



## COMPUTER SIMULATION OF MATERIAL SEPARATION PROCESSES

Jan Bořkovec<sup>1</sup>, Jindřich Petruška<sup>2</sup>

*Summary: Despite long evolution dating long time back, fracture processes still remain a big challenge for engineers and researchers all over the world. Lately, together with “traditional” elements erosion method new meshless methods Smooth Particle Hydrodynamics and Element Free Galerkin were introduced to well established finite element code LS-DYNA. In this field it has probably largest selection of material failure possibilities. This work is intended to outline different methods and qualitatively compare the result with the experiment of production operation of bold head trimming.*

### 1. Úvod

V posledních letech dochází k velkému rozvoji výpočtových programů metody konečných prvků. Na velmi vysoké úrovni byly zvládnuty úlohy statické i dynamické včetně zahrnutí různých nelinearit, do programových balíčků byly zahrnuty také bezsít'ové metody a další pokročilé funkce. Simulace porušování materiálu však zůstává nadále výzvou pro vědeckou oblast i tvůrce programů. Jedním z tradičních výpočetních balíčků je LS-Dyna, která v sobě obsahuje několik možností pro simulování porušování materiálu.

- Explicitně formulovanou metodu konečných prvků (MKP) s adaptivní tvorbou sítě a možností vymazávání prvků.
- Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) – bezsít'ová metoda
- Element Free Galerkin (EFG) – bezsít'ová metoda

Pro tuto práci byla použita LS-Dyna verze 970 vydání 5434a, která je součástí programu ANSYS 10.0.

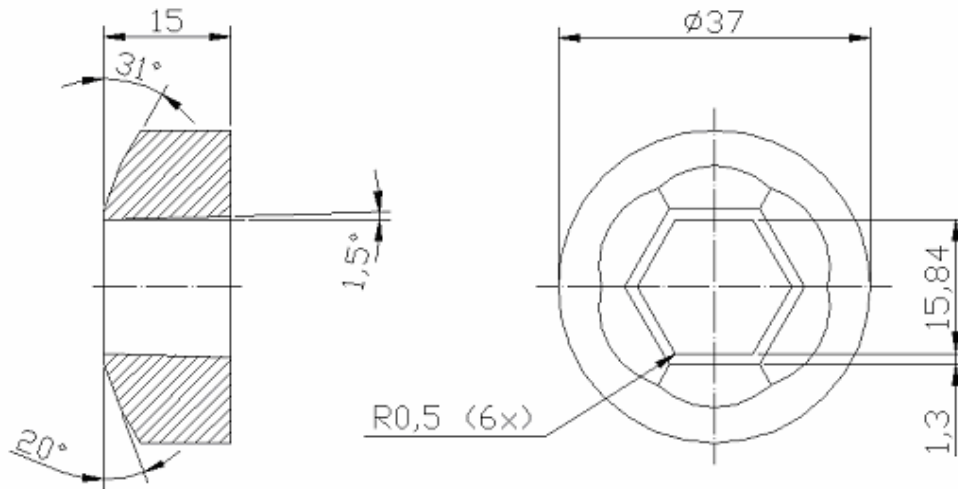
Výsledky jednotlivých modelů budou porovnány a zhodnoceny na základě experimentu pro technologickou operaci ostřihování hlav šroubů, která je poslední tvarovou operací při výrobě šroubů na postupových automatech. Při tomto procesu je nejprve tažením vytvořen dřík šroubu, poté je koncová část spěchována. Tím se vytvoří hlavu kruhového průřezu, které se následně ostříhne šestihranným nástrojem (obrázek 1). Operace ostřihování hlav šroubů je

---

<sup>1</sup> Ing. Jan Bořkovec: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2, 616 69 Brno tel.: +420-732687591, e-mail: jan.borkovec@centrum.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

specifická v tom, že zátěžný stav je výrazně v tlakové oblasti, kde se problémy jednotlivých metod a kritérií porušování projeví vždy nejvíce (Bořkovec 2006).

