

# Výroba švových rúr malých priemerov z austenitických ocelí

**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

## Production of small diameter seam tubes from austenitic steels

**Abstract:** The article focuses on the analysis of the production process of small diameter seam tubes made of austenitic steels used in the food industry, automotive and aerospace industries, in measurement technology, heating elements, in healthcare in the production of needles for syringes, for heat exchangers designed to cool exhaust gases in the automotive industry and for fuel-oil heat exchangers used in the aerospace industry. The article deals with the production of precision seam tubes with a diameter of 6 mm and a wall thickness of 1 mm. The aim was to optimize the process using simulation using the *DEFORM 3D* simulation program. The solution consisted in adjusting the geometry of the beam and improving the friction ratios during the drawing.

**Keywords:** seam tubes, beam drawing, tube drawing downstanding, reduction size

## ÚVOD

Článok je zameraný na výrobu tenkostenných koróziivzdorných švových rúr malých priemerov do 12 mm ťahaním cez prievlak. Samotnému ťahaniu predchádza výroba švovej zváranéj rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zváraním. Pri finálnom ťahaní na konečný rozmer pri malých priemeroch sa využíva prievlačné ťahanie. Tieto rúry majú uplatnenie najmä v potravinárskom, automobilovom a leteckom priemysle, v meracej technike, vykurovacích telesách alebo v zdravotníctve pri výrobe ihliel do injekčných striekačiek. Tiež sú používané pre tepelné výmenníky určené na ochladzovanie výfukových plynov v automobilovom priemysle a pre palivovo-olejové tepelné výmenníky používané v leteckom priemysle.

## 1 SÚČASNÝ STAV VÝROBY

Proces výroby švových rúr začína kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zváraním pričom ako polotovar je použitý pás s požadovanou šírkou navinutý do tvaru zvitku. Švové rúry sa následne na konečné rozmery ťahajú na ťažných stolicích s navíjaním do tvaru zvitku. Rúry sa ťahajú

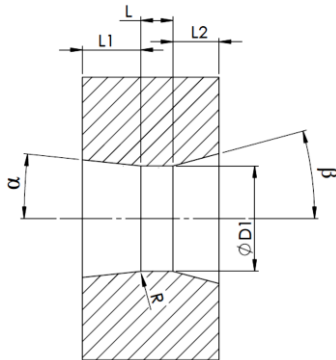
prievlačným ťahom pri maximálnej rýchlosti ťahania  $6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  alebo v niektorých prípadoch s plávajúcim ťňhom s maximálnou rýchlosťou ťahania  $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Zvárané tenkostenné koróziivzdorné rúry sú vyrábané s vonkajším priemerom od 0,2 mm až do 12 mm a hrúbkou steny od 0,05 mm do 1 mm. Štandardná tolerancia podľa technických noriem je pri oboch rozmeroch  $\pm 0,05 \text{ mm}$ . V tab. 1 sú uvedené materiály používané pri výrobe koróziivzdorných rúr.

**Tab. 1. Materiály používané pri výrobe rúr**

Číslo materiálu	Označenie	Číslo materiálu	Označenie
1.4301	X5CrNi18-10	1.4435	X2CrNiMo18-14-3
1.4303	X4CrNi18-12	1.4439	X2CrNiMo17-13-5
1.4306	X2CrNi19-11	1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5
1.4307	X2CrNi18-9	1.4541	X6CrNiTi18-10
1.4310	X10CrNi18-8	1.4550	X6CrNiNb18-10
1.4318	X2CrNi18-7	1.4561	X1CrNiMoTi18-13-2
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	1.4565	X2CrNiMnMoNbN25-18-5-4
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2

Článok je zameraný na optimalizáciu procesu výroby švovej rúry z koróziivzdornej ocele s vonkajším priemerom 6 mm. Súčasná geometria prievlaku používaná pri výrobe je znázornená na obr. 1 a hodnoty jednotlivých rozmerov sú uvedené v tab. 2.



Obr. 1. Súčasná geometria prievlaku:  $\alpha$  - uhol vstupnej časti [°],  $\text{ØD1}$  - priemer kalibračného valca [mm],  $L$  - dĺžka kalibračného valca [mm],  $R$  - prechodový rádius [mm],  $L1$  - dĺžka vstupnej časti [mm],  $L2$  - dĺžka výstupového kužeľa [mm],  $\beta$  - uhol výstupového kužeľa [°]

Tab. 2. Hodnoty jednotlivých rozmerov prievlaku

Parameter	$\alpha$ [°]	$\text{ØD1}$ [mm]	$L$ [mm]	$R$ [mm]	$L1$ [mm]	$L2$ [mm]	$\beta$ [°]
Hodnota	6	5,94	0,9	0,1	3,3	2,6	15

Ďalšími vstupným veličinami sú materiál prievlaku, použité mazivo a súčasná používaná rýchlosť ťahania  $v_f$ , ktoré sú uvedené v tab. 3.

