

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

VOID MODEL - NUMERICAL SIMULATION AND COMPARISON WITH EXPERIMENT

DUTINOVÝ MODEL – NUMERICKÁ SIMULACE A SROVNÁNÍ S EXPERIMENTEM

Vladislav Laš¹, Vlastimil Vacek², Ing. Luboš Řehounek³

The paper deals with the numerical simulation of a ductile fracture of steel and compares numerical results with an experiment. The comparison is done for three different specimens – the CT – specimen, the edge notched bar and the three point bending specimen – for all these three specimens exhibit, because of the different geometry, different constraint effect. The simulation was based on the GTN model and system MSC.Marc was used for the numerical solution. Measured quantities were compared with those from the numerical simulation and a good agreement was proved.

Keywords

Ductile fracture, modified Gurson model, numerical simulation, experiment

Klíčová slova

Tvárný lom, modifikovaný Gursonův model, numerická simulace, experiment

Úvod

Práce je věnována numerické simulaci tvárného lomu oceli a jejím srovnání s experimentem. Porovnání bylo provedeno na třech různých vzorcích z téhož materiálu. Jednalo se o CT vzorek, vzorek s bočním vrubem a vzorek namáhaný tříbodovým ohybem. Je zřejmé, že každý z těchto vzorků má vlivem rozdílné geometrie rozdílná napěťová a deformační pole (různý “constraint” efekt) v okolí kořene vrubu.

Numerická simulace byla provedena pomocí metody konečných prvků a pro řešení tvárného lomu byl použit modifikovaný Gursonův model (GTN). Některé parametry GTN modelu byly určeny pomocí experimentu na válcové tyčce s vrubem.

Při experimentu byla sledována závislost rozevření vrubu na zatěžující síle a stanovena velikost síly, při které vznikla trhлина v kořeni vrubu. U tříbodového ohybu byla sledována závislost průhybu pod silou v závislosti na zatěžující síle.

¹ Doc. Ing. Vladislav Laš, CSc.: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377 632 326, e-mail: las@kme.zcu.cz

² Ing. Vlastimil Vacek, CSc.: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377 632 334, e-mail: vacek@kme.zcu.cz

³ Ing. Luboš Řehounek.: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, e-mail: rehoun3@kme.zcu.cz

Pomocí numerické simulace byly stanoveny stejné závislosti jako při experimentu z důvodu jejich porovnání. Dále byly stanoveny ekvivalentní poměrné deformace, při kterých došlo ke vzniku trhlin ve vzorcích.

K řešení byl použit výpočtový systém MSC.Marc.

Modifikovaný Gursonův model

Původní Gursonův model byl modifikován Needlemanem a Tvergaardem [3] a vznikl tzv. modifikovaný Gursonův model – GTN model. Zásadní změna oproti původnímu modelu spočívá v tom, že GTN model zahrnuje proces koalescence dutin.

Modifikovaný Gursonův model, který představuje plochu plasticity zahrnující poškození má tvar

$$\phi = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_M^2} + 2 f^* \cos h \left(\frac{q_2}{2} \frac{\sigma_k^k}{\sigma_M} \right) - 1 - (q_1 f^*)^2 = 0, \quad (1)$$

kde σ_e je makroskopické von Misesovo ekvivalentní napětí

σ_M je okamžitá mez kluzu materiálu matrice

σ_k^k je stopa makroskopického tenzoru Cauchyho napětí

q_1, q_2 jsou Tvergaardovy konstanty

f^* modifikovaný objemový podíl dutin.

Pojem „makroskopický“ je zde třeba chápat ve smyslu mechaniky kontinua, tj. že na materiál se nahlíží jako kontinuum obsahující dutiny.

Mechanismus růstu objemového podílu dutin lze popsat pomocí vztahu

$$\dot{f} = \dot{f}_{vznik} + \dot{f}_{rust} \quad \text{s počáteční podmínkou} \quad f(t_0) = f_0 \quad (2)$$

kde $\dot{f}_{vznik}$ rychlost objemového podílu nově vzniklých dutin

$\dot{f}_{rust}$ rychlost objemového podílu vlivem růstu stávajících dutin.

