

COMPUTATIONAL SIMULATION OF COLD FORMING OF BOLTS AND PREDICTION OF MATERIAL DAMAGE DURING THE PROCESSJ. Petruška¹, P. Skalka², L. Janíček³, S. Rusz⁴

Summary: *The paper deals with application of selected criteria of ductile fracture to prediction of material damage during the production of bolts by cold forming. Two basic steps of this procedure are described. First, the fracture criteria parameters are identified by numerical simulation of realized material fracture tests in compression. Second, two main stages of the bolt production (forward extrusion of shaft and compression of head) are computationally simulated as a large displacement, elasto-plastic problem. The computed history of stress and strain is then used for evaluation of the fracture criteria and compared with the identified limit fracture values of the material. A number of geometrical versions are analysed to evaluate the influence of shape on the probability of fracture.*

1. Úvod

Pro svou vysokou produktivitu a využití v sériové výrobě zaujímá tváření stále důležitější místo ve výrobě mechanických dílů. Tváření je však omezeno limitujícím faktorem - vznikem tvárného lomu. Tento komplexní jev je ovlivněn mnoha různými faktory. Jsou to jak vlastnosti materiálu, tak parametry přetvárného procesu jako jsou teplota, rychlost deformace, lokální napětí a přetvoření, dotykové podmínky mezi nástrojem a materiálem a relativní pohyb tvářeného materiálu vzhledem k nástroji, kterým se vytváří konečný tvar výrobku. Proto se rozšiřuje studium vzniku a rozvoje vad v materiálu v průběhu tvářecích procesů, problematiky stanovení limitů tvařitelnosti a obecně celé oblasti vzniku tvárného porušení a možností jeho včasné a úspěšné predikce[1]. Schopnost předpovědět okamžik vzniku tvárného lomu v průběhu procesu tváření umožňuje modifikaci technologického postupu už ve fázi návrhu s cílem snížení výskytu možných poruch během výroby a tím i snížení nákladů. V předloženém příspěvku se zabýváme možnostmi využití výsledků výpočtové simulace procesu výroby šroubů tvářením za studena pro predikci vzniku tvárného lomu. V následujících odstavcích jsou popsány hlavní kroky našeho postupu. Nejprve je uvedena identifikace mezních materiálových hodnot, určujících okamžik vzniku tvárného lomu pro daný materiál, zvolená lomová kritéria a příslušné tepelně-mechanické podmínky. Dále se věnujeme popisu výpočtové simulace výroby jednotlivých variant šroubu a využití identifikovaných materiálových parametrů k predikci vzniku tvárného lomu během výroby.

¹Doc. Ing. J. Petruška, CSc., ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno,
Tel: 05 4114 2858, Fax: 05 4114 2876, email: petruska@umt.fme.vutbr.cz

²Ing. P. Skalka, ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno,
Tel: 05 4114 2804, Fax: 05 4114 2876, email: petr.skalka@email.cz

³Dr. Ing. L. Janíček, ÚST FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno,
Tel: 05 4114 2507, Fax: 05 748 214, email: janicek@ust.fme.vutbr.cz

⁴Doc. Ing. S. Rusz, CSc., kat.345, VŠB-TU Ostrava, tř.17.listopadu 15, 708 33 Ostrava

2. Identifikace mezních hodnot vybraných kritérií

Na základě předchozích prací [4] a literárních podkladů [5] byla pro hodnocení vzniku tvárného lomu vybrána dvě kritéria, Cockroft - Latham [2] a Brozzo [6]:

$$\text{Cockroft} - \text{Latham} : \quad C4 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

Kritérium *Cockroft - Latham* vyjadřuje plastickou práci tahové složky napjatosti na jednotku objemu. V okamžiku dosažení kritické hodnoty, se předpokládá vznik tvárného lomu. Význam použitých symbolů ve vztahu (1) : σ_1 - maximální hlavní tahové napětí, $\bar{\varepsilon}_f$ ekvivalentní přetvoření při porušení.

