GRANT journal
ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4

EUROPEAN GRANT PROJECTS | RESULTS | RESEARCH & DEVELOPMENT | SCIENCE

Rotační tváření konců trubek z AL slitin

Vojtěch Klouček[1]

[1] VÚTS, a.s., Svárovská 619, Liberec XI – Růžodol I, 460 01 Liberec, vojtech.kloucek@vuts.cz

Grant: LO1213
Název grantu: Excelentní Strojírenský Výzkum
Oborové zaměření: JQ Strojní zařízení a nástroje

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt Téma článku je motivováno technologií výroby potrubí pro rozvod chladiva klimatizace osobního automobilu. Protože automobil je typický produkt velkosériové výroby, průmyslová praxe vyžaduje detailní znalost a popis technologických procesů spojených s výrobou. Jednou z operací při výrobě potrubí je tváření konce trubky z lehkých neželezných slitin za studena do rotačně symetrického tvaru. V článku jsou uvedeny příklady vyráběných produktů. Příspěvek si klade za cíl popsat proces tváření pomocí volitelných technologických parametrů a stanovit závislost potřebných tvářecích sil a výkonů na těchto parametrech.

Klíčová slova tváření za studena, přetvárná práce, deformační energie, plastická deformace

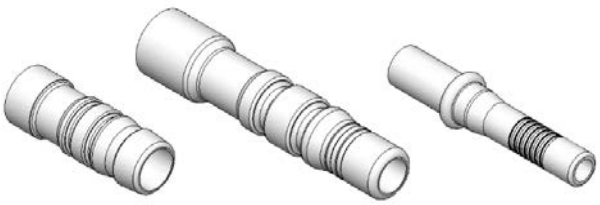
1. ÚVOD

Technologie tváření za studena je v průmyslové praxi velmi rozšířená pro svoji relativní technologickou jednoduchost, vysokou produktivitu a vysokou přesnost výroby. Pro konstrukci tvářecího nástroje, a obecně pro vhodnou volbu nebo návrh tvářecího stroje, je nezbytná přesná znalost tvářecích sil a výkonů potřebných pro danou technologickou operaci.

Článek popisuje analytickou metodu stanovení tvářecích sil při rotačním tváření trubky z lehkých neželezných slitin. Metoda je založena na analýze energetické bilance tváření.

1.1 Vyráběné produkty

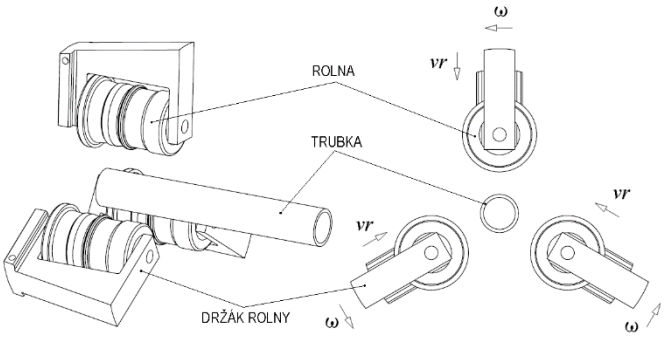
Jedná se o trubky ze slitin hliníku, používané pro rozvod chladiva v automobilových klimatizačních systémech. Tyto trubky mají být na koncích různě tvarovány za účelem napojení na hadice, nasazení těsnicích kroužků apod. Příklady tvarů konců jsou na obr.1. Vnější průměry polotovarů se pohybují od 10 do 18 mm, tloušťka stěny od 1,25 do 1,5 mm.



Obr.1: Příklady požadovaných tvarů konců trubek

1.2 Technologie výroby

Konec trubky je tvářen trojicí nástrojů (rolen), které jsou radiálně vtlačovány do materiálu trubky rychlostí vr Trubka a držáky s rolnami zároveň konají vzájemný rotační pohyb s úhlovou rychlostí ω (obr.2). Rolny jsou v držácích uloženy rotační vazbou ve valivých ložiskách, vlivem třecích sil se tedy po trubce odvalují.



