

Tehnologija valjanja radialno orebrenih cevi za prenos toplote

Rolling Technology of Radially Finned Tubes for Heat Exchangers

P. Leš, F. Dover, Tehniška fakulteta Maribor, Oddelek za strojništvo, Maribor

Orebrene cevi uporabljajo za izdelavo izmenjevalcev toplote na različnih industrijskih področjih za hlajenje plinov, komprimiranega zraka, olja oz. vode v motorjih, hlajenje turbin in drugih energetskih naprav. V članku so prikazani različni načini izdelave orebrenih cevi, teorija izračunov sil s pomočjo ravnovesnih diferencialnih enačb in analitični pristop za reševanje diferencialnih enačb modela trenja na limitni plasti. Na koncu še je dodana osnovna konstrukcija orodja in stroja.

Fin tubes are used for heat exchangers in different industry areas, for the cooling of gases, compressed air, oil and water in engines, turbines and other power systems. The aim of this paper is to demonstrate the principle and application of finned tubing production and theoretical calculations of forces by differential equations. At the end the fundamental design of the metal forming tool and machine is given.

1 Uvod

Na pobudo Mariborske livarne Maribor in njene potrebe, smo se na našem inštitutu za tehnologijo in preoblikovanje gradiv odločili, da bomo izdelali projekt tehnološke izdelave orebrenih cevi. Postopek valjanja orebrenih cevi, za katerega smo se odločili, pri nas še ni v uporabi, pa tudi v zahodnem svetu ga uporablja le nekaj specialnih podjetij. Pri izdelavi tega projekta izhajamo iz končnega izdelka, t.j. orebrene cevi, katere vzorec smo dobili od naročnika.

2 Različni postopki izdelave orebritve

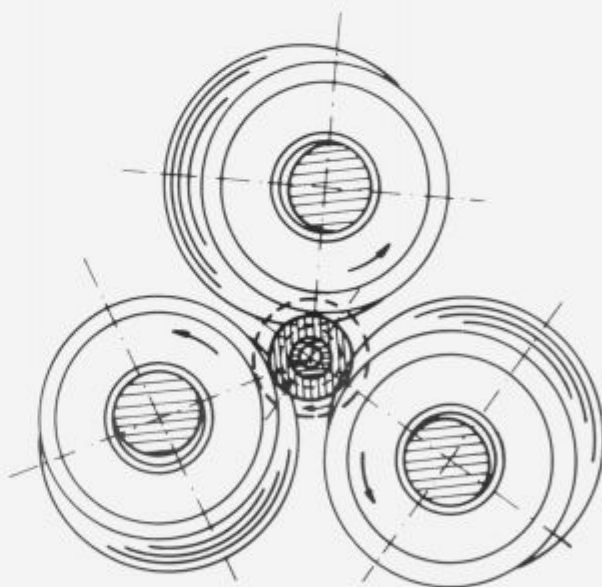
Orebrene cevi izdelujejo z namenom povečanja hladilne površine, da bi povečali izkoristek naprav za hlajenje z zrakom. Obstajajo različne tehnologije za izdelavo cevi za izmenjavo toplote, kot na primer:

- natikanje pločevinastih reber krožne ali pravokotne oblike na gladko cev
- izdelovanje krožnih reber z valjanjem (1)
- laminiranje debelostenskih cevi v obliki navojnice

Glede na različne tehnologije so tudi bistvene karakteristike različne kot npr. toplotna prevodnost in cena izdelave. Najboljše karakteristike imajo orebrene cevi v obliki navojnih reber, saj so rebra izdelana iz skupnega osnovnega materiala debelostenske gladke cevi. Tehnološka izdelava je zapletena, omogoča pa nam velikoserijsko proizvodnjo, ki daje ugodne ekonomske rezultate.

