

## RELIABILITY OF SELECTED DUCTILE FRACTURE CRITERIA

J. Šuta<sup>1</sup>, J. Petruška<sup>1</sup>, L. Janíček<sup>1</sup>

**Summary:** *Ductile fracture criteria are used for fracture prediction in metal forming processes. In this paper, there is briefly described the method of criteria verification and their characteristic quantities identification. Comparison of upsetting experimental results and results of upsetting numerical simulations is the base for criteria verification and evaluation. Results of selected group of criteria verification are presented. Characteristic quantities are determined and their independence on the stress-strain history during the forming process is evaluated. Successful criteria are then applied to the simulation of cold forming production of bolts. Brief comparison of the criteria, based on the results, is presented in conclusions.*

### 1. Úvod

Vznik tvárného lomu je omezujícím faktorem většiny procesů objemového tváření. Eliminace jeho možného vzniku už ve fázi návrhu technologie zefektivňuje procesy tváření a vede k podstatné úspoře nákladů. Nástrojem k predikci vzniku tvárného porušení a k určení limitů tvařitelnosti jsou kriteria tvárného lomu. Základní myšlenka jejich verifikace a hodnocení spolehlivosti spočívá v porovnání experimentálně zjištěných dat z pýchovacích zkoušek s výsledky numerických simulací těchto zkoušek. V článku uvádíme výsledky hodnocení kvality a spolehlivosti skupiny relativně jednoduchých, průmyslově aplikovatelných kriterií tvárného lomu pro dvě zvolené oceli 12010 a 15260. Kriteria byla hodnocena jak z hlediska úspěšnosti při určení místa vzniku tvárného lomu v průběhu tvářecího procesu, tak z hlediska možnosti jejich obecného použití při stanovení limitů tvařitelnosti.

### 2. Návrh postupu ověření kriterií tvařitelnosti

Pro ověření kvality a spolehlivosti kriterií tvárného lomu byl navržen postup, který se skládá z následujících, dílčích kroků:

---

<sup>1)</sup> Ing. J. Šuta, PSP Engineering a.s., Kojetínská 358, 750 53 Přerov,  
Tel: 0641 23 2954, Fax: 0641 203 164, email: [suta@pspeng.cz](mailto:suta@pspeng.cz)  
Doc. Ing. J. Petruška, CSc, ÚMT FSI VUT Brno, Technická 616 69 Brno.  
Tel: 05 4114 2858, Fax: 05 4114 2876, email: [petruska@umt.fme.vutbr.cz](mailto:petruska@umt.fme.vutbr.cz)  
Dr. Ing. L. Janíček, ÚST FSI VUT Brno, Technická 616 69 Brno.  
Tel: 05 4114 2507, Fax: 05 748 214, email: [janicek@ust.fme.vutbr.cz](mailto:janicek@ust.fme.vutbr.cz)

1. Z dostupných provedených experimentálních prací byly vybrány vhodné skupiny pēchovacích zkoušek, které pokrývají pokud možno co nejširší rozpětí třecích podmínek a geometrických parametrů.
2. V prostředí programového systému konečných prvků ANSYS byl vytvořen model pēchovací zkoušky. Byla definována geometrie modelu, zadány materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a způsob zatěžování.
3. Byla provedena řada simulací pēchovacích zkoušek pro zvolený interval hodnot koeficientu tření  $f$  mezi kovadly a čelem vzorku. Cílem bylo stanovit optimální hodnoty koeficientu tření  $f$  pro 3 provedené režimy pēchování - pēchování s drážkovanými kovadly, s hladkými kovadly a s hladkými kovadly s mazivem.
4. Postupně byly realizovány simulace všech vybraných experimentálně provedených pēchování
5. V prostředí ANSYSu byl sestaven a odladěn program pro vznik výsledkového souboru s jednotným formátem, který obsahuje napěťové a deformační veličiny simulovaného pēchování.
6. V prostředí systému MathCAD byly vytvořeny pro všechna vybraná kritéria predikce tvárného lomu programy, které zpracují data z výsledkového souboru simulace pēchování v ANSYSu a vypočtou kritické lomové hodnoty kritériálních veličin - limity tvařitelnosti.
7. Pro každou provedenou simulaci konkrétní pēchovací zkoušky byly ze známého, experimentálně určeného, okamžiku lomu stanoveny s využitím výpočtově určených veličin deformace-napětí hodnoty kritériálních veličin jednotlivých vybraných kritérií tvárného lomu v okamžiku porušení. Dále bylo ověřováno, zda v experimentu skutečně dochází k lomu v místech, kde kritériální veličina nabývá své maximální hodnoty. Výsledky byly statisticky zpracovány a posloužily ke zhodnocení, do jaké míry jsou kritériální veličiny skutečně nezávislé na konkrétních podmínkách tvářecích procesů (tj. na tření a výchozích geometrických rozměrech vzorků).