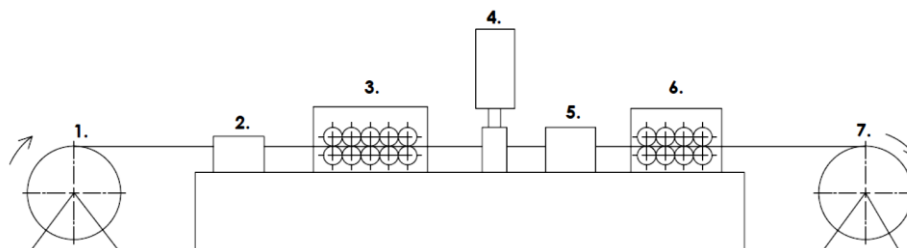
Tab. 3. Vstupné parametre používané v súčasnosti pri ťahaní

Materiál prievlaku	PCD
Mazivo	Vysoko viskózný olej
Súčasná maximálna ťažná rýchlosť $v_f$ [m min <sup>-1</sup> ]	5

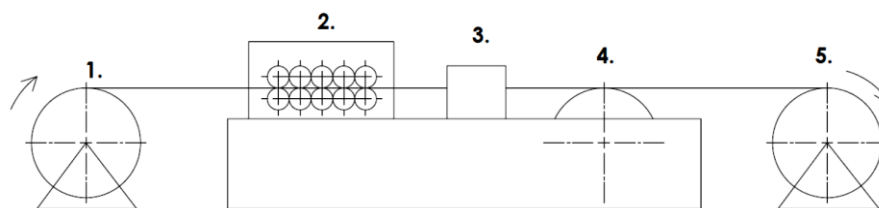
Na obr. 2 je schéma pracoviska na výrobu švovej zvarenej rúry kontinuálnym ohýbaním medzi valcami s následným zvaráním. Pred zavedením pásu medzi zakružovacie valce sa jeho povrch mechanicky čistí pomocou papiera namočeného v etanole. Po zvarení rúra postupuje do kontrolnej komory, kde sa kontroluje zvar, ďalej ide cez ďalšie zakružovacie kladky, kde sa kalibruje tvar rúry a navíja sa na bubon.

Pred ťahaním cez prievlak sa navinutá rúra odvíja a postupuje do žihacej pece, kde sa vyžiha pri teplote 950°C až 1080°C a znovu sa navíja na ďalší bubon.

Zvitok sa nasadí na odvíjačku a rúra sa postupne zavedie cez zavádzacie kladky do prievlaku, kde je privádzaný mazací olej a rúra sa ťahá cez prevíjajúci bubon, ktorý udáva rýchlosť ťahania. Potom sa vytiahnutá rúra navíja na navíjajúci bubon (obr. 3).



Obr. 2. Schéma výrobného systému na výrobu švovej rúry kontinuálnym ohýbaním: 1 - odvíjajúci bubon, 2 - mechanické čistenie, 3 - zakružovacie kladky, 4 - zvaracie zariadenie so zvaracou komorou, 5 - kontrola zvaru, 6 - zakružovacie kladky, 7 - navíjajúci bubon



Obr. 3. Schéma výrobného systému na výrobu presných švových rúr prievlačným ťahaním: 1 - odvíjajúci bubon, 2 - zavádzacie kladky, 3 - prievlak, 4 - prevíjajúci bubon, 5 - navíjajúci bubon

## 2 OPTIMALIZÁCIA PROCESU ŤAHANIA

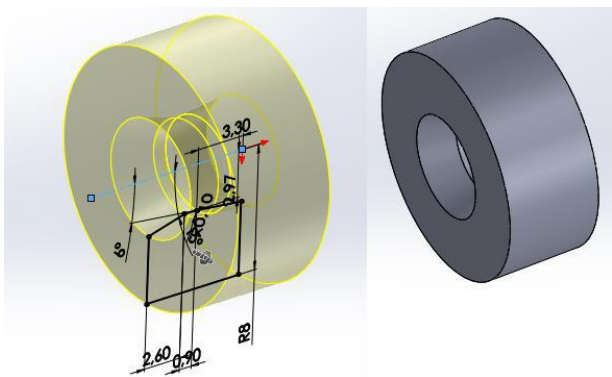
Cieľom bola optimalizácia priebehu procesu ťahania a tiež možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania za účelom zvýšenia produktivity výroby pre konkrétny typorozmer rúry. V tab. 4 sú uvedené rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúr.

Viaceri autori sa vo svojich štúdiách zhodujú, že významný vplyv na proces prievlačného ťahania má samotné trenie medzi rúrou a prievlakom, čo úzko súvisí s geometriou prievlaku [1]. Vhodná geometria prievlakov umožňuje znížiť ťahové napätia v materiáloch ťahanej rúry za prievlakom, a tým aj ťažnú silu.