Glede na različne možnosti valjanja, smo se odločili za trivaljni sistem (slika 1), čeprav bi bilo možno uporabiti tudi več-valjne sisteme, ker nam trivaljni sistem nudi določene prednosti. Delovni valji morajo biti izvedeni tako, da so gibljivi v več oseh. Nagibni kot osi valjev mora biti prilagojen zahtevnemu razmiku reber, hkrati pa so premaknjeni za 1/3 hoda v osem smislu zato, da se rebra, ki jih uvalja valj lepo ujemajo in da opravi vsak valj le 1/3 dela.

Z diski, ki tvorijo sklop orodja, je možno izdelati cevi z nizkimi in visokimi rebri. Visoka rebra, ki so v uporabi

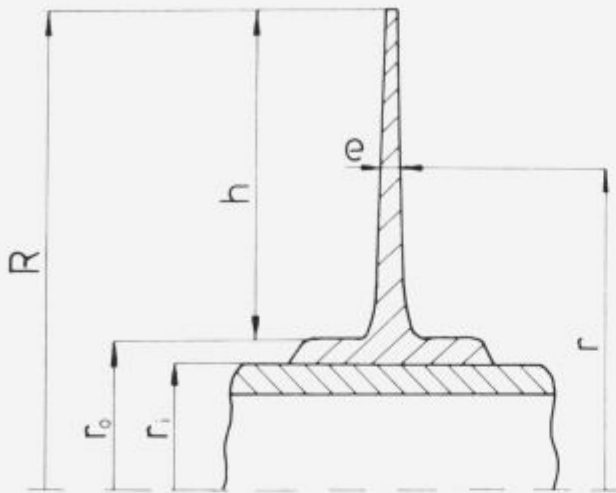


Slika 1. Trivaljni sistem.

za prenos toplote izdelujejo s postopkom hladnega preoblikovanja, zaradi česar privarčujejo na toplotni in električni energiji, postopek je čistejši in nudi ekološko čistejše delovne pogoje.

Rebra na ceveh morajo zadoščati različnim pogojem, t.j. dobremu toplotnemu prenosu in dobri površinski gladkosti. Pri izdelavi morajo ohraniti rebra svojo osnovno geometrijsko obliko (slika 2), medtem ko hod navojnice lahko spreminjamo.

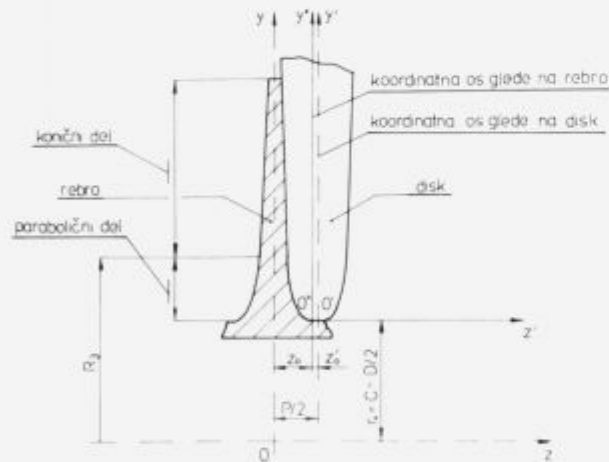
Prav tako lahko za isto orodje za valjanje orebrenih cevi uporabimo različne premere osnovne gladke cevi. Rebro oblikujemo v prvi fazi izdelave s prodiranjem diskov



Slika 2. Osnovna geometrijska oblika rebra.

v material, ga naberejo določen volumen zato, da ga v drugi fazi z nadaljnjim postopkom preoblikovanja vlečemo s pomočjo vpliva trenja in primerno oblikovanimi diski navzven na določeno višino z namenom, da bi dobili v tretji fazi izdelave določen zunanji premer in lepo gladko površino reber.

Zaradi kompliciranosti raziskave pri dvigovanju materiala v posameznih fazah preoblikovanja, smo morali najprej analizirati profile diskov in jih zaradi lažje matematične analize razdeliti na dva elementarna profila, (slika 3), in sicer na konični in parabolični del.



Slika 3. Razdelitev geometrijske oblike rebra na parabolični in konični del.

