
Analýza vlastností medených drôtov vyrobených pretlačovaním

Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.*

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.
E-mail: jozef.bilik@stuba.sk, Tel.: +421 915 761 406

Róbert Sobota, Ing., PhD.

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava.
E-mail: robert.sobota@stuba.sk, Tel.: +421 908 657 796

Analysis of the properties of copper wires produced by extrusion

Abstract: The article focuses on the production of copper wires by extrusion and the evaluation of their mechanical properties. The article presents the results obtained on the basis of tensile tests and on the basis of hardness measurement. The tests were carried out on a semi-finished product with a circular cross-section and on manufactured wires with a rectangular cross-section. The wires produced were 9.5x4.5 mm, 10.5x1.65 mm and 5.75x1.35 mm. The impact of the transformation on the microstructure of the produced wire was also monitored.

Keywords: copper wire, extrusion, reduction, strain.

ÚVOD

Článok sa venuje problematike riešenia výroby drôtov pretlačovaním určených najmä pre oblasť výroby káblov. Výroba drôtov je vysoko aktuálna vzhľadom na širokú oblasť ich využitia v rôznych odvetviach priemyselnej výroby. V článku je uvedená analýza procesu výroby z hľadiska dosiahnutia požadovanej kvality a produktivity výroby. V texte je analýza vlastností vstupného polotovaru a vlastností drôtu vyrábaného pretlačovaním v súvislosti s veľkosťou pretvorenia v procese pretlačovania. Pozornosť je zameraná na výrobu plochých medených drôtov s obdĺžnikovým prierezom.

Pri výrobe drôtov dochádza k výraznej zmene prierezu vstupného polotovaru, ktorý je najčastejšie vo forme valcovaného drôtu dodávaného vo zvitkoch. V súčasnosti sa pri výrobe drôtov najčastejšie využíva technológia ťahania cez prievlaky, a to najmä pri výrobe drôtov kruhového prierezu. Pri výrobe drôtov sa v niektorých prípadoch využíva aj technológia dopredného pretlačovania, ako je to napríklad pri výrobe drôtov pre zváracie elektródy a pod. Okrem toho sa pri výrobe medených drôtov nekrhového prierezu využíva aj technológia pretlačovania, pri ktorej je polotovar vo forme zvitku a do pretlačovacej

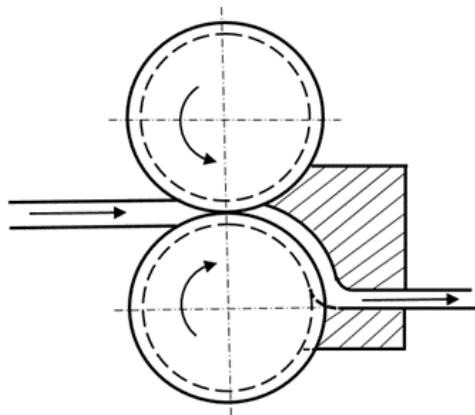
hlavy je tlačný pomocou valcov ktoré vyvíjajú pretlačovaciu silu.

1 PRÍPRAVA VZORIEK NA ANALÝZU VLASTNOSTÍ

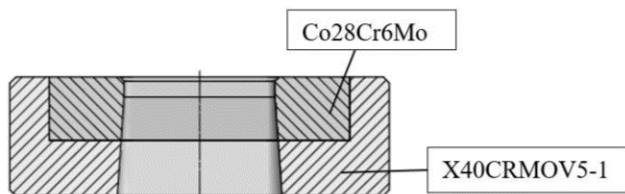
Analyzované drôty boli vyrobené v spoločnosti *Vicente Torns Slovakia a. s.*, ktorá používa pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnych nástrojov (nožov), ktorých vonkajšia časť je z materiálu X40CRMOV5-1 a vnútorná, teda funkčná časť nástroja (noža), je z materiálu Co28Cr6Mo. Táto technológia je založená na podobnom princípe ako je technológia ECAR (*equal chanel angular rolling*) ktorá patrí medzi technológie intenzívnych plastických deformácií (IPD). Princíp technológie je uvedený na obr. 1.