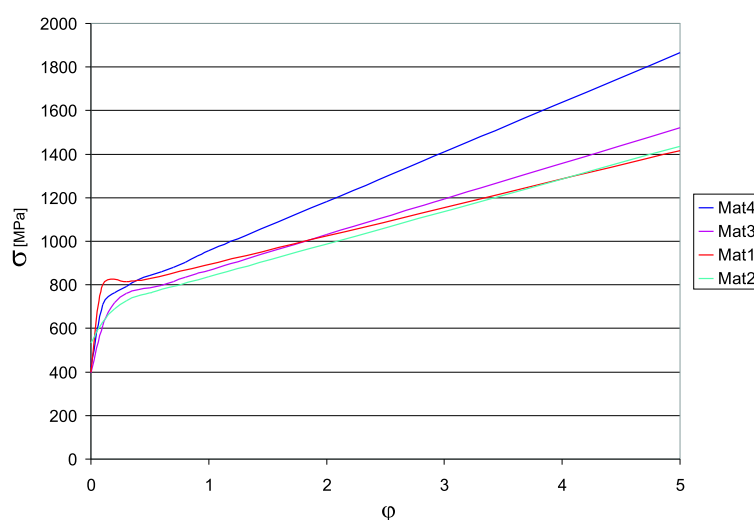
$$\text{Brozzo} : \quad C6 = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

Kritérium Brozzo obsahuje explicitní vliv hydrostatického napětí a závisí na maximálním hlavním tahovém napětí σ_1 a na hydrostatické složce napjatosti σ_H .

Stanovení mezních hodnot C4 a C6, při nichž dochází podle uvedených kritérií ke vzniku tvárného lomu, bylo provedeno srovnáním výsledků reálných pýchovacích zkoušek a jejich numerické simulace.

2.1 Realizované experimenty

Zkoušky byly prováděny na ÚST FSI VUT v Brně pýchováním válcových vzorků na hydraulickém lisu s hladkými kovadly při teplotě 20°C. Během zkoušky se sleduje volný povrch vzorku za účelem zjištění okamžiku vzniku trhliny na volném povrchu vzorku. Materiálem pýchovaných ocelových vzorků byla drátová ocel 23MnB4, jejíž křivky pětvarného odporu byly získány z VŠB - TU Ostrava a ŽDB - závod Drátovna.



Obrázek 1: Závislost $\sigma = f(\varphi)$ při teplotě 20° C

Jednotlivé varianty Mat1 - Mat4 na obr.1 se vzájemně liší tepelným zpracováním. Rozměry zkušebních vzorků byly pro jednotlivé materiály: $d_0^1=11.77$ mm, $h_0^1= 17.11$ mm; $d_0^2=11.8$ mm, $h_0^2= 17.88$ mm; $d_0^3=12.20$ mm, $h_0^3= 18.18$ mm; $d_0^4=13.98$ mm, $h_0^4= 21$ mm, kde d_0 představuje počáteční průměr a h_0 počáteční výšku daného zkušebního vzorku pro materiál ^{1,2,3,4}. Kritická výška vzorku při níž vzorek na povrchu praskl (průměrné hodnoty): $h_k^1= 2.756$ mm; $h_k^2= 3.459$ mm; $h_k^3= 3.257$ mm; $h_k^4= 4.895$ mm.