Vznik nových dutin lze řídit pomocí napětí nebo deformací. V případě deformačně řízené nukleace se používá následující vztah

$$\dot{f}_{vznik} = \frac{f_N}{s\sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_M^p - \varepsilon_N}{s} \right)^2 \right] \dot{\varepsilon}_M^p, \quad (3)$$

kde f_N je objemový podíl nukleačních částic

s je směrodatná odchylka deformace

ε_N je střední nukleační deformace

ε_M^p je ekvivalentní plastická deformace matrice.

Rychlost růstu dutin je dán výrazem

$$\dot{f}_{rust} = (1 - f) \dot{\varepsilon}_k^{k,p}, \quad (4)$$

kde $\dot{\varepsilon}_k^{k,p}$ je stopa tenzoru plastické deformace
 f je objemový podíl dutin.

Z výrazu (4) je zřejmé, že rychlost růstu dutin je přímo úměrná hydrostatické deformaci. Proces koalescence dutin je popsán pomocí modifikovaného objemového podílu f^* .
Platí

$$f^* = f \quad \text{pro} \quad f \leq f_c \quad (5)$$

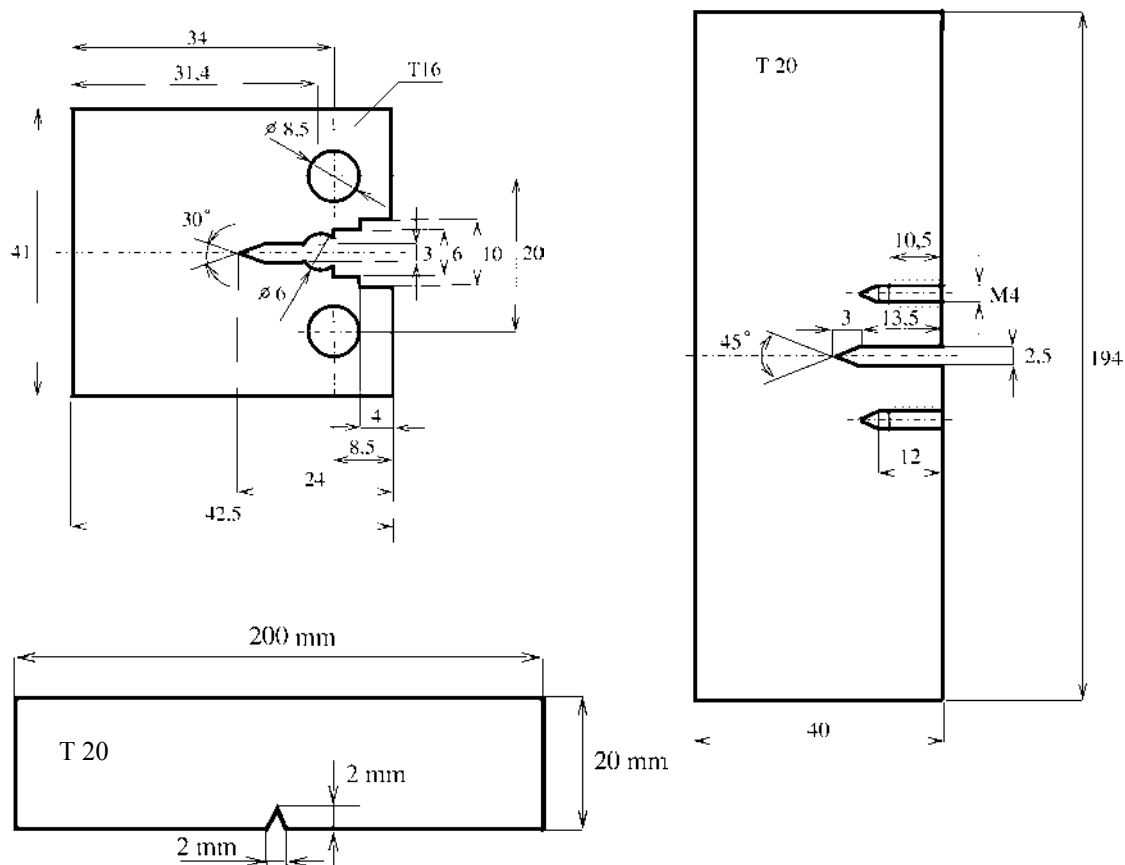
$$f^* = f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) \quad \text{pro} \quad f > f_c,$$