### 3. Popis realizovaných experimentů

Základní experimentální údaje byly získány na základě spolupráce s ÚST FSI v Brně, kde byla v minulosti realizována řada pēchovacích plastometrických zkoušek. Pēchovací zkouška je nejjednodušší, dostupná a široce používaná možnost experimentálního určování tvařitelnosti a křivek přetvárného odporu materiálu. Lze ji definovat jako axiální stlačování kovového válcového vzorku s definovanými rozměry mezi čelistmi (kovadly) pēchovacího stroje za daných podmínek, kterými jsou tvar čelistí, tření mezi vzorkem a nástrojem, teplota, rychlost pohybu čelistí (tj. rychlost deformace). Při zkoušce se v postupných krocích sleduje volný povrch vzorku, aby se zjistil přesný okamžik výskytu velkých trhlin. Mezní přetvoření, které odpovídá okamžiku vzniku těchto trhlin, se bere jako tvařitelnost (pēchovatelnost) vzorku. Přesnost takto stanovené tvařitelnosti je ovšem omezena schopností přesně určit okamžik vzniku „velkých“ trhlin.

Vzorky pro pēchovací 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 žhána naměkko.

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. Numerická simulace pēchovací zkoušky

Pro numerickou simulaci pēchovacích zkoušek byl zvolen programový systém metody konečných prvků ANSYS, který umožňuje simulovat procesy s velkými plastickými deformacemi, třením a kontaktem.

Pro modelování pēchování byl v ANSYSu vytvořen model s následujícími charakteristikami:

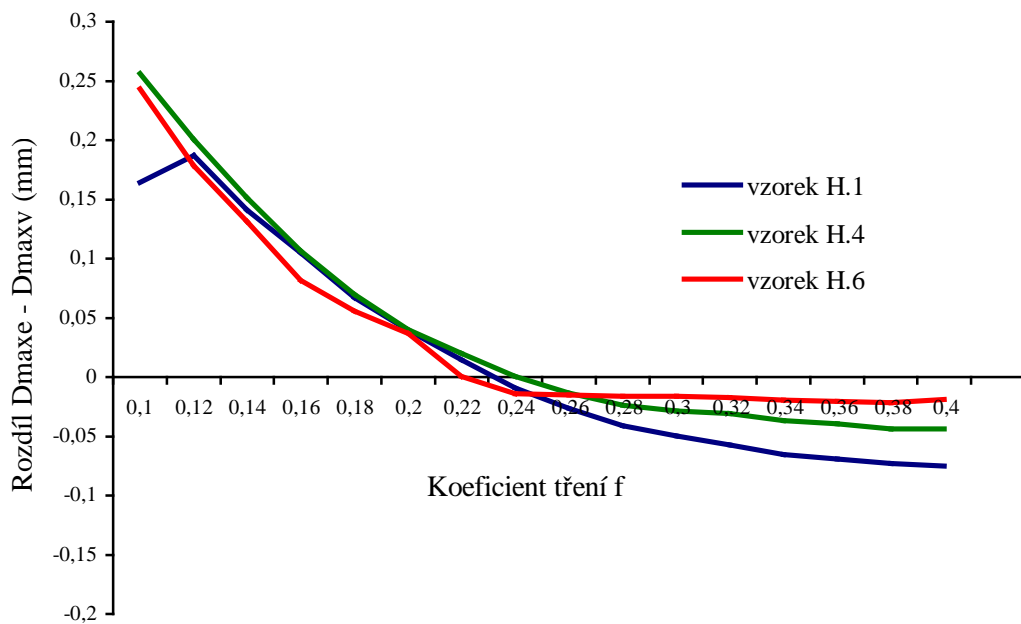
a) Elementy: **VISCO106** – tento rovinný 4-uzlový prvek byl použit pro modelování ocelového válcového vzorku. Je určen pro rovinné modelování prostorových těles, v tomto případě s využitím jeho osově-symetrické varianty. **CONTAC26** – kontaktní 3-uzlový rovinný prvek. Umožňuje modelovat absolutně tuhý povrch v kontaktu s pružným tělesem bez tření nebo se třením podle Coulombova zákona. Prvek byl použit pro modelování kovádra tvářecího stroje. Deformace kovádra při pēchování je vzhledem k deformaci pēchovaného vzorku zanedbatelná.

b) Materiálový model: Materiál pēchovaných ocelových vzorků byl modelován podle Prandtlovy-Reusovy teorie plastického tečení s podmínkou plasticity HMM a s izotropním zpevněním. Model zahrnuje geometrické nelinearity související s velkými deformacemi. Naměřené křivky přetvárného odporu, tj. závislost skutečného napětí na skutečném přetvoření, byly pro oba zkoumané materiály přebrány z práce Konečný (1998).