Obr.2: Kinematika nástrojů vůči trubce

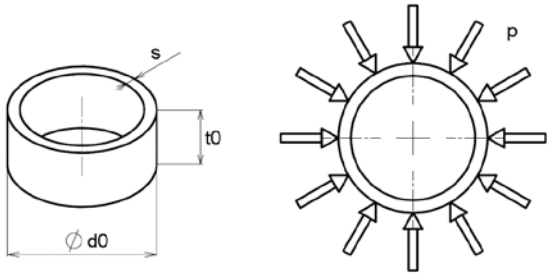
2. POČETNÍ STANOVENÍ SIL POTŘEBNÝCH PRO TVÁŘENÍ

Pro výběr optimální konstrukční varianty je nutno znát silové poměry během tváření trubek. Z nich vyplývá zatížení rámu stroje a jednotlivých konstrukčních podskupin a potřebné výkony pohonů. Cílem výpočtu je stanovení hodnot těchto sil a momentů v závislosti na rozměrech trubek a nastavitelných parametrech tvářecího procesu.

Pro odhalení závislosti tvářecích sil na podmínkách tváření je jako teoretický základ popsáno nejprve tváření hladké trubky. Následně je řešení rozšířeno i na obecný tvar konce trubky.

2.1 Přetvárná práce

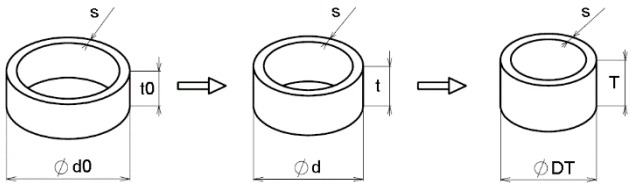
Energie potřebná k plastickému přetvoření trubky je rovna mechanické práci vnějších sil. Sledujme nyní deformaci trubky o původních rozměrech $d0, t0, s$ a koncových rozměrech DT, T, s vyrobené z materiálu s napětím na mezi kluzu SK, zatíženou rovnoměrně rozloženým vnějším přetlakem p (obr.3 a 4).



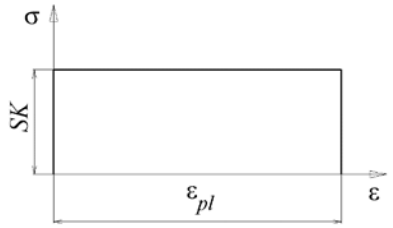
Obr.3: Hladká trubka zatížená rovnoměrným vnějším přetlakem

Předpoklady pro průběh deformace:

- tloušťka stěny trubky s zůstává během deformace konstantní
- objem materiálu trubky zůstává během deformace konstantní (obr.4)
- trubka je tenkostěnná, tedy $s << d0$
- materiál trubky je modelován jako ideálně plastický [1] (obr.5)



Obr.4: Deformace trubky se zachováním tloušťky stěny a objemu materiálu



Obr.5: Diagram napětí - deformace pro ideálně plastický materiál

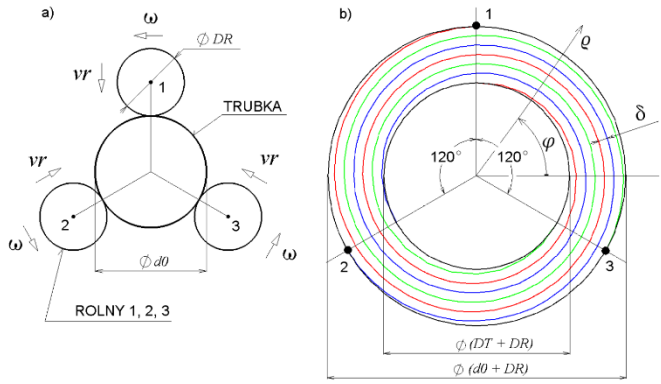
Na obr.5 je graficky znázorněna závislost napětí - deformace ideálně plastického materiálu. Těleso z takového materiálu zatížené vnějšími silami se chová jako ideálně tuhé až do dosažení napětí na mezi kluzu SK. Poté nastane tečení materiálu při konstantním napětí. Po odlehčení tělesa (napětí v materiálu klesne na nulu) zůstává veškerá dosažená deformace ε_{pl} jako plastická.