Pri samotnom pretlačovaní v dôsledku výraznej plastickej deformácie a rýchlosti pretvorenia vzniká množstvo tepla a dochádza k ohrevu pretlačovaného materiálu až nad teplotu rekryštalizácie. Funkčné časti nástrojov na výrobu analyzovaných drôtov sú vyrobené z nástrojovej ocele 19554 (X40CRMOV5-1) a ocele Co28Cr6Mo (obr. 2).

Na obr. 2 je znázornené použitie daných materiálov na nástroj pri výrobe drôtov pretlačovaním.



Obr. 1. Princíp technológie výroby medených drôtov pretlačovaním



Obr. 2. Nástroj na výrobu drôtov pretlačovaním

Technologický proces výroby drôtu pretlačovaním je realizovaný vo výrobnej linke pozostávajúcej z odvíjacieho zariadenia, zariadenia na pretlačovanie pomocou valcov a špeciálnej pretlačovacej hlavy, chladiaceho zariadenia a navíjacieho zariadenia. Niektoré časti linky sú uvedené na obr. 3 až obr. 6.



Obr. 3. Vstup materiálu (polotovaru) do stroja medzi valce na pretlačovanie



Obr. 4. Pohľad na otvorenú výstupnú časť pretlačovacieho zariadenia s odklopeným špeciálnym nástrojom (pretlačovacou hlavou)



Obr. 5. Výstup drôtov z pretlačovacej hlavy a začiatok chladenia



Obr. 6. Chladenie drôtu po pretlačovaní

2 ANALÝZA VLASTNOSTÍ DRÔTOV

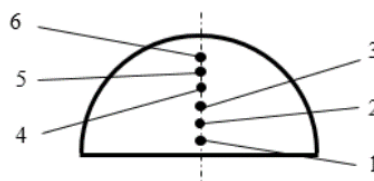
Na analýzu vlastností vybraných typorozmerov drôtov sa realizovalo meranie tvrdosti a určenie mechanických vlastností na základe ťahovej skúšky. Na sledovanie vplyvu deformácie na štruktúru bola použitá analýza mikroštruktúry pred a po pretlačovaní.

2.1 Výsledky merania tvrdosti HV5

Na analýzu boli používané dva typy medeneho polotovaru a tri typy drôtov vyrobených technológiou pretlačovania. Tvrdosť sa stanovila meraním podľa *Vickersa* na priečnom reze na vzorkách pripravených zo vstupného polotovaru a z vyrobených drôtov. Veľkosť záťaže bola 49,03 N (5 kp) a čas záťaže 10 s. Tvrdosť bola meraná na tvrdomery *ZWICK 3212* podľa normy *STN EN ISO 6507*.

2.1.1 Meranie tvrdosti HV5 na polotovare v priečnom reze

Na obr. 7 sú znázornené miesta merania tvrdosti na vstupnom polotovare s priemerom $\varnothing 12,7$ mm.



Obr. 7. Miesta merania tvrdosti na polotovare v priečnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti vstupného polotovaru z bezkyslíkovej (OXY) a elektrotroskovo pretavovanej (ETP) medi sú uvedené v tab. 1 a tab. 2.

Tab. 1. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovary OXY

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu [mm]	1	2	3	4	5	6
Tvrdość HV5	55,2	54,6	60,3	63,5	64,2	71,2

Tab. 2. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre polotovary ETP

Miesto merania	1	2	3	4	5	6
Vzdialenosť od stredu [mm]	1	2	3	4	5	6
Tvrdość HV5	56,3	58,2	62,6	65,6	66,3	71,2

2.1.2 Meranie tvrdosti HV5 na vyrobených drôtoch v priečnom reze

Namerané hodnoty tvrdosti drôtu sú uvedené v tab. 3, tab. 4 a tab. 5.

Tab. 3. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 9,5x4,5

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdość HV5	62,9	70,8	64,2	65,97

Tab. 4. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 10,5x1,65

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdość HV5	58,2	56,5	62,6	59,10

Tab. 5. Namerané hodnoty tvrdosti HV5 pre drôt 5,75x1,35

Číslo merania	1	2	3	Stredná hodnota
Tvrdość HV5	75,7	73,2	72,8	73,90

2.2 Výsledky z ťahových skúšok

Na meranie tvrdosti takisto aj na ťahové skúšky boli pripravené vzorky z dvoch typov polotovaru a troch typov drôtov. Ťahové skúšky boli robené na trhačke EU 40. Ide o takmer čistú meď. Polotovary: ETP (elektrotroskovo pretavovaná) a OXY (bezoxidová resp. bezkyslíková).

