

## COMPUTER SIMULATION OF DUCTILE FRACTURE IN ROD CUTTING PROCESS

J. Hůlka\*, J. Petruška\*

**Summary:** *Rod cutting is an important phase of many technological procedures, which includes fast dynamic process of ductile material fracture. Explicit FE solvers seem to be the best tool for computational simulation of such problems. In this paper, the simulation was performed by ABAQUS/Explicit, version 6.5. Finite element models were created using two types of material failure models: limit strain and Johnson-Cook model. Results of the simulation – time history of the cutting force and development of the fracture surface – were compared with experiments.*

### 1. Úvod

Jednou z prvních operací při zpracování tyčového polotovaru je stříhání. Jedná se přitom většinou o velmi rychlý děj, při kterém dochází k cílenému porušování soudržnosti materiálu v určitém místě. Požadována je kvalitní, co možná nejméně deformovaná střížná plocha. Na řešení takového typu úloh se v poslední době používá výhradně numerických simulací, a to explicitní metody konečných prvků. Důvodem je vhodnější implementace modelů porušování a kontaktů na nově vzniklé plochy materiálu.

Nejrozšířenější přístup modelování porušování materiálu je vytvoření konečnoprvkové sítě a předepsání lomového kritéria, přičemž při naplnění kritéria v elementu se element vymaže. Často se užívá i adaptivní tvorba sítě. Tento způsob modelování s sebou nese řadu negativ, proto byly vyvinuty i bezsíťové metody. V programu LS-Dyna jsou aplikovány bezsíťové metody SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), EFG (Element Free Galerkin) a XFEM (eXtended FEM).

Výpočty k této práci byly prováděny v programu ABAQUS/Explicit. Ten má již v sobě obsaženo několik modelů materiálu a modelů porušování, které umožňují zahrnout porušování do výpočtu. Tato práce se zabývá dvěma z nich:

- Kritérium redukovaného přetvoření
- Kritérium Johnson-Cook

---

<sup>1</sup>Ing. Jiří Hůlka: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2, 619 69 Brno tel.: +420-777838541; e-mail: [hulka@c-box.cz](mailto:hulka@c-box.cz)

<sup>2</sup>Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2, 619 69 Brno tel.: +420-541142858; e-mail: [petruska@fme.vutbr.cz](mailto:petruska@fme.vutbr.cz)

Kritéria porušování jsou nejslabším článkem v celé výpočtové simulaci. Žádný z modelů není univerzální a každý nese svá úskalí při aplikaci.

## 2. Modely materiálů

Výše uvedené dva modely porušování jsou aplikovány ve většině komerčních explicitních programů, jako jsou například ABAQUS, LS-DYNA, PAMCRASH a AUTODYN.

Prvním modelem je kritérium redukovaného přetvoření. Přestože je známo, že toto kritérium zcela pomíjí závislost procesu porušování na stavu napjatosti, je stále velmi používané pro svou jednoduchost při kalibraci a praktickém použití. K porušení dojde tehdy, když redukované přetvoření dosáhne své lomové hodnoty. Redukované přetvoření je charakterizováno takto:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}$$

Druhým kritériem porušování je model Johnson-Cook. Porušování u tohoto modelu je definováno takto: k tvárnému porušení dojde tehdy, pokud lomový parametr  $D$  dosáhne jednotkové velikosti

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon^f},$$

kde  $\Delta \bar{\varepsilon}^p$  je přírůstek redukovaného plastického přetvoření a  $\varepsilon^f$  je lomové přetvoření, které je definováno rovnicí:

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta))(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*)$$

dalšími členy jsou  $D_1$ - $D_5$  materiálové konstanty

$\eta$  triaxialita napětí

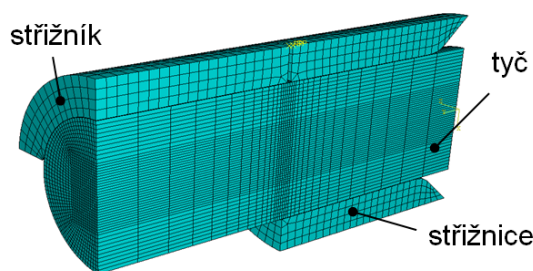
$\dot{\varepsilon}^*$  rychlost přetvoření

$T^*$  homologovaná teplota

Materiálové konstanty se musí určit z tahových a tlakových zkoušek materiálu a to při různých teplotách a rychlosti deformace. Často se proto kritérium redukuje pouze na první tři konstanty, jak tomu bude i v našem případě, protože se jedná o stříh za pokojové teploty na klikovém lisu.