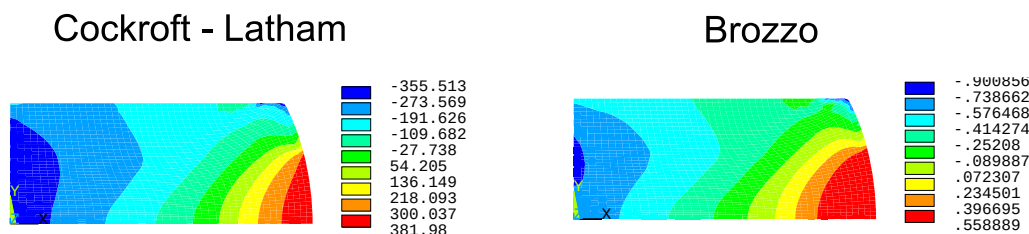
2.2 Výpočtová simulace experimentu

Simulace pěchovací zkoušky byla realizována pomocí systému ANSYS 7.1 jako rotačně symetrický problém velkých pružně plastických deformací s kontaktem mezi tuhými kovádky a pěchovaným materiálem. Zatěžování bylo deformační, tření mezi nástrojem a materiálem Coulombovské s hodnotou součinitele smykového tření 0,05, což odpovídá mazanému kontaktu. Zpevnění materiálu bylo uvažováno kinematické, křivky přetvárného odporu pro jednotlivé tepelné zpracování materiálu 23MnB4 byly zadány dle obr.1. Při analýze byly využity následující prvky systému ANSYS:

Plane 183 - prvek ze skupiny 2D prvků s osmi uzly a dvěma stupni volnosti v každém uzlu, představující tvářený materiál, *Conta 172* - tříuzlový 1D kontaktní prvek mající dva stupně volnosti v každém uzlu, představující kontaktní povrch tvářeného materiálu, *Target 169* - tříuzlový 1D kontaktní prvek mající dva stupně volnosti v každém uzlu, představující kontaktní povrch tvářecích nástrojů.

2.3 Určení mezních hodnot lomových kritérií

Výpočtové výsledky historie napjatosti a deformace umožňují vyčíslit v každém bodě řešené oblasti integrály ve výrazech (1), (2) a určit tak rozložení kritériálních veličin v pěchovaném vzorku, jak je uvedeno na obr.2



Obrázek 2: Rozložení krit. hodnot po průřezu zk. vzorku v okamžiku lomu - mat. 2

Z obrázků je patrné, že maximum z hodnot definičního integrálu kritéria nastává na vnějším obvodu ve středu válcového vzorku, což je v souladu s experimentem. Při pěchování dosahují v této oblasti vysokých hodnot obvodová tahová napětí, která nejvíce přispívají k akumulaci tahové plastické práce a vedou ke vzniku tvárného lomu. Naopak minimálních hodnot nabývají kritériální veličiny ve střední části zkušebního vzorku. V této oblasti jsou během pěchování všechna hlavní napětí tlaková a proto zde dosahují kritériální veličiny záporných hodnot a tudíž ve středu vzorku nehrozí vznik tvárného lomu. Na základě srovnání experimentálních výsledků z provedených pěchovacích zkoušek pro materiál 23MnB4 a numerických simulací lze konstatovat, že obě kritéria byla úspěšná při predikci místa tvárného lomu.

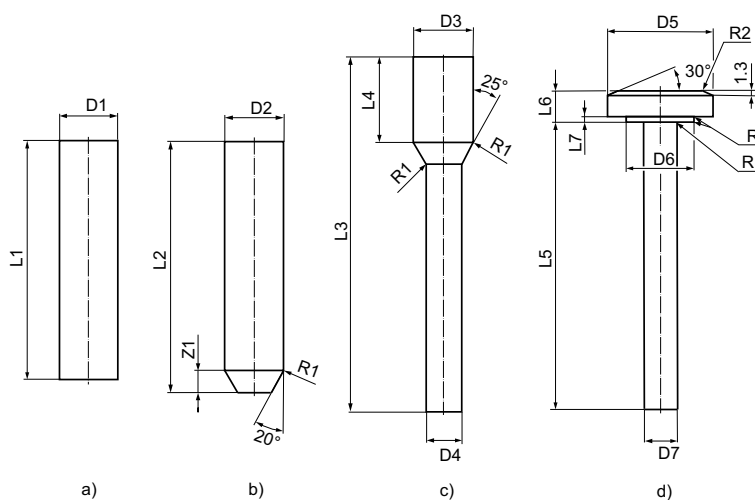
Hodnotu kritériální veličiny v kritickém místě v okamžiku reálného vzniku lomu můžeme proto považovat za mezní materiálovou hodnotu. Statistické zpracování těchto výsledků pro jednotlivé varianty tepelné úpravy materiálu 23MnB4 je uvedeno v Tabulce 1.