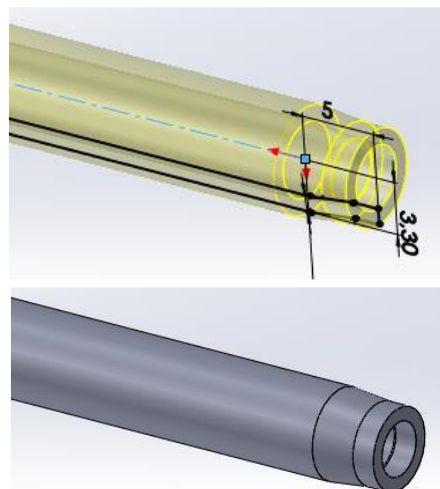
Tab. 4. Rozmery a požiadavky kladené na daný typorozmer rúry

Materiál ťahanej rúry	1.4301(X5CrNi18-10) AISI 304
Vonkajší priemer vstupnej rúry $\theta D_0$ [mm]	6,45 až 6,65
Hrúbka steny vstupnej rúry $t_0$ [mm]	1
Požadovaný vonkajší priemer rúry po ťahaní $\theta D$ [mm]	$6^{-0,05}$
Požadovaná hrúbka steny rúry po ťahaní $t$ [mm]	$1^{+0,05}$

Znížením ťažnej sily dôjde k zníženiu odporu voči ťahaniu, čím vznikne možnosť zvýšenia ťažnej rýchlosti [2]. Vhodnou úpravou uhla vstupnej kužeľovej časti prievlaku  $\alpha$  sa dajú znížiť napätia vznikajúce v materiály počas ťahania [2]. Pri optimalizácii geometrie uhla vstupného kužeľa bola využitá simulácia procesu ťahania v simulačnom softvéri *DEFORM 3D*. 3D model prievlaku a rúry bol vytvorený v programe *Solidworks* a bol importovaný do simulačného softvéru. 3D model prievlaku je na obr. 4 a 3D model rúry pre simuláciu je na obr. 5.



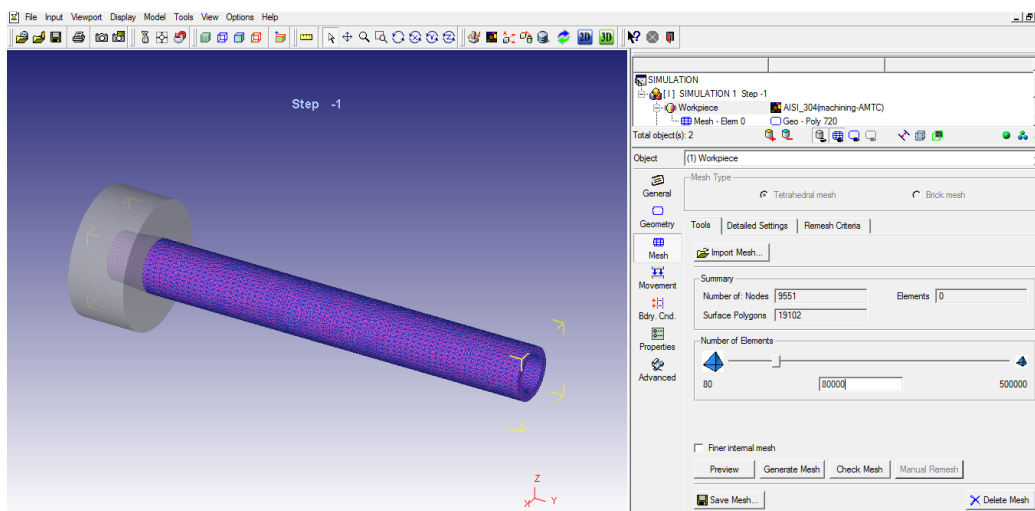
Obr. 4. Vytvorený 3D model prievlaku



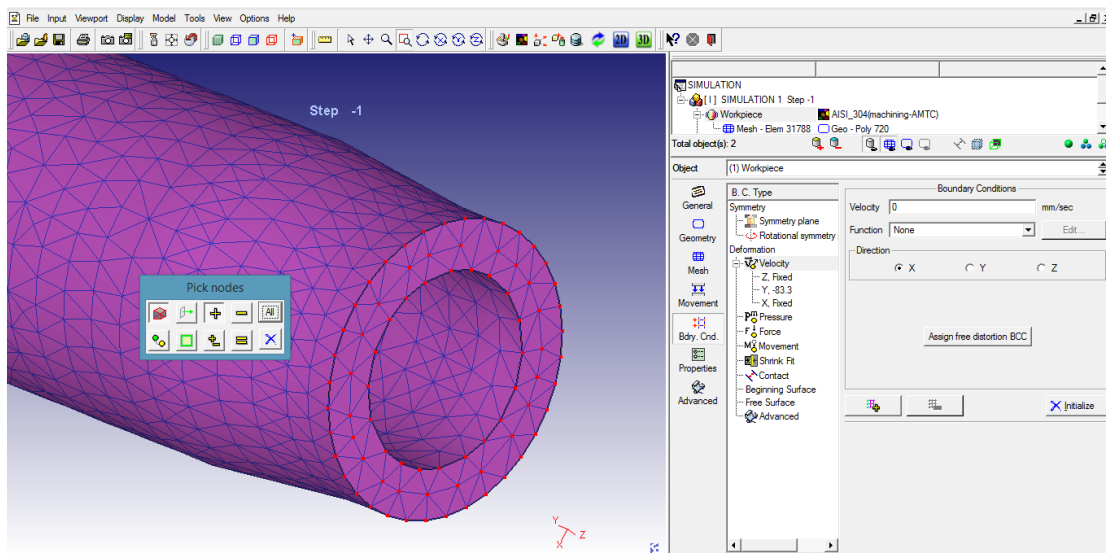
Obr. 5. Vytvorený 3D model rúry s predtvárneným tvarom (hrotom) na presunutie cez prievlak

