



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

NUMERICAL SIMULATION OF THE BOLT HEAD TRIMMING PROCESS

Jan Bořkovec¹, Jindřich Petruška², Rudolf Foret³

Summary: An important phase of the bolt production is a bolt head trimming. It is a very fast, complicated process including material failure. For this reasons explicit solver LS-Dyna was used. In the fist part of this paper the ability of LS-Dyna material models to describe the ductile fracture of metals was investigated both with Lagrange and ALE behaviour of the mesh. The results of this testing phase were used to optimize the model of the bolt head trimming. Several geometrical versions were solved and the results were compared with a help of the cutting work and the contact force. As a next phase the experiment was carried out. The behaviour of the cutting force and the look of the separated material were evaluated.

1. Úvod

Jednou z důležitých operací při výrobě šroubů na postupových automatech je ostřížení napěchované hlavy šroubu šestihrannou ořezávací maticí. Kvalitu střížné plochy jakož i celkovou životnost nástroje ovlivňuje především střížná hrana. Od výrobce přišel požadavek zodpovědět, jak ovlivňuje poloměr zaoblení průběh a efektivitu celé operace a zda má vliv na životnost nástroje. Těmto problémům se tedy budeme v tomto článku věnovat.

Ostříhování hlav šroubů je velmi rychlý proces, dochází při něm k porušování soudržnosti materiálu, proto byl na provedení výpočtů použit program ANSYS 8.1 obsahující modul LS-Dyna s explicitním řešičem LS760 na počítači s procesorem Pentium 4 - 1.8GHz.

2. Testovací úlohy

Stěžejním úkolem z celého výpočtového modelu je volba materiálového modelu porušované (ostříhované) součásti. Byla provedena řada testovacích úloh, které nám pomohly vybrat nejvhodnější kombinaci materiálu, formulace prvku a typu úlohy. Testovací úlohou bylo zvoleno vystříhování kruhové díry pro svojí jednoduchost a dostupnost literárních údajů k porovnání výsledků. Model byl řešen jako osově symetrický.

¹ 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

² Doc. 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

³ Doc. Ing. Rudolf Foret, CSc.: Ústav materiálových věd a inženýrství, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2, 619 69 Brno tel.: +420-541143191; e-mail: foret@fme.vutbr.cz

Materiálem stříhaného plechu je šroubová ocel 23MnB4 s křivkou přetvárného odporu zjištěnou z pýchovací zkoušky ve tvaru polynomu

$$\sigma = 395,31 + 2959,06 \varepsilon - 9040,01 \varepsilon^2 + 13446,86 \varepsilon^3 - 9354,31 \varepsilon^4 + 2458,30 \varepsilon^5$$

Mezní hodnoty veličin pro podmínky porušování byly rovněž stanoveny z pýchovací zkoušky.

Materiálový model stříhané součásti musí umožnit porušování své soudržnosti. Pro simulaci dělení tvárných materiálů jsou vhodné a testování byly podrobeny tyto modely:

- Materiál *Piecewise Linear Plasticity*
- *Add Erosion* s mezními kritérii:
 1. kritické hlavní napětí
 2. kritické redukované napětí
 3. kritické hlavní přetvoření
 4. kritický zkos

Další testovací úloha byla zaměřena na prozkoumání možností Lagrangeova-Eulerova popisu (dále pouze ALE) sítě u 2D prvků.

ALE formulace prvků je zvláště vhodná pro velké deformace sítě, ke kterým během ostříhování dochází. Představuje kombinaci Lagrangeovského (materiálového) popisu velkých deformací s občasnou Eulerovskou úpravou sítě konečných prvků, která zachovává topologii sítě při zlepšení tvaru jednotlivých extrémně deformovaných prvků.

Analýza výsledků

Z testů materiálových modelů vyplynulo, že lomové podmínky *Add Erosion* – Hlavní napětí a *Add Erosion* – Hlavní přetvoření nejsou vhodné pro tvárné porušování kovů. Jako nejvýhodnější pro naši aplikaci byl vybrán materiál *Piecewise Linear Plasticity*. Měl dobrý odhad střížné síly i tvar lomové plochy a výpočet trval nejkratší dobu.

