

Vývoj textúry pri ťahaní presných ocelových rúr za studena

Texture Evolution During Cold Drawing of Precision Steel Tubes

prof. Ing. Ľudovít Parilák, CSc.^{1,2}; Ing. Peter Burik, Ph.D.¹; Ing. Peter Bella, Ph.D.¹; Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.³

¹ ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., Kolkáreň 35, 976 81 Podbrezová, Slovenská republika

² Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove, Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovenská republika

³ Technická univerzita v Liberci, Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Studentská 2, 461 17 Liberec, Česká republika

V príspevku je analyzovaná kryštalografická orientácia na vzorkách ťahaných rúr za studena akosti E235. Hlavným cieľom bolo definovanie súvisu vývoja kryštalografickej orientácie zrn a napäťovo-deformačného stavu pri trňovom a prievlačnom ťahaní. Napäťovo-deformačný stav materiálu rúry pri jednotlivých spôsobov ťahania bol vypočítaný pomocou softwaru založenom na metóde konečných prvkov – DEFORM-3D. Kryštalografická orientácia bola meraná pomocou EBSD (Electron BackScatter Diffraction) analýzy v rastrovanom elektrónovom mikroskope. Vývoj textúry jednotlivých zrn a napäťovo-deformačný stav bol sledovaný v troch rôznych smeroch cylindrického koordinačného systému vzhľadom na smer ťahania. Taktiež bola odhadnutá hodnota napätia vyvolá rotáciu kryštalografickej mriežky, a teda zmenu podielu prednostných kryštalografických rovin pri ťahaní v danom smere. Táto štúdia umožní získať poznatky pre dosiahnutie optimálnej kryštalografickej orientácie ťahanej rúry s vlastnosťami bližiacimi sa parametrom hlbokoťažných materiálov.

KLúčové slová: presné ocelové rúry; prievlačné ťahanie; ťahanie na trni; kryštalografická textúra; metóda konečných prvkov

Cold drawing of tubes is a metal forming process that allows manufacturers to produce high precision tubes. The dimensions of the tube are reduced by drawing it through a drawing die, using the plug (i.e. plug drawing) or without the plug (i.e. hollow sinking). Therefore, the main objective was to determine the difference in the development of the crystallographic texture and also the difference in the stress-strain state between both drawing processes (plug drawing vs hollow sinking).

The input feedstock of E235 steel grade after the recrystallization annealing was cold drawn either by plug drawing or hollow sinking, using a single drawing pass. The crystallographic orientation was measured by EBSD (Electron BackScatter Diffraction) analysis using the scanning electron microscope. The stress-strain state in the tube material during drawing was calculated by FEM (Finite Element Method) software DEFORM-3D. Texture development of individual grains and the stress-strain state was evaluated in three different directions using cylindrical coordinates with respect to the drawing direction. The stress values that caused rotation of the crystal lattice were estimated. Stress in the tube material during drawing causes a change in the ratio of preferred crystallographic planes for a given direction in a cylindrical coordinate system. For example, a significant difference in preferred crystallographic plane ratio between plug drawing and hollow sinking was recorded for radial direction. In conclusion, this study will serve as a valuable basis for further optimization of the technological process of tube drawing in Železiarne Podbrezová.

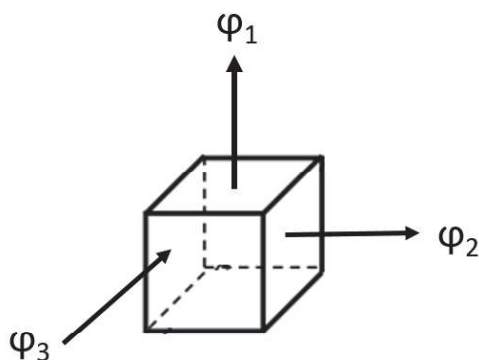
Key words: precision steel tube; hollow sinking; drawing with fixed plug; crystallographic texture; finite element method