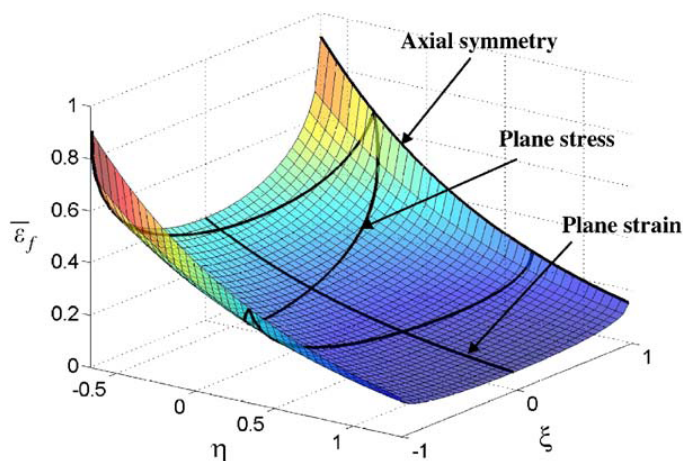
## 3. Výpočtové modelování porušování

U výpočtového modelu bylo využito rovinné symetrie. Střížník a střížnice byly simulovány jako tuhá tělesa, neboť jejich mez kluzu v tlaku (materiálu 19 437.4) se pohybuje až do 3000 MPa, přičemž mez kluzu stříhaného materiálu 12 050.3 je 375 MPa. Dále byla zahuštěna konečnoprvková síť v místě stříhu na velikost elementu 0.2 mm, což je vidět na obrázku 1, a to na základě testovací úlohy vlivu hrubosti sítě na reakční síly.



Obrázek 1: Model konečnoprvkové sítě

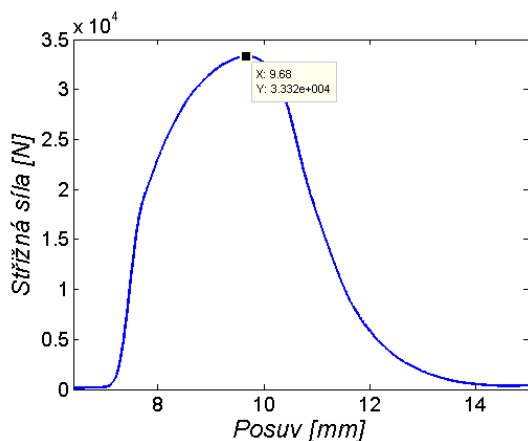
Při testovací úloze byl však zjištěn nesoulad kritéria J-C s předpokládaným průběhem porušování, a proto byla provedena testovací tahová úloha na triaxialitu napětí (obr. 2). Na základě testu byla zjištěna rozdílnost definice napěťové triaxiality v různých komerčních programech.



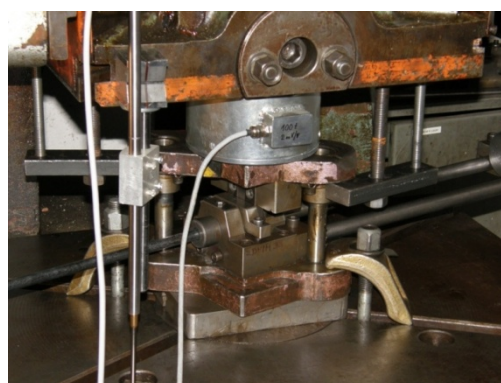
Obrázek 2: Funkce lomového přetvoření v závislosti na napěťové triaxialitě a Lodeho parametru – Wierzbicki [2]

#### 4. Experiment

Ve spolupráci s firmou J-VST s r.o. byl proveden experiment v poloprovozních podmínkách, který nám posloužil jako verifikátor provedené numerické simulace. Dynamometr zaznamenávající průběh střížné síly byl umístěn nad střížnou sestavou a snímač posunutí beranu byl přichycen přímo na beranu lisu (obr. 4). Bylo provedeno několik kompletních přestřihnutí a střížné síly byly statisticky zpracovány (obr. 3).



