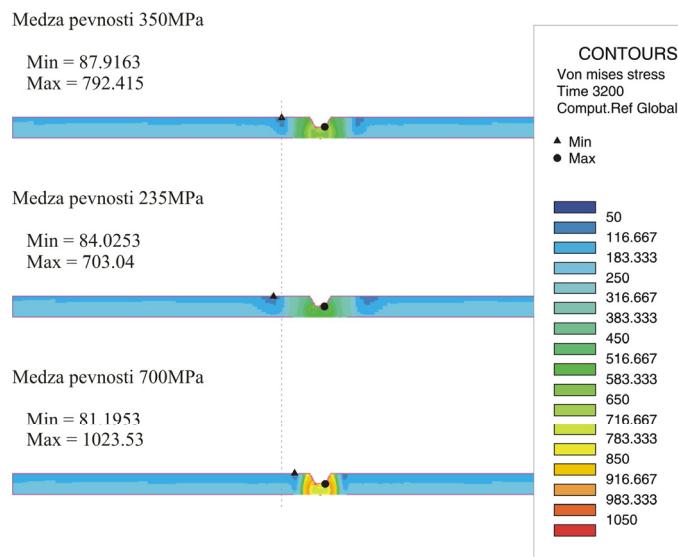
Ďalším sledovaným vplyvom bola zmena medze klzu materiálu na rozloženie zvyškových napäť vo zváranom materiáli. Opäť sme vychádzali z rovnakých podmienok ako pri sledovaní vplyvu zmeny medze klzu na výsledný deformačný stav. Jedná sa teda o jednovrstvový zvar s uvažovaním absolútne tuhého uchytenia zváraného materiálu. Z obr.5 vyplýva, že zmena medze klzu má výraznejší vplyv na zvyškové napäťia, než na zvyškové deformácie. Okrem očakávaného zvyšovania, resp. znižovania maximálnej hodnoty zvyškových napäťí v závislosti od zmeny medze klzu, nastáva aj posun lokality minima zvyškových napäťí vo zvare. Maximum zvyškových napäťí je lokalizované v jednom mieste pre všetky uvažované prípady z dôvodu, že oblasť sa správa z pohľadu napäťového stavu ako vrub.

Priebeh porovnávacích napäť na obr.8 len potvrzuje očakávaný vplyv priamej závislosti zvyšovania resp. znižovania sledovaného napäťia od zvyšovania resp. znižovania medze klzu použitého materiálu.

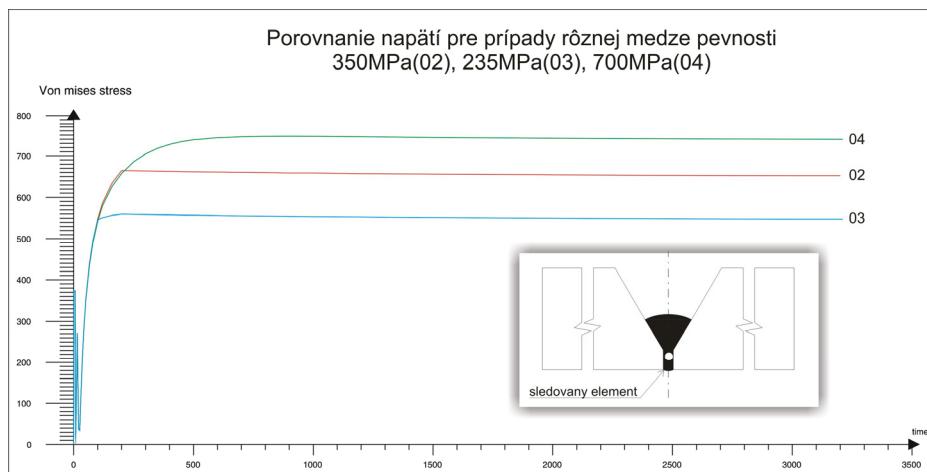
Z výsledného rozloženia priebehu porovnávacích napäť je zrejmý vplyv zmeny medze klzu nielen na samotnú hodnotu maxima a minima porovnávacích napäťí, ale aj na lokalizáciu minima porovnávacích napäťí.