2.2.1 Výsledky pre vstupný polotovary

Polotovary OXY

Stredný priemer polotovaru (vzorky): $d_{OS} = 12,7$ mm.

Počiatková meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 100$ mm.

Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary OXY sú uvedené v tab. 6.

Polotovary ETP

Stredný priemer: $d_{OS} = 12,7$ mm.

Počiatková meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 85$ mm.

Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary ETP sú uvedené v tab. 7.

Tab. 6. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary OXY

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	12,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	22,3
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	77,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R [mm]	6,1
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	29,21
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	97,95
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	176,15
Ťažnosť [%]	77,5
Kontrakcia [%]	76,9
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,556

Tab. 7. Výsledky merania z ťahovej skúšky pre polotovary ETP

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	13,0
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	30,0
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	76,5
Priemer krčka v mieste roztrhnutia d_R [mm]	6,3
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	126,6
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	31,16
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	102,7
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	237,0
Ťažnosť [%]	90,0
Kontrakcia [%]	75,4
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,433

2.2.2 Výsledky pre vyrobené drôty

Pre každý typorozmer drôtu bola ťahová skúška realizovaná na dvoch vzorkách.

Tab. 8. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	4,7
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	10,5
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	75,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	5,84x2,06
Počiatkový prierez vzorky S_0 [mm ²]	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	12,03
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	109,9
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	245,6
Ťažnosť [%]	50,0
Kontrakcia [%]	71,8
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,447

Drôt 9,5x4,5 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky vo forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 8 a pre vzorku č. 2 v tab. 9.

Tab. 9. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	4,6
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	10,4
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	79,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	5,73x2,08
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	42,75
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	11,92
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	107,6
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	243,3
Ťažnosť [%]	53,0
Kontrakcia [%]	72,1
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,442

Drôt 10,5x1,65 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky vo forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 10 a pre vzorku č. 2 v tab. 11.

Tab. 10. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	1,3
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	3,96
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	72,1
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	7,22x1,14
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	8,23
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	75,04
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	228,6
Ťažnosť [%]	48,1
Kontrakcia [%]	52,5
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,328

Tab. 11. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	1,4
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	4,1
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	72,0
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	7,60x1,12
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	17,325
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	8,512

Tab. 11. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2 (pokračovanie)

Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	80,8
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	236,65
Ťažnosť [%]	48,0
Kontrakcia [%]	50,9
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,341

Drôt 5,75x1,35 mm

Počiatočná meraná dĺžka vzorky: $L_0 = 150$ mm.

Výsledky z ťahovej skúšky o forme nameraných a vypočítaných hodnôt pre vzorku č. 1 sú uvedené v tab. 12 a pre vzorku č. 2 v tab. 13.

Tab. 12. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 1

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	0,72
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	1,94
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	64,5
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	4,08x0,85
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	3,47
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	92,75
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	249,9
Ťažnosť [%]	43,0
Kontrakcia [%]	55,3
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,371

Tab. 13. Výsledky merania z ťahovej skúšky - vzorka č. 2

Sila na medzi klzu $F_{Rp0,2}$ [kN]	0,70
Sila na pevnosti v ťahu F_{Rm} [kN]	1,90
Predĺženie do roztrhnutia ΔL_R [mm]	63,2
Rozmery krčka v mieste roztrhnutia Šírka x hrúbka [mm]	4,20x0,90
Počiatočný prierez vzorky S_o [mm ²]	7,762
Prierez v mieste roztrhnutia S_R [mm ²]	3,78
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	90,2
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	244,8
Ťažnosť [%]	42,1
Kontrakcia [%]	51,3
Pomer medze klzu a pevnosti v ťahu [-]	0,368

Vstupný materiál s priemerom $d_{0S} = 12,7$ mm aj z neho vyrobené drôty s rozmermi 9,5x4,5, 10,5x1,65 a 5,75x1,35 majú pomer medze klzu a pevnosti v ťahu menší ako 0,65, ako aj vysokú ťažnosť nad 40 %, čo svedčí o veľmi dobrých plastických vlastnostiach polotovaru aj vyrobených drôtov.