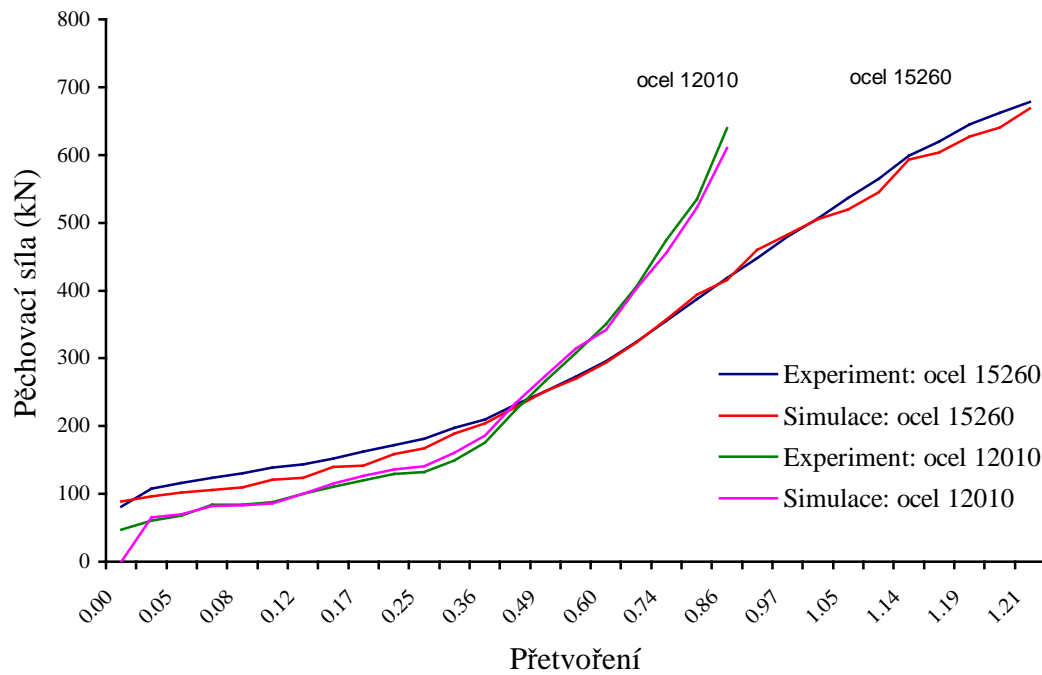
c) Geometrie, okrajové podmínky, zatížení: Vzhledem ke geometrii vzorků a danému zatížení v procesu pēchování představuje řešení napjatosti a deformace v průběhu pēchovací zkoušky rotačně-symetrickou úlohu se dvěma rovinami symetrie S využitím obou podmínek symetrie byla pro výpočty modelována jen (horní pravá) čtvrtina válce. Model je zatěžován předepsaným posuvem tuhého kontaktu (modeluje kovádro) ve směru proti ose válcového vzorku. Jednotlivé zatěžovací kroky (tj. posuvy uzlů kontaktu) odpovídají posuvům kovádel pēchovacího stroje při experimentech. V těchto krocích byly měřeny deformace vzorků.

V průběhu ladění matematického modelu bylo třeba provést velké množství testovacích a kontrolních úloh, aby byla zaručena jeho maximální věrohodnost a spolehlivost. Podstatná byla zejména verifikace dvou veličin – ověření průběhu lisovací síly a stanovení optimálního koeficientu tření  $f$  pro všechny tři režimy pēchování.

Nalezení optimální hodnoty koeficientu tření pro každý pēchovací režim spočívá v provedení řady parametrických simulací vzorku pro zvolený interval hodnot koeficientu tření  $f$ . Porovnává se naměřený průměr  $D_{\max e}$  ve středu vzorku s vypočteným průměrem  $D_{\max v}$  v okamžiku lomu a jako optimální hodnota koeficientu  $f$  se (v ideálním případě) bere hodnota, kdy jsou naměřený i vypočtený průměr  $D_{\max v}$  v okamžiku lomu totožné. Tyto parametrické simulace byly provedeny pro všechny vzorky a na jejich základě byly stanoveny následující hodnoty koeficientu tření  $f$  pro tři pēchovací režimy:  $f = 0.35$  pro drážkovaná kovádra,  $f = 0.23$  pro hladká kovádra a  $f = 0.05$  pro hladká kovádra s mazivem. Na obr. 1 je uveden příklad závislosti rozdílu naměřeného a vypočteného průměru  $D_{\max}$  na hodnotě koeficientu tření  $f$  pro vybrané hladké vzorky.