V polykryštalickom materiáli má každé individuálne zrno odlišnú kryštalografickú orientáciu od susedného zrna. Pri výrobnom procese je len výnimočné, že zrná majú náhodnú kryštalografickú orientáciu. Pri odliatkoch sa počas tuhnutia môžu tvoriť stĺpcové zrná pozdĺž špecifického kryštalografického smeru. Počas následnej plastickej deformácie sa kryštály otáčajú smerom k určitej stabilnej orientácii. Po rekryštalizácii vzniknú nové kryštály na úkor deformovaných zrn. Všetky tieto procesy vedú k vzniku určitých preferovaných orientácií v polykryštalickom materiáli. Vývoj textúry alebo zmeny

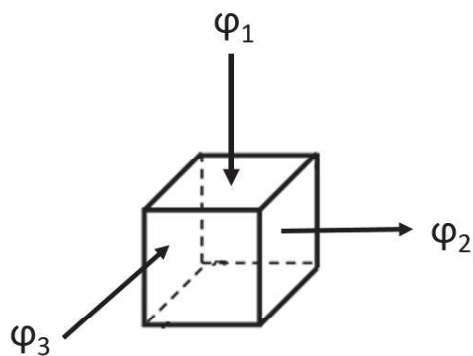
textúry v materiáli sa zvyčajne vyskytuje v dôsledku kombinácií nasledujúcich faktorov: tuhnutie, plastická deformácia, žihanie a fázová transformácia [1, 2, 3]. Tento príspevok sa venuje vývoju deformačnej textúry počas ťahania ocelových rúr za studena.

Ťahanie rúr za studena je široko používaný spôsob výroby bezšvových rúr, ktoré sa používajú na rôzne mechanické aplikácie. Ťahanie rúr je nehomogénny proces s anizotropným tokom materiálu. Rúry môžeme ťahať nasledujúcimi spôsobmi: ťahanie na trni, ťahanie na tyči

(pohyblivom trní), ťahanie prievlačným ťahom (bez trňa). Taktiež, špecifický spôsob ťahania na rebrovanom trní bol popísaný v práci [4]. Jednotlivé spôsoby sa rozlišujú podľa toho, ako sa vymedzuje vnútorný priemer rúry. Preto aj smer pretvorenia, resp. deformácie pri jednotlivých spôsoboch bude odlišný (obr. 1 a 2) [5–8]. φ_1 je pretvorenie v radiálnom smere a spôsobuje zmenu hrúbky steny rúry. φ_2 je pretvorenie v axiálnom smere a spôsobuje zmenu dĺžky rúry. φ_3 je pretvorenie v tangenciálnom smere a je stanovené zmenou priemeru rúry.



Obr. 1 Schéma pretvorenia pri ťahaní na trní
Fig. 1 Scheme of strain during drawing with fixed plug

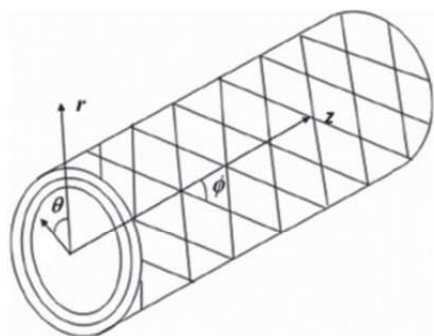


Obr. 2 Schéma pretvorenia pri prievlačnom ťahaní
Fig. 2 Scheme of strain during hollow sinking

Hlavným cieľom je určiť vývoj kryštalografickej textúry počas ťahania bezšvových oceľových rúr pomocou EBSD

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]}, \text{ (MPa)} \quad (1)$$

kde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ sú normálové napätia, τ_x, τ_y, τ_z sú šmykové napätia.



Obr. 3 Znáznomenie cylindrických súradníc na rúre [9]
Fig. 3 Cylindrical coordinate system as applied on a tube [9]

analýzy a stanoviť rozdiely medzi trňovým a prievlačným ťahaním.