Testy formulace prvků ukázaly, že rozdíl mezi Lagrangeovými a ALE prvky je poměrně výrazný. A to jak ve vzhledu lomové plochy tak v průběhu střížné síly po začátku porušování. U modelů, které obsahovaly ALE prvky, je lom tvárnější, trvá delší dobu, zaoblení způsobené střížníkem je větší, lomová plocha probíhá více po spojnici střížník-střížnice. Výsledky jsou blíže realitě. Výpočtové časy jsou ovšem o polovinu větší než při použití Lagrangeových prvků. Nutné je ovšem podotknout, že křehký charakter Lagrangeovy sítě je velmi silně zesílen použitím hourglass controlu na materiál plechu. Tím se zvýší tuhost a lom je křehčí. U ALE formulace se tento jev téměř neprojeví. Poměrně dobrá shoda ve výsledcích mezi různými typy prvků je v odhadu maximální střížné síly a také její průběh je až k dosažení maxima téměř totožný.

Z těchto výsledků můžeme formulovat následující doporučení pro praktické použití:

- *Lagrangeova síť* – je možné ji použít, pokud nás zajímají výsledky v první fázi stříhání, tj. než se materiál začne porušovat. Patří sem například odhad maximální střížné síly, zatížení hrany střížníku či ostříhávacího nástroje. Pro všechny fáze stříhání ji lze doporučit pouze v případě, kdy je síť dobře podmíněná a nevyskytuje se výrazný hourglassing, který musí být potlačen přidáním tuhosti.
- *ALE síť* – je vhodná pro použití ve všech případech, výpočet ovšem trvá o více než polovinu déle než u Lagrangeovy formulace.

3. Výpočtové modelování

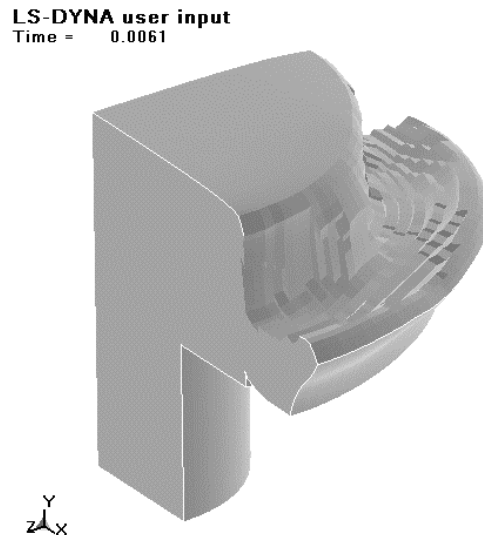
Výpočtový model pro problém ostříhování hlav šroubů byl optimalizován pomocí testovacích úloh obsažených v kapitole 2. Výsledkem bylo rozhodnutí použít pro model následující parametry:

- materiál stříhané součásti – Piecewise Linear Plasticity
- formulace prvku – Lagrangeova