kde f_c je kritický objemový podíl dutin
 f_F je objemový podíl dutin, při kterém dochází k lomu

$$f_u^* = \frac{1}{q_1} \quad (6)$$

Experiment

Experimenty byly provedeny za účelem verifikace numerické simulace. Byly použity tři typy vzorků – prizmatická tyč s bočním vrubem zatěžovaná tahem, vzorek s vrubem pro tříbodový ohyb a CT vzorek. Tvar a rozměry vzorků jsou uvedeny na obr. 1. Všechny vzorky byly vyrobeny z oceli 11458.

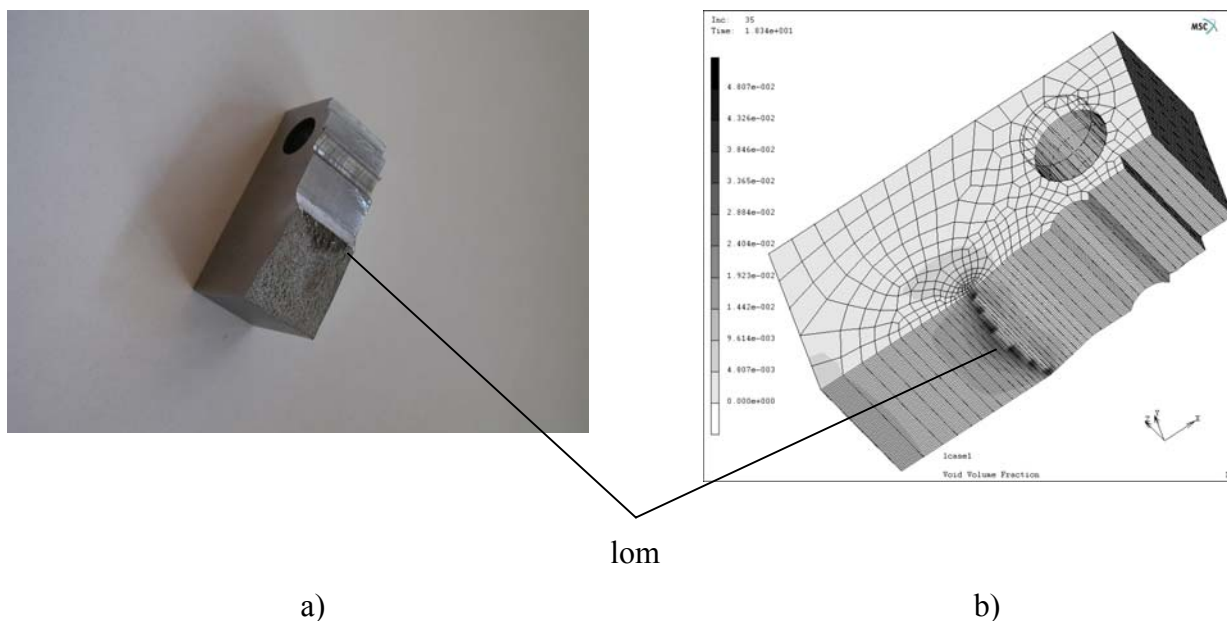


Obr. 1

Vzorky byly zatěžovány s využitím příslušných přípravků ve zkušebním stroji MTS 500 kN. Rychlost posuvu příčnicku byla 0,02 mm/s. Byly sledovány závislosti síly na rozevření vrubu (u CT vzorku a vrubované tyče) a síla na posuvu působitě síly při třibodovém ohybu. Získané experimentální křivky spolu s křivkami získanými numerickou simulací jsou uvedeny na obr. 4. Zkoušky byly zastaveny v počáteční fázi rozvoje trhliny, což odpovídalo tahové síle cca 23 kN pro CT vzorek, 182,5 kN pro vrubovanou tyč a 49 kN pro třibodový ohyb. Poté byly vzorky zahřáty, následně zchlazeny v tekutém dusíku a křehce dolomeny, což umožňovalo zviditelnit trhlínu. Výsledek je pro CT vzorek uveden na obr. 2a.