Z podmínky konstantního objemu vyplývá $t(r) = \frac{DT - s}{2 \cdot r - s} \cdot T$, kde $r = \frac{d}{2}$. Z předpokladu tenkostěnné trubky a předpokladu napětí ve stěně trubky na mezi kluzu SK plyne $p(r) = \frac{s \cdot SK}{r}$. Elementární mechanická práce vykonaná tlakem p je pak dána vztahem $\mathrm{d}W = p(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot t(r) \cdot \mathrm{d}r$. Výsledná přetvárná práce pak je

$$W = 2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot \int_{d0/2}^{DT/2} \frac{\mathrm{d}r}{2 \cdot r - s} = 2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot \ln \frac{d0 - s}{DT - s}.$$

2.2 Kinematika při tváření

Během tváření se rolny odvalují po povrchu trubky (obr.6a). Středy rolen se pohybují po trajektoriích odlišených v obr.6b barevně - rolna č.1 červená, rolna č. 2 modrá, rolna č. 3 zelená. Trajektoriemi jsou tři shodné Archimédovy spirály vzájemně pootočené o 120˚.



Obr.6: Kinematika relativního pohybu trubka - nástroje

Úběr poloměru trubky na jednu otáčku hlavy je 3δ. Každá rolna je tedy vtlačena do materiálu trubky o hodnotu δ. Tato hodnota je jednoznačně určena úhlovou rychlostí hlavy ω a radiální rychlostí rolny vr. Obě tyto hodnoty jsou pomocí řídicího systému stroje nezávisle nastavitelnými parametry. Platí, že $\delta = \frac{2}{3}\pi \cdot \frac{vr}{\omega}$.

Jednotlivé spirály jsou v polárních souřadnicích ϱ a φ vyjádřeny rovnicemi:

$$\text{rolna č.1:} \quad \rho(\phi) = \frac{1}{2} \cdot (d0 + DR) - \frac{3\delta}{2\pi} \cdot \left(\phi - \frac{\pi}{2}\right)$$

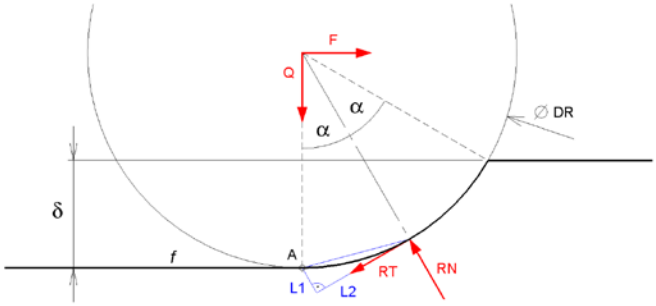
$$\text{rolna č.2:} \quad \rho(\phi) = \frac{1}{2} \cdot (d0 + DR) - \frac{3\delta}{2\pi} \cdot \left(\phi - \frac{7\pi}{6}\right)$$

$$\text{rolna č.3:} \quad \rho(\phi) = \frac{1}{2} \cdot (d0 + DR) - \frac{3\delta}{2\pi} \cdot \left(\phi - \frac{11\pi}{6}\right)$$

2.3 Problém valení

Na obr.7 je zobrazena rolna o průměru DR vtlačená do materiálu o hodnotu δ. Síly působící na rolnu jsou vyznačeny červeně. Tyto silové poměry nastanou za těchto předpokladů:

- pohyb rolny vůči materiálu je rovnoměrný
- ve stykové ploše mezi rolnou a materiálem je tlak rozložen rovnoměrně
- rolna se po materiálu odvaluje, tzn. že $RT \le f \cdot RN$, kde f je součinitel smykového tření