Teplota : 22 °C	Kritéria	Střední hodnota [MPa] / [-]	Směrodatná odchylka [MPa] / [-]	Variační koeficient [-] / [-]
Materiál číslo.:				
1	C4 / C6	418 / 0.682	123.8 / 0.027	0.296 / 0.04
2	C4 / C6	382 / 0.558	30.65 / 0.037	0.08 / 0.068
3	C4 / C6	444 / 0.609	48.26 / 0.057	0.108 / 0.095
4	C4 / C6	358 / 0.481	70.25 / 0.078	0.196 / 0.164

Tabulka 1: Mezní lomové hodnoty pro mat. 23MnB4

3. Porovnání geometrických variant

Z hlediska možnosti vzniku tvárného lomu byly analyzovány následující geometrické varianty.



Obrázek 3: Geometrie modelu v jednotlivých etapách výroby

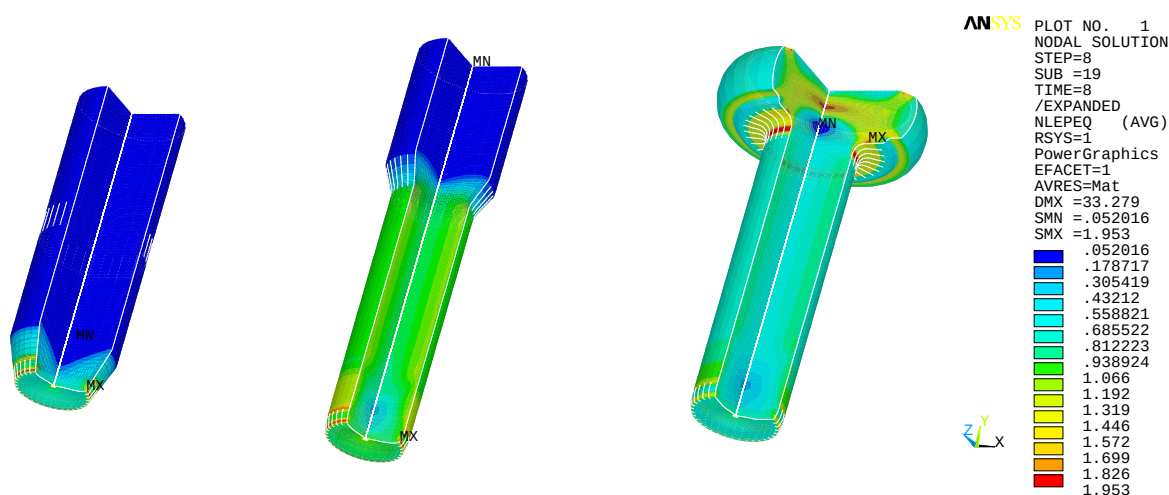
Jednotlivé geometrické varianty jsou uspořádány postupně ve sloupcích tab.2 a představují technologii výroby těchto šroubů :

- varianta 1 - šroub M10 - polotovar $\phi 11.7$ mm
- varianta 2 - šroub M8 - polotovar $\phi 11.7$ mm
- varianta 3 - šroub M8 - polotovar $\phi 11.7$ mm (odlišná technologie výroby)
- varianta 4 - šroub M8 - polotovar $\phi 9.2$ mm
- varianta 5 - šroub M10 - polotovar $\phi 13.7$ mm
- varianta 6 - šroub M12 - polotovar $\phi 14$ mm