Pro určení nezbytných parametrů Gursonova modelu byly využity dřívější experimenty na vrubované tyči [2].

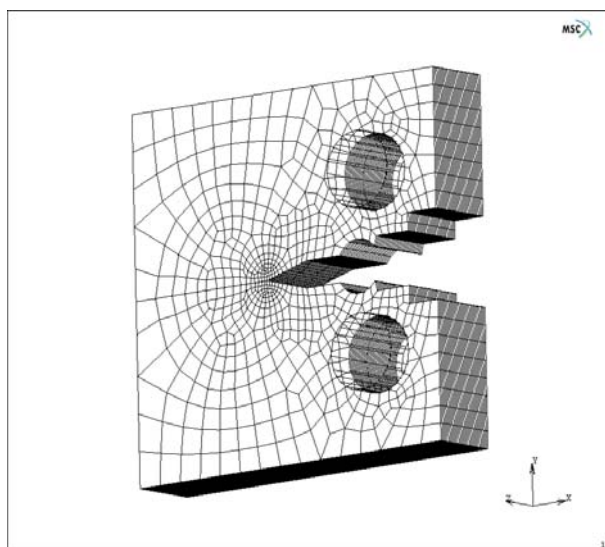
Veškeré experimenty byly realizovány v laboratoři lomové mechaniky společnosti ŠKODA – Výzkum, s.r.o.



Obr. 2

Numerická simulace a srovnání s experimentem

Pro všechny tři typy vzorků byly vytvořeny výpočtové modely. Na obr. 3 je znázorněn výpočtový model CT vzorku. Úloha byla tedy řešena ve 3D. Byly použity 8-mi uzlové prvky typu SOLID. Zatěžování vzorku bylo provedeno pomocí posuvů v místě uchycení čelistmi.



Obr. 3

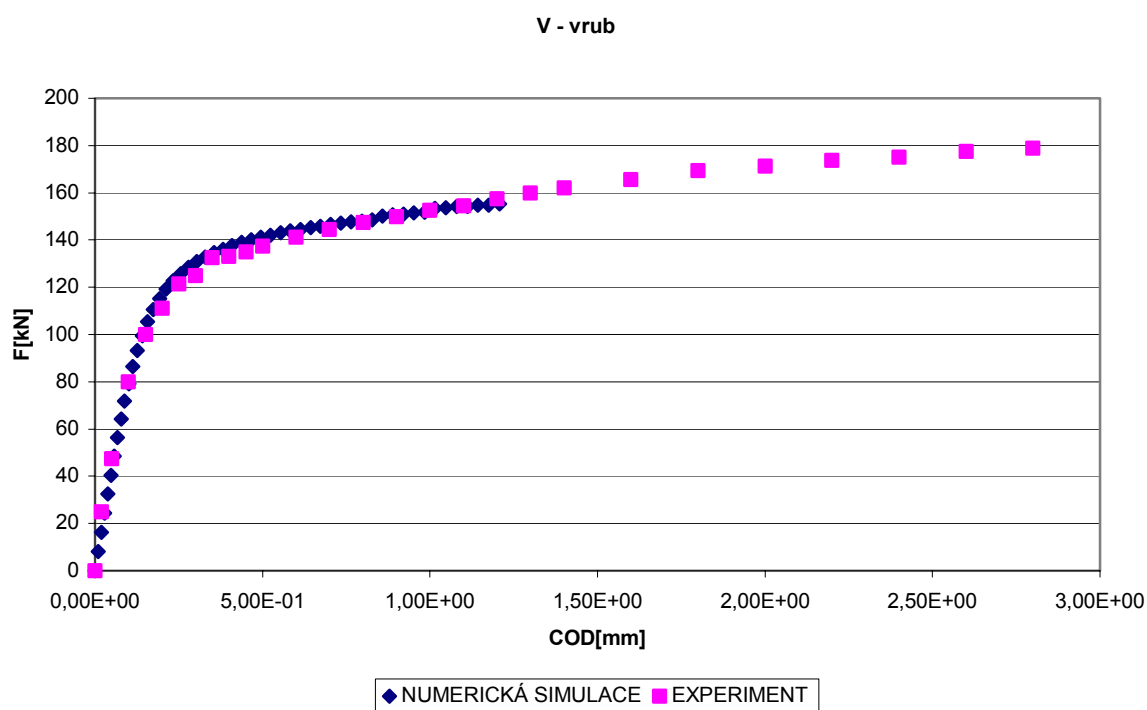
Numerická simulace lomu vzorků byla řešena s využitím modifikovaného Gursonova modelu. Parametry modelu byly určeny pomocí literatury a experimentů [2]. Hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce 1. Pro řešení úlohy plasticity byla použita tzv. dilatační plasticita, která uvažuje změnu objemu.