Obr.7: Silové poměry na rolně vtlačené do materiálu

Úhel α je jednoznačně určen úběrem rolny δ. Platí $\alpha = \arcsin\sqrt{\frac{\delta}{DR}}$, $\alpha \in \left\langle 0, \frac{\pi}{2} \right\rangle$. Odvěsny trojúhelníku v obr.7

vyznačené modře jsou $L1 = DR \cdot \left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2$ a $L2 = DR \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot \cos\frac{\alpha}{2}$. Za předpokladu rovnoměrného pohybu rolny musí být výsledná síla působící na rolnu nulová, což lze vyjádřit rovnicemi rovnováhy:

$$\square: \quad RN - Q \cdot \cos\alpha - F \cdot \sin\alpha = 0$$

$$\square: \quad -RT - Q \cdot \sin\alpha + F \cdot \cos\alpha = 0$$

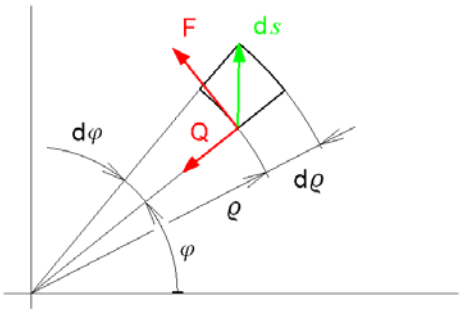
$$A: \quad -F \cdot \frac{DR}{2} - RT \cdot L1 + RN \cdot L2 = 0$$

Z rovnic rovnováhy vyplývá poměr mezi silami F a Q ve tvaru

$$\frac{F}{Q} = kf = \mathrm{tg}\,\alpha\,.$$

2.4 Mechanická práce sil působících na rolnu

Nyní je možno přistoupit k výpočtu mechanické práce sil působících na rolnu. Práci budou konat složky tečná F a normálová Q (obr.8). Celková práce vykonaná těmito složkami musí být rovna přetvárné práci, která byla stanovena výše. Za předpokladu, že na každé rolně jsou shodné silové poměry, je možno práci vypočítat pro jednu rolnu, celková přetvárná práce pak bude trojnásobek této hodnoty.



Obr.8: Mechanická práce sil v polárních souřadnicích

Elementární přírůstek přetvárné práce je podle principu superpozice

$$\mathrm{d}W = \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{\rho} + \vec{Q} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = F \cdot \rho \cdot \mathrm{d}\phi - Q \cdot \mathrm{d}\quad .$$

Z rovnice spirály vyplývá $\mathrm{d}\phi = -\frac{2\pi}{3\delta} \cdot \mathrm{d}\rho$. Dále platí, že $F = kf \cdot Q$. Po dosazení vyjde

$$\mathrm{d}W = -Q \cdot \left(kf \cdot \frac{2\pi}{3\delta} \cdot \rho + 1\right) \cdot \mathrm{d}\rho\,.$$

Integrováním v mezích poloměru ρ od $\frac{1}{2}(d0 + DR)$ do $\frac{1}{2}(DT + DR)$ a dosazením za $\delta = \frac{2}{3}\pi \cdot \frac{vr}{\omega}$ je výraz pro celkovou přetvárnou práci vykonanou jednou rolnou ve tvaru

$$W = Q \cdot \left\{\frac{kf \cdot \omega}{8 \cdot vr} \cdot \left[(d0 + DR)^2 - (DT + DR)^2\right] + \frac{1}{2} \cdot (d0 - DT)\right\}.$$

2.5 Celkové tvářecí síly

Porovnáním vztahů pro přetvárnou práci dostaneme výraz pro radiální sílu potřebnou k tváření trubky ve tvaru

$$Q = \frac{2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot \ln\frac{DT - s}{d0 - s}}{\frac{3 \cdot kf \cdot \omega}{8 \cdot vr} \cdot \left[(d0 + DR)^2 - (DT + DR)^2\right] + \frac{3}{2} \cdot (d0 - DT)}\,.$$

