

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Technologie pro ohýbání tenkostěnné trubky

TECHNOLOGY FOR BENDING THIN-WALLED TUBE OF COPPER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SOLIL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MILAN DVOŘÁK, CSc.

BRNO 2009

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

1 ÚVOD.....	8
2 VŠEOBECNĚ O STŘIŽNÉM PROCESU	9
3 METODY DĚLENÍ TRUBEK STŘÍHÁNÍM PRO OHÝBÁNÍ	10
3. 1 STŘÍHÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK VERTIKÁLNÍM ZPŮSOBEM	10
3. 2 STŘÍHÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK HORIZONTÁLNĚ VERTIKÁLNÍM ZPŮSOBEM ..	11
3. 3 STŘÍHÁNÍ V NÁSTROI BEZ ODPADU	11
3. 4 STŘÍHÁNÍ TRUBEK KOTOUČOVÝMI NOŽI	13
3. 5 NOVÉ ZPŮSOBY STŘÍHÁNÍ TRUBEK	13
3. 5. 1 <i>Stříhání trubek s axiálním předpětím</i>	14
3. 5. 2 <i>Stříhání trubek vysokou střížnou rychlostí</i>	14
3. 5. 3 <i>Stříhání trubek pomocí pružných materiálů</i>	15
4 ROZBOR PROBLEMATIKY OHÝBÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK.....	16
4. 1 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ TRUBEK	16
4. 1. 1 <i>Moment ohybu v elasticko plastické oblasti</i>	17
4. 1. 2 <i>Maximální poloměr ohybu</i>	18
4. 1. 3 <i>Ohybová síla</i>	18
4. 2 OHÝBÁNÍ TRUBEK ZA STUDENA A ZA TEPLA.....	19
4. 3 METODY OHÝBÁNÍ TRUBEK	24
4. 3. 1 <i>Ruční ohyb v přípravku</i>	24
4. 3. 2 <i>Ohyb s navíjením</i>	24
4. 3. 3 <i>Ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou</i>	25
4. 3. 4 <i>Ohyb s ohřevem</i>	26
5 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY PŘI OHÝBÁNÍ.....	27
5. 1 OHÝBACÍ SÍLA A PRÁCE	27
5. 2 POLOMĚR OHYBU NEUTRÁLNÍ VRSTVY A STANOVENÍ ODPRUŽENÍ PRO U OHYB	28
5. 3 ODPRUŽENÍ PŘI OHÝBÁNÍ	29
5. 4 ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ NEPŘESNOSTI PO OHYBU TRUBKY DO U TVARU	30
5. 4. 1 <i>Ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu</i>	30
5. 4. 2 <i>Zploštění kruhového průřezu</i>	31
5. 4. 3 <i>Zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu</i>	32
5. 4. 4 <i>Odpružení trubky po ohybu</i>	32
6 ZAŘÍZENÍ PRO OHYB TRUBEK.....	33
7 NÁVRH OHÝBACÍHO PŘÍPRAVKU	34
7. 1 NÁVRH MATERIÁLU A JEHO VLASTNOSTI.....	34
7. 2 NAVRŽENÝ PŘÍPRAVEK, JEHO POPIS A SCHÉMA	34
8 TAHOVÉ ZKOUŠKY MĚDĚNÉHO POTRUBÍ.....	36
8. 1 PŘÍPRAVA A PRŮBĚH TAHOVÉ ZKOUŠKY	36

8. 2 VÝSLEDKY TAHOVÝCH ZKOUŠEK	36
9 MAZIVA PRO DĚLENÍ A OHÝBÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK	38
10 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	39
11 ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ – SYMBOLŮ	41
SEZNAM OBRÁZKU A TABULEK	42
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	44

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Solil

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie pro ohýbání tenkostěnné měděné trubky

v anglickém jazyce:

Technology for bending thin-walled tube of cooper

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie ohýbání tenkostěnné trubky z mědi do tvaru U, včetně návrhu ohýbacího zařízení/ resp. přípravku /. Průměr trubky a tloušťka stěny jsou limitovány max. rozměry. Výstupem řešení je funkční ohnutý dílec do požadovaného tvaru.

Cíle bakalářské práce:

Návrh technologie ohýbání zadané trubky z mědi a ohýbací přípravek pro funkční dílce pro seriovou výrobu.

Seznam odborné literatury:

1. KOTOUČ, J., ŠANOVEC, J., ČERMÁK, J. a MÁDLE, L. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 349s. ISBN 80-01-01003-1.
2. KRÍŽ, R., VÁVRA, P. Strojírenská příručka. Tváření. 1. vyd. Praha: Scientia 1998. sv.8. 255s. ISBN 80-7183-054-2.
3. BOLJANOVIC, V. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. 1.st. ed. New York: Industrial Press. 2004. 219p. ISBN 0-8311-3182-9.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 19.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena do problematiky technologie dělení a ohýbání tenkostěnných trubek z materiálu Cu- DHP dle EN 12735-2, včetně zařízení pro ohyb trubek. V práci je navržen ohýbací přípravek pro ohyb tenkostěnných měděných trubek do tvaru U. Práce obsahuje vedle výpočtové a výkresové dokumentace ohýbacího přípravku, taktéž experiment s provedením tahových zkoušek trubek a ohybových zkoušek do U tvaru trubek.

Klíčová slova

Stříhání, ohýbání, tenkostěnná trubka, materiál Cu

Abstract

Bachelor's thesis is concerned with issues of cutting and bending the thin-walled pipes which are produce from Cu-DHP material by EN12735-2. Thesis is also concerned with banding tool. There is designed banding tool for thin-walled copper pipes in the U form. Thesis contains calculations, drawing of banding tool and experiment with the tensile and bending tests of thin-walled pipes in the U form.

Key words

Cutting, bending, thin-walled pipes, Cu-DHP material

Bibliografická citace

SOLIL, P. *Technologie pro ohýbání tenkostěnné měděné trubky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 45 s., 4s příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci na vybrané téma technologie pro ohýbání tenkostěnné trubky jsem vypracoval samostatně, s využitím literatury a odborných pramenů na základě konzultací, pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Ivani dne 5. 5. 2009

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za poskytnuté konzultace a za velmi cenné připomínky.

1 Úvod

Problematika ohýbání tenkostěnných trubek z mědi o malých průměrech a tloušťce stěny v řádově několika desetin milimetru do ohybu U je velmi aktuální a v průmyslové praxi v poslední době používána.

Tyto měděné trubky jsou vyráběny jako komponenty do klimatizačních dílů nazývaných dle druhu použití jako tepelné výměníky, kondensátory a výparníky. Jejich rozmanité využití nalezneme u dopravních prostředků, klimatizací budov a zdravotnických zařízení, vzduchotechnice a v poslední době velmi oblíbených tepelných čerpadlech.

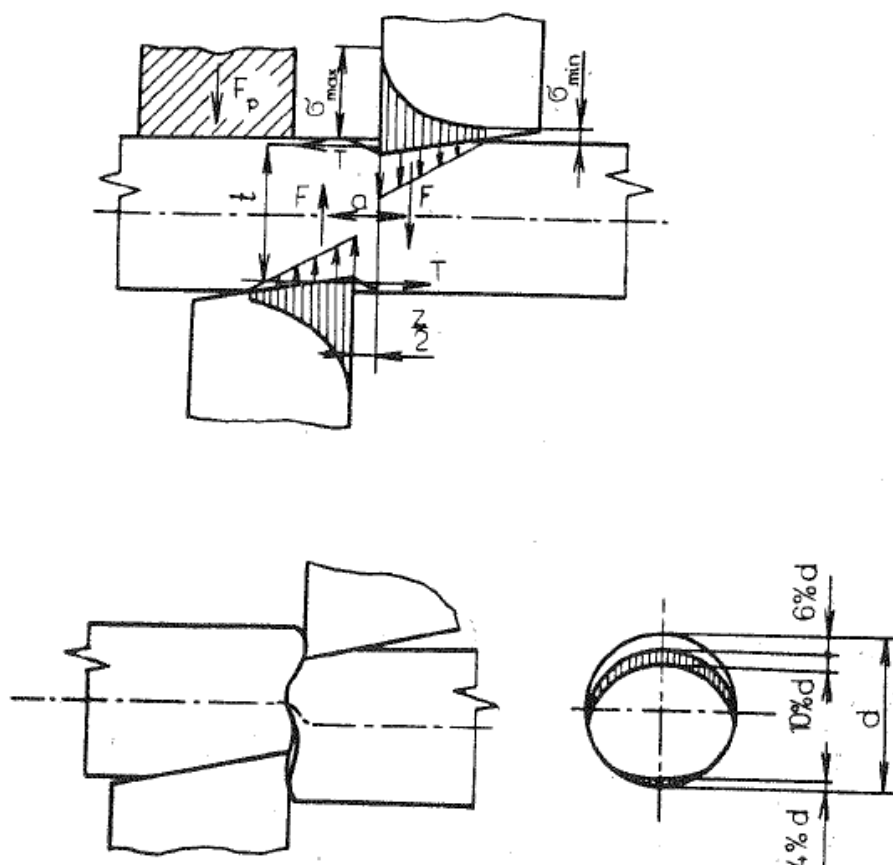
V bakalářské práci je řešena technologie ohýbání měděné tenkostěnné trubky o vnějším průměru 9,525 mm (3/8 inch) a tloušťce stěny 0,28 mm. Trubka je vyrobena z potravinářské mědi dle dodavatelského standardu CUPROCLIMA v souladu s evropskou normou EN 12735-2. Byly zjišťovány vybrané mechanické hodnoty tahových zkoušek R_m , R_e , A_{80} od tří různých dodavatelů a to Cupori Finland PF1 až PF5, KME Francie vzorky KME1 až KME5 a Wieland Germany W1 až W5. Tyto byly vzájemně porovnány dle zjistitelných mechanických hodnot, které sloužily pro další výpočet a návrh ohýbacího přípravku pro zadaný rozměr trubek.

Z důvodu výskytu materiálových vad u dodaného materiálu dochází k důlkové korozi stěny ohýbaných trubek. V průběhu výroby a také dopravou dochází často k poškození trubek a je potřeba provést jejich výměnu. Stávající strojní zařízení pro ohýbání trubek je zaměřeno pro sériovou výrobu. Opravy jednotlivých ohýbaných dílců zvláště atypických rozměrů trubek jsou jako v našem případě neekonomické na ohýbacích strojních zařízeních pro sériovou výrobu. Z tohoto důvodu bylo třeba navrhnout ohýbací universální přípravek pro kusovou výrobu. Navržený ohýbací přípravek umožní ekonomický způsob oprav výměny měděných trubek a řešení defektů hospodárnějším způsobem. Dále byla pozornost věnována mazivu, které bylo experimentálně navrženo a odzkoušeno.

2 Všeobecně o střižném procesu [1]

Střižný proces začíná vtláčováním nožů do materiálu. Při tom dochází k odchylce od daného geometrického tvaru a k deformaci podélných vláken. Při dalším pohybu jsou vlákna natahována a současně vytlačována do stran, aby se uvolnilo místo pro vnikající nože. Materiál je v počáteční fázi deformován pružně a při dalším pohybu je namáhán plasticky. Tlakové napětí dosáhne nejprve meze kluzu ve smyku, přičemž vznikají axiální tlakové síly, které dosahují velikosti třecích sil mezi nástrojem a materiálem. V další fázi dosáhne tlakové napětí meze pevnosti ve smyku a zvětšujícími se axiálními tlakovými silami je způsoben relativní pohyb mezi trubicou a nástrojem. Nastává smykové prodloužení. Trhlinky v materiálu vycházejí od střižné hrany nože a při optimální vůli na sebe navazují. Tím dochází k vlastnímu oddělení materiálu.

Ukázka silových poměrů a střižné plochy pro plný materiál, který byl dříve používán místo trubek ukazuje Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Silové poměry a střižná síla [1]

3 Metody dělení trubek stříháním pro ohýbání [1]

Tenkostěnné profily a trubky se dělí třískovým způsobem, odtavením nebo beztrískovou technologií – stříháním. Rozhodující parametry při volbě použité technologie je velikost série, délka ústřížku, průměr a tloušťka stěny, dostupné nástroje a výrobní zařízení. Z hlediska efektivnosti je nezbytně nutné využití technologie dělení např. trubek „stříhání bez odpadu“.

