



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta v Trnave

Ing. Monika Vyskočová

Autoreferát dizertačnej práce

**Kvantitatívna analýza štruktúry materiálov pre preskúmanie
procesov ťahania rúr za studena**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 104226 Strojárske
technológie a materiály

v študijnom odbore: Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: V Trnave 31.5.2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre tvárnenia kovov a plastov na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Monika Vyskočová
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ: prof. Ing. Maroš Martinkovič, PhD
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti: prof. Ing. Ernest Gondár, CSc.
Ústav technológií a materiálov
Strojnícka fakulta si sídlom v Bratislave
Námestie slobody 17
812 31 Bratislava 1

doc. Ing. Jozef Bílik, CSc.
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 24.08.2022 o 10. h.

na Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.

OBSAH

ÚVOD.....	3
1 LITERÁRNY PREHĽAD RIEŠENEJ PROBLEMATIKY.....	4
1.1 Ťahanie rúr.....	4
1.2 Stanovenie lokálnej plastickej deformácie s využitím charakteristík anizotropie mikroštruktúry.....	4
2 STANOVENIE VEDECKÝCH PREDPOKLADOV A CIEĽOV PRÁCE.....	7
2.1 Stanovenie vedeckých predpokladov.....	7
2.2 Stanovenie cieľov práce.....	7
3 METODIKA PRÁCE.....	8
4.1 Vplyv rýchlosti pretvorenia na veľkosť napät'ovo deformačného stavu ťahanej rúry za studena.....	12
4.2 Podmienky simulácie v programe Deform.....	13
4.3.1 Prievlačné ťahanie.....	14
4.3.2 Rúra ťahaná s hladkým tŕňom cez prievlak so 6° ťažným uhlom.....	16
4.3.3 Rúra ťahaná s hladkým tŕňom cez prievlak s 12° ťažným uhlom.....	17
4.3.4 Rúra ťahaná s pevným tŕňom s drážkami.....	18
4.3.5 Rúra ťahaná s tŕňom s priamymi drážkami v 6° prievlaku.....	20
4.3.6 Rúra ťahaná s tŕňom so šikmými drážkami v 6° prievlaku.....	22
4.3.7 Rúra ťahaná s tŕňom s rovnými drážkami v 12° prievlaku.....	23
4.4.2 Rúra ťahaná s tŕňom so šikmými drážkami v 12° prievlaku.....	25
5 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	27
Prínosy dizertačnej práce.....	27
ZÁVER.....	28
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	29
PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ.....	30

ÚVOD

Dnešný moderný svet už nedokáže existovať bez technológií v akejkoľvek podobe a vzhľadom na neustále sa zvyšujúcu konkurenciu s nástupom globalizácie je veľmi dôležité pokračovať v zlepšovaní efektivity procesov z hľadiska kvality výrobkov a optimalizácie využitých zdrojov. Požiadavky, napr. v automobilovom, energetickom, ale aj ťažobnom a inom priemysle, tlačia na výrobcov, aby vyrábali iba kvalitné a vysoko presné výrobky. Ako pretláčanie, tak aj ťahanie sú spôsoby tvárenia kovov, ktoré majú vysoké využitie materiálu a vyrábajú produkty s vynikajúcimi metalurgickými a materiálovými vlastnosťami.

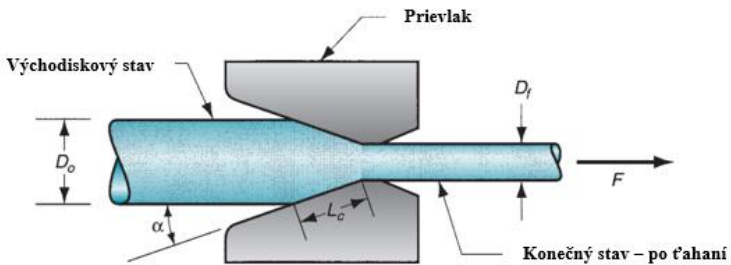
Z hľadiska stanovenia vzťahu medzi štruktúrou a vlastnosťami je dôležité správne klasifikovať štruktúru rôznych druhov spracovania rovnakého materiálu za porovnateľných podmienok. Bez podrobného preskúmania štruktúry po deformácií ale nie je možné porozumieť danému procesu deformácie. Na to slúžia viaceré metódy, medzi ktoré môžu byť zaradené stereologické metódy, vytvorenie modelu mikroštruktúry materiálu v rôznych simulačných programoch, kvantitatívne sledovanie mikroštruktúry alebo vlastností materiálu, atď.

Cieľom predkladanej dizertačnej práce je využitie vyššie spomenutých metód na analýzu vplyvu lokálnej plastickej deformácie na mikroštruktúru materiálu po procese ťahania rúr za studena, kedy dôjde k deformácii hraníc zín a je potrebné určiť ich orientáciu, resp. stanoviť stupeň ich orientácie. To umožní na základe získaných poznatkov, objektívne charakterizovať štruktúru materiálu a tok materiálu.

1 LITERÁRNY PREHLAD RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

1.1 Ťahanie rúr

V kontexte objemovej deformácie je ťahanie operácia, pri ktorej je prierez tyče, rúry alebo drôtu zmenšený jeho pretiahnutím cez otvory prievlaku (Obr. 1), dochádza k ich predĺženiu, pričom musí byť dodržané pravidlo zachovania objemu [1, 2].



Obr. 1 Princíp ťahania rúry [1]

D_0 – počiatočný vonkajší priemer rúry, D_1 – vonkajší priemer rúry po ťahaní, α – ťažný uhol, L_c – dĺžka ťažného kužeľa, F – sila a smer ťahania

Pri ťahaní sa kryštály deformujú v smere ťahania materiálu, resp. v smere dĺžky [3].

1.2 Stanovenie lokálnej plastickej deformácie s využitím charakteristík anizotropie mikroštruktúry

Orientácia nie je to isté ako deformácia, preto je potrebné vyvinúť model premeny orientácie hraníc zŕn na deformáciu [4].

Jedna z metód je založená na závislosti pomeru merného povrchu hranice zrna v deformovanom stave S_v a nedeformovanom stave S_{v0} . Metóda vyžaduje znalosť parametra štruktúry v prípade nulovej hodnoty počiatočnej deformácie, ktorá je vo

väčšine prípadov neznáma, a tento parameter nie je rovnaký v celom objeme telesa, a rovnako závisí od veľkosti zrna [4].

