



COMPUTATIONAL SIMULATION OF FORWARD EXTRUSION

Libor JANÍČEK, Jindřich PETRUŠKA*

Summary: Presented paper deals with creation of a reliable computational model for the simulation of forward extrusion. In the first part, experimental verification of computational results is presented on the example of copper specimens, extruded through different shapes of extrusion dies. The procedure is based on the comparison of measured hardness and computed strain distribution. Based on these results, combined extrusion-compression procedure of bolts production is simulated. Detailed analysis of stress, strain and workability exhaustion during subsequent production stages is presented.

1. ÚVOD

Výpočtová simulace tváření se stává stále významnějším nástrojem při návrhu a inovaci výrobních procesů. Proto je nutné podrobit vytvářené výpočtové modely a jejich výsledky kritické analýze a verifikaci. V tomto příspěvku se zabýváme experimentální verifikací výpočtové simulace dopředného protlačování měděných vzorků přes průtlačnice různých profilů. Prostředkem verifikace je srovnání tvrdosti průtlačku s výpočtově určeným rozložením intenzity přetvoření. Na základě výsledků této etapy je pak vytvořen výpočtový model simulace rozhodujících etap výroby šroubů tvářením za studena bez následného tepelného zpracování. Vynechání tepelného zpracování je současný trend, významný z ekonomického hlediska a umožněný výsledky materiálového výzkumu [1]. Ukazuje se, že i tepelně nezpracované produkty z vybraných materiálů mohou splňovat téměř všechny mechanické vlastnosti a charakteristiky, požadované normativními předpisy [2].

2. PROTlačOVÁNÍ MĚDĚNÝCH VZORKŮ

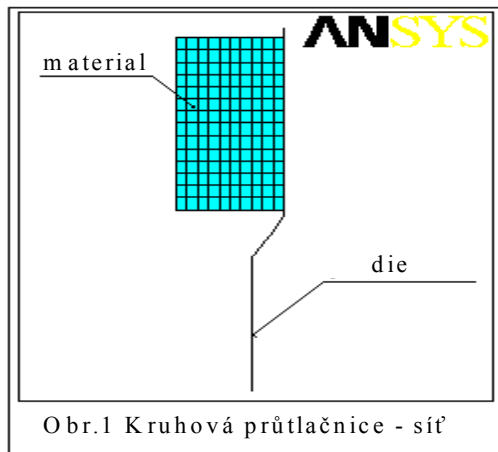
Vyšetřovaný materiál byla elektrovodná měď CuE 99,9 dle ČSN 423001. Bylo uskutečněno dopředné protlačování válcových vzorků o průměru $D_0=18,0\text{mm}$, a to pro tři různé tvary průtlačnice: kruhový, čtvercový a trojúhelníkový. Ve všech případech byl průřez redukován na 50%, což odpovídá střednímu logaritmickému přetvoření 0,69. Protlačené vzorky byly podélně rozříznuty a na osových řezech byla na pravidelné síti 150-180 bodů změřena tvrdost podle Brinella HB. Rozložení tvrdosti bylo zpracováno do podoby izoploch obdobně jako výpočtové výsledky MKP (viz obr.3,4).

Simulace protlačování mědi kruhovou průtlačnicí bylo řešeno jako rotačně symetrická úloha (obr.1), zatímco čtvercová a trojúhelníková průtlačnice byla řešena jako prostorový problém, s využitím rovin symetrie (obr.2). Výpočet byl realizován pomocí systému ANSYS s využitím prvků umožňujících velké plastické deformace. Přehled použitých prvků je v tab.1.