1. Experimentálny materiál a metóda

Použitý materiál bola oceľ E235 s feriticko-perlitickou mikroštruktúrou. Chemické zloženie ocele je uvedené v tab. 1. Vstupný materiál bola rekryštalizačne žihaná rúra, ktorá sa ťahala za studena nasledujúcim spôsobom:

- ťahaním na pevnom trní z rozmeru $\Phi 25,00 \times 1,50$ mm na rozmer $\Phi 22,00 \times 1,25$ mm (redukcia 26,42 %),
- prievlačným ťahom z rozmeru $\Phi 18,00 \times 0,90$ mm na rozmer $\Phi 12,00 \times 0,95$ mm (redukcia 31,79 %).

Tab. 1 Chemické zloženie ocele E235 (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of E235 steel grade (wt. %)

| C | Mn | Si | P | S | Cu | Cr | Ni | Al | N |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 0,078 | 0,43 | 0,22 | 0,014 | 0,006 | 0,13 | 0,03 | 0,07 | 0,021 | 0,008 |

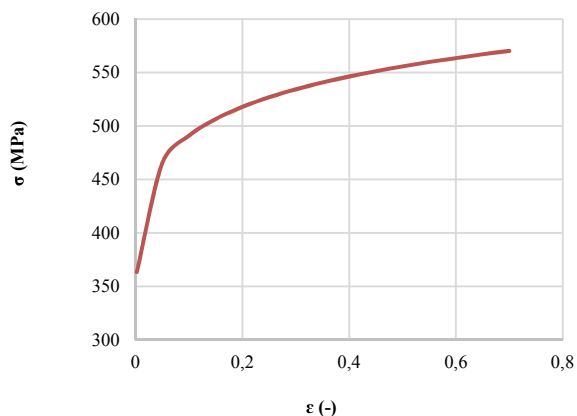
EBSD analýza bola realizovaná pred a po ťahaní za studena na celom priereze hrúbky steny rúry v pozdĺžnom smere pomocou mikroskopu UHR FE-SEM Carl Zeiss Ultra Plus pri urýchľovačom napätí 20 kV, ktorý bol vybavený detektorom OXFORD Nordlys Nano, s použitým krokom $1 \mu\text{m}$ a sklonom vzorky 70° . Záverečná príprava metalografického výbrusu pre EBSD analýzu bola realizovaná pomocou mechanicko-chemického leštenia na koloidnej suspenzii SiO_2 . Získané dáta boli analyzované pomocou softwaru HKL Channel 5.

Vývoj textúry jednotlivých zŕn a napäťovo-deformačný stav bol sledovaný v troch rôznych smeroch cylindrického koordinačného systému vzhľadom na smer ťahania. V postprocesore softvéru Deform 3D boli vyhodnotené deformačné stavy ustálených polí (steady state) pri ťahaní daným spôsobom. Vzhľadom k tomu, že dosiahnuť ustálený napäťový stav je obtiažne, z tohto dôvodu sú uvedené priemerné hodnoty napätí z oblasti deformačného pásma v danom cylindrickom smere, pri ktorých došlo k zmene rozmeru a taktiež k rotácii kryštalografickej mriežky. Pre efektívne napätie σ_i platí vzorec:

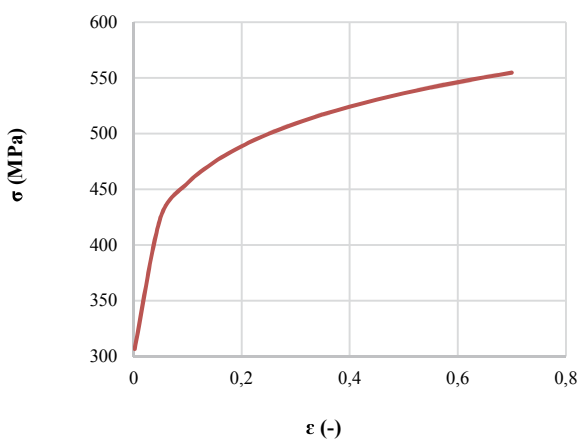
Základné vstupné podmienky, ktoré sa použili na modelovanie procesu ťahania sú v tab. 2. Koeficienty trenia boli overené prostredníctvom zhody hodnôt ťažnej sily [9]. Materiálové dáta boli stanovené pomocou ťahových skúšok a následne bola použitá extrapolácia pre stanovenie vyšších deformácií (obr. 4 a 5).

