



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**EVALUATION OF DUCTILE FRACTURE CRITERIA IN METAL
FORMING PROCESSES**

Jiří ŠUTA, Jindřich PETRUŠKA, Libor JANÍČEK¹⁾

Annotation:

The presented paper deals with procedure created for quality and reliability evaluation of ductile fracture criteria group. The base for criteria verification is comparison of upsetting experimental results and results of upsetting numerical simulations. Ductile fracture prediction using numerical simulation results is compared with experimentally measured ductile fracture. This comparison is also used for evaluation of independence of ductile fracture criteria on stress-strain conditions during different forming processes. There are briefly described upsetting experiments and numerical simulation model created in FEM system ANSYS. Partial results are presented for some ductile fracture criteria.

Key words:

Ductile fracture, ductile fracture prediction, ductile fracture criteria

1 ÚVOD

Limitujícím faktorem v mnoha tvářecích procesech je vyčerpání schopnosti materiálu dále se plasticky deformovat a jeho následné porušení - vznik tvárného lomu. Je to komplexní jev, který je ovlivněn jak vlastnostmi materiálu, tak parametry přetvárného procesu, jako jsou teplota, rychlost deformace, dotykové podmínky nástroj-materiál, relativní pohyb tvářeného kusu vzhledem k nástroji, lokální napětí a přetvoření.

Nástrojem pro predikci tvárného porušení jsou kriteria tvažitelnosti. Tato kriteria byla v minulosti formulována empiricky na základě praktických zkušeností. Pokrok v rozvoji matematické simulace procesů tváření na základě teorie plasticity a numerických výpočtů metodou konečných prvků umožňuje určit lokální historii vývoje napětí a deformací během procesu tváření materiálu. Tyto lokální veličiny mohou být následně využity k vyhodnocení definičních vztahů kriterií tvažitelnosti a k určení místa

¹⁾ Ing. Jiří ŠUTA, PSP Engineering a.s., Kojetínská 358, 750 53 Přerov,

Tel: 0641 23 2954, Fax: 0641 203 164, email: suta@pspeng.cz

Doc. Ing. Jindřich PETRUŠKA, CSc, Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno, Technická 616 69 Brno.

Tel: 05 4114 2858, Fax: 05 4114 2876, email: petruska@umt.fme.vutbr.cz

Dr. Ing. Libor JANÍČEK, Ústav strojírenské technologie FSI VUT Brno, Technická 616 69 Brno.

Tel: 05 4114 2507, Fax: 05 748 214, email: janicek@ust.fme.vutbr.cz

a doby vzniku tvárného lomu materiálu v průběhu simulovaného tvářecího procesu. Srovnáním takto získaných výsledků s experimenty posoudíme **kvalitu vybraných kritérií predikce tvárného lomu z hlediska schopnosti předpovědět místo a dobu jeho vzniku v průběhu tvářecího procesu**. Tak lze také posoudit **nezávislost kritériálních konstant na silově-deformačních podmínkách konkrétních tvářecích procesů**. Jen v případě potvrzení této nezávislosti jsou kritériální konstanty, zjištěné v podmínkách konkrétních experimentů (např. pýchovacích zkoušek), přenositelné na další tvářecí procesy

2 KRITERIA PORUŠENÍ PŘI PLASTICKÝCH DEFORMACÍCH.

Historicky vznikl velký počet kritérií predikce tvárného lomu v průběhu tvářecích procesů. Tato kritéria lze rozdělit do dvou kategorií:

- kritéria založená na teorii vzniku, růstu a spojování dutin v materiálu při plastické deformaci
- kritéria založená na makroskopických efektech mikroskopických procesů, které probíhají v materiálu při vzniku a rozvoji plastických deformací, vedoucích nakonec k tvárnému lomu

K praktickým inženýrským aplikacím se jeví jako vhodnější druhá skupina. Tabulka 1 uvádí definiční vztahy a stručné charakteristiky nejběžněji používaných kritérií predikce tvárného lomu. Z hlediska praktické použitelnosti a frekvence využívání v reálných technologických procesech objemového tváření byla zaměřena pozornost na zkoumání následujících kritérií:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| - maximálního tahového napětí | - maximální poměrné deformace |
| - Freudenthal | - Cockroft – Latham |
| - hydrostatického napětí | - Brozzo |
| - Oh | - Oyane |