* Dr.ing.Libor Janíček, Ústav strojírenské technologie FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno. Tel: 05 4114 2507, Fax:05 748 214, e-mail: janicek@ust.fme.vutbr.cz
Doc.ing.Jindřich Petruška,CSc., Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno. Tel:05 4114 2858, Fax:05 41142876, e-mail: petruska@umt.fme.vutbr.cz

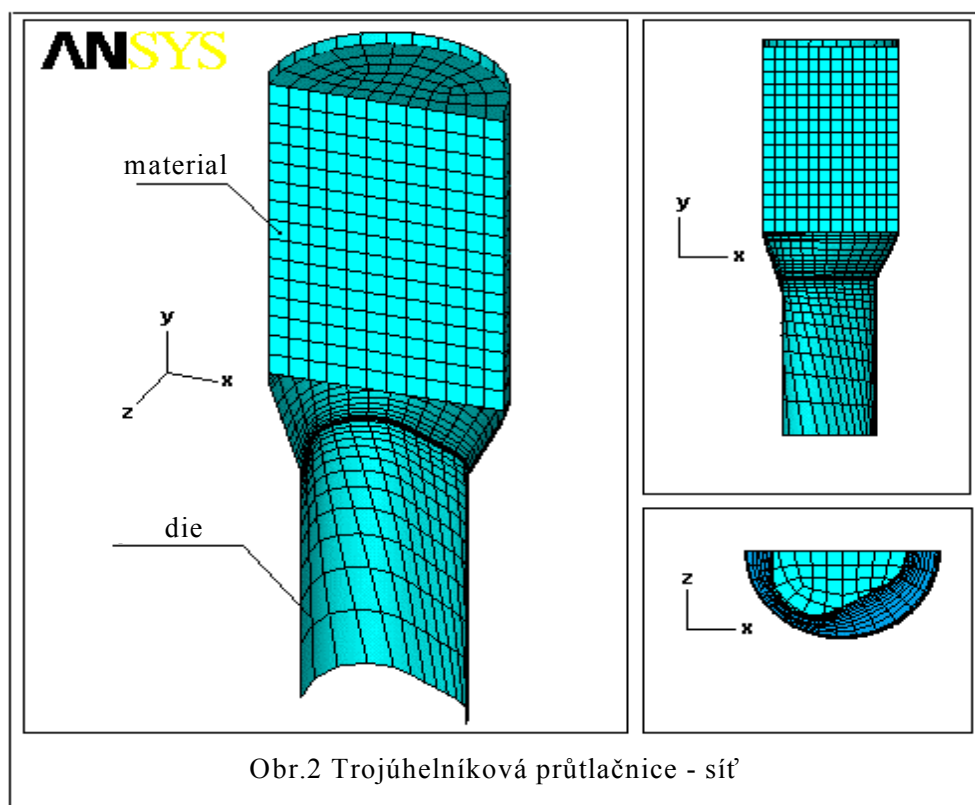
Tab. 1: Typy prvků, použité při protlačování mědi

Geometrie	Protlačovaný materiál	Průtlačnice	Kontakt
Osově symetrická	VISCO106	TARGET169	CONTAC171
Prostorová	VISCO107	TARGET170	CONTAC173