Tab. 2 Základné vstupné dáta do modelu ťahania
Tab. 2 Basic input data to the model of drawing

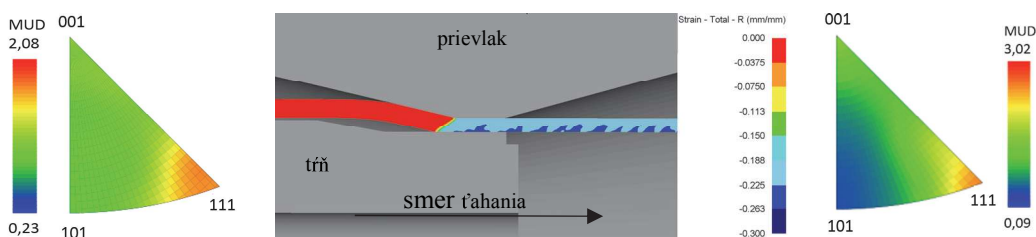
| Ťah. rozmeru (mm) | Uhol prievlaku | Koef. trenia | Rýchlosť ťah. (mm·s ⁻¹) | Ťažný uhol trňa |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|
| Φ25,00 × 1,50 → Φ 22,00 × 1,25 | 26° | 0,08 | 400 | 0°8' |
| Φ 18,00 × 0,90 → Φ 12,00 × 0,95 | R35 | 0,06 | 500 | |



Obr. 4 Deformačný odpor pre rúru: Φ 25,00 × 1,50 mm
Fig. 4 Deformation resistance for tube Φ 25,00 × 1,50 mm



Obr. 5 Deformačný odpor pre rúru Φ 18,00 × 0,90 mm
Fig. 5 Deformation resistance for tube Φ 18,00 × 0,90 mm



Obr. 6 Ťahanie na trni: rozloženie deformácie pri ťahaní v radiálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)
Fig. 6 Plug drawing: distribution of effective strain in the radial direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)

2. Výsledky experimentu a diskusia

EBSD analýza bola realizovaná s cieľom pochopiť vývoj kryštalografickej textúry počas ťahania presných rúr. Textúra je zobrazená pomocou inverzných pólových obrazcov (Inverse Pole Figure – IPF). Intenzita IPF obrazcov je vyjadrená pomocou násobkov jednotkovej hustoty (Multiple of Uniform Density – MUD). Ak je hodnota MUD vyššia ako 1, tak existuje viacej dátových bodov určitej orientácie, ako by sa dalo očakávať od vzorky, ktorá má náhodnú kryštalografickú orientáciu.

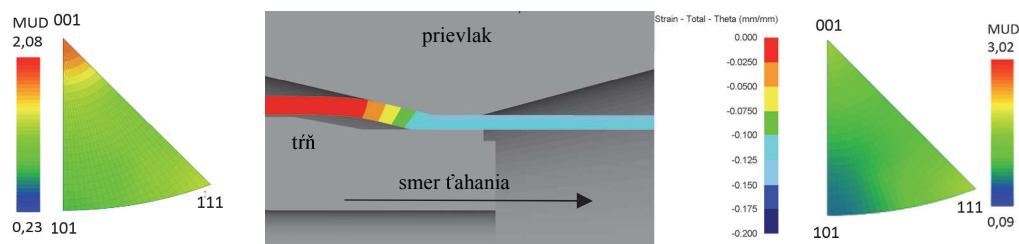
Ako môžeme vidieť na obr. 6–11, pri ťahaní rúry je nerovnomerné rozloženie deformácie po hrúbke steny rúry, ktoré sa mení aj v závislosti od jednotlivých deformačných pásiem.