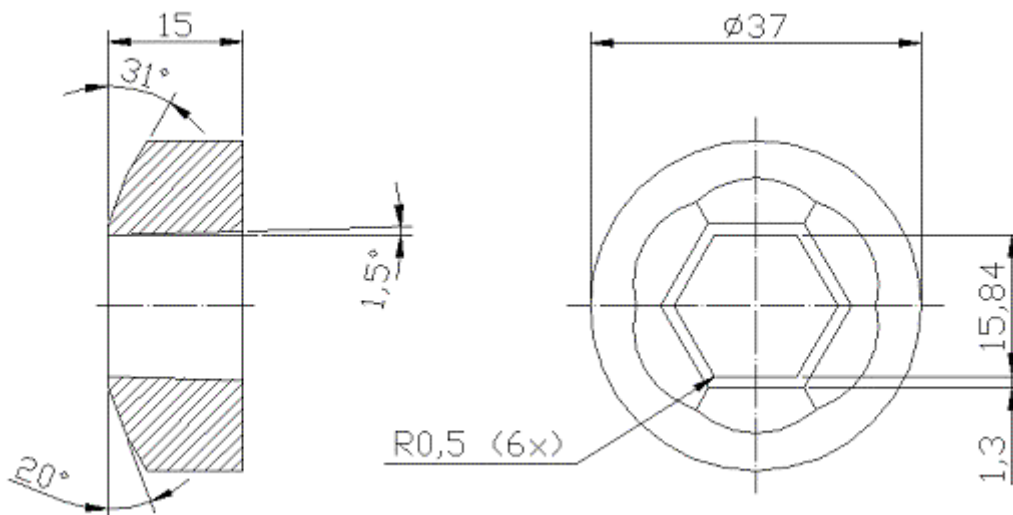
Úloha byla nejprve řešena ve 3D. I s velmi hrubou sítí však výpočet trval 40 hodin. Důležitým zjištěním bylo, že ostříhnutý materiál zůstává celistvý. 2D model byl proto řešen jako osově symetrický.

Řešeny byly 3 varianty provedení hrany ostříhávacího nástroje, obr. 6. Měnil se poloměr zaoblení na 0,1mm, 0,2mm a 0,3mm. Polotovaru, který vzniká dopředným protlačováním v předchozích operacích, byl zkrácen dřív kvůli zrychlení výpočtů, obr 7.

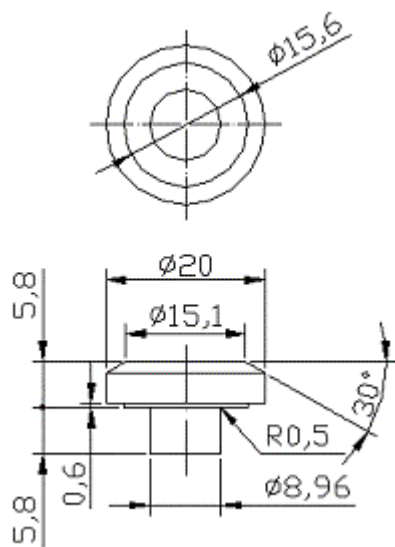
Ořezávací matrice je vyrobena z nástrojové rychlořezné oceli 19 830 s mezí kluzu v tlaku $R_{et} = 3500$ MPa. Vzhledem k tomu bylo uvažováno elastické chování nástroje v celém rozsahu zatěžování. Koeficientem smykového tření mezi jednotlivými součástmi byl nastaven na hodnotu 0,15. Nástroj se pohyboval rychlostí $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