3. 1 Stříhání tenkostěnných trubek vertikálním způsobem [1]

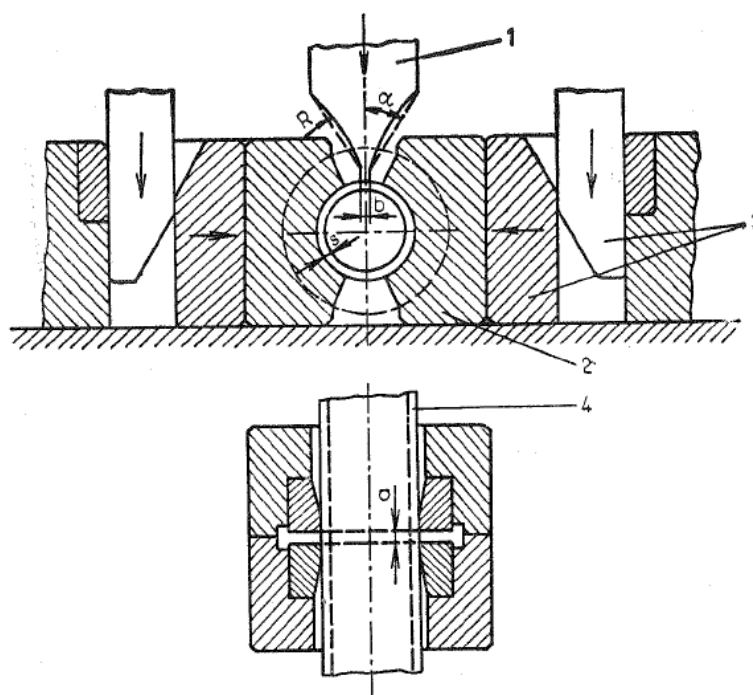
Trubka je během střížného procesu sevrěna po obvodě čelistmi, které jsou ovládány odpruženým přidržovačem, umístěným v horní části nástroje, nebo bočním klínem. Při střížném procesu vniká nůž hrotem do trubky a odstříhuje obvykle dvojitým stříhem úzký prstenec (odpad). Tloušťka nože má být minimálně 1,5 až dvojnásobek tloušťky stěny trubky:

$$a = (1,5 \text{ až } 2) \cdot s, \alpha = 30^\circ. \quad (1)$$

Šířka hrotu nože je: $b = 2 \cdot s. \quad (2)$

Poloměr tvaru nože R odpovídá 1,2 násobku průměru stříhané trubky:

$$R = 1,2 \cdot D \text{ (Obr. 3-1).} \quad (3)$$



Obr. 3-1 Nástroj pro stříhání tenkostěnných trubek – vertikální způsob[1]

1 – pohyblivý nůž, 2 – čelisti, 3 – klínové ovládání čelistí, 4 – stříhaná trubka, a – tloušťka nože, α – úhel nože, R – poloměr tvaru nože, s – tloušťka stěny trubky, b – šířka hrotu nože.

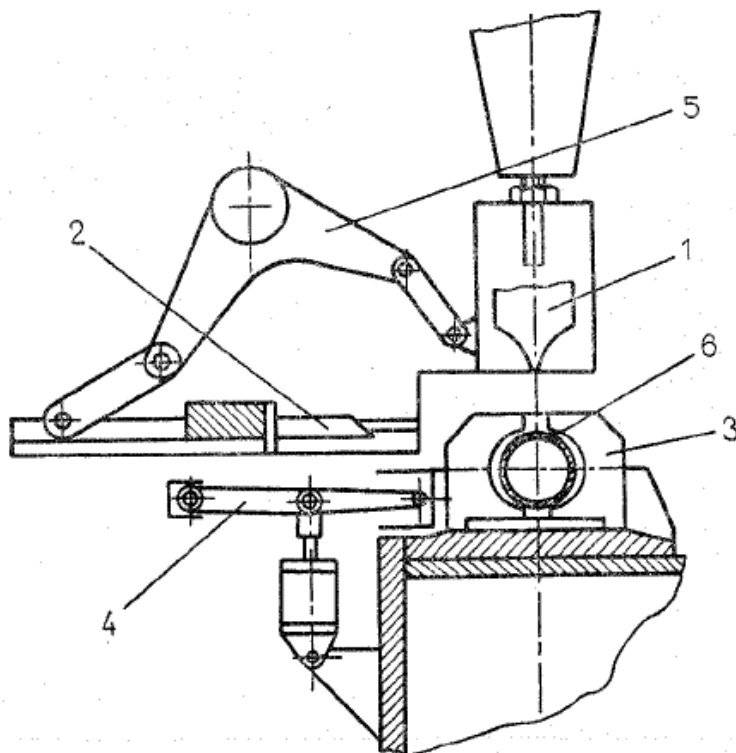
Trubka je v místě vnikání nože mírně deformovaná. Tímto způsobem lze stříhat i trubky jiných průřezů, např. elipsovitě, vícehranné. Podstatně kvalitnější střížné plochy při stříhání trubek lze dosáhnout v nástroji, ve kterém je umístěn vnitřní rozpínací trn.

3.2 Stříhání tenkostěnných trubek horizontálně vertikálním způsobem [1]

Stříhání tenkostěnných trubek a uzavřených profilů (čtverec, obdélník, apod.) má tři pracovní části:

1. fáze: uzavřený profil se z obou stran upne.
2. fáze: nůž s horizontálním pohybem odstřihne horní část profilu.
3. fáze: po vrácení horizontálního nože do výchozí polohy vnikne klínový vertikální nůž do přistřižnutého otvoru a stříh dokončí.

Stříhané trubky a uzavřené profily mají kvalitní střížnou plochu.



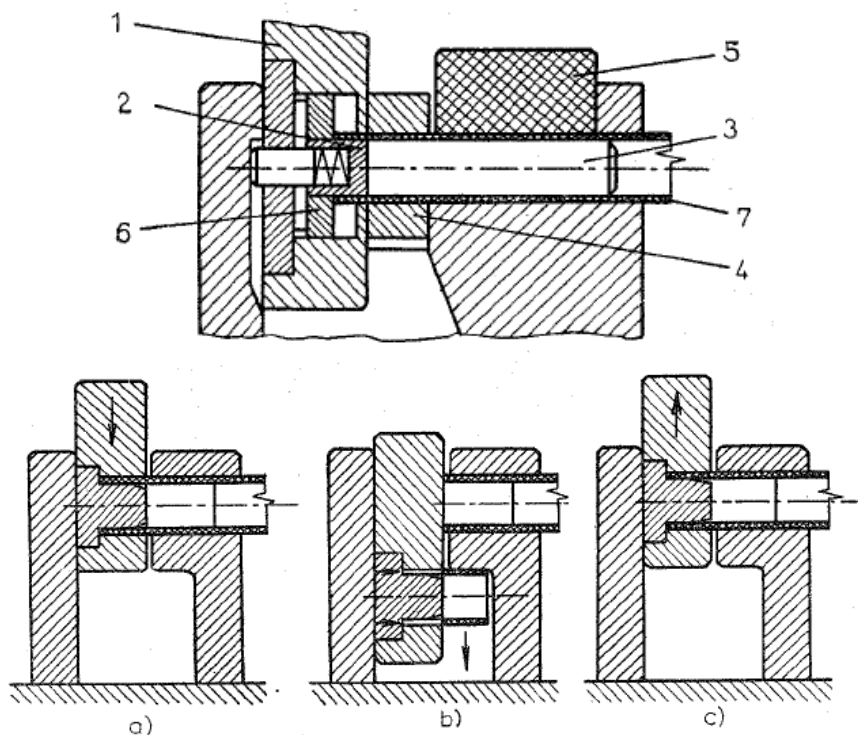
Obr. 3-2 Princip zařízení ke stříhání tenkostěnných trubek – horizontálně vertikální způsob [1]

1 – vertikální nůž, 2 – boční nůž, 3 – čelisti, 4 – upínání čelistí, 5 – pohon bočního nože, 6 – trubka.

3.3 Stříhání v nástroji bez odpadu [1]

U běžných konstrukcí nástrojů pro stříhání tenkostěnných profilů a trubek se nedosahuje tak kvalitních střížných ploch jako při stříhání s odpadem. Deformace tvaru profilu je závislá na přesnosti provedení tvaru pevného a pohyblivého nože. Nože nástroje pro stříhání otevřených tenkostěnných profilů bez odpadu mají tvar přibližně stejný, jako je tvar stříhaných profilů.

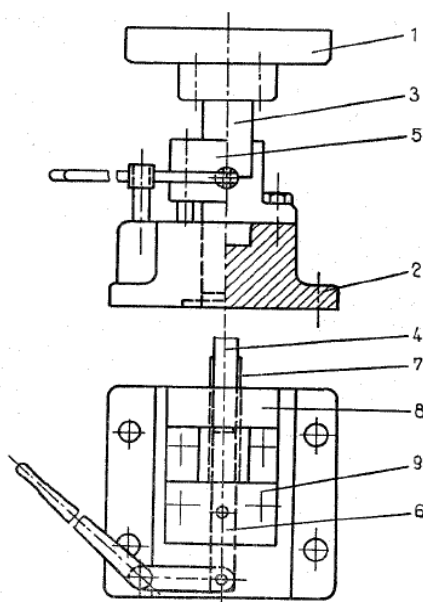
Při stříhání uzavřených tenkostěnných profilů a trubek bez odpadu se používá dvojice trnů, které lze konstruovat jako letmé nebo rozpínací. Tím se odstraní deformace při stříhu. Princip a schéma jsou znázorněny na obr. 3-3. Stříhaná trubka 7 je pevně sevřena v nástroji mezi přidržovačem 5, pevným nožem 4 a plovoucím trnem 3 na jedné a mezi pohyblivým nožem 1 a trnem 2 na straně druhé. Ustřižená trubka je vyhozena vyhazovačem 6.



Obr. 3-3 Princip a schéma nástroje pro stříhání trubek a uzavření tenkostěnných profilů [1]

a – počáteční fáze, b – fáze stříhu, c – konečná fáze, 1 – pohyblivý nůž, 2 – trn, 3 – plovoucí trn, 4 – pevný nůž, 5 – přidržovač, 6 – vyhazovač, 7 – stříhaná trubka.

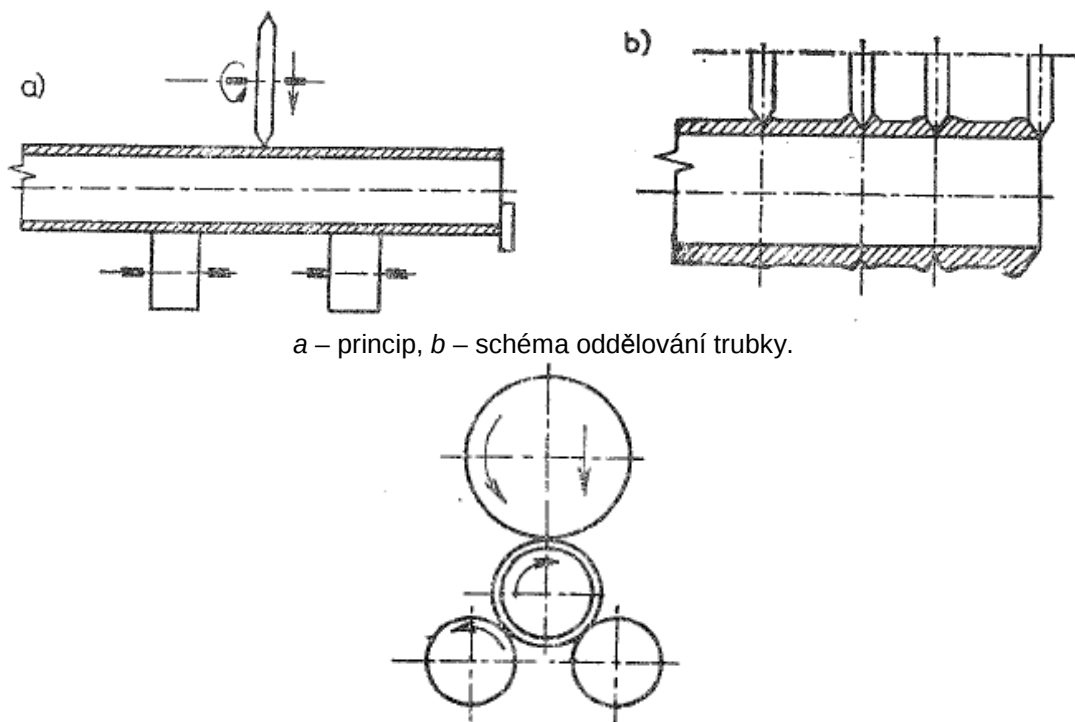
Konstrukce nástroje pro stříhání krátkých trubek ve velkých sériích je znázorněna na následujícím obr. 3-4. Nástroj se skládá z horní části a dolní části 1, 2, do nichž jsou upnuty funkční části nástroje, tj. střížnice 8, doraz 9, pohyblivý nůž 3, upínací čelist 5 a ovládání trnu 6. Dvojice trnů 4 vyplňuje při stříhání trubku 7. Po skončení stříhu se pákou trn vysune a ústřížek trubky vypadne. Oba trny se dotýkají na střížné hraně.



Obr. 3-4 Nástroj pro stříhání trubek bez odpadu [1]

3. 4 Stříhání trubek kotoučovými noži [1]

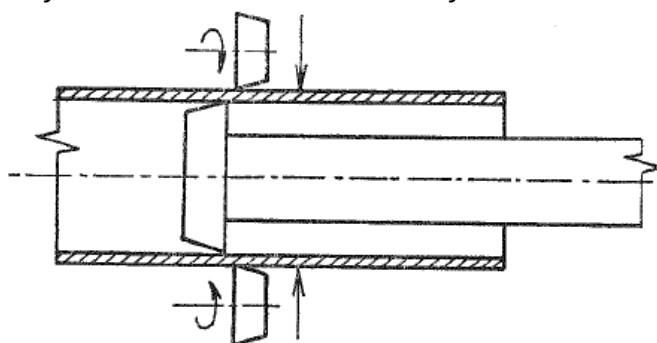
Stříhání trubek kotoučovými noži se provádí metodou Kleager a metodou stříhání s otočným trnem. Při využití první metody je do trubky, která je uložena na válečcích, vtlačován břit kotoučového nože. Trubka se otáčí a na jejím povrchu se vytvoří ryska, která se prohlubuje až do úplného oddělení části trubky. Princip je založen na stříhání s využitím únavy materiálu (obr. 3-5).



a – princip, b – schéma oddělování trubky.