Z tohto dôvodu sa pristúpilo k stanoveniu deformácie z orientácie hranice zrna. Tento prístup vychádza z troch základných rovníc:

- definície deformácie
$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{1}{l} dl \quad (1)$$

φ – skutočné (logaritmické) pretvorenie [-]
 l – dĺžka [mm]
 l_0 – dĺžka pred deformáciou [mm]

- definície stupňa orientácie v danom smere
$$O = \frac{(S_V)_{OR}}{(S_V)_{TOT}} \quad (2)$$

O – stupeň orientácie [-]
 $(S_V)_{OR}$ - merný povrch orientovaných plošných prvkov [mm²/mm³]
 $(S_V)_{TOT}$ - celkový merný povrch plošných prvkov s orientáciou [mm²/mm³]

- zákona zachovania objemu
$$V_0 = V_{def}, \quad (3)$$

V_0 – objem materiálu pred deformáciou
 V_{def} – objem materiálu po deformácii

z ktorého vyplýva skutočné pretvorenie $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ [5].

φ_1 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere osi x [-]
 φ_2 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere osi y [-]
 φ_3 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere osi z [-]

Riešenie pre idealizované tvary zrna (guľa, kocka, izometrický valec,...) vedie k nezávislosti výsledku na počiatočnej veľkosti zrna, pretvorenie je iba funkciou tvaru

zrna, na základe čoho bola pre stanovenie lokálnej plastickej deformácie z nameranej morfolologickej anizotropie štruktúry využívaná závislosť [5]:

$$\varphi = \ln \left(\frac{1+O\sqrt{2-O^2}}{1-O^2} \right) \quad (4)$$

φ - skutočné (logaritmicke) pretvorenie [-]

O – stupeň orientácie [-]

Takto charakterizovaná morfológia hranice zrna sa dá využiť na priame porovnanie štruktúry alebo na stanovenie lokálnej plastickej deformácie v ľubovoľnom mieste výtvaru. V takomto prípade je však nutné stanoviť kvantitatívnu závislosť medzi orientáciou a deformáciou. Korelácia je matematicky demonštrovaná pomocou parametra ξ , ktorý odráža ortogonálnu 2D projekciu zrnitej štruktúry do orientovanej roviny. Na prevod orientácie zrnitej štruktúry na lokálnu plastickeú deformáciu bola použitá matematická simulácia Monte Carlo.

Algoritmus Monte Carlo v tomto prípade využíva postupnú substitúciu N náhodne vybratých trojíc premenných, ktoré zodpovedajú parametrom popisujúcich priestorovú orientáciu zrn zo Saltykovej metódy. Výpočet ξ sa uskutočňuje cez náhodné maticové úlohy.

2 STANOVENIE VEDECKÝCH PREDPOKLADOV A CIEĽOV PRÁCE

2.1 Stanovenie vedeckých predpokladov

Na základe preštudovanej súčasne dostupnej svetovej, ale aj domácej literatúry k danej problematike možno stanoviť tri vedecké predpoklady:

1. rýchlosť pretvorenia nemá vplyv na napätovo deformačný stav ťahanej rúry za studena,
2. väčší ťažný uhol má väčší vplyv na rozloženie veľkosti pretvorenia,
3. pri ťahaní s ťňom s drážkami vzniknú výrazné rozdiely v lokálnej plastickej deformácii aj toku materiálu.

2.2 Stanovenie cieľov práce

Hlavným cieľom predkladanej dizertačnej práce je na základe experimentu a počítačovej simulácie potvrdiť alebo vyvrátiť stanovené vedecké predpoklady. Hlavný cieľ možno rozdeliť na štyri podciele, a to:

- C1 \Rightarrow analýza vplyvu rýchlosti ťahania na veľkosť pretvorenia,
- C2 \Rightarrow analýza orientácie zŕn pri jednotlivých spôsoboch ťahania ocelových bezšvových rúr,
- C3 \Rightarrow výpočet stupňa orientácie na základe zistení z analýzy orientácie zŕn,
- C4 \Rightarrow porovnanie dosiahnutých experimentálnych výsledkov so simuláciami jednotlivých spôsobov ťahania.

3 METODIKA PRÁCE

Experimentálna časť dizertačnej práce pozostáva z nasledujúcich krokov:

- **rezanie polotovaru** – polotovarom na ťahanie je oceľová bezšvíková rúra akosti 11353 (STN 420250) (Tab. 1-2) ťahaná za studena s priemerom 28 mm a s hrúbkou steny 4 mm.

Oceľ má rovnomernú feriticko-perlitickú štruktúru so strednou veľkosťou feritického zrna 11 μm a s objemovým podielom perlitu 5%.

Tab. 1 Chemické zloženie [%]

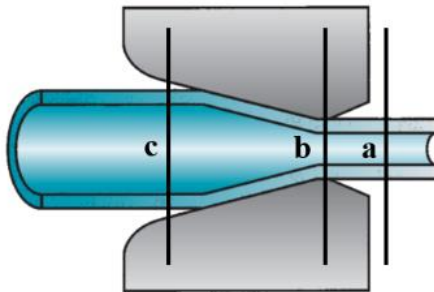
Mn [%]	C [%]	Cu [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	
0,37	0,26	0,15	0,23	0,06	0,04	
Al [%]	Mo [%]	V [%]	Co [%]	P [%]	S [%]	Fe [%]
0,02	0,02	0,006	0,006	0,005	0,005	98,8

Tab. 2 Mechanické vlastnosti [6]

	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
min	235	340	25
max		440	

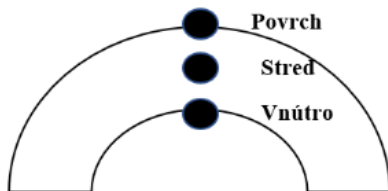
- **hrotovanie rúry** – prípravok na úpravu koncov rúr pred ťahaním je patentovaný pod č. 142-2018 [7]. Tento spôsob upnutia rúry do stroja je pôvodným riešením z ústavu výrobných technológií.