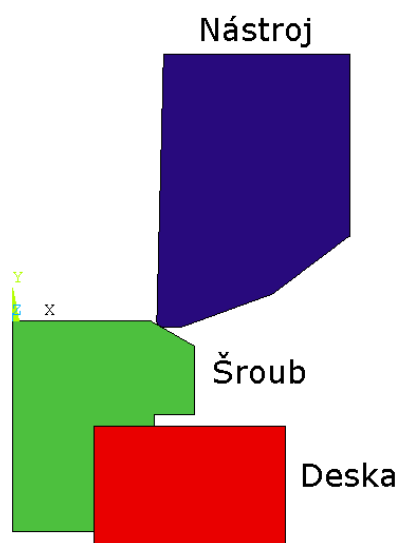
Obrázek 1: 3D model šroubu



Obrázek 2: Geometrie nástroje OK16



Obrázek 3: Geometrie polotovaru



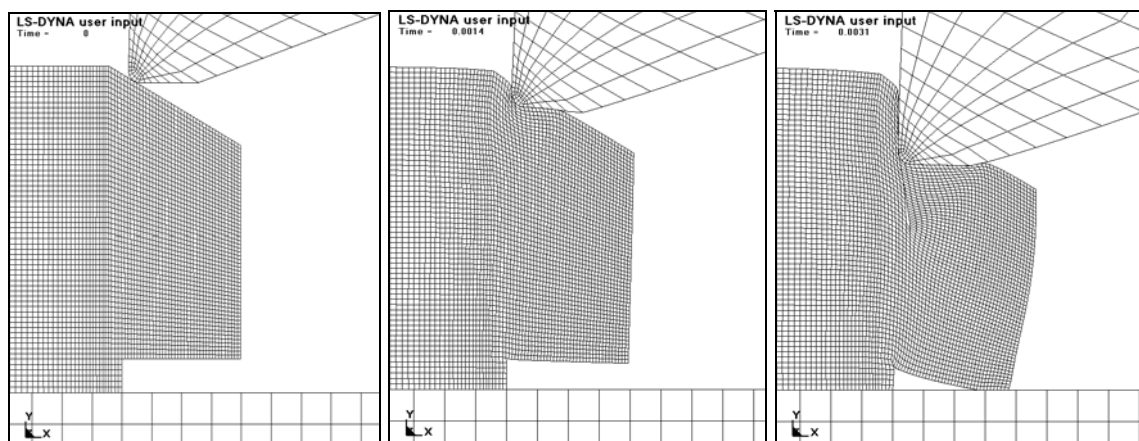
Obrázek 4: Model pro ostříhování hlavy šroubu

Prezentace výsledků

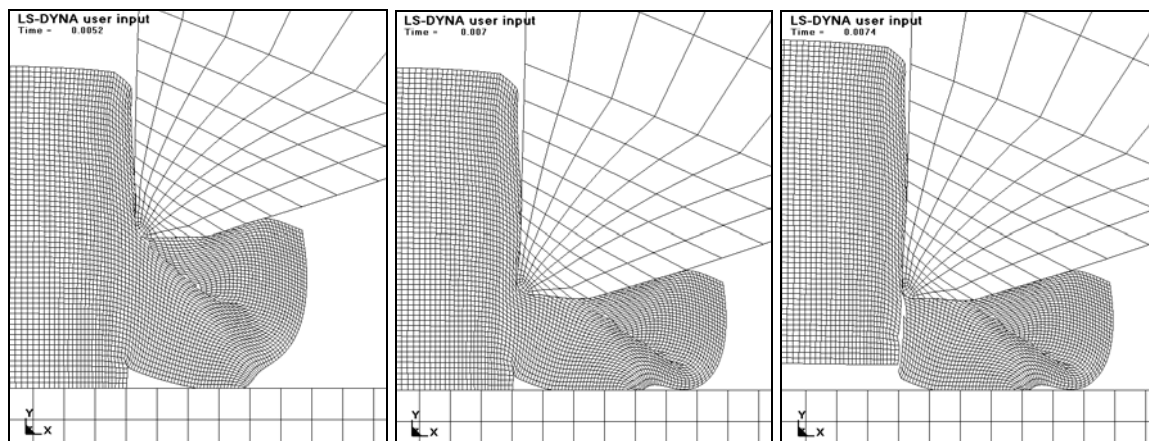
Všechny geometrické varianty mají stejnou topologii sítě. Obsahují 6350 uzlů a 6150 prvků. Výpočet jedné geometrické varianty trval 6 hodin 50 minut. Všechny uváděné výsledky v grafech i v tabulkách jsou vztažené na celý obvod. Výpočet je prováděn pro úhel 1 rad, proto bylo nutné výsledky vynásobit konstantou 2π .

Celý proces ostříhování může být rozdělen na 3 oblasti, které jsou jasně patrné i z průběhu kontaktních sil, graf 1:

- **1. fáze** $(0 - 3) \cdot 10^{-3}$ s – Oblast klasického ostříhávání. Průběh střížných sil je poměrně plynulý.
- **2. fáze** $(3 - 7) \cdot 10^{-3}$ s – Dochází k opření převislé části materiálu do desky, viz obrázek 11. Ostříhávaný materiál je tedy současně stříhán a tvářen. Dochází k výraznému rozkmitání průběhu střížných sil.
- **3. fáze** $(7 - 8) \cdot 10^{-3}$ s – Pohyb nástroje se zastaví. Materiál je dostřížen působením vyhazovače.