Rozměr	φ11,7 - 59,7	φ11,7 - 37,8	φ11,7 - 37,8	φ9,2 - 61,2	φ13,7 - 44,36	φ14 - 61,5
D1 [mm]	11,7	11,7	11,7	9,2	13,7	14
D2 [mm]	11,8	11,8	11,8	9,25	13,85	14,1
D3 [mm]	11,9	11,9	11,9	9,4	13,9	14,2
D4 [mm]	8,92	7,08	7,08	7,08	8,92	10,7
D5 [mm]	20	17	17	17	20	22
D6 [mm]	15,6	12,5	12,5	12,5	15,6	17,4
D7 [mm]	8,96	7,12	7,12	7,12	8,96	10,75
L1 [mm]	33,31	21,18	21,14	34,25	25,11	35
L2 [mm]	34,24	22,12	23,38	34,84	27,46	37,24
L3 [mm]	45,45	40,69	40,69	45,69	42,88	47,37
L4 [mm]	13,65	7,03	7,03	14,7	8,95	14,9
L5 [mm]	30	30	30	30	30	30
L6 [mm]	5,8	5,3	5,3	5,3	5,8	7,5
L7 [mm]	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5
R [mm]	0,3	0,25	0,25	0,25	0,3	0,25
Z [mm]	5,29	5	7,25	3,74	8	6,4

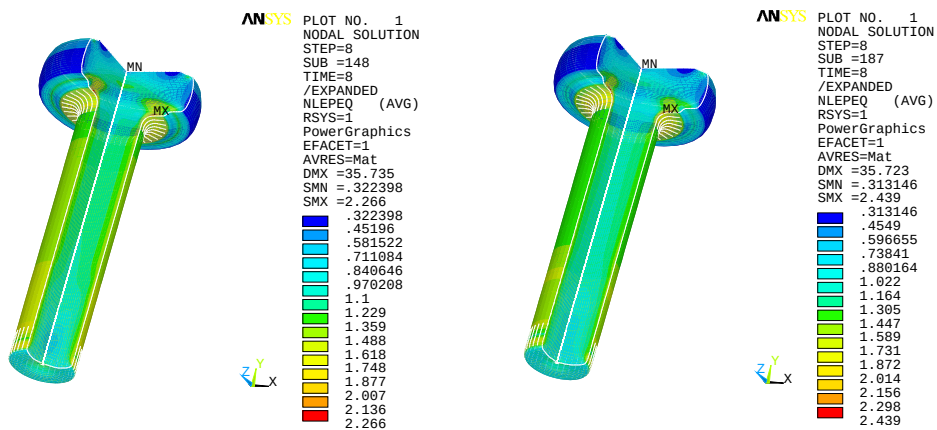
Tabulka 2: Rozměry geometrie

Materiálový model byl volen dle kap. 2. Byly simulovány všechny 3 etapy, včetně respektování návaznosti historie napjatosti i deformace všech těchto etap. Vše bylo řízeno změnou okrajových podmínek, které představují tuhý povrch tvářecích nástrojů (průtláčnice, razník) v jednotlivých etapách výroby. Výsledky jednotlivých etap pro variantu č.1 jsou uvedeny na obr.4. Jak je patrné, maximálních hodnot přetvoření je dosaženo v etapě pěchování hlavy. Škála na obr.4 se vztahuje pouze k etapě pěchování hlavy.