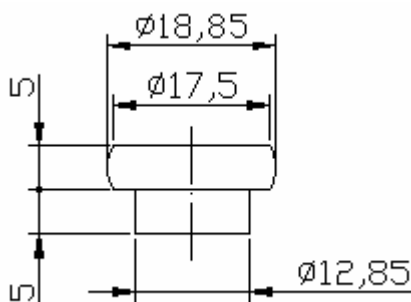


Obrázek 1: Ostřihovací matrice OK16

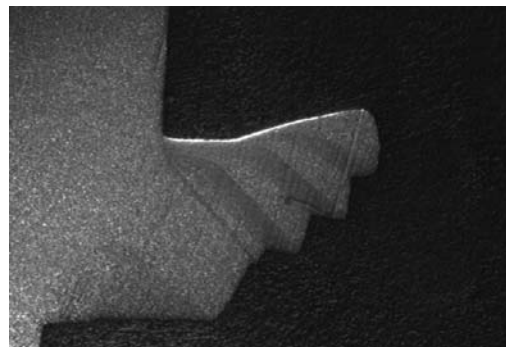
## 2. Experiment

Ve spolupráci s firmou J-VST spol. s r.o. byl proveden experiment v poloprovozních podmínkách. Pod sestavu nástroj-šroub-deska se umístil snímač síly, kterým se zaznamenával průběh střížných sil. Provedeno bylo několik stříhů s různou velikostí posuvu střížníku, vždy v několika opakováních.

K dispozici byly polotovary s rovnou hlavou. Jejich tvar a rozměry můžeme vidět na obr. 2, ovšem již se dříkem zkráceným pro potřeby výpočtového modelování. Šrouby byly vyrobeny z materiálu AISI S 174 00, pro který je ekvivalentem ocel 17 351 (mez kluzu 800 MPa, mez pevnosti 1050 MPa, kontrakce 45%).



Obrázek 2: Geometrie polotovaru



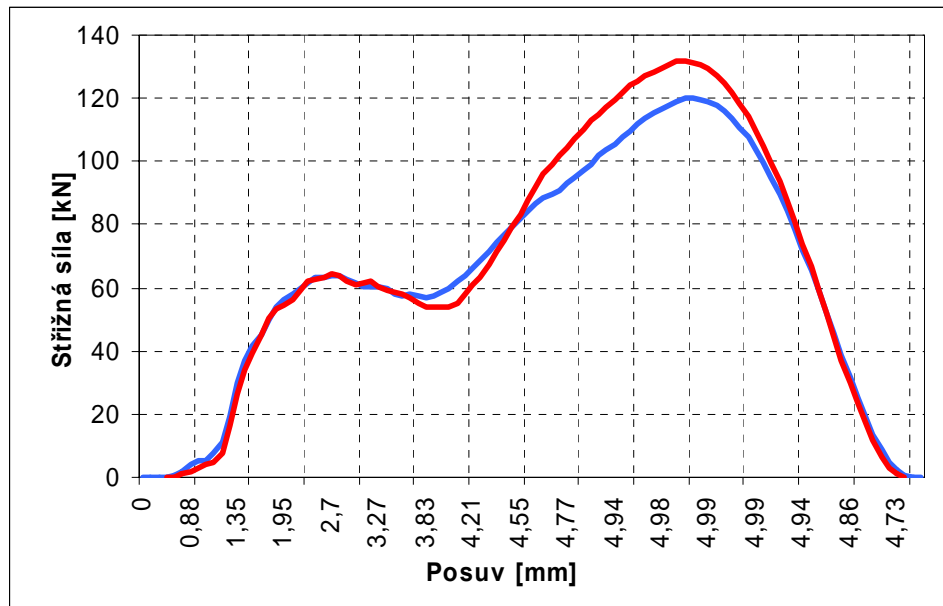
Obrázek 3: Metalografický výbrus

Z měření byly zjištěny průběhy sil, viz graf 1. Jak je vidět, tak střížná síla nejprve stoupá, po překonání prvotního odporu mírně poklesne a poté v důsledku pěchování odděleného materiálu opět roste a to velmi výrazně.

Dále byly předány vzorky k metalografickému rozboru. Vzorky byly naleptány, aby se zviditelnila struktura materiálu. Makrostruktura ostříženého materiálu je patrná z obr. 3, ze které mimo jiné vyplývají tyto skutečnosti:

- patrný tok materiálu při pěníování hlavy
- pozorovatelné skluzové pásy a korespondující stupně při tvorbě „třísky“.