Pre správne vytvorenie kontaktu medzi prievlakom a rúrou je potrebné upraviť začiatok rúry. To znamená, že je potrebné upraviť tvar geometrie rúry do tzv. predtvárneného tvaru (vytvorenie hrotu). Pri importe geometrie analyzovaných modelov sa importoval osobitne model rúry a potom sa importoval model prievlaku. Nasledovalo zadanie materiálu rúry a typ objektu modelu. V tomto prípade sa pre rúru zvolil elasto-plastický typ a pre prievlak sa zvolil typ *Rigid* (pevný) a zvolil sa materiál rúry z databázy softvéru a to *AISI 304 1.4301* (tab. 4). Nasledovalo vytvorenie siete prvkov (*Mesh*) pre rúru, v tomto prípade konkrétne štvorsten (*tetrahedron*) s počtom použitých prvkov 80 000 (obr. 6).

Potom sa zadefinovali okrajové podmienky (obr. 7) a zafixovanie čelnej plochy rúry v osi *X* a *Z*, t. j. zadanie nulovej rýchlosti v týchto smeroch. Ďalej bolo potrebné zadefinovanie ťažnej rýchlosti v osi *Y*. Pri analýze vplyvu geometrie prievlaku (uhla vstupného kužeľa) na veľkosť ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola zadefinovaná pre danú rúru ťažná rýchlosť  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  ktorá je štandardne používaná.



Obr. 6. Vytvorenie siete prvkov pre rúru



Obr. 7. Zadefinovanie okrajových podmienok

Ďalším krokom bolo vytvorenie kontaktu medzi rúrou a prievlakom, bolo potrebné zadať aj súčiniteľ trenia ktorý bol zadaný s hodnotou  $f=0,35$ . Počet krokov analýzy bol zadaný 50 a časový prírastok jedného kroku bol 0,01 sekundy. Pred spustením samotnej simulácie sa realizovalo vytvorenie databázy analýzy ktorá slúžila pre softvér na čítanie a čerpanie potrebných informácií pri vykonávaní analýzy. Výsledkom samotnej analýzy boli hlavne farebné mapy a hodnoty ťahových napätí v osi ťahania  $\sigma_p$ . Z dôvodu aby pri ťahaní za prievlakom nedochádzalo k nežiadúcej deformácii prierezu rúry a tým k zmene rozmerov rúry musí byť toto napätie menšie ako je následná medza klzu po deformačnom spevnení ktoré nastane v dôsledku ťahania a ktoré je úmerné veľkosti pretvorenia v danom ťahu. Pre správne vyhodnotenie počítačových analýz a pre ďalší možný postup bolo preto potrebné poznať maximálne dovolené ťahové napätie  $\sigma_{dov}$  v rúre tak, aby nedošlo k jej deformácii resp. k porušeniu za prievlakom. Na určenie týchto napätí bol použitý napäťovo deformačný diagram (krivka deformačného odporu) pre oceľ 1.4301 (X5CrNi18-10), AISI 304 uvedený na obr. 8.

Z hľadiska použitia tohto diagramu na určenie dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre bolo potrebné zistiť skutočné (logaritmické) pretvorenie pri ťahaní a to podľa vzorca:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{17,59}{15,52} = 0,125, \quad (1)$$

kde  $\varphi$  - logaritmické pretvorenie [ - ],

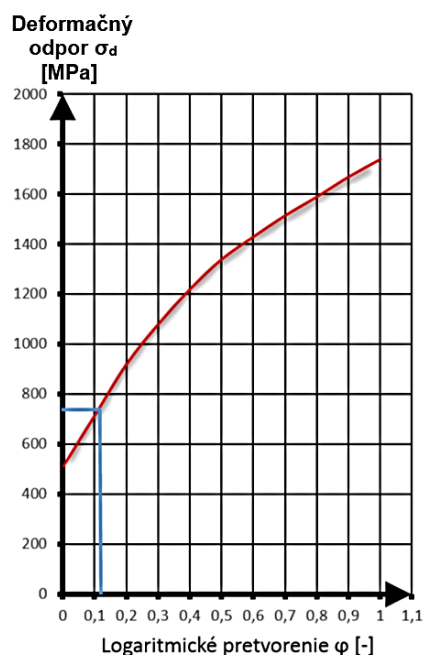
$S_0$  - prierez vstupnej rúry pred ťahaním [mm<sup>2</sup>],

$S$  - prierez rúry po ťahaní [mm<sup>2</sup>].