Obr. 1. Graf závislosti  $(D_{\max e} - D_{\max v}) = g(f)$  pro vybrané hladké vzorky

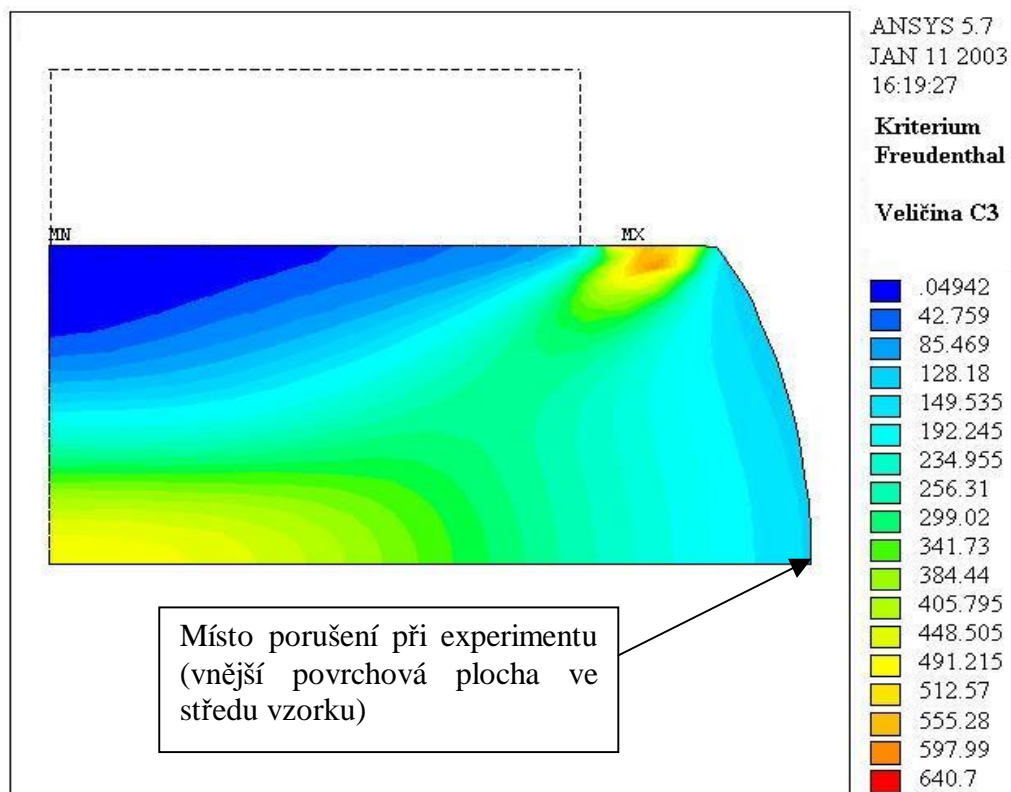


Obr. 2. Průběh pěchovací síly pro zkušební vzorky z materiálů 12010 a 15260

Pro ověření správnosti modelu bylo také nutné porovnat naměřený a vypočtený průběh pýchovací síly během pýchování pro oba zkoušené materiály. Za tímto účelem byla v laboratoři ÚST FSI v Brně provedena dvě zkušební pýchování vzorků z materiálů 12010 a 15260. Pýchování probíhalo s hladkými čelistmi s vrstvou maziva. V ANSYSu byly provedeny simulace obou těchto pýchovacích zkoušek s odpovídajícím koeficientem tření  $f = 0.05$  pro hladké čelisti s vrstvou maziva. V každém kroku jsme stanovili hodnoty reakčních sil, které by měly být shodné s hodnotami pýchovacích sil v odpovídajících krocích procesu pýchování. Na obr. 2 jsou vyneseny průběhy naměřených a vypočtených pýchovacích sil pro oba experimenty, které ukazují dobrou shodu mezi výpočtem a měřením.

### 5. Výsledky hodnocení vybraných kritérií tvárného lomu

Byla hodnocena následující kritéria tvárného lomu: kritérium maximálního tahového napětí, maximálního přetvoření, Freudenthal, Cockroft-Latham, hydrostatického napětí, Brozzo, Oh a Oyane. Pro názornou ilustraci metodiky hodnocení jednotlivých kritérií následují podrobné výsledky pro kritéria Freudenthal a Brozzo.