Pri oblikovanju dobi rebro bočno in gladko geometrijsko obliko orodja, t.j. diska. Le primerna geometrijska oblika orodja lahko daje pogoje za dvigovanje materiala. To dvigovanje je odvisno od več parametrov med katerimi so najvažnejši pogoji trenja, deformacijska napetost, vrtilna hitrost, hitrost gnetenja, vrsta materiala in temperature, ki se ustvarja med preoblikovalnim procesom. Zato moramo določiti parametre, ki pogojujejo velikost deformacijskih sil.

3 Teorija izračunov sil pri izdelavi orebrenih cevi

3.1 Uvod

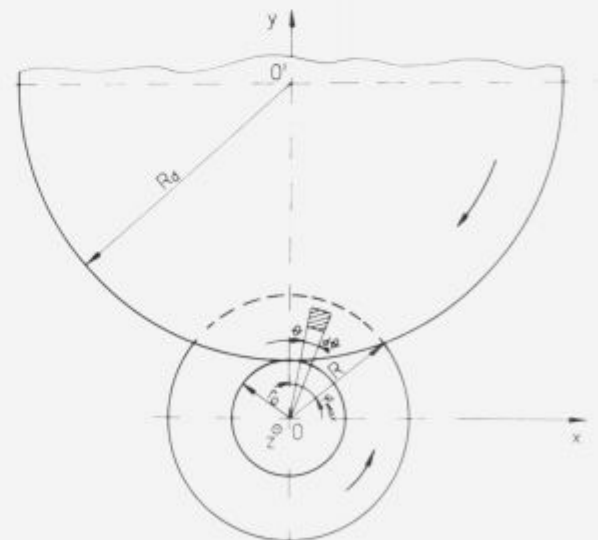
Kot smo že povedali, je deformacija orebrenih cevi pri laminiranju odvisna od več parametrov, med katerimi so najvažnejši pogoji trenja, oblika profila diska in razporeda diskov v orodju. Določiti moramo sile v odvisnosti od teh parametrov. Zato smo med različnimi računskimi metodami na osnovi teorije plastičnosti izbrali metodo ravnovesja elementarnih površin v deformacijskem območju.

3.2 Metoda ravnovesja rezin elementarnih deformacijskih površin

Pred analizo tega problema smo uporabili nekaj hipotez, ki smo jih aplicirali v naši nalogi zaradi olajšave pri računanju, saj je upoštevanje vseh vplivnih parametrov težko zajeti. Glede na element rezine (slika 5), dobimo rešitev problema s pomočjo poenostavitve in naslednjih hipotez:

1. debelina rebra je glede na kontaktno površino zanemarljiva, upoštevati pa moramo napetost striženja, ki se ustvarja med diskom in rebrom
2. volumen elementarne rezine se med deformacijo ne spreminja
3. napetost in deformacija sta konstantni v vsakem volumskem delu. V primeru, da napetost ne doseže vrednosti, ki jo določa krivulja plastičnosti, nam zaradi deformacije nastane razpoka (2)
4. koeficient trenja μ je konstanten po celotni kontaktni površini

Ob upoštevanju teh hipotez nastavimo enačbo ravnovesja za elementarni volumen, ki smo ga narisali v polarnih koordinatah (r, ϑ, z) in je zajet med dvema polmeroma (r) in $(r + dr)$, ter omejen z razliko kotov (ϑ) , (slika 4).