Obrázky 5 – 7: Jednotlivé fáze ostříhování



Obrázky 8 – 10: Jednotlivé fáze ostřihování

Velmi důležitou charakteristikou při stříhání je práce potřebná pro ostřížení. Vyjadřuje energetickou náročnost celého procesu. Ve výpočtovém modelování je významná také proto, že eliminuje nepřesnosti způsobené diskretizací modelu a s tím spojené rozkmitání sil. Ty se při integrování přes delší časový interval tolik neprojeví.

Práce byla stanovena pro nástroj ve fázi 1, ve fázi 2 a také celkově (fáze 1 + 2).

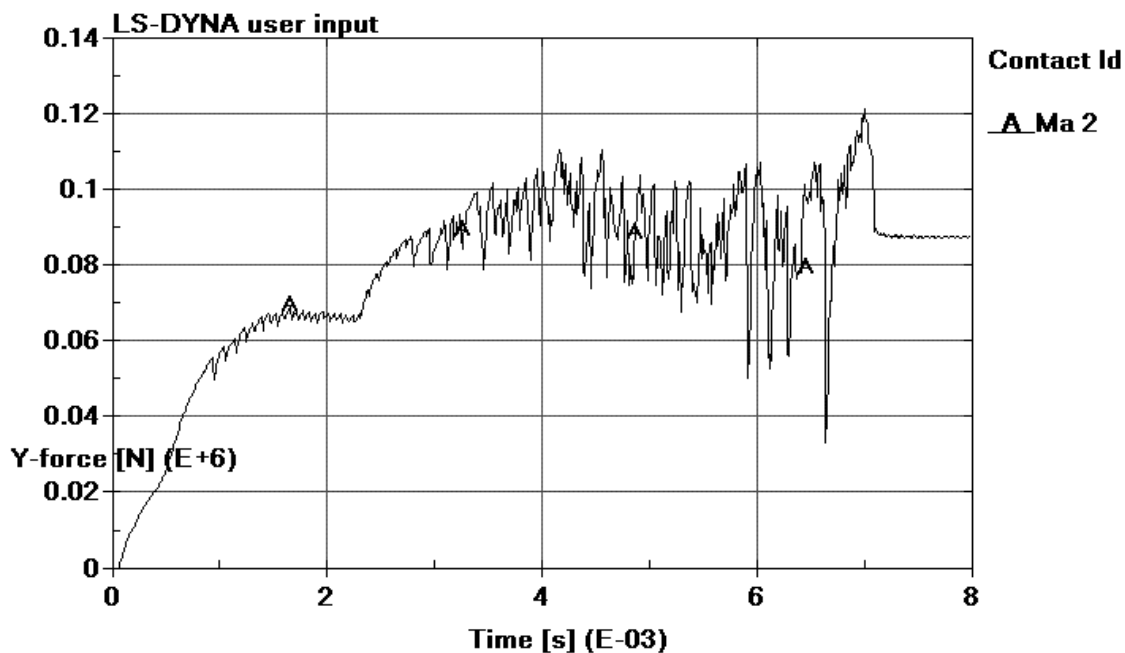
Tabulka 1: Práce nástroje

Zaoblení hrany [mm]	Práce nástroje celková [J]	Práce nástroje – 1. fáze [J]	Práce nástroje – 2. fáze [J]
0,1	296	96	200
0,2	314	102	212
0,3	332	111	221

Maximální napětí HMH bylo stanoveno jako maximum ze všech prvků nástroje. Na této charakteristice se naopak diskretizace a nastavení modelu projevují velmi výrazně. Odmazávání prvků a následný náraz nástroje do materiálu způsobuje rázové špičky, které jsou ovšem velmi výrazně ovlivněné například tuhostí kontaktů. Takto získaná napětí musíme tedy spíše považovat za relativní ukazatel, vhodný ke vzájemnému srovnání jednotlivých řešených variant .