Skluzové pásy mají nespojitě (stupňovitě) vyústění na volný povrch. Dále bylo možné pozorovat vznik trhlin ve skluzových pásích a také vznik mikrodotin, jako první fáze porušování.



Obrázek 4: Průběh sřížných sil

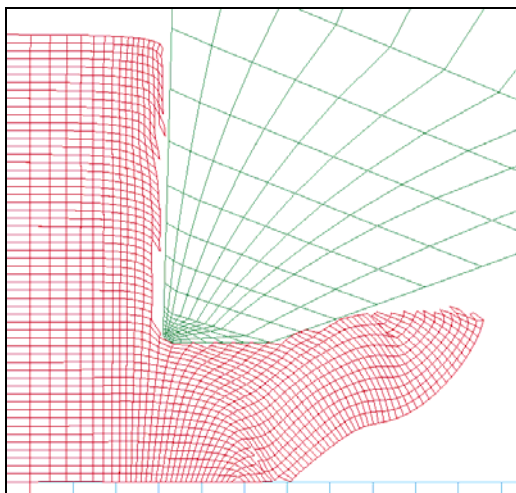
### 3. Odmazávání elementů

Nejčastějším způsobem jak simulovat porušování v metodě konečných prvků je vymazáním elementů, na kterých bylo dosaženo lomového kritéria. Tato metoda je v současnosti stále nejvíce používána, protože její aplikace je poměrně jednoduchá a je standardně obsažena ve všech explicitních výpočtových systémech. Její podstatou je, že po dosažení kritéria porušení dochází k postupnému snižování napětí na prvku (kvůli zmírnění rázů) a poté je prvek odstraněn z výpočtu (silně deformovaný prvek by snižoval časový krok).

V průběhu doby bylo vytvořeno opravdu velké množství různých kritérií, z nichž pouze některá byla implementována do komerčních programů. Moderní kritéria a modely porušování jsou velmi dobře popsány v práci (Wierzbicki 2005) a to včetně jejich kalibrace. V LS-DYNE jsou přístupná tato kritéria a modely vhodné pro tvárné porušování kovů:

- Kritérium redukovaného přetvoření
- Johnson-Cook
- DC - RC (pouze pro skořepinové prvky)
- Gurson (pouze pro skořepinové prvky)
- Add erosion (hlavní napětí, hlavní přetvoření, tlak, smykové přetvoření, redukované napětí)

Volba vhodného kritéria je velice důležitá pro věrohodné výsledky. Ukázalo se, že z výše zmíněných modelů porušování dosahuje v tlakové oblasti zatěžování nejlepších výsledků model EWK – obdoba RC-DC v PAMCRASHi (Bořkovec 2006). Ovšem v této práci použít nejde a proto jsme pro ilustraci použili kritérium redukovaného přetvoření.



Obrázek 5: Odmazávání elementů - kritérium redukovaného přetvoření

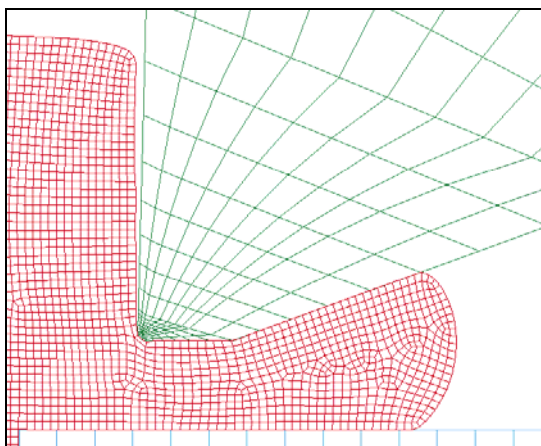
Problém při jejím použití nastává pokud dochází k velkým deformacím (což je při porušování téměř vždy). Jednotlivé prvky v síti se deformují a odchylují se od ideálního tvaru (krychle, čtverec). Numerické vlastnosti deformovaných prvků jsou velmi špatné a výrazně ovlivňují přesnost výpočtu.