Tabulka 1:

1.	Kriterium maximálního tahového napětí	$\sigma_1 = \sigma_{krit}$	maximální tahové napětí při deformaci daného materiálu dosáhne kritické hodnoty
2.	Kriterium maximální poměrné deformace	$\varepsilon_1 = \varepsilon_{krit}$	maximální poměrná deformace dosáhne kritické hodnoty
3.	Kriterium Freudenthal	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C3$	deformační energie na jednotku objemu dosáhne během přetvárného procesu určité kritické hodnoty

4.	Kriterium Cockroft a Latham	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = C4$	integrál tahové plastické práce musí dosáhnout své kritické hodnoty
5.	Kriterium hydrostatického napětí	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_H d\bar{\epsilon} = C5$	určující veličinou pro vznik tvárného lomu je zde hydrostatické napětí
6.	Kriterium Brozzo	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} d\bar{\epsilon} = C6$	kriterium závisí na max. hl. tahovém napětí a na hydrostatické složce napjatosti
7.	Kriterium Oh	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C7$	poměr maximálního tahového napětí k redukovanému napětí
8.	Kriterium Osakada a Mori	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} (B + \bar{\epsilon} + D\sigma_H) d\bar{\epsilon} = C8$	explicitní závislost na efektivní deformaci a hydrostatické složce napjatosti
9.	Kriterium Oyane	$\bar{\epsilon}_f = -\frac{1}{A} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} + C9$	k plastickému porušení dojde, jakmile je dosaženo kritické, materiálově – závislé objemové deformace
10.	Kriterium Ghosh	$k_f = \sigma_H \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2}$	neintegrální kriterium, testování okamžité hodnoty
11.	Kriterium Norris	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{1}{(1 - c\sigma_H)} d\bar{\epsilon} = C11$	integrál funkce hydrostatického napětí v procesu deformace do lomu
12.	Kriterium Atkins	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{(1 + \frac{1}{2L})}{(1 - c\sigma_H)} d\bar{\epsilon} = C12$ $L = \frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2}$	Norris + vliv podílu hlavních poměrných deformací

3 PĚCHOVACÍ ZKOUŠKY

Jako experimentální základ pro ověřování kvality zvolených kritérií byly vybrány pěchovací experimenty provedené na ÚST FSI VUT Brno.

Pěchovací zkouška je nejjednodušší, dostupná a široce používaná možnost experimentálního určování tvařitelnosti. Lze ji definovat jako **axiální stlačování kovového válcového vzorku s definovanými rozměry mezi čelistmi (kovadly) pěchovacího stroje za daných podmínek – tvar čelistí, tření mezi vzorkem a nástrojem, teplota, rychlost pohybu čelistí (tj. rychlost deformace)**. Při zkoušce se sleduje v postupných krocích volný povrch vzorku, aby se zjistil přesný okamžik výskytu velkých trhlin. Přetvoření, které odpovídá okamžiku vzniku těchto trhlin, se bere jako tvařitelnost (pěchovatelnost) vzorku.

Velmi důležitý je vhodný výběr experimentů s maximálním rozsahem hodnot koeficientu tření, který umožňuje získat na jednom typu experimentu různé historie napjatosti a deformace a simulovat tak vlastně různé tvářecí technologie. V naší práci jsme vybrali experimenty pro 3 různé třecí poměry – hladká-mazaná kovadla pěchovacího stroje, hladká kovadla a drážkovaná kovadla. Vzorky pro pěchovací zkoušky byly vyrobeny z následujících ocelových materiálů:

a) ocel 12010 (TRISTAL) – vysoce tvárná uhlíková ocel s vyšším obsahem manganu. Používá se pro mírně namáhané součásti vyráběné za studena tvářením. Je žíhána na měkko.

b) ocel 15260 - ocel s vyšším obsahem manganu, chromu a vanadu. Má vyšší pevnost a dobrou tažnost. Používá se pro výrobu velmi namáhaných strojních součástí.