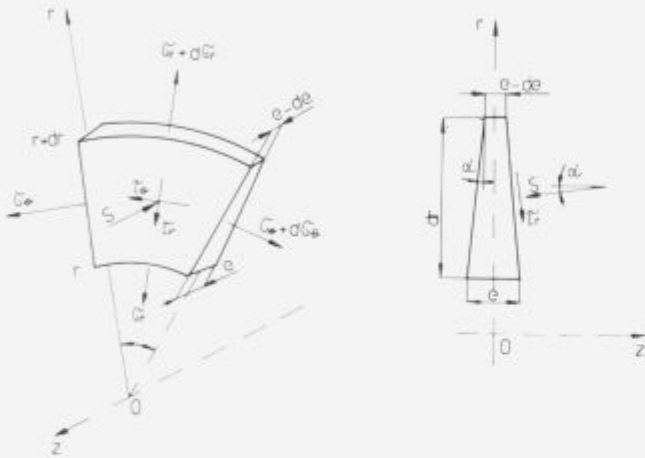
Slika 4. Diferencialni del rebra.

Vemo, da je rebro pri prehodu skozi orodje podvrženo različnim delnim modifikacijam glede na svoj profil, zato smo ta profil, kot je bilo že omenjeno, razdelili na parabolični in konični del ter za vsak del zgradili osnovno ravnovesno diferencialno enačbo.

Ravnovesna diferencialna enačba za parabolni del

Ob upoštevanju sil na elementarno površino (slika 5), dobimo:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\vartheta(\epsilon_p - d\epsilon_p) - \sigma_r r d\vartheta d\epsilon_p - 2\tau_r \cos \alpha \frac{r dr d\vartheta}{\cos \alpha} - 2S \sin \alpha \frac{r dr d\vartheta}{\cos \alpha} - (\sigma_\vartheta + d\sigma_\vartheta)dr \epsilon_p \frac{d\vartheta}{2} - \sigma_\vartheta dr \epsilon_p \frac{d\vartheta}{2} = 0,$$



Slika 5. Ravnovesje na rezini.

Dobljeno enačbo smo poenostavili tako, da smo zanemarili infinitezimalno količino drugega reda in uredili ter dobili končno enačbo ravnovesja za parabolni del naslednje oblike:

$$\epsilon_p \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{\epsilon_p} \right) = \frac{\sigma_\vartheta - \sigma_r}{r} + 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{\epsilon_p}.$$

Ravnovesna diferencialna enačba za konični del

Z izenačitvijo sil v koničnem delu (slika 5) dobimo:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\vartheta(\epsilon_c - d\epsilon_c) - \sigma_r r d\vartheta d\epsilon_c - 2\tau_r \cos \alpha \frac{r dr d\vartheta}{\cos \alpha} - 2S \sin \alpha \frac{r dr d\vartheta}{\cos \alpha} - (\sigma_\vartheta + d\sigma_\vartheta)dr \epsilon_c \frac{d\vartheta}{2} - \sigma_\vartheta dr \epsilon_c \frac{d\vartheta}{2} = 0.$$

Dobljeno enačbo smo prav tako kot prej poenostavili in zanemarili infinitezimalno količino drugega reda, uredili ter dobili enačbo ravnovesja za konični del:

$$\epsilon_c \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{\epsilon_c} \right) = \frac{\sigma_\vartheta - \sigma_r}{r} + 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{\epsilon_c}.$$

Diferencialne enačbe, ki smo jih izpeljali na osnovi ravnovesja sil na diferencialni volumski element, niso zadoščale za dokončno rešitev problema, zato smo dodali kriterij plastičnosti po Tresci. Tako imamo enačbi:

$$\epsilon_p \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{\epsilon_p} \right) = \frac{\sigma_\vartheta - \sigma_r}{r} + 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{\epsilon_p} \quad (1)$$

$$\epsilon_c \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{\epsilon_c} \right) = \frac{\sigma_\vartheta - \sigma_r}{r} + 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{\epsilon_c} \quad (2)$$

Iz preračuna profila diska smo dobili, da je nagib tangente profila diska majhen ($\approx 3^\circ$), bo prva aproksimacija $\operatorname{tg} \alpha = 0$, od koder dobimo $\epsilon_p = \epsilon_c = \epsilon_m = \operatorname{konst.}$ Na osnovi tega zapišemo zgornji enačbi v naslednji obliki:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\vartheta - \sigma_r}{r} + 2 \frac{\tau_r}{\epsilon_m}. \quad (3)$$