Prierez vstupnej rúry pred ťahaním  $S_0$  a prierez rúry po ťahaní  $S$  bol určený pomocou softvéru *Solidworks*

na základe 3D modelu vstupnej rúry a 3D modelu rúry po ťahaní.

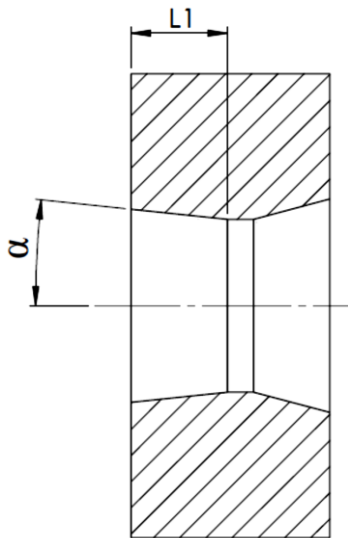
Prierez vstupnej rúry pred ťahaním bol  $S_0 = 17,59 \text{ mm}^2$  a prierez rúry po ťahaní bol  $S = 15,52 \text{ mm}^2$ . Na základe vypočítaného logaritmického pretvorenia  $\varphi$  bolo stanovené najväčšie možné napätie pri ťahaní rúry tak, aby nedošlo k jej deformácii za prievlakom.



Obr. 8. Krivka deformačného odporu - odčítanie najväčšieho možného (dovoleného) napätia

Z diagramu vyplýva, že najväčšie dovolené napätie je  $\sigma_{dov} = 735 \text{ MPa}$ .

Úprava geometrie prievlaku spočívala v zmene uhla zavádzacej časti  $\alpha$ . Z tejto úpravy vyplýva aj zmena dĺžky zavádzajúcej časti prievlaku  $L1$ . Upravované časti sú znázornené na obr. 9.



Obr. 9. Upravované časti prievlaku:  $\alpha$  - uhol zavádzacej časti,  $L1$  - dĺžka zavádzacej časti

Rozmery prievlaku ktoré sa menili v rámci optimalizácie geometrie prievlaku sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5. Rozmery prievlaku menené v rámci optimalizácie geometrie prievlaku pomocou simulácie

$2\alpha$ [°]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$L1$ [mm]	7,9	6,6	5,9	5,1	4,5	4	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7

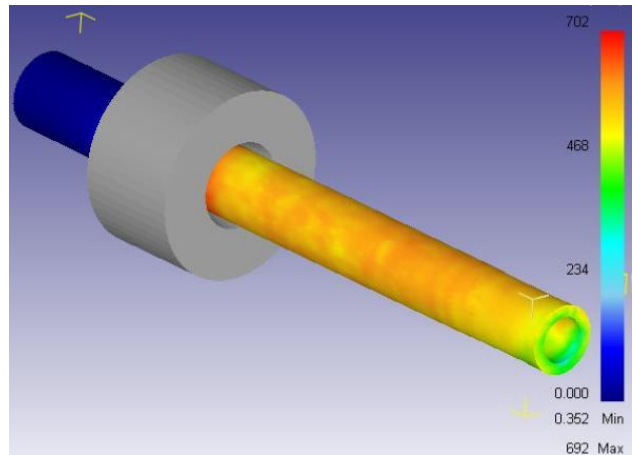
Z analýzy pri použití uhla  $5^\circ$  vyplynulo, že maximálne ťahové napätie dosahovalo hodnotu 850 MPa, čo by znamenalo prekročenie dovolenej hodnoty  $\sigma_{dov} = 735$  MPa a rúra by sa pri použití takého uhla deformovala za prievlakom prípadne by sa roztrhla.

Z analýzy pri použití uhla  $6^\circ$  taktiež vyplynulo, že rúra by sa pri použití tohto uhla deformovala za prievlakom prípadne by sa roztrhla, lebo maximálne ťahové napätie dosahovalo hodnotu 830 MPa.

Pri použití uhla  $7^\circ$  sa už maximálne ťahové napätie v rúre za prievlakom dosahovalo hodnotu  $\sigma_{imax} = 692$  MPa, ktoré je menšie ako dovolené a preto nedôjde k deformácii rúry za prievlakom. Výsledok analýzy pre uhol vstupného kužela prievlaku  $2\alpha = 7^\circ$  je uvedený na obr. 10.