2.1 Ťahanie na trni

Rúra, ktorá vstupovala do ťahu bola rekryštalizačne žihaná (bez ochrannej atmosféry), následne morená v HCl, ďalej fosfátovaná a posledným krokom úpravy bolo ponorenie do reaktívneho mydla. Ťahanie bolo realizované technológiou ťahania na tvarovom trni, ktorý je upevnený na trňovej tyči. Na obr. 6–8 je vidieť rozloženie deformácie pri trňovom ťahaní v danom cylindrickom smere. V radiálnom a tangenciálnom smere je materiál rúry pri ťahaní deformovaný tlakovou deformáciou (obr. 6 a 7). Z numerických simulácií bolo vypočítané, že tlakovú deformáciu vyvolalo tlakové napätie, ktorého priemerná hodnota z pásma deformácie bola $\sigma = -451$ MPa v radiálnom smere a $\sigma = -375$ MPa v tangenciálnom smere.

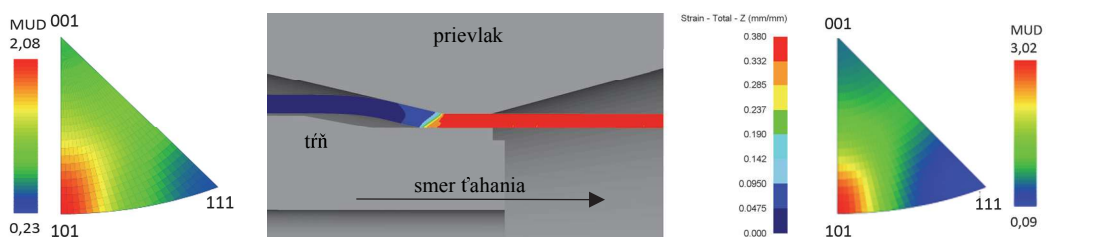
Inverzné pólové obrázky ukazujú, že vplyvom tlakového napätia došlo k zmene hustoty pólov v jednotlivých rovinách. V radiálnom smere bola pred ťahaním najvyššia hustota pólov v (111) a po ťahaní sa táto hustota pólov ešte navýšila. V tangenciálnom smere počas ťahania dochádza k rotácii kryštálu, pričom dochádza k zmene textúry z (001) do (001)/(111).

V axiálnom smere je materiál rúry pri ťahaní rúry deformovaný ťahovou deformáciou (obr. 8). Prostredníctvom simulácie bolo vypočítané, že túto deformáciu spôsobila dominantná ťahová zložka napätia, ktorého priemerná hodnota bola $\sigma = 352$ MPa v stene rúry tesne za prievlakom. Vplyvom ťahového napätia sa zvyšuje hustota pólov v (101).



Obr. 7 Ťahanie na trni: rozloženie deformácie pri ťahaní v tangenciálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)

Fig. 7 Plug drawing: distribution of effective strain in the tangential direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)



Obr. 8 Ťahanie na trni: rozloženie deformácie pri ťahaní v axiálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)

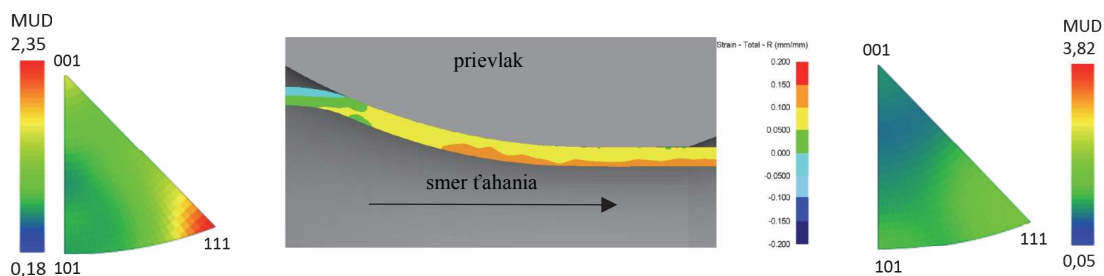
Fig. 8 Plug drawing: distribution of effective strain in the axial direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)