#### 4. Adaptivní tvorba sítě

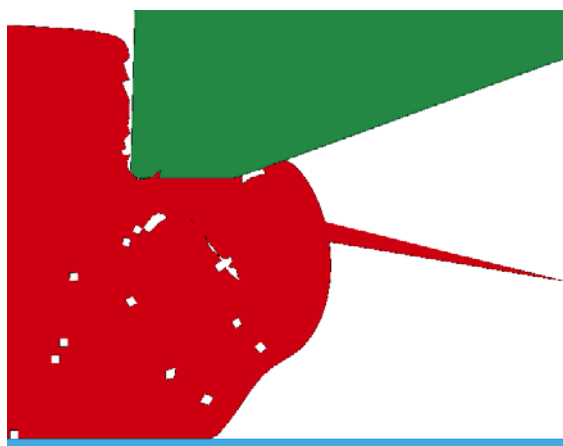
Pomocí adaptivní tvorby sítě, se můžeme vyhnout problémům s přílišnou deformací sítě a špatnými numerickými vlastnostmi prvků. Na druhou stranu vyvstane nutnost mít algoritmus, který automaticky vytvoří novou síť a následně na tuto síť namapuje pole napětí, přetvoření a dalších veličin (porušení, teplota). Tento proces je časově náročný a interpolací veličin dochází ke snížení přesnosti výpočtu. Tyto nevýhody se projevují více u složitých 3D výpočtů.

V zásadě jsou použity dva přístupy, jak využít adaptivní tvorbu sítě pro problémy dělení materiálu. První z nich je možné použít, když nevznikají žádné vnitřní trhliny a volný povrch vzniká přímo v místě působení nástroje – to je případ obrábění s kontinuální třískou. Při těchto aplikacích je v určitých intervalech vytvořena nová síť, která „ustupuje před nástrojem“ – viz Obrázek 6. Druhým je tvorba velmi jemné sítě v místě trhliny, která postihne její tvar. Při růstu trhliny je potřeba vytvořit novou síť respektující vznik nového volného povrchu. Tento přístup je ovšem o mnoho náročnější, není standardně dostupný a proto jsou nutné zásahy do programového kódu.

Pokus spojit metodu odmazávání elementů s výhodami rovnoměrnosti nové sítě selhal na špatné implementaci v této verzi LS-Dynu – viz obrázek 7. Podle oficiálních zpráv výrobce by měla být tato chyba v nových verzích odstraněna.



Obrázek 6: Adaptivní síť



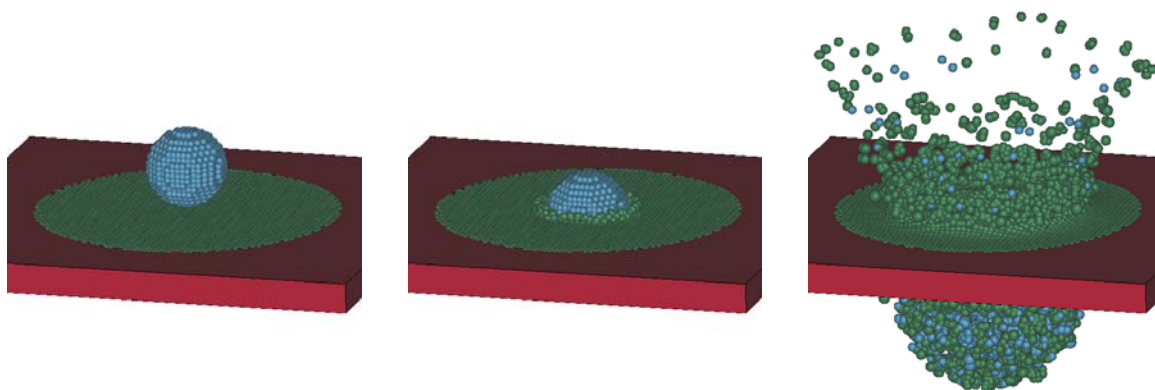
Obrázek 7: Adaptivní síť s porušováním

Největší časovou zátěží při tvorbě adaptivní sítě je v MKP nutnost vytvoření prvků, tzn. v síti jsou předdefinovaná spojení mezi jednotlivými uzly. Jednou z možností, jak se vyhnout těmto těžkostem je přejít na bezsít'ové metody, které potřebují pouze uzly nikoli elementy, proto je adaptivní tvorba sítě efektivnější.