Obr. 3-5 Stříhání trubek kotoučovými noži [1]

Stříhání trubek s otočným trnem je znázorněno na obr. 3–6. Tuto technologii lze použít pro trubky s maximální tloušťkou stěny 3 mm.



Obr. 3-6 Stříhání trubek s otočným trnem [1]

3. 5 Nové způsoby stříhání trubek [1]

Při stříhání tenkostěnných profilů a trubek mají vliv na přesnost ústřížku mechanické vlastnosti stříhaného materiálu, tolerance a povrch stříhaného

materiálu, geometrie a konstrukce nástroje, rychlost stříhání a poměr L/D . Při L/D menším než 0,8 vznikají větší deformace. Při současném způsobu stříhání trubek vzniká velká deformace ústřížku a ovalita, zejména ve střížné ploše. Zmíněné nevýhody lze odstranit stříháním trubek novými způsoby, při nichž je v místě stříhu vyvozen víceosý stav napjatosti. Podle způsobu vyvození dvojosého nebo tříosého stavu napjatosti se zařízení dělí na zařízení s axiální silou, zařízení s radiálním sevřením tyče i ústřížku a zařízení s přídavným krutem.

3. 5. 1 Stříhání trubek s axiálním předpětím [1]

Ve výzkumném středisku FZU pro tváření ve Zwickau vyvinuli společně s VEB Umformtechniku ve Erfurtu, zařízení pro stříhání tyčí a trubek s axiálním předpětím a se střížnou rychlostí $v = 2 \cdot m \cdot s^{-1}$. (4)

Zařízení je řešeno jako automatická stříhací linka, která je vybavena lisem PXS 125s nástrojovým systémem, zásobníkem pro tyče nebo trubky a zařízením na hrotování a z dopravního zařízení na odvádění ústřížků. Tímto uspořádáním je umožněno v automatickém procesu vyrovnat a očistit deformované konce tyčí a trubek i otřepy po řezání na pile. Takto upravené tyče nebo trubky jsou přiváděny do tvářecího stroje

Výhody lisu PXS 125 :

- Vyšší kvalita stříhaných částí proti obvyklým způsobům stříhání na nůžkách a lisech.
- Ústřížky se vyznačují čistými a téměř rovinnými střížnými plochami bez vad, minimálním otřepem a velmi malým sklonem střížné plochy vůči ose stříhu ve svislé rovině.
- Kontrola délky posuvu před každým stříháním. Tím je dána záruka nejmenších délkových tolerancí ústřížků.
- Použitelný pracovní rozsah od $\varnothing 30 - \varnothing 62$ mm.
- Dosahuje se vyšší produktivity práce. Dále úspory pracovních sil vlivem plně automatizovaného pracovního procesu.

Konstrukce stříhacího lisu PXS 125 umožňuje vestavěním speciálních nástrojových systémů univerzální nasazení u různých druhů profilů. Rozsah použití stříhacího lisu PXS 125 je rozšířen o stříhací zařízení na trubky pro beztržkové zhotovování kroužků z trubek. Vyvinuté zařízení je laboratorní a pracuje s opěrným trnem na straně ústřížku i tyče. Laboratorní zařízení bylo dimenzováno na stříhání trubek o vnějším průměru 28 mm až 62 mm. Přípustné odchylky vnějšího průměru trubky jsou $\pm 0,3$ mm. Zařízení je vybaveno uzavřenými, pouzdrovými noži pracujícími z boku trubky nebo otevřenými noži, pracujícími ve směru od ústřížku. Délky ústřížku jsou od 10 mm do 60 mm. Ústřížky se vyznačují vyšší kvalitou střížné plochy, minimálním otřepem a malým sklonem střížné plochy ke svislé rovině. Maximální úhel sklonu jedné střížné plochy proti druhé činil u ústřížků trubek $0,50^\circ$.

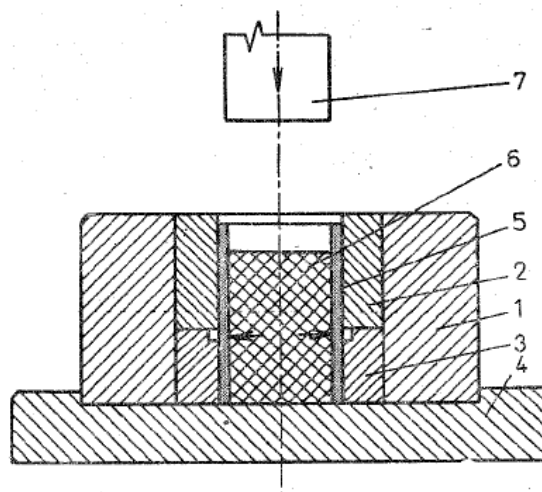
3. 5. 2 Stříhání trubek vysokou střížnou rychlostí [1]

Pro získání kvalitních střížných ploch při stříhání trubek je výhodné využít vysokých střížných rychlostí. Švédská firma HJO Mekaniska Verkstad používá

pro stříhání trubek speciálních zařízení, u kterého je střížná rychlost $v = 10 \cdot m \cdot s^{-1}$ (5). Urychlení je provedeno pomocí pneumatického válce se speciálním uspořádáním ventilu.

3. 5. 3 Stříhání trubek pomocí pružných materiálů [1]

Technologie stříhání tenkostěnných trubek pomocí pružných materiálů (např. polyuretan, pryž) byla zkoušena ve Velké Británii. Na obrázku 3-7 je schematicky znázorněn nástroj pro stříhání trubky pomocí polyuretanu.



Obr. 3-7 Stříhání trubek polyuretanem [1]

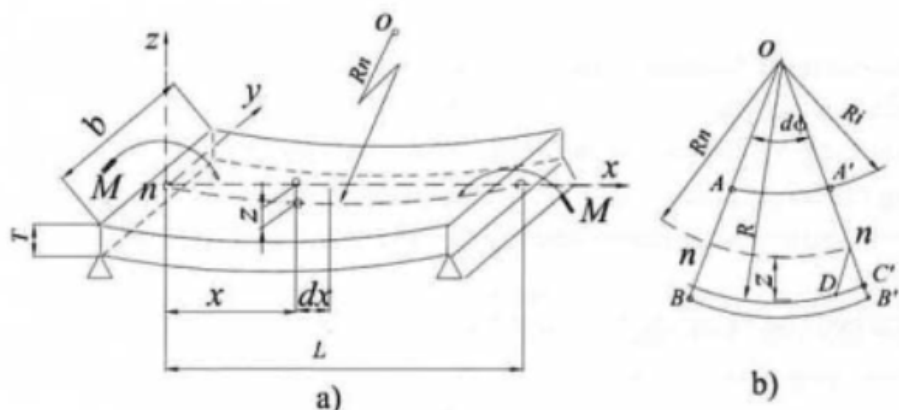
Nástroj se skládá z masivního tělesa 1, do něhož jsou uloženy střížnice 2, 3, a ze základové desky 4. Střížná trubka 5 je vyplněna polyuretanem 6 a vložena do nástroje. Při stříhání působí na polyuretan trubky trn 7, který polyuretan stlačí a má tedy funkci střížníku. Střih je proveden radiálním směrem.

4 Rozbor problematiky ohýbání tenkostěnných trubek

4. 1 Technologie ohýbání trubek

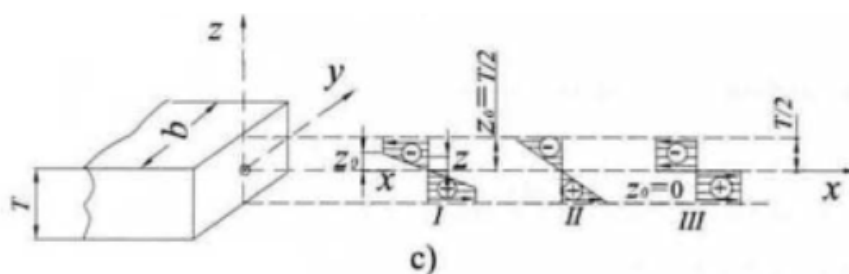
Z literární studie zadané zahraniční literatury od autora Boljanoviče k technologii ohýbání tenkostěnné trubky bylo zjištěno, že autor se takto speciální teorií ohybu tenkostěnné trubky do tvaru U nezabývá. Podobně autor Bernard Oehler z knihy Biegen se na 331 stranách k ohýbání rovněž nezmiňuje o ohybu tenkostěnné trubky do tvaru U. Podobně německý autor Kaiser, který se zabývá plošným tvářením, teoreticky neřeší zmiňovanou problematiku. Na s. 230 uvádí konstrukční řešení podle amerického patentu č. 2750026 pro dělenou zápustku pro ohyb trubky do pravoúhlého oblouku za podmínky, že střední poloměr ohybu musí splňovat podmínku $r > 5d$, max. roven $5d$, kde d je vnější průměr trubky. Výplň trubky je rozlišena podle jejich průměrů d . Mezní průměr je $d = 40 \text{ mm}$. Do $d = 40 \text{ mm}$ se doporučuje nízko tající slitina složená z 50 % Bi, 10 % Cd, 26,7 % Pb a 13,3 % Sn. Bod tání je 70 °C. U větších průměrů se doporučuje následující složení výplně trubky před ohýbáním: 55,5 % Bi a 44,5 % Pb. Celá řada autorů se zabývá ohybovými zkouškami např. do tvaru V buď za studena, ale i s vlivem teploty, např. Hofmann, W., Zünkler, B., Eisenkolb, F., Güth, H. apod. [2].

Ohyb trubky lze teoreticky ukázat i na ohybu elementu plechu v podobě nosníku. Schematickou ilustraci ohýbání nosníku s neutrální osou a ohybovým napětím v elasticko-plastické oblasti ukazuje obr. 4-1 [2].



Obr. 4-1 Schéma ohybu nosníku [2]

a) ohyb nosníku, b) neutrální osa



Obr. 4-1 Schéma ohybu nosníku [2]

c) ohybové napětí v elasticko-plastické oblasti

4. 1. 1 Moment ohybu v elasticko plastické oblasti [2]

Moment ohybu v elasticko plastické oblasti může být vyjádřen součtem momentů ohybu v elastické a plastické oblasti na stejné ose a tím dává obecný vzorec:

$$M = Re \left[\frac{2}{Z_0} \int_0^z z^2 dA + \int_{z_0}^{T/2} z dA \right] \quad (6)$$

První část této rovnice je moment odporu v elastické deformační oblasti s ohledem na y-osu:

$$W' = \frac{2}{Z_0} \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA \quad (7)$$

Druhá část rovnice je moment statický v plastické deformační oblasti s ohledem na y-osu:

$$S = 2 \int_{z_0}^{T/2} z \cdot dA \quad (8)$$

Moment ohybu v elasticko plastické oblasti je ve finální formě:

$$M = Re \cdot (W_0 + S) \quad (9)$$

kde:

Re = mez kluzu

W₀ = moment odporu

S = statický moment

Pro obdélníkový průřez nosníku, je ohybový moment v elasticko-plastické oblasti dán vzorcem: $M = \frac{(Re)b}{12} (3t^2 - 4z_0^2)$ (10)

Hodnotu **z₀** lze vypočítat z Hookova zákona: $Re = E \cdot \varepsilon_0 = E \cdot \frac{z_0}{R_n}$ (11)

Z toho plyne: $z_0 = \frac{(Re)R_n}{E}$ (12)

Po další úpravě dostaneme vztah pro ohybový moment:

$$M = \frac{(Re) \cdot b}{12} \left[3t^2 - \left(\frac{2(Re) \cdot R_n}{E} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Ohybový moment lze vyjádřit jako zmenšený poloměr křivky (R_r):

$$M = (Re) \frac{b \cdot t^2}{12} \left[3 - \left(\frac{2(Re) \cdot R_r}{E} \right)^2 \right] \quad (14)$$

S ohybem v elasticko plastické oblasti a za předpokladu, že $5 < R_r < 200 \text{ mm}$ a vlivem $\left(\frac{2 \cdot R_e \cdot R_r}{E}\right)^2$ dostaneme zjednodušený vztah pro ohybový moment ve tvaru: $M = (R_e) \frac{bt^2}{4}$ (15)

4. 1. 2 Maximální poloměr ohybu [2]

Maximální poloměr ohybu je dán vztahem: $R_{i(\max)} \leq \frac{tE}{2R_e}$ (16)

Ohýbaný poloměr je v rozmezí: $R_{i(\min)} \leq R_i \leq R_{i(\max)}$ (17)

Pokud není ohýbaný poloměr v tomto rozmezí, může dojít ke vzniku trhlin na vnější straně ohýbaného dílce.

Pro $R_i > R_{i(\max)} = \frac{t \cdot E}{2 \cdot R_e}$ nebude dosaženo trvalé plastické deformace

u ohýbaného plechu a tento plech bude mít snahu se vrátit zpět do původní polohy a vznikne tzv. odpružení materiálu.