Obr.6 Umiestnenie termočlánkov



Obr.7 Hodnoty porovnávacích napäťí



Obr.8 Priebeh porovnávacích napäťí na sledovanom elemente

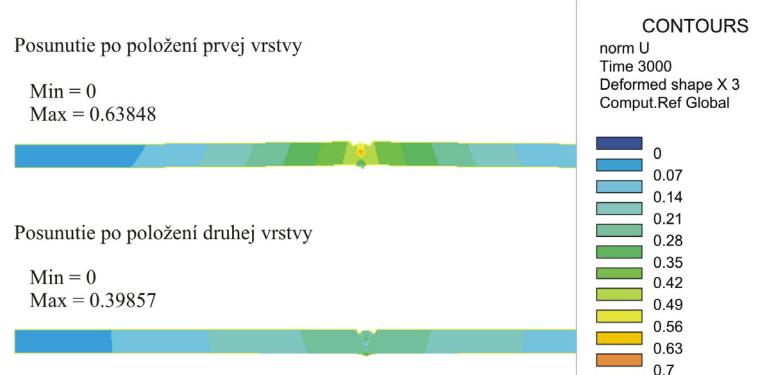
VÝSLEDKY ANALÝZY DVOJVRSTVOVÉHO ZVARU

Ďalším uvažovaným prípadom zvaru bol dvojvrstvový zvar realizovaný na materiáli s medzou klzu 350 MPa pri dokonale tuhom uchytení. Geometria dvojvrstvového zvaru je zrejmá z nasledujúceho obr.9. Parametre procesu zvárania boli pre prvú aj druhú vrstvu totožné s prípadmi uvádzanými v predchádzajúcich kapitolách. Proces kladenia druhej húsenice začal až v momente, keď zváraná vzorka po navarení prvej vrstvy vychladla na teplotu okolia, teda približne po 3000 sekundách od začiatku navárania prvej vrstvy.

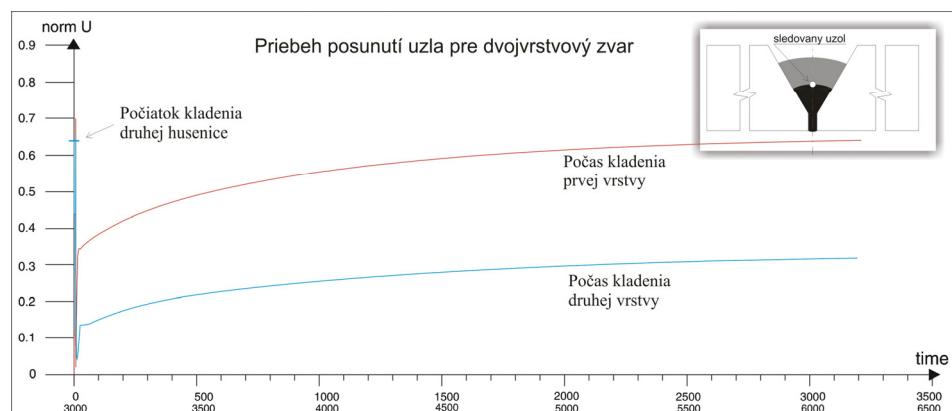


Obr.9 Geometria dvojvrstvového zvaru

Ako prvú veličinu sme porovnávali výsledné deformácie po navarení prvej a druhej vrstvy. Porovnávané stavy sú v čase, keď vzorky vychladli na teplotu okolia. Z obr.10 je zrejmé, že navarením druhej vrstvy zvaru dochádza k zníženiu hodnoty maximálnej zvyškovej deformácie. Tento efekt môžeme podrobnejšie sledovať aj na grafoch priebehu posunutí v uzle na rozhraní prvej a druhej vrstvy (obr.11).



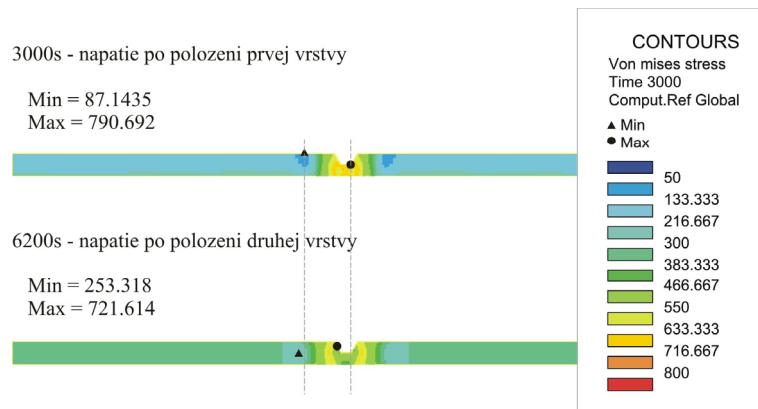
Obr.10 Výsledné posunutia po vyhotovení prvej a druhej vrstvy