- **samotný proces ťahania rúry** – samotné ťahanie sa vykonalo na zariadení na skúšku ťahom Tinius Olsen 300ST. Úprava zariadenia je taktiež patentovaná - 73-2019. K tomuto zariadeniu boli navrhnuté a vyrobené prievlaky zo spekaného karbidu s kalibračným valcom s priemerom 25mm a ťažnými uhlami 6° a 12°. Proces ťahania bol realizovaný prievlačne (bez trňa), ako aj s pevným trňom. Okrem hladkého trňa, ktorého priemer je 18 mm, bol použitý aj drážkový trň, kde vonkajší priemer v drážke bol 17 mm a vo výstupku 18 mm.
- **metalografická príprava vzorky** – rúry boli priečne rozrezané v troch úsekoch (Obr.2), aby bol zachytený celý proces ťahania, čiže rez v oblasti vstupu rúry do prievlaku, kde je zachytený aj východiskový stav polotovaru, v kalibračnej časti a v časti, kde je rúra už po ťahaní.



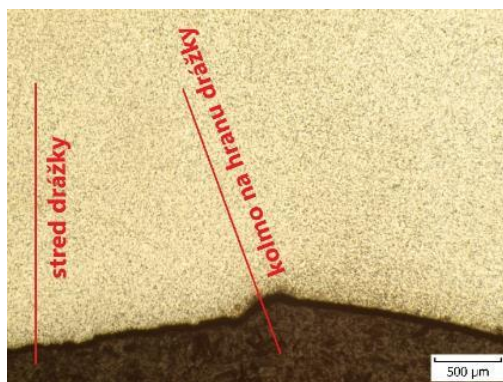
Obr. 2 Priečne rezy: a – konečná veľkosť po ťahaní; b – kalibrovaný povrch; c – počiatočný stav [8]

Vzorky boli rezané v priečných a pozdĺžnych rovinách deformovanej rúry.



Obr. 2 Príklad polôh pozorovaných na vzorke

- **pozorovanie mikroštruktúry** – rezy boli zvolené tak, aby bola vzorka pozorovaná v troch polohách – povrch, stred, vnútro (Obr. 3), rozstup medzi nimi bol 1mm, pričom sa začínalo 1mm od vnútorného okraja. Pri ťahaní s drážkovými tŕmi bola každá vzorka posudzovaná aj v strede drážky, ale aj kolmo na hranu drážky (Obr. 4).



Obr. 4 Vyhodnocované polohy na vzorke znázornené v pozdĺžnom reze

Pre každú vzorku boli vyhotovené fotografie, z ktorých následne bola pomocou metódy skúšobných čiar vyhodnocovaná orientácia zŕn.

- **výpočet stupňa orientácie** – počty priesečníkov skúšobných čiar s hranicami zŕn v ortogonálnom aj paralelnom smere pri 90% spoľahlivosti sa dosadili do vzorcov, z ktorých bol vypočítaný stupeň orientácie zrnitej štruktúry. Tá bola

prostredníctvom konverzného modelu, prevedená na lokálnu plastickú deformáciu.

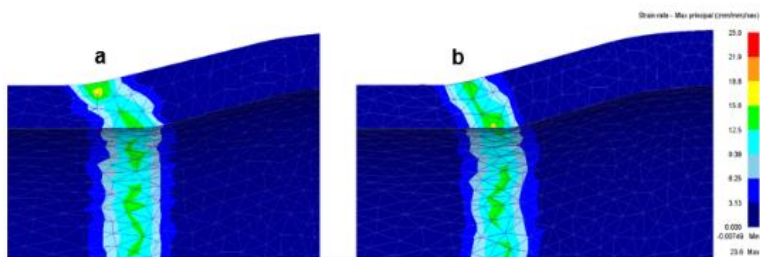
- **simulácia výsledkov** – porovnanie experimentálne zistenej hodnoty skutočnej deformácie s deformáciou vypočítanou na základe simulácie modelu v programe Deform.

4 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

4.1 Vplyv rýchlosti pretvorenia na veľkosť napätovo deformačného stavu ťahanej rúry za studena

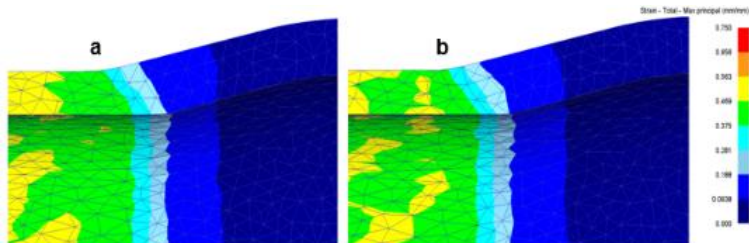
Pre výskum vplyvu rýchlosti pretvorenia na napätovo deformačný stav ťahanej rúry za studena bol navrhnutý numerický 3D model. Analýza bola realizovaná využitím tohto modelu a jeho výpočtových možností lagrangesového FEM prístupu. Ako vzor bola vybraná rúra s vonkajším priemerom 25 mm hrúbkou steny 2,5 mm, ktorá bola ťahaná na vonkajší priemer 20 mm s hrúbkou steny 2 mm. Boli použité dva materiálové modely zadané formou tabuľky. Jeden materiálový model zahŕňa krivku spevnenia pri vyšších rýchlostiach pretvorenia (120 mms^{-1}), druhý materiálový model zahŕňa len krivku spevnenia, pri rýchlosti pretvorenia 1 mms^{-1} .

V oboch prípadoch prebehol výpočet 400 krokov. Krok simulácia bol nastavený na 0,001s. Pri rýchlosti 120 mms^{-1} je simulovaná dĺžka ťahania 48 mm. Pri takto nastavených podmienkach je predpoklad ustálených napätovo deformačných stavov v zóne tvárnenia materiálu. Porovnanie výsledkov simulácie znázorňujú obr. 5 a-b, 6 a-b.



Obr. 5 Výsledok rýchlosti pretvorenia: a - materiálový model s rýchlosťou pretvorenia 1 mms^{-1} ,
b - materiálový model so zahrnutými vyššími rýchlosťami pretvorenia

Pre ďalšiu analýzu stavu napätia a pretvorenia v oblasti prívľaku bol využitý ukazovateľ stavu napätosti a ukazovateľ stavu pretvorenia (Obr. 6 a-b).



Obr. 6 Výsledok hlavného pretvorenia: a - materiálový model s rýchlosťou pretvorenia 1mm s^{-1} ,
b - materiálový model so zahrnutými vyššími rýchlosťami pretvorenia

Numerickou simuláciou s požitím dvoch rôznych materiálových modelov bolo dokázané, že model so zahrnutou rýchlosťou pretvorenia (120 mms^{-1}) má len nepatrný vplyv na výsledok simulácie, a teda môžeme rýchlosť pretvorenia pri modelovaní a simulácii zanedbať.