Z uporabo enostavnejšega kriterija plastičnosti po Tresci, ki pravi, da nastopi plastična deformacija pri neki največji tangencialni napetosti v materialu (3); zapišemo naslednjo diferencialno enačbo:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_z + k_f) = \frac{k_f}{r} + 2 \frac{\tau_r}{\epsilon_m}. \quad (4)$$

Desna stran enačbe predstavlja vplive, ki privedejo do spremembe normalnega pritiska diska na kontaktno površino rebra. Ti vplivi so predvsem geometrija profila diskov in trenje pri strižni napetosti.

Leva stran enačbe pa predstavlja povečanje napetosti, ki je posledica prejšnjih, že omenjenih vplivov.

Levi del enačbe razstavimo in dobimo:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr}(\sigma_z + k_f) &= \frac{d}{dr} \left(k_f \left(\frac{\sigma_z}{k_f} + 1 \right) \right) = \\ &= k_f \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_z}{k_f} \right) + \left(\frac{\sigma_z}{k_f} + 1 \right) \frac{d}{dr}(k_f), \end{aligned} \quad (5)$$

- kjer ustreza spremenljivka $d/dr (\sigma_z/k_f)$ nagibu povečanja normalne napetosti,
- kjer spremenljivka $d/dr (k_f)$ predstavlja nagib krivulje plastičnosti, t.j. utrjevanje.

Ker je za industrijsko proizvodnjo orebrenih cevi ugodno uporabljati materiale z majhnim utrjevanjem, kot npr. Al 99.5%, je krivulja utrjevanja zanemarljiva glede na krivuljo povečanja normalne napetosti. To hipotezo uporabljamo za poenostavitev problema in zahteva modifikacije pri uporabi materialov z močnim utrjevanjem.

Iz diferencialne enačbe (5) dobimo:

$$\frac{d}{dr} \left(k_f \left(\frac{\sigma_z}{k_f} + 1 \right) \right) = k_f \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_z}{k_f} \right) = k_f \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{k_f} \right). \quad (6)$$

Z uporabo modela trenja na limitni plasti $\tau = \overline{m}k_f$, kjer je $0 \leq \overline{m} \leq 1$ in z vstavitvijo tega odnosa in enačbe (6) v enačbo (4) dobimo:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{k_f} \right) = \frac{1}{r} + 2 \frac{\overline{m}}{\epsilon_m}. \quad (7)$$

Dobljeno enačbo integriramo. S poenostavitvijo, da je koeficient trenja \overline{m} konstanten na celotni kontaktni površini, dobimo:

$$\frac{\sigma_r}{k_f} = \ln(r) + 2 \frac{\overline{m}r}{\epsilon_m} + C, \quad (8)$$

kjer je:

C integracijska konstanta in
 k_f deformacijska napetost.

Za določitev integracijske konstante (C) uporabimo robni pogoj. Na površini, kjer je ($r = R$), je radialna napetost $\sigma_r = 0$. Tako dobimo:

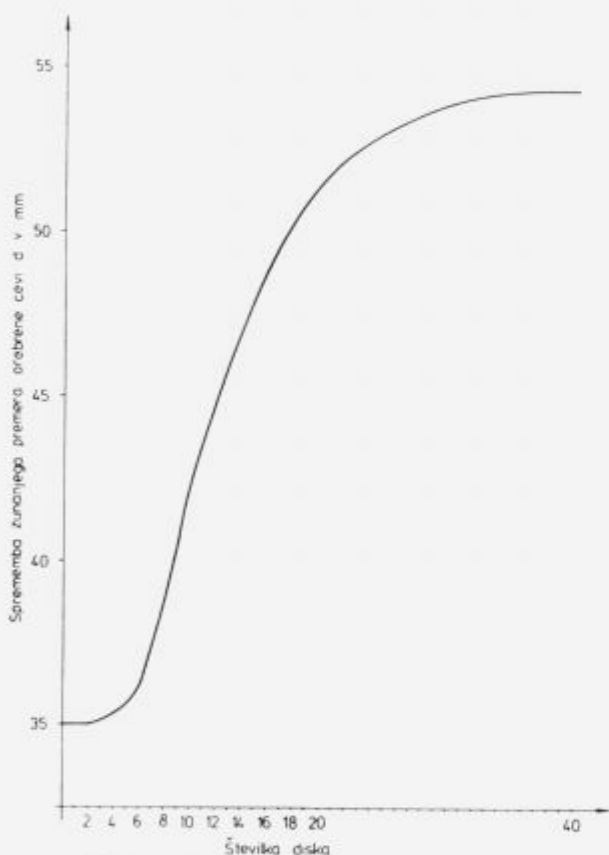
$$C = -\ln(R) - 2 \frac{\bar{m}}{\epsilon_m} R. \quad (9)$$