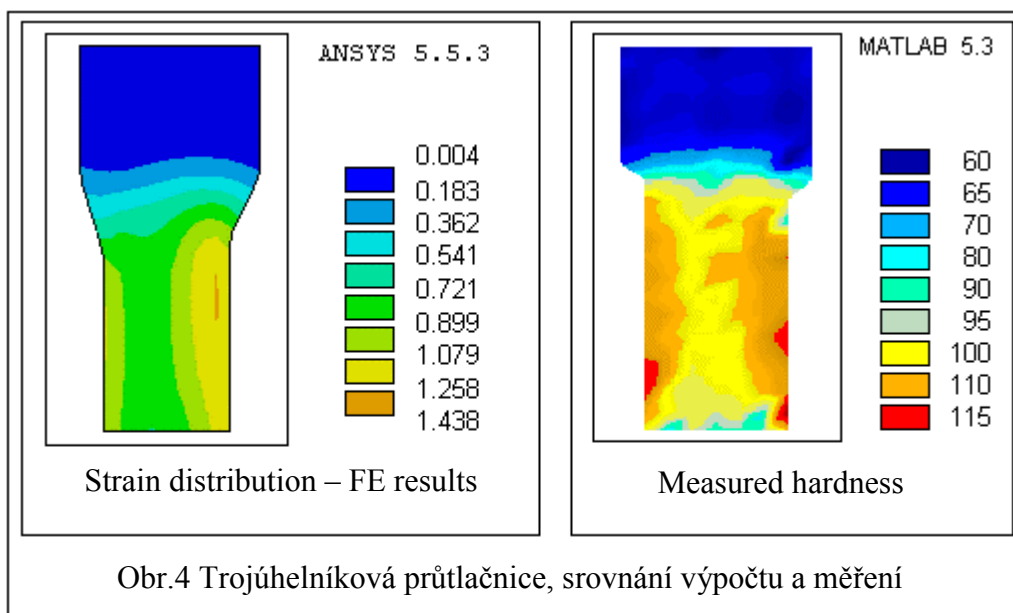
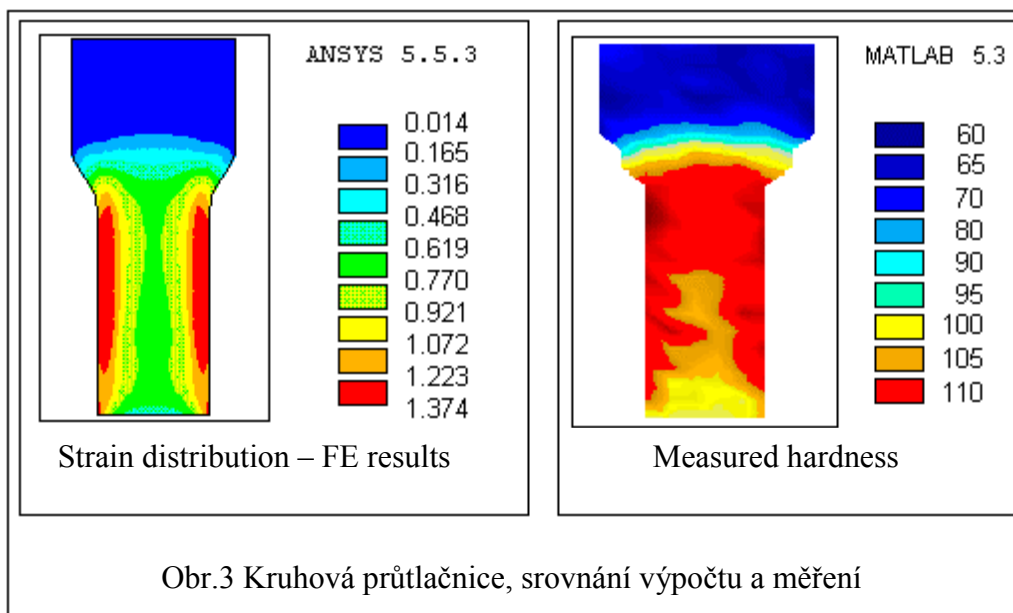
Proces toku materiálu byl modelován jako pružně-plastický (prvky typu VISCOxx) – inkrementální teorie plasticity s izotropním zpevněním, Misesovou podmínkou plasticity a pracovním diagramem určeným z nezávislých pěchovacích zkoušek. Protlačovaný materiál byl zatížen deformačně předepsáním posuvů na horní ploše válcového vzorku. Povrch průtlačnice byl uvažován jako tuhý (prvky typu TARGETxx), mezi průtlačnicí a materiálem bylo předepsáno Coulombovské tření (prvky typu CONTACxx), s koeficientem tření 0,15. Pokutový algoritmus řešení kontaktu vyžadoval optimální hodnotu normální tuhosti kontaktních prvků, která je kompromisem mezi rychlostí konvergence a přesností splnění kinematických podmínek v kontaktu. V našem případě byly použity normální tuhosti 10^7 N/mm pro 3D, resp. 10^6 N/mm pro osově symetrický

problém. Pro tyto hodnoty trval výpočet cca 3 hodiny pro osově symetrický a 30-40 hodin pro prostorový problém (Pentium 100MHz, RAM 64MB).