4.2 Podmienky simulácie v programe Deform

Pre numerický model, ktorý bol použitý pre výpočet lokálnej plastickej deformácie, hraničné podmienky, ktoré predstavovali rýchlosť ťahania, boli nastavené na $9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Koeficienty trenia medzi rúrou a prievlakom a medzi rúrou a tŕňom v mazanom stave sa určujú pomocou modelovania FEM, porovnaním nameraných a simulovaných síl na tŕni, prievlaku a ťažnej sily. V tomto prípade sa koeficient trenia nastavil na 0,055421.

Na simuláciu FEM bol použitý 3D model tŕňa a prievlaku. Simulácia bola zjednodušená pomocou zrkadlovej funkcie a bola použitá štvrtina prierezu rúry. Oblasť rúry bola vyplnená tetraédickou sieťou. Oblasť rúry bola rozdelená na sub-oblasť pre optimálne sieťovanie pričom sub-oblasť so sieťovou výplňou mala najmenšie prvky. Pretože oblasť siete je súčasťou oblasti s vysokým namáhaním s najmenšou dĺžkou prvku po

každých 50 krochov, bol vykonaný postup opätovného zosieťovania, aby sa pokračovalo v procese a dosiahla konvergencia [9].

Simulácia bola počas ťahania prerušená v určitých krokoch, aby bolo možné sledovať vývoj deformácie v rôznych oblastiach, ako je nedeformovaná zóna, čiastočne deformovaná rúra v prievlaku, finálne deformovaná ťahaná rúra. V týchto oblastiach boli vybrané rovnako tri body, ako pri experimente – povrch, stred, vnútro materiálu a bola v nich meraná veľkosť deformácie, resp. pretvorenia [10].

4.3 Kvantitatívna analýza lokálnej plastickej deformácie

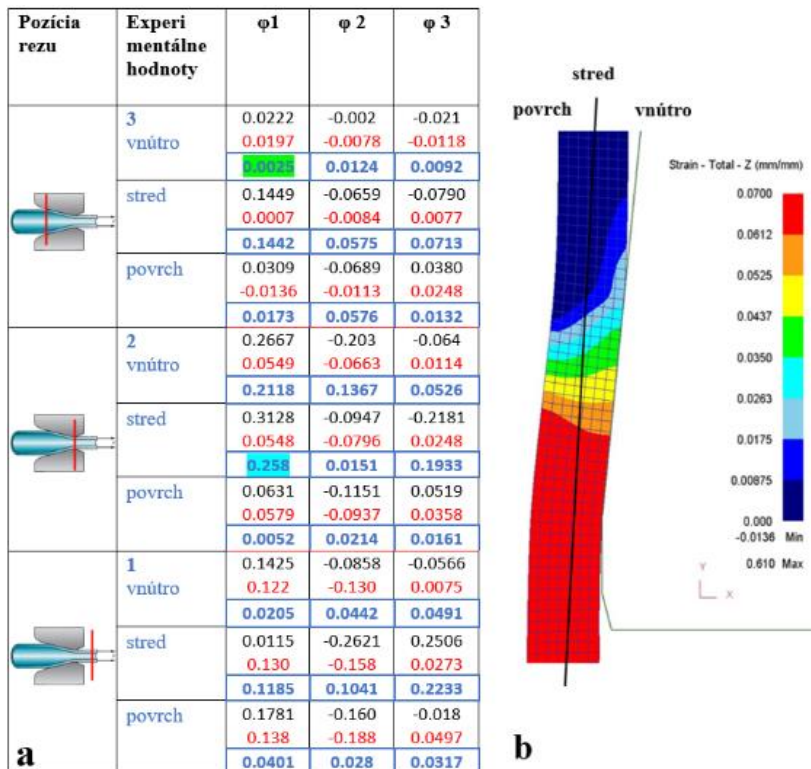
Významnosť rozdielov medzi jednotlivými hodnotami pochádzajúcimi z experimentálnych výpočtov a simulácie bola posúdená pomocou štatistického dvojfaktorového t-testu v programe Minitab.

Na obrázkoch 7(a), 8(a) a 9(a), sú experimentálne získané výsledky, prepočítané pomocou konverzného modelu, znázornené čiernou farbou. Červenou farbou sú doplnené hodnoty lokálneho plastickeho pretvorenia vypočítané simuláciou v programe Deform. V modrom rámečku sú vypočítané absolútne hodnoty ich rozdielu.

4.3.1 Prievlačné ťahanie

Prievlačné ťahanie rúry bolo realizované cez prievlak s ťažným uhlom 6° .

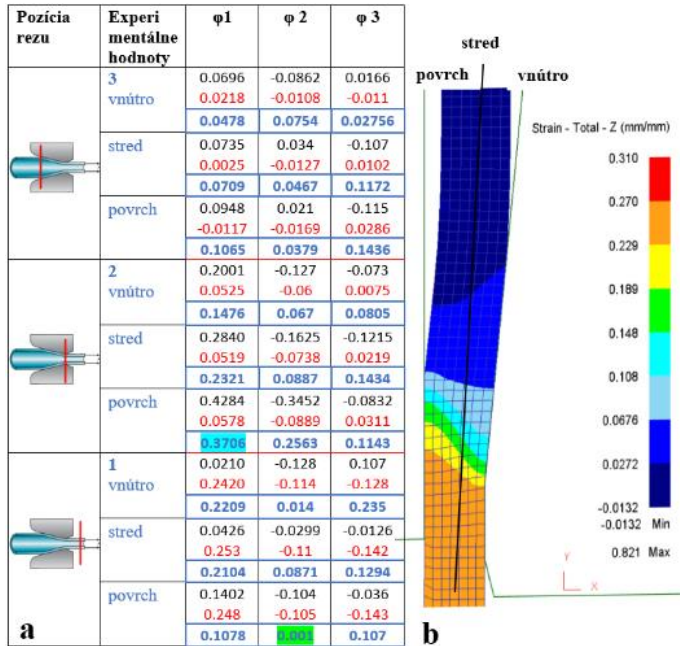
Zelené podfarbenie hodnoty v tabuľkách (Obr. 7a) predstavuje najnižšiu hodnotu (0,0025) rozdielu medzi vypočítanou a simulovanou hodnotou lokálneho plastickeho pretvorenia. Modré podfarbenie naopak znázorňuje najväčšiu odchýlku (0,258).