4 SIMULACE PĚCHOVACÍCH EXPERIMENTŮ V SYSTÉMU ANSYS

Pro numerickou simulaci pěchovacích zkoušek byl zvolen široce využívaný programový systém metody konečných prvků ANSYS. Tento systém umožňuje simulovat procesy s velkými plastickými deformacemi, třením a kontaktem. Model vytvořený v ANSYSu pro simulaci pěchování lze stručně charakterizovat takto:

a) Elementy

VISCO106 – tento rovinný 4-uzlový prvek byl použit pro modelování ocelového válcového vzorku. Každý uzel má tři stupně volnosti – posuvy u_x , u_y , u_z . Je určen pro rovinné modelování prostorových těles, v tomto případě s využitím jeho osověsymetrické varianty.

Vstupní parametry prvku jsou geometrie (souřadnice uzlů), materiálové charakteristiky určené přiřazeným materiálovým modelem

CONTAC26 – kontaktní prvek. Deformace kovadla při pěchování je zanedbatelná, proto byl pro jeho modelování využit tento kontaktní prvek, který umožňuje definovat absolutně tuhý povrch s Coulombovským třením

Vstupní parametry prvku jsou geometrie (souřadnice uzlů), součinitel tření, normálová a smyková (tangenciální) kontaktní tuhost

b) Materiálový model

Materiál byl modelován podle Prandtlovy-Reussovy teorie plastického tečení s podmínkou plasticity HMM a izotropním zpevněním. Model zahrnuje geometrické nelinearity související s velkými deformacemi. Za těchto podmínek je třeba v ANSYSu zadávat materiálovou charakteristiku jako závislost skutečného napětí na skutečné poměrné deformaci. Tato závislost byla experimentálně určena pro oba zkoumané materiály v průběhu pěchovacích experimentů.

c) Geometrie, okrajové podmínky, zatížení

Vzhledem ke geometrii vzorků a danému zatížení v procesu pěchování představuje řešení napjatosti a deformace v průběhu pěchovací zkoušky rotačně-symetrickou úlohu se dvěma rovinami symetrie. S využitím obou podmínek symetrie byla pro výpočty modelována jen (horní pravá) čtvrtina válce. Model je zatěžován předepsaným posuvem tuhého kontaktu (modeluje kovadlo) ve směru proti ose válcového vzorku. Jednotlivé zatěžovací kroky (tj. posuvy uzlových bodů kontaktu) odpovídají posuvům kovadel zkoušecího stroje při experimentech. V těchto krocích byly měřeny hodnoty deformace vzorků.

5 NÁVRH POSTUPU OVĚŘOVÁNÍ KRITERIÍ TVAŘITELNOSTI

Hlavní myšlenkou verifikace a hodnocení spolehlivosti kritérií predikce tvárného lomu je porovnání experimentálně zjištěných dat z pěchovacích zkoušek s výsledky z numerických simulací těchto zkoušek. Výsledky predikce tvárného lomu dosažené použitím jednotlivých kritérií a veličin z numerické simulace - tj. místo poruchy a okamžik jejího vzniku v průběhu přetvárného procesu – se porovnají s experimentálně naměřenými daty a zhodnotí se tak kvalita kritérií. Navrhli jsme postup, který realizuje tuto základní myšlenku a skládá se z následujících kroků:

1. Nejprve je třeba z dostupných provedených experimentálních prací vybrat vhodné skupiny pěchovacích zkoušek, které pokryjí pokud možno co nejširší rozpětí třecích podmínek a geometrických parametrů pěchovaných vzorků.
2. V prostředí programového systému konečných prvků ANSYS je třeba vytvořit model těchto zkoušek, definovat geometrii modelu, zadat materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a způsob zatěžování.
3. V třetím kroku se provede řada simulací pěchovacích experimentů pro interval hodnot koeficientu tření f mezi kovadly a čelem vzorku variantně pro drážkovaná kovadla, hladká kovadla a hladká kovadla s mazivem. Výsledky, získané z těchto parametrických výpočtů, se porovnají s experimentálně naměřenými hodnotami deformací vzorků a určí se co nejpřesněji hodnoty koeficientů tření f pro všechny tři režimy pěchování – s drážkovanými, hladkými a hladkými-mazanými kovadly.
4. Dále se provede postupně simulace všech vybraných experimentálně provedených pěchování pro zvolené materiály, druhy kovadel (tj. režimy tření nástroj-vzorek) a všechny druhy výchozí geometrie vzorků (tj. poměry výšky vzorků a průměru h_0/d_0).