## 5. Smooth Particle Hydrodynamics

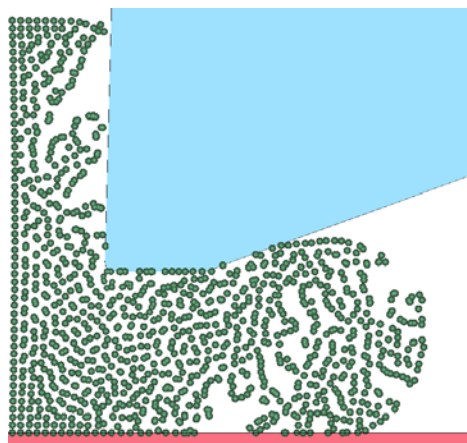
Jednou z prvních bezsít'ových metod byla metoda Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

Tato metoda je vhodná hlavně pro modelování tekutin. Kovy a jejich porušování je účinné popsat SPH metodou zejména při extrémně vysokých rychlostech deformace, kdy se už kov chová podobně jako tekutina. To je například při průstřelech plechů, kde k porušování dochází mechanismem spalace (tříštění) – viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Náráz projektilu rychlostí 6,18 km/s

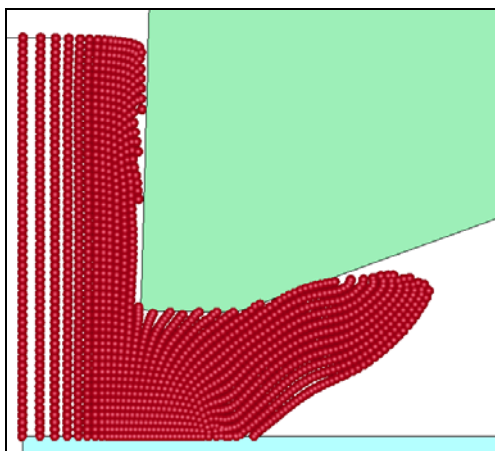
Na stránkách [www.dynaexamples.com](http://www.dynaexamples.com) jsou k vidění i příklady použití SPH na modelování Taylorova testu, které při porovnání s metodou konečných prvků (dále také MKP) vykazují velmi dobrou shodu. Proto jsme se pokusili tuto metodu použít i pro simulaci procesu ostříhování. Zde nastal problém v tom, že SPH uzly jsou ovlivňovány všemi uzly, které jsou v určitém okolí, a nezáleží, zda s ním sousedily na počátku vypočtu. Održený materiál se tedy může připojit znovu na jiném místě. Tento přístup je logický u kapalin, ovšem pro simulaci tuhých materiálů není použitelný.



Obrázek 9: Ostřihování pomocí SPH částic

## 6. Element Free Galerkin

Další bezsít'ovou metodou, která byla vyvinuta přímo pro pevné materiály je Element Free Galerkinova metoda (EFG). V LS-Dyně je tato metoda implementována tak, že do výpočtu vstupují klasické elementy, ze kterých jsou poté automaticky vygenerovány uzly EFG metody. Důvodem je to, že k integraci diferenciálních rovnic je potřeba integrační síť (background mesh), která je shodná se sítí elementů. Pro hlubší seznámení s touto metodou doporučujeme přečíst výborně napsanou práci (Kambur 2004).