Obr. 7 Hodnoty lokálnej plastickej deformácie (a) experimentálne – 1) po ťahaní, 2) kalibrováný povrch, 3) vstup do prievlaku; (b) simuláciou v Deforme

V prípade prievlačného ťahania bola odchýlka pri 70% výpočtov menšia ako 0,1. Významnosť jednotlivých rozdielov v hodnotách lokálneho plastickeho pretvorenia a simuláciou (Obr. 7b) s ohľadom na polohu bola vyhodnotená ako štatisticky nevýznamná ($P > 0,05$).

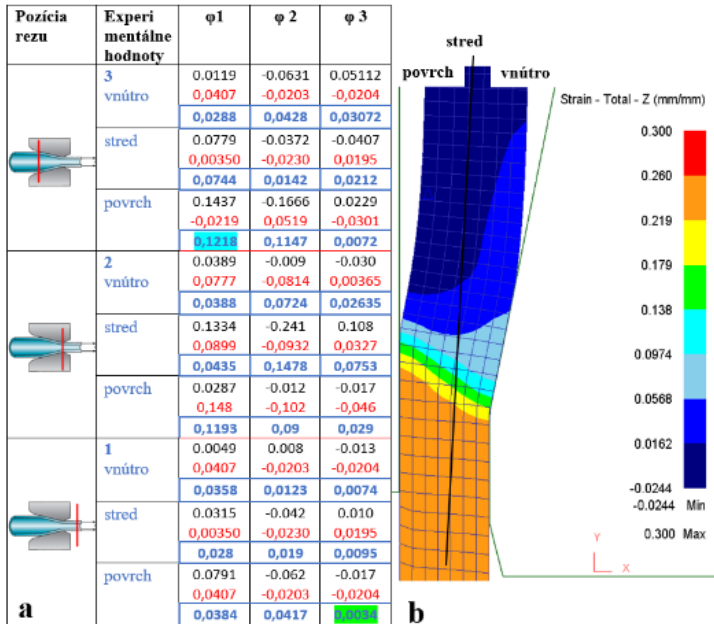
4.3.2 Rúra ťahaná s hladkým trňom cez prievlak so 6° ťažným uhlom



Obr. 8 Hodnoty lokálnej plastickej deformácie (a) experimentálne – 1) po ťahaní, 2) kalibrovanej povrch, 3) vstup do prievlaku; (b) simuláciou v Deforme

Najväčšia odchýlka medzi experimentálne vypočítanými hodnotami a simuláciou (Obr. 8) bola 0,3706. Významnosť jednotlivých rozdielov bola taktiež posúdená prostredníctvom štatistického t-testu ako štatisticky nevýznamná ($P > 0,05$).

4.3.3 Rúra ťahaná s hladkým trňom cez prievlak s 12° ťažným uhlom



Obr. 9 Hodnoty lokálnej plastickej deformácie (a) experimentálne – 1) po ťahaní, 2) kalibrováný povrch, 3) vstup do prievlaku; (b) simuláciou v Deform

Až 85% hodnôt rozdielov (Obr. 9a) nedosahuje hodnotu 0,1 a podľa štatistického t-testu, všetky rozdiely v hodnotách lokálneho plastickeho pretvorenia oproti simulácií (Obr. 9b), boli rovnako vyhodnotené ako štatisticky nevýznamné, náhodné ($P > 0,05$).

Ťažná sila pri ťahaní s pevným trňom bola podľa očakávania vyššia než pri prievlačnom ťahaní, pričom pri menšom ťažnom uhle (6°), bola vyššia – 62,9 kN, než

pri väčšom (12°) - 62,3 kN , to sa týka i sily na tŕňovej tyči – pri 12° bola 13,56 kN, pri 6° bola 185 kN.

Na základe všetkých výpočtov a údajov zo simulácií je možné túto časť experimentu zhodnotiť porovnaním maximálnych hodnôt lokálneho plastického pretvorenia (ďalej len pretvorenia) v jednotlivých bodoch objemu materiálu pri rôznych spôsoboch ťahania.

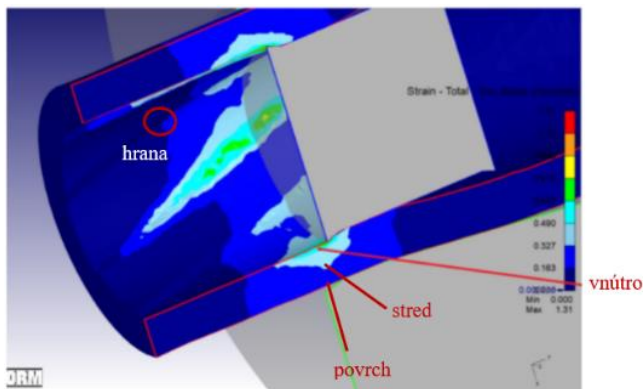
Medzi jednotlivými spôsobmi ťahania sú najväčšie rozdiely medzi max. a min. hodnotami zistené pri ťahaní s pevným tŕňom cez 6° prievlak. Priemerná hodnota rozdielov bola 0,122. Pri prievlačnom ťahaní (priemer 0,072) a ťahaní s tŕňom cez 12° prievlak (priemer 0,048), sú rozdiely menšie . Podľa simulácie rovnako vychádzajú väčšie rozdiely pri prievlačnom ťahaní, pri ostatných dvoch sú rovnako veľké. Najväčšie pretvorenia boli v 60 % namerané v smere ϕ_1 , čo je smer ťahania. Rovnako je možné vidieť, že väčší ťažný uhol (12°) nespôsobuje väčšie pretvorenie, pretože najvyššie hodnoty lokálneho plastického pretvorenia boli dosiahnuté pri prievlačnom ťahaní, ktoré bolo uskutočnené cez prievlak so 6° ťažným uhlom. Pri ťahaní s pevným tŕňom boli taktiež väčšie lokálne plastické pretvorenia dosiahnuté pri prievlaku so 6° ťažným uhlom. Pri prievlačnom ťahaní boli najvyššie hodnoty lokálneho plastického pretvorenia namerané vždy v strede vzorky pri všetkých pozíciách rezu. Pri 6° a 12° prievlaku a ťahaní s pevným tŕňom boli najvyššie hodnoty dosahované na vnútornom priemere.