4. 1. 3 Ohybová síla [2]

Ohybovou sílu lze odhadnout, jsou-li vyrovnané ohybové momenty od vnitřních a vnějších sil. Dále za předpokladu, že ohybový proces vychází z ohybu jednoduchého nosníku.

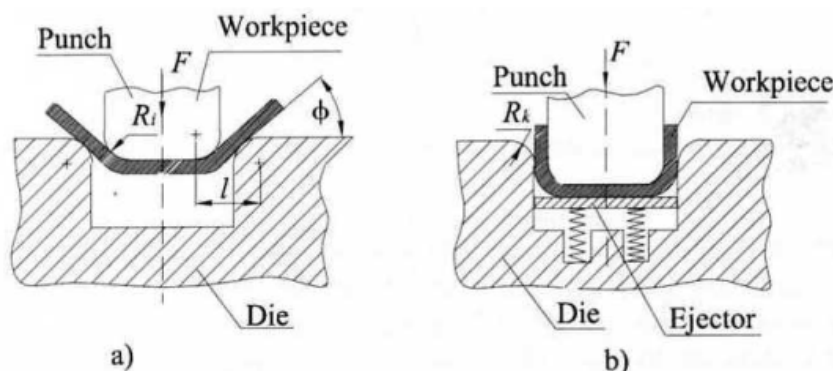
Ohybová síla pro U profil je vyjádřena vztahem:

$$F = \frac{2M}{l} (1 + \sin \varphi) \quad (18)$$

$$\text{kde: } l = R_i + R_k + t \quad (19)$$

v případě, že se ohýbá materiál v ohybnici s vyhazovačem, musí se zvýšit ohybová síla přibližně o 30 procent, takže celková ohybová síla pro U profil je:

$$F_1 = 1,3 \cdot F \quad (20)$$



Obr. 4-2 Ukázka ohýbaného dílce do tvaru U [2]

a) bez vyhazovače, b) s vyhazovačem

4. 2 Ohýbání trubek za studena a za tepla

Trubky se ohýbají za studena ručně a strojně na ohýbacích strojích. Ručně se trubky ohýbají prostým ohnutím přes trn nebo podle šablony. Při ručním ohýbání se zpravidla nevyplňuje vnitřek trubky, a tím dochází k určité deformaci kruhového průřezu. Část trubky, která je na vnější tažené části oblouku se ohýbáním zeslabuje, a tím může dojít ke snížení pevnosti trubky. Aby se to nestalo, je doporučeno nejmenší poloměr ohybu, který musí být alespoň trojnásobkem vnějšího průměru trubky. Takto lze ohýbat ocelové trubky menších průměrů, měděné a hliníkové trubky.

Při ohýbání na ohýbačce se vkládá do trubky ohebný trn, který vyplňuje její vnitřek a zabrání tím deformaci trubky. Při práci nastavíme správnou vzájemnou polohu ohýbací kladky, příložek a trnu. Je-li trn příliš vpředu, trubka se vytahuje a deformuje. Je-li příliš vzadu, vnitřní část oblouku je odtlačována a vytváří se na vnitřní části oblouku příčné zvlnění nebo zvrásnění. Nesmí se též porušit ovalita o více než 7 % vnějšího průměru trubky. Při ohýbání za studena se musí trubka tepelně zpracovat. Zpracovává se normalizačním žháním při teplotě 870°C až 950°C. Není-li možno celou trubku tepelně zpracovat, musí se vyžehat alespoň její ohyby, aby se z nich odstranilo vnitřní pnutí.

Za tepla se trubka ohýbá buď s náplní nebo prázdná. Oblouky mohou být hladké nebo záhybové.

Při ohýbání hladkých ohybů je třeba se přesvědčit, zda trubka není vadná a má-li zaručenou jakost. Trubka se vyplní pískem. Písek musí být dokonale suchý. Kdybychom použili mokřý písek, vznikla by z vody v trubce při ohřevu vodní pára. Tlak páry by mohl vyrazit zátku a mohlo by dojít ke zranění. Pro ohýbání musí být čistý křemičitý písek bez hlíny a vápence. Nejvíce se používá písek říční. Nejlepší zrnění písku je 2 až 3 mm. Pískem se trubky vyplňují buď ručně nebo strojně. Při ručním vyplňování se do trubky, která má zaslepený jeden konec, nasype písek. Trubka se oklepává kladívkem, písek sesedá a tento prázdný prostor se doplňuje. Po úplném zpěchování se trubka uzavře.

Strojní vyplňování pískem se provádí tzv. strojními nebo vibračními oklepávacími stroji. Strojní oklepávačky mají elektricky poháněná kladívka, umístěná v kruhu kokem trubky. Ta klepou do trubky tak dlouho, až písek dokonale sesedne. Vibrační oklepávačky pracují na principu sesedání písku při chvění (vibracích).

Před vlastním ohýbáním se nejprve vyznačí křížkem střed ohybu a udělá se první ryska. Od této rysky se vlevo nanese délka poloměru zakřivení a udělá se druhá ryska. Pro lepší kontrolu se tato vzdálenost rozdělí na polovinu a vyznačí se třetí ryska. Tato vzdálenost, která se rovná polovině poloměru zakřivení, se nanese od první rysky vpravo a udělá se čtvrtá ryska. Tím se celý oblouk ohybu rozdělí na tři stejné díly, z nichž dva jsou vlevo a jeden vpravo od první rysky. Trubku musíme mezi označenými místy stejnoměrně ohřát a při ohýbání musíme dbát na to, aby byl ohyb stejnoměrný a přesný. Rysky na trubce musíme vyznačit po celém obvodu. Nejlépe mastnou křídou nebo alespoň černou máčenou křídou. Křída se v ohni nespálí a při ohřívání zůstávají na obvodě bílé proužky, podle nichž ohýbáme a nahříváme. U trubek normálních jakostí je možno trubku místně chladit vodou za koncovými ryskami. Chlazení vodou nesmíme však použít při ohýbání trubek z legovaných ocelí.

Ohýbá-li se oblouk v úhlu 45° nebo menším, nanáší se od středu ohybu na obě strany jen vzdálenost jedné poloviny poloměru zakřivení. Na trubce jsou jenom tři rysky.

Ohřev se provádí po celém obvodu na teplotu, při které je trubka světle-červená. Trubka musí být stejnoměrně ohřátá. Ohřívá se zpravidla v plynových nebo elektrických a moderně indukčním ohřevem. Trubky menších průměrů lze ohřát eventuálně plamenem.

Záhybové ohýbání se provádí buď s pískovou náplní nebo bez ní. Při záhybovém ohýbání s náplní písku je postup měření a označování stejný jako při hladkém ohýbání za tepla. Navíc je třeba označit celou délku ohybu na určitý počet stejných dílků, který se vyznačí ryskami. Rysky musí být vyznačeny po celém obvodu trubky. Každá ryska znamená střed jednoho záhybu. Poloměr zakřivení u ohýbání se záhyby bývá stejný jako při hladkém ohýbání, tzn. že nejmenší poloměr ohybu je roven trojnásobku průměru potrubí.

Záhybové ohyby se ohřívají zásadně acetyléno-kyslíkovým plamenem. Ohřívá se místně, tj. každá záhyb se ohřívá samostatně.

Při ohýbání bez písku, tzv. způsob na spony, používáme kleští. Jsou to v podstatě čtyřhranné plechy, v nichž jsou půlkruhové díry stejného průměru, jako je průměr ocelové trubky. Ty se nasunou na trubku, aby se v koleně nezplošťovala. Lepších výsledků dosáhneme dvoudílnými rozevíracími sponami, které jsou podobné obručím a jsou z oceli na odlitky.

Záhybová kolena se dělají většinou u trubek větších průměrů nejčastěji od Js 200 výše. Záhybových kolen, popř. kompenzátorů složených ze záhybových oblouků, používáme nejčastěji při dopravě páry nebo horkých plynů. Záhybová kolena nebo oblouky jsou v provozu pružnější než hladké ohyby.

Při ohybu tělesa přes ohybovou hranu vynikají v oblasti ohybu v tahové vnější části napětí tahová σ_p , tlaková σ_o a v tlakové části napětí tlaková σ_p a σ_o . Mimo posunutí neutrální osy obdobně jakou ohybu plechu způsobuje napětí tlakové u tenkostěnných profilů, k nimž patří i trubky, ztrátu stability, při níž se vnější obvod ohybu snaží zaujmout energeticky výhodnější polohu, tedy posunout se k ose ohybu. Tahové a tlakové napětí způsobuje pak zeslabení stěny v tahové části, popř. zesílení v části tlakové. Deformace způsobené napětími σ_p jsou limitující z hledisek pevnostních požadavků kladených na trubku, deformace způsobené napětími σ_o limitují povolenou změnu průřezu trubky [3].

Z hlediska ztráty stability trubky je ohyb v praxi limitován poměrným poloměrem ohybu $\rho = R/D$ (tabelováním pro různé materiály a technologie ohybu) a poměrnou tloušťkou stěny t/D . Čím je tato hodnota vyšší, tím je možno dosáhnout menšího poměrného poloměru ohybu [2].

Pro trubky o $\varnothing 32$ až 76 mm – při ohýbání za studena bez trnu platí:

$$t/D \geq 1/10 \quad R \geq 2,5D$$

$$t/D \geq 1/20 \quad R \geq 5D$$

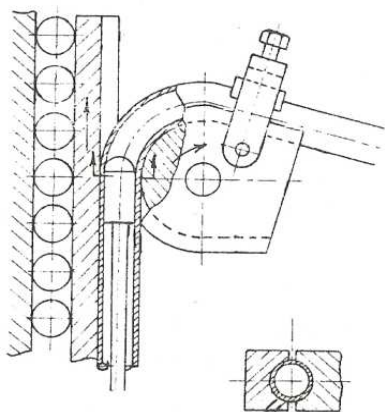
Při ohýbání s pevným trnem za studena platí:

$$t/D \geq 1/10 \quad R \geq 1,5D$$

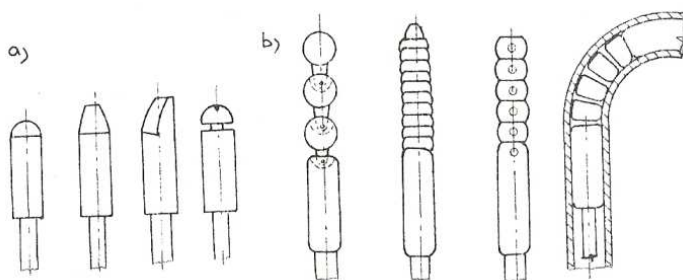
$$t/D \geq 1/20 \quad R \geq 2D$$

$$t/D \leq 1/20 \quad R = 3D$$

Na obr. 4-3 je patrný ohýbací nástroj pro ohyb trubky, kde vnější tvar je formován tvarovou kladkou. Kruhovitost trubky je zajišťována trnem, zasahující do oblasti plastické deformace, který je tvořen buď trnem lžícovým neseným v trubce nebo řetězovým článkovým trnem (viz obr. 4-4). Délka trnu v rovné části je závislá na průměru trubky a pohybuje se od $6D$ u menších průměrů až do délky $3D$ u průměrů 120 mm. V případě kusové výroby je možné trn nahradit lehce tavitelným kovem nebo napěchováním trubky pískem [4].

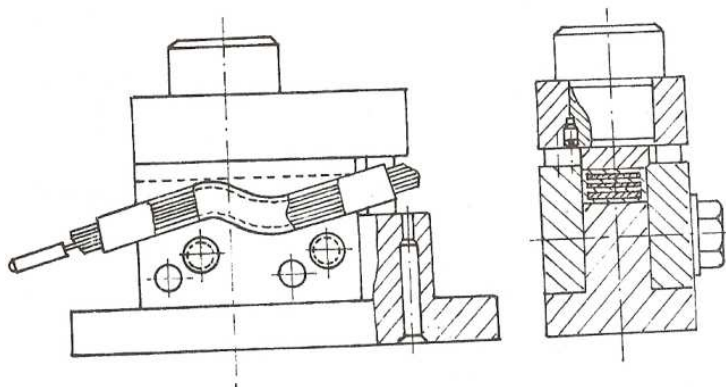


Obr. 4-3 Ohýbání trubek s trnem [4]



Obr. 4-4 Ohýbací trny [4]
a) pevné, b) článkové

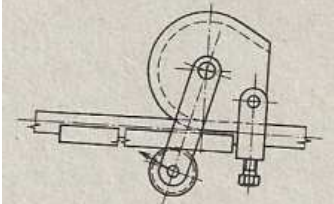
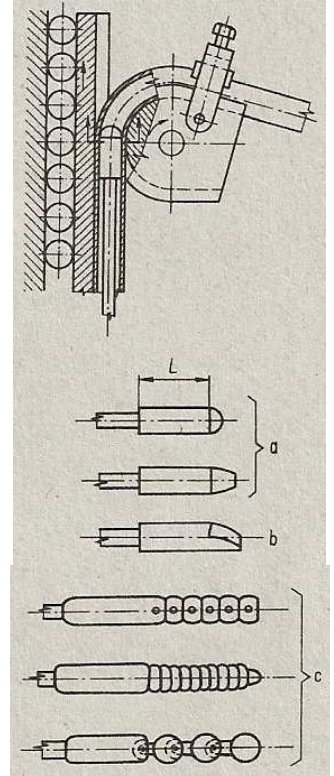
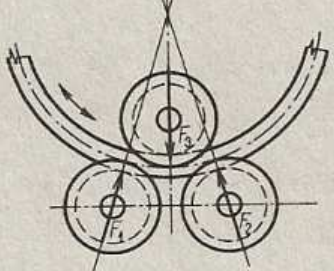
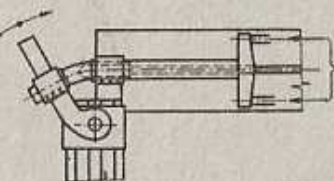
Pro prizmatické trubky se používá klasických ohýbacích nástrojů, opatřených lištovým trnem (viz obr. 4-5), který se před ohnutím zasune do rovné trubky a po ohnutí se jednotlivé lišty vytahují vzhledem k nebezpečí zborcení stojin bočního vedení [4].