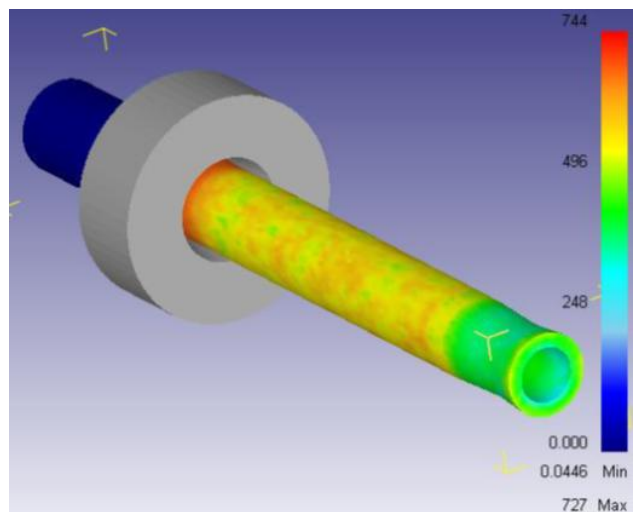
Pri použití uhla  $8^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 702$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $9^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 700$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $10^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 716$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $11^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 712$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $12^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 710$  MPa teda nižšiu hodnotu ako

dovolené napätie. Pri použití uhla  $13^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 714$  MPa teda nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $14^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 721$  MPa, teda o niečo nižšiu hodnotu ako dovolené napätie. Pri použití uhla  $15^\circ$  dosahovalo maximálne ťahové napätie hodnotu  $\sigma_{imax} = 727$  MPa, ktorá sa blíži k dovolenej hodnote.



Obr. 10. Výsledok analýzy pri použití uhla  $7^\circ$

Na obr. 11 je znázornený výsledok analýzy pre uhol  $15^\circ$ .



Obr. 11. Výsledok analýzy pri použití uhla  $15^\circ$

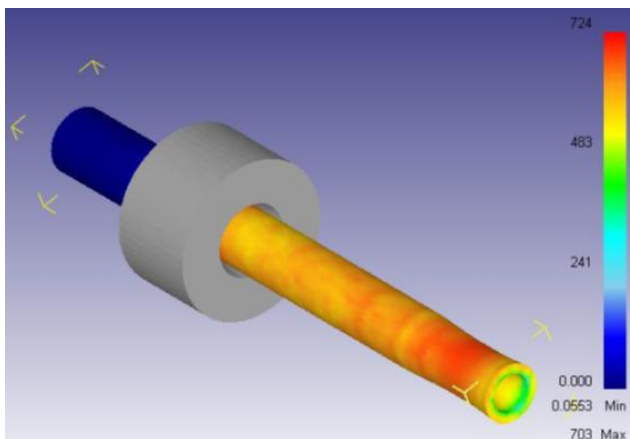
Na základe výsledkov simulácie ako najvýhodnejší uhol vyšiel uhol  $2\alpha = 7^\circ$ , kde boli zistené najmenšie maximálne hodnoty ťahového napätia za prievlakom s hodnotou 692 MPa v smere ťahania, preto sa tento uhol použil aj v následnej optimalizácii rýchlosti ťahania.

Predpokladalo sa, že zvyšovaním rýchlosti ťahania pri nezmenenom spôsobe mazania sa bude zvyšovať deformačný odpor materiálu a teda aj maximálne ťahové napätie v ťahanej rúre za prievlakom. Preto sa pomocou analýzy použitím softvéru *DEFORM 3D* zisťovalo, akou najväčšou rýchlosťou je možné ťahať rúru cez tento prievlak tak, aby maximálne ťahové napätie neprekročilo dovolenú hodnotu  $\sigma_{dov} = 735$  MPa.

Pri analýze sa použili ťažné rýchlosti  $v_f = 5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

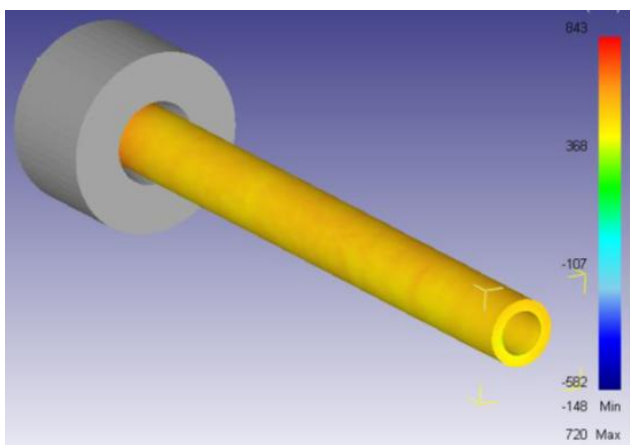
Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 692 \text{ MPa}$  (obr. 10).