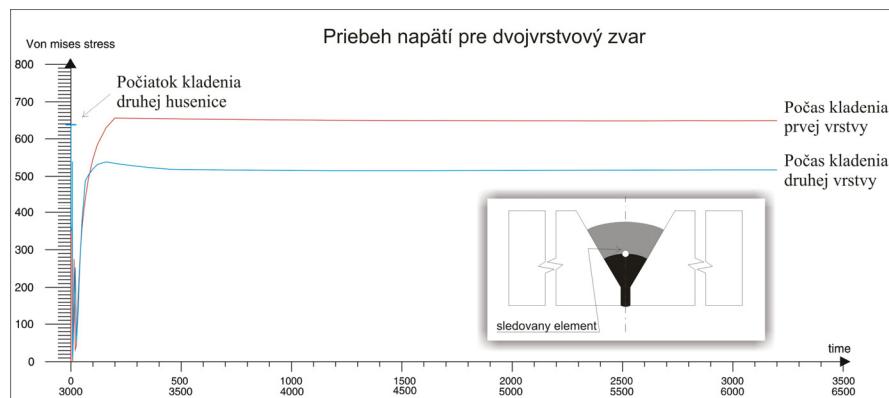
Obr.11 Priebeh posunutí sledovaného uzla pri vyhotovení prvej a druhej vrstvy

Pri sledovaní výsledného napäťového stavu môžeme konštatovať, že položením druhej vrstvy zvaru nastáva v materiáli rovnomernejšie rozloženie zvyškových napäťí (obr.12). Toto rozloženie napäť má za následok aj posuv maximálnej a minimálnej hodnoty, pričom na posuv maximálnej hodnoty má výrazný vplyv aj to, že vrub ktorý vznikol v mieste maxima po prvej vrstve, položením druhej vrstvy zanikne a vrub sa posunie vyššie vplyvom polozenia druhej vrstvy zvaru.

Z priebehov na obr.13 je zrejmé, že v oblasti koreňa nastáva položením druhej vrstvy zvaru pokles napäť. Je však dôležité poznamenať, že v miestach vzdialenejších od koreňa zvaru nastáva zvýšenie porovnávacích napäťí, čo sa v konečnom dôsledku prejaví na reakciach v uložení.



Obr.12 Mapa rozloženia porovnávacieho napäťia po vyhotovení prvej a druhej vrstvy (pri teplote okolia)



Obr.13 Priebeh porovnávacieho napäťia počas navárania prvej a druhej vrstvy

ZÁVER

Predkladaná numerická simulácia zvarového spoja bola v prvej etape riešenia nastavená pomocou parametrov (geometria Goldakovho modelu) tak, aby sa výsledky termálnej analýzy zhodovali s experimentálne nameranými hodnotami na termočlánkoch T1 a T2 (obr.6), pri dodržaní základných parametrov zvárania (v, U, I, \dots). Výsledkom nastavovania a následného termálneho výpočtu sú rozloženia teplotných polí. Získané parametre zvárania boli požitie pri analýze zvyškových napäťí a deformácií po zváraní, pre prípady jednovrstvového a dvojvrstvového zvaru.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory č.APVT-51-017602, ako i Agentúrou VEGA prostredníctvom finančnej podpory č. 1/2084/05.

LITERATÚRA

- [1] Sysweld, 2000. *Reference manual*, ESI Group
- [2] FASSINI, R.N.S., TREVISAN, O.V.. *Analytical modeling of multipass welding process with distributed heat source*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, XXV (3) , pp. 302-305, 2003
- [3] HRIVŇÁK, I., ÉLESZTÓS, P., BENČA, Š, PODEBRADSKÝ, J.: *Hodnotenie spôsobilosti a bezpečnosti zváraných tlakových nádob v chemickom priemysle*, Zváranie - Svařování, 3-4/2001
- [4] MRÁZ, L., ÉLESZTÓS, P., VOŠTIAR, V.: *Experimental measurements and numerical simulation of stress built up during and after single pass welding*, SÚČASNÉ TRENDY V SPÁJANÍ A ZVÁRANÍ (RECENT DEVELOPMENT IN WELDING), Japonsko – Slovenský seminár, Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV, 2005
- [5] TREBUŇA, F. BURŠÁK, M.: *Medzné stavy lomy*, Grafotlač, Prešov, 2002
- [6] TREBUŇA, F. ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*, Emilena Košice 2004
- [7] ÉCSI, L., ÉLESZTÓS, P.: *AN ATTEMPT TO SIMULATE MORE PRECISELY THE BEHAVIOR OF A SOLID BODY USING NEW ENERGY CONSERVATION EQUATION FOR FULLY COUPLED THERMAL STRUCTURAL ANALYSIS*, III. European conference on Computational Mechanics Solids, Lisabon, June 2006, (Submitted)