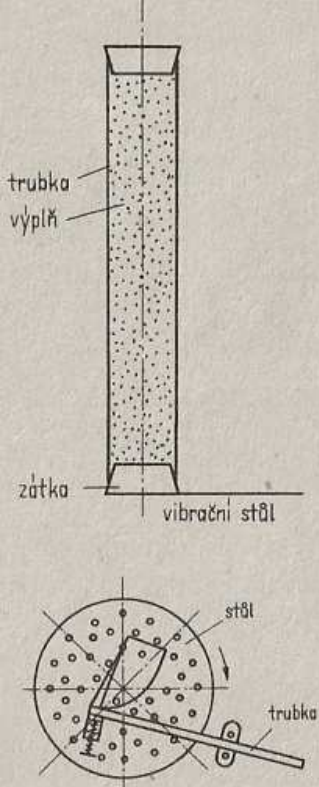
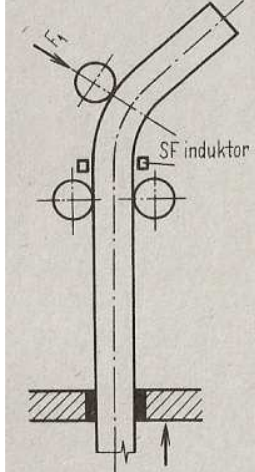
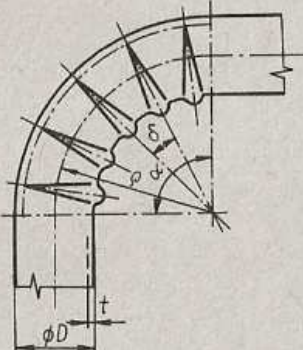
Obr. 4-5 Ohýbací nástroj pro ohnutí prizmatické trubky s vyjímatelným trnem [4]

U ohybu trubek malých průměrů se používá kromě trnu rovněž plnění pískem, olovem, lehce tavitelnými kovy atd. Způsoby ohybu za studena a za tepla jsou uvedeny na tab. 4-1 a 4-2 níže.

Tab. 4-1 Technologie ohýbání trubek za studena [3]

Technologie za studena	Provedení nástroje	Technologický popis
Bez trnu		Proti vybočení trubky je třeba používat segment a lištu bránící vybočení v prodlužované části $D < 160 \text{ mm}$.
S trnem		Tvar trnu: ▪ Kulový (a) ▪ Lžicový (b) ▪ Článekový (c) Vůle mezi trnem a trubicí: ▪ $D = 32 \text{ až } 50 \quad t_t = 1 \text{ mm}$ ▪ $D = 50 \text{ až } 200 \quad t_t = 1 \text{ až } 1,5 \text{ mm}$ ▪ $D > 200 \quad t_t = 1 \text{ až } 3 \text{ mm}$ Délka pracovní části trnu L: ▪ do $D = 30 \text{ mm} \quad L = 6D$ ▪ do $D = 30 \text{ až } 75 \text{ mm} \quad L = 4,5d$ ▪ do $D = 120 \text{ mm} \quad L = 3D$
Zakružováním		$R \geq 6D$ $D < 177 \text{ mm}$
Na lisech		Závisí na t/D $R \geq 10D$ $D < 300 \text{ mm}$
Momentem za působení tlaku		$R \geq 3D$ $D \leq 203 \text{ mm}$

Tab. 4-2 Technologie ohýbání trubek za tepla [3]

Technologie za tepla	Provedení nástroje	Technologický popis
Trubky plněné pískem		Je sníženo nebezpečí vybočení trubky. Tuhost trubky závisí na intenzitě spěchování náplně. Minimální poloměr ohybu D. $R = 0,165D^2/t$ $D = (22 \text{ až } 372) \text{ mm}$
Ohyb trubky tlakem se středofrekvenčním ohřevem		$R \geq 3D$ $D = (108 \text{ až } 325) \text{ mm}$
Ohyb záhybový		Trubka po ohřevu na tvářecí teplotu vybočí, čímž se v úzkém pásu kolem místa ohřevu vytvoří počátek záhybu. Proti vybočení se používá svěrek. Nevýhodou je snížený profil trubky a vysoké vnitřní odpory způsobené záhyby. $R \geq 6D$ $D = (108 \text{ až } 625) \text{ mm}$

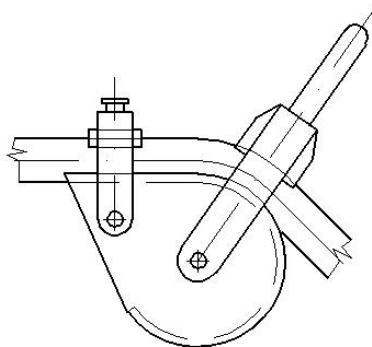
4. 3 Metody ohýbání trubek [5]

Níže jsou uvedeny vybrané metody tvarování trubek ohybem. Tyto metody lze rozdělit to čtyřech základních skupin :

- ruční ohyb v přípravku,
- ohyb s navíjením,
- ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou,
- ohyb s ohřevem.

4. 3. 1 Ruční ohyb v přípravku

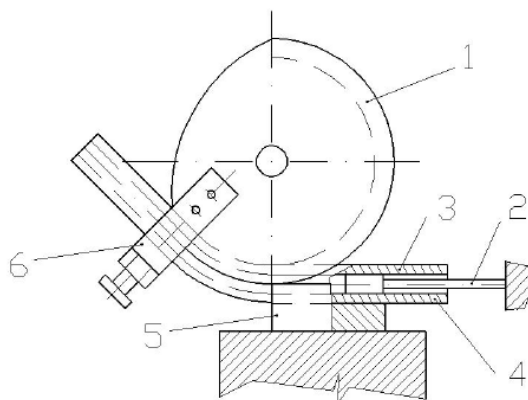
Metoda se používá k ohýbání tenkostěnných trubek do průměru $D < 20 \text{ mm}$ a $R_{min} \geq 2,5 D$. Na obr. 4-6 níže je uvedeno schéma přípravku pro ruční ohýbání v jedné rovině s kladkou s odpovídajícím profilem pro trubku. Trubky se v převážné míře stabilizují „hydraulickou kapalinou“.



Obr. 4-6 Ruční ohyb pomocí přípravku [5]

4. 3. 2 Ohyb s navíjením

Ohyb se realizuje natáčením segmentového kotouče, ke kterému je trubka uchycena upínkou (viz obr. 4-7). Trubka je dotlačena do drážky kotouče lištou, která má rovněž odpovídající profilovou drážku. Lišta je pevná nebo pohyblivá. Při ohybu trubek navíjením se kvalita ohybu zlepší užitím trnů a mechanických ohebných vložek v podobě hustě vinuté pružiny, silonových nebo kovových ohebných vložek s tvarem kulových segmentů.

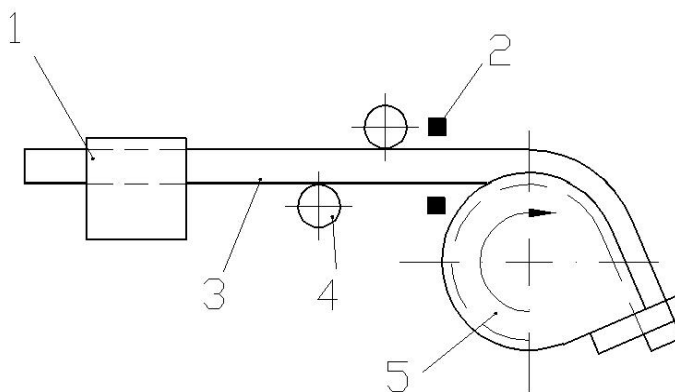


Obr. 4-7 Ohyb s navíjením [5]

1 – segmentový kotouč, 2 – nosná tyč, 3 – trn, 4 – trubka, 5 – lišta, 6 – upínka.

4. 3. 3 Ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou

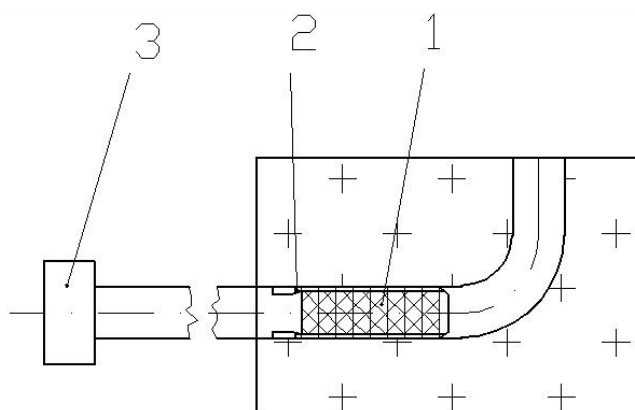
Při konvenčním ohýbání trubek na $R/D = 1,7$ až $1,5$ dochází ke značnému ztenčení tloušťky stěn na vnějším poloměru, který činí kolem 25 %. Uvedený nedostatek kompenzují technologie ohybu za současného tlaku bez ohřevu nebo s ohřevem trubky. Nejlepších výsledků se dosáhne ohybem kombinovaným s tlakem a vysokofrekvenčním ohřevem v úzce vymezené oblasti trubky (viz obr. 4-8).



Obr. 4-8 Navíjení trubky s osovým tlakem a ohřevem [5]

1 – tlačný mechanismus, 2 – vysokofrekvenční ohřev, 3 – trubka, 4 – vodící kotouč, 5 – segmentový kotouč.

Jiný způsob ohýbání krátkých tenkostěnných trubek na velmi ostrý ohyb protlačováním za studena do dělené zápusťky s využitím polytanové výplně ve formě kroužku (viz obr. 4-9). Konec trubky je zčásti uzavřen. Trn působí pouze na polytan, který se rozpěchuje. V důsledku třecích sil je trubka polytanem „nesena“ ve směru pohybu trnu a její průřez je zatěžován tlakovým napětím. Dochází k napěchování stěny, čímž je v ohnisku deformace kompenzováno její ztenčení. Vznik zvlnění na vnitřním poloměru je potlačen vysokým tlakem polytanu. Zvětšení tloušťky stěny o 4 až 30 % se uvádí pro trubku $s/D = 0,052$ a $R/D = 1,5$.



Obr. 4-9 Protlačení trubky s polytanovou výplní [5]

1 – polytanová výplň, 2 – trubka, 3 – trn.

4. 3. 4 Ohyb s ohřevem

Tato metoda je určitým východiskem pro případy, kdy ohyb za studena nepřináší žádné výsledky. Ohřev se provádí kyslíko-acetylenovým plamenem v místě ohybu s větším nahřátím vnitřní strany poloměru. Ohyb se provádí v přípravku, který je vlastně šablonou daného tvaru ohnutého dílce. Dutina trubky se plní suchým sklářským pískem.

Výhody této metody jsou:

- menší ohýbací síla,
- menší hodnoty odpružení.

Mezi nevýhody patří:

- vyšší náklady (ohřev, čištění, tepelné zpracování),
- nižší produktivita práce,
- horší kvalita povrchu,
- náročnější příprava trubky pro ohyb s ohřevem.

5 Technologické parametry při ohýbání

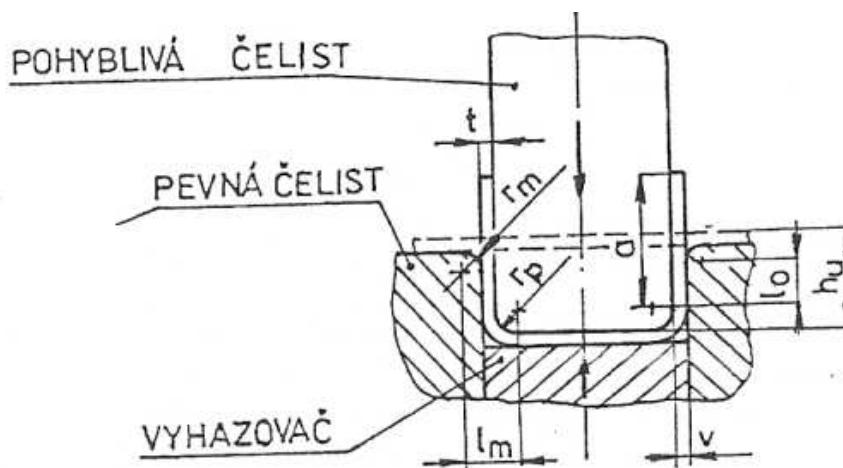
5.1 Ohýbací síla a práce [6]

Výpočet ohýbací síly pro ohyb tvaru U bez přidržovače je následující:

$$F_{ou} = (0,4 * R_m * t^2 * b) / l_m \quad [N] \quad (21)$$

kde F_{ou} ohýbací síla pro ohyb tvaru U [N]
 b součet všech šířek ohybů [mm]
 l_m rameno, na kterém působí síla ohybu F_{ou} [mm]
 $l_m = r_m + 1,2t + r_p$ [mm]. (22)

Při ohýbání s přidržovačem je nutno ohýbací sílu zvětšit o sílu přidržovače F_p a při ohýbání s kalibrací počítat s celkovou silou F_{cu} .