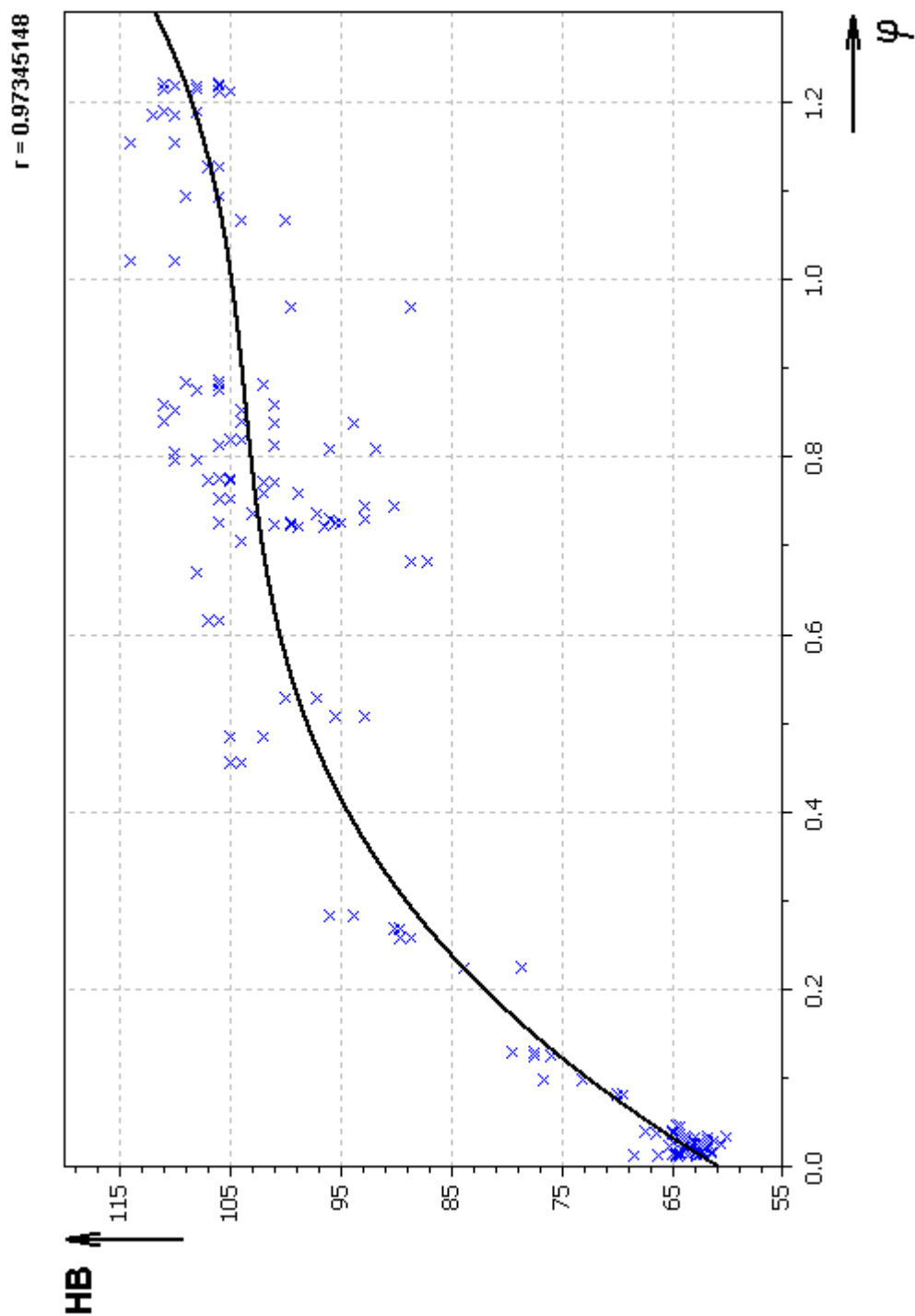


Úroveň výpočtového modelování byla posuzována srovnáním pole změřených tvrdostí a vypočtených přetvoření na osovém řezu jednotlivými vzorky. Výsledky na obr.3 a 4 ukazují toto srovnání na kruhovém a trojúhelníkovém profilu průtlačku – v levé části obrázku jsou výpočtové, vpravo experimentální výsledky. Potvrzuje se soulad v charakteru rozložení obou veličin: nárůst

v místě zúžení průtlačnice, v protlačené části pak gradient výpočtových i experimentálních hodnot směrem k povrchu průtlačku. Tyto gradienty jsou lépe zachyceny v obraze přetvoření, což lze vysvětlit jednak menší hustotou sítě měřících bodů ve srovnání se sítí MKP, zejména ale charakterem křivky tvrdost-přetvoření. Ta je pro větší hodnoty přetvoření nad 0,8 poměrně plochá, což přispívá k efektivnímu "vymazání" gradientů z obrazu tvrdostí (obr.5).