Dobljeno integracijsko konstanto vstavimo v enačbo (8) tako, da je:

$$\frac{\sigma_r}{k_f} = \ln\left(\frac{r}{R}\right) + 2 \frac{\bar{m}}{\epsilon_m} (r - R), \quad (10)$$

ali v odvisnosti od normalne napetosti σ_z :

$$\frac{\sigma_z}{k_f} = \ln\left(\frac{r}{R}\right) + 2 \frac{\bar{m}}{\epsilon_m} (r - R) - 1. \quad (11)$$



Slika 6. Sprememba zunanjega premera diskov.

Iz preračuna dobimo, da je lahko izraz $\ln(r/R)$ zanemarljiv glede na izraz $2\bar{m}/\epsilon_m(r - R)$, toliko bolj, ker v praksi srednja debelina rebra (ϵ_m) poteka v obratnem smislu kot polmer (r). Zato smo uporabili enačbo (12) kot aproksimacijo, ki predstavlja spremembo normalne napetosti v odvisnosti od polmera rebra. Tako je:

$$\frac{\sigma_z}{k_f} = 2 \frac{\bar{m}}{\epsilon_m} (r - R) - 1. \quad (12)$$

Glede na prejšnje aproksimacije lahko zapišemo osnovni diferencialni enačbi za parabolični in konični del profila

diska:

$$e_p \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{e_p} \right) = 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{e_p} \quad \text{in} \quad (13)$$

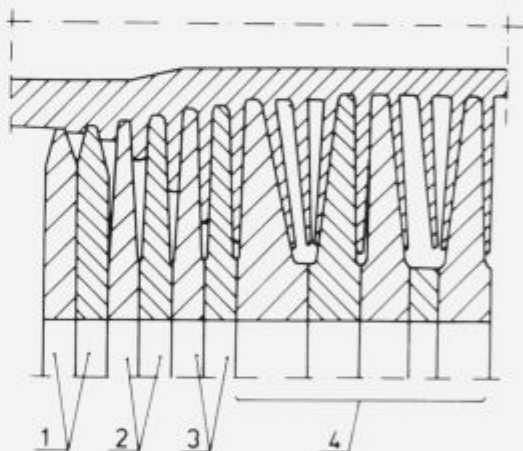
$$e_c \frac{d}{dr} \left(\frac{\sigma_r}{e_c} \right) = 2 \frac{\tau_r + S \operatorname{tg} \alpha}{e_c} \quad (14)$$

Iz prikazane strukture reševanja diferencialnih enačb in z uporabo določenih aproksimacij smo ugotovili, da je povečanje napetosti v glavnem odvisno od tangencialne napetosti, ki je posledica trenja diska ob rebro in geometrije rebra, če izhajamo iz hipoteze, da rebro dobi bočno obliko diska. Obe enačbi (13) in (14) sta glavni enačbi in služita za nadaljnji izračun napetosti oz. sil. S temi silami mora delovati orodje na material in oblikovati rebro.

S pomočjo navedenih enačb smo numerično rešili konstrukcijo orodja in dobili rešitev za spremembo zunanjega premera posameznih diskov v obliki diagrama, ki prikazuje eno izmed takšnih rešitev, (slika 6).