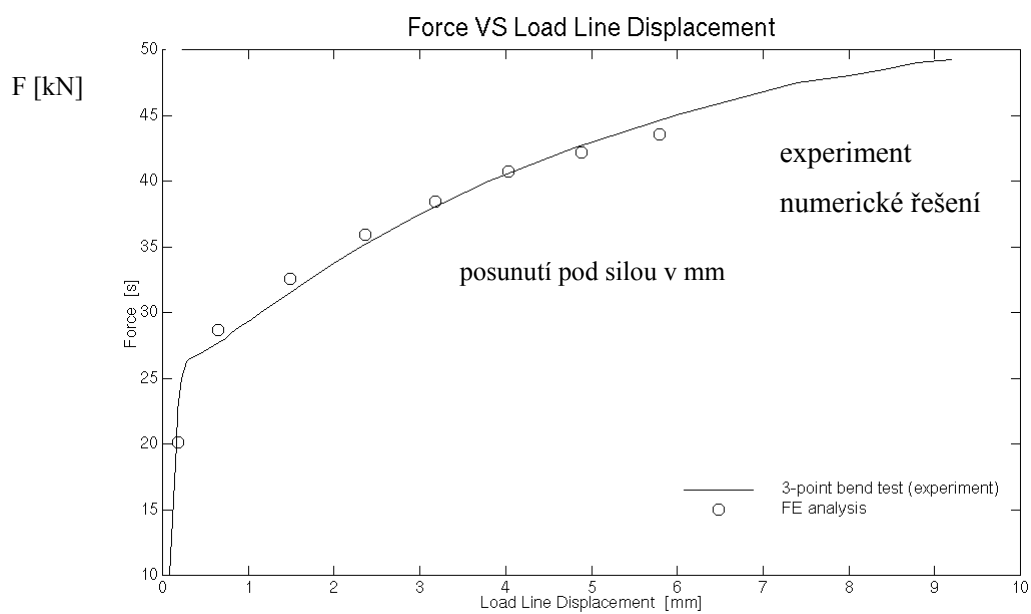
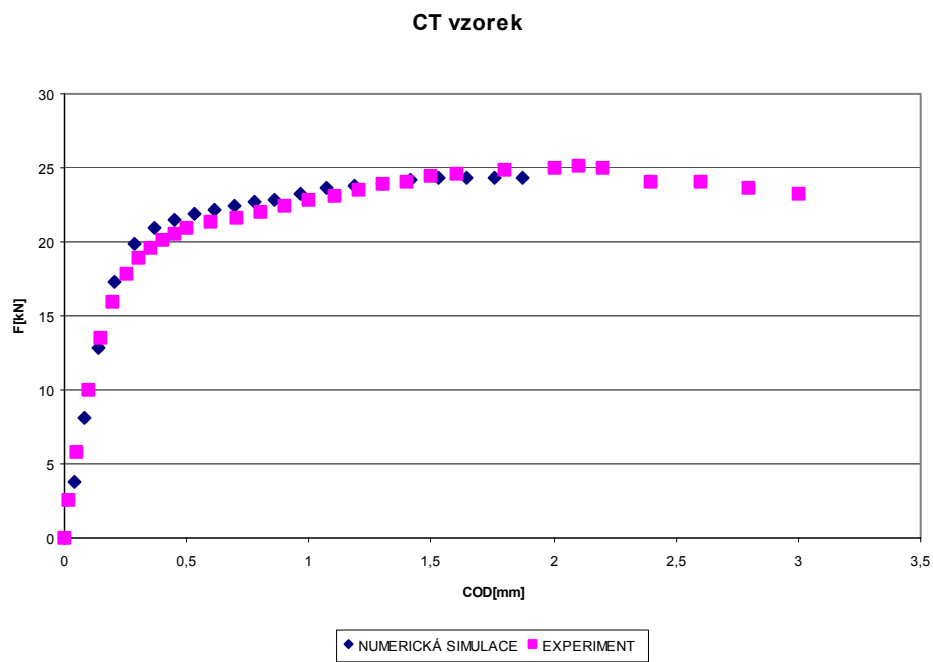
Tabulka 1