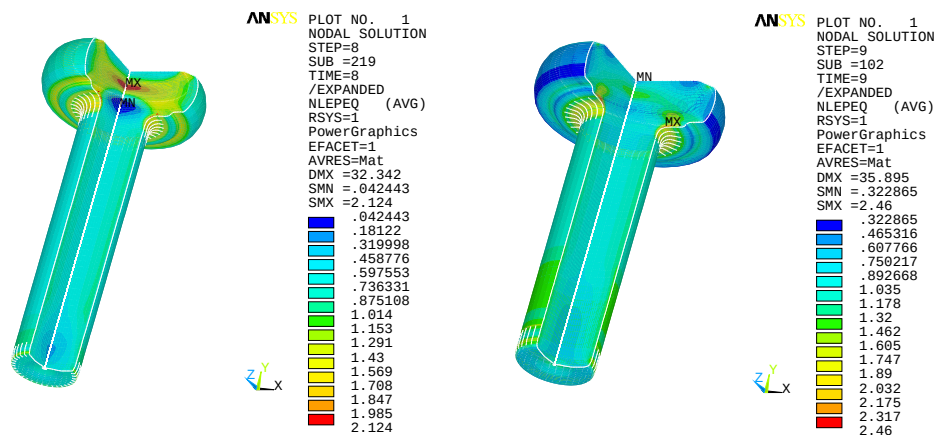


Obrázek 4: Intenzita plastického přetvoření pro všechny 3 fáze - varianta 1

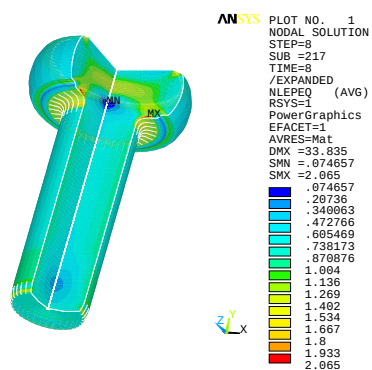
Z následující sekvence obrázků je patrný vliv geometrie jednotlivých variant na finální rozložení intenzity plastického přetvoření.



Obrázek 5: Intenzita plastického přetvoření - varianty 2, 3



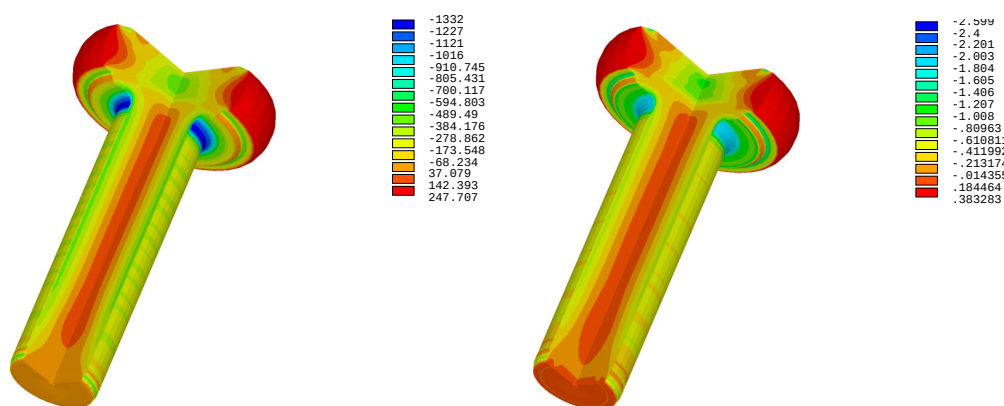
Obrázek 6: Intenzita plastického přetvoření - varianty 4, 5



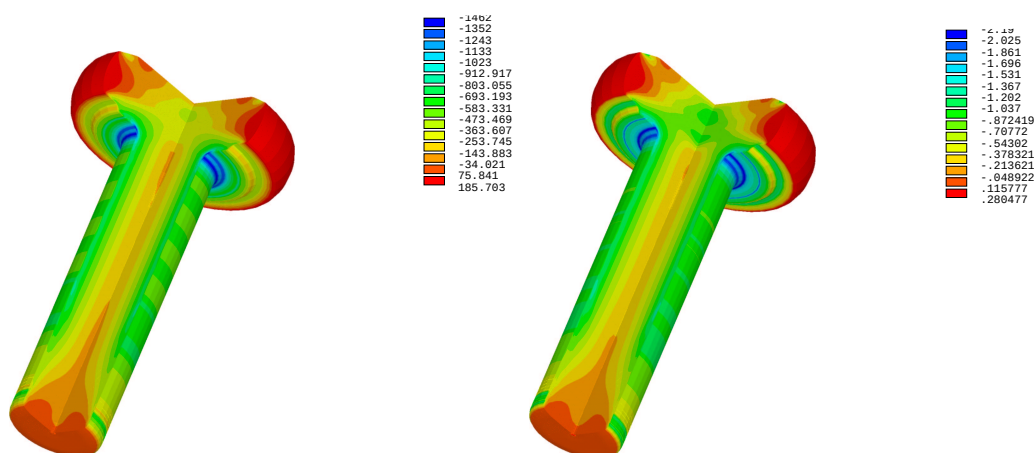
Obrázek 7: Intenzita plastického přetvoření - varianta 6