Obrázek 3: Průběh střížné síly

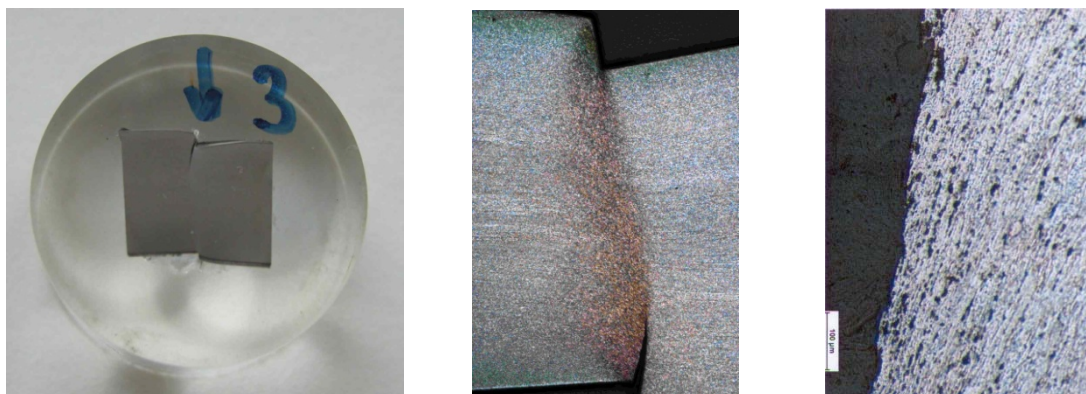


Obrázek 4: Experimentální soustava

Dále bylo provedeno několik stříhů s různou velikostí posunutí. Nástřihy a přestřížené vzorky byly dále podrobeny metalografickému rozboru (obr. 5) pro rozbor plastického toku materiálu. Z metalografického rozboru vyplývá:

- Plastická deformace probíhá v úzkém pásu
- Střížná plocha má typický tvar křivky „S“
- Jediným pozorovaným mechanismem porušení je tvárný smykový mechanismus s nukleací a rozvojem dutin

Struktura materiálu je feriticko-karbidická, což odpovídá žíhanému materiálu na měkko.



Obrázek 5: Metalografický vzorek, makrostruktura a střížná hrana

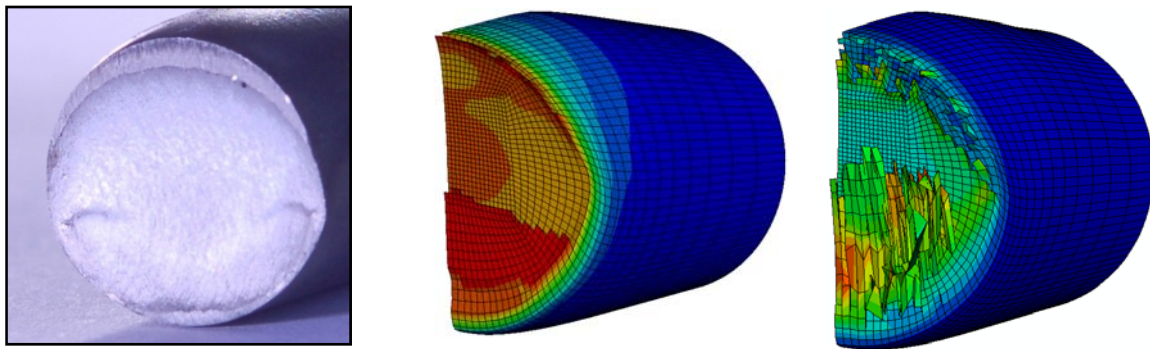
## 5. Prezentace výsledků

V této části se budeme věnovat porovnání výsledků obou modelů jak vůči sobě, tak s experimentem. Kritérium porušení by nemělo poskytovat pouze dobrou kvalitativní a kvantitativní shodu střížných sil s experimentem, ale mělo by i dobře popisovat lomovou plochu.

Úspěšnost jednotlivých kritérií simulace je víceméně dána počtem a rozmístěním vymazaných elementů. Vymazané elementy by měly charakterizovat místo a rozložení trhlin, neboť ovlivňují velikost střížných sil. Při vymazávání elementů však dochází k ztracení se materiálu. K tomuto jevu nejvíce dochází při tváření materiálu, jak potvrdil Bořkovec [1].