Kvalitativní soulad mezi tvrdostí a přetvořením (tj. zpevněním) materiálu je možno kvantifikovat vzájemným přiřazením lokálních hodnot tvrdosti a přetvoření v odpovídajících bodech osového řezu. Přiřazení bylo provedeno ve všech měřících bodech, křivky tvrdost-přetvoření tak byly aproximovány zhruba ze 150-180 bodů. Dobrá korelace obou veličin byla potvrzena hodnotou koeficientu korelace, pohybující se ve všech případech v rozmezí 0,95-0,97. Příklad jedné křivky je uveden na obr.5.

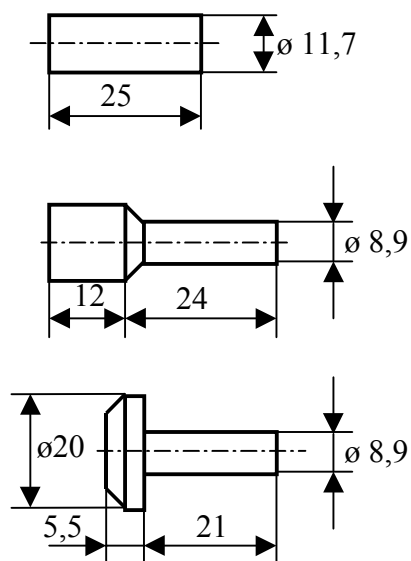


Obr.5 Křivka tvrdost-přetvoření, získaná vyhodnocením vzorku z kruhové průtláčnice

3. VÝROBA ŠROUBŮ TVÁŘENÍM ZA STUDENA

Odladěný výpočtový model protlačování byl v dalším použit při simulaci výroby šroubů, pouze s modifikací geometrických rozměrů a pracovního diagramu materiálu, který byl na základě dostupných materiálových údajů uvažován ve tvaru

$$\sigma = 952 \cdot \varepsilon^{0,18} \quad (1)$$



Obr.6 Výrobní postup šroubu

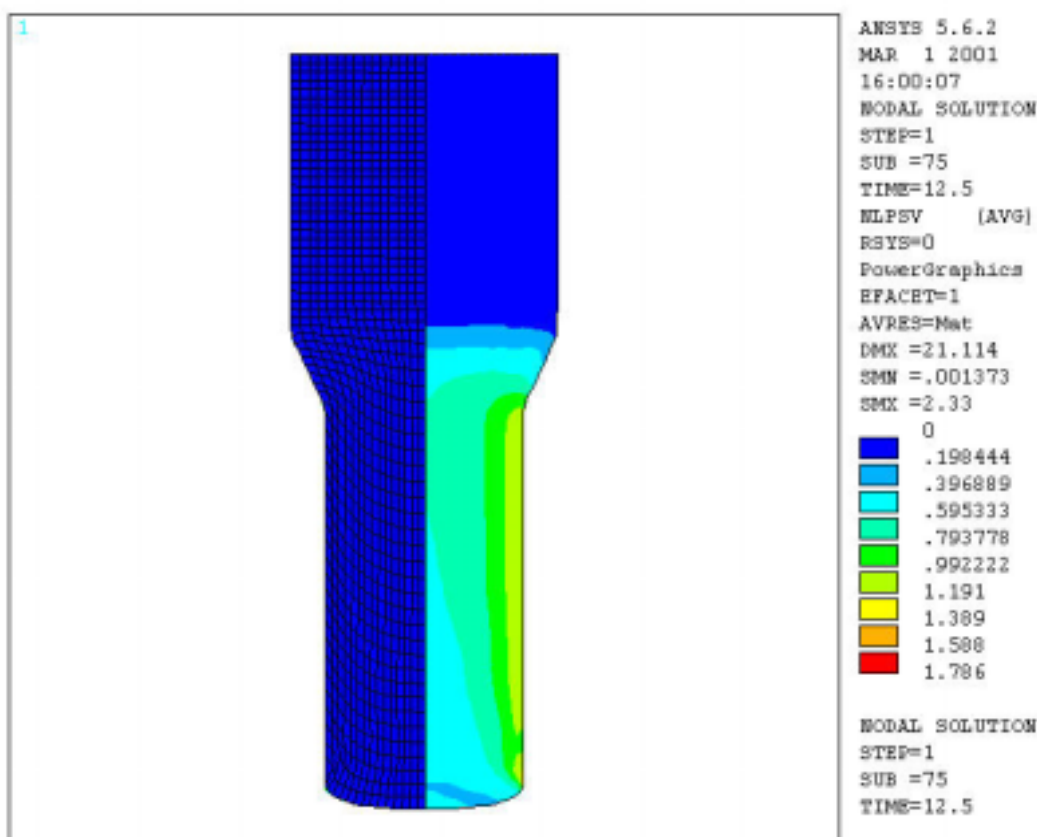
kritérií k porušení dojde, jestliže sledovaná veličina kdekoli dosáhne mezní hodnoty, která je materiálovou charakteristikou, tedy