Tečná síla působící na rolnu pak je $F = kf \cdot Q$, tedy

$$F = \frac{kf \cdot 2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot \ln\frac{DT - s}{d0 - s}}{\frac{3 \cdot kf \cdot \omega}{8 \cdot vr} \cdot \left[(d0 + DR)^2 - (DT + DR)^2\right] + \frac{3}{2} \cdot (d0 - DT)}\,.$$

Jelikož se během tváření hlava otáčí poměrně vysokými otáčkami (řádově $1000\,min^{-1}$), není možno zanedbat dynamické síly. Na rolnu působí odstředivá síla $Fd = mR \cdot \frac{1}{2} \cdot (d0 + DR) \cdot \omega^2$, kde mR je hmotnost rolny. Tuto sílu je nutno přičíst k radiální síle Q. Protože rolna vykonává současně pohyb rotační a posuvný směrem k ose otáčení, působí na ni i síla Coriolisova $Fcor = 2 \cdot mR \cdot vr \cdot \omega$. Vzhledem k malé rychlosti vr je možno Coriolisovu sílu zanedbat. Celková radiální síla působící na jednu rolnu tedy je

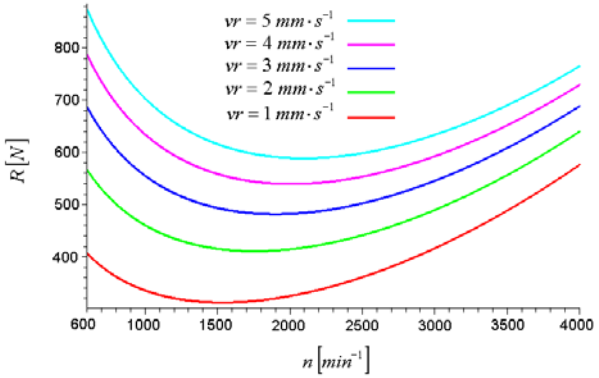
$$R = \frac{2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot \ln\frac{DT - s}{d0 - s}}{\frac{3 \cdot kf \cdot \omega}{8 \cdot vr} \cdot \left[(d0 + DR)^2 - (DT + DR)^2\right] + \frac{3}{2} \cdot (d0 - DT)} + mR \cdot \frac{1}{2} \cdot (d0 + DR) \cdot \omega^2\quad .$$

Celkový točivý moment potřebný pro náhon hlavy (reakční moment v místě upnutí trubky) je pak dán vztahem $M = 3 \cdot F \cdot \frac{1}{2}(d0 + DR)$, tedy

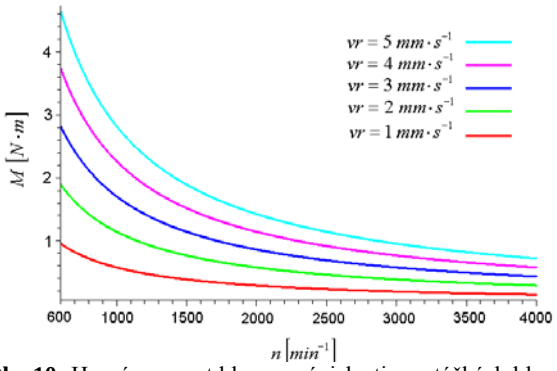
$$M = \frac{kf \cdot 2\pi \cdot s \cdot SK \cdot T \cdot (DT - s) \cdot (d0 + DR) \cdot \ln\frac{DT - s}{d0 - s}}{\frac{kf \cdot \omega}{4 \cdot vr} \cdot \left[(d0 + DR)^2 - (DT + DR)^2\right] + (d0 - DT)}\,.$$

Na obr. 9 a 10 jsou vyneseny grafy závislostí tvářecích sil na otáčkách hlavy a radiální rychlosti rolny. Do vztahů jsou dosazeny následující parametry:

$d0$	původní průměr trubky	18	[mm]
s	tloušťka stěny trubky	1.5	[mm]
DT	konečný průměr trubky	15	[mm]
T	délka trubky	40	[mm]
SK	mez kluzu materiálu trubky	87	[MPa]
DR	průměr rolny	30	[mm]
mR	hmotnost rolny	0.1	[kg]
n	otáčky hlavy	proměnná	$[\mathrm{min}^{-1}]$
vr	radiální rychlost rolny	proměnná	$[\mathrm{mm \cdot s^{-1}}]$



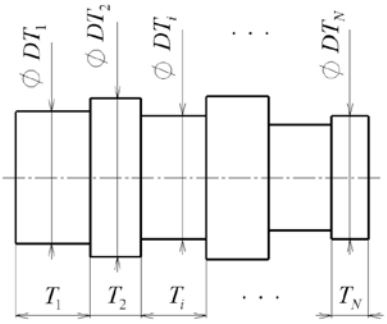
Obr.9: Radiální síla na rolnu v závislosti na otáčkách hlavy pro různé radiální rychlosti rolny



Obr.10: Hnací moment hlavy v závislosti na otáčkách hlavy pro různé radiální rychlosti rolny

2.6 Přepočet na obecný tvar trubky

Jako parametry ve vztazích pro tvářecí síly vystupují koncové rozměry trubky DT a T. Pro trubku obecného tvaru je možno přibližně vyčíslit potřebné síly jako součet sil dílčích, které jsou vypočteny pro krátké úseky trubky s přibližně konstantním průměrem po tváření (obr.11).



Obr.11: Rozdělení trubky na úseky přibližně stejného průměru

Trubka je rozdělena na N úseků o rozměrech T_i a DT_i, příslušný průměr rolny je DR_i. Celková radiální síla na rolnu je potom $R = \sum_{i=1}^{N} R_i$ a celkový točivý moment náhonu hlavy je $M = \sum_{i=1}^{N} M_i$. Výpočet těchto hodnot je automatizován sestaveným algoritmem. Příklad vypočtených hodnot uvádí následující tabulka:

DT_i [mm]	T_i [mm]	DR_i [mm]
15.75	11.12	29.68
17.5	1.44	27.93
14.8	3.31	30.63
17.5	4.92	27.93
14.8	3.31	30.63
17.5	0.74	27.93
15.75	8.1	29.68
16	7.01	29.43
Původní průměr trubky [mm]		18
Tloušťka stěny trubky [mm]		1.5
Otáčky hlavy [min^{-1}]		1100
Radiální rychlost rolny [$\mathrm{mm \cdot s^{-1}}$]		4
Celková radiální síla [N]		642
Celkový reakční moment [N · m]		2.12

3. ZÁVĚR

Uvedený postup výpočtu má svoje silné i slabé stránky. Mezi výhody patří zejména:

- výsledek v analytickém tvaru, kde může být každý parametr považován za proměnnou, a tudíž velikost tvářecích sil zkoumána jako funkce
- velmi rychlý výpočet v prostředí MAPLE
- plná kontrola rovnic a výrazů, jejich řešitelnosti a definičních oborů

Nevýhodou jsou značná zjednodušení výpočtového modelu, a to zejména:

- předpoklad konstantního rozložení tlaku ve styčné ploše mezi rolnou a trubkou
- nezahrnutí smykových napětí při výpočtu tvářecích sil pro trubku obecného tvaru
- model ideálně plastického materiálu
- přetvárná práce stanovená na hladké trubce zatížené vnějším přetlakem je minimální možná, nezahrnuje smykové deformace
- nezahrnutí tepelných ztrát v energetické bilanci

Vzhledem k těmto skutečnostem bude nutno učinit další kroky, a to:

- navržení postupu a provedení měření tvářecích sil a výkonů na zkušebním přípravku
- výpočet pomocí metody konečných prvků

Zdroje

1. Aifantis, E. C.: The physics of plastic deformation. International Journal of Plasticity, Volume 3, Issue 3, 1987, Pages 211–247.