Tabulka 2: Zatížení nástroje

Zaoblení hrany [mm]	Max. napětí HMH – 1. fáze [MPa]	Max. napětí HMH – 2. fáze [MPa]
0,1	2860	4220
0,2	2160	2780
0,3	1690	2260



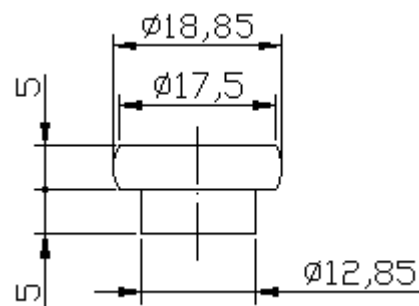
Graf 1: R0,2 Kontaktní síla

Výsledky, ukazují, že vliv zmenšení poloměru zaoblení hrany na zlepšení efektivity procesu je pouze malý. Velmi výrazně však roste zatížení nástroje a tím i opotřebení střížné hrany. Důležitým zjištěním je velký podíl 2. fáze na celkovou energetickou bilanci ostříhování. Dochází při ní k nežádoucím jevům jako je pěchování odstříženého materiálu, vzniku trhliny mimo rovinu stříhu, růstu střížných sil i zatížená nástroje. Pro významnější zlepšení dosahovaných výsledků bylo vhodné přepracovat geometrii soustavy nástroj – materiál – opěrná deska a tím zabránit neúčelnému pěchování materiálu.

4. Experiment

Ve spolupráci s firmou J-VST spol. s r.o. byl proveden experiment. Bohužel byly k dispozici pouze polotovary s odlišným tvarem hlavy než byl použit pro výpočtové modelování v kapitole 3. Chyběl zde nákrůžek na spodní části hlavy a horní hrana nebyla zkosená, obrázek 6. Šrouby byly vyrobeny z materiálu AISI S 174 00, pro kterou je ekvivalentem ocel 17 351.

Dále byla vyloučena 3. fáze stříhu, dostřížení pomocí vyhazovače. Důvodem bylo umístění snímače pod opěrnou deskou, v místě, kde při skutečné výrobě prochází tyč vyhazovače.



Obrázek 11: Geometrie hlavy

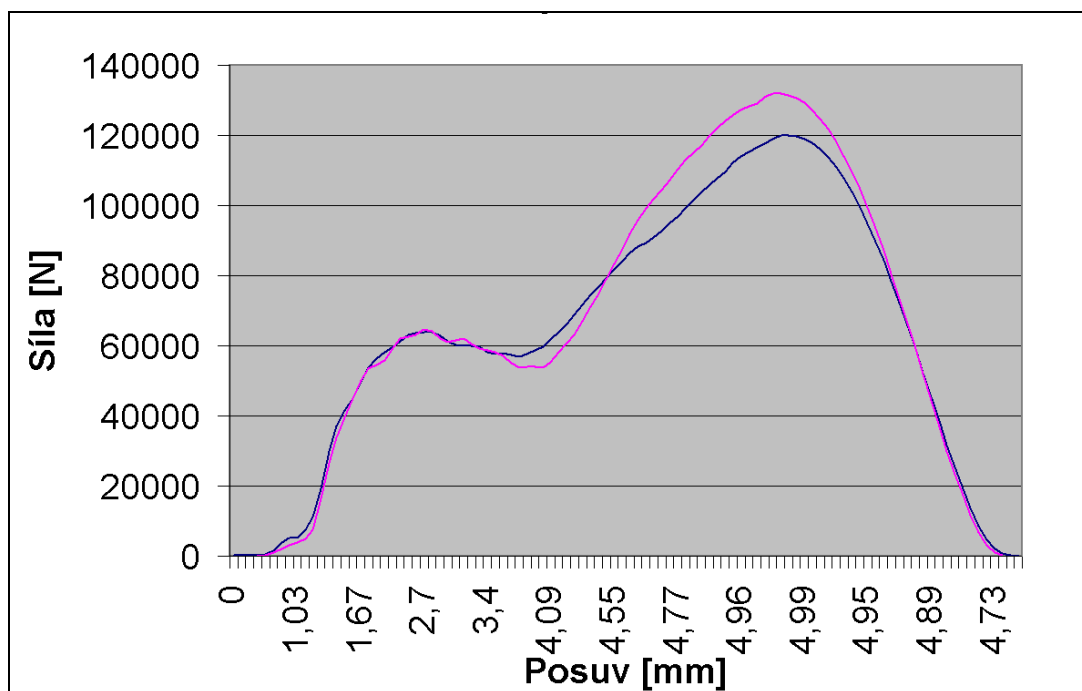
Provedeno bylo několik stříhů s různou velikostí posuvu střížníku, vždy v několika opakováních.