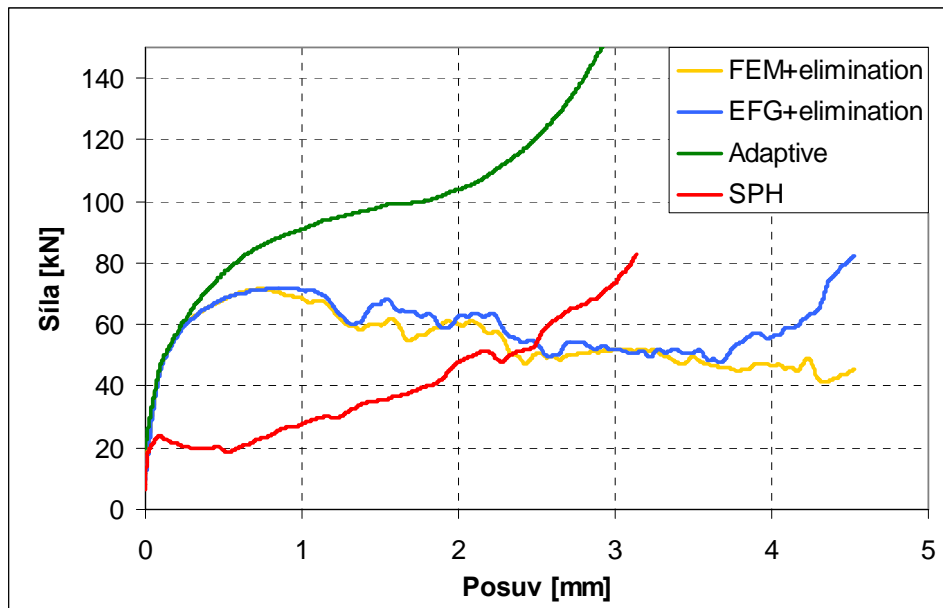


Obrázek 10: EFG s kritériem redukovaného přetvoření

Vývojoví pracovníci LS-Dyny (Wu 2006) z Livermore Software Technology Corporation (LSTC) slibují vývoj nových adaptivních bezsít'ových algoritmů a XFEM (eXtended FEM) porušení. Takovéto nástroje by umožnily výrazný kvalitativní posun při modelování šíření obecné trhliny.

## 7. Porovnání střížných sil

Další závěry můžeme vyvozit z posouzení průběhu střížných sil. Z experimentálního průběhu sil (Obrázek 4) je možné pozorovat dva vrcholy, které budeme hledat i ve výsledcích výpočtu. Porovnání je to čistě kvalitativní. Ze zjednodušené 2D úlohy není možné jednoduše stanovit velikosti střížných sil pro celý šroub (úloha není osově symetrická).



Obrázek 11: Porovnání filtrovaného průběhu střížných sil

Průběh sil při adaptivní tvorbě sítě je velice strmý, protože zde nedochází k žádnému porušování. Metoda SPH má velice malý první vrchol vlivem tahové nestability této metody, poté síla stále vzrůstá (metoda nemá žádné porušování v tlakové oblasti). Velice zajímavé zjištění je, že EFG metoda je při použití naprosto stejných vstupních parametrů jako klasická MKP schopná simulovat proces přesněji. Zřejmě je to zejména z koncové fáze ostříhování, kdy dochází k silnému pýchování ostříženého materiálu mezi nástroj a podpěrnou desku.

## 8. Závěr

V předložené práci byly představeny možnosti výpočetního programu LS-DYNA v oblasti simulací porušování soudržnosti materiálu. K dispozici jsou tyto hlavní možnosti – klasická metoda konečných prvků s vymazáváním prvků a adaptivní tvorbou sítě, metoda Smooth Particle Hydrodynamics a bezsít'ová Galerkinova metoda. Bylo zjištěno, že nejlepší výsledky dosahuje právě posledně zmíněná metoda. V současnosti probíhá v LSTC její další rozvoj (adaptivita a XFEM porušování), takže v příštích verzích LS-DYNA by se měla kvalita výstupů ještě zlepšit.

## 9. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu GAČR 101/06/0914

## 10. Literatura

- Bořkovec, J., Petruška, J.: EWK Rupture Model in the Numerical Simulation of the Bolt Head Trimming, Engineering Mechanics, p. 30-31, Svratka, 15 - 18.5.2006
- Kambur, C.: Assessment of Mesh-free Methods in LS-DYNA: Modelling of Barriers in Crash Simulation, University of Stuttgart, 2004.
- Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y.-W., Bai, Y.: Calibration and evaluation of seven fracture models, International Journal of Mechanical Sciences 47, p. 719-743, 2005
- Wu, C.T., Guo, Y., Lu, H.S. : The Development of XFEM Fracture and Mesh-free adaptivity, 5<sup>th</sup> LS-DYNA Anwenderforum, Ulm, 2006.