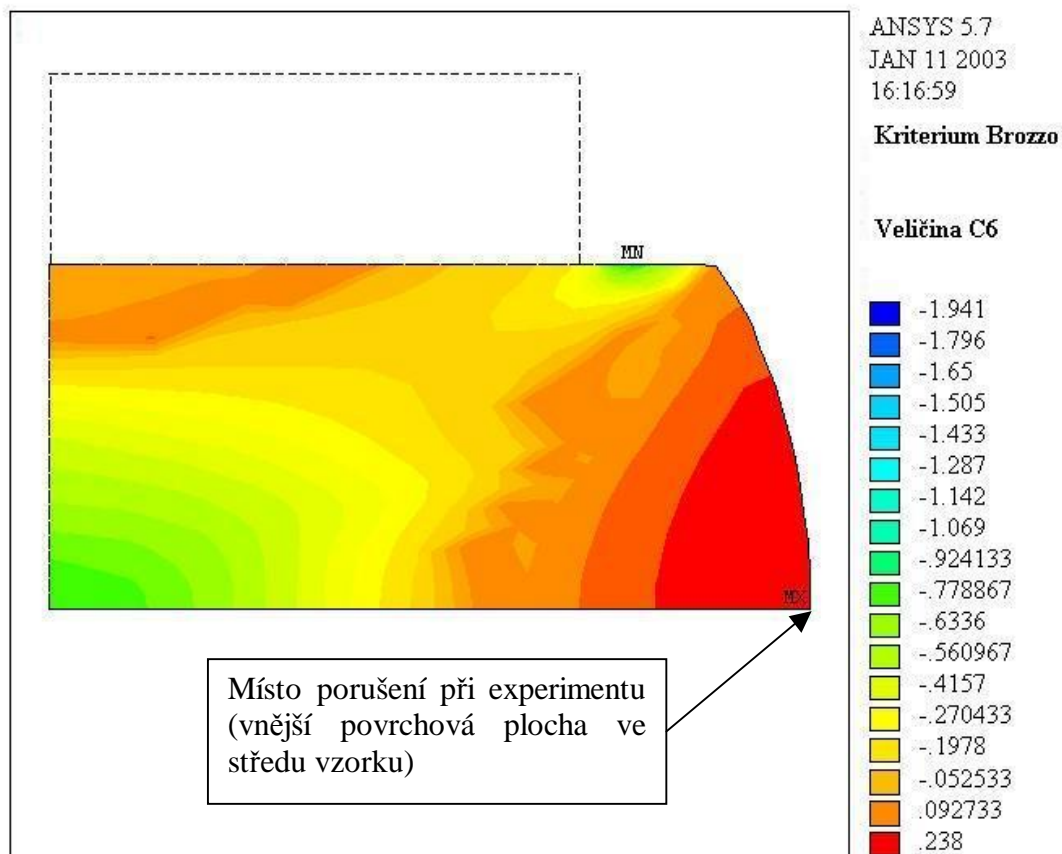
obr. 3. Kritérium Freudenthal – rozložení hodnot kritériální veličiny C3 po průřezu pýchovaného vzorku v okamžiku lomu

Podle kriteria **Freudenthal** je kritickou veličinou pro vznik plastického lomu deformační energie, která se v materiálu akumuluje během procesu deformace. K plastickému porušení dojde, jestliže deformační energie na jednotku objemu dosáhne během přetvárného procesu určité kritické hodnoty. Kriterium je definováno vztahem

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{S} d\bar{\epsilon} = C3 \quad (1)$$

Na obrázku 3 vidíme rozložení hodnot kritériální veličiny C3 v okamžiku lomu po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina průřezu). Veličina C3 představuje akumulovanou deformační energii (plastickou práci na jednotku objemu). Jak z obrázku vyplývá, její maximum nastává v horní části vnější obvodové plochy ve styku s kovadlem pěchovacího stroje, zatímco při experimentu dochází k lomu na vnějším obvodu ve středu válcového vzorku. Kriterium predikuje nesprávně místo vzniku tvárného lomu pro všechny provedené simulace pěchovacích experimentů.

Vzhledem k relativně široké základně provedených experimentů, které byly zpracovány v rámci disertační práce (2 materiály, interval poměrů  $h_0/d_0$  a třecí podmínky), opravňují dosažené výsledky k závěru, že kriterium Freudenthal nelze obecně úspěšně použít při identifikaci místa porušení a určení mezí tvažitelnosti.