Obr. 5-1 Ohýbací síla a práce potřebná k ohýbání do tvaru U [6]

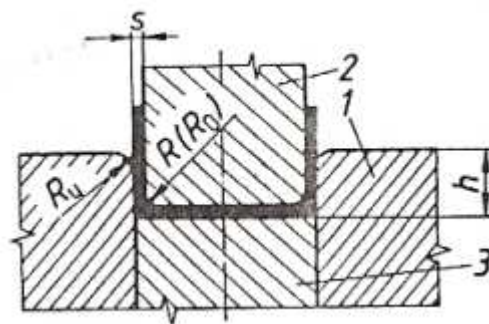
Výpočet práce potřebné k ohýbání do tvaru U včetně kalibrace je následující:

$$A_{ou} = (m * F_{cu} * h_u) / 1000 \quad [J] \quad (23)$$

kde A_{ou} práce pro ohyb U [J]
 F_{cu} celková síla potřebná k ohybu do tvaru U a kalibraci [N]
 m součinitel respektující průběh síly, $m = 1/6$
 h_u pracovní zdvih [mm]
 $h_u = l_o + r_p + r_m + t$ [mm]. (24)

5. 2 Poloměr ohybu neutrální vrstvy a stanovení odpružení pro U ohyb [7]

Poloha neutrální vrstvy je důležitá pro stanovení rozměrů výchozího polotovaru pro ohýbání. U velkých poloměrů ohybu ($R/s \geq 12$), kdy dochází k malým pružně plastickým deformacím, lze předpokládat, že neutrální vrstva prochází uprostřed tloušťky polotovaru. Poloměr ohybu $R_p = R + s/2$. (25)



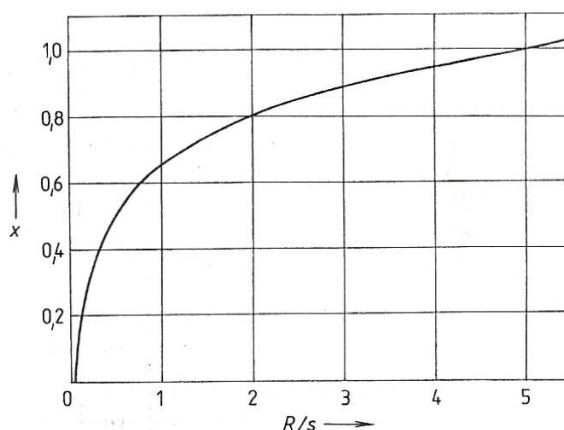
Obr. 5-2 Ohýbání – tvar U [7]

1 - pevná část, 2 - posuvná část, 3 –vyhazovač.

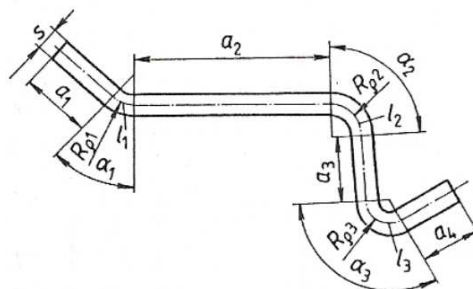
Při ohýbání s malými poloměry ohybu ($R/s < 6$) je ohyb doprovázen změnou tloušťky, změnou průřezu a posuvem neutrální vrstvy na stranu stlačovaných vláken:

$$R_p = R + (s/2) * x \quad (26)$$

kde x je součinitel posunutí neutrální vrstvy viz obr. 5-3 a 5-4 níže.



Obr. 5-3 Závislost součinitele posunutí neutrální vrstvy x na R/s [7]



Obr. 5-4 Stanovení délky výchozího polotovaru při ohýbání [7]

Délka polotovaru pro součást vyráběnou ohýbáním je dána součtem délek oblouků neutrální vrstvy v úsecích ohybů a délek ramen:

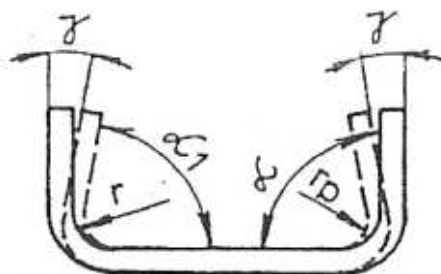
$$L = \sum l + \sum a \quad (27)$$

Pro délku oblouku neutrální vrstvy platí:

$$l = \frac{\pi \alpha R_e}{180} = \frac{\pi \alpha}{180} \left(R + \frac{s}{2} x \right) \quad (28)$$

5. 3 Odpružení při ohýbání

Přestane-li na ohýbanou součást působit ohýbací síla, projevuje se snaha materiálu vrátit se do původního tvaru, a to o úhel pružení. Toto se projeví zvětšením úhlu otevření α_1 o úhel pružení γ a zvětšením poloměru ohybu r_p na r [6].



Obr. 5-5 Odpružení při ohýbání do tvaru U [6]

Velikost odpružení je ovlivněna :

- mechanickými vlastnostmi ohýbaného materiálu,
- poměrem poloměru ohybu k tloušťce materiálu r/t (čím menší r/t , tím menší pružení),
- velikostí úhlu otevření α_1 ,
- velikostí měrného tlaku při kalibraci,
- seřazením stroje,
- vůlí mezi činnými částmi ohýbadla,
- konstrukčním řešením ohýbadla [6].

Pro přibližný výpočet úhlu pružení na konci pracovního zdvihu ohýbadla při U ohýbání bez kalibrace platí tento vztah:

$$\text{tg } \gamma = 0,75 * (I_m * R_e) / (k * s * E), \quad (29)$$

kde k součinitel podle tab. 5-1
 I_m rameno ohybu; $I_m = R_u + R_o + 1,2s$. (30)

Tab. 5-1 Součinitel k pro výpočet úhlu odpružení [7]

Poloměr R/s	0,10	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
Součinitele $1/k$	0,68	0,65	0,62	0,58	0,54	0,53	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,5	0,5

Přibližnou informativní hodnotu úhlu otevření a poloměru zaoblení r_p při ohýbání bez kalibrace je možno vypočítat ze vzorců :

$$\alpha = 180 - K * (180 - \alpha_1) \quad [^\circ] \quad (31)$$

$$r_p = K * (r + 0,5 * t) - 0,5 * t \quad [\text{mm}] \quad (32)$$

kde K součinitel podle tab. 5-2
 α_1 úhel otevření před odpružením $[^\circ]$
 α úhel otevření po odpružení ve stupních $[^\circ]$
 r_p poloměr ohybu před odpružením [mm]
 r poloměr ohybu po odpružení [mm]
 t tloušťka materiálu [mm].

Tab. 5-2 Součinitel K pro výpočet úhlu odpružení a poloměru r_p [6]

Materiál	Součinitel K pro	
	$r/t = 1$	$r/t = 10$
Ocel vhodná pro tváření	0,99	0,97
Korozivzdorná ocel	0,96	0,92
Hliník A1 99,5 měkký	0,99	0,98
Hliník Al 99,5 polotvrdý	0,98	0,93
Hliník Al 99 měkký	0,99	0,98
Hliník Al 99 polotvrdý	0,98	0,92
Slitina AlMn měkká	0,99	0,97
Slitina AlMn polotvrdá	0,98	0,90
Slitina AlMg2 měkká	0,985	0,96
Slitina AlMg2 polotvrdá	0,98	0,88
Slitina AlMg3 měkká	0,985	0,94
Slitina AlMg3 polotvrdá	0,98	0,90
Mosaz Ms 70, Ms 68	0,975	0,915

5. 4 Rozměrové a tvarové nepřesnosti po ohybu trubky do U tvaru

Optimální technologie ohybu trubek vyžaduje dodržení podmínky $s/D \geq 0,1$ a $R_{min}/D \geq 3$, kde s je výchozí tloušťka trubky, D vnější průměr ohýbané trubky, R_{min} minimální poloměr ohybu, který se stanoví výpočtem na základě empirických vztahů $R_{min} = f(K, D, \Delta s)$ [8].

V případě nedodržení technologické zásady pro ohýbání, a to zejména doporučené hodnoty s_0/D nebo R_{min} může docházet ke vzniku výraznějších defektů:

- značné ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu,
- značné zploštění kruhového průřezu,
- zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu,
- odpružení trubky po ohybu – změna poloměru či úhlu ohybu [5].

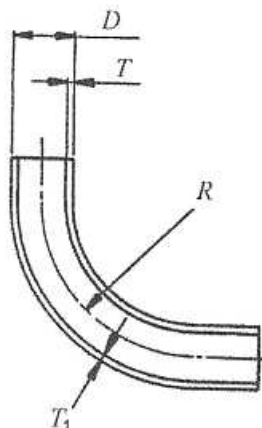
5. 4. 1 Ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu [5]

Maximální přípustné ztenčení trubek nesmí překročit 25%. Jde zejména o trubky např. instalačních systémů, které bývají vystaveny značnému zatížení

vnitřním tlakem. Ztenčování stěny trubky je v těchto případech velmi obtížné potlačit na přijatelnou míru, zvláště při užití běžných způsobů ohybu, a to i při užití výplní.

Pro stanovení minimální tloušťky stěny (s_{min}) lze použít vztah:

$$s_{min} = s_0 * [1 - (D - s_0) / 2 * R_0] \quad (33)$$



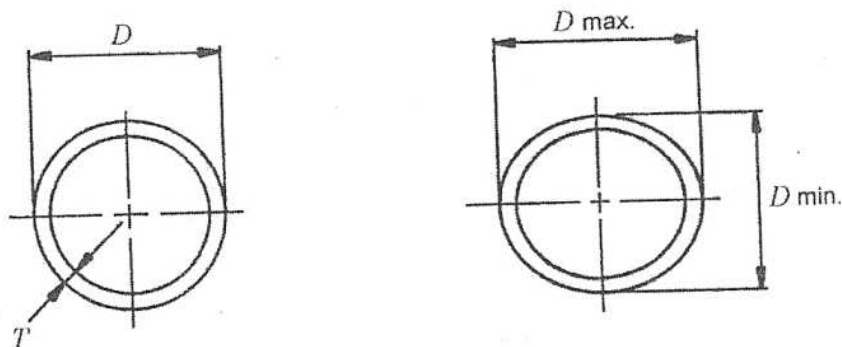
Obr. 5-6 Ztenčení při ohýbání do tvaru U [9]

T – tloušťka stěny trubky, R – poloměr ohybu, D – vnější průměr trubky, T_1 – minimální tloušťka stěny po ohybu

Jednou z metod, kterou lze toto ztenčení eliminovat, je metoda ohybu za současného tlaku. V tomto případě je nutný nárůst tloušťky až o 6%.

5. 4. 2 Zploštění kruhového průřezu [9]

Tento defekt je možné sledovat pomocí koeficientu ovality K_0 , který hodnotí změnu kruhového průřezu v eliptický tvar (viz obr. 5-7).



Obr. 5-7 Zploštění po ohybu trubky [9]

Koeficient ovality K_0 lze vypočítat ze vztahu:

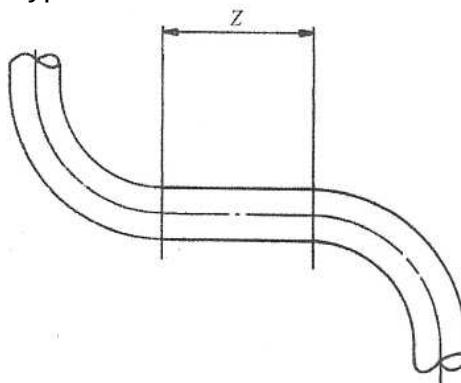
$$K_0 = [(D_{max} - D_{min}) / D] * 100 \quad [\%] \quad (34)$$

D_m je průměr trubky ve směru zploštění

Jde o smluvní vyjádření ovality dle technických předpisů. Přípustné hodnoty zploštění se kontrolují průchodem normované kuličky. Zplošťování trubek je možné do určité míry potlačit užitím výplní.

5. 4. 3 Zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu [5]

Zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru je projevem ztráty stability poměrně tenké stěny (viz obr. 5-8). Vlny jsou nežádoucí u těch dílců, které jsou vystaveny vibracím a extrémním změnám provozních tlaků, poněvadž mohou být zdrojem únavových trhlin. Jako v případě zplošťování jsou pro potlačení vzniku vln vhodné různé výplně.



Obr. 5-8 Zvlnění trubky po ohybu [9]

5. 4. 4 Odpružení trubky po ohybu [5]

Případné nedosažení požadovaného zaoblení v důsledku odpružení trubky po ohybu, a to např. změna poloměru či úhlu ohybu trubky, lze považovat za defekt. Odpružení je způsobeno plastickými vlastnostmi materiálu.