5. Jako další krok je nutno v prostředí ANSYSu vytvořit program pro konverzi výsledků a vznik souboru napěťových a deformačních veličin s jednotným formátem, který obsahuje data potřebná pro výpočet podmínek tvárného lomu u jednotlivých kritérií tvařitelnosti.
6. V prostředí systému MathCAD se vytvoří pro všechna vybraná kritéria predikce tvárného lomu programy, které umožní zpracování dat z výsledkového souboru simulace přechování v ANSYSu a výpočet definičních vztahů kritérií pro určení limitů tvařitelnosti.
7. Ze známého, experimentálně určeného, okamžiku lomu se stanoví s využitím výpočtově určených deformací a napětí hodnoty kritériálních veličin jednotlivých vybraných podmínek tvařitelnosti v okamžiku lomu. Dále se posoudí, zda v experimentu skutečně dochází k lomu v místech, kde kritérium nabývá při simulaci své mezní hodnoty. A nakonec bude nutné stanovit, do jaké míry jsou kritériální veličiny (tj. σ_{krit} , ε_{krit} , C3, C4, ...) skutečně nezávislé na podmínkách tvářecích procesů (na tření a výchozích geometrických rozměrech vzorků).

Navržený postup je konkretizován pro vybraný soubor kritérií tvařitelnosti, ale je zároveň dostatečně obecný, aby mohl být aplikován i na ostatní kritéria. Dosud byly realizovány následující kroky řešení daného problému:

- ad1) Byly vybrány vhodné skupiny přechovacích zkoušek.
- ad2) V systému ANSYS byl vytvořen obecný MKP model simulace přechovací zkoušky.
- ad3) Byla provedena řada simulací konkrétních přechovacích experimentů a určeny optimální hodnoty koeficientu tření f pro drážkovaná kovádla, hladká kovádla a mazaná kovádla.
- ad4) Numerické simulace jsou zpracovány zhruba pro 50% přechovacích experimentů.
- ad5) Byl vytvořen program pro přenos výsledků numerických simulací z ANSYSu do MathCADu.
- ad6) Pro některá kritéria jsou v prostředí MathCADu hotovy programy pro vyčíslení kritériálních vztahů.
- ad7) Probíhá hodnocení kritérií Freundenthal, Cockcroft-Latham, Brozzo a Oh.

6 REALIZOVANÉ VÝPOČTY A JEJICH VÝSLEDKY

V současnosti jsou úspěšně provedeny simulace přechovacích experimentů pro materiál 12010 a to 3 série po 7 kusech vzorků s různou počáteční geometrií pro 3 třecí režimy – drážkovaná kovádla (koeficient tření $f = 0.35$), hladká kovádla (koeficient tření $f = 0.23$) a hladká kovádla s vrstvou maziva (koeficient tření $f = 0.07$). Výsledky z těchto zatím provedených simulací byly použity k výpočtu a zhodnocení kvality 4 kritérií predikce tvárného porušení – kritéria **Freundenthal**, **Cockcroft-Latham**, **Brozzo** a kritéria **Oh**.

a) Kriterium **Freudenthal** [10] – je definováno vztahem $\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = C3$. Pro

každou provedenou simulaci bylo zjištěno rozložení hodnot kritériální veličiny C3 v průřezu pěchovaného vzorku a posouzeno, zda nabývá svého maxima v místě (experimentálně určeného) porušení. Rozložení hodnot kritériální veličiny C3 na průřezu vzorku (horní pravá čtvrtina vzorku) je na obrázku č.1. Na základě dosud provedených simulací lze konstatovat, že toto kritérium je neúspěšné při stanovení místa tvárného lomu a veličina C3 nabývá maximálních hodnot ve styku vzorku s kovádkem případně uprostřed vzorku a nikoli na povrchu ve středu vzorku (experiment). Důvodem je použití redukovaného napětí v definičním vztahu kritéria. Redukované napětí nevystihuje charakter napjatosti (tahová x tlaková), což se ukazuje jako velmi významné pro úspěšnou predikci tvárného porušení.