4.3.4 Rúra ťahaná s pevným tŕňom s drážkami

Ako vstupné parametre numerickej simulácie v programe Deform boli tvárnice nástroje definované ako ideálne tuhé telesá. Nábehová časť prievlaku bola definovaná nábehovým uhlom $\phi = xxx^\circ$ (záleží od konkrétneho ťažného uhla). Vnútorný priemer výbebovej časti, bol rozmerovo identický s vonkajším priemerom

rebrovanej rúry $A = 24$ mm. Rebrovaný tŕň bol taktiež definovaný ako ideálne tuhé teleso, so zamedzením posunutia v axiálnom smere. Rotácia tŕňa bola definovaná aplikovaním malého krútiaceho momentu (v našom prípade 1 Nm). Vonkajší priemer tvárniacej časti tŕňa bol rozmerovo identický s vnútorným priemerom rebrovanej rúry $B = 16,06$ mm so šírkou drážky $F = 4,6$ mm. Funkciu ťažného reprezentovala okrajová podmienka rýchlosti v axiálnom smere s $v = 30$ mm/s. Tvárnený objekt (rúra) bol definovaný ako teleso s plastickými vlastnosťami so zanedbaním elastických vlastností. Okrajová podmienka teploty bola nastavená konštantná na $T=20^{\circ}\text{C}$. Ďalším dôležitým krokom je sieťovanie tvárneného objektu. V tomto prípade boli kladené vysoké rozmerové požiadavky na rádiusy rebier na vnútornom povrchu rúry. Na týchto miestach, kde bola dosahovaná najväčšia plastická deformácia boli vytvárané elementy prostredníctvom váhového presieťovania. Veľkosť elementov na vnútornom povrchu bola 10-násobne menšia v porovnaní s elementami vo zvyšnom objeme rúry. Pre čas práce bola použitá $\frac{1}{4}$ geometria modelu rúry s využitím podmienky rotačnej symetrie.

Pre potreby porovnania experimentálne získaných hodnôt veľkosti lokálneho plastického pretvorenia s hodnotami vychádzajúcimi zo simulácie boli do úvahy brané hodnoty v štyroch bodoch – vnútro, stred, povrch a presne na hrane drážky (Obr. 10). Z dôvodu, že nie je možné zo simulácie získať hodnoty lokálneho plastického pretvorenia v polohe na hrane drážky v celom objeme, bral sa do úvahy iba bod presne z hrany drážky na vnútornom povrchu rúry. Ostatné hodnoty, ktoré prislúchali polohe stredu drážky, boli vyhodnocované vo všetkých troch polohách v objeme rúry. Experimentálne výpočty boli v každom z prípadov vykonané v celom objeme rúry, čiže boli počítané hodnoty z vnútra, stredu a povrchu rúry, pričom vzdialenosť medzi týmito polohami bola vždy 1 mm a začínalo sa 1 mm od vnútorného okraja.

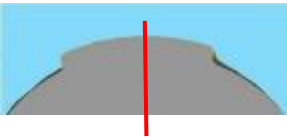


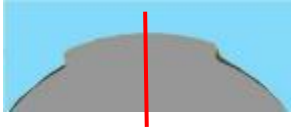
Obr. 10 Poloha hodnôt lokálneho plastického pretvorenia v simulácii

4.3.5 Rúra ťahaná s trňom s priamymi drážkami v 6° prievlaku

Veľkosti lokálneho plastického pretvorenia získané experimentálne sú znázornené v tabuľke 3 čiernou farbou. Červenou farbou sú znázornené hodnoty získané zo simulácie. Absolútna hodnota rozdielu medzi týmito dvoma spôsobmi je modrá. Rovnaké farebné rozlíšenie bude použité aj v nasledujúcich tabuľkách (Tab. 3, 4 a 5) týkajúcich sa porovnávania hodnôt medzi experimentom a simuláciou.

Tab. 3 Hodnoty lokálneho plastického pretvorenia z experimentu

Pozícia rezu		$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$
Stred drážky 	povrch	0.115	-0.100	-0.015
		0.22	-0.14	-0.09
		0.105	0.04	0.075

Pozícia rezu		$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$
	stred	0.244	-0.131	-0.113
		0.34	-0.28	0.13
		0.096	0.149	0.017
	vnútro	0.334	-0.176	-0.158
		0.480	-0.19	0.08
		0.146	0.014	0.078
Hrana drážky	vnútro	0.167	-0.344	-0.011
		0.2	-0.38	0.15
		0.033	0.036	0.139

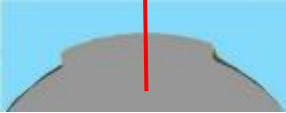
Najmenší rozdiel medzi hodnotami získanými z experimentálnych výpočtov a simuláciou je hodnota 0,017, najväčší rozdiel je 0,149. Rovnako, ako v predchádzajúcich prípadoch bola významnosť týchto rozdielov porovnávaná zo štatistického hľadiska pomocou T-testu v programe Minitab. V tomto prípade bol rozdiel medzi experimentálnym výpočtom a simuláciou (Tab. 3) štatisticky nevýznamný ($P > 0,05$).


Ak sa porovnajú konkrétne hodnoty spolu so smermi lokálnych plastických deformácií a polohami, možno konštatovať, že výpočty sú v zhode so simuláciou. Najväčšie hodnoty lokálnej plastickej deformácie boli namerané v smere $\phi 1$, čiže v smere ťahania a v polohe vo vnútri rúry (vo vnútornom priemere). Deformácia na

hrane drážky bola menšia ako v strede drážky, pričom rovnaký výsledok potvrdila aj simulácia a najvyššie hodnoty deformácie neboli namerané v smere φ_1 , ale φ_2 .

4.3.6 Rúra ťahaná s trňom so šikmými drážkami v 6° prievlaku

Tab. 4 Hodnoty lokálneho plastického pretvorenia z experimentu

Pozícia rezu		φ_1	φ_2	φ_3
<p style="text-align: center;">Stred drážky</p> 	povrch	0.063	-0.072	0.009
		0.26	-0.16	-0.1
		0.197	0.088	0.091
	stred	0.150	-0.105	-0.046
		0.36	-0.32	0.1
		0.21	0.215	0.054
	vnútro	0.189	-0.100	-0.090
		0.25	-0.31	0.3
		0.061	0.21	0.21



Pozícia rezu		$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$
Hrana drážky 	vnútro	0.105	-0.458	0.153
		0.47	-0.78	0.16
		0.365	0.322	0.007

V tomto prípade sa hodnoty (Tab. 4), v ktorých boli dosahované najvyššie deformácie, zhodujú s predchádzajúcim prípadom. Pri hodnotách získaných z experimentu boli najvyššie lokálne plastické deformácie (0,189) vypočítané v polohe vo vnútri rúry v smere $\phi 1$. Pri simulácii boli najvyššie hodnoty (0,36) namerané rovnako v smere $\phi 1$, ale v strede rúry. Pri hrane drážky bola najvyššia deformácia (0,458 experiment a 0,78 simulácia) nameraná v smere $\phi 2$. Rozdiely medzi výsledkami boli štatisticky v Minitabe posúdené ako náhodné, čiže nevýznamné ($P > 0,05$).