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  dosiahlo maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 703 \text{ MPa}$ . Na obr. 12 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



Obr. 12. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  má vzniknuté maximálne ťahové napätie za prievlakom v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 720 \text{ MPa}$ . Na obr. 13 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



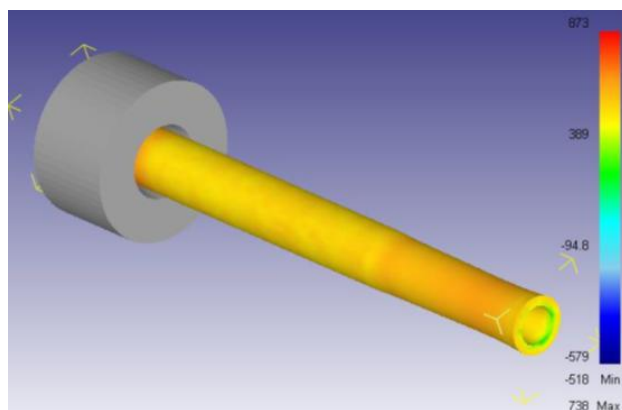
Obr. 13. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  má vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 738 \text{ MPa}$  a teda došlo k miernemu prekročeniu dovoleného napätia, čo môže viesť k plastickej deformácii ťahanej rúry za prievlakom a teda k nežiadúcej zmene rozmeru ťahanej rúry. Na obr. 14 sú znázornené výsledky analýzy s použitím ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Napriek tomu bola realizovaná aj simulácia pri použití rýchlosti ťahania  $v_f = 9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , aby sa potvrdil trend ďalšieho

zvýšenia maximálnej ťažnej sily v ťahanej rúre za prievlakom.

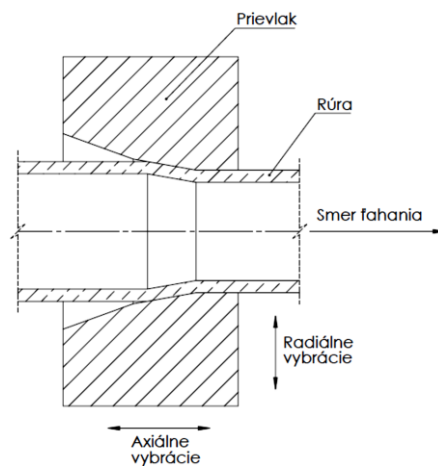
Pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  malo vzniknuté maximálne ťahové napätie v osi ťahania hodnotu  $\sigma_{tmax} = 745 \text{ MPa}$ , čo potvrdilo trend nárastu napätia so zvyšovaním rýchlosti ťahania.

Z dôvodu aby nedochádzalo k nežiadúcej plastickej deformácii rúry za prievlakom musí platiť  $\sigma_{tmax} < \sigma_{dov}$ , preto z analýz vyplýva, že najvyššou ťažnou rýchlosťou pri prievlaku s uhlom zavádzacej časti  $2\alpha = 7^\circ$  môže byť  $v_f = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Toto zvýšenie rýchlosti ťahania zo 6 na  $7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  umožnilo zvýšenie produktivity pri výrobe daného typorozmeru rúry o 16,7 %.



Obr. 14. Výsledky analýzy pri použití ťažnej rýchlosti  $v_f = 8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

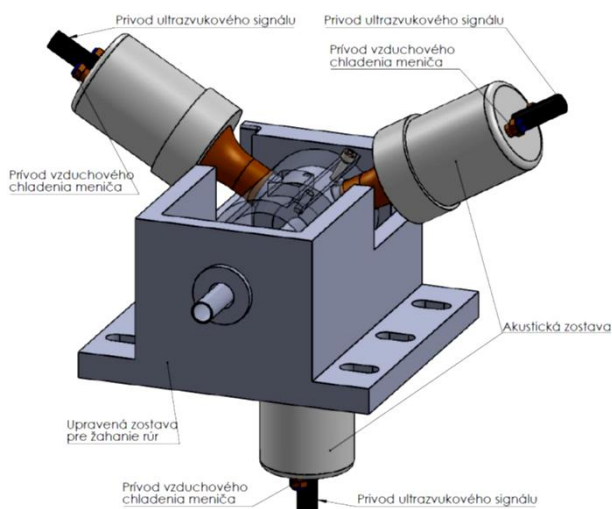
Pre ďalšie zvýšenie rýchlosti ťahania bola analyzovaná aj možnosť zníženia trenia medzi prievlakom a ťahanou rúrou na zníženie veľkosti ťahových napätí, a to aplikáciou ultrazvukovej energie na princípe skrátenie doby kontaktu medzi trúcimi sa plochami [4]. Ultrazvukové vibrácie sú aplikované na prievlak buď v axiálnom alebo radiálnom smere na smer ťahania (obr. 15). Použitím týchto ultrazvukových vibrácií dochádza k zlepšeniu mazacích podmienok a k zníženiu potrebnej sily na ťahanie. Potrebnými parametrami sú frekvencia vibrácií  $f = 20 \text{ kHz}$  a amplitúda  $a = 0,5 \mu\text{m}$  až  $10 \mu\text{m}$  [7].