b) Kriterium **Cockroft-Latham** [9] – je definováno vztahem $\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = C4$. Pro

každou provedenou simulaci bylo opět zjištěno rozložení hodnot kritériální veličiny C4 v průřezu pěchovaného vzorku a posouzeno, zda nabývá svého maxima v místě (experimentálně známého) porušení. Na obrázku č.2 je graf rozložení hodnot C4 po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina vzorku). Je zřejmé, že maximum veličiny C4 nastává v místě experimentálně zjištěného porušení. Kriterium dává tento výsledek pro všechny dosud provedené simulace, takže ho lze hodnotit z hlediska predikce tvárného porušení jako úspěšné.

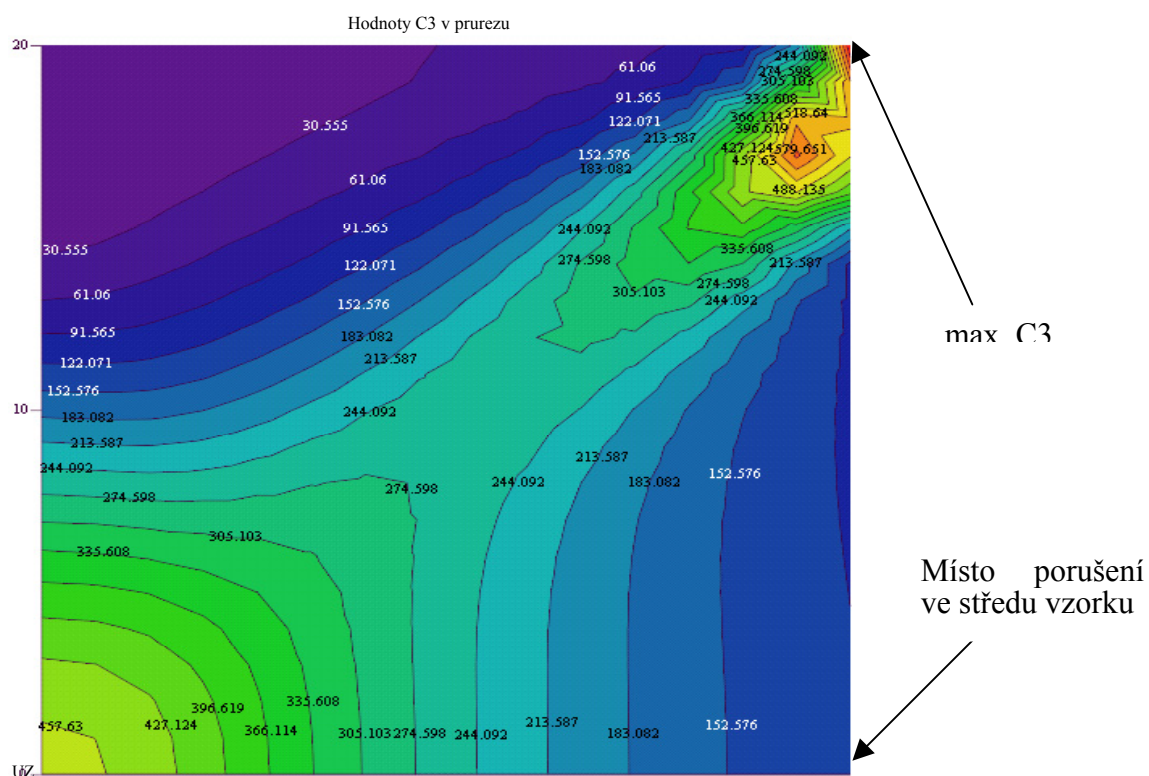
c) Kriterium **Brozzo** [8] – je definováno vztahem $\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} d\bar{\epsilon} = C6$.