Obrázek 12: Nástroj pro ořezávání hlavy



Obrázek 13: Jednotlivé díly nástroje



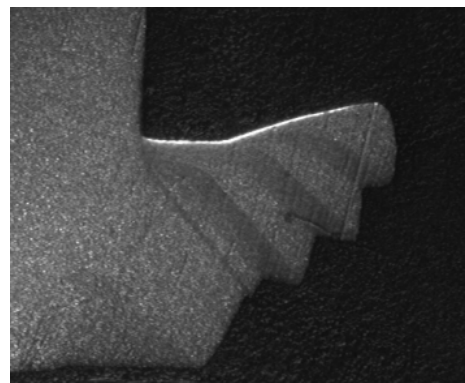
Graf 2: Střižné síly při maximálním úběru materiálu – opakované měření

Z měření byly zjištěny průběhy sil, viz graf 2. Jak je vidět, tak střižná 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.14, ze kterého mimo jiné vyplývají tyto skutečnosti:

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

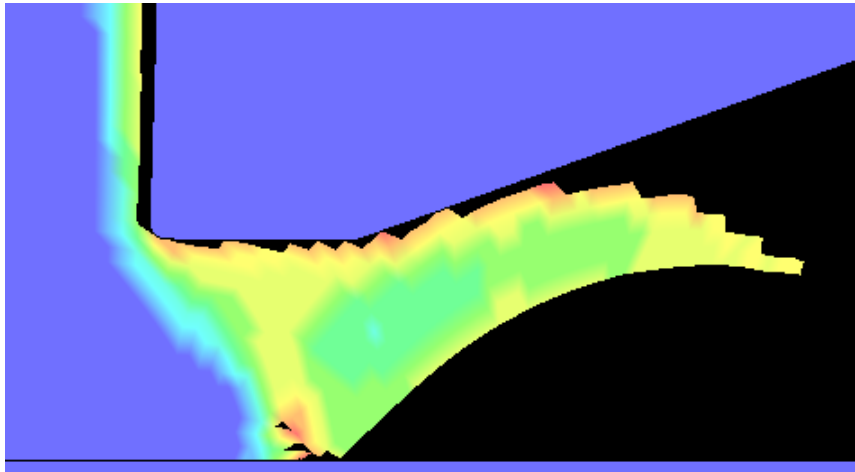


Obrázek 14: Skluzové pásy

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

5. Výpočtové modelování 2

Vzhledem k tomu, že oproti počítanému modelu se při experimentu změnila jak geometrie, tak materiál polotovaru, bylo přistoupeno k přepracování výpočtového modelu. Byla snaha co nejvíce se přiblížit podmínkám experimentu.