Hodnota zbytkového poloměru (R_{zb}) je dán vztahem:

$$R_{zb} = R_0 / (1 - (M * R_0) / E * I) \quad (35)$$

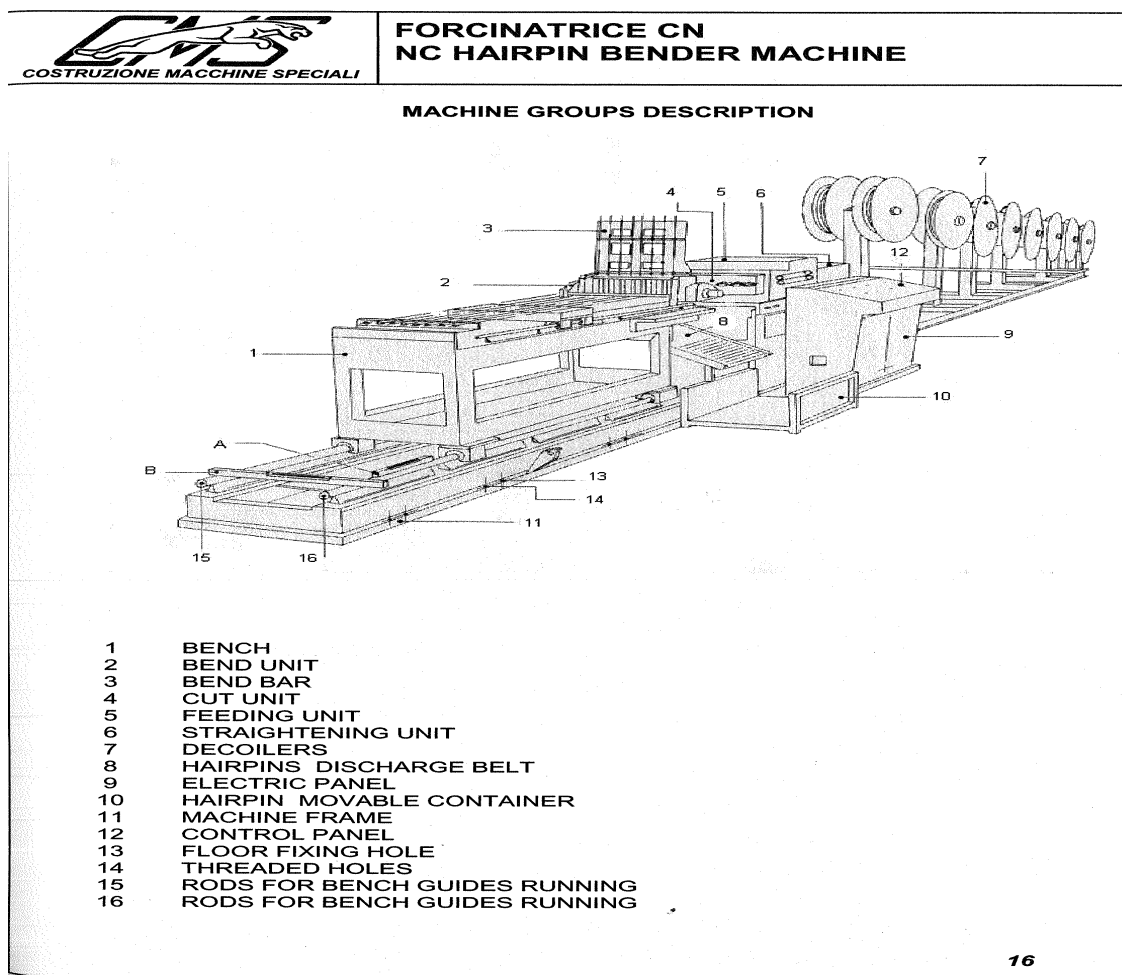
Se změnou poloměru souvisí také změna úhlu ohybu trubky $\Delta\alpha$. Stanoví se z podmínky, že délka neutrálního vlákna zůstane po odpružení nezměněna.

6 Zařízení pro ohyb trubek

Na obr. 6-1 a 6-2 je uveden stroj včetně jeho popisu pro sériovou výrobu měděných U oblouků od Italské firmy CMS specializující se na Stroje pro klimatizační zařízení.



Obr. 6-1 Ohýbací stroj firmy CMS



Obr. 6-2 Schéma a popis ohýbacího stroje firmy CMS

7 Návrh ohýbacího přípravku

7. 1 Návrh materiálu a jeho vlastnosti

Při výrobě klimatizačních komponentů se výhradně používá potravinářská měď vyráběná dle dodavatelského standardu Cuproclima ve shodě s evropskou normou EN 12735-2. Jejíž část požadavků, a to hlavně chemické složení trubky z Cu a mechanické vlastnosti trubky z Cu je uvedena níže. Tolerance tloušťky stěny trubky z Cu a tolerance ovality je uvedena v příloze č. 4.

Tab. 7-1 Chemické složení trubky z Cu [10]

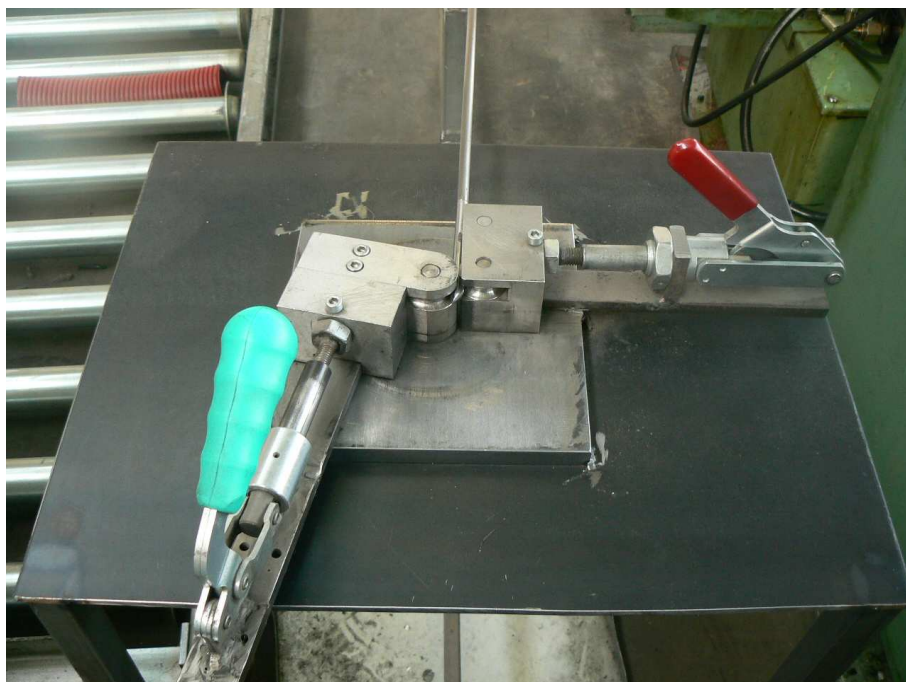
Standard	Materiál	Cu (+Ag) % min.	P %	Bi % max.	Pb % max.
Cuproclima	CU-DHP	99,90	0,015 - 0,040	0,001	0,003
ASTM	C 12200	99,90	0,015 – 0,040	-	-
EN 12735-2	CU-DHP	min. 99,90	0,015 – 0,040	-	-

Tab. 7-2 Mechanické vlastnosti trubky z Cu [10]

Vlastnosti	Materiál	Mez kluzu, $R_{p0,2}$ N/mm ²	Pevnost tahu R_m min. N/mm ²	Tažnost A min. %	Průměrná zrnitost mm
Lehce žíhaný	Y040	40 – 90	220	45	0,015 – 0,035
EN 12735-2	Y040	40 – 90	220	45	0,015 – 0,040
Lehce žíhaný	Y035	35 – 80	210	48	0,030 – 0,060
EN 12735-2	Y035	35 – 80	210	40	0,030 – 0,060

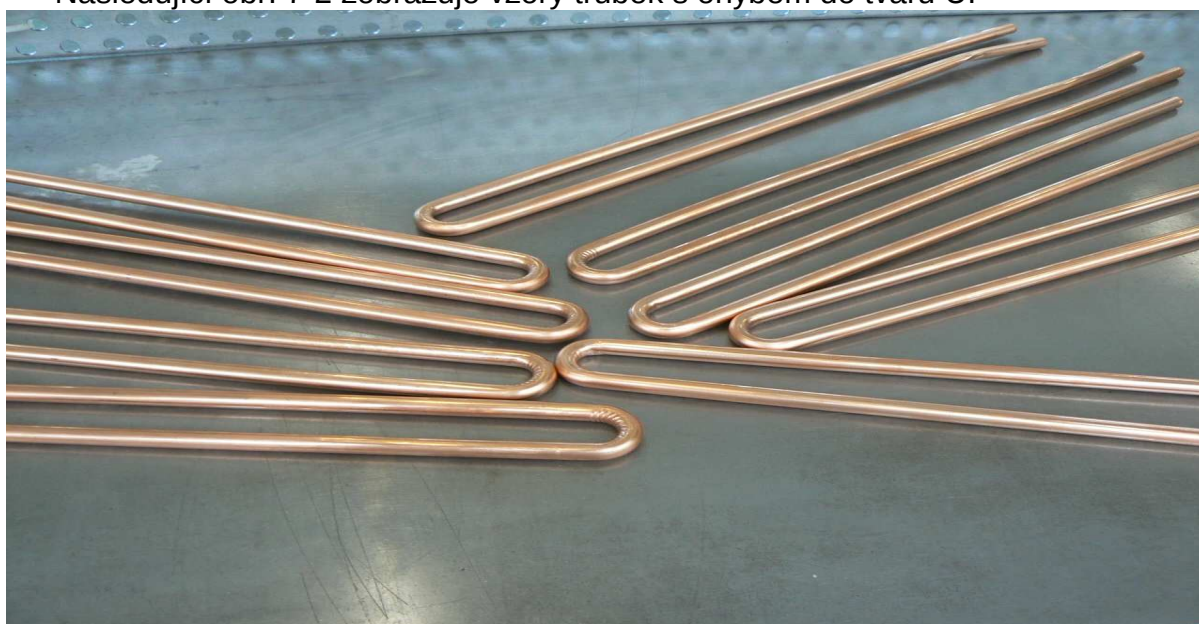
7. 2 Navržený přípravek, jeho popis a schéma

Dle zadání byl vytvořen schematický náčrtek přípravku pro ruční ohýbání s pevným trnem. Na tomto náčrsku (viz Příloha č. 1) je znázorněn jednoduchý ruční přípravek, který se skládá z několika částí. Základním prvkem tohoto přípravku je stůl, na kterém jsou připevněny ohybové elementy (1). Ve středu stolu je připevněn posouvací pevný trn (11). Do tohoto středu se prizmaticky k zajištění ohýbané trubky posouvá po vodicím suportu (3) tvarová kladka (5). Vlastní ohyb se provádí pomocí ohýbadla, které se skládá z ohybnice (6), ohybové čelisti (12) a páky. Připevnění ohybnice zajišťuje čep (7) (viz obr. 7-1).



Obr. 7-1 Ohýbací přípravek

Následující obr. 7-2 zobrazuje vzory trubek s ohybem do tvaru U.



Obr. 7-2 Vybrané vzory trubek z Cu s ohybem do tvaru U

8 Tahové zkoušky měděného potrubí

8. 1 Příprava a průběh tahové zkoušky

Mechanické tahové zkoušky byly provedeny na měděném potrubí o průměru 9,52 mm a tloušťky stěny 0,28 mm, které se připravily v mechanické dílně v celkovém počtu 30 ks. Broušením na čele se odstranilo sevření trubek po řezání, pomocí vrtáku se provedlo odjehlení a nakonec došlo k úpravě konců trubek v délce 30 mm. Poté se zaslepily konce trubek odpovídajícím průměrem čepů o délce 29 mm, které měly upravené sražené hrany 0,5 mm x 45°. Následně byly všechny vzorky podrobeny vizuální a mikroskopické kontrole, zda nejsou po zalisování a na povrchu přítomny nežádoucí defekty, a to v podobě zborcení, promáčknutí, nepříznivé změny v kruhovitosti či jiné poškození povrchu trubky. Nakonec byly oba konce zkušebních trubek popsány zkratkou příslušného dodavatele. Příprava pro tahovou zkoušku byla v souladu s ČSN EN 10002-1.

Tahová zkouška probíhala za těchto podmínek:

- zkušební stroj TIRA TEST 2300,
- silový rozsah 10 kN,
- rychlost pohybu příčnicku 3,6 mm/min,
- rozměry zkoušené tyče TR $\varnothing$ 9,52 x 0,28-50 mm,
- teplota v místnosti 22°,
- počet vzorků celkem 15 ks / vždy po 5 ks od jednotlivých dodavatelů.

8. 2 Výsledky tahových zkoušek

Mechanická tahová zkouška byla provedena u 15 ks připravených vzorků, a to vždy 5 ks vzorků od jednotlivých dodavatelů z Finska, Německa a Francie. Příslušná zkratka dodavatelů byla:

- **PF** 1 až 5 – dodavatel Cupori Finland,
- **KME** 1 až 5 – dodavatel KME France SAS,
- **W** 1 až 5 – dodavatel Wieland z Německa.