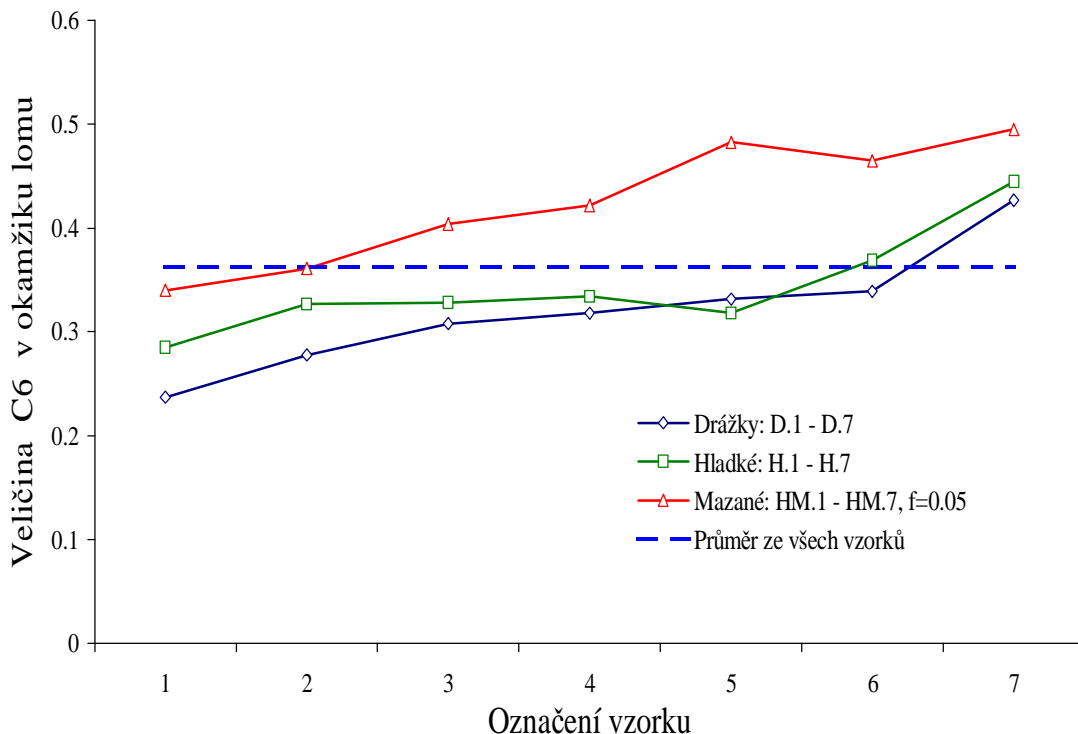
obr. 4. Kriterium Brozzo – rozložení hodnot kritériální veličiny C6 po průřezu pěchovaného vzorku v okamžiku lomu

Kriterium **Brozzo** obsahuje explicitní vliv hydrostatického napětí. Hodnota kritériální veličiny  $C_6$  závisí na maximálním hlavním tahovém napětí a na hydrostatické složce napjatosti. Kriterium je definováno vztahem

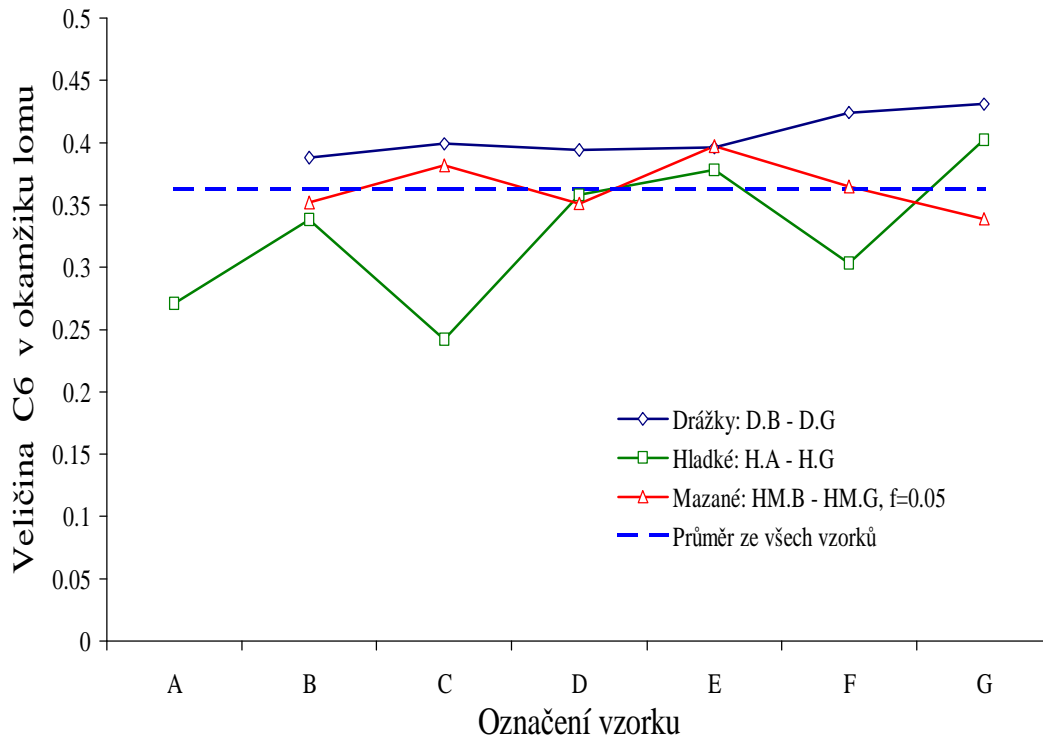
$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2s_1}{3(s_1 - s_H)} d\bar{\epsilon} = C_6 \quad (2)$$