Obrázek 15: Tvar třísky

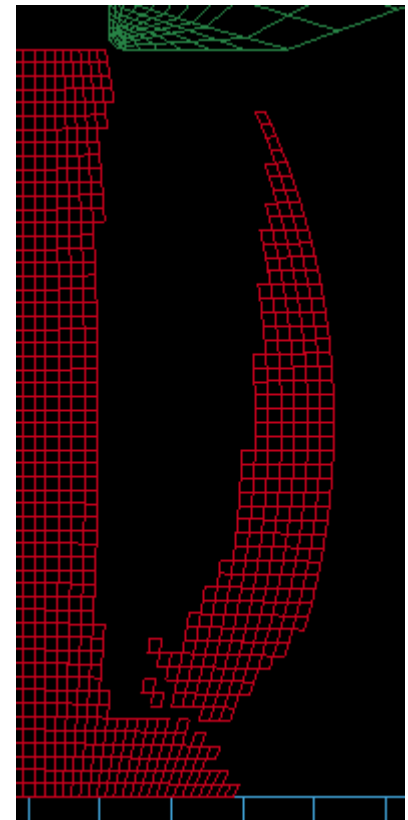
Z výsledků je zřejmé, že absence nákržku výrazně ovlivňuje průběh stříhu a jeho výpočtové modelování. Zatímco u polotovaru s nákržkem má dominantní význam první fáze, kterou jsme definovali jako klasické ostříhávání. To znamená, že napjatost je převážně smyková a lokalizovaná do jedné střížné roviny. Tato fáze při absenci nákržku úplně chybí a materiál je rovnou ostříhován a pýchován zároveň. To je velmi nevýhodné pro efektivitu celého procesu.

Bohužel se ukázalo, že právě porušování při současném pýchování je na rozlišovací úrovni tohoto výpočtového modelu velmi špatně postihnutečné. Porušování řízené maximálním plastickým přetvořením způsobuje při výpočtech odbourávání prvků přicházející do styku s nástrojem, obrázek 16. To má za následek nepřirozený tvar ostříhnutého materiálu, obrázek 15, a také velké rozkmitání střížných sil.

Pro tento typ zatěžování je třeba najít jiný model porušování, který by zohledňoval stav napjatosti. Možností, velmi často zmiňovanou v literatuře, je Gursonův model, který v tlakové oblasti prvky neodbourává. Je založen na vzniku, rozvoji a koalescenci mikroductin v materiálu, což bylo pozorováno na vzorcích podrobených metalografickému rozboru.

6. Závěr

Tato práce ukázala, že v procesu ořezávání hlavy šroubu hraje významnou negativní roli pýchování ořezávaného materiálu, které zvyšuje silové zatížení nástroje a v extrémních případech může vést i k vylamování částí řezné hrany. Snahou bude tedy nalézt takové



Obrázek 16: Odbourané elementy

geometrické uspořádání nástrojů a polotovaru, aby se tento vliv pokud možno eliminoval. Rovněž se prokázalo, že výpočtový model porušování založený na maximálním plastickém přetvoření je vhodný spíše pro napjatostní stavy, kde převažuje tahové, případně smykové zatížení elementů. Při dominantním tlakovém namáhání dochází k excesivnímu vymazávání prvků při kontaktu nástroje a materiálu. Snahou tedy bude použít jiný, kvalitativně lepší model porušování materiálu např. Gursonova typu. Tímto směrem se bude ubírat naše další práce.

7. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu Eureka E!2924 FGM-Mag Tool

8. Literatura

Fürbacher, I., a kol. : *Lexikon technických materiálů*, Verlag Dashöfer, 2001

Greškovič, F. : Hodnotenie strihateľnosti tenkých oceľových plechov, Habilitačná práca, Technická univerzita v Košiciach, 2002

Novotný, J., Langer, Z. : Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů, SNTL Praha, 1980

Pešina, E. : Základy užití teorie plasticity, SNTL Praha, 1966

Rachlik, M., Roelandt, J. M., Maillard, A. : Numerical Simulation Of Sheet Metal Blanking Predicting the Shape of the Cut Edge, sborník Key Engineering Materials Vols, str. 329-334, Trans Tech Publications, Switzerland, 2003