q_1	q_2	f_0	f_C	f_F	ε_N	s	f_N
1,5	1	0,002	0,05	0,15	0,15	0,1	0,04

Cílem numerické simulace bylo provést srovnání vypočtených závislostí se závislostmi získanými experimentem. Bylo sledováno jak se mění rozevření vrubu (COD) v závislosti na zatěžující síle a při jaké síle nastane porušení materiálu – vznik trhliny.

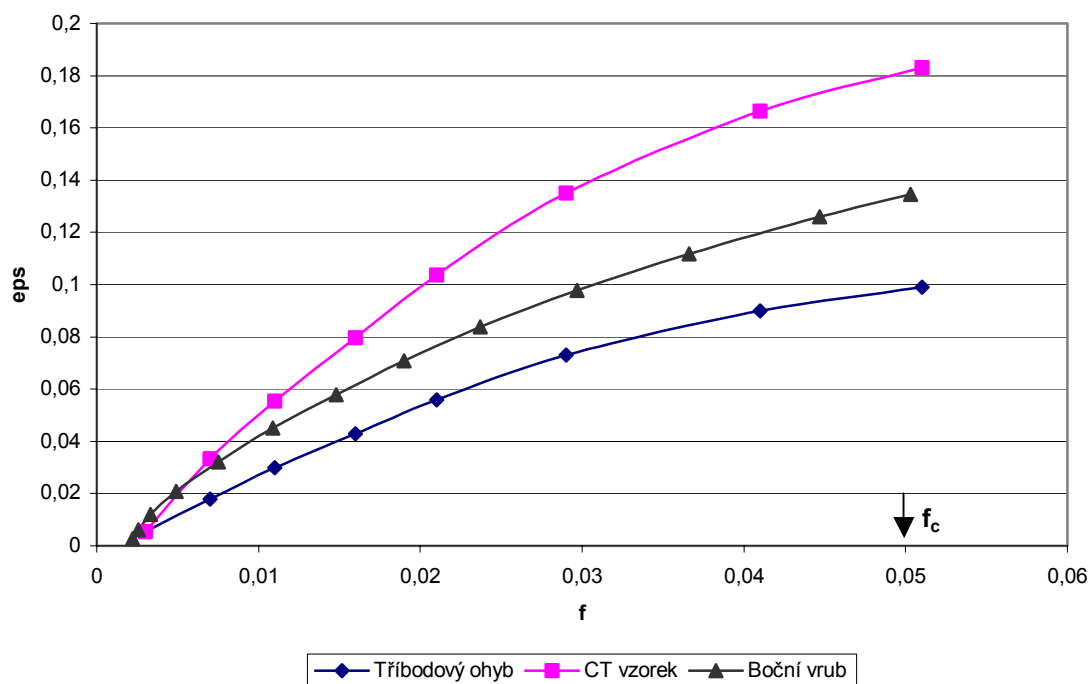
Na obr. 4 jsou znázorněny výše uvedené závislosti pro všechny tři typy vzorků. Je možno konstatovat, že ve všech případech numerické simulace dobře korespondují s experimenty. Bohužel se nepodařilo z důvodu divergence řešení provést numerickou simulaci do tak velkých rozevření jako u experimentů.