$$\max \varepsilon_l = C_1, \quad (2)$$

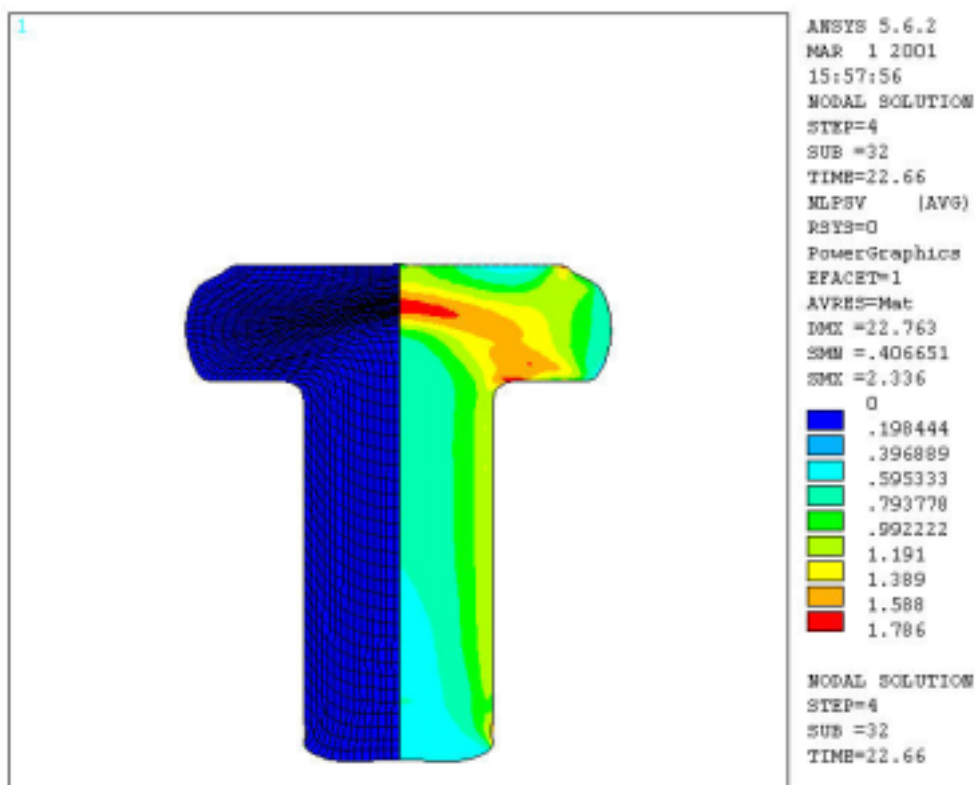
resp.

$$\max \left(\int \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq}^{pl} \right) = C_2. \quad (3)$$