Z rozložení hodnot kritériální veličiny  $C_6$  po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina průřezu) na obr. 4 je zřejmé, že maximum z hodnot definičního integrálu kriteriální veličiny nastává na vnějším obvodu ve středu válcového vzorku, což je souladu experimentem. V této oblasti dosahují při pěchování vysokých hodnot obvodová tahová napětí  $s_1$ , která mají vzhledem ke konstrukci definičního vztahu kriteriální veličiny podstatný vliv na nárůst akumulované kritériální veličiny  $C_6$ . Minimum hodnot kritériální veličiny  $C_6$  nastane v horní části vnější obvodové plochy ve styku s kovadlem pěchovacího stroje. V této oblasti jsou během pěchování všechna hlavní napětí tlaková a proto zde dosahuje kritériální veličina  $C_6$  záporných hodnot.

Ze srovnání výsledků pěchovacích experimentů a jejich numerických simulací plyne, že kriterium Brozzo bylo úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny simulace pěchovaných vzorků z obou zkoumaných materiálů.



Obr. 5. Kriterium Brozzo - hodnoty kritériální veličiny  $C_6$  v okamžiku lomu pro všechny vzorky z materiálu 12010



Obr. 6. Kriterium Brozzo - hodnoty kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu pro všechny vzorky z materiálu 15260

#### Kvantitativní hodnocení kriteria – lomová hodnota veličiny C6

Na obrázcích 5 a 6 jsou uvedeny hodnoty akumulované kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu pro všechny vzorky – obr. 5 pro materiál 12010, obr. 6 pro materiál 15260.

Tab. 1. Kriterium Brozzo - statistické vyhodnocení kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu

Kriterium Brozzo		Lomové hodnoty kritériální veličiny C6						
		Materiál 12010			Materiál 15260			
		průměr [-]	směrodatná odchylka [-]	variační koeficient		průměr [-]	směrodatná odchylka [-]	variační koeficient
1	D <sub>1-7</sub>	0,32	0,06	0,18	D <sub>B-G</sub>	0,41	0,02	0,04
2	H <sub>1-7</sub>	0,34	0,05	0,15	H <sub>A-G</sub>	0,33	0,06	0,18
2	HM <sub>1-7</sub>	0,42	0,06	0,14	HM <sub>B-G</sub>	0,36	0,02	0,06
4	D <sub>1-7</sub> +H <sub>1-7</sub> +HM <sub>1-7</sub>	0,36	0,07	0,19	D <sub>B-G</sub> +H <sub>A-G</sub> +HM <sub>B-G</sub>	0,36	0,05	0,14

Tab. 1 obsahuje jednoduché statistické hodnocení výsledků kritériální veličiny C6. V každém řádku tabulky jsou uvedeny veličiny pro jiný statistický soubor zkoumaných vzorků: 1. řádek uvádí hodnoty pro drážkované vzorky z daného materiálu, 2. řádek pro hladké vzorky, 3. řádek pro mazané vzorky a 4. řádek uvádí hodnoty pro všechny vzorky. Z tabulky vyplývá, že



průměrná lomová hodnota kritériální veličiny C6 při započtení všech vzorků je  $C6 = 0.36$  s hodnotou variačního koeficientu  $Vk = 0.19$  pro materiál 12010 a  $C6 = 0.36$  s hodnotou variačního koeficientu  $Vk = 0.14$  pro materiál 15260.