Obr. 15. Ultrazvukové vibrácie aplikované na prievlak

Pre reálne využitie ultrazvuku pri ťahaní z literárnych zdrojov vyplýva, že je oveľa výhodnejšie použitie ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere na zníženie ťažnej sily a v konečnom dôsledku na zvýšenie rýchlosti ťahania [7]. Vibrácie vytvárajú opakujúci sa cyklus zvyšovania a znižovania tlaku na rozhraní prievlaku a rúry, čo okrem zníženia ťažnej sily vedie aj k zvýšeniu kvality povrchu ťahanej rúry [4].

Na základe uvedených poznatkov bola pre ťahanie daného typorozmeru rúry navrhnutá aj zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Zostava bez generátora a rozdeľovača signálu je zobrazená na obr. 16.



Obr. 16. Zostava pre ultrazvukom podporované ťahanie rúr

## ZÁVER

Cieľom článku bolo riešenie úlohy zameranej na optimalizáciu priebehu procesu ťahania a možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania za účelom zvýšenia produktivity výroby pre konkrétny typorozmer rúry v prevádzkových podmienkach s využitím počítačovej podpory.

Riešenie spočívalo v optimalizácii uhla ťažného kužeľa za účelom zníženia ťažnej sily a teda ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom za účelom možnosti zvýšenia rýchlosti ťahania.

Na základe simulácie pomocou simulačného softvéru *DEFORM 3D* ako optimálny uhol ťažného kužeľa bol zistený uhol  $2\alpha = 7^\circ$ , ktorý bol následne použitý na optimalizáciu rýchlosti ťahania. Na základe analýzy sa zistilo, že pri ťahaní daného typorozmeru rúry je možné zvýšiť rýchlosť ťahania z pôvodne používanej rýchlosti  $6 \text{ m min}^{-1}$  na  $7 \text{ m min}^{-1}$  bez toho, aby došlo k prekročeniu dovoleného ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom a teda k vzniku nežiadúcej plastickej deformácie za prievlakom a k ovplyvneniu presnosti vytiahnutej rúry. Zvýšenie rýchlosti ťahania zo  $6 \text{ m min}^{-1}$  na  $7 \text{ m min}^{-1}$  pri zavedení do prevádzky prinieslo zvýšenie produktivity práce o 16,7 %.

Ako ďalšia možnosť zvýšenia rýchlosti ťahania na základe zníženia ťažnej sily a teda zníženia ťahového napätia v ťahanej rúre za prievlakom bola sledovaná možnosť zníženia trenia, a to na základe aplikácie ultrazvuku v procese ťahania. Zistilo sa na základe vykonanej štúdie literárnych zdrojov, že aplikáciou ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere je možné výrazne znížiť ťažnú silu a tiež zlepšiť aj kvalitu povrchu ťahanej rúry. Preto bola navrhnutá pre ťahanie daného typorozmeru rúry zostava na ťahanie s využitím ultrazvukových vibrácií v radiálnom smere. Toto riešenie si však vyžaduje vyššie investičné náklady oproti riešeniu s úpravou geometrie prievlaku.

## Pod'akovanie

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

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0418.

## LITERATÚRA

- [1] PALENGAT, M. - CHAGNON, G. - FAVIER, D. - LOUCHE, H. - LINARDON, C. - PLAIDEAU, C. (2013): *Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis*. In: International Journal of Mechanical Sciences, Elsevier, Vol. 70, pp. 69-78.
- [2] NEVES, F.O. - BUTTON, S.T. - CAMINAGA, C. - GENTILE, F.C. (2005): *Numerical and experimental analysis of tube drawing with fixed plug*. In: Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. Federal University of Sao Joao del Rei, J Vol. 27, (4).
- [3] *How to Reduce Friction between Surfaces* [online]. [cit. 2015-2-3] Dostupné na internete: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29181/reduce-friction-surfaces>.
- [4] MAROPIS, N. (2011): *Using ultrasonic energy for drawing tube* [online]. [cit. 2015-22-3] Dostupné na internete: <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/using-ultrasonic-energy-for-drawing-tube>.
- [5] HERDA, M. (2015): *Návrh zlepšenia procesu ťahania švových zvarovaných rúr z austenitických ocelí s počítačovou podporou*. Trnava: Diplomová práca.
- [6] SCHREK, A. (2005): *Ťahanie rúrok hraničných rozmerov z austenitických ocelí*. Bratislava: Sjf STU.
- [7] HAYASHI, M. - JIN, M. - THIPPRAKMAS, S. - MURAKAWA, M. - HUNG, J. - TSAI, Y. - HUNG, CH. (2003): *Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM)*. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, pp. 30-35.