4.3.7 Rúra ťahaná s trňom s rovnými drážkami v 12° priedvaku

V tabuľke 5 je možné vidieť ako sa vyvíjala lokálna plastická deformácia v objeme vzorky podľa experimentálnych výpočtov a simulácie. Najnižší rozdiel medzi experimentom a simuláciou bol 0,031 a najväčší 0,586. Zo štatistického hľadiska boli rozdiely posúdené ako nevýznamné, čiže náhodné ($P > 0,05$).

Tab. 5 Hodnoty lokálneho plastického pretvorenia z experimentu



Pozícia rezu		$\varphi 1$	$\varphi 2$	$\varphi 3$
<p style="text-align: center;">Stred drážky</p> 	povrch	0.122	-0.040	-0.082
		0.09	-0.1	-0.03
		0.032	0.06	0.052
	stred	0.311	-0.202	-0.109
		0.12	-0.11	-0.14
		0.191	0.092	0.031
vnútro	0.534	-0.149	-0.085	
	1.12	-0.23	-0.02	
	0.586	0.071	0.405	
<p style="text-align: center;">Hrana drážky</p> 	vnútro	-0.272	-0.153	0.425
		0.19	-0.44	0.12
		0.082	0.287	0.041

Podobne, ako v predchádzajúcich prípadoch, najväčšie lokálne plastické deformácie (Tab. 16) boli pri oboch spôsoboch merania vyhodnotené v strede drážky v smere ťahania, čiže v smere $\varphi 1$. Na hrane drážky boli námery rozdielne, pri

experimentálnych hodnotách bola najväčšia deformácia (0,425) vypočítaná v smere φ_3 , ale pri simulácii (0,44) v smere φ_2 .

4.4.2 Rúra ťahaná s trňom so šikmými drážkami v 12° prievlaku

Tab. 3 Hodnoty lokálneho plastického pretvorenia z experimentu

Pozícia rezu		φ_1	φ_2	φ_3
<p style="text-align: center;">Stred drážky</p> 	povrch	0.180	-0.102	-0.079
		0.14	-0.21	-0.12
		0.04	0.108	0.041
	stred	0.210	-0.147	-0.064
		0.41	-0.35	-0.05
		0.2	0.203	0.014
vnútro	0.216	-0.135		
	1.01	-0.36	0.1	
	0.794	0.225	0.019	
<p style="text-align: center;">Hrana drážky</p> 	vnútro	0.372	-0.383	0.011
		0.51	-0.92	0.14
		0.138	0.537	0.129

Najväčšie lokálne plastické pretvorenia (Tab. 18) v strede drážky boli vyhodnotené vo vnútri ťahanej rúry v smere φ_1 . Experimentálne hodnoty kopírujú výsledky simulácie, pričom aj v tomto prípade boli rozdiely v hodnotách posúdené štatistickým párovým t-testom ako štatisticky nevýznamné, náhodné ($P > 0,05$). Najnižší rozdiel medzi hodnotami bol 0,014, naopak najväčší bol 0.794. Na hrane drážky sú najvyššie hodnoty deformácie namerané v smere φ_2 , tentokrát je zhoda medzi experimentálnymi hodnotami aj hodnotami získanými zo simulácie.

5 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Prínosy dizertačnej práce

- výsledky dosiahnuté pri riešení predloženej dizertačnej práce možno rozdeliť do troch skupín prínosov, a to prínosy pre vedu, pre prax a pre pedagogiku.

Prínosy pre vedu:

- analýzou mikroštruktúry v rámci celého objemu materiálu bolo dokázané, že sa deformácia v rámci objemu nešíri rovnako. Pre rozhodovanie sa na základe objektívnych údajov, nestačí pozorovať deformáciu na povrchu vzorky.

- konverzný model, ktorý bol vytvorený pomocou metódy Monte Carlo, za účelom prevodu stupňa orientácie na lokálnu plastickú deformáciu, bol výsledkami experimentu a simulácií potvrdený.

Prínosy pre prax:

- na základe podrobného poznania veľkosti deformácie v rámci celého objemu materiálu je možné optimalizovať proces výroby pre získanie požadovaných vlastností;

Prínosy pre pedagogiku:

- dizertačná práca môže byť podkladom pre ďalšie vypracovanie záverečných prác, napr. z veľkostí lokálneho plastického pretvorenia dopočítat veľkosť hlavných napätí v jednotlivých smeroch deformácie.