Obr. 4

Dále bylo sledováno jak se mění během zatěžování ekvivalentní plastická deformace ε_{ekv}^p v závislosti na růstu objemového podílu dutin f . Na obr. 5 je znázorněna změna ε_{ekv}^p až do hodnoty, kdy objemový podíl dutin dosáhne kritické hodnoty $f_c = 0,05$, tj. kdy začíná koalescence dutin. Tato závislost byla sledována na elementu, který leží v kořeni vrubu a jeho stěny leží v rovinách symetrie. Jedná se o místo s největším stísněním („constraint“ efektem), kde dochází nejdříve ke vzniku trhliny u všech tří vzorků.



Obr. 5

V numerickém modelu je vznik trhliny simulován odpojením prvků. Z obr. 5 je vidět, že k odpojení prvního prvku dochází u vzorků při různé hodnotě ekvivalentní plastické deformace. Bylo vyšetřeno, že u vzorku namáhaném tříbodovým ohybem dochází ke vzniku trhliny při $\varepsilon_{ekv}^p = 0,1$. Znamená to, že u tohoto vzorku nastává největší stísnění. Nejmenší stísnění je u CT vzorku, kdy dochází ke vzniku trhliny při $\varepsilon_{ekv}^p = 0,185$.

Závěr

Lze konstatovat, že použití dutinového modelu pro řešení porušení materiálu se ukazuje jako vhodné. Byla shledána poměrně dobrá shoda mezi vypočtenými a naměřenými závislostmi síla versus rozevření vrubu, eventuálně síla versus průhyb u tříbodového ohybu.

Charakter lomu při experimentu odpovídá charakteru při numerické simulaci (obr. 2). Bohužel nebylo možné u experimentu určit okamžik vzniku trhliny, který byl získán numerickou simulací. Pomocí videokamery byla zjištěna trhlina až když se objevila na boku vzorku, což bylo při podstatně vyšším zatížení než byl vznik trhliny uprostřed kořene vrubu.

Stanovení parametrů Gursonova modelu pomocí fitování numerického výpočtu na experiment vyžaduje určité zkušenosti. Rovněž tak vytvoření reálného modelu a následný numerický výpočet.

Poděkování

Předkládaná práce byla zpracována za podpory grantu GA ČR 101/03/0731 a v rámci řešení výzkumného záměru MSM 235200003.

Literatura

- [1] Gurson, A. L.: Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nuclear and Growth, J. Eng. Mat. Tech., Paper No. 76-Mat-CC, 1977.
- [2] Laš, V. – Řehounek, L.: Numerická simulace tvárného lomu a porovnání s experimentem, Výpočty 2002, Výpočty metodou konečných prvků, Praha 2002.
- [3] Needleman, A. – Tverguard, V.: An Analysis of Ductile Repture in Notched Bars, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 32, No. 6, Pergamon Press, 1984.
- [4] Plánička, F. a kol.: Experimental support for testing the modified Gurson model, Proceedings 17th Conference with International Participation Computational Mechanics 2001, Nečtiny 2001.
- [5] Růžička, M. – Papuga, J.: Konstitutivní vztahy při elastoplastickém řešení, Výzkumná zpráva č. 2051/00/26, ČVUT FS, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti, Praha 2000.