3 VÝPOČET VEĽKOSTI SKUTOČNÉHO PRETVORENIA A REDUKCIE

Z hľadiska priebehu procesu tvárnenia aj z hľadiska výsledných vlastností výtvarkov a teda aj drôtov významnú úlohu zohráva aj veľkosť pretvorenia, ktorá je jednou z termomechanických podmienok tvárnenia. Preto sa realizoval aj výpočet pretvorenia pri výrobe jednotlivých typorozmerov drôtov.

Priemer vstupného polotovaru pre všetky tri typorozmery drôtu: $d_{pol} = 12,7$ mm.

Prierez vstupného polotovaru: $S_{pol} = 126,61$ mm².

Časť prierezu vstupného polotovaru sa pred jeho vstupom do pretlačovacej hlavy odstráni orezaním a potom prierez vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní je:

$$S_o = S_{pol} - S_{or}, \quad (1)$$

kde S_{pol} - prierez vstupného polotovaru,

S_{or} - orezaný prierez.

Odpad pri orezávaní pred vstupom polotovaru do pretlačovacej hlavy tvoril pri súčasnom spôsobe výroby približne 7 %.

Potom orezaný prierez S_{or} , o ktorý sa zmenší pôvodný prierez polotovaru je:

$$S_{or} = 0,07 \cdot S_{pol} = 0,07 \cdot 126,61 \text{ mm}^2 = 8,86 \text{ mm}^2. \quad (2)$$

Prierez polotovaru vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní je:

$$S_o = 126,61 \text{ mm}^2 - 8,86 \text{ mm}^2 = 117,75 \text{ mm}^2. \quad (3)$$

3.1 Výpočet veľkosti pretvorenia pre jednotlivé typorozmery vyrobených drôtov

Výpočet veľkosti skutočného pretvorenia sa realizoval podľa vzorca:

$$\varphi = \ln \frac{S_o}{S}, \quad (4)$$

kde S_o - počiatočný prierez vstupujúci do pretlačovacej hlavy po orezaní,

S - prierez drôtu po pretlačovaní.

Výpočet veľkosti redukcie sa realizoval podľa vzorca:

$$R = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100 [\%]. \quad (5)$$

Výsledky výpočtov sú uvedené v tab. 14.

Tab. 14. Veľkosť skutočného pretvorenia a redukcie pri pretlačovaní jednotlivých typorozmerov drôtov

Rozmery drôtu [mm]	Skutočné pretvorenie φ [-]	Redukcia R [%]
9,5x4,5	1,010	63,7
10,5x1,65	1,916	85,3
5,75x1,35	2,719	93,4

4 METALOGRAFIA

Na posúdenie vplyvu procesu výroby drôtov technológiou pretlačovania bola sledovaná aj mikroštruktúra pred a po pretlačovaní.

Príprava vzorky sa realizovala nasledujúco:

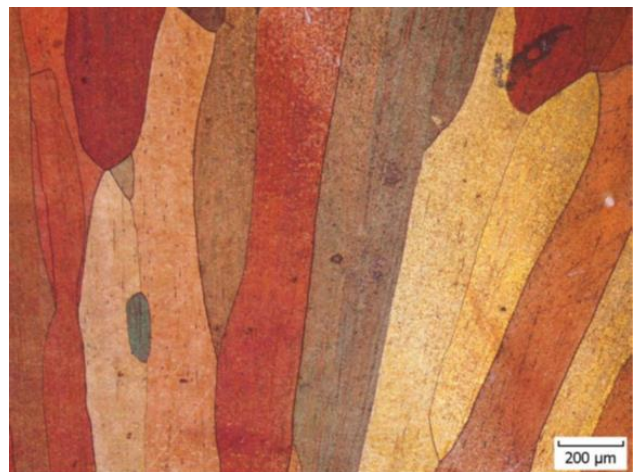
- delenie materiálu (odber vzorky),
- označenie,
- zalisovanie,
- brúsenie,
- leštenie,
- zviditeľnenie štruktúry leptaním.

Pri príprave vzoriek boli použité tri brúsne kotúče so zrnitosťou 120, 240 a 600, pričom boli nastavené otáčky 300 s⁻¹ a záťaž 30 N.