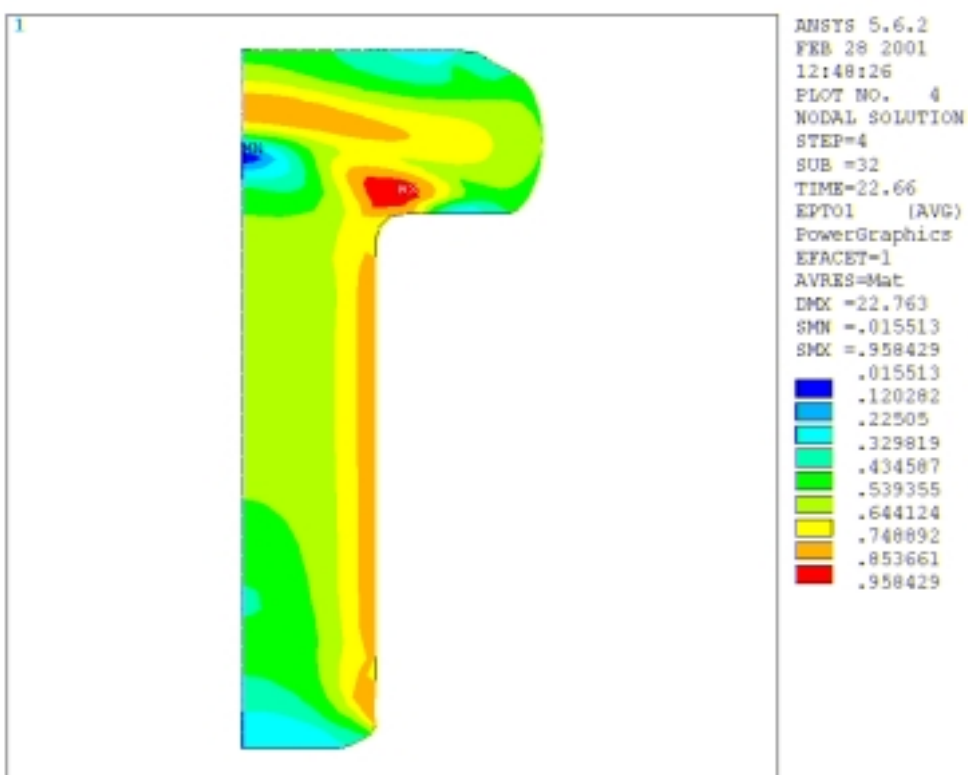
Byly simulovány dvě rozhodující etapy výroby: dopředné protlačování díku z výchozího polotovaru $\varnothing 11,7$ na $\varnothing 8,9$ a následné pěchování hlavy šroubu na $\varnothing 20$ (obr.6). Jelikož mezi oběma etapami ani následně není zařazeno tepelné zpracování, byla uvažována postupná kumulace plastické deformace v průběhu obou etap. Charakteristické rozložení intenzity přetvoření v průběhu protlačování je patrné na obr.7, kde je rovněž zachycen tvar deformované sítě na konci první etapy. Z obr.8 je zřejmé, že následující etapa pěchování vede k podstatně vyšším hodnotám přetvoření, a to zejména uprostřed hlavy šroubu a na její spodní straně, v okolí přechodu díku do hlavy. Výsledky napjatosti a přetvoření byly dále posuzovány zejména z hlediska vyčerpání tvažitelnosti a možnosti vzniku tvárného lomu v procesu výroby šroubů. Byla použita dvě nejběžnější kritéria tvárného lomu – kritérium maximálního hlavního přetvoření a měrné plastické práce. Podle těchto