4. Aplikace kritérií Cockroft - Latham, Brozzo na šroub

Obě zvolená kritéria byla aplikována na variantu šroubu č.1 a 5. Záměrně byla zvolena tato dvojice, která představuje výrobu téhož finálního rozměru M10 ze dvou odlišných vstupních průměrů polotovaru 11.7 mm (varianta 1) a 13.7 mm (varianta 5). Obě varianty byly analyzovány s materiálovým modelem 23MnB4, křivka zpevnění mat2 dle obr.1. Po konverzi výsledků byly spočteny průběhy rozložení kritériálních veličin na průřezu vyrobeného šroubu. Podle rozložení kritériálních veličin ve šroubu lze usoudit na místa, potenciálně nebezpečná z hlediska vzniku tvárného lomu. Grafické zobrazení rozložení kritériálních veličin C4 a C6 v obou analyzovaných variantách šroubu je uvedeno na obr.8 a 9. Z obrázků je patrné, že kritické místo je ve všech případech lokalizováno na vnějším obvodu hlavy šroubu. Maximální dosažené hodnoty kritériálních veličin jsou rovny $C4 = 248 \text{ MPa}$ a $C6 = 0,383$ pro variantu 1, resp. $C4 = 185 \text{ MPa}$ a $C6 = 0.28$ pro variantu 5. V obou případech se jedná o hodnoty, ležící na bezpečné straně vůči mezním lomovým hodnotám dle tabulky 1. Z výsledků je rovněž patrné, že varianta 5 má vyšší bezpečnost vůči tvárnímu lomu během výroby než varianta 1.



Obrázek 8: Rozložení kritériálních hodnot C4, C6 po průřezu šroubu - varianta 1



Obrázek 9: Rozložení kritériálních hodnot C4, C6 po průřezu šroubu - varianta 5

5. Závěr

Na příkladu šroubu M10, vyrobeného ze dvou různých průměrů vstupního polotovaru - šroubového drátu - byl ukázán postup aplikace lomových kritérií, umožňujících predikovat porušení materiálu během procesu výroby. Součástí postupu byla i identifikace materiálových parametrů vybraných kritérií. Řešené příklady prokázaly, že u konkrétně navržených technologických postupů nehrozí nebezpečí vzniku tvárného lomu. Další řešené varianty budou uvedeny při ústní prezentaci příspěvku v průběhu jednání konference. Předpokládáme, že navržená metodika bude dále využívána při řešení konkrétních technických problémů, podle potřeb spolupracujících průmyslových podniků.

6. Literatura

- [1] T.Altan, V.Vasquez: Status of process simulation using 2D and 3D finite element method, J.Mat.Proc.Tech. 71 (1997) 49-73
- [2] M. G. Cockroft, D. J. Latham: Ductility and the Workability of metals. J. Inst. Met. 1968
- [3] P. Skalka (2003): Výpočtová analýza procesu tváření šroubu za studena. Diplomová práce, FSI VUT Brno
- [4] J. Šuta (2003): Predikce porušování kovů při tváření. Disertační práce, FSI VUT Brno
- [5] Clift S. E., Hartley P., Sturgess C. E. N., Rowe G. W.: Fracture prediction in plastic deformation processes. Int. J. Mech. Sci. 1990.
- [6] Brozzo P., DeLuca B., Rendina R.: 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

Poděkování

Tato práce vznikla jako součást Výzkumného záměru č. CEZ:J22/98:262100001 a CEZ:J22/98:262100003