Podobně jako u předchozích kritérií byla zkoumána kritériální veličina C6 a její rozložení v průřezu pěchovaného vzorku v průběhu simulace až do lomu. U všech zkoumaných vzorků nastalo maximum C6 v místě experimentálně určeného lomu (na povrchu ve středu vzorku) – kritérium úspěšně predikuje místo tvárného porušení. Na obrázku č.3 je uvedeno rozložení hodnot veličiny C6 na řezu vzorku s maximem v místě porušení.

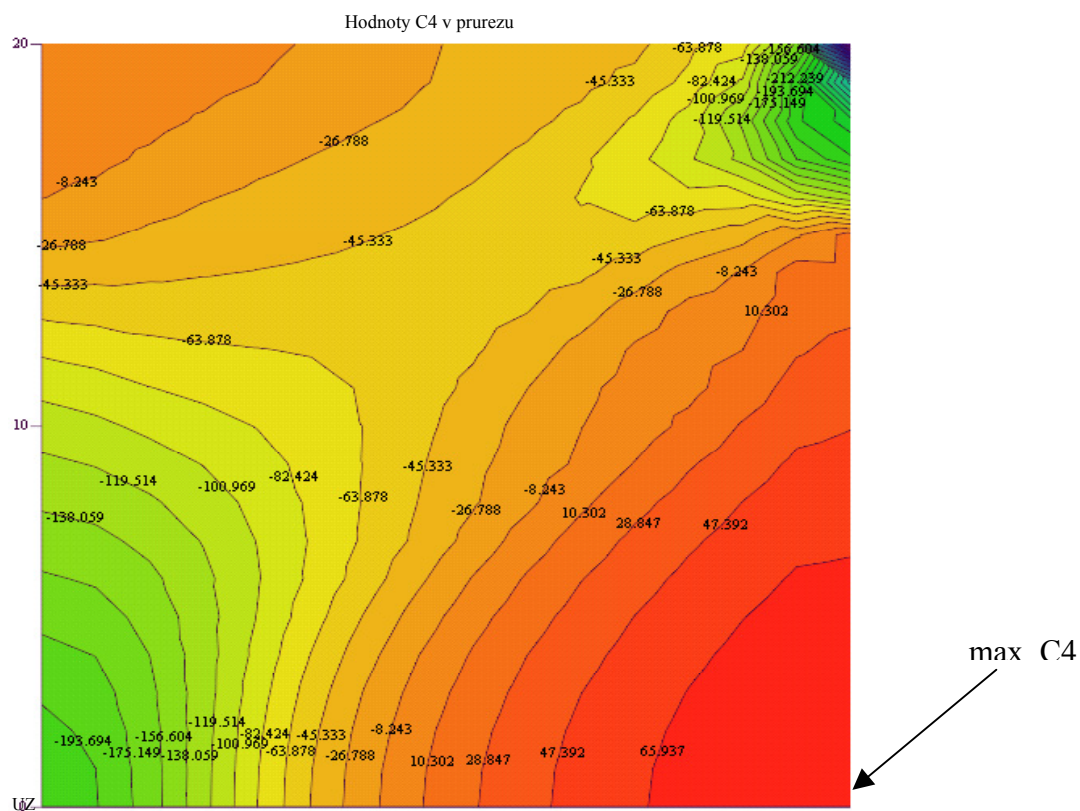
d) Kriterium **Oh** [11] – je definováno vztahem $\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C7$. Pro každou pro-

vedenou simulaci bylo opět zjištěno rozložení hodnot kritériální veličiny C7 v průřezu pěchovaného vzorku a posouzeno, zda nabývá svého maxima v místě (experimentálně známého) porušení. Na obrázku č.4 je graf rozložení hodnot C7 po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina vzorku). Maximum veličiny C7 nastává v místě experimentálně zjištěného porušení na povrchu ve středu vzorku. Kriterium predikuje místo tvárného porušení úspěšně pro všechny dosud provedené simulace.