2.2 Prievlačné ťahanie

Rúra, ktorá vstupovala do ťahu bola rekryštalizačne žíhaná (bez ochrannej atmosféry) a následne ťahaná prievlačným spôsobom na reakčnom oleji. Na obr. 9 – 11 je znázornené rozloženie deformácie v pozdĺžnom reze hrúbky steny rúry pri prievlačnom ťahaní. V radiálnom smere sú pozorované nízke hodnoty ťahových deformácií, pretože nedochádza k redukcii hrúbky steny rúry (obr. 9). Z numerických simulácií bolo vypočítané, že ťahovú deformáciu spôsobilo ťahové napätie, ktorého priemerná hodnota z pásma deformácie bola $\sigma = 102$ MPa. Táto ťahová zložka napätia vyvolaná geometriou prievlaku v tvárniacom pásme spôsobila zvýšenie hrúbky steny o 0,05 mm. Zhrubnutie steny rúry bolo potvrdené aj výsledkom z numerických simulácií [9]. Z inverzných pólových obrázkov je vidieť, že vplyvom ťahového napätia došlo k rotácii kryštálu, kde pred ťahaním bola najvyššia hustota pólov v (111) a po ťahu došlo k zmene textúry, ktorá je v (101)/(111).

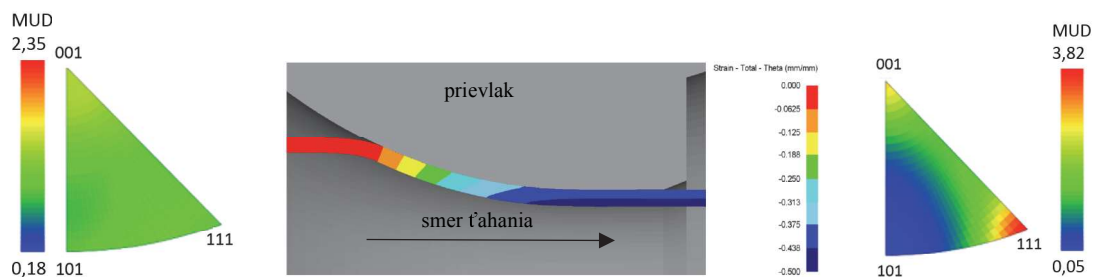
V tangenciálnom smere, podobne ako pri trňovom ťahaní, pôsobí dominantná tlaková deformácia, pričom pomocou numerických simulácií bolo vypočítané, že túto deformáciu spôsobilo dominantné tlakové napätie, ktorého priemerná hodnota z pásma deformácie bola $\sigma = -458$ MPa (obr. 10). Inverzné pólové znázornenie (obr. 10) ukazuje, že vplyvom tlakového napätia došlo k zmene hustoty pólov v jednotlivých rovinách, kde pred procesom ťahania bola rovnomerná hustota pólov a po ťahaní sa zvýšila hustota pólov v (111).

V axiálnom smere bol materiál rúry pri prievlačnom ťahaní deformovaný ťahovou deformáciou (obr. 11). Túto ťahovú deformáciu spôsobilo ťahové napätie, ktorého priemerná hodnota bola $\sigma = 353$ MPa v stene rúry tesne za prievlakom. Inverzné pólové obrázky ukazujú, že po prvom ťahu došlo k miernej zmene hustoty pólov v jednotlivých rovinách, a teda navýšením hustoty pólov v rovine (101) po ťahaní.



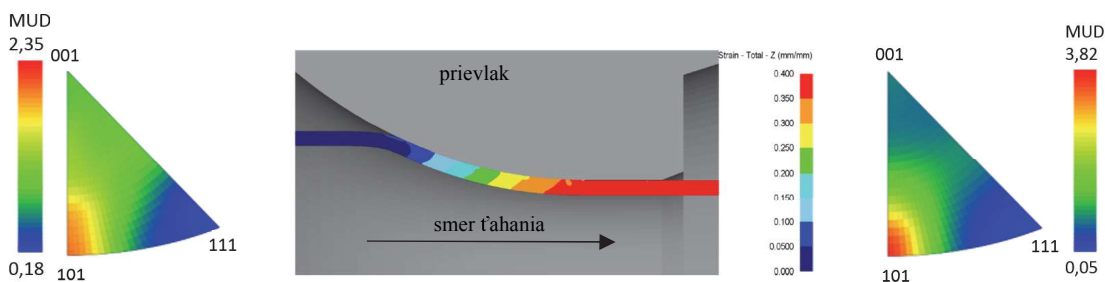
Obr. 9 Prievlačné ťahanie: rozloženie deformácie pri ťahaní v radiálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)