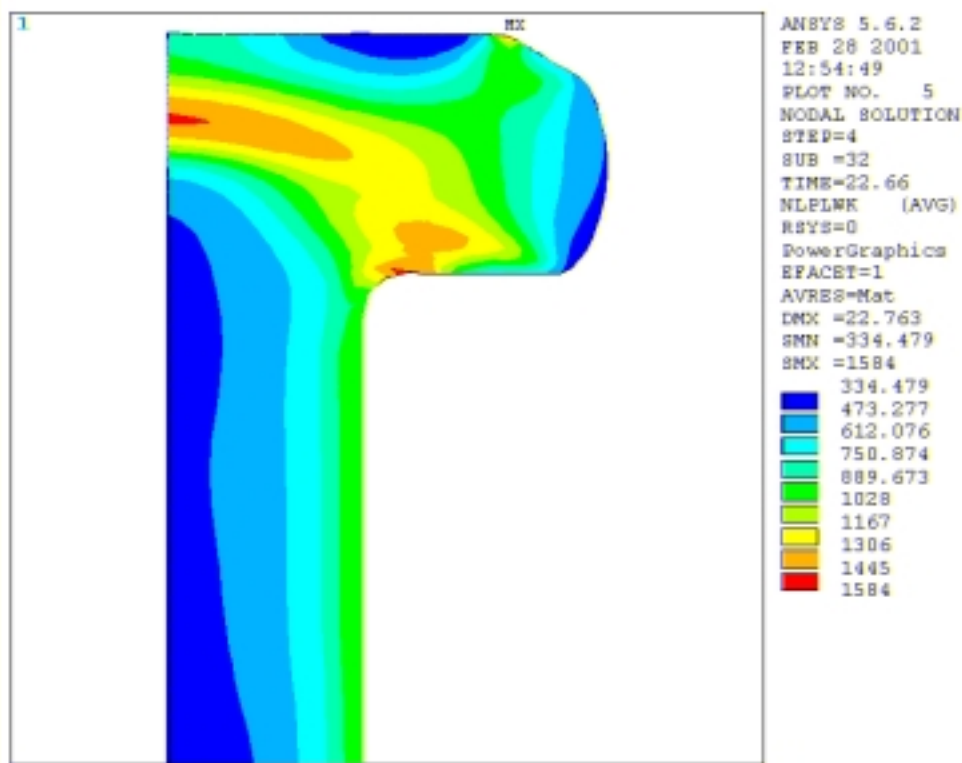
Obr.7 Deformovaná síť a intenzita plastického přetvoření na konci 1.etapy



Obr.8 Deformovaná síť a intenzita plastického přetvoření na konci 2.etapy



Obr.9 Rozložení hlavního přetvoření ϵ_1 na konci 2.etapy



Obr.10 Rozložení měrné plastické práce na konci 2.etapy [N/mm^2]

Vzhledem k tomu, že potřebné materiálové charakteristiky nejsou v této etapě k dispozici, je možno uvedené vztahy (2), (3) použít pouze k vytipování nebezpečného místa. Průběhy obou kritériálních veličin po ukončení obou výrobních etap jsou uvedeny na obr.9 a 10. Obě kritéria shodně ukazují jako kritickou oblast z hlediska porušení přechod dříku do hlavy šroubu. Přesnější kvantitativní posouzení pravděpodobnosti lomu by vyžadovalo provedení materiálových zkoušek dle [3].

4. ZÁVĚR

Byl vytvořen a experimentálně verifikován výpočtový model dopředného protlačování kovových materiálů za studena, průtlačnicemi různých profilů. Úspěšné ověření modelu umožnilo jeho použití při simulaci stěžejních etap výroby šroubů – dopředného protlačování dříku a pěchování hlavy. Praktické využití výpočtové simulace je především v oblasti predikce kritických míst z hlediska možnosti vzniku tvárného lomu. V současném stavu jsme schopni poměrně spolehlivě určit polohy nebezpečných míst, ke stanovení okamžiku porušení bude třeba experimentálně určit potřebné materiálové charakteristiky.

5. LITERATURA

1. Hořejš, S.: Výšepevné materiály pro objemové tváření za studena v sortimentu drátů a tyčí, Zpráva o řešení projektu EUREKA č.OE 50/1, VÚHŽ a.s. Dobruška, 1998
2. ČSN EN 20898 "Všeobecné požadavky na šrouby a matice"
3. Janíček, L., Petruška, J.: Ductile fracture criteria in compression and cracking of notched cylindrical specimens, Proc. 6th Int.Conf. on Technology of Plasticity, Vol.III, Springer, 1999, 2287-2292

PODĚKOVÁNÍ:

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