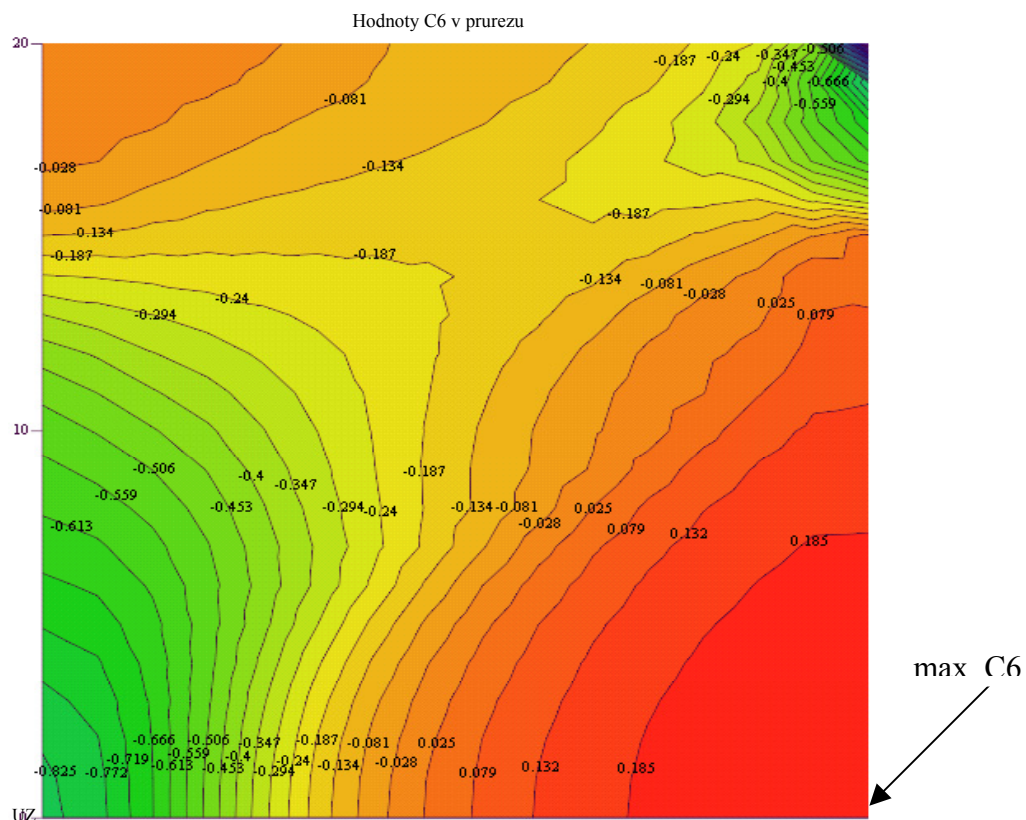
Na základě provedených experimentů a numerických simulací lze konstatovat, že Freundenthalovo kritérium při predikci tvárného porušení selhává, zatímco kritéria Cockroft-Latham, Brozzo a Oh jsou úspěšná. V případě Freundenthalova kritéria je příčinou redukované napětí v definičním vztahu, které nerespektuje tahový resp. tlakový charakter napjatosti. Naopak definiční vztahy kritéria Brozzo, Cockroft-Latham a Oh obsahují první hlavní napětí a hydrostatické napětí a tím charakterizují napjatost lépe. K tvárnému porušení dochází v oblastech s převažující tahovou napjatostí a přetvořením a odtud lze soudit na důvod úspěšnosti kritérií Brozzo, Cockroft-Latham a Oh.