Na základě dosažených výsledků je možné konstatovat, že kritérium Brozzo bylo úspěšné při predikci místa tvárného lomu pro všechny simulace pěchovaných vzorků z obou zkoumaných materiálů a veličina C6 dobře charakterizuje proces vzniku tvárného lomu pro materiály 12010 a 15260.

Z analýzy všech výsledků vyplývají pro jednotlivá kritéria následující závěry:

- § kritéria **maximálního přetvoření** a **Freudenthal** byla **neúspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů
- § kritérium **hydrostatického napětí** bylo při predikci místa vzniku tvárného lomu **úspěšné pouze pro některé pěchované vzorky**
- § kritérium **Ghosh** bylo **úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozptyl hodnot kritériální konstanty C8 je však pro oba materiály vysoký s hodnotou variačního koeficientu  $Vk \geq 0.5$ . **Kritérium proto nelze použít obecně pro stanovení limitů tvařitelnosti.**
- § kritérium **maximálního tahového napětí** bylo **úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozbor lomových hodnot kritériální veličiny C1 však ukazuje podstatnou závislost na podmínkách experimentu. **Obecně kritérium nelze použít při stanovení limitů tvařitelnosti.**
- § kritéria **Cockroft-Latham, Brozzo, Oh a Oyane** byla **úspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozbor hodnot kritériálních veličin u těchto kritérií umožňuje s technicky přijatelnou mírou přesnosti vyslovit předpoklad, že **tyto kritériální veličiny dobře charakterizují rozvoj poškození a vznik tvárného lomu pro oba studované materiály.**

Přehledné výsledky úspěšnosti všech hodnocených kritérií jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2. Hodnocení úspěšnosti zkoumaných kritérií tvárného lomu

(x úspěšné o neúspěšné x\* částečně úspěšné - nezkoumáno)

Hodnocené hledisko		Hodnocená kritéria								
		maximálního tahového napětí	maximálního přetvoření	Freudenthal	Cockroft-Latham	hydrostatického napětí	Brozzo	Oh	Ghosh	Oyane
Materiál 12010	Identifikace místa lomu	x	o	o	x	x*	x	x	x	x
	Určení limitů tvařitelnosti	o	-	-	x	-	x	x	o	x
Materiál 15260	Identifikace místa lomu	x	o	o	x	x*	x	x	x	x
	Určení limitů tvařitelnosti	o	-	-	x	-	x	x	o	x

## 6. Závěr

Vybraná skupina kritérií tvárného lomu byla hodnocena jak z hlediska úspěšnosti při predikci místa vzniku porušení tak z pohledu možnosti jejich obecné aplikace ke stanovení limitů tvařitelnosti. Na základě porovnání provedených experimentů pýchovacích zkoušek a jejich numerických simulací lze mezi kritéria tvárného lomu, **úspěšná z obou hodnocených hledisek**, zařadit kritéria **Cockroft-Latham, Brozzo, Oh a Oyane**. Ostatní hodnocená kritéria byla neúspěšná buď při určení místa vzniku lomu nebo z hlediska možnosti jejich obecného použití při stanovení limitů tvařitelnosti. Úspěšná kritéria byla zařazena do postprocesoru MKP a aplikována pro predikci tvárného lomu na simulaci procesu výroby šroubů tvářením za studena. I v tomto případě byla na základě srovnání s provozními výsledky úspěšná jak při určení místa vzniku porušení, tak při stanovení limitů tvařitelnosti.

## 7. Literatura

- S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess, G. W. Rowe (1990): Fracture prediction in plastic deformation processes. *Int. J. Mech. Sci.*
- M. G. Cockroft, D. J. Latham (1950): Ductility and the Workability of metals. *J. Inst. Met.* 1968.
- A. M. Freudenthal(1950): *The Inelastic Behavior of Solids*. Wiley.
- A. K. Ghosh (1976): A criterion for ductile fracture in sheets under biaxial loading. *Metall. Trans.*
- R. Konečný (1998): Analýza meze tvařitelnosti polotovarů z vybrané oceli. Diplomová práce, FS VUT Brno.
- S. I. Oh, S. Kobayshi (1976): *Theories of Flow and Fracture in Metal-Forming Processes*. Technical Report, Air Force Material Laboratory, OH.
- M.Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima (1980): Criteria for ductile fracture and their applications. *Journal of Mechanical Working Technology*, 4.
- A. S. Wifi (1998): On the finite element analysis of workability limits in metal forming processes. *Advances in Materials Processing and Technologies*, Kuala-Lumpur.