Fig. 9 Hollow sinking: distribution of effective strain in the radial direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)



Obr. 10 Prievlačné ťahanie: rozloženie deformácie pri ťahaní v tangenciálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)

Fig. 10 Hollow sinking: distribution of effective strain in the tangential direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)



Obr. 11 Prievlačné ťahanie: rozloženie deformácie pri ťahaní v axiálnom smere (v strede) a inverzný pólový obrázok pred (vľavo) a po ťahu (vpravo)

Fig. 11 Hollow sinking: distribution of effective strain in the axial direction during drawing (centre) and IPF before (left) and after drawing (right)

4. Záver

Na základe textúrnej charakteristiky oceľových rúr z E235 ocele pomocou EBSD analýzy riešiteľa dospeli k nasledujúcim záverom:

- Pri trňovom ťahu v axiálnom smere dominantne pôsobí ťahové napätie, ktoré vyvoláva rotáciu kryštalografickej mriežky do stabilnej polohy, ktorá je v rovine (101) v mriežke BCC. V radiálnom a tangenciálnom smere pôsobia dominantné zložky tlakového napätia, ktoré spôsobujú rotáciu kryštalografickej mriežky do stabilnej polohy, ktorá je v rovine (111) v mriežke BCC [10].
- Pri prievlačnom ťahaní v axiálnom a radiálnom smere pôsobí dominantné ťahové napätie, vplyvom ktorého kryštalografická mriežka rotuje do stabilnej polohy, ktorá je v rovine (101) v mriežke BCC. V tangenciálnom smere pôsobí dominantné tlakové napätie, ktoré vyvoláva rotáciu kryštalografickej mriežky do stabilnej polohy, ktorá je v rovine (111) v mriežke BCC [10].

Literatúra

[1] HSUN, H. Texture of Metals. *Texture*, Gordon and Breach Science Publishers Ltd., Veľká Británia, (1974) 1, 233–258.
[2] PARK, H., LEE, D. N. Deformation and Annealing Textures of Drawn AlMgSi Alloy Tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, (2001) 113, 551–555.

[3] GULLBERG, D. *Influence of Composition, Grain Size and Manufacture Process on the Anisotropy of Tube Materials*. (Doctoral thesis) Uppsala University, 2010, 54 p.
[4] BELLA, P., BUČEK PRIDZOŇ, M., MOJŽIŠ, M., PARILÁK, E. Numerical simulation of multi-rifled tube drawing – finding proper feedstock dimensions and tool geometry, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 179 (2017), doi: 10.1088/1757-899X/179/1/012008.
[5] LOHARKA P. K., PRADHAN, M. K. *Modeling and Analysis of Cold Drawing Process*. Handbook of Research on Manufacturing Process Modeling and Optimization Strategies, ed. R. Das, M. Pradhan. 2017. s. 40–53, DOI: 10.4018/978-1-5225-2440-3.ch003.
[6] BOUTENELA, F., DELHOMMED, M., VELAYA, V., BOMANC, R. Finite Element Modelling of Cold Drawing for High Precision Tubes. *Comptes Rendus Mécanique*, 348 (2017) 8, 665–677.
[7] RAJI, N. A., OLUWOLE, O. O. Influence of Degree of Cold-Drawing on the Mechanical Properties of Low Carbon Steel. *Materials Sciences and Applications*, 11 (2011) 2, 1556–1563.
[8] BROKMEIER, H. G. et al. Texture Gradient in a Copper Tube at Maximum and Minimum Wall Thickness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2015) 82. doi:10.1088/1757-899X/82/1/012102.
[9] BELLA, P., RIDZOŇ, M., MOJŽIŠ, M., PARILÁK, E. The Technology of Cold Drawing of Seamless Steel Tubes Using Numerical Simulation, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 84 (2017) 8, 356–358, ISSN 1230-3534.
[10] HOSFORD, W. F. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, 2010. ISBN-13 978-0-521-19569-0.