Při porovnávání střížných ploch jsme vycházeli z porovnání finální střížné plochy (obr. 6) a z rozvoje trhliny. Nejbližší střížnou plochu experimentu a průběh trhliny vykazuje kritérium redukovaného přetvoření. U kritéria J-C dochází k iniciaci trhlin u hran střížných nástrojů, kde je největší tahové napětí. Trhliny se však poté zastaví a další iniciace je ve středu vzorku, kde je prostý smyk. Odtud postupuje trhlina k vnějšímu povrchu.

Lze konstatovat, že kritérium redukovaného přetvoření popisuje lépe tvar střížné plochy.



Obrázek 6: Střížné plochy experimentu, kritéria redukovaného přetvoření a J-C kritéria

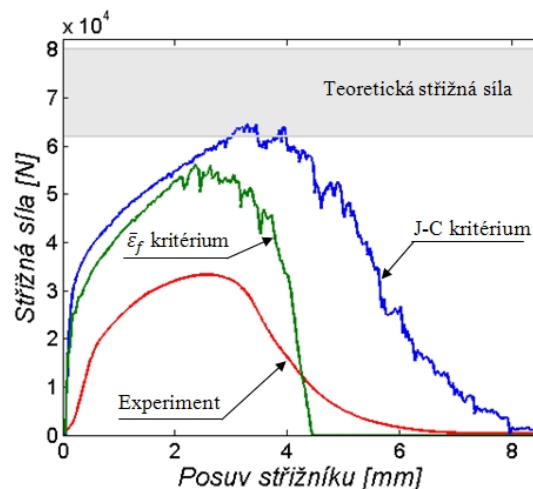
Při vyhodnocování střížných sil jsou porovnávány výpočtové reakční střížné síly se střížnou silou změřenou při experimentu a teoretickou střížnou silou (obr. 7), která je definována jako

$$F_s = n \cdot S \cdot \tau_s$$

kde  $F_s$  [N] je střížná síla,  $n$  je koeficient zahrnující opotřebení nástroje a nabývá hodnot  $n = (1,2 \div 1,55)$  [-],  $S$  [mm<sup>2</sup>] je plocha stříhu,  $\tau_s$  [MPa] je střížný odpor a  $R_m$  [MPa] je mez pevnosti stříhaného materiálu.

$$\tau_s = 0,8 \cdot R_m$$

Střížné síly u obou použitých kritérií mají z počátku velmi podobný trend. Zanedbáme-li u experimentu elastické deformace lisu, nástrojů a vymezení vůlí celé sestavy, je i trend experimentální střížné síly podobný. U kritéria redukovaného přetvoření nastane porušování dříve a křivky střížných sil se rozcházejí. Kvalitativně se experimentu nejvíce přibližuje kritérium J-C, avšak velikosti střížných sil jsou téměř dvojnásobné.



Obrázek 7: Střížné síly

## 6. Závěr

Výsledky ukazují, že model založený na redukovaném přetvoření dává věrohodný tvar střížné plochy, ale ne však velikost střížné síly. Tvar střížné síly lépe popisuje kritérium J-C. Pro objasnění důvodu tak vysokých střížných sil byla provedena tahová zkouška materiálu, která odhalila nižší mez pevnosti materiálu, než pro jakou byly modely kalibrovány.

Další práce v této oblasti bude zaměřena na kalibraci modelů materiálu z tahové zkoušky a aplikaci dalších modelů porušování, jako jsou Bao-Weirzbicki, Rice-Tracey a RTCL.

## 7. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu GAČR 101/09/1630

## 8. Literatura

- [1] Bořkovec, J.(2006), *Výpočtová simulace procesu dělení materiálu*. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [2] Wierzbicki, T., Bao, T., Lee, Y., W., Bai, Y.Y. (2005) *Calibration and evaluation seven fracture models*. International Journal of Mechanical Sciences.
- [3] Teng, X., Wierzbicki, T.(2006), *Evaluation of fracture models in high velocity perforation*. Cambridge
- [4] Forejt, M., Píška, M. (2006), *Teorie obrábění a nástroje*. CERM, Brno