ZÁVER

Týmto výskumom bola kvantitatívne analyzovaná lokálna plastická deformácia v materiáli deformovanom za studena pomocou stereologických metód. Stereologická analýza bola vykonaná manuálnym spôsobom, pretože sa tak vylúčilo meranie neželaných artefaktov pri nedokonalnej metalografickej príprave. Získané informácie poskytli objektívny pohľad na lokálnu plastickú deformáciu v jednotlivých bodoch deformovaného materiálu v rámci celého objemu a pomohli posúdiť správnosť meraní v simulačnom programe. Pre overenie výsledkov, ktoré boli získané experimentálne pomocou stereológie a prepočtom v matematickom modeli vytvorenom metódou Monte Carlo, boli vytvorené simulácie v simulačnom programe Deform. Rozdiely medzi vypočítanými a simulovanými hodnotami sa pohybovali až v 69% pod hodnotou 0,1 a odchýlka medzi nimi je na základe štatistického T-testu nevýznamná, resp. náhodná. Najvyššie hodnoty lokálneho pretvorenia sa vyskytovali v oblasti rúry, ktorá sa nachádzala ešte v prievlaku v procese ťahania, najnižšie prevažne už vo finálnej polohe, vonku z prievlaku po ťahaní. Týmto spôsobom bolo overené, že prostredníctvom popísanej kvantitatívnej analýzy je možné s veľmi malou odchýlkou, popísať lokálnu plastickú deformáciu, resp. pretvorenie v akomkoľvek mieste objemu deformovaného materiálu, potvrdené simuláciou v softvéri Deform. Rovnako bol experimentom verifikovaný aj matematický model, ktorý bol vytvorený len za účelom konverzie stupňa orientácie zrna na lokálnu plastickú deformáciu. V predkladanej dizertačnej práci bola dosiahnutá vynikajúca zhoda lokálnych plastických deformácií zo stereologického merania s deformáciou zistenou simuláciou procesu v programe Deform.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] GROOVER, M.P.. Wire and bar drawing. In: Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed. Hoboken USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, s. 442. ISBN 978-0470-467002
- [2] BÍLIK, J., KAPUSTOVÁ, M., RIDZOŇ, M.. Teória tvárnenia . Trnava: Materiálovotechnologická fakulta STU, Vydavateľstvo AlumniPress. 2015. ISBN 978-80-8096-215-9
- [3] ŠUGÁROVÁ, J., ŠUGÁR, P.. Technológia tvárnenia. In: Výrobné technológie. Banská Bystrica: DALI-BB, s.r.o., 2009, s. 181, 251 . ISBN 978-80-89090-587
- [4] MARTINKOVIČ, M.. Estimation and utilization of structure anisotropy in forming pieces. In: *Ceramics-Silikáty*, 2017, 61, (2), s. 141 – 146. ISSN 1804-5847
- [5] MARTINKOVIČ, M.. Charakteristika anizotropie mikroštruktúry materiálu po plastickej deformácii. In: *Tézy inauguračnej prednášky*, 2015, s.8-9.
- [6] Ocel'ové rúry [cit. 2019-03-28]. Dostupné na internete: <https://www.oceloverury.sk/zelpo/vyrobky.nsf/page/vwBezsvtlaTOW?OpenDocument&Count=1000&ExpandView>
- [7] Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky. [cit. 2022-03-05]. Dostupné na internete: <https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/Patent/Detail/142-2018>
- [8] BOUTENELA, F., DELHOMMEB, M., VELAYA, V., BOMAN, R.. Finite element modelling of cold drawing for high precision tubes. *Comptes Rendus Mecanique*. 2018 volume 346, issue 1. ISSN: 1631-0721
- [9] NECPAL, M., KAPUSTOVÁ, M., MARTINKOVIČ, M.. Using 2D/3D FEM Simulation to determine drawing force in cold drawing of steel tubes with straight internal rifling. In: *Solid State Phenomena*, 2020, Vol 304, s. 121-125. ISSN 1662-9779
- [10] FOADIAN, F., CARRADÓ, A., PIRLING, T., & PALKOWSKI, H. Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation. In: *Materials & Design*, 2016, 107, 163-170. doi:10.1016/j.matdes.2016.06.028

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ

VYSKOČOVÁ, M., MARTINKOVIČ, M., NECPAL, M., VYSKOČ, M.. Estimation of Local Plastic Deformation in a Bulk of Polycrystalline Materials. In NEW SZP GEN: Journal of Engineering Research. 15, september (2021), s. 1-16. ISSN 2307-187

VYSKOČ, M., SAHUL, M., DOMÁNKOVÁ, M., JURČI, P., SAHUL, M., **VYSKOČOVÁ, M.**, MARTINKOVIČ, M.. The Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AW5083 Aluminum Laser Weld Joints. In *Metals*. Vol. 10, iss. 11 (2020), s. 1-22. ISSN 2075-4701

VYSKOČ, M., DOMÁNKOVÁ, M., SAHUL, M., **VYSKOČOVÁ, M.**.. Effect of shielding gas on the properties of CP titanium Grade 2 laser weld joints. In *Kovové materiály. Metallic materials*. Vol. 57, iss. 4 (2019), s. 247-265. ISSN 0023-432X

VYSKOČ, M., DOMÁNKOVÁ, M., SAHUL, M., **VYSKOČOVÁ, M.**.. The effect of the shielding gas flow rate on the geometry, porosity, microstructure and mechanical properties of laser weld joints. In *Vedecké práce MTF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Roč. 28, č. 47 (2020), s.72-85. ISSN 1336-1589.

MARTINKOVIČ, M., **VYSKOČOVÁ, M.**, NECPAL, M., MINÁRIK, S.. Estimation of triaxial stress state of formed pieces using quantitative metallography. In *Metallography & Fractography 2019 : 17th International Symposium on Metallography, Fractography and Materials Science*. Nový Smokovec, High Tatra Mountains, Slovak Republic, 24. - 26. 4. 2019. 1. vyd. Košice : Technická univerzita, 2019, S. 55. ISBN 978-80-553-3285-7.

VYSKOČOVÁ, M., MARTINKOVIČ, M., NECPAL, M., VYSKOČ, M.. Výpočet lokálnej plastickej deformácie v celom objeme polykrystalického materiálu. In *Zváranie - Svařování*. Roč. 70, č. 2 (2021), s. 26-31. ISSN 0044-5525.

VYSKOČ, M., **VYSKOČOVÁ, M.**.. Vplyv ochrannej atmosféry pri zváraní hliníkových zliatin. In *MM Průmyslové spektrum*. č. 5 (2020), s. 58-59. ISSN 1212-2572.

MARTINKOVIČ, M., **VYSKOČOVÁ, M.**, VYSKOČ, M., SAHUL, M., SAHUL, M.. Vplyv ochrannej atmosféry na vlastnosti laserových zvarov komerčne čistého titánu Grade 2. In *Zváranie - Svařování*. Roč. 67, č. 4 (2018), s. 36-41. ISSN 0044-5525.

VYSKOČ, M., SAHUL, M., SAHUL, M., **VYSKOČOVÁ, M.**.. Vplyv ochrannej atmosféry na vlastnosti zvarových spojov horčíkovej zliatiny AZ31B vyhotovených laserom. In *Zváranie - Svařování*. Roč. 68, č. 1 (2019), s. 30-36. ISSN 0044-5525.

VYSKOČ, M., SAHUL, M., DOMÁNKOVÁ, M., **VYSKOČOVÁ, M.**.. Analýza mikroštruktúry laserových zvarových spojov AL zliatiny AW 5083. In *Zváranie - Svařování*. Roč. 69, č. 3 (2020), s. 22-29. ISSN 0044-5525.