Bolo použité mechanické leštenie pomocou diamantovej pasty. Po každom leštení boli vzorky opláchnuté vodou a alkoholom.



Obr. 8. Mikroštruktúra polotovaru pred pretlačovaním



Obr. 9. Mikroštruktúra drôtu po pretlačovaní

Vzorky pred leptaním boli vyčistené vatou a alkoholom. Po leptaní vzorky boli umiestnené pod tečúcu vodu a opláchnuté alkoholom a vysušené teplým vzduchom. Na leptanie bolo použité leptadlo určené pre zliatiny meďi Cu-Zn, a to 10 % roztok persíranu amónneho s dobou leptania 30 s.

Na obr. 8 je uvedená mikroštruktúra polotovaru pred pretlačovaním.

Na obr. 9 je zobrazená mikroštruktúra drôtu na pozdĺžnom reze po pretlačovaní.

ZÁVER

Článok sa zaoberal hodnotením výsledných mechanických vlastností vyrábaných drôtov. Na základe vykonaných skúšok na vstupnom polotovare ako aj na vybraných typorozmeroch vyrobených drôtov sa zistili výsledné mechanické vlastnosti a to medza klzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť a kontrakcia. Výsledky potvrdili výborné mechanické vlastnosti vyrobených drôtov ako aj dobrú plasticitu vstupných polotovarov. Na vstupnom polotovare pomer medze klzu a pevnosti v ťahu ako jeden z ukazovateľov plasticity (húževnatosti) dosahoval hodnotu menšiu ako 0,6, pričom tento ukazovateľ u vyrobených drôtov technológiou kontinuálneho pretlačovania dosahoval hodnotu menšiu ako 0,5.

Pri výrobe drôtov pretlačovaním v dôsledku veľkého plastického pretvorenia, ktoré na základe výpočtov pre jednotlivé typorozmery drôtov dosahovalo hodnotu $\varphi = 1,01$ až $2,719$ a tiež v dôsledku trenia v pretlačovacom nástroji pri kontinuálnom procese výroby vzniká vysoká teplota presahujúca teplotu rekryštalizácie, ktorá tiež ovplyvňuje vlastnosti drôtov. Napriek tomu, štruktúra vyrobených drôtov vykazovala výraznú deformáciu.

Pri súčasnej výrobe týchto drôtov vzniká približne $7\% \div 8\%$ odpadu, pričom ide o drahý vstupný polotovar. Z toho dôvodu boli riešené aj možnosti zníženia odpadu. Tieto možnosti nie sú v príspevku uvedené.

Pod'akovanie

Článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023.

LITERATÚRA

- [1] BLAŠČÍK, F. (1984): *Technológia objemového tvárnenia*. Bratislava, ALFA.
- [2] BAČA, J. - BÍLIK, J. - TITTEL, V. (2010): *Technológia tvárnenia*. Bratislava, Nakladateľstvo STU, ISBN 978-80-227-3242-0.
- [3] EGERMEIER, V. - BALVAR, J. - DUCHOŇ, J. - ŠINGEL, J. - PŘIKRYL, J. (1976): *Řízeně ochlazovaný válcovaný drát a tažený drát*. Praha, TEVÚH, typové číslo: 735 212 3207.
- [4] MORAVEC, J. - BÍLIK, J. (2017): *Tvárníacie stroje a nástroje*. Žilina, UNIZA, ISBN 978-80-554-1339-6.
- [5] HRIVŇÁK, A. - PODOLSKÝ, M. - DOMAZETOVÍČ, V. (1992): *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava, ALFA, ISBN 80-05-01032-X
- [6] FOREJT, M. - PÍŠKA, M. (2006): *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno, VUT Brno, Akademické nakladatelství CERM, 225 s., ISBN 978-80-2142-374-9.
- [7] PERNIS, R. (2007): *Teória tvárnenia kovov*. Trenčín, Trenčianska univerzita A. Dubčeka, 168 s., ISBN 978-80-8075-244-6.
- [8] MORAVEC, J. (2015): *Teória tvárnenia kovov*. Žilina, EDIS-vydavateľstvo ŽU, 332 s., ISBN 978-80-554-1095-1.