Zjištěné experimentální hodnoty s výpočtem střední hodnoty u vybraných parametrů, a to R_m (mez pevnosti), $R_{p0,2}$ (mez skluzu) a A_{80} (tažnost) uvádějí následující tabulky 8-1, 8-2 a 8-3.

Tab. 8-1 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Finsko

Označené vzorky	Parametry		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
PF1	84	250	28,5
PF2	88	245	23,9
PF3	82	247	26,5
PF4	82	245	22,5
PF5	94	248	25,0
Průměrná hodnota	86	247	25,8
Atesty*	$R_{p0,2} = 62-65$	$R_m = 243-257$	$A_{10} = 49$

(vlastní zpracování) * Atesty přiložené v příloze 2.

U vzorků dodavatele z Finska byly vypočteny tyto střední hodnoty: mez pevnosti R_m v rozmezí od 243 do 257 MPa, mez kluzu $R_{p0,2}$ v rozmezí 62 až 65 MPa a tažnost A_{80} ve výši 49 %.

Tab. 8-2 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Francie

Označené vzorky	Parametry		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
KME1	94	239	19,4
KME2	104	248	25,0
KME3	104	249	27,2
KME4	96	248	28,4
KME5	99	248	26,7
Průměrná hodnota	99,4	246,4	25,3
Atesty*	$R_{p0,2} = 50-90$	$R_m = 230$	$A_{50} = 40-60$

(vlastní zpracování) * Atesty přiložené v příloze 2.

U vzorků dodavatele z Francie byly vypočteny tyto střední hodnoty: mez pevnosti R_m ve výši 230 MPa, mez kluzu $R_{p0,2}$ v rozmezí 50 až 90 MPa a tažnost A_{80} v rozmezí 40 až 60 %.

Tab. 8-2 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Německo

Označené vzorky	Parametry		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
W1	94	235	21,4
W2	98	239	25,0
W3	92	229	19,8
W4	92	237	23,2
W5	92	224	16,5
Průměrná hodnota	93,6	232,8	21,2
Atesty*	$R_{p0,2} = 62-68$	$R_m = 239-243$	$A = 51,5-57,5$

(vlastní zpracování) * Atesty přiložené v příloze 2.

U vzorků dodavatele z Německa byly vypočteny tyto střední hodnoty: mez pevnosti R_m v rozmezí od 239 až 243 MPa, mez kluzu $R_{p0,2}$ v rozmezí 62 až 68 MPa a tažnost A_{80} ve rozmezí 51,5 až 57,5 %.

V příloze 3 jsou také uvedeny záznamy tahových zkoušek Cu trubek stejných rozměrů s uvedenými parametry meze pevnosti v tahu R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$ a hodnot tažnosti A_{80} v %.

9 Maziva pro dělení a ohýbání tenkostěnných trubek

a) dělení – po prováděných zkouškách bylo dosaženo kladného výsledku u emulze Zubora 50 H plus dodané od firmy Zeller+Gmelin. Tato emulze oproti předchozí emulzi firmy Merlin plus zamezila tvorbě fleků na potrubí a byl taktéž zredukován nepříjemný zápach.

b) ohýbání - k usnadnění ohybu do tvaru U je potřeba provést aplikaci maziva na trn. Mazivo používané pro ocelové trubky včetně austenitických antikoročních trubek s názvem presspate od firmy Klüber se neosvědčila, a to z důvodu nutnosti odstraňování maziva v případě mazání trnů pro tenkostěnné trubky z mědi. Proto bylo navrženo pro U ohyb tenkostěnných Cu trubek mazivo na bázi odpařovacích olejů od firmy OAK.

Tab. 9-1 Fyzikální vlastnosti maziva od firmy OAK

OAK mazivo	Jednotka	ASTM metoda	Hodnoty					
			4205A- FR	4210A- FR	4215A- FR	4220A- FR	4230A- FR	4250A- FR
Objem hmoty	kg/m ³	D 1298	764,0	768,0	772,0	776,0	784,0	805,0
Viskozita	mm ² /s	D 445	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Bod varu	°C	D 86	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
Teplota vznícení	°C	D 93	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0
Bod tuhnutí	°C	D 97	<-50,0	<-50,0	<-50,0	<-50,0	<-50,0	<-50,0
Tlak par při 37,8°C	mbar	D 323	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Poznámka: Uváděné informace v tabulce jsou průměrnými hodnotami, neměly by být brány jako garance, mohou být změněny bez upozornění.

10 Technicko-ekonomické zhodnocení

Stávající strojní zařízení pro ohýbání trubek je zaměřeno pro sériovou výrobu. Jedná se o 100 tisícové série, kde v případě výroby vzorků nebo výroby potrubí sloužící na opravu klimatizačních výměníků, nelze efektivně vyrobit tyto kusové dílce a dochází k časovým ztrátám při nastavení stroje. Dále se zvyšuje jeho poruchovost při každém jeho nastavení. Nejhlavnější důvod je ztráta kapacity na stroji a tím celková ztráta konkurence schopnosti.

Navržený ohýbací přípravek umožní ekonomický způsob oprav výměny měděných trubek a řešení defektů hospodárnějším způsobem. Nebude docházet k brzdění výroby a je možné přípravek přímo umístit u zákazníka a provést opravu. V tomto ohledu je jeho největší přednost.

11 Závěr

Bakalářská práce pojednává o problematice ohýbání měděné tenkostěnné trubky o vnějším průměru 9,525 (3/8 inch) a tloušťce stěny 0,28 mm, která je vyrobena z potravinářské mědi dle dodavatelského standardu CUPROCLIMA a je v souladu s evropskou normou EN 12735-2.

U 15 ks vzorků měděných tenkostěnných trubek byla provedena mechanická tahová zkouška, a to vždy 5 ks vzorků od jednotlivých dodavatelů z Finska (Cupori Finland), Německa (Wieland) a Francie (KME France SAS). V rámci tahové zkoušky byly zjišťovány u vzorků jednotlivých dodavatelů experimentální hodnoty meze pevnosti R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A_{80} .

Výsledné hodnoty vybraných parametrů (R_m , $R_{p0,2}$ a A_{80}) byly u vzorků PF a KME blízko u sebe, průběhy záznamů tahových zkoušek jsou si podobné. Vzorky W od německého dodavatele mají mez pevnosti v tahu nižší než vzorky ostatních dodavatelů a rovněž mají nižší pružnost. V tomto případě jsou průběhy tahových zkoušek odlišné. Žádný z dodavatelů není dle výsledků tahových zkoušek ideální, relativně nejlepší výsledek tváření tenkostěnných trubek z Cu do U-ohybu s nejvyšší mírou pravděpodobnosti dají z pohledu kvality povrchu, tedy bez zvlnění a trhlin, měděné trubky označené PF od dodavatele Cupori Finland.

Na základě vzájemného porovnání výsledků tahových zkoušek byl navržen ohýbací přípravek pro zadaný rozměr Cu trubek. Navržený ohýbací přípravek umožní ekonomický způsob oprav výměny měděných trubek a řešení defektů hospodárnějším způsobem.

V poslední části bakalářské práce byla věnována pozornost mazivu, které bylo odzkoušeno a následně vybráno odpařovací mazivo firmy OAK.

Seznam použitých označení – symbolů

a	mm	tloušťka nože, délka ramen
s	mm	tloušťka stěny trubky
b	mm	šířka hrotu nože
R	mm	poloměr nože
v	m*min ⁻¹	střížná rychlost
r	mm	poloměr ohybu
M	mm ⁴	moment ohybu
d	mm	vnější průměr trubky
R _e , R _{p0,2}	MPa	Smluvní mez kluzu
W ₀	mm ³	moment odporu
S	mm ³	statický moment
E	MPa	modul pružnosti v tahu
R _i max (min)	mm	max. (min) poloměr ohybu
F	N	ohybová síla
t	mm	tloušťka stěny
l	mm	délka
σ _p	MPa	napětí tahová
σ _e	MPa	napětí tlaková
F _{ou}	N	ohýbací síla
b	mm	součet všech šířek ohybů
r _p	mm	poloměr ohybu před odpružením
R _m	MPa	mez pevnosti
F _p	N	síla přidržovače
F _{cu}	N	celková síla
A _{ou}	J	práce pro ohyb
m		součinitel síly
h _u	mm	pracovní zdvih
x		součinitel posunutí neutrální vrstvy
α ₁	°	úhel otevření
γ	°	úhel odpružení
k	-	součinitel pro výpočet úhlu odpružení
s _{min}	mm	min tloušťka stěny
t ₁	mm	min tloušťka stěny po ohybu
K ₀	%	koeficient ovality
D _{max} (min)	mm	max či min průměr trubky
R _{zb}	mm	zbytkový poloměr

Seznam obrázku a tabulek

Obr. 2-1 Silové poměry a střížná síla	9
Obr. 3-1 Nástroj pro stříhání tenkostěnných trubek – vertikální způsob.....	10
Obr. 3-2 Princip zařízení ke stříhání tenkostěnných trubek – horizontálně vertikální způsob.....	11
Obr. 3-3 Princip a schéma nástroje pro stříhání trubek a uzavřených tenkostěnných profilů.....	12
Obr. 3-4 Nástroj pro stříhání trubek bez odpadu	12
Obr. 3-5 Stříhání trubek kotoučovými noži	13
Obr. 3-6 Stříhání trubek s otočným trnem	13
Obr. 3-7 Stříhání trubek polyuretanem	15
Obr. 4-1 Schéma ohybu nosníku	16
Obr. 4-1 Schéma ohybu nosníku	16
Obr. 4-2 Ukázka ohýbaného dílce do tvaru U	18
Obr. 4-3 Ohýbání trubek s trnem	21
Obr. 4-4 Ohýbací trny	21
Obr. 4-5 Ohýbací nástroj pro ohnutí prismatické trubky s vyjímatelným trnem	21
Obr. 4-6 Ruční ohyb pomocí přípravku	24
Obr. 4-7 Ohyb s navíjením	24
Obr. 4-8 Navíjení trubky s osovým tlakem a ohřevem	25
Obr. 4-9 Protlačení trubky s polytanovou výplní	25
Obr. 5-1 Ohýbací síla a práce potřebná k ohýbání do tvaru U	27
Obr. 5-2 Ohýbání – tvar U	28
Obr. 5-3 Závislost součinitele posunutí neutrální vrstvy x na R/s	28
Obr. 5-4 Stanovení délky výchozího polotovaru při ohýbání	28
Obr. 5-5 Odpružení při ohýbání do tvaru U	29
Obr. 5-6 Ztenčení při ohýbání do tvaru U	31
Obr. 5-7 Zploštění po ohybu trubky	31
Obr. 5-8 Zvlnění trubky po ohybu	32
Obr. 6-1 Ohýbací stroj firmy CMS	33
Obr. 6-2 Schéma a popis ohýbacího stroje firmy CMS	33
Obr. 7-1 Ohýbací přípravek.....	35
Obr. 7-2 Vybrané vzory trubek z Cu s ohybem do tvaru U.....	35
Tab. 4-1 Technologie ohýbání trubek za studena	22
Tab. 4-2 Technologie ohýbání trubek za tepla	23
Tab. 5-1 Součinitel k pro výpočet úhlu odpružení	29
Tab. 5-2 Součinitel K pro výpočet úhlu odpružení a poloměru r_p	30
Tab. 7-1 Chemické složení trubky z Cu	34
Tab. 7-2 Mechanické vlastnosti trubky z Cu	34
Tab. 8-1 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Finsko.....	36
Tab. 8-2 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Francie	37
Tab. 8-2 Výsledek tahové zkoušky – dodavatel Německo.....	37
Tab. 9-1 Fyzikální vlastnosti maziva od firmy OAK	38

Seznam použité literatury

- [1] NOVOTNÝ J., LANGER Z. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 216 s. L 13-B3-IV-41/22674.
- [2] BOLJAVOVIČ, V. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 1. st. ed. New York: Industrial Press. 2004. 219 p. ISBN 0-8311-3182-9.
- [3] ELFMARK J. A KOL. *Tváření kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1992. 528 s. ISBN 80-03-00651-1.
- [4] KOTOUČ, J., ŠANOVEC, J., ČERMÁK, J., MÁDLE, L. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
- [5] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, J. *Technologie tváření plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [6] ČSN 22 7340. *Tvářecí nástroje. Ohýbadla. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [7] KŘÍŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka. Tváření*. 1. vyd. Praha: Scientia 1998. sv. 8. 255 s. ISBN 80-7183-054-2.
- [8] ŽÁK, J., SAMEK, R., BUMBÁLEK, B. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. Brno: VUT 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.
- [9] ČSN EN 3658. *Letectví a kosmonautika – ohyby trubek používaných v motorech – Konstrukční norma*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 12 s.
- [10] CUPROCLIMA. *Quality Standard for ACR Copper Tubes in LWC*. Wieland.

Seznam příloh

Příloha 1 – Návrh výkresové dokumentace ohýbacího přípravku

Příloha 2 – Atesty dodavatelů z Finska, Francie a Německa

Příloha 3 – Záznamy tahových zkoušek Cu trubek

Příloha 4 – Dodavatelský standard Cuproclima, strana 6-7.