4 Principielna skica orodja in stroja za izdelavo orebrenih cevi

Orodje smo konstruirali na osnovi konstrukcijske zahteve oblike rebra, (slika 7).



- 1 – Diski za predoblikovanje
 - 2,3 – Diski za laminiranje, vlečenje in stanjševanje
 - 4 – Diski za kalibriranje
- Slika 7. Skica orodja.

Sestavljeno je iz treh sklopov diskov. V vsakem sklopu je določeno število diskov določene debeline, ki opravijo pri enem vrtljaju 1/3 deformacijskega dela. Za trdnostni in oblikovni izračun potrebnega sklopa orodja oz. posameznih diskov smo izdelali še dodatne izračune, ki so bili potrebni za določitev dimenzij orodja in stroja.

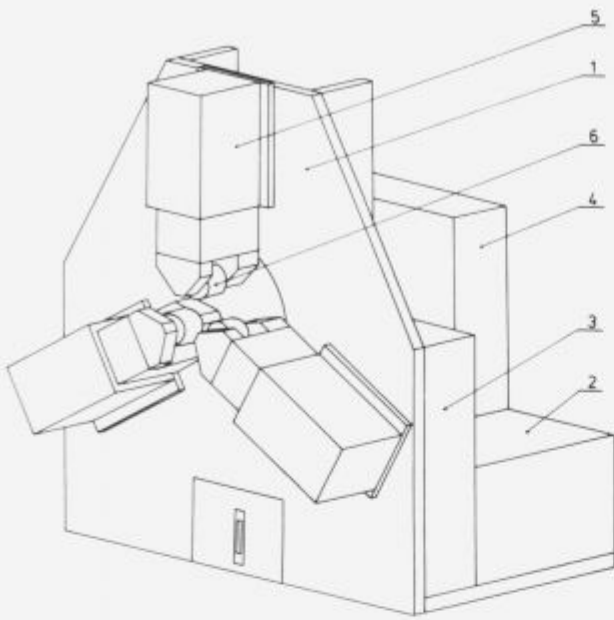
Stroj za izdelavo orebrenih cevi bo sestavljen iz prednje nosilne plošče, ki bo nosila preoblikovalno orodje, orodje pa bo pritrjeno na hidravlični cilindar (slika 8). V zadnjem delu stroja bo izveden pogon preko elektromotorja in menjalnega predležja na vretenjak, ki mora imeti tri izhode, ki bodo povezani preko kardanskih gredi z orodjem.

5 Zaključek

Gospodarnejša raba energije z uporabo orebrenih cevi v izmenjevalcih toplote v razvitem svetu ni več skrivnost, pač pa je skrivnost tehnologija izdelave teh naprav. Zato smo se v našem laboratoriju za tehnologijo in preoblikovanje gradiv odločili na pobudo Mariborske livarne Maribor in za njene potrebe izdelati projekt tehnološke izdelave orebrenih cevi. Tehnološki in ekonomski razvoj tega projekta nam bo omogočil velik prihranek pri materialu (do 80% glede na gladko cev) in prihranek pri energiji izdelave. Ker so orebrene cevi zanimive za našo industrijo, bi s tem zmanjšali potrebe po uvozu. Istočasno predstavljajo orebrene cevi končni izdelek našega naročnika.

6 Literatura

- ¹ Lange, K.: Umformtechnik, Band 2, Springer Verlag, Berlin 1984
- ² Leš, P., Glogranc F.: Tehnika preoblikovanja, 2. izdaja, Maribor, 1991
- ³ Čaušević M.: Obrada metala valjanjem, Veselin Masleša 1983



- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1-Nosilna plošča | 5-Hidravlična stiskalnica |
| 2-Rezervoarji olja | 6-Delovni valji – diski |
| 3-Krmlina plošča | |
| 4-Zabniški pogon | |

Slika 8. Skica stroja.