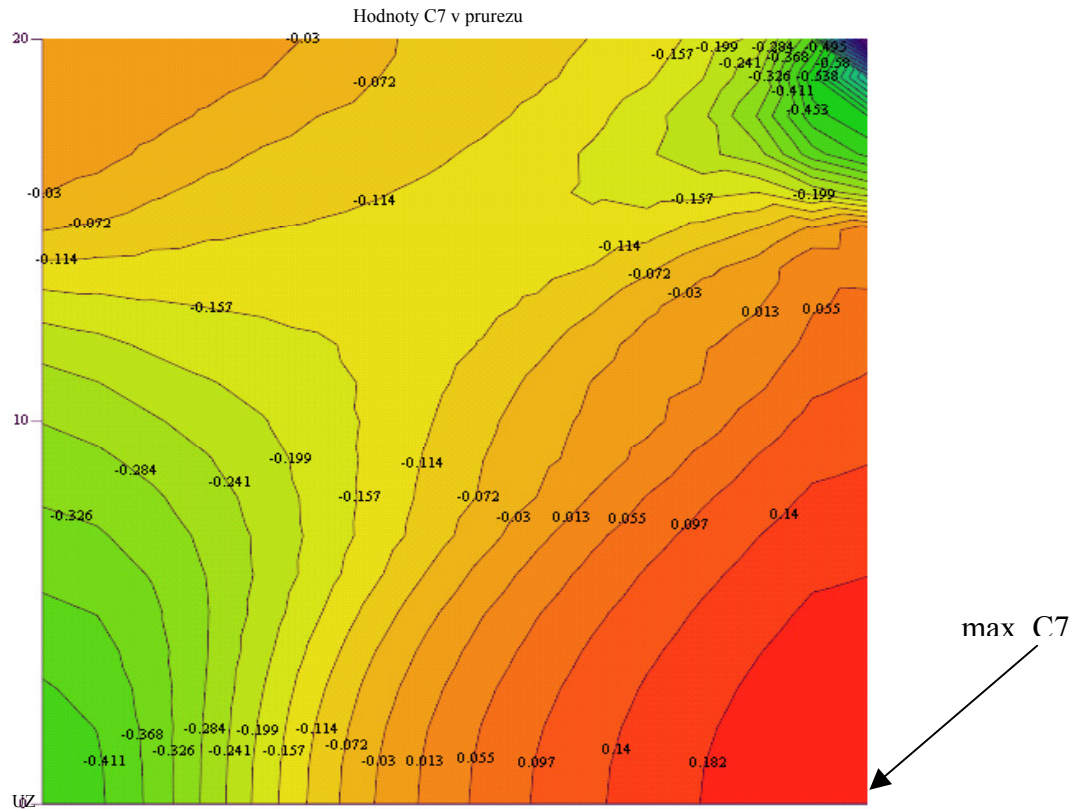
Obrázek č.1: Rozložení hodnot C3 v průřezu vzorku – kritérium Freudenthal
(horní pravá čtvrtina vzorku)



Obrázek č.2: Rozložení hodnot C4 v průřezu vzorku – kritérium Cockcroft-Latham
(horní pravá čtvrtina vzorku)



Obrázek č.3: Rozložení hodnot C6 v průřezu vzorku – kritérium Brozzo
(horní pravá čtvrtina vzorku)



Obrázek č.4: Rozložení hodnot C7 v průřezu vzorku – kritérium Oh
(horní pravá čtvrtina vzorku)

LITERATURA:

- [1] Eugen Pešina: Základy užití teorie plasticity. SNTL Praha, 1966
- [2] E. Bellenger, P. Bussy: Plastic and viscoplastic damage models with numerical treatment for metal forming processes. Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998).
- [3] M.Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima: Criteria for ductile fracture and their applications. Journal of Mechanical Working Technology, 4 (1980).
- [4] R. Konečný: Analýza meze tvařitelnosti polotovarů z vybrané oceli. Diplomová práce, FS VUT Brno 1998.
- [5] Z. Kuliš: Pružnost a pevnost IV – Plasticita. Skripta FS ČVUT Praha 1970.
- [6] Z. Kuliš: Plasticita a creep I – Plasticita. Skripta FS ČVUT Praha 1984.
- [7] M. A. Shabara, A. A. El-Domiaty, A. Kandil: Validity assessment of ductile fracture criteria in cold forming. Journal of Materials Engineering and Performance 1996.
- [8] P. Brozzo, B. DeLuca, R. Rendina: A new method for the prediction of formability limits in metal sheets. Proceedings of the 7th Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group 1972.
- [9] M. G. Cockcroft, D. J. Latham: Ductility and the Workability of metals. J. Inst. Met. 1968.
- [10] A. M. Freudenthal: The Inelastic Behavior of Solids Wiley 1950.
- [11] S. I. Oh, S. Kobayshi: Theories of Flow and Fracture in Metal-Forming Processes. Technical Report, Air Force